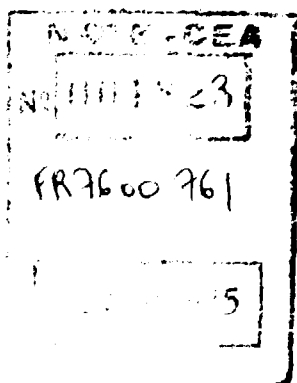


CEA. N. 1823

LE DETECTEUR NEUTRONIQUE AU GRAPHITE "G. A. M. I. N. "

Etudes et applications à la dosimétrie des dommages radio-induits

M. CANCE
J. P. GENTHON
G. MICAUD*
L. SALON



Janvier 1975

R E S U M E

Le détecteur au graphite dit G. A. M. I. N. est un détecteur particulièrement bien adapté à la détermination des fluences caractéristiques des dommages radio-induits dans les matériaux de pile. Il est décrit en détail, ainsi que sa mise en oeuvre.

Il permet la mesure directe de l'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} = (flux graphite)/(flux nickel). On donne la récapitulation de toutes les valeurs ainsi mesurées à ce jour à OSIRIS, et dans la majeure partie des réacteurs d'essais d'Europe (H_2O , D_2O , G et rapide).

Enfin, on montre comment, outre les fluences de dommage graphite, le détecteur G. A. M. I. N. permet de caractériser les fluences de dommages relatives à d'autres corps.

The so-called G. A. M. I. N. graphite detector is well suited to determining fluences of radiation damage in reactor materials.

It enables the measurement of the index ϕ_G / ϕ_{Ni} = (graphite damage flux) (nickel flux). Measurements have been performing in OSIRIS and the main part of testing reactors in Europ (H_2O , D_2O , G and fast) All measurements results are recapitulated here.

It is shown how G. A. M. I. N. can determine not only graphite fluxes, but by a simple interpretation the damage fluxes typical of other materials.

TABLE DES MATIERES

Résumé	1
Table de matières	2
Notations employées	3
I - INTRODUCTION - PRESENTATION	4
II - DESCRIPTION DU DOSIMETRE G.A. M.I.N. - MESURES ET MODE D'EMPLOI ..	12
II.1 - Présentation du dosimètre G.A. M.I.N. et grandeurs mises en oeuvre	12
II.2 - Les mesures	15
II.3 - Guide d'emploi du dosimètre G.A. M.I.N.	20
III - LOI DE VARIATION DE LA REPOSE DU DOSIMETRE G.A. M.I.N. - EFFETS DE TEMPERATURE ET DE DOSE - PRECISION DES MESURES	23
IV - ETALONNAGE DE LA REPOSE G.A. M.I.N. - INDICES DE SPECTRES ET NOMBRE DE DEPLACEMENTS ATOMIQUES	38
V - SYNTHESE DES RESULTATS DE MESURE DANS DIVERS REACTEURS	52
VI - APPLICATION AUX DETERMINATIONS DE FLUENCE DE DOMMAGES DIVERS	55
ANNEXES :	
Annexe I - Correction dite de température équivalente	64
Annexe II - Détermination de la formule $s(T_e, D)$	69
Annexe III - Effet de guérison à température ambiante - Loi d'évolution	73
Annexe IV - Traitement des mesures G.A. M.I.N. - Description du code de calcul	89
Annexe V - Mesure du rapport d'étalonnage entre les 2 lots de graphite	104
Annexe VI - Fiches : Récapitulation des mesures réalisées à ce jour	106
REFERENCES	161

NOTATIONS EMPLOYEES

$\varphi(E)$	Flux de neutron par intervalle d'énergie
$\Phi_E(E)$	fluence de neutron par intervalle d'énergie
$\Phi(E)$	fluence de neutron par intervalle d'énergie (notation allégée)
$\chi(E)$	spectre de fission
$\Phi(E)$	$\int_E^\infty \Phi(E) dE$
$\Phi_{(75keV)}$	$\int_{75keV}^\infty \Phi(E) dE$
ϕ_x^f	flux de fission équivalent pour la réaction x :
	$\phi_x^f = \frac{1}{w_x} \int_0^\infty w_x(E) \Phi(E) dE$
ϕ_x	Idem. Notation allégée
ϕ_G	flux de fission équivalent pour le graphite (réaction $w_G(E)$)
ϕ_{Ni}	flux de fission équivalent pour le nickel (réaction $\sigma_{Ni}(E)$)
ϕ^{END}	flux Equivalent Nickel Dido (notation allégée pour ϕ_G^{END})
	$\phi^{END} = \frac{1}{1,8} \phi_G$
$\sigma(E)$	section efficace neutronique
$\sigma_{Ni}(E)$	section efficace de la réaction $Ni^{58}(n, p)Co^{58}$
σ_{Ni}^f	valeur moyenne de $\sigma_{Ni}(E)$ dans le spectre de fission :
	$\sigma_{Ni}^f = \frac{\int_0^\infty \sigma_{Ni}(E) \chi(E) dE}{\int_0^\infty \chi(E) dE}$

$w(E)$	fonction efficacité neutronique en ce qui concerne un dommage donné par exemple: $w_G(E)$, $w_{ZS}(E)$, etc.
$w_G(E)$	proportion d'atomes de G déplacés par unité de $\phi(E)$
$w_{ZS}(E)$	pour $w_{\text{Fer } ZS}(E)$; nb de zones créées dans le Fer par unité de $\phi(E)$
$w_d(E)$	pour $w_{\text{Fer } d}(E)$; proportion d'atomes de Fer déplacés par unité de $\phi(E)$
w_x^f	valeur moyenne de $w_x(E)$ dans le spectre de fission $\chi(E)$ $w_x^f = \frac{\int_0^\infty w_x(E) \chi(E) dE}{\int_0^\infty \chi(E) dE}$
w_x	notation allégée pour w_x^f
w_G	$720 \cdot 10^{-24}$ dép. cm ²
w_G^{END}	$1300 \cdot 10^{-24}$ dép. cm ²
w^{END}	notation allégée pour w_G^{END}
d	proportion d'atomes déplacés dans le matériau considéré
E_R	énergie cédée au réseau du matériau considéré
R	résistance du crayon de graphite du détecteur G. A. M. I. N.
ΔR	variation de R induite par l'irradiation
$\Delta R/R$	variation relative de R , induite par l'irradiation
$\tau(t)$	loi d'évolution de $\Delta R/R$ en fonction du temps de stockage à la température ambiante (annexe III)
D	valeur de $\Delta R/R$ considérée après 2 jours de recuit à la température ambiante
δ	valeur de D corrigée des effets de température, de fluence et de vitesse d'irradiation. δ est proportionnel à la fluence et indépendant des autres facteurs $\delta = D / s(T_e, D)$
s	fonction de la température et de la fluence (figure 9)

T_e	température équivalente (annexe I)
θ	température réelle d'irradiation
$\mathcal{A}$	activité Co^{58} mesurée dans le détecteur nickel du G. A. M. I. N.
A_{Ni}	déduit de $\mathcal{A}$ $A_{\text{Ni}} = \int_0^\infty \sigma_{\text{Ni}}(E) \phi(E) dE = \sigma_{\text{Ni}}^f \phi_{\text{Ni}}$
A	notation allégée pour A_{Ni}
r	indice expérimental mesuré par G. A. M. I. N. $r = 10^{-7} \cdot \frac{\delta}{A_{\text{Ni}}}$
Σ	définition antérieure de l'indice G. A. M. I. N. $\Sigma = a \cdot r \text{ avec } a = 15,1 \text{ cm}^2$

CHAPITRE I - INTRODUCTION - PRESENTATION.

Une irradiation neutronique conduisant à dommages radio-induits doit être caractérisée, entre autres, par un paramètre de fluence reçue - ou dose reçue - correctement définie suivant son aptitude à induire des dommages.

On trouvera en [1] une introduction au principe de la définition de telles fluences.

En bref, il faut définir et choisir quelle est la réaction neutronique et son résultat immédiat, qui accumulé, ou (et) transformé au cours du temps, aboutit au dommage radio-induit constaté. On peut choisir par exemple l'énergie cinétique E_R cédée au réseau par le choc neutronique, ou (et) le nombre d d'atomes déplacés par cette énergie. C'est le choix fait en [1].

Soit $w(E)$ le produit de la réaction neutronique retenue, par unité de fluence neutronique $\phi_E(E)$ à l'énergie E , $w(E)$ est par exemple un nombre d'atomes déplacés ; la fluence caractérisant l'irradiation est correctement définie par tout nombre proportionnel à $\int w(E) \phi_E(E) dE$

Ce peut être un nombre d'atomes déplacés

$$d = \int w(E) \phi_E(E) dE \quad (1)$$

ou un flux de fission équivalent :

$$\phi^f = \frac{\int w(E) \phi_E(E) dE}{\int w(E) \chi_E(E) dE} \int \chi_E(E) dE \quad (2)$$

où $\chi_E(E)$ est un spectre de fission.

En toute rigueur, il peut être nécessaire de retenir non pas une, mais plusieurs réactions neutroniques concourant au dommage constaté. De plus, température, durée d'irradiation et fluence ne sont pas des paramètres indépendants. En pratique, ici, la notion de fluence développée plus haut suffit très bien au prix d'un artifice de correction de température (Annexe I), et nous en restons donc aux

définitions (1) et (2).

La quantité $\int w(E) \phi_E(E) dE$ peut être calculée. Elle peut aussi s'obtenir par l'intermédiaire de la mesure d'un dommage donné. La variation radio-induite $\Delta R/R$ de résistivité électrique dans un échantillon irradié sous neutrons à faible fluence s'est montrée particulièrement bien adaptée à cette mesure.

Dans un domaine de faibles fluences et de températures convenables (30°C à 180°C environ), cette variation s'est montrée en effet proportionnelle à la fluence, après application éventuelle de lois connues de corrections de température, de flux et de fluence.

De plus, $\Delta R/R$ est un des moyens les plus faciles de mesurer indirectement un nombre d'atomes déplacés, c'est-à-dire d'atteindre la fluence lorsqu'elle est fondée sur le nombre d'atomes déplacés. On admettra ici, lorsque c'est nécessaire, la proportionnalité entre $\Delta R/R$, corrigé s'il y a lieu, et nombre d'atomes déplacés. Cette hypothèse, qualitativement bonne en général, s'est montrée très bien vérifiée en particulier dans le cas du graphite (*). On verra au chapitre IV que la proportionnalité

$$\Delta R/R \propto \int w(E) \phi_E(E) dE$$

est bien vérifiée pour le graphite, lorsque $w(E)$ prend la valeur $w_G(E)$ du nombre d'atomes déplacés dans le graphite par unité de fluence à l'énergie E .

La fonction de dommages, $w_G(E)$, présente l'intérêt de faire partie de l'ensemble des fonctions de dommage $w(E)$, ensemble qui est particularisé en ce qui nous intéresse par le domaine des neutrons intéressés.

Plus précisément, si l'on admet, pour fixer les idées, une représentation plus ou moins grossière suivant une fonction saut, on constate que toute fonction de dommage est caractérisée par un seuil équivalent compris entre quelques 75 et 300 keV. Ce point sera repris plus bas. Et l'on peut donc attendre une certaine

(*) des raisons théoriques confirment cette constatation : le nombre de déplacements induits par un choc neutronique varie avec l'énergie du neutron mais la structure de ces déplacements ne change pas pour le graphite (zones de 4 déplacements [3]). Nombre de déplacements et variation $\Delta R/R$ sont alors proportionnels. Il n'en serait pas de même si les structures de déplacements variaient avec l'énergie E du neutron (zones de taille croissante avec E par exemple).

similitude a priori de deux fonctions de dommages $w_i(E)$ et $w_j(E)$ relatives à 2 corps, ou 2 propriétés i et j étudiées sous neutrons.

La figure 1 donne, pour fixer les idées, 3 spectres $\Phi_E(E)$ neutroniques typiques (pile rapide, pile au graphite et pile à eau légère), qu'on peut rapprocher de 3 fonctions de réponse de détecteur :

- $\sigma_{Ni}(E)$: section efficace d'activation du nickel, réaction $Ni^{58}(n,p)Co^{58}$, qui constitue de fait une référence internationale de mesure de fluence rapide (à peu près équivalent à une fonction saut à 2,7 MeV)
- $w_G(E)$: fonction de dommages pour le graphite (nombre d'atomes déplacés) (très sensiblement équivalent à une fonction saut à 75 keV)
- $w_W(E)$: fonction de dommages pour le tungstène (nombre d'atomes déplacés) (grossièrement équivalent à une fonction saut à 300 keV).

Graphite et tungstène sont les matériaux que nous avons principalement retenus aujourd'hui (mais ce n'est pas exclusif) comme détecteurs à variation $\Delta R/R$ (voir plus loin).

Enfin, la figure 1 donne les fonctions de dommages représentant sensiblement les limites des cas à envisager (*) :

- limite de sensibilité maximale aux neutrons de basse énergie : w_{ZS} et w_G
 $w_{ZS}(E)$ fonction efficacité possible pour les propriétés mécaniques des aciers (nombre de Zones Stables [5]) (très sensiblement équivalent à une fonction saut à 75 keV) ;
 $w_G(E)$, vue ci-dessus, est très voisine en pratique de $w_{ZS}(E)$.
- limite de sensibilité maximale aux neutrons de haute énergie : w_d et w_W
 $w_d(E)$ fonction efficacité pour les aciers (sur la base du nombre d'atomes déplacés) grossièrement équivalent à une fonction saut à 300 keV) ;
 $w_W(E)$, vue ci-dessus, est voisine de $w_d(E)$.

(*) les fonctions semi-empiriques de SERPAN, recommandées par l'AIEA [4], sont, par d'autres, bien situées à l'intérieur de ces limites ; elles sont d'ailleurs assez bien représentées en pratique par $w_W(E)$.

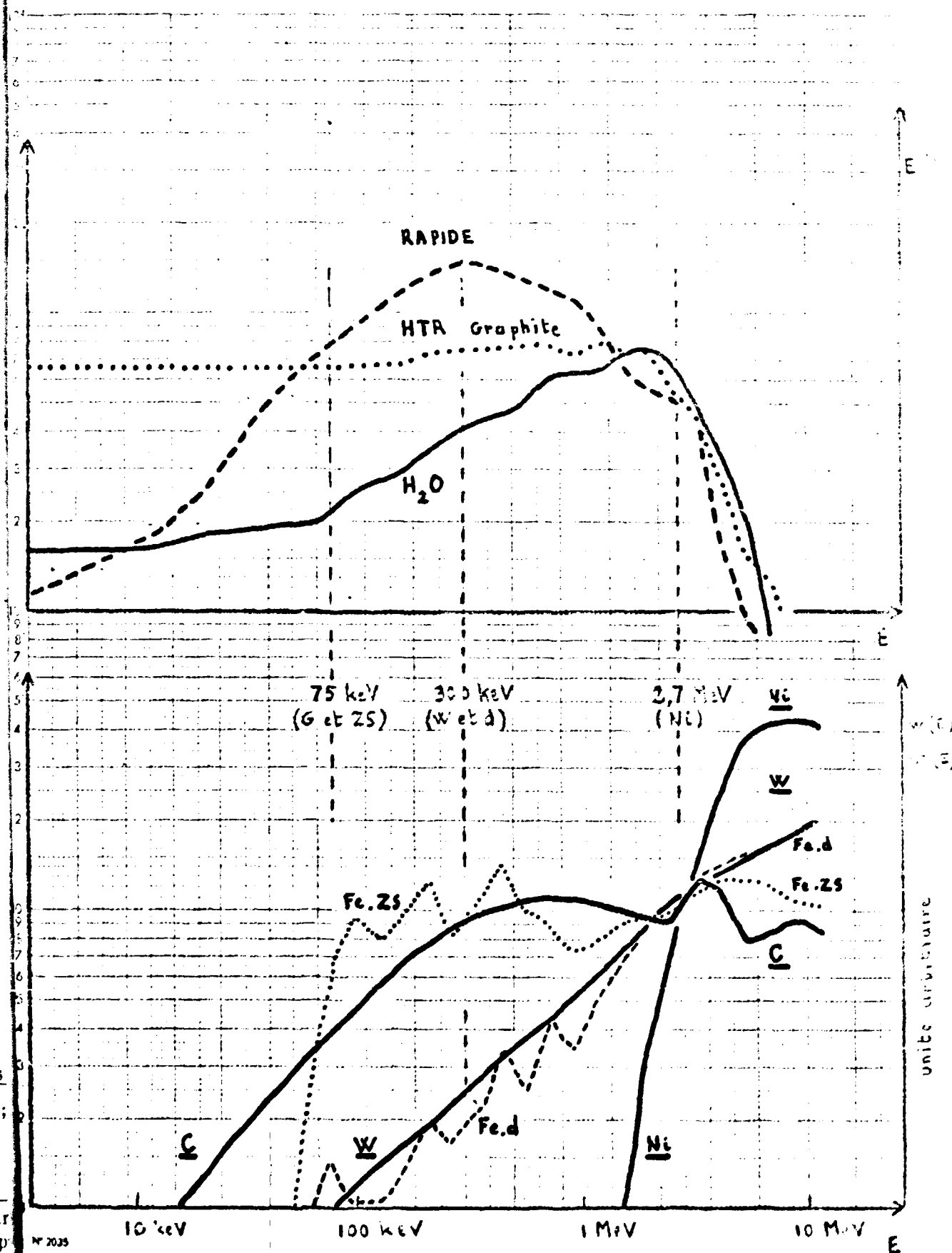


Figure 1

La fonction graphite $w_G(E)$ est conforme aux recommandations Euratom et AIEA [4] . de même que les autres fonctions de dommages dans les métaux, w_{ZS} excepté ; w_{ZS} correspond à une hypothèse possible, envisagée ici car elle constitue un cas limite.

Si l'on définit une fluence de dommages d_i par

$$d_i = \int w_i(E) \phi_E(E) dE$$

on voit clairement comment :

- le graphite et le tungstène constituent une bonne enveloppe des cas possibles de mesures de fluence de dommage,
- le graphite et le nickel (réaction d'activation du nickel en neutrons rapides) constituent aussi une enveloppe de ces cas, plus lâche,
- la seule réaction d'activation du nickel en neutrons rapides ne peut que très indirectement caractériser une fluence de dommages.

L'intérêt du détecteur à variation de résistance est alors triple : mesure de débit de fluence de dommage, étalonnage d'intégrateur ou de méthode de calcul de fluence, mesure d'indice de spectre :

- mesure de débit de fluence de dommages, directement si le détecteur d'une part et le dommage considéré d'autre part sont caractérisés par la même loi $w(E)$ (nombre de déplacement par seconde, pour un même corps dans les 2 cas, par exemple), et indirectement par interprétation calculée dans le cas contraire. Cette interprétation implique la connaissance du spectre neutronique et des deux lois $w_i(E)$ et $w_j(E)$, connaissance d'autant plus approximative que $w_i(E)$ et $w_j(E)$ sont plus voisines,

- étalonnage par fonctionnement à faible fluence du moyen qui servira à déterminer les fluences plus élevées reçues dans l'irradiation proprement dite : étalonnage d'un intégrateur conventionnel à réaction nucléaire - $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Ni}$ (n, p) ^{58}Co , $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mg}$, etc. - ou étalonnage d'un procédé de calcul.

- enfin, étude d'un réacteur par détermination d'indices de spectres dans les domaines particuliers d'énergie neutronique qui sont ceux des dommages radio-induits .

La méthode est applicable à de nombreux matériaux, en particulier aux métaux. A ce jour, ont été retenus et développés le tungstène et le graphite. La première solution tungstène est décrite en détail en [7] ; une amélioration est en cours (fiabilité, précision, extension). La solution graphite fait l'objet du présent rapport. Le choix des éléments C et W a été guidé par :

- la recherche du nombre atomique le plus petit possible (carbone) et du nombre atomique le plus grand possible (tungstène) permettant, comme on l'a vu ci-dessus sur les courbes de la figure 1, d'envelopper l'ensemble des cas possibles,
- la recherche d'une température de fusion la plus élevée possible de façon à diminuer au maximum les migrations de défauts à la température d'irradiation. En sont accrus, d'une part la sensibilité de la mesure, et d'autre part la fidélité de la relation entre $\Delta R/R$ et le nombre d'atomes déplacés,
- la recherche d'une activation minimale aux neutrons, pour faciliter les mesures en laboratoires,
- enfin la recherche de la stabilité de la résistance R, hors irradiation, et la reproductibilité des mesures $\Delta R/R$.

Cette reproductibilité est excellente pour le détecteur au graphite (voir chapitre III).

Le détecteur de "Graphite Appliqué à la Mesure des Intégrateurs Neutroniques" (G.A.M.I.N.) est décrit au chapitre II. Il comprend essentiellement un crayon de graphite étalonné, 2 pastilles de nickel et un témoin de température. Son irradiation à faible fluence induit une variation relative de résistance $\Delta R/R$ et une activité nickel A, dont le rapport définit l'indice G.A.M.I.N. r , après correction de température et de saturation développée au chapitre III. Les conditions d'emploi du G.A.M.I.N. sont explicitées au chapitre II.

Enfin, l'étalonnage absolu de la réponse G.A.M.I.N. (chapitre IV) permet de déterminer l'indice de spectre graphite nickel (rapport des flux de fission équivalent graphite et nickel) :

$$\phi_G^f / \phi_{Ni}^f = 0,50 r$$

ainsi que le nombre d'atomes déplacés.

Le tableau I suivant donne des résultats obtenus :

Réacteur		r
D ₂ O	Type DIDO : PLUTO (Harwell), FRJ 2 (Jülich)	3,60*
G	. BR1 - modérateur - coeur (Mol)	7,25
	. DRAGON (HTR) - combustible - coeur (Winfrith)	5,75
	. BEPO (TE 10)	8,2
H ₂ O	. HFR - coeur (Petten)	3,62
	. MELUSINE - coeur (Grenoble)	2,93
	. OSIRIS et ISIS - coeur (Saclay)	3,41
	. BR2 - coeur (Mol)	3,24
	. PEGASE - boucle réflecteur (Cadarache)	3,54
	. TRITON - réflecteur (Fontenay aux Roses)	2,46
Réacteur rapide	RAPSODIE - limite coeur-réflecteur (Cadarache)	12**
Spectre de fission	Interprétations calculées	2,0
* mesures corrigées et ramenées à la définition [1] des ϕ^{END} ($w^{END} = 1\,300 \cdot 10^{-24}$ dép. pour $1\,n \cdot cm^{-2}$). ** très variable suivant la position (9 à 22)		

Tableau 1 : Valeurs caractéristiques de r, indice graphite/nickel mesuré.

Ces valeurs sont des valeurs typiques ; r peut varier suivant la position de mesure et le chargement local. On trouve, par exemple, $r = 3,95$ à PLUTO avec un chargement de graphite et d'aluminium entre autres, et $r = 4,0$ à FRJ2 avec un chargement d'eau lourde et d'aluminium entre autres, et on calcule qu'on aurait $r = 3,3$ sans chargement (vide).

A RAPSODIE, r peut varier d'un facteur 2 suivant la position de mesure à la limite coeur-réflecteur. La présence de beryllium, dans la pile H₂O, peut faire croître r de plus de 20 %, etc.

On trouvera, au chapitre V, une récapitulation de toutes les mesures G.A.M.I.N. faites, et leur détail en Annexe VI.

Enfin, la réponse G.A.M.I.N. peut s'interpréter en termes de flux divers (chapitre VI). En ce qui concerne le graphite, d'une part (flux "DIDO" par exemple), en ce qui concerne d'autres matériaux d'autre part, comme les aciers.

C'est aussi la mesure directe des flux d'énergie supérieure à 75 keV environ :

$$\phi_{(75\text{ keV})} \equiv \int_{75\text{ keV}}^{\infty} \phi_E(E) dE$$

*

*

*

CHAPITRE II - DESCRIPTION DU DOSIMETRE G.A. M.I.N. - MESURES ET MODE D'EMPLOI.

II.1 - PRESENTATION DU DOSIMETRE G.A. M.I.N. ET GRANDEURS MISES EN OEUVRE.

II.1.1 - Description :

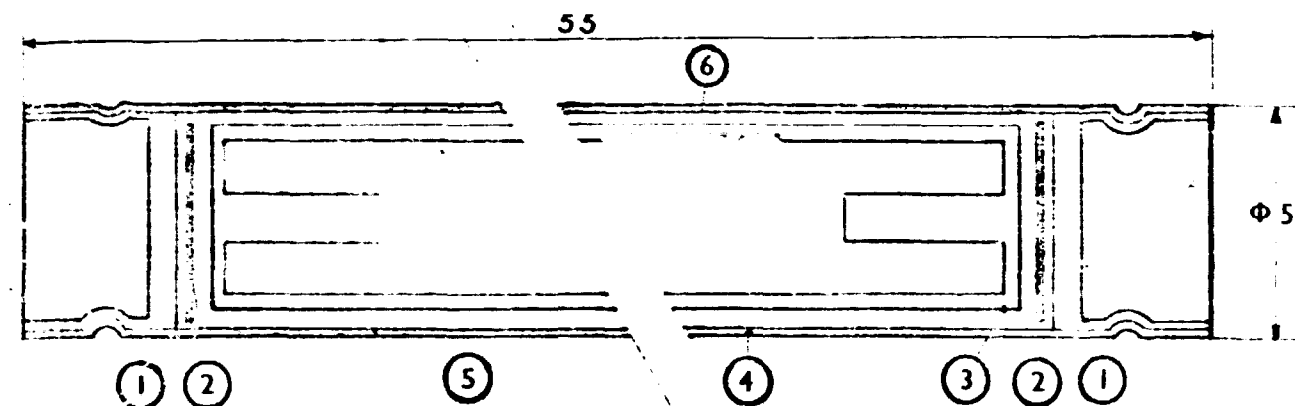
Il se compose d'un échantillon de graphite auquel sont associés deux détecteurs par activation de nickel et un jeu de témoins de température. L'ensemble est placé dans un conteneur étanche en aluminium.

L'échantillon de graphite, de forme cylindrique, comporte une fente à chaque extrémité. On détermine ainsi les 4 bornes nécessaires aux mesures de précision des résistances électriques de faible valeur. Tous les échantillons sont usinés à partir d'un lot unique de graphite à grain fin et de haute pureté (électrodes de spectrographie Péchiney). L'excellente homogénéité de ce lot est démontrée par la reproductibilité des mesures G.A. M.I.N. réalisées dans le réacteur Isis en 1971, 1972 et 1973 (chapitre III).

Les deux détecteurs de nickel permettent la détermination précise de la fluence neutronique moyenne au niveau de l'échantillon de graphite.

Les témoins de température (pastilles virant au noir lorsque leur température nominale est atteinte ou dépassée) permettent une détermination suffisamment précise de la température d'irradiation lorsque celle-ci reste constante. Lorsqu'une évolution de la température en cours d'irradiation est à craindre, le dispositif d'irradiation devra être muni de thermocouples (voir paragraphe II 3).

L'échantillon de graphite est emballé dans une mince feuille d'aluminium (0,05 mm d'épaisseur) sur laquelle sont collés les témoins de température. L'ensemble est ensuite glissé dans un tube d'aluminium fermé à chaque extrémité par un bouchon serti de façon étanche (voir figure 2).

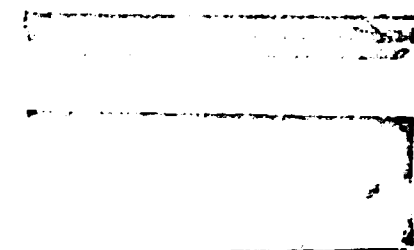


- (1) Bouchon d'aluminium
- (2) Nickel
- (3) Papier d'aluminium de 5/100 mm
- (4) Tube d'aluminium
- (5) Graphite
- (6) Témoin de température

LE DETECTEUR G.A. M.I.N. - Coupe

DESCRIPTIF

Longueur de l'échantillon de graphite :	2,85 mm
Longueur :	45 mm
Longueur de chaque fente :	6 mm
Valeur typique de la résistance électrique à 25°C :	$3,9 \cdot 10^{-4} \mu\Omega$
Valeur approximative de la résistivité électrique à 25°C :	$800 \mu\Omega \text{ cm}$
Coefficient de température :	$-3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Provenance du graphite :	Péchiney GL1350
Date de fabrication du graphite :	Février 1971
Longueur des détecteurs par activation de Ni :	4 mm
Épaisseur " " " :	0,1 mm
Isotopes utilisés :	Ni^{58} (n, p) Co^{58}
Période de l'isotope formé (Co^{58}) :	71,3 j
Longueur du conteneur d'aluminium :	5 mm
Longueur " " :	55 mm
Épaisseur " " :	0,4 mm



0 1 2 3 4 5 6

Figure 2

II.1.2 - Définition des grandeurs employées :

La variation de résistance $\Delta R/R$ n'est proportionnelle à la fluence de dommages cherchée que pour une température donnée, pour une fluence faible et en l'absence de recuits spontanés à la température de stockage. On appellera δ la valeur de $\Delta R/R$ corrigée de ces différents effets (voir chapitre III)

$$\delta = \Delta R/R \text{ corrigé} \quad (\text{saturation, température, recuits}) \quad (3)$$

(ramené à un stockage de 48 heures à 21°C, à une température d'irradiation de 40°C et à la linéarité en fonction de la fluence caractéristique de $\Delta R/R \leq 1\%$).

On définit, d'autre part, l'indice graphite/nickel $r^{(*)}$:

$$r = 10^{-7} \frac{\delta}{A} \quad (4)$$

où A est le nombre de réaction $Ni^{58}(n, p)Co^{58}$ par noyau cible de nickel, déduit de l'activité mesurée du nickel ; $A = \int \sigma_{Ni}(E) \phi_E(E) dE$.

Si l'on appelle suivant [1] :

d : la proportion d'atomes déplacés

ϕ_G : le flux de fission équivalent (relation (2)) pour la réaction de dommage le graphite.

ϕ_{Ni} : le flux de fission équivalent (relation (2)) pour la réaction $Ni^{58}(n, p)$

la variation de résistivité corrigée δ et l'indice graphite/nickel conduisent aux grandeurs d, d/A, ϕ_G , et ϕ_G/ϕ_{Ni} suivant les relations (voir chapitre IV) :

$$\phi_G / \phi_{Ni} = \alpha r \quad \text{avec } \alpha = 0,50 \pm 0,01$$

$$\phi_G = \phi_{G0} \delta \quad \text{avec } \phi_{G0} = 4,8.10^{17} \text{ n.cm}^{-2}$$

$$d = d_0 \delta \quad \text{avec } d_0 = 3,47.10^{-4}$$

$$d/A = 10^7 d_0 r$$

(*) N. B. l'indice Σ utilisé dans d'autres notes antérieures est proportionnel à r

$$\Sigma = ar \quad \text{avec } a = 15,1 \text{ cm}^2$$

avec le modèle de dommage retenu ici $w_G(E)$ (recommandé par EURATOM, tableau 6) et la répartition $\sigma_{Ni}^f(E)$ retenue ici (tableau 6).

d_0 et ϕ_{G0} variant sensiblement comme l'inverse de la valeur moyenne de $\sigma_{Ni}^f(E)$, prise par exemple sur un spectre de fission, $\sigma_{Ni}^f(E)$.

Les valeurs ci-dessus correspondent à :

$$\sigma_{Ni}^f = 101 \text{ mb sur un spectre de LEACHMAN}$$

$$= 105 \text{ mb sur un spectre de CRANBERG}$$

α est sensiblement indépendant des hypothèses.

II.2 - Les mesures :

II.2.1 - Mesures de la variation de résistance électrique du graphite :

La valeur de la résistance électrique de chaque échantillon est mesurée avant et après irradiation dans des conditions rigoureusement identiques.

On détermine ainsi l'effet de l'irradiation sur le graphite :

$$\Delta R/R = \frac{R_2 - R_1}{R_1}$$

R_1 = résistance électrique avant irradiation,

R_2 = résistance électrique après irradiation.

La valeur mesurée après irradiation décroît avec le temps (voir Annexe 3). Ce phénomène est corrigé de façon à exprimer toutes les mesures à 2 jours après la fin de l'irradiation.

Les mesures sont toujours effectuées à 25°C. Un bain thermostaté (*) à circulation d'huile permet de maintenir les échantillons à température constante ($\pm 2.10^{-3}^\circ\text{C}$) pendant la durée de la mesure. La reproductibilité de la température à chaque nouvelle mesure est assurée à $\pm 10^{-3}^\circ\text{C}$ par l'emploi d'une sonde thermométrique de platine.

Les échantillons à mesurer sont mis en place dans un dispositif "boîte conductimètre" de conception originale permettant d'assurer les contacts électriques sur les bornes de chaque échantillon de graphite sans lui faire subir de

(*) Marque : Guildline - réf. 9732 VT

contrainte mécanique. Cette suppression des contraintes (nécessaire pour assurer une bonne reproductibilité de la mesure) a été obtenue par l'emploi de contacts à mercure.

La mesure est faite par comparaison de l'échantillon à une résistance étalon fixe suivant une méthode d'opposition. Cette méthode permet, par l'emploi de résistances à 4 bornes, de s'affranchir des résistances parasites (contacts et fils de jonction).

La figure 5 montre le schéma de principe du pont employé^(*). La résistance étalon R_e et l'échantillon à mesurer R_x sont parcourus par des courants différents et ajustables. Un détecteur de zéro G permet de contrôler l'équilibre du pont :

$$R_x I_x = R_e I_e$$

soit $R_x = R_e \cdot \frac{I_e}{I_x}$

Le rapport des courants est déterminé par un second équilibre. Le nombre de spires N_x est ajusté pour obtenir un flux magnétique nul dans le noyau métallique. on a alors :

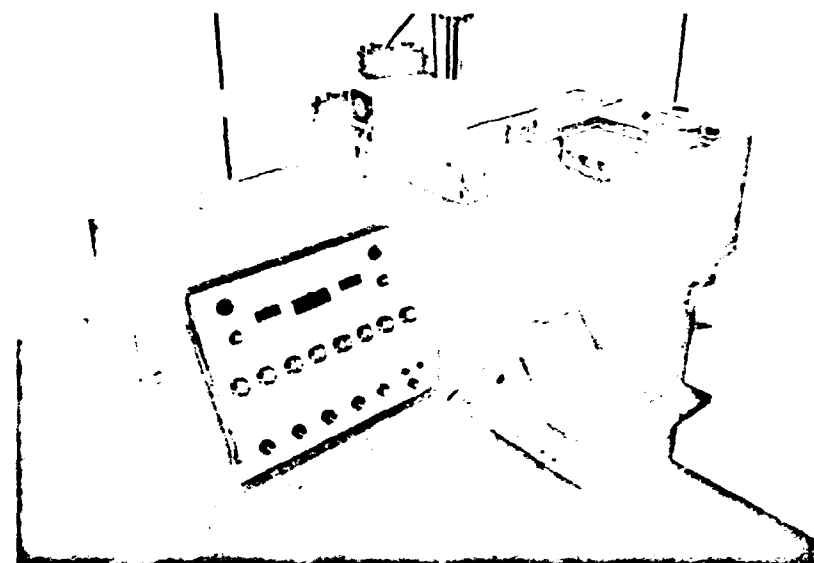
$$N_e I_e = N_x I_x$$

soit $\frac{I_e}{I_x} = \frac{N_x}{N_e}$ et $R_x = R_e \cdot \frac{N_x}{N_e}$

Le rapport $\frac{N_x}{N_e}$ peut être compris entre 0 et 10 et la résolution est de 10^{-7} de la valeur de l'étalon.

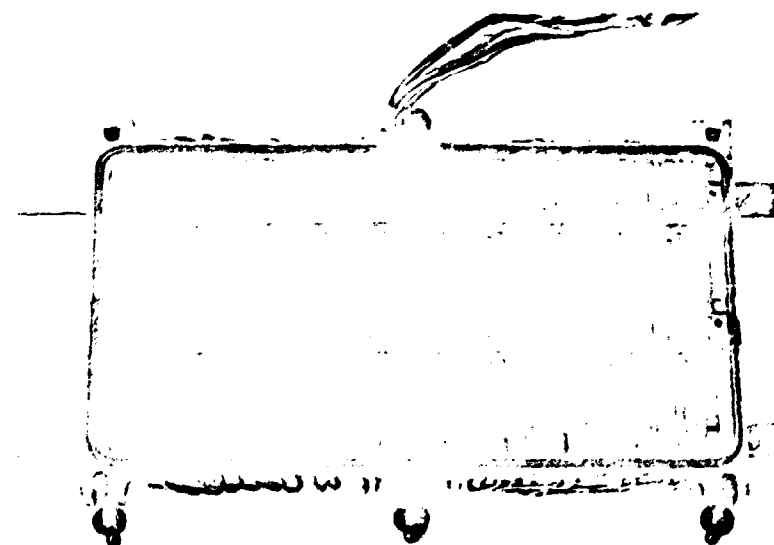
Les mesures sont effectuées avec une résistance étalon de 1Ω ce qui permet une résolution de $0,1\mu\Omega$. La reproductibilité des mesures est assurée à environ $3\mu\Omega$ près (écart-type caractérisant la dispersion des séries de mesures sur échantillons non irradiés).

(*) Marque : Guildline - réf. 9970



Banc de mesure

Figure 3



Boîte conductimètre

Figure 4

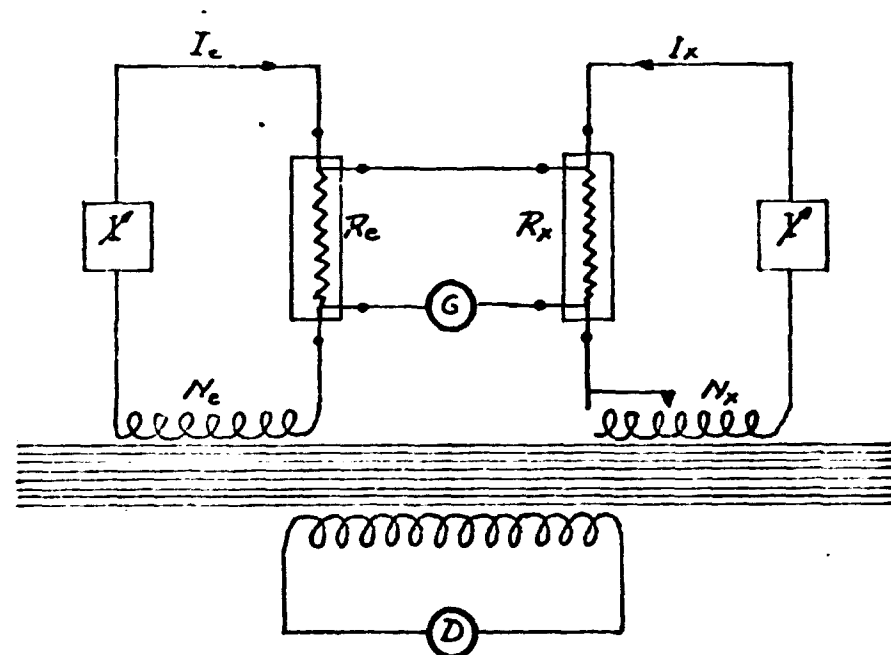


Figure 5

Les autres causes d'erreur telles que : évolution de l'étalon de résistance, reproductibilité de la température de mesure, appréciation de l'équilibre du pont, sont de l'ordre de 0.2μ ou moins; elles sont donc totalement négligeables devant cette dispersion de mesure qui constitue en fait la seule incertitude.

L'erreur de mesure (écart-type) de l'effet $\Delta R = R_1 - R_2$ sur le graphite est donc de 4μ .

II.2.2 - Mesure de la fluence neutronique :

La mesure de l'activité du Co^{58} formé suivant la réaction $\text{Ni}^{58} (n, p) \text{Co}^{58}$ permet de connaître la fluence neutronique reçue par le graphite.

$$\mathcal{A} = k \int_0^t \int_0^\infty \sigma(E) \phi_E(E) dE dt = k \sigma_{\text{Ni}}^f \phi_{\text{Ni}}$$

avec

$$\sigma_{\text{Ni}}^f = \frac{\int_0^\infty \sigma(E) \chi_E(E) dE}{\int_0^\infty \chi_E(E) dE}$$

$\mathcal{A}$: activité en Co^{58}

$\sigma_{\text{Ni}}(E)$: section efficace de la réaction $\text{Ni}^{58} (n, p) \text{Co}^{58}$

$\phi_E(E)$: spectre neutronique à l'emplacement d'irradiation

$\chi_E(E)$: spectre de fission $\phi_f(E) = \sqrt{E} e^{-0.775 E}$

σ_{Ni}^f : section efficace moyennée sur le spectre de fission.

ϕ_{Ni} : fluence de fission équivalente pour le Ni.

On a donc :

$$\phi_{\text{Ni}} = \frac{\mathcal{A}}{k \sigma_{\text{Ni}}^f}$$

avec $\sigma_{\text{Ni}}^f = 101 \text{ mb.}$

La mesure de l'activité $\mathcal{A}$ est réalisée avec un ensemble de spectrométrie γ équipé d'un scintillateur Na I et d'un sélecteur multicanal intertechnique SA 40.

Les échantillons font l'objet d'une mesure relative avec un étalon d'activité de Co^{58} .

La mesure se fait sur le pic γ de 810 keV du Co^{58} . Une installation automatique assure la permutation des échantillons sous le compteur et la sortie des résultats sur cartes perforées. Un code de calcul écrit en Fortran IV [8] permet un traitement optimum des données, en particulier par assimilation du pic γ à la gaussienne la plus voisine. Cette méthode assure une excellente reproductibilité des mesures. L'erreur statistique (écart-type) est généralement inférieur à $0,5 \%$. Ceci est obtenu en comptant chaque échantillon environ 5 fois pendant un temps

suffisant pour totaliser 10^5 à $2 \cdot 10^5$ coups sous le pic.

La reproductibilité de mesure a été contrôlée de nombreuses fois par des comptages séparés de quelques jours à quelques semaines de séries d'une vingtaine de détecteurs. La reproductibilité sur la mesure des ϕ_{Ni} a ainsi pu être assurée environ 1 % près pour l'ensemble des résultats figurant au présent rapport.

II.3 - Guide d'emploi du dosimètre G.A.M.I.N. :

La mesure de l'indice graphite/nickel r nécessite l'irradiation, dans des conditions bien définies, de dosimètres G.A.M.I.N. De la mesure de l'activité du Co^{58} et de la variation de résistance électrique du graphite, on déduira, après application des corrections appropriées, la valeur de l'indice r dans l'emplacement d'irradiation considéré.

La gamme de fluence et de température d'irradiation dans laquelle on peut employer G.A.M.I.N. est indiquée ci-dessous (ces limites d'emploi sont établies au paragraphe III.4).

GAMME D'EMPLOI

$$30^\circ C < T_e < 180^\circ C$$

$$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2} < \phi_G < 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$$

GAMME OPTIMALE D'EMPLOI

$$30^\circ C < T_e < 80^\circ C$$

$$10^{16} \text{ cm}^{-2} < \phi_G < 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$$

PRECAUTIONS D'EMPLOI :

La température :

- La température d'irradiation doit être d'autant mieux connue qu'elle est plus élevée : une incertitude de $\pm 5^\circ C$ entraîne une erreur, sur l'indice r , de

$$\begin{cases} \pm 0,7 \% & \text{pour } T_e \approx 40^\circ C \\ \pm 5 \% & \text{pour } T_e \approx 180^\circ C \end{cases}$$

- Les dosimètres doivent être stockés à une température voisine de $20^\circ C$.
- La température doit être constante pendant l'irradiation et décroître rapidement (retour à l'ambiante en quelques minutes) dès la fin de celle-ci.

Si l'une de ces conditions n'est pas remplie, une irradiation d'étalonnage de durée et fluence égales et reproduisant la même évolution de température devra être réalisée dans l'emplacement de référence du détecteur Isis.

Il est indispensable, dans un tel cas, d'équiper le dispositif d'irradiation de thermocouples afin de connaître avec précision les variations de la température. Les témoins de température inclus dans le G.A.M.I.N. ne permettent la mesure que de la température maximale atteinte, ce qui est insuffisant pour interpréter les résultats d'une irradiation qui n'a pas eu lieu à température constante.

Chocs, rayures, contamination :

Le conteneur étanche en aluminium protège l'échantillon de graphite de tous risques de contamination, de rayures, de contraintes, voire de cassures. Le G.A.M.I.N. ne doit donc pas être sorti de son conteneur.

Les chocs ou traitements aux ultra-sons (pour décontamination par exemple) peuvent provoquer des variations de la résistance électrique de l'échantillon de graphite.

De telles variations pourraient se traduire par une erreur importante sur la mesure G.A.M.I.N. Le soin apporté à la manipulation des G.A.M.I.N. est essentiel pour assurer la précision maximale à la mesure.

Lors d'une mesure G.A.M.I.N., quelques dosimètres subissent l'ensemble des manipulations sauf l'irradiation. La mesure de ces échantillons témoins permet soit de s'assurer de l'absence d'effet parasite soit au contraire de déterminer la correction à apporter.

PRECISION

La valeur typique de l'erreur (écart-type) affectée à la mesure de l'indice graphite/nickel r par n dosimètres est établie au paragraphe III.3 :

$$100 \frac{\Delta r}{r} \approx 1,2 \sqrt{1 + \frac{1}{n}}$$

soit $\approx 1,3 \%$ pour $n = 5$ dosimètres.

L'incertitude sur la valeur de la température d'irradiation peut accroître sensiblement cette erreur.

EXPLOITATION DES MESURES :

. Mesures d'activité du Ni en Co^{58} :

Le traitement des mesures brutes est assuré par un code [δ] qui indique pour chaque détecteur la fluence neutronique correspondante et l'erreur statistique associée à cette mesure.

. Mesures de l'effet d'irradiation sur le graphite :

Les diverses corrections apportées aux mesures brutes de l'effet d'irradiation ΔR sont effectuées par un code décrit en Annexe 4.

- Correction de l'effet de guérison des défauts radio-induits à température ambiante

$$D = (\Delta R/R)_{2j} = \frac{1}{\tau(t)} \cdot (\Delta R/R)_t$$

où $\tau(t)$ est la loi de guérison établie à l'annexe 3.

L'effet $\Delta R/R$ est ainsi exprimé pour une durée de refroidissement de 2 jours

- Calcul de la température équivalente d'irradiation (Annexe 1).

- Application de la loi d'étalonnage $s(T_e, D)$

$$\delta = \frac{(\Delta R/R)}{s(T_e, D)}$$

L'effet sur le graphite est ainsi corrigé des effets de saturation, de température d'irradiation et de vitesse d'irradiation.

- Calcul de l'indice graphite/nickel r :

$$r = 10^{-7} \frac{\delta}{A_{Ni}}$$

Rappelons que l'on a directement (voir chapitre IV) : $\phi_G / \phi_{Ni} = 0,5.r$

*

* *

(*) Temps qui s'est écoulé depuis la fin de l'irradiation.

CHAPITRE III - LOI DE VARIATION DE LA REPONSE DU DOSIMETRE G. A. M. I. N.

EFFETS DE TEMPERATURE ET DE DOSE. PRECISION DE MESURE.

Un ensemble d'environ 55 irradiations réalisées dans 2 emplacements du réacteur Isis (*) a permis d'établir la loi de variation $s(T_e, D)$ de l'effet $\Delta R/R$ mesuré sur le graphite en fonction de la température d'irradiation et de la dose.

La plupart des irradiations ont été réalisées à une puissance proche de la puissance nominale d'Isis (800 kW). Les conditions standard d'irradiation sont définies par :

- Le chargement du coeur représenté sur la figure 6

- . 6 barres de contrôle vierges à 262 g d' U^{235} avec plaques de rives borées à 500 ppm de B^{10}
- . 17 éléments combustibles standard vierges à 390 g d' U^{235}
- . 16 éléments combustibles partiellement brûlés, du même type que les précédents. Les taux de combustion (indiqués sur la figure 6), varient de 21 % à 39 %
- . 7 blocs d'aluminium chargés de noyaux également en aluminium
- . 6 éléments réflecteurs de beryllium.

- La structure des emplacements d'irradiation : emplacements 42 et 46. Dans les deux cas, les G. A. M. I. N. sont irradiés dans le plan de flux maximal :

- . emplacement 42 : les barres de commande 1 et 3 (voir figure 6) sont hautes. L'emplacement est occupé par un bloc d'aluminium représenté figure 7. La partie centrale ($\phi 13$) comprend le dispositif expérimental en aluminium et, (ou) silice dans lequel sont situés les dosimètres G. A. M. I. N.
- . emplacement 46 : les barres de commande 2 et 4 sont hautes. L'emplacement est occupé par un bloc d'aluminium à 4 trous, représenté figure 8.

(*) Maquette du réacteur d'essais de matériaux Osiris de Saclay.

34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
5	0	6	0	34%		
0	Al	0	0	0	Al	0
0	0	3	Al	4	0	0
34%	Al	0	0	0	Al	23
34%	0	1	Al	2	0	34%
34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
34%		Be				Be
3	4	5	6	7		

CHAMBIER - COMPOSITES I

Trois de ces trous sont occupés par un noyau d'aluminium, le quatrième contient le four "Chouca" dans lequel ont eu lieu les irradiations. Les G.A.M.I.N. sont situés dans un barillet d'aluminium de Ø18 équipé de 2 thermocouples.

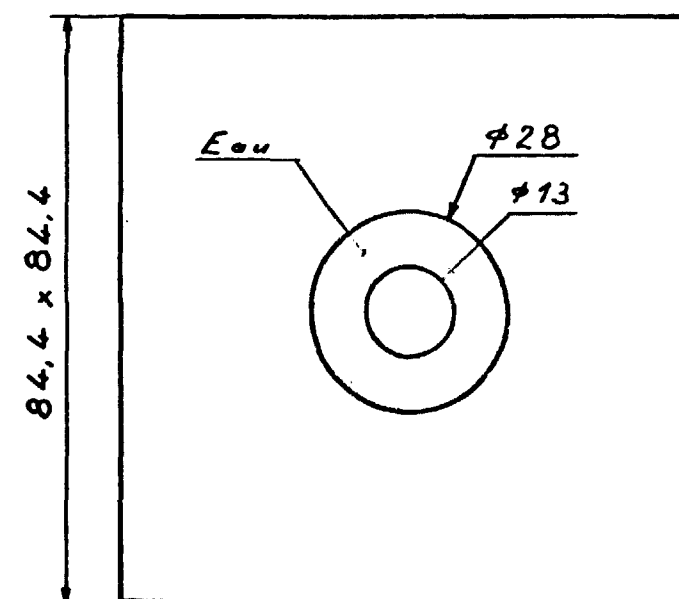


Figure 7

Emplacement 42

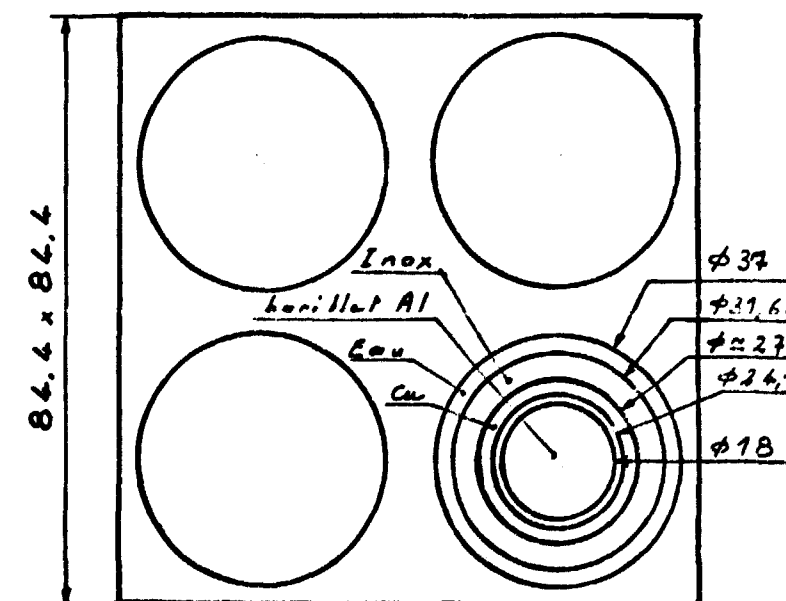


Figure 8

Emplacement 46

III.1 - Examen des résultats - formule donnant l'effet de saturation et de température d'irradiation :

Le tableau 2 donne les résultats de mesures relatifs aux 15 irradiations 42 et 27 irradiations en 46, retenues pour établir la loi $s(Te, D)$ (voir annexe 2)

Chaque valeur de ce tableau est la moyenne de 5 mesures.

On trouve successivement les renseignements suivants :

- N° i : numéro de l'irradiation
- Date de l'irradiation
- P : puissance de la pile (en kW)
- t : durée de l'irradiation (en mn)
- θ et Te : température d'irradiation et température équivalente d'irradiation en $^{\circ}C$ (voir annexe 1)
- $\Delta R/R$: variation relative de résistance électrique du graphite (en %)
- A_{Ni} : proportion de noyaux de Ni^{58} ayant subi la réaction $Ni^{58}(n, p)Co^{58}$

$$\text{On a : } A_{Ni} = \int_0^{\infty} \sigma_{Ni}(E) \phi_E(E) dE = \sigma_{Ni}^f \phi_{Ni}$$

- s : coefficient de température et de dose

$$s = s(Te, D) = \frac{\Delta R/R}{\delta}$$

où δ est la variation relative de résistance électrique que l'on aurait mesurée en l'absence d'effet de saturation et pour une température équivalente d'irradiation de $40^{\circ}C$

La partie droite du tableau 2 donne :

- δ
- $r = 10^{-7} \frac{\delta}{A_{Ni}}$
- σ_e : écart-type de la dispersion des 5 valeurs élémentaires

	N° i	Date	P kw	t mn	θ $^{\circ}C$	Te $^{\circ}C$	$\Delta R/R$ %	A_{Ni} 10^{-10}	S	δ %	r	σ_e
Emplacement 42	1	10.6.71	630	36	48	47	1,651	4,850	0,971	1,701	3,49	0,04
	2	16.6.71	680	770	54	52	34,00	123,5	0,811	41,9	3,39	0,06
	3	5.8.71	710	18	46	44	0,996	2,900	0,996	1,000	3,45	0,03
	4	6.8.71	680	195	43	42	8,30	26,65	0,900	9,22	3,44	0,01
	6	13.8.71	600	65	46	45	3,751	11,56	0,934	4,02	3,39	0,02
	7	19.8.71	600	45	48	47	2,050	6,248	0,960	2,135	3,42	0,01
	8	23.8.71	620	9	42	41	0,436	1,290	1,000	0,436	3,38	0,015
	11a	17.11.71	860	30	39	38	1,460	4,363	0,990	1,495	3,41	0,04
	11b	17.11.71	860	30	39	38	1,467	4,387	0,991	1,481	3,38	0,07
	12	24.11.71	720	9	37	37	0,388	1,119	1,005	0,386	3,45	0,05
	13	6.1.72	700	11	37	34	0,679	1,962	1,009	0,673	3,40	0,03
	15	21.2.73	710	300	48	47	13,44	45,15	0,867	15,50	3,43	0,01
	51	16.6.71	680	565	54	50	30,12	109,0	0,822	36,7	3,36	0,04
	52	5.8.71	710	14	46	41	0,972	2,894	0,999	0,973	3,36	0,02
	54	19.8.71	600	8	48	45	0,456	1,340	0,993	0,459	3,42	0,02
Emplacement 46	21	10.6.71	630	30	69	72	0,990	3,140	0,958	1,033	3,29	0,015
	22	16.6.71	680	770	77	79	20,13	81,2	0,711	28,30	3,36	0,03
	23	30.6.71	320	75	43	50	1,263	3,847	0,976	1,294	3,36	0,03
	24	30.6.71	600	40	77	81	1,189	3,942	0,917	1,296	3,29	0,02
	25	6.8.71	690	310	77	81	7,745	29,34	0,776	9,98	3,40	0,03
	26	12.8.71	720	32	55	57	1,197	3,604	0,974	1,229	3,41	0,04
	27	12.8.71	610	38	61	65	1,155	3,654	0,963	1,199	3,28	0,02
	28	13.8.71	610	25	113	117	0,651	2,494	0,783	0,831	3,33	0,03
	34	3.9.71	720	45	143	145	1,134	5,408	0,647	1,754	3,24	0,007
	35	16.9.71	760	39	55	54	1,401	4,377	0,970	1,445	3,30	0,03
	36	28.10.71	220	83	20	29	0,977	2,900	1,010	0,967	3,34	0,02
	38	24.11.71	720	40	92	93	1,414	4,982	0,852	1,660	3,33	0,05
	40	8.12.71	730	70	171	172	1,518	9,183	0,501	3,030	3,30	0,03
	42	24.25.1.72	760	1090	117	118	22,95	135,3	0,504	45,6	3,37	0,06
	43	16.2.72	200	20	69	79	0,266	0,847	0,924	0,288	3,40	0,05
	44	23.2.72	200	80	69	80	0,989	3,245	0,921	1,074	3,31	0,015
	46	4.10.72	550	18	54	55	0,710	2,220	0,981	0,724	3,26	0,04
	47	9.10.72	440	12	76	77	0,469	1,490	0,944	0,497	3,34	0,06
	48	12.10.72	660	16	90	91	0,594	2,048	0,857	0,670	3,27	0,02
	49	12.10.72	800	100	117	116	3,346	15,24	0,679	4,93	3,23	0,03
	500	17.10.72	810	440	93	91	15,13	69,98	0,672	22,52	3,22	0,03
	501	19.10.72	820	30	173	171	0,854	4,723	0,559	1,598	3,38	0,04
	503	24.10.72	770	415	145	143	9,670	64,86	0,454	21,79	3,28	0,04
	504	27.10.72	810	422	173	171	7,508	67,60	0,342	21,94	3,25	0,015
	506	19.1.73	730	203	145	145	4,756	28,45	0,513	9,28	3,28	0,02
	507	22.1.73	700	150	173	172	2,960	21,22	0,424	6,91	3,26	0,04
	508	22.1.73	680	135	155	155	3,028	18,00	0,506	5,98	3,23	0,02

Tableau 2

Il est dit dans l'annexe II comment l'ensemble des valeurs expérimentales du tableau 2 a permis de déterminer, par moindres carrés, sur une formule empirique, la loi de variation $s(Te, D)$.

$$s(Te, D) = U_1 - T(U_2)$$

avec :

$$U_1 = a_1 Te + b_1 + (c_1 Te + d_1) \lg\left(\frac{D}{D_0}\right) T'\left(\frac{D}{D_0}\right)$$

$$T'\left(\frac{D}{D_0}\right) = \begin{cases} 1 & \text{si } D \geq D_0 \\ 0 & \text{si } D < D_0 \end{cases}$$

$$T(U) = \begin{cases} U & \text{si } U \geq 0 \\ 0 & \text{si } U < 0 \end{cases}$$

$$D_0 = -2.10^{-5} Te + 1,21.10^{-2}$$

$$a_1 = -4,06.10^{-3}$$

$$a_2 = -2,74.10^{-3}$$

$$b_1 = 1,256$$

$$b_2 = 0,202$$

$$c_1 = -6,6.10^{-4}$$

$$c_2 = -2,4.10^{-4}$$

$$d_1 = -1,21.10^{-1}$$

$$d_2 = -0,26.10^{-2}$$

Les courbes de la figure 9 représentent les variations de $s(D)$ pour diverses valeurs de paramètre Te .

Pour $D < D_0$, il n'y a pas de saturation : s ne dépend que de Te .

D_0 varie de 1,15 % pour $Te = 30^\circ\text{C}$ à 0,8 % pour $Te = 200^\circ\text{C}$.

En pratique, on se trouve généralement dans le cas où $D > D_0$, c'est-à-dire que la réponse du G.A.M.I.N. dépend des 2 variables D et Te .

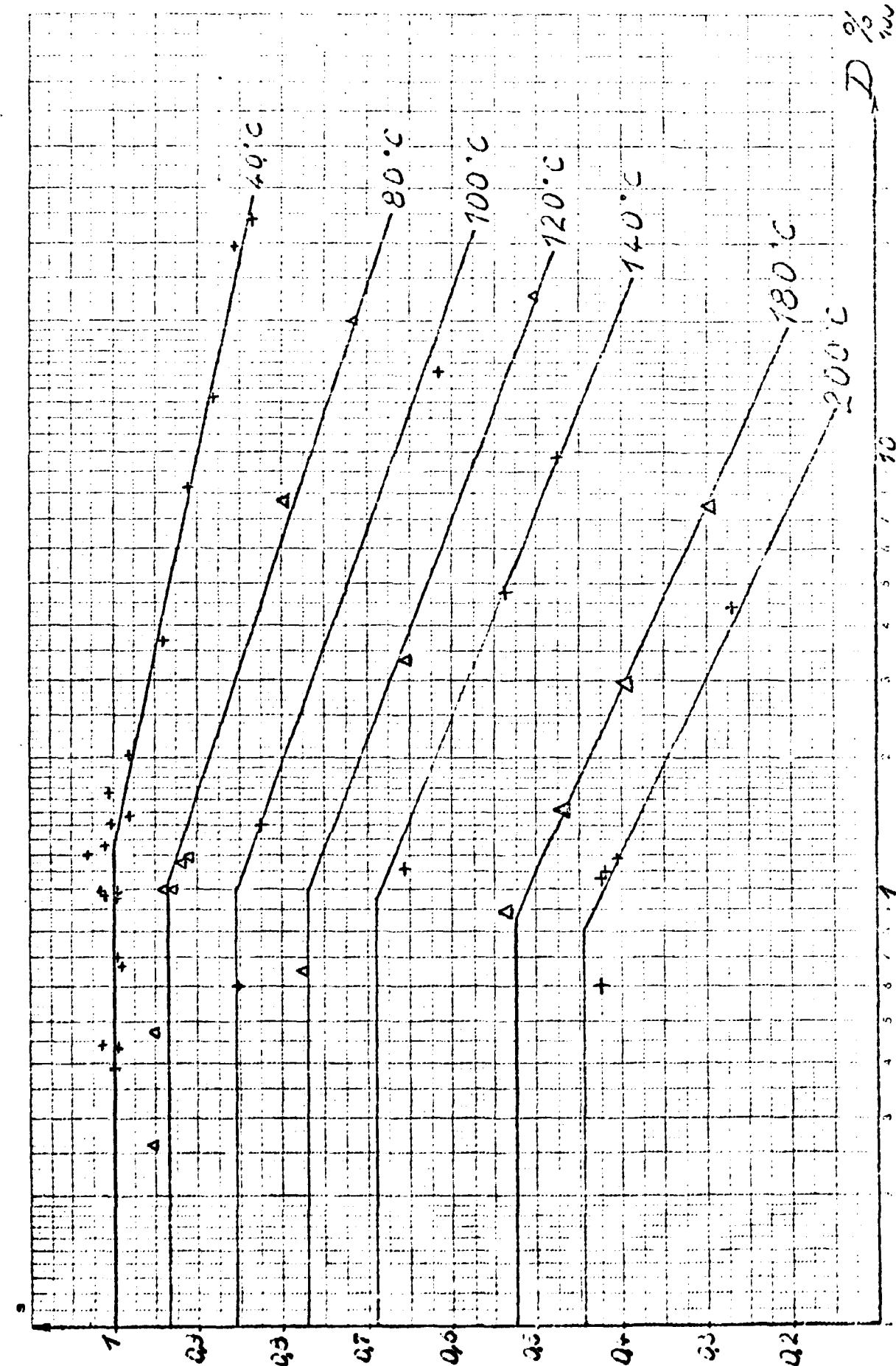


Figure 9

III.2 - Applications de la formule $s(\text{Te}, D)$ aux irradiations réalisées dans Isis :

Les courbes de la figure 9 représentent la formule $s(\text{Te}, D)$ établie au paragraphe précédent en fonction de D et pour diverses valeurs du paramètre Te . Les points expérimentaux qui ont servi à établir cette formule sont reportés ici après avoir subi la légère correction qui les ramène à la valeur ronde de Te immédiatement voisine. On constate ainsi que la formule retenue représente bien les résultats expérimentaux.

L'application de la formule $s(\text{Te}, D)$ va permettre de corriger l'effet mesuré $\Delta R/R$ des effets de température et de saturation.

On a ainsi :

$$\delta = \frac{\Delta R/R}{s(\text{Te}, D)}$$

et l'indice graphite/nickel :

$$r = 10^{-7} \frac{\delta}{A_{\text{Ni}}}$$

Le tableau 2 donne les valeurs de δ et de r pour l'ensemble des irradiations. Chaque valeur de r est la moyenne de 5 mesures. σ_e est l'écart-type de la dispersion constatée des 5 mesures.

La partie supérieure du tableau 2 se rapporte aux irradiations réalisées dans l'emplacement 42, la partie inférieure à celles réalisées dans l'emplacement 46.

On détermine ainsi :

. emplacement 42	$\bar{r} = 3,41$
. emplacement 46	$\bar{r} = 3,30$

Ces 2 valeurs en 42 et 46 sont respectivement la moyenne de 15 et 27 mesures. L'analyse de la dispersion de ces valeurs et de l'erreur qui leur est affectée, fait l'objet du paragraphe suivant.

On détermine ainsi la précision de la méthode G. A. M. I. N.

III.3 - Précisions des mesures G. A. M. I. N. :

On a vu :

$$r = 10^{-7} \frac{\Delta R/R}{s(\text{Te}, D)} \frac{1}{A_{\text{Ni}}}$$

Soit à considérer, dans la détermination de l'erreur sur r :

- l'homogénéité du lot de graphite (identité de tous les G. A. M. I. N. entre eux en ce qui concerne r),
- la précision des mesures de résistances conduisant à ΔR ,
- la fidélité à long terme de l'appareil de mesure de résistance (étalon R),
- la statistique de comptage de l'activité nickel,
- la précision sur l'étalon d'activité utilisé A ,
- la précision sur la relation $s(\text{Te}, D)$
- la précision sur T ,
- l'indétermination même du paramètre r étudié, qui peut varier en particulier dans le temps, à la suite par exemple de fluctuations de spectre liées à des changements plus ou moins limités du milieu. Il n'est pas toujours possible de connaître les causes de telle variation de r , et d'en tenir compte.

Dans beaucoup de cas, il a été possible d'utiliser plusieurs G. A. M. I. N. (5 en général), en des positions voisines supposées identiques en ce qui concerne la réponse G. A. M. I. N. On obtient alors un indice r résultant par moyenne des n valeurs $r_{\text{élem}}$ obtenues à partir de chacun des n G. A. M. I. N. employés

$$r = r_{\text{résultant}} = \frac{\sum r_{\text{élémentaire}}}{n}$$

Si l'on suppose que les n G. A. M. I. N. élémentaires mis en oeuvre sont bien tous dans les mêmes conditions neutroniques, leur dispersion n'est plus conditionnée que par :

- l'homogénéité du graphite (identité en ce qui concerne r des G. A. M. I. N. considérés),
- la précision de mesure de ΔR (précision et fidélité à court terme de l'appareil de mesure),
- la statistique de comptage de l'activité Nickel.

L'étalon nickel employé, $Te. D. s. Te. D)$ sont les mêmes pour les n G.A.M.I.N. élémentaires et n'intervient donc pas ici, de même qu'un éventuel manque de fidélité à long terme.

Soit σ_e la dispersion constatée (écart-type) des $r_{\text{élémentaires}}$ autour de la valeur $r_{\text{résul.}}$.

On dispose de plusieurs jeux de mesures permettant de déterminer σ_e .

Ce sont les mesures de l'emplacement 42 et de l'emplacement 46 (tableau 1) et les mesures DIDO (tableau 18) et l'ensemble des autres mesures du tableau 1 affectées d'une valeur σ_e ; les mesures non affectées d'un σ_e n'ont pas pu faire l'objet de mise en oeuvre de G.A.M.I.N. élémentaires et n'ont donc pas pu conduire à des valeurs de σ_e .

On calcule, pour chaque jeu, la valeur moyenne de σ_e correspondante.

On trouve :

	$100 \sigma_e / r$	Nombre d'ensemble de $n^{(*)}$ mesures élémentaires
DIDO	$1,15 \pm 0,25$	5
42	$1,0 \pm 0,1$	15
46	$1,1 \pm 0,1$	27
tous les autres cas	$1,2 \pm 0,1$	26
moyenne générale	1,1	73

(*) $n \sim 5$

Tableau 3

La dispersion constatée entre $r_{\text{élémentaire}}$ est donc remarquablement bien définie. Elle est de $\sigma_e = 1,1 \%$ (écart-type) dans les conditions normales de mesures (voir entre autres chapitre 2).

C'est bien ce qu'on peut attendre de la composition des erreurs de mesure d'activité, de mesure de ΔR et d'homogénéité du graphite.

La dispersion correspondante sur r diminue lorsque n augmente ; elle est de l'ordre de $\sigma_e / \sqrt{n-1}$.

Les autres causes d'erreur pourront être analysées par l'observation de résultats de $r = r_{\text{résul.}}$ répétées successivement. A côté des erreurs introduites par la technique de mesure ($Te. s. (Te. D)$, étalons A et R etc.) intervient la fluctuation du paramètre r lui-même au cours du temps (évolution du réacteur et de l'environnement du point de mesure).

Les 15 mesures de $r = r_{\text{résul.}}$ à l'emplacement 42 d'Isis et les 27 mesures à l'emplacement 46, rapportées tableau 2, permettent cette analyse. On constate une dispersion (écart-type) de 1% en 42 et $1,7 \%$ en 46.

Soit la décomposition suivante d'une part en termes de dispersion des $r_{\text{élémentaires}}$, soit $1,1 \% / \sqrt{5-1}$ et d'autre part en termes de dispersion relative aux autres risques d'erreur, la somme quadratique de ces erreurs étant l'erreur globale constatée.

	Composantes de $\Delta r / r$		$\Delta r / r$ total
	comptage Ni. homogénéité G et mesure ΔR	- $Te. s.$ étalons A et R - fluctuation même du paramètre r	
Isis emplacement 42 (2ème semestre 1971)	0,5 %	0,8 %	1 %
Isis emplacement 46 (1971-1972)	0,6 %	1,6 %	1,7 %

erreur constatée (dispersion sur les r mesurés)

Tableau 4

Deux caractéristiques principales distinguent les mesures "42" et "46" : la gamme de température est plus étendue dans le 2ème cas (20 à 180°C contre 35 à 55°C) ainsi que l'étalement dans le temps (8 mois contre 20 mois). Mais aucun n'explique la différence trouvée dans la dispersion ; en effet, la dispersion constatée pour les mesures "46" ne diminue pas significativement si l'on restreint les gammes de température et de temps retenues.

On retiendra que l'emplacement 42 a fait l'objet de mesures particulièrement précises, caractérisant r au 2ème semestre 1971. On admettra d'autre part que dans la composition des erreurs, seul le terme σ_p est susceptible d'être réduit une multiplication des mesures, ce qui conduit assurément à une estimation de l'erreur par excès.

Soit l'erreur sur r à l'emplacement 42 Isis (fin 1971) :

$$100 \Delta r/r = \sqrt{(0,8)^2 + \frac{(1,1)^2}{15 \times 5}} = 0,8$$

$$r = 3,41 \pm 0,025 \text{ (Isis - emplacement 42 - fin 1971)}$$

et l'erreur sur r à l'emplacement 46 Isis :

$$100 \Delta r/r = \sqrt{(1,6)^2 + \frac{(1,1)^2}{27 \times 5}} = 1,6$$

$$r = 3,30 \pm 0,05 \text{ (Isis - emplacement 46 - 1971/72)}$$

Plus généralement, en moyenne, on retiendra que l'erreur sur une mesure réalisée à l'aide de n G.A. M.I. N. au total en une ou plusieurs irradiations est de

$$100 \Delta r/r \sim \sqrt{(1,2)^2 + \frac{(1,1)^2}{n}}$$

$$100 \Delta r/r \sim 1,2 \sqrt{1 + \frac{1}{n}}$$

Suivant les conditions de mesure (température comprise entre 30 et 50°C), du des essais limitées dans le temps ...) l'erreur pourra être moindre. Elle pourra être supérieure aussi : température mal connue par exemple d'erreur correspondante peut-être déduite de la courbe $s(Te, D)$, emploi en dehors ou au voisinage des limites ci-après, etc..

III.4 - Limites de validité de l'étalonnage :

L'étalonnage du dosimètre G.A. M.I. N. a conduit à la formule de correction $s(Te, D)$ vue plus haut. Cette formule étant purement empirique, il faut déterminer précisément la gamme de doses D et de température Te dans laquelle elle peut être appliquée sans entraîner d'erreur supérieure à celle déterminée en III.3.

Le tableau 5 ci-dessous regroupe les résultats de 11 irradiations (2 en 42 et 9 en 46) qui conduisent à des valeurs sensiblement différentes des valeurs moyennes déterminées au paragraphe III.2.

Ces irradiations contribuent à déterminer les limites supérieures de D et de Te à ne pas dépasser lors de mesures avec le dosimètre G.A. M.I. N.

III.4.1 - Dose maximale d'irradiation :

Les irradiations 14 a et 14 b conduisent à $r = 3,30$, valeur trop faible de 3 à 4 % par rapport à la valeur moyenne en 42. Ces irradiations sont caractérisées par une dose particulièrement élevée $D = 43$ %. Par contre, l'irradiation n° 2 (tableau 2) conduit à une valeur r tout à fait correcte pour une dose D de 34 %. La dose maximale, pour des températures voisines de l'ambiante (30°C à 50°C) est donc située vers 35 %. Cette limite diminue lorsque la température augmente. On peut estimer (irradiation 504 en particulier) qu'elle est vers 10% ou légèrement au delà pour $Te = 170^\circ\text{C}$.

Emplace	N°	Date	P kW	t mn	θ °C	Te °C	$\Delta R/R$ %	A_{Ni} 10^{10}	s	δ %	r	σ_r
42	14 a	25.1.72	760	1090	45	44	42,6	158,8	0,816	52,2	3,29	0,01
	14 b	25.1.72	760	1090	45	44	42,8	158,8	0,815	52,5	3,31	0,01
46	29	23.8.71	620	75	194	198	1,070	7,183	0,418	2,557	3,42	0,02
	30	27.8.71	790	60	194	195	1,120	7,650	0,431	2,599	3,40	0,01
	37	17.11.71	860	60	194	194	1,181	8,173	0,429	2,754	3,37	0,05
	39	3.12.71	700	380	194	195	4,375	45,48	0,280	15,63	3,44	0,02
	502	19.10.72	790	30	194	191	0,597	3,951	0,468	1,277	3,23	0,05
	31	31.8.71	110	510	194	224	0,989	8,298	0,313	3,162	3,94	0,05
	32	6.9.71	730	75	235	234	0,964	9,010	0,272	3,548	3,91	0,01
	33	7.9.71	110	510	195	227	0,891	8,182	0,314	2,837	3,60	0,05
	41	20.12.71	680	120	250	248	1,132	14,26	0,189	5,99	4,20	0,03

Tableau 5

III.4.2 - Température maximale d'irradiation.

Les irradiations 31, 32, 33 et 41 (tableau 5) à température comprise entre 220 et 250 °C conduisent à des valeurs de r tout à fait incohérentes.

Les irradiations 20, 30, 37 et 39 (tableau 5) à $T_e = 195^\circ\text{C}$ conduisent à $r = 3,41$ au lieu de $r = 3,30$ en 46 soit un écart de 3 %.

Les irradiations 40, 501, 504 et 507 (tableau 2) à $T_e = 171^\circ\text{C}$ conduisent à des valeurs tout à fait cohérentes avec l'ensemble des valeurs de r en 46.

Donc :

- . la formule s'applique parfaitement à $T_e = 170^\circ\text{C}$,
- . elle entraîne une erreur par excès de 3 % à $T_e = 195^\circ\text{C}$,
- . elle conduit à des résultats aberrants pour $T_e > 220^\circ\text{C}$.

La limite d'application rigoureuse de la formule $s(T_e, D)$ est située entre 170°C et 195°C . On admet comme limite 180°C (un emploi jusqu'à 200°C serait possible, si nécessaire, en faisant une correction minime de quelques %).

III.4.3 - Température minimale d'irradiation.

La limite inférieure de température d'irradiation T_e est imposée par le phénomène de guérison d'une partie des défauts radio-induits créés lors de l'irradiation. Le transport et le stockage des dosimètres irradiés effectués à température ambiante (20 à 25°C) et leur mesure à 25°C . Il n'est pas souhaitable d'irradier à des températures trop voisines de celles-ci (et en tout cas, pas inférieures), ce qui conduirait à une guérison après irradiation mal définie.

L'irradiation n° 36 (température vraie 20°C , température équivalente 29°C) qui conduit à une valeur r correcte, permet de fixer la limite inférieure à $T_e = 30^\circ\text{C}$.

III.4.4 - Dose minimale d'irradiation.

La limite inférieure en dose est imposée par la précision de la mesure de la résistance électrique de l'échantillon de graphite.

L'erreur sur une mesure $\Delta R = R_2 - R_1$ est évaluée à $5 \mu\Omega$ (écart-type) somme quadratique des 3 erreurs ci-dessous :

- . erreur d'appréciation à la lecture : $3 \mu\Omega$ (écart-type)
- . instabilité propre du graphite : $3 \mu\Omega$ (")
- . événements extérieurs incontrôlés : $3 \mu\Omega$ (")

La valeur typique de résistance électrique des échantillons de graphite est $40\,000 \mu\Omega$. Une dose d'irradiation $D < 1\%$ (soit $R/R < 400 \mu\Omega$) conduit alors à une erreur relative $> 1\%$ (rapport $5 \mu\Omega / 400 \mu\Omega$).

Le terme d'erreur statistique $\frac{1\%}{\sqrt{n}}$ attaché à une mesure G.A.M.I.N. par x dosimètres est alors accru.

Bien que l'étalonnage ait été assuré jusqu'à $D \approx 0,3\%$, il est souhaitable, pour ne pas perdre en précision, de s'imposer $D_{\text{mini}} = 1\%$.

En conclusion, la gamme de dose D et de température T_e d'emploi du dosimètre G.A.M.I.N. est définie par :

$30^\circ\text{C} < T_e < 180^\circ\text{C}$ $1\% < D < D_{\text{max}}$ avec $D_{\text{max}} = 35\%$ à $T_e = 30^\circ\text{C}$ $D_{\text{max}} = 10\%$ à $T_e = 180^\circ\text{C}$
--

La relation $\phi_G = 4,8 \cdot 10^{17} \delta$ (voir chapitre II.1.2) permet d'exprimer les limites en fluences d'irradiation :

$$5 \cdot 10^{15} \text{ n.cm}^{-2} < \phi_G < 2 \cdot 10^{17} \text{ n.cm}^{-2}$$

*

*

*

CHAPITRE IV - ETALONNAGE DE LA REPOSE G. A. M. I. N.

INDICES DE SPECTRES ET NOMBRE DE DEPLACEMENTS ATOMIQUES.

IV.1 - Introduction :

On recherche une proportionnalité entre variation de résistivité électrique et nombre d'atomes déplacés. La variation de résistivité électrique est considérée à 40°C et corrigée des phénomènes de saturation ; c'est la grandeur mesurée δ (voir chapitre 2). Le nombre d'atomes déplacés d est calculé, connaissant la répartition énergétique de fluence neutronique $\phi(E)$:

$$d = \int \phi(E) w_G(E) dE$$

où $w_G(E)$ est la fonction nombre de déplacements atomiques par unité de fluence à l'énergie E .

Diverses fonctions $w_G(E)$ existent dans la littérature ; notre problème se pose de rechercher s'il en est qui permettent de définir une constante d_0 telle qu'on puisse écrire la relation de proportionnalité :

$$d = \int \phi_j(E) w_G(E) dE = d_0 \delta_j$$

pour l'ensemble des couples $[\phi_j(E) \text{ (calculé)}, \delta_j \text{ (mesuré)}]$ correspondant à l'ensemble des cas de pile possibles j .

Nous verrons plus loin que la fonction $w_G(E)$ recommandée par EURATOM en [1] est la meilleure.

En fait, on sait qu'il est beaucoup plus sûr, tant dans le calcul que dans la mesure, de ne pas rechercher la valeur absolue d'une grandeur, mais d'exprimer sa valeur par rapport à une autre grandeur prise comme référence des niveaux de flux à l'emplacement considéré.

C'est la réponse de la réaction $^{58}\text{Ni} (n, p) ^{58}\text{Co}$ qui constituera ici la grandeur de référence ; elle est bien adaptée à notre problème, et son emploi fait l'objet d'un accord tacite international.

Si $\sigma_{Ni}(E)$ est la section efficace de cette réaction, on peut alors calculer le rapport

$$\frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE}$$

qui ne dépend plus que de la répartition énergétique de $\phi_j(E)$, et non plus de sa valeur absolue.

Mieux, on peut définir l'indice de spectre donné par le rapport des flux de fission équivalents :

$$\left(\phi_G / \phi_{Ni} \right)_j = \frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{\int w_G(E) x(E) dE} \frac{\int \sigma_{Ni}(E) x(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE} \quad (10)$$

où $x(E)$ est le spectre de fission,

ϕ_G est la fluence équivalente de fission pour la réaction graphite considérée [1]

ϕ_{Ni} est la fluence équivalente de fission pour la réaction nickel considérée [1]

et on note que l'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} ne dépend ni des valeurs absolues des fluences $\phi(E)$, ni non plus des valeurs absolues des fonctions $w(E)$ et $\sigma(E)$. Seules les répartitions suivant E importent.

On mesure d'autre part l'activité dans le nickel, ce qui permet la détermination expérimentale du nombre $A_j = \int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE$ des réactions $^{58}\text{Ni}(n, p) ^{58}\text{Co}$ par noyaux Ni. d'où l'indice expérimental $r_j : 10^{-7} \delta_j / A_j$ (le facteur 10^{-7} est introduit pour raison de convenance d'écriture des valeurs numériques de r).

Notre problème est alors de rechercher une fonction $w_G(E)$ qui permette de définir une constante α telle que l'on puisse écrire la relation de proportionnalité :

$$\left(\phi_G / \phi_{Ni} \right)_j = \alpha r_j \quad (11)$$

pour l'ensemble des cas de piles possibles j .

Le facteur d_0 ci-dessus s'en déduira suivant :

$$d_0 = 10^{-7} \alpha \frac{w_G^f}{\sigma_{Ni}^f} \quad (1)$$

où σ_{Ni}^f et w_G^f sont les valeurs moyennes sur un spectre de fission des fonctions $\sigma_{Ni}(E)$ et $w_G(E)$:

$$\sigma_{Ni}^f = \frac{\int \sigma_{Ni}(E) \chi(E) dE}{\int \chi(E) dE} \quad (13)$$

$$w_G^f = \frac{\int w_G(E) \chi(E) dE}{\int \chi(E) dE} \quad (14)$$

Enfin, on peut définir une grandeur ϕ_{G0} telle que $\phi_G = \phi_{G0} \delta$ avec $\phi_{G0} = d_0 / w_G^f$.

La relation (11) peut s'écrire :

$$\alpha = \frac{1}{r_j} \frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE} \frac{\int \sigma_{Ni}(E) \chi(E) dE}{\int w_G(E) \chi(E) dE} \quad (15)$$

et l'on voit que α - comme ϕ_G / ϕ_{Ni} - dépend des répartitions de $w_G(E)$, $\sigma_{Ni}(E)$ et $\chi(E)$.

La relation (12) peut s'écrire, compte tenu de la forme (15) de :

$$d_0 = \frac{10^{-7}}{r_j} \frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE}$$

et l'on voit que d_0 dépend des fonctions $w_G(E)$ et $\sigma_{Ni}(E)$ en répartition mais pas en valeur absolue. Par contre, d_0 ne fait appel à aucune définition de spectre de fission et est donc indépendant du choix de $\chi(E)$.

Enfin, on peut écrire :

$$\phi_{G0} = \frac{10^{-7}}{r_j} \frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{w_G^f} \frac{1}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE}$$

où ϕ_{G0} dépend des répartitions de $w_G(E)$, $\sigma_{Ni}(E)$ et $\chi(E)$ et de la valeur absolue de $\sigma_{Ni}(E)$.

Les répartitions $\sigma_{Ni}(E)$ et $\chi(E)$ font l'objet d'un accord général à peu près satisfaisant pour ce qui nous intéresse ici, et le choix critique d'une répartition $w_G(E)$ est, entre autres, l'objet du présent travail. On peut donc espérer une détermination à peu près complète de la constante α . Ce n'est pas le cas de la constante d_0 ; la valeur absolue de w_G peut être considérée comme conventionnelle, et il n'y a pas d'accord général sur les valeurs absolues de $\sigma_{Ni}(E)$; nous ferons un choix et on se souviendra que d_0 reste proportionnel aux valeurs absolues de $\sigma_{Ni}(E)$, de même que ϕ_{G0} .

IV.2 - Valeurs utilisées ; erreurs.

a) constantes introduites :

Plusieurs formes de spectre de fission existent. Il y a en particulier les formes de

CRANBERG $\chi(E) = 0.45274 e^{-1.0363E} \sinh \sqrt{2.29 E}$

LEACHMAN $\chi(E) = 0.76985 e^{-0.775E} \sqrt{E}$

où E est exprimé en MeV.

Plusieurs fonctions $w_G(E)$ sont envisagées. C'est d'abord celle recommandée par Euratom [1] reproduite au tableau 6, fondée sur le modèle de THOMPSON WRIGHT [9]. Nous verrons que c'est celle dont la répartition est retenue ici, à la fois parce que consacrée par l'usage et bien cohérente avec les résultats de mesure ; c'est en effet une fonction qui permet d'écrire ... (suite page 13) ...

Energie (MeV)	Energie inférieure de groupe	Δe	σ_{Ni} mb	w_G^f EURATOM	w_G^f/w_G^f		
					ID	LG	LM
0	14 MeV	0,238	610	0,853	0,703	0,611	1,176
1	7,788	0,25	650	0,905	0,923	0,727	1,247
2	6,053	0,25	643	0,830	0,734	0,753	1,012
3	4,7237	0,25	569	0,787	0,698	0,726	0,922
4	3,6788	0,25	383	1,155	1,061	1,100	1,438
5	2,8050	0,25	219	1,231	1,029	1,170	1,451
6	2,2313	0,25	110	0,917	0,872	0,905	0,941
7	1,7577	0,25	53,7	0,941	0,890	0,953	0,905
8	1,3553	0,25	13,7	0,973	0,987	0,990	0,920
9	1,0540	0,25	4,5	1,038	1,068	1,060	0,981
10	0,8208	0,25	0,4	1,086	1,131	1,095	1,010
11	0,6393	0,25	0	1,096	1,172	1,119	1,010
12	0,4979	0,25		1,071	1,182	1,118	0,981
13	0,3877	0,25		1,021	1,152	1,089	0,924
14	0,3020	0,25		0,961	1,136	1,036	0,855
15	0,2352	0,25		0,884	1,107	0,970	0,766
16	0,1832	0,25		0,789	1,029	0,883	0,630
17	0,1426	0,25		0,684	0,943	0,785	0,594
18	0,1111	0,25		0,571	0,815	0,688	0,537
19	86,52 keV	0,25		0,473	0,703	0,588	0,500
20	67,38	0,25		0,390	0,597	0,493	0,501
21	49,87	0,50		0,287	0,464	0,383	0,388
22	24,79	0,50		0,187	0,308	0,261	0,280
23	15,03	0,50		0,121	0,208	0,176	0,170
24	9,11	0,50		0,075	0,127	0,112	0,100
25	5,53	0,50		0,046	0,076	0,071	0,069
26	3,35	0,50		0,027	0,047	0,044	0,043
27	2,04	0,50		0,019	0,026	0,028	0,027
28	1,235	0,50		0,007	0,017	0,017	0,017
29	0,742	0,50		0,006	0,011	0,011	0,010
30	0,455	0,50		0,004	0,005	0,005	0,005
31	0,276	0,50		0,002	0,004	0,004	0,004

Tableau 6

N.B. : $w_G^f = 720 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ pour le modèle EURATOM.

la relation (11) avec une valeur α constante pour tous les cas. En ce qui concerne sa valeur absolue, nous la considérerons comme conventionnelle : les valeurs w_G^f correspondantes varient très peu avec le choix de $\chi(E)$ (voir tableau 7).

Les autres fonctions $w_G(E)$, fondées sur le modèle de LINDHARD [10], sont celles de DULIEU [11], notée plus loin LD, celle calculée par GERVAISE selon [12] notée LG et celle de MORGAN [13], notée LM. Elles sont représentées au tableau 6.

Les valeurs $\sigma_{Ni}^f(E)$ possibles sont nombreuses [11] et conduisent à des valeurs de σ_{Ni}^f variant entre 100 et 110 mb et au-delà. En répartition relatives, elles sont toutes assez voisines.

2 fonctions $\sigma_{Ni}(E)$ sont retenues ici, qui sont sensiblement équivalentes en répartition, mais non en valeur absolue :

- . la répartition du tableau 6 issue des données de LISKIEN et PAULSEN [1]
- . la répartition de CARTER [16]

On a ainsi :

		$10^{27} \sigma_{Ni}^f \text{ cm}^2$		$10^{24} w_G^f \text{ dep. cm}^2$
		LISKIEN	CARTER	EURATOM
$\chi(E)$	CRANBERG	105	107	720,5
	LEACHMAN	101	103	718

Tableau 7

La valeur $\sigma_{Ni}^f = 107 \text{ mb}$ est celle traditionnellement utilisée par l'U.K.A.E.A., la valeur 101 mb est celle convenue au C.E.A. (piles d'irradiation).

La valeur $w_G^f = 720 \cdot 10^{-24} \text{ dep. cm}^2$ peut être considérée comme une excellente approximation, quelque soit la forme $\chi(E)$ retenue.

b) il s'agit d'abord de trouver α , constante quelque soit j :

$$\alpha = \frac{1}{r_j} \left(\frac{\phi_G}{\phi_{Ni}} \right)_j \quad \text{d'après la relation (11) ci-dessus.}$$

La mesure de r_j est décrite dans le présent rapport, en particulier au chapitre I. Elle peut être bonne, ou moins bonne, caractérisée par l'erreur Δr qui lui est associée (écart-type). Normalement, cette erreur est très faible ($\Delta r/r \sim 1\%$) elle peut être plus grande, si, par exemple, la température d'irradiation n'est pas suffisamment connue.

Le calcul de ϕ_G / ϕ_{Ni} (relation (2)) suppose le choix d'une répartition $w_G(E)$, choix qui sera fait plus loin. Le choix de $\sigma_{Ni}(E)$ n'a pas d'incidence sur ϕ_G / ϕ_{Ni} , les répartitions possibles étant équivalentes, comme on l'a dit plus haut. Enfin, l'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} varie comme σ_{Ni}^f / w_G^f lorsque la forme $\chi(E)$ change. Il en résulte de 3 % lorsqu'on remplace la forme $\chi(E)$ de LEACHMAN par celle de CRANBERG.

Le calcul de $\left(\phi_G / \phi_{Ni} \right)_j$ demande le calcul du spectre $\phi_j(E)$. Il est plus ou moins entaché d'erreur si l'on connaît mal les données d'entrée de calcul correspondant à la géométrie de la mesure r_j , si les codes de calcul neutronique utilisés imposent des simplifications de géométrie, enfin, si ces codes sont contestables dans leur principe même pour les applications considérées.

c) il s'agit de plus de trouver d_0 , déduit de α suivant la relation (12) :

$$d_0 = \alpha 10^{-7} w_G^f / \sigma_{Ni}^f$$

équivalent (voir plus haut) à :

$$d_0 = \frac{10^{-7}}{r_j} \frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE}$$

Il est nécessaire de définir ici non seulement les répartitions, mais les valeurs absolues des fonctions $w_G(E)$ et $\sigma_{Ni}(E)$.

Le problème des répartitions est vu ci-dessus pour α : il n'induit pas d'erreur sensible.

Les valeurs absolues peuvent être repérées en considérant leur valeur moyenne sur un spectre choisi, un spectre de fission par exemple.

Nous considérerons ultérieurement d_0 pour une fonction $\sigma_{Ni}(E)$ conduisant à $\sigma_{Ni}^f = 101$ mb sur le spectre $\chi(E)$ de LEACHMAN (soit 105 mb sur le spectre de CRANBERG).

Il doit être bien clair que la notion de spectre de fission n'intervient ici que pour repérer une amplitude de $\sigma_{Ni}(E)$, mais n'a strictement aucune incidence sur d_0 .

IV.3 - Choix de la fonction $w_G(E)$ et détermination de α . Données :

À l'intérieur d'un ensemble de spectres neutroniques trop voisins, il est exclu de pouvoir constater des effets de spectres et il n'y a pas a priori de fonction $w_G(E)$ - parmi celles possibles - qui permette mieux qu'une autre la définition de la constante α de la relation (11). C'est par exemple le cas de l'ensemble des spectres de pile à H_2O , où la grandeur mesurée r_j varie peu d'un spectre à un autre, de même que, pour une fonction $w_G(E)$ donnée, la grandeur calculée

$$\frac{\int w_G(E) \phi_j(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_j(E) dE}$$

Il n'est donc pas question de procéder au choix de la fonction $w_G(E)$ qui minimiserait les variations d'un spectre à l'autre du rapport de ces deux grandeurs, elles-mêmes déjà à peu près constantes.

C'est entre les spectres de pile à graphite d'une part et ceux de pile à eau (lourde ou légère) d'autre part qu'on peut constater une grande variation des deux grandeurs r_j et $\frac{\int w \phi_j dE}{\int \sigma \phi_j dE}$ (variation d'un facteur 2).

La fonction $w_G(E)$ à retenir est alors celle qui maintiendra au mieux constant le rapport de ces deux grandeurs et la quantité α (relation (11)).

$$\alpha_i = \frac{1}{r_i} \frac{\int w_G(E) \varphi_i(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \varphi_i(E) dE} = \frac{\sigma_{Ni}^f}{w_G^f}$$

En fait, nous considérerons les cas de pile à H₂O, le cas de BR.2, le cas de DIDO, qui forment 3 ensembles assez comparables, et nous considérerons le cas des piles à graphite.

Nous ne retenons ici que les mesures pour lesquelles on dispose aujourd'hui d'un calcul de spectre suffisamment élaboré.

Les cas de pile à H₂O : OSIRIS, ISIS, PEGASE, MELUSINE, HFR :

Le tableau 8 ci-après récapitule l'ensemble des cas où l'on dispose d'une mesure de r et d'un calcul de σ_G / σ_{Ni} avec fonction w de EURATOM et spectre de fission de CRANBERG

Cas de pile	N° de fiche	r mesuré	Méthode de calcul de σ_G / σ_{Ni} et référence	$\alpha = \frac{1}{r} \frac{\sigma_G}{\sigma_{Ni}}$
HFR G5	K	3,62	SAND II [17]	0,463
E7	K	3,74	"	0,454
H3	K	4,28	"	0,451
ISIS 42	chap. III	3,41	APOLLO [18] [20]	0,531
46	chap. III	3,30	"	0,533
OSIRIS Coeur Maxi-clio	W	3,73	APOLLO [18] [20]	0,509
Coeur Colibri	U	3,35	TRIPOLI [19] [22]	0,525
Réflecteur H ₂ O	U	3,42	"	0,488
Réflecteur H ₂	U	4,03	"	0,514
PEGASE Boucle	L	3,54	" [19] [23]	0,506
MELUSINE Coeur	M	2,93	APOLLO [24] DTF 4	0,502
TRITON réflecteur				
HEBE AV	O	3,48	APOLLO [18] [21]	0,509
HEBE AR	O	3,66	"	0,503
boite à sardines	P	2,93		0,500

Tableau 8

Soit $\alpha = 0,507$

$\sigma_\alpha = 0,025$ (écart-type de la distribution des 14 valeurs ci-dessus)

(N.B. : pour établir la moyenne - mais non l'écart type - on élimine les 2 valeurs HFR E7 et H3 qui s'écartent de plus de 2σ sur la totalité des points, $\alpha = 0,500$).

On ne dispose pas, dans tous les cas du tableau 8 des spectres mais uniquement du résultat final σ_G / σ_{Ni} ; il n'est donc pas possible de recommencer systématiquement dans tous les cas les calculs de σ_G / σ_{Ni} sur la base des autres fonctions $w_G(E)$; c'est d'autre part superflu ; il nous suffit de disposer de quelques cas de spectre pile à H₂O pour calculer de combien α change lorsqu'on change de modèle $w_G(E)$, quelque soit le spectre, dans le cadre des spectres à H₂O.

Le tableau 9 donne les valeurs α correspondant à 3 cas typiques retenus (spectre de fission de CRANBERG) :

	r	$\alpha = \frac{1}{r} \frac{\sigma_G}{\sigma_{Ni}}$			
		EUR	LD	LG	LM
OSIRIS coeur Maxi-clio	3,73	0,509	0,559	0,532	0,498
PEGASE boucle	3,54	0,506	0,554	0,528	0,497
TRITON Hébé	3,66	0,503	0,548	0,524	0,493
Valeurs caractéristiques H ₂ O		0,506	0,554	0,528	0,496

Tableau 9

Ces cas correspondent bien aux valeurs moyennes de α : à tout autre cas à valeurs α_{EUR} plus grande ou plus petite correspondraient des valeurs α_{LD} , α_{LG} et α_{LM} plus grandes et plus petites dans des proportions sensiblement identiques.

La pile BR.2 (H₂O - Be) :

	N° de fiche	r mesuré	Méthode de calcul de $\frac{\phi_G}{\phi_{Ni}}$ et référence	$\alpha = \frac{1}{r} \frac{\phi_G}{\phi_{Ni}}$		
				EUR	ID	LG
Canal D 240 (beryllium)	R	3,24	DTF 4 [25]	0,512	0,557	0,533
Canal F 166	R	3,25	DTF 4 [25]	0,525	0,572	0,547
Valeurs caractéristiques BR.2				0,518	0,564	0,540

(spectre de fission de CRANBERG)

Tableau 10

La pile DIDO :

On a, chapitre VI, $r = 3,80 \pm 0,05$

Le spectre correspondant conduit aux résultats suivants :

	$\alpha = \frac{1}{r} \frac{\phi_G}{\phi_{Ni}}$			
	EUR	ID	LG	LM
DIDO graphite	0,500	0,575	0,537	0,500

(spectre de fission de CRANBERG)

Tableau 11

La pile au G :

	N° de fiche	r mesuré	Méthode de calcul de $\frac{\phi_G}{\phi_{Ni}}$ et référence	$\alpha = \frac{1}{r} \frac{\phi_G}{\phi_{Ni}}$		
				EUR	ID	LG
BR.1	H	7,25	APOLLO [20]	0,512	0,609	0,559
BEPO	J	8,2	MONTÉ CARLO [9]	0,515	0,606	0,560
Valeurs caractéristiques pile au graphite				0,513	0,607	0,560

(spectre de fission de CRANBERG)

Tableau 12

Choix de $w_G(E)$:

On récapitule les tableaux précédents :

	α			
	EUR	ID	LG	LM
Spectre H ₂ O	0,506	0,554	0,528	0,496
Spectre BR.2	0,518	0,564	0,540	0,510
Spectre DIDO	0,500	0,575	0,537	0,500
Spectre Graphite	0,513	0,607	0,560	0,510

Tableau 13

Comme on l'a dit plus haut, c'est essentiellement la comparaison entre spectres notablement différents c'est-à-dire entre les cas de pile au graphite d'une part et les cas de pile à eau (lourde ou légère) d'autre part, qui permet de juger des fonctions $w_G(E)$ utilisées.

On voit que la fonction $w_G(E)$ conduit à une valeur α qui :

- n'est pas fonction du spectre dans le cas du modèle EURATOM et dans le cas LM de MORGAN. Dans le cas EURATOM, la valeur α relative au spectre graphite est bien située parmi les valeurs α relatives aux autres cas. Il en est presque de même dans le cas LM.
- varie par contre de 8 % en moyenne entre graphite et autres spectres dans le cas ID.
- varie de 5 % en moyenne entre graphite et autres spectres dans le cas LG.

Ces écarts de 5 % et 8 % dépassent largement les dispersions de valeurs entre cas de pile voisins. Ils sont significatifs ; les fonctions $w_G(E)$ ID et LG sont trop peu sensibles aux hautes énergies de neutron.

Par contre, $w_G(E)$, fondée sur le modèle de THOMPSON-WRIGHT et recommandée par EURATOM, convient bien. La fonction $w_G(E)$ fondée sur le modèle de LINDHARD et calculée par MORGAN convient presque aussi bien. C'est principalement l'usage qui nous conduit à conserver la précédente. Toutes deux correspondent d'ailleurs aux mêmes valeurs de α .

Valeurs de α :

Le tableau 14 récapitule les valeurs de α données précédemment : l'écart-type donné est soit l'écart observé s'il y a suffisamment de mesures, soit à défaut estimé égal à celui établi pour l'ensemble des cas H₂O :

Type de pile	Nombre de mesure	α	Ecart-type calculé ou estimé
H ₂ O (OSIRIS)	12	0,506	0,025
H ₂ O-Be (BR.2)	2	0,518	0,025
D ₂ O (DIDO)	4	0,500	0,006
G	2	0,513	0,025

(spectre de CRANBERG)

Tableau 14

Il est difficile de savoir si l'on peut, et comment, traiter statistiquement l'ensemble de résultats. En surestimant sans doute les erreurs, on adopte une valeur $\alpha = 0,505 \pm 1\%$, pour le spectre de fission de CRANBERG.

Avec le spectre de LEACHMAN, on aurait $\alpha = 0,490 \pm 1\%$.

Le tableau 15 récapitule l'ensemble des considérations de ce chapitre :

	Spectre de fission choisi		σ_{Ni} considéré comme exact	
	LEACHMAN	CRANBERG	LISKIEN	CARTER
α	0.490	0.505	$\sim$ indépendant des valeurs absolues	
σ_{G0}	$\sim$ indépendant		varie comme l'inverse de σ_{Ni} moyen (moyenne sur un spectre de fission par exemple)	
			$4,8 \cdot 10^{17} \text{ n.cm}^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{17} \text{ n.cm}^{-2}$
d_0	indépendant		$3,47 \cdot 10^{-4}$	$3,40 \cdot 10^{-4}$

Tableau 15

On adopte :

$\alpha = 0,50 \pm 0,01$ dans tous les cas (quelque soit le spectre de fission et σ_{Ni})

$$\begin{aligned} \sigma_{G0} &= 4,8 \cdot 10^{17} \text{ n.cm}^{-2} \\ d_0 &= 3,47 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{pour } \sigma_{Ni} (E) \text{ donné tel que} \\ \sigma_{Ni}^f = 101 \text{ mb (spectre de LEACHMAN) ou } 105 \text{ mb (spectre de CRANBERG)} \end{array} \right.$$

en rappelant :

$$\begin{aligned} \sigma_G / \sigma_{Ni} &= \alpha r \\ d &= d_0 \delta \\ \sigma_G &= \sigma_{G0} \delta \end{aligned}$$

Remarque :

Sur la base de ces résultats, et pour le graphite considéré, on a, pour un nombre initial de paires lacune-interstitiel créées de 10^{-4} par atome, une augmentation résiduelle (à 40°C) de résistance de 29 %.

Si l'on admet, pour fixer les idées, un facteur 1,6 environ entre résistance induite à -270°C et résistance résiduelle à 40°C (d'après [26]), on peut dire que :

10^{-4} paires lacune-interstitiel créées par atome (selon modèle de THOMPSON-WRIGHT) induisent une variation de résistance de 45 % de la résistance initiale.

CHAPITRE V - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE MESURE DANS DIVERS REACTEURS.

Depuis 1971, de nombreuses mesures ont été réalisées avec le dosimètre
G.A. M.I.N. dans une dizaine de réacteurs situés en Europe :

Réacteur	Implantation	Type	Nombre emplacements étudiés	Nombre dosimètres
OSIRIS - ISIS	Saclay - France	H ₂ O	10	600
TRITON	Fontenay "	"	5	43
SHOE - MELUSINE	Grenoble "	"	2	22
PEGASE	Cadarache "	"	1	9
E.L.3	Saclay "	D ₂ O	1	12
RAPSODIE	Cadarache "	Rapide	3	105
HARMONIE	" "	"	1	2
PROSPERO	Valduc "	"	1	5
BR.1	Mol - Belgique	Graphite	1	24
BR.2	" "	H ₂ O-Be	2	20
HFR	Petten - Pays-Bas	H ₂ O	9	33
FRJ2	Julich - R. F. A.	D ₂ O	2	14
PLUTO-DIDO	Harwell - G. B.	D ₂ O	1	9(+6)
DRAGON	Winfrith - "	RHT-Grap	4	25

Tableau 16

On voit, d'après le tableau ci-dessus, que c'est environ un millier de
dosimètres qui ont été utilisés dans les spectres les plus divers.

Le tableau 17 récapitule l'ensemble des mesures réalisées avec le dosimè-
tre G.A. M.I.N. ; on y trouve les principales caractéristiques de chaque irra-
diation et la valeur moyenne ou les valeurs extrêmes de l'indice r obtenu dans
chaque cas. Les fiches suivantes (A à X) donnent les résultats détaillés relatifs
à chaque mesure ainsi que les conditions d'irradiation.

Réacteur - emplacement	Fiche	Date	T / Te °C	ΔR/R %	N	r	σ _r	Δr	En collaboration avec
PLUTO (Harwell) - D ₂ O - type DIDO									
. Pluto : élém. comb. Mark V, barillet G	A	21.2.71	45 / 63	1,3	3	3,85	0,09		S. B. Wright et H. J. Luntz
. Pluto : élém. comb. Mark V, " Al		22.5.71	75 / 76	28	6	3,95	0,02		S. L. W. Simmons
. Dido-Pluto : condition d'étalonnage graphite PGA (antérieur à 1963) (irradiation comparée à ISIS de PGA et G.A. M.I.N.)	B	-	Voir fiches B & J	-		3,96	0,06	0,08	D. T. Kelly
BR.2 (Molich) - D ₂ O - type DIDO									
. Elém. comb. vierge Mark V, D ₂ O	C	22.10.71	363 16 / 313 42	3 à 8	7	4,22	0,03	0,1	B. W. Hasekloper
. Elém. comb. brûlé Mark V, D ₂ O		22.10.71	363 46 / 358 45	2 à 6	7	4,01	0,03	0,1	et W. Schaefer
BR.1 (Saclay) - D ₂ O									
. Emplacement DS 1 (modérateur)	D	27.5.74	74 / 68	4,3	12	4,05	0,07		
HARMONIE (Cadarache) - rapide	E	13.2.69	35 / 54	1	2	10,437,4 (1) (4)	-	0,5	J. L. Campan
Canal tangentiel dans la couverture contre le coeur									
PROSPERO (Valduc) - bloc Pu	F	4.11.71	35 / 96	0,5	5	3,43 (1)	0,03	?	J. Morin
Centre coeur									
RAPSODIE (Cadarache) rapide	G	6.1.73	1538167/1568168	134	105				J. Kremser
Conte coeur-réflecteur, 3 dispositifs à 1, 2 ou 3									
élém. comb. voisins (résultats comparables)									
. extrémités						21,6317,2 (2)	-	0,6	
. niveau médian						34,639,01 (2)	-	0,3	
BR.1 (Mol) - graphite	H	3.7.72	18 / 38	1,2	12	7,42	0,14		J. Debrue
Canal milieu cellule G, parallèle et à égale		2.10.73	41 / 64	1,5	12	7,25	0,07		N. Maene
distance des barres d'uranium									
DRAGON (Winfrith) - graphite (HTR)	I	1.7.73	803 95 / 833 119	1 à 2	25	4,6 à 5,7 (1)	-	0,1	M. R. Everett L. J. Hankart
Coeur : 4 emplacements suivant un rayon									
PLUTO (Harwell) - graphite	J		voir fiche J -			8,2	0,12	0,15	
Conditions d'étalonnage PGA (antérieur à 1963)									
BR.1 (Petten) - H ₂ O	K	14.9.71	21 / 28 à 35	1,3 à 2,7	3	3,60	0,05		W. L. Zijp
. Coeur bloc Al (essai préliminaire)		10.11.71	30 / 40 à 48	1 à 2	2x3	3,61-3,62	0,03-0,05		
. Coeur bloc Al. Zone centrale									
2 emplacements grille		10.11.71	30 / 41 à 46	1 à 1,8	4x3	3,70 - 3,76	0,01-0,03		
. Coeur bloc Al. Zone médiane						3,75 - 3,76	0,02-0,04		
4 emplacements grille		14.9.71	21 / 38 à 42	0,7 à 1	3	4,26	0,04		
. Réflecteur (3). Voisinage Be									
(essai préliminaire)		10.11.71	30 / 49 à 56	0,430,8	3x3	4,22-4,29	0,02-0,02		
. Réflecteur (3). Voisinage Be						4,34	0,03		
3 emplacements grille									
PEGASE (Cadarache) - H ₂ O	L	22.2.71	44 / 22	0,8	9	3,40 à 3,67 ⁽⁴⁾	-	?	J. M. Renard
Réflecteur, boucle. Mesure en couronne (Ø18mm)									
SHOE-MELUSINE (Grenoble) - H ₂ O	M	5.6.72	32 / 26 à 34	0,832,2	14	2,93	0,04		J. J. Dornan P. Mis
. Coeur 1,2 élément Al entouré U		5.6.72	22 / 26 à 38	0,632,1	8	2,69	0,06		
. Réflecteur (3) (4cm H ₂ O, pas d'Al)									
TRITON (Fontenay-aux-Roses) - H ₂ O	N	13.6.72	58 à 67/62 à 67	3,2 35,5	9	3,47	0,06		
. Réflecteur (3). Four acier Chouca (Ø3cm)									
. Réflecteur (3). Tube acier (Ø2cm)									
Chargement acier dans élément Al contre	N	13.6.72	38/31	9 à 11	4	3,30	0,05		
four ci-dessus ; 2 cm du coeur									
Idem ; 6 cm du coeur	N	13.6.72	34/35	4 à 5	4	3,37	0,025		
. Réflecteur (3). Four acier Hébé (Ø7,3 cm)	O	11.10.72	63 / 70 à 74	2 à 3	8	3,66 à 3,48	-	0,06	
avec écran de plomb de 1,5 cm d'épaisseur									
. Réflecteur (3). Bloc acier de 35x15,5 cm	P	10.4.73	62/66	3,243,8	11	2,93	0,04		
axe à 4 cm du coeur (pas d'Al)									
. Réflecteur (3). Bloc acier de	Q	9.10.73	63 à 73/73 à 81	2,233,5	11	3,4 à 3,8	-	0,06	
37,5 x 2,5 x 6 cm. axe à 4 cm du coeur									
(pas d'Al)									
. Réflecteur (3). Dans H ₂ O à 4 cm du coeur	P	10.4.73	35 / 47 à 51	1 à 2	7	2,46	0,03		

nom de l'installation	Site	Date	T ₁ T ₂ °C	ΔH R	N	r	σ _r	Δr	En cours
- FRJ2 (D₂O - H₂O)									
Coeur - 2 emplacements 1 et 2 (éléments combustibles voisins (résultats identiques))	R	22.11.72	40/51 / 45/51	1,5 3,5	29	3,24	0,04		P. Vande K. Piter
- OSIRIS (SIS (S₁) - H₂O)									
- Emplacements de référence :									
- Coeur. Elément Al entouré d'éléments combustibles (trou 42)	(5)	22.12.73	37 à 51 / 34 à 50	0,13 31	75	3,41	0,04	0,025	
- Coeur. Elément Al. Four acier Choura (Ø3cm) entouré d'éléments combust. (trou 45)	(5)	"	20/173 / 29 à 172	0,3 323	135	3,30	0,04	0,05	
- Idem mais barre de commande (Co) voisine basse	(5)	"				idem + 2 %			
- Réflecteur (5), dans bloc Be pas d'Al	S	19.8.71	48/59	0,9	4	4,30	0,06		
- Réflecteur (5), 1ère périphérie dans H ₂ O (pas d'Al) 4 cm du coeur	S	22.2.73	29.44	1,5	7	2,58	0,03		
- Coeur - trou 42 - dans l'eau (pas d'Al)	T	23.1.74	34/45	1,25	7	2,91	0,09		
- Coeur - trou 42 - 1/2 élément Al entouré d'U	T	17.1.74	35/33	1,6	7	3,02	0,06		
- Expériences d'irradiation (maquettes)									
- Coeur. Elément Al Four acier Colibri (Ø3cm) chargement graphite	U	11.1.71	32/41	1,3	10	3,35(4)	0,05		
- Réflecteur (3) Four acier Colibri (Ø3cm) chargement G, voisinage Be	U	12.1.71	52/60	1,5	8	4,03(4)	0,07		
- Réflecteur (3) Four acier Colibri (Ø4 cm) chargement G, voisinage H ₂ O	U	21.1.71	42/56	2,5	11	3,42(4)	0,04		
- Réflecteur (3) Four acier Colibri (Ø4 cm) chargement G, voisinage complexe (voisinage introduit par calcul)	U					4,17	-		
- Coeur. Boucle Spiffire (Ø7cm) chargement U - graphite	V	17.9.70	48/75	1,4	5	3,62(4)	0,04		
- Coeur. Four acier Maxi-Chlo (Ø7cm) chargement G - environnement U	W	9.8.72	45 / 53 à 62	1,333,5	54	3,67 à 3,78	-	0,06	
- Coeur. Elément Al. 3 dispositifs Four acier Colibri (Ø3 cm) chargement graphite (résultats comparables)	X	22.10.73	44 à 62/60 à 88	0,6 à 1,8	40	2,9 à 3,5	-	0,05	
- Réflecteur, éprouvettes acier. 10 cm de H ₂ O		23.9.74	50-47	3	6	2,45			

(1) Variation de l'indice en allant vers le centre du coeur.
 (2) Valeurs extrêmes de l'indice suivant un cercle de Ø33 mm centré sur l'emplacement d'irradiation.
 (3) Réflecteur : milieu 1ère périphérie à 4 cm du coeur dans un bloc d'Al sauf mention contraire.
 (4) Mesure réalisée avec l'ancien lot de graphite étalon. Ces résultats ont été divisés par le facteur 1,14 de façon à les rendre cohérents avec l'ensemble des mesures (voir annexe 5).
 (5) L'ensemble de ces irradiations fait l'objet du chapitre 3.

Tableau 17

CHAPITRE VI - APPLICATION AUX DETERMINATIONS DE FLUENCES DE DOMMAGES DIVERSES.

VI.1 - Nouvelles unités internationales [1] et [4] :

Flux de fission équivalent graphite ϕ_G et nombre de déplacement d.

L'application est immédiate. L'étalonnage G.A.M.I.N. ayant été établi sur la base de ces unités au Chapitre IV. On en rappelle très brièvement ici les conclusions récapitulées d'autre part au tableau 15 :

$$\phi_G / \phi_{Ni} = \alpha r$$

$$d = d_0 \delta$$

$$\phi_G = \phi_{G0} \delta$$

$$\text{avec } \phi_{G0} = 4,8 \cdot 10^{17} \text{ n.cm}^{-2} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{variant suivant } \sigma_{Ni} \\ \text{(voir chapitre IV)} \end{array} \right.$$

$$d_0 = 3,47 \cdot 10^{-4}$$

et $\alpha = 0,50 \pm 0,01$ quelles que soient les hypothèses.

Et on rappelle que $d = w_G \phi_G$ avec $w_G = 720 \cdot 10^{-24} \text{ dép.cm}^2$.

VI.2 - Le flux Equivalent Nickel DIDO pour le graphite ϕ_{Ni}^{END} :

Le tableau ci-dessous récapitule les divers résultats obtenus dans le réacteur type DIDO (voir [29]) :

Emplacement d'irradiation	N° de fiche	r _i	ω _i	r _c
Pluto barillet G	A	3,85 ± 0,09	1,005	3,83 ± 0,09
Pluto barillet Al	A	3,95 ± 0,02	1,045	3,78 ± 0,02
Dido Pluto 1962	B	3,96 ± 0,08	1,015 ± 0,02	3,9 ± 0,1
FRJ2 D ₂ O-Al	C	4,01 ± 0,1	1,00	4,0 ± 0,1

Tableau 18

avec 1ère colonne : caractéristique de l'emplacement d'irradiation i.

2ème colonne : n° de la fiche correspondante (Annexe VI).

3ème colonne : valeur de r trouvée r_i dans les conditions de la mesure, et erreur estimée (écart-type).

4ème colonne : correction de chargement ω_i à apporter à r pour obtenir la valeur r_c correspondant à un canal entièrement chargé en graphite. La grandeur ω_i est issue de calculs de spectres par méthode APOLLO (d'après [36]).

5ème colonne : valeurs $r_c = r_i / \omega_i$ et dispersion estimée (écart-type estimé).

On en déduit une valeur moyenne r pour un canal empli graphite et la dispersion moyenne correspondante (pondération par les dispersions estimées)

$$r = 3,80 \pm 0,05 \text{ (estimation de l'écart-type de la dispersion des résultats)}$$

La valeur de l'indice de spectre trouvée par calcul est la même suivant deux méthodes de MONTE-CARLO indépendantes, mises en oeuvre à Harwell et à Saclay (voir [29]).

On trouve, pour un canal empli graphite :

nombre d'atomes déplacés par unité de flux nickel : $1\,366 \cdot 10^{-24}$

soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1,90$ (le spectre de fission étant le spectre de CRANBERG)

On sait que l'unité de flux Equivalent Nickel DIDO ϕ^{END} est définie par convention parmi les cas possibles par un nombre de déplacements par atome égal à $1300 \cdot 10^{-24}$ [1]. La valeur correspondante de r est donc de $r = 3,80 \frac{1300}{1366}$

Soit, dans l'emplacement standard de DIDO défini par $d = 1\,300 \cdot 10^{-24}$ par unité de ϕ_{Ni}

$$r = 3,6 \text{ dans DIDO (défini par } 1\,300 \text{ dpa)}$$

Et on rappelle à toutes fins utiles $\phi_G / \phi^{END} = 1300 \cdot 10^{-24} / 720 \cdot 10^{-24}$

soit $\phi_G / \phi^{END} = 1,80$.

VI.3 - $\phi_{(75 \text{ keV})}$:

On peut montrer, d'après [37] et [38] la relation :

$$\phi_G \sim \phi_{(75 \text{ keV})} \equiv \int_{75 \text{ keV}}^{\infty} \phi_{E'}(E') dE'$$

valable pour tous les spectres de coeur et de réflecteur de pile (mais non de protection).

En effet, soit une fluence ϕ_1 à répartition spectrale donnée $\phi_1(E)$, on sait qu'on a, par définition [1] :

$$\phi_G = \frac{\int_0^{\infty} w_G(E') \phi_1(E') dE'}{\int_0^{\infty} w_G(E') \chi(E') dE'} \int_0^{\infty} \chi(E') dE' \quad (\text{où } \chi(E') \text{ est le spectre de fission})$$

Si on pose :

$$\phi_G = \beta \int_E^{\infty} \phi_1(E') dE'$$

on définit une relation $\beta(E)$, propre au spectre ϕ_1 , notée ϕ_1 sur la figure 10 ci-dessous. Un même type de relation $\beta(E)$ relative au spectre ϕ_2 , puis ϕ_3 , ... etc peut être de même établie. Ces relations sont notées ϕ_2 , ϕ_3 ... etc sur la figure 10.

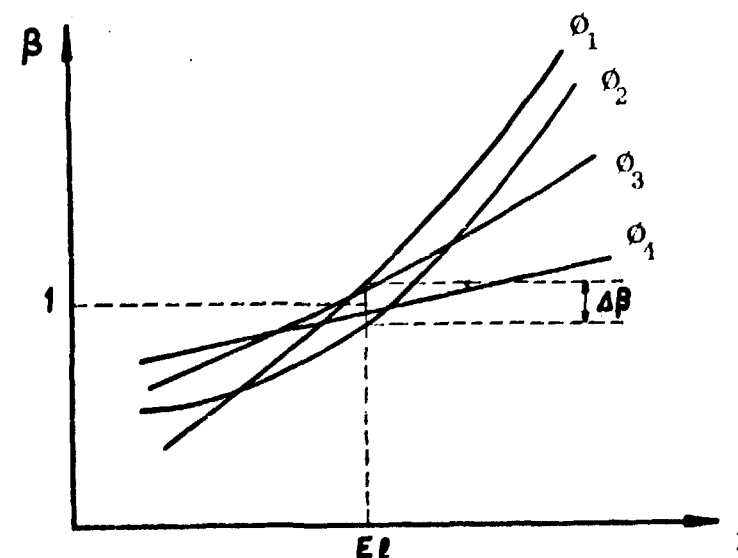


Figure 10

Il existe une valeur E_f de E telle que la répartition des valeurs relatives aux divers spectres $\phi_1, \phi_2, \dots$ etc. se regroupe à l'intérieur d'une plage d'amplitude de $\Delta\beta$ minimale.

La forme des spectres de pile (protections exceptées) et de la fonction w_i situent ce minimum de $\Delta\beta$ aux environs de $\beta = 1$. La variation de $\Delta\beta$ est aux variations de β et E au voisinage de $\beta = 1$, ce qui autorise le choix $\beta = 1$ soit :

$$E_f = 75 \text{ keV} \quad \text{et} \quad \beta = 1 \pm 8 \%$$

soit :

$$\phi_G = \phi_{(75 \text{ keV})} \pm 8 \%$$

d'où

$$\phi_{75 \text{ keV}} / \phi_{Ni} \sim \alpha r$$

Le tableau 19 ci-après montre qualitativement, et sur quelques cas typiques comment $\phi_{(75 \text{ keV})}$ est assimilable à ϕ_G .

VI.4 - Application aux autres matériaux - Aciers.

En ce qui concerne les dommages radio-induits, on sait [1] qu'on peut caractériser la dose d'irradiation par une quantité

$$\int w_i(E) \phi(E) dE$$

ou par toute autre quantité proportionnelle, telle la fluence de fission équivalente

$$\phi_i^f = \frac{1}{w_i} \int w_i(E) \phi(E) dE$$

$$\text{ou } \phi_i^f = \frac{\int w_i(E) \chi(E) dE}{\int \chi(E) dE} \quad \text{et } \chi(E) \text{ est le spectre de fission.}$$

La fonction $w_i(E)$ est une fonction d'efficacité des neutrons en ce qui concerne le dommage induit considéré dans le matériau considéré. Un choix, plus ou moins satisfaisant suivant les cas, est de prendre pour fonction $w_i(E)$, la proportion de déplacements atomiques induits dans le matériau considéré.

La quantité ci-dessus $\int w_i(E) \phi(E) dE$ est alors le nombre total d'atomes déplacés d_i , et le flux de fission équivalent ϕ_i^f est le rapport de d_i au nombre w_i^f de déplacements dans le spectre de fission unité.

Ces considérations sont développées en [1].

On a vu qualitativement au chapitre I et particulièrement sur la figure 1 comment l'emploi du graphite (fonction $w_G(E)$) et du nickel (réaction $\sigma_{Ni}(E)$) peut permettre de connaître par interpolation la réponse de n'importe quelle fonction de dommage $w_i(E)$ si cette fonction est connue.

Plus précisément, le tableau 19 suivant donne, pour différents spectres typiques de pile, les diverses valeurs de ϕ_j , ramenées à $\phi_{Ni} = 1$, c'est-à-dire les diverses valeurs des rapports ϕ_j / ϕ_{Ni} , calculées suivant les fonctions $w_j(E)$ données au chapitre I.

	Spectre de fission	TRITON (réflecteur)	OSIRIS	DIDO	Graphite R. H. T.	Rapide	
						cœur	cœur - couverture
ϕ_{Ni}	1	1	1	1	1	1	1
$\phi_{75} \text{ (Fer Zones)}$	1	1,28	1,73	1,82	2,29	3,16	4,74
ϕ_G	1	1,25	1,71	1,80	2,26	2,98	4,43
$\phi_{(75 \text{ keV})}$	0,99	1,26	1,72	1,80	2,23	3,12	4,67
$\phi_d \text{ (Fer déplacements)}$	1	1,08	1,29	1,33	1,50	1,86	2,44
ϕ_w	1	1,08	1,32	1,33	1,51	1,93	2,56
$\phi_{(300 \text{ keV})}$	0,93	1,02	1,31	1,28	1,50	2,20	3,03
$(\phi_G)^{1/2}$	1	1,11	1,30	1,34	1,50	1,73	2,10

Tableau 19

On voit déjà que $(\phi_G / \phi_{Ni})^{1/2} \sim \phi_d / \phi_{Ni}$

c'est-à-dire que

$$\phi_d \sim (\phi_G \cdot \phi_{Ni})^{1/2}$$

La moyenne géométrique entre ϕ_G et ϕ_{Ni} constitue une assez bonne approximation de ϕ_d pour une gamme large de spectres neutroniques. Il est logique d'arriver que toute autre interpolation, plus spécifique d'un spectre donné, et mettant oeuvre ce spectre, conduira à une précision meilleure.

Soit $\phi_k(E)$ ce spectre calculé, et $w_j(E)$ la fonction efficacité neutronique envisagée (par exemple $w_d(E)$, etc...)

Soit le rapport calculé ϕ_G / ϕ_{Ni}

$$\left(\phi_G / \phi_{Ni}\right)_c = \frac{\int w_G(E) \phi_k(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_k(E) dE} \times \frac{\sigma_{Ni}^f}{w_G^f}$$

et la valeur mesurée du même rapport :

$$\left(\phi_G / \phi_{Ni}\right)_m = a r$$

Soit la grandeur cherchée ϕ_j / ϕ_{Ni}

$$\phi_j / \phi_{Ni} = \frac{\int w_j(E) \phi_k(E) dE}{\int \sigma_{Ni}(E) \phi_k(E) dE} \times \frac{\sigma_{Ni}^f}{w_j^f}$$

différentes méthodes de calculs peuvent conduire de la mesure r au rapport

ϕ_j / ϕ_{Ni} ci-dessus :

IV.4.1 - Famille de spectres :

On a vu, ci-dessus, que pour une large famille de spectres (cœur et réflecteur de pile), on a, pour le fer :

$$\phi_d \sim (\phi_G \cdot \phi_{Ni})^{1/2} \pm 15 \%$$

soit $\phi_d / \phi_{Ni} \sim (a r)^{1/2}$

(17)

Pour une gamme plus restreinte de spectres, on peut trouver une relation empirique du même type plus précise. C'est le cas de la pile rapide par exemple étudiée en [31] et qui se résume dans le tableau 20 ci-dessous. On trouve encore les valeurs calculées de ϕ_G / ϕ_{Ni} et ϕ_d / ϕ_{Ni} .

Emplacement		ϕ_G / ϕ_{Ni}	ϕ_d / ϕ_{Ni}	$\left(\frac{\phi_G}{\phi_d} \cdot \frac{\phi_d}{\phi_{Ni}}\right)^{1/2}$
R _{cm}	P _{cm}			
0	0	2,98	1,86	1,22
-10	0	3,16	1,92	1,22
-20	0	4,30	2,37	1,25
-30	0	7,53	3,59	1,26
-40	0	12,51	5,42	1,23
0	22,5	3,52	2,07	1,21
0	24,5	4,44	2,44	1,25
0	27,5	6,51	3,27	1,25
0	30,5	8,91	4,21	1,23

Rapsodie - Relation entre ϕ_d et ϕ_G

Tableau 20

On voit par exemple ici que, dans la limite des cas envisagés (Rapsodie, $R \leq 30$ cm et $|P| \leq 40$ cm), il n'est pas besoin de connaître le spectre et que, à mieux que 2 % près, on a

$$\phi_d / \phi_{Ni} = \frac{1}{1,22} \left(\phi_G / \phi_{Ni}\right)^{3/4} \quad (18)$$

Soit à Rapsodie ($R \leq 30$ cm et $|P| \leq 40$ cm) pour le fer (atomes déplacés

$$\phi_d / \phi_{Ni} = \frac{(a r)^{0,75}}{1,22}$$

Le même type de relation peut être développé pour d'autres fonctions $w_j(E)$ et d'autres familles de spectre. Ce type de relation est intéressant lorsqu'on ne veut pas recalculer le spectre, pour chacune des mesures d'une même série, par exemple, ou bien lorsqu'on connaît mal le spectre (paramètres mal connus, géométrie difficile à calculer).

IV.4.2 - Spectre $\Omega_j(E)$ calculé connu :

Soit $\Omega_j(E)$ le spectre calculé. Il doit conduire à une valeur (Ω_G / Ω_{Ni}) calculée, proche de la valeur mesurée ar , ou égale à cette valeur. Le calcul du flux Ω_j^f est alors envisageable à l'aide de ce spectre.

Les fonctions $w_j(E)$ sont telles que le flux Ω_j^f se trouvera toujours compris entre Ω_{Ni} et Ω_G (figure 1 et tableau 19). On déterminera alors Ω_j par le calcul du rapport Ω_j / Ω_G ou du rapport Ω_j / Ω_{Ni} en choisissant celui de ces 2 rapports qui est le plus proche de l'unité. C'est pratiquement toujours Ω_j / Ω_G , comme on peut le voir tableau 19 ; on rappelle ici que $\Omega_{d\text{ Fer}}$ et Ω_W constituent un extrême le plus loin de Ω_G et le plus près de Ω_{Ni} parmi les flux de dommage, alors que Ω_{7S} constitue l'autre extrême voisin Ω_G .

On écrit donc :

$$\Omega_j / \Omega_{Ni} \approx \left(\Omega_j / \Omega_G \right)_{\text{calculé}} \quad (19)$$

avec une erreur de l'ordre de : $ar - \Omega_G / \Omega_{Ni}$

On détermine ainsi, par exemple, à TRITON, pour le Fer :

	Dispositif d'irradiation (réflecteur)		
	nE.d.E. v.	nE.d.E. r.	Boîte source
$\Omega_G / \Omega_{Ni} \approx ar$	1,74	1,83	1,46
$\left(\Omega_G / \Omega_{Ni} \right)_{\text{calculé}}$	1,77	1,84	1,46
erreur	2 %	1 %	0
$\Omega_{7S} / \Omega_{Ni}$	1,78	1,85	1,48
$\Omega_{d\text{ Fer}} / \Omega_{Ni}$	1,34	1,37	1,19

Tableau 21

IV.4.3 - Fonction w_{7S} dans les aciers :

Ce modèle dit de "zones stables", ZS, est susceptible d'être celui qui rend le mieux compte des doses pour les variations de propriétés mécaniques dans les aciers [20]. On peut voir (figure 1, tableaux 19 et 21) que, quel que soit le spectre, on peut écrire :

$$\Omega_{7S} = \Omega_G \cdot 1,3 \quad (20)$$

CORRECTION DITE DE TEMPERATURE EQUIVALENTE

([2] et [3])

Il est d'usage de considérer comme une fonction de la fluence Φ et de la température T , l'effet de l'irradiation sur les matériaux de structure des réacteurs (dommages radio-induits).

Il est bien évident, et bien connu, que l'information "fluence Φ " n'est pas complète, et qu'il est nécessaire d'en considérer la décomposition suivant un terme de flux φ et un terme de durée d'irradiation t (cas simplifié d'une irradiation à flux φ constant).

On se convaincra aisément de la nécessité de considérer le flux φ et la durée t - non pas seulement le produit $\varphi t = \Phi$ - par rapprochement avec les lois d'activation d'un nuclide en pile ; l'analogie est qualitativement valable, la température d'irradiation T jouant dans le matériau irradié un rôle à rapprocher (suivant l'équivalence (A1) ci-dessous) de celui de la constante radioactive $\lambda = 1/\tau$ du radioisotope formé.

De même que l'activation du nuclide est fonction de φ , t et λ , l'induction de dommages d'irradiation est fonction de φ , t et T .

L'usage est de réduire ce nombre de variables à 2 pour le cas au graphique en particulier. Ce sont la fluence $\Phi = \varphi t$ d'une part, et d'autre part une température T_e déduite de la température réelle par une correction qui prend en compte la durée de l'irradiation t . C'est classiquement la correction dite de température équivalente définie pour compenser ce qu'on appelle effet de durée d'irradiation, ou effet de vitesse d'irradiation, ou encore effet de niveau de flux.

Ceci suppose qu'on connaît suffisamment bien les lois composées des effets de température et de durée d'irradiation pour les utiliser à la définition d'une variable réduite, présentée ici comme une température équivalente. Des modèles existent, qui sont sans doute acceptables pour une correction, et surtout dans le cadre de la gamme d'emploi de G. A. M. I. N.

Il faut considérer schématiquement la création de dommages radio-induits en 2 stades principaux ici ; au premier stade, le choc neutronique induit des premiers défauts instables n et ces défauts se combinent au deuxième stade pour induire les plus gros défauts d , stables et responsables de l'effet macroscopique constaté. Ce mécanisme de combinaison est fonction en particulier de la probabilité de rencontre des premiers défauts n , c'est-à-dire de leur densité.

C'est en ce qui concerne le premier stade que l'analyse avec les phénomènes d'activation est immédiate. Plus concrètement, considérons, pour simplifier, le premier stade à un seul type de premier défaut, n , et non pas plusieurs, comme on le verra plus bas. Soit N la densité en défauts du type n ; ils sont créés en nombre w par unité de flux φ , et disparaissent en nombre λN : λ est en particulier proportionnel à la probabilité $e^{-Q/kT}$, pour un défaut n , de ne pas être arrêté par son énergie de liaison Q lors d'une tentative de quitter son site par agitation thermique.

$$\lambda = A e^{-Q/kT} \quad (k = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K} \text{ constante de Boltzman}) \quad (A1)$$

$$dN/dt = w \varphi - \lambda N \quad (A2)$$

$$N = w \frac{\varphi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{où l'on reconnaît l'équation de l'activation}$$

qu'on peut écrire :

$$N = w \frac{\Phi}{u} (1 - e^{-u}) \quad \text{avec } u = \lambda t \quad (A3)$$

Le deuxième stade considère les disparitions λN ; certaines se font par combinaison entre défauts n , et conduisent aux défauts d , en densité Δ , responsables des effets macroscopiques constatés. La probabilité de ces combinaisons entre défauts n est évidemment une fonction directe de la densité N , que nous appellerons $f(N)$. Les autres disparitions sont des annihilation par recombinaison avec des défauts préexistants, porosité, etc.

On peut donc écrire :

$$\frac{d\Delta}{dt} = \lambda N \cdot f(N)$$

soit :

$$\frac{d\Delta}{d\phi} = w (1 - e^{-u}) f \left[w \frac{\phi}{u} (1 - e^{-u}) \right]$$

ou bien, si l'on prend pour simplifier $f(N) = (aN)^d$, avec $d > 0$:

$$k \frac{d\Delta}{d(\phi^{d+1})} = \frac{(1 - e^{-u})^{d+1}}{u^d}$$

On voit dans l'une ou l'autre de ces 2 dernières relations (A4) et (A4 bis) que Δ ne dépend pas de 3 paramètres indépendants ϕ , φ ou t , et λ (c'est à dire T), mais seulement des 2 paramètres ϕ et u dans le cadre du modèle élémentaire employé ici.

En fait, la convention classique n'est pas d'utiliser directement ϕ et u mais ϕ et une variable de Température, plus parlante. C'est la température dite équivalente T_e , qui conduit, pour des conditions standard de niveau de flux φ_0 , à la valeur de u caractéristique de l'irradiation dans ses conditions réelles de flux φ et de température T .

Soit, ϕ étant donné, $t_0 = \phi / \varphi_0$

$$u = \lambda t = \lambda_e t_0 \quad \text{avec } \lambda_e = A e^{-Q/kT_e}$$

c'est-à-dire $\varphi / \lambda = \varphi_0 / \lambda_e$

d'où la relation classique [27]

$$\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T} = \frac{k}{Q} \text{Log} \frac{\varphi}{\varphi_0}$$

(A5)

On mesure une valeur $Q = 1,2$ eV pour les températures comprises entre 150°C et 225 C [27] et $Q = 4,0$ eV au-delà de 600 C [3].

On montre ([2] et [3]) que les premiers défauts induits au premier stade constituent une population de types i divers, caractérisés par des énergies d'activation Q_i comprises probablement entre 0,5 eV et plus de 5 eV, en passant par les valeurs 1,2 et 4,0 eV citées ci-dessus.

On peut montrer de plus ([2] et [3]) que, parmi ces différents types i de défaut, un seul est à retenir pour une température T donnée, et en ce qui concerne les effets de température T et de durée t considérés ici, c'est-à-dire en ce qui concerne l'incidence de la variable $u = t \lambda = t A e^{-Q/kT}$.

En effet, on voit que d'une part u varie très vite avec la température et que d'autre part (relation [A4 bis]), des valeurs trop petites ou trop grandes de u conduisent à des variations $d\Delta/d\phi$ très faibles.

De même, pour une température donnée T , u varie très vite avec Q , et parmi les différents Q_i , on peut distinguer celle Q_j qui donne à u une valeur u_j non nulle et limitée.

C'est ce défaut j , et lui seul qui est à retenir en pratique pour la température considérée.

- les défauts caractérisés par $Q_i > Q_j$ sont immobiles ($u_j \sim 0$) et ne peuvent se rencontrer et se combiner pour concourir à Δ
- les défauts caractérisés par $Q_i < Q_j$ sont très instables (u_j grand) fugitifs et en densité trop faible ($N \sim 0$) pour avoir une probabilité notable de se rencontrer et de concourir à Δ .

En conséquence, le modèle à un seul type de défaut, et la relation (A5) sont à retenir ; mais le type de défaut à considérer, c'est-à-dire l'énergie Q , est variable suivant les températures considérées.

On peut définir ainsi le tableau ci-dessous :

T	- 30°C 110 225 (500) 1200					
Q	0,45 eV ?	0,9	1,2	1,5	4,0	4.0 ou plus

Tableau A.1

On voit que dans le domaine variant entre la température ambiante et quelques 300°C, le choix d'une valeur unique $Q = 1,2$ eV constitue une bonne moyenne des valeurs possibles, et son emploi ne doit pas introduire d'erreur importante.

Le graphite étalon anglais PGA [27] a été étalonné avec mise en oeuvre de la relation (A5), et avec emploi de $Q = 1,2$ eV. Et c'est en particulier suivant ces conventions qu'il est employé ici (fiches J et B).

Plutôt qu'une valeur moyenne de Q , nous avons, quant à nous, adopté une continue de Q , considérée comme une meilleure approximation de la variation réelle par saut du tableau ci-dessus.

On définit alors Q par $u \cdot e^{-\frac{Te}{Q}}$ et on choisit par exemple la valeur u défini par $Q = 1,2$ eV à $T = 190^\circ\text{C}$ (milieu de l'intervalle de définition expérimentale de cette valeur)

$$\text{soit } \frac{kT}{Q} = 8,6 \cdot 10^{-5} \frac{190 + 273}{1,2} = 0,033$$

La relation (A5) peut alors s'écrire :

$$\frac{T - T_e}{T_e} = \frac{kT}{Q} \log \frac{\varphi}{\varphi_0} = 2,3 \frac{kT}{Q} \log_{10} \frac{\varphi}{\varphi_0} = 0,075 \log_{10} \frac{\varphi}{\varphi_0}$$

$$\frac{T - T_e}{T_e} = 0,075 \log_{10} \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad (A6)$$

Un accroissement de température de 7,5 % (exprimée en °K) est équivalente à une diminution de flux d'un facteur 10.

C'est la relation démontrée plus précisément en [2] et [3], et qui est retenue ici en particulier pour l'emploi du G. A. M. I. N.

Dans le présent rapport, nous utiliserons la valeur de φ_0 correspondant aux flux régnant dans l'emplacement 46 d'ISIS à 800 kW, soit

$$\varphi_G = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}.$$

*

* *

ANNEXE II

DETERMINATION DE LA FORMULE $s(T_e, D)$

L'ensemble des résultats du tableau 2 (chapitre III) a permis de déterminer une formule empirique représentant rigoureusement les valeurs expérimentales.

La fonction $s(T_e, D)$ représente l'effet de température d'irradiation et de saturation :

$$s(T_e, D) = \frac{\Delta R/R}{\delta}$$

où δ est la variation relative de résistance électrique que l'on aurait mesurée en l'absence d'effet de saturation et pour une température équivalente d'irradiation de 40°C .

La figure 9 représente $s(T_e, D)$ en fonction de D pour diverses valeurs de T_e (ordonnées linéaires, abscisses logarithmiques). On voit que chaque courbe comprend 2 parties :

• une droite horizontale d'ordonnée $X(T_e)$ et une droite de pente négative $Y(T_e)$.

On a ainsi, pour $s(T_e, D)$ une équation de la forme :

$$s(T_e, D) = X(T_e) + Y(T_e) \log \left(\frac{D}{D_0} \right) \cdot T' \left(\frac{D}{D_0} \right) \quad (A7)$$

où • D_0 , abscisse du point anguleux, est fonction de T_e

$$\begin{aligned} \bullet T' \left(\frac{D}{D_0} \right) &= 1 \quad \text{si } D \geq D_0 \\ &= 0 \quad \text{si } D < D_0 \end{aligned}$$

Il s'agit maintenant d'explicitier les fonctions $X(T_e)$ et $Y(T_e)$ et de déterminer les valeurs des coefficients intervenant dans leurs équations.

DETERMINATION DES COEFFICIENTS

1. Détermination de D_0 :

Une première observation des données conduit à $D_0 \sim 10^{-2}$. En fait, des ajustements graphiques et quelques essais de fonction D_0 nous ont conduit à

$$D_0 = 0,2 \cdot 10^{-4} T_e + 1,2 \cdot 10^{-2}$$

(T_e en °C)

qu'il est absolument inutile de raffiner mieux.

2. Détermination des équations et des coefficients de $X(T_e)$ et $Y(T_e)$:

Le réseau de courbes $s(T_e, D)$ montre que $X(T_e)$ et $Y(T_e)$ varient tous deux linéairement.

$$X(T_e) = a_1 T_e + b_1$$

$$Y(T_e) = c_1 T_e + d_1$$

$$(A7) \text{ devient } s(T_e, D) = a_1 T_e + b_1 + (c_1 T_e + d_1) \log \left(\frac{D}{D_0} \right) T' \left(\frac{D}{D_0} \right)$$

Les coefficients a_1, b_1, c_1, d_1 sont déterminés par moindres carrés.

On étudie d'abord l'ensemble des irradiations pour lesquelles $T_e > 70^\circ$.

Pour chacune d'elles, on connaît la valeur de s à partir des résultats de mesure

$$\text{soit } U = \sum_i \left(s_i \text{ calculé} - s_i \text{ mesuré} \right)^2$$

en écrivant que la somme des écarts soit être minimum, il vient :

$$\frac{\partial U}{\partial a_1} = \frac{\partial U}{\partial b_1} = \frac{\partial U}{\partial c_1} = \frac{\partial U}{\partial d_1} = 0$$

Pour irradiations, U peut s'écrire :

$$U = \sum_i \left[(a_1 T_i + b_1) + (c_1 T_i + d_1) \log \frac{D_i}{D_0} - s_i \right]^2 \times P_i$$

P_i est le poids tel que $P_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$, σ_i écart-type calculé pour chacune des irradiations à partir de la dispersion des résultats de mesure (si $\sigma \leq 0,03$, on prend $\sigma = 0,03$).

En dérivant l'équation (A9) par rapport aux coefficients, on a :

$$\frac{\partial U}{\partial a_1} = 2 \sum_i T_i \left[a_1 T_i + b_1 + (c_1 T_i + d_1) \log \frac{D_i}{D_0} - s_i \right] \times P_i = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial b_1} = 2 \sum_i \left[a_1 T_i + b_1 + (c_1 T_i + d_1) \log \frac{D_i}{D_0} - s_i \right] \times P_i = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial c_1} = 2 \sum_i T_i \log \frac{D_i}{D_0} \left[a_1 T_i + b_1 + (c_1 T_i + d_1) \log \frac{D_i}{D_0} - s_i \right] = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial d_1} = 2 \sum_i \log \frac{D_i}{D_0} \left[a_1 T_i + b_1 + (c_1 T_i + d_1) \log \frac{D_i}{D_0} - s_i \right] = 0$$

Un programme de calcul en Fortran permet de résoudre ce système de 4 équations à 4 inconnues et de déterminer ainsi les valeurs des 4 coefficients a_1, b_1, c_1, d_1 .

Pour $T_e < 70^\circ\text{C}$, la formule (A8) conduit (avec les coefficients ci-dessus) à des valeurs de s supérieures aux valeurs expérimentales.

Il a donc fallu compléter l'équation (A8) pour qu'elle représente bien l'ensemble des résultats expérimentaux (pour $80^\circ\text{C} < T_e < 30^\circ\text{C}$).

On introduit un terme Δs :

$$\Delta s = s_{\text{calculé}} - s_{\text{mesuré}}$$

Ce terme Δs , fonction de T_e et D , peut être représenté par une équation de même forme que (A8). On détermine alors suivant la même méthode que précédemment les coefficients a_2, b_2, c_2, d_2 de :

$$\Delta s = a_2 T_e + b_2 + (c_2 T_e + d_2) \log \left(\frac{D}{D_0} \right) T' \left(\frac{D}{D_0} \right)$$

Ce terme correctif ne s'applique que s'il est positif.

L'équation complète de $s(Te, D)$ devient alors :

$$s(Te, D) = a_1 Te + b_1 + (c_1 Te + d_1) \log \left(\frac{D}{D_0} \right) T' \left(\frac{D}{D_0} \right) + T \left[a_2 Te + b_2 + (c_2 Te + d_2) \log \left(\frac{D}{D_0} \right) T' \left(\frac{D}{D_0} \right) \right]$$

$$\text{avec } T' \left(\frac{D}{D_0} \right) = 1 \quad \text{si} \quad \frac{D}{D_0} \geq 1$$

$$= 0 \quad \text{si} \quad \frac{D}{D_0} < 1$$

$$\text{et } T(U) = U \quad \text{si} \quad U \geq 0$$

$$= 0 \quad \text{si} \quad U < 0$$

$$a_1 = 4,06 \cdot 10^{-3}$$

$$b_1 = 1,256$$

$$c_1 = 6,6 \cdot 10^{-4}$$

$$d_1 = 1,21 \cdot 10^{-1}$$

$$a_2 = 2,74 \cdot 10^{-3}$$

$$b_2 = 0,202$$

$$c_2 = 2,4 \cdot 10^{-4}$$

$$d_2 = 0,26 \cdot 10^{-2}$$

*

* *

ANNEXE III

EFFET DE GUERISON A TEMPERATURE AMBIANTE

Loi d'évolution

Une partie des défauts radio-induits créés lors des irradiations à température $\leq 100^\circ\text{C}$ et à dose $\leq 20\%$ subissent une guérison spontanée à température ambiante (20°C). L'effet d'irradiation mesuré ΔR dépend ainsi du temps qui s'est écoulé entre la fin d'irradiation et le moment de la mesure. On a choisi de ramener toutes les mesures à 2 jours de "refroidissement". On établit ici la loi de décroissance $\Delta R(t)$ à partir des mesures effectuées au cours du temps sur un ensemble d'échantillons irradiés à des doses et des températures différentes (tableau 1).

On a représenté la variation de $\tau = \frac{\Delta R(t)}{\Delta R(2j)}$ par une formule empirique permettant de corriger toutes les mesures de cette décroissance.

Etablissement de la formule de décroissance :

Les figures A.1, A.2 et A.3 représentent les variations de τ . Trois gammes de température d'irradiation ont été considérées :

- $T < 40^\circ\text{C}$
- $40^\circ\text{C} < T < 55^\circ\text{C}$
- $T > 55^\circ\text{C}$

On a tenté de représenter au mieux les résultats expérimentaux par une formule du type :

$$\tau = A + B e^{-\lambda_1 t} + C e^{-\lambda_2 t}$$

où les coefficients A, B et C peuvent être fonction des 2 variables T et D.

(A10)

N° d'ordre	N° du tableau*	Date	T °C	D %	$A_{Ni} \times 10^{10}$
1	13	6.1.72	37	0,679	1,982
2	36	28.10.71	20	0,977	2,900
3	1	10.6.71	48	1,651	1,890
4	23	30.6.71	43	1,263	3,847
5	-	31.8.71	32	3,87	11,92
6	4	6.8.71	43	8,30	26,85
7	-	16.6.71	54	10	36,7
9	2	16.6.71	54	34,0	123,5
12	21	10.6.71	69	0,99	3,14
13	24	30.6.71	77	1,189	3,942
14	22	16.6.71	77	20,13	84,2
15	-	5.6.72	32	1,7	5,98
16	-	5.6.72	22	1,5	5,69
20	25	6.8.71	77	7,746	29,34

* tableau de l'ensemble des irradiations ISIS chapitre III du présent rapport

Tableau A.2 - Mesures utilisées - Caractéristiques

1. Détermination de A :

Dans l'équation (A.1), A correspond à la valeur de τ au temps ∞ . Pour simuler ce temps ∞ , un certain nombre de G.A.M.I.N. sont recuits pendant 24 heures à 100°C et mesurés ensuite (irradiations n° 1, 3, 7, 13, 16, 20).

Ce phénomène de recuit, décrit l'évolution dans le temps et on peut considérer en première approximation que la valeur de τ ainsi obtenue correspond au temps $t \rightarrow \infty$ ($t \gg \tau$ mais, donc $t \rightarrow \infty$).

Dans le tableau A.2, figurent les valeurs de A.

2. Détermination des périodes T_1 et T_2 :

On calcule maintenant : $\tau = A + B e^{-\lambda_1 t} + C e^{-\lambda_2 t}$.

Pour chaque irradiation, on représente les variations de $\tau - A$ en fonction du temps (figures A.4, A.5, A.6).

La courbe ainsi obtenue peut se décomposer en deux fonctions exponentielles (droites en pointillés sur les figures) dont on détermine les périodes T_1 et T_2 . La valeur moyenne retenue pour ces périodes sera :

$$T_1 = 18 \text{ jours}$$

$$T_2 = 560 \text{ jours}$$

d'où l'on obtient les constantes de décroissance :

$$\lambda_1 = \frac{0,693}{18} = 3,85 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1} \quad \lambda_2 = \frac{0,693}{560} = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ j}^{-1}$$

Les valeurs à l'origine des droites représentant les fonctions exponentielles sont B et C.

Le tableau A.3 fait apparaître, pour chaque irradiation, les périodes T_1 , T_2 et les valeurs des coefficients.

3. Loi de variation des coefficients A , B , C :

A partir des valeurs de A, B, C ainsi obtenues, il faut trouver les lois de variation de ces coefficients en fonction de la dose et de la température.

La figure A.7 représente la variation de B en fonction de la température :

$$B = f(T) = 0,161 - 1,31 \times 10^{-3} T$$

N° irradiations	A	T ₁ jours	T ₂ jours	B	C
1	0,573	18	490	0,116	0,3
3	0,609	16	490	0,095	0,29
·	0,632	21	650	0,075	0,285
13	0,618	18	680	0,077	0,285
16	0,593	19	420	0,125	0,272
20	0,717	20	670	0,038	0,29

Tableau A.3 - Valeurs des coefficients A, B, C et des périodes T₁ et T₂

puis $\frac{B}{f(T)}$ en fonction de la dose.

L'équation de B sera donc :

$$B = (0,161 - 1,31 \times 10^{-3} T) (1 - 10^{-2} D)$$

Un même raisonnement appliqué à A et C donne :

$$A = (1,65 \times 10^{-3} T + 0,538) (5,2 \times 10^{-2} \log_{10} D + 0,973)$$

et montre que C est indépendant de T et de D (figures A.7, A.8, A.9). Il en résulte $C = 0,283$.

4. Vérification.

L'équation A10 devient :

$$\tau = A + B e^{-\lambda_1 t} + 0,283$$

en négligeant l'exponentielle de forte période qui varie peu pour des durées de l'ordre de quelques semaines.

On compare alors, pour l'ensemble des irradiations, les valeurs τ calculées aux valeurs τ mesurées. On constate un bon accord pour $t > 10$ j.

Pour $t < 10$ j, τ mesuré décroît plus vite que τ calculé. Ceci nous conduit à ajouter un terme supplémentaire à courte période. L'équation (A12) devient alors :

$$\tau = A + B e^{-\lambda_1 t} + E e^{-\lambda_3 t} + 0,283$$

$$\text{avec } T_3 = 3 \text{ j soit } \lambda_3 = 0,23 \text{ j}^{-1}$$

E, déterminé comme les autres coefficients, est trouvé indépendant de la température.

On a (voir figure A.8) :

$$E = 0,0307 - 2,73 \cdot 10^{-3} D \quad \text{(A13)}$$

de plus, E doit rester positif ou nul, ce qui implique :

$$E = 0 \quad \text{pour } D \geq 13,4 \quad \text{(A14)}$$

L'équation (A12) devient alors :

$$\tau = A + B e^{-\lambda_1 t} + E e^{-\lambda_3 t} + 0,283$$

Il apparaît de plus nécessaire d'imposer les conditions logiques suivantes :

- 1) $\tau = 1,00$ pour $t = 2$ jours
- 2) $1,00 \leq \tau \leq 1,01$ pour $t < 2$ jours
- 3) $\tau \leq 1,00$ pour $t > 2$ jours

Le plus, si D ou T_e, ou leur combinaison, sont suffisamment élevés, il n'y a plus de décroissance sensible et l'on prendra alors $\tau = 1,0$.

La gamme (s (T_e, D) pour laquelle cette guérison à température ambiante devient négligeable est définie par :

$$D \geq -0,2 T + 23$$

En conclusion, la formule générale donnant la valeur de τ en fonction du temps t écoulé après l'irradiation sera :

$$\tau = A + B e^{-\lambda_1 t} + E e^{-\lambda_3 t} + 0,283$$

avec :

$$\lambda_1 = 3,87 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1} \quad \lambda_3 = 0,23 \text{ j}^{-1}$$

$$A = (1,65 \cdot 10^{-3} T + 0,538) (5,2 \cdot 10^{-2} \log_{10} D + 0,973)$$

$$B = (0,16) - 1,31 \cdot 10^{-3} T (1 - 10^{-2} D)$$

$$E = 0,037 + 2,73 \cdot 10^{-3} D \quad \text{et } E \geq 0$$

$$t = 2 \text{ j} \longrightarrow \tau = 1,00$$

$$t < 2 \text{ j} \longrightarrow 1,00 \leq \tau \leq 1,01$$

$$t > 2 \text{ j} \longrightarrow \tau \leq 1,00$$

$$D \geq -0,2 T + 23 \quad \tau = 1,00$$

Les tableaux A.4 et A.5 permettent de comparer τ mesuré (colonnes M) et τ calculé (colonnes C) par la formule ci-dessus. On constate qu'il y a concordance entre τ calculé et τ mesuré, à mieux que 0,5 % près jusqu'à 30 jours et à mieux que 1 % près jusqu'à 50 jours.

Cette formule ayant pour but de corriger les mesures faites après irradiation pour tenir compte du phénomène de guérison et exprimer tous les résultats à 2 jours, elle n'aura pas à être utilisée pour les durées supérieures à 20 jours.

Seule, l'irradiation n° 2 fait exception ; on constate en effet un écart à peu près constant de 2 % entre valeurs calculées et valeurs mesurées. On peut penser que cet écart est dû au fait que la température d'irradiation (20 °C ici) est trop proche de la température de stockage (≈ 20 °C). La température d'irradiation en dessous de laquelle la formule ne représente plus correctement l'évolution réelle est située entre 20 °C et 30 °C.

t jours	N° mesure 1		7		3		13		16		20	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0,979	0,973	0,998	1	0,985	0,983	0,997	0,996	0,978	0,973	1	1
6	0,964	0,961	0,994	0,994	0,971	0,974	0,990	0,987	0,964	0,959	1	1
8	0,954	0,951	0,99	0,989	0,962	0,966	0,982	0,981	0,952	0,951	0,999	1
10	0,945	0,942	0,986	0,982	0,957	0,959	0,977	0,976	0,942	0,944	0,998	1
15	0,925	0,927	0,976	0,973	0,941	0,945	0,957	0,967	0,924	0,924	0,991	0,996
20	0,914	0,915	0,968	0,965	0,931	0,935	0,960	0,960	0,911	0,911	0,990	0,990

Tableau A.4 - Résultats pour les mesures ayant servi à déterminer l'équation

t jours	N° mesure 2		4		5		6		9		12		14		15	
	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
1	1,01	1	1,008	1,003	1,009	1,01	1,005	1,01	1,001	1,005	1,006	1,009	1,001	1,01	1,012	1,004
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0,982	0,966	0,982	0,980	0,988	0,989	0,996	0,994	0,997	0,998	0,988	0,988	0,999	1	0,979	0,975
6	0,969	0,953	0,970	0,968	0,978	0,978	0,988	0,986	0,993	0,991	0,980	0,980	0,998	1	0,964	0,965
8	0,958	0,941	0,960	0,960	0,970	0,969	0,982	0,979	0,991	0,990	0,973	0,972	0,998	1	0,954	0,955
10	0,950	0,932	0,953	0,951	0,962	0,961	0,976	0,975	0,988	0,987	0,958	0,967	0,997	1	0,945	0,945
15	0,935	0,916	0,938	0,937	0,946	0,946	0,965	0,961	0,98	0,979	0,958	0,957	0,996	1	0,928	0,932
20	0,923	0,900	0,926	0,926	0,934	0,934	0,956	0,951	0,974	0,973	0,95	0,949	0,994	0,999	0,916	0,920
30	0,901	0,880	0,910	0,911	0,916	0,917	0,940	0,936	0,963	0,964	0,938	0,939	0,992	0,992	0,894	0,905
50	0,878	0,857	0,896	0,894	0,890	0,897	0,920	0,920	0,945	0,953	0,920	0,927	0,987	0,984	0,870	0,873

Tableau A.5 - Vérification des résultats sur les autres mesures

Figure A.1

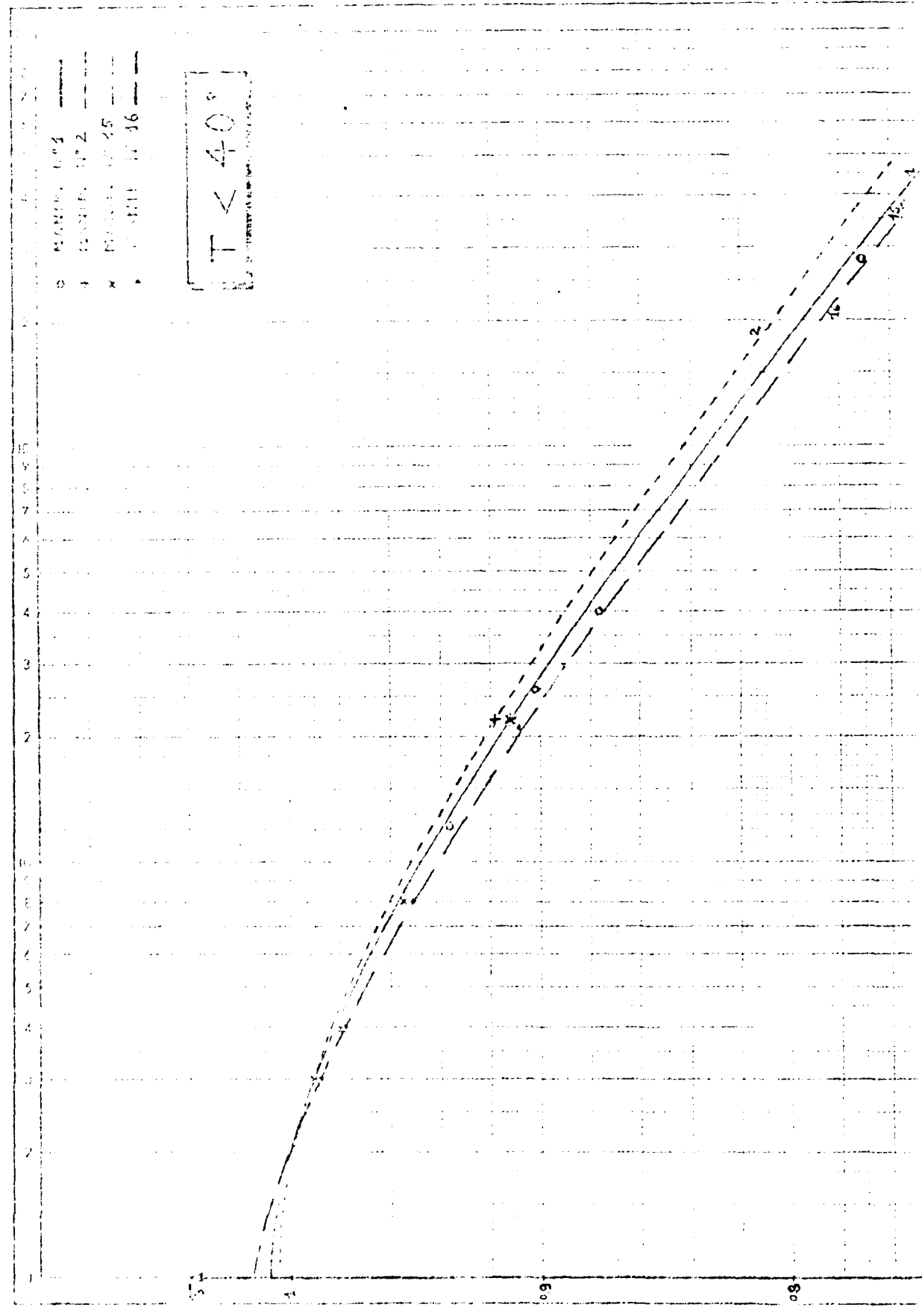


Figure A.2

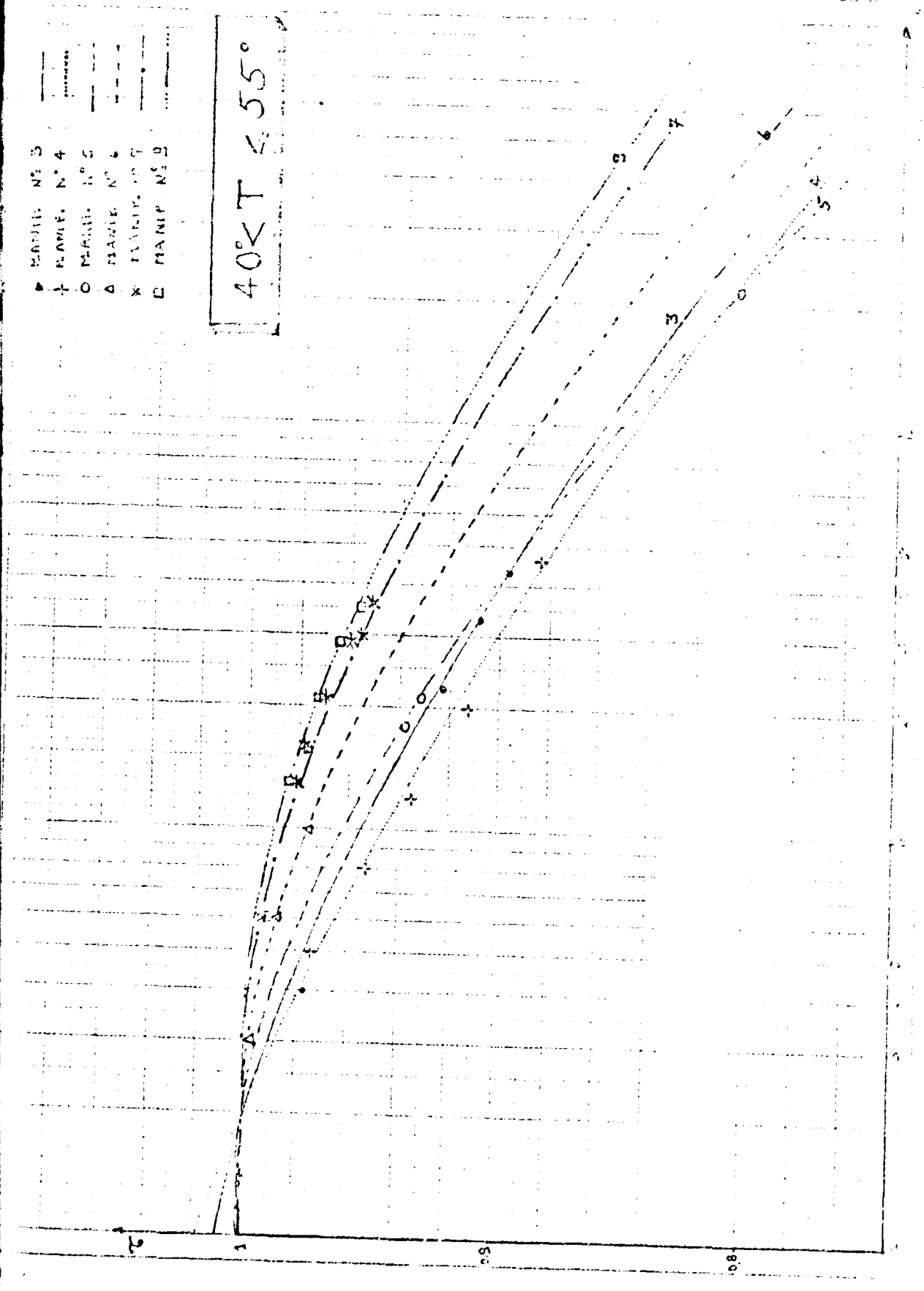


Figure A.5

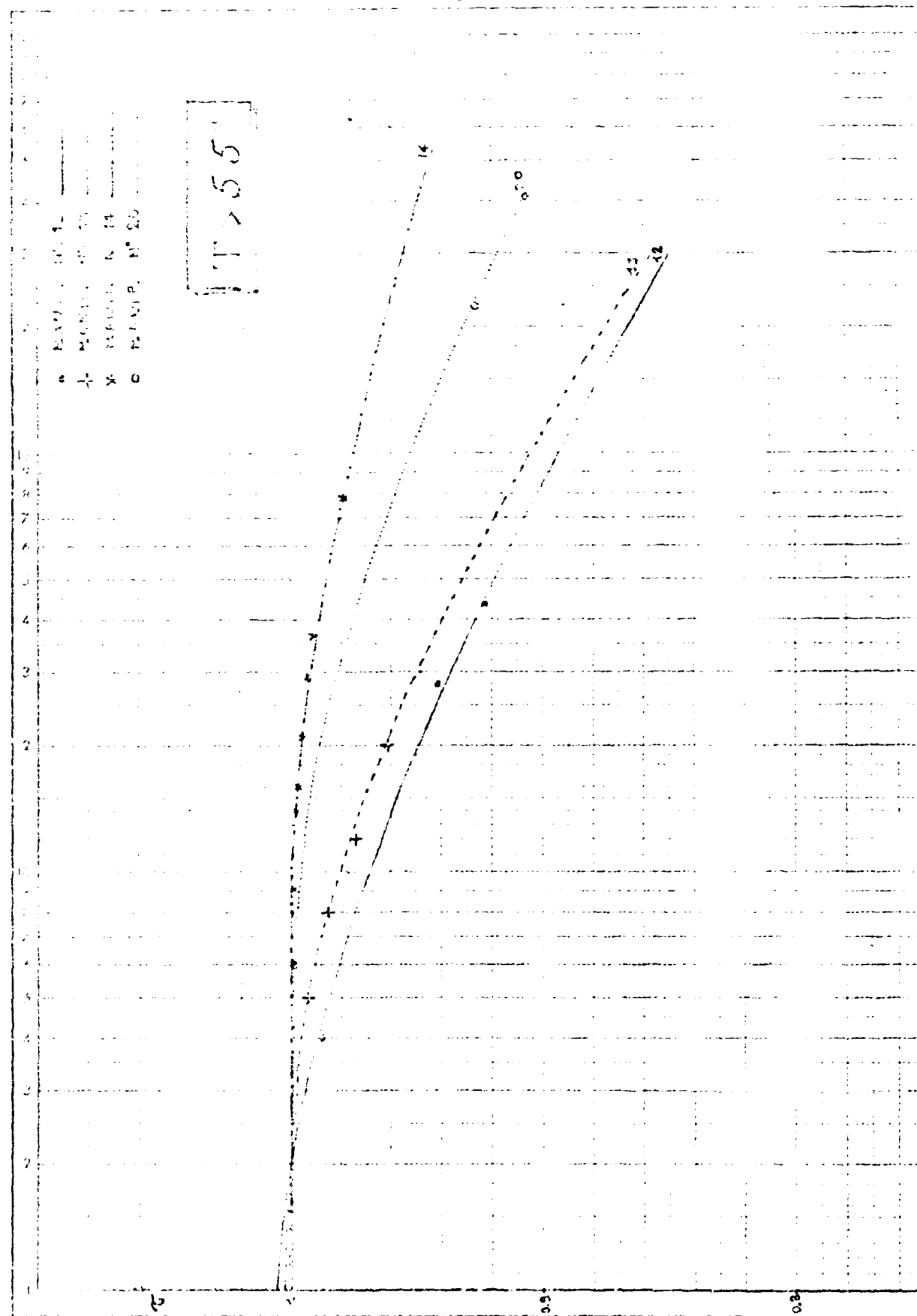


Figure A.6

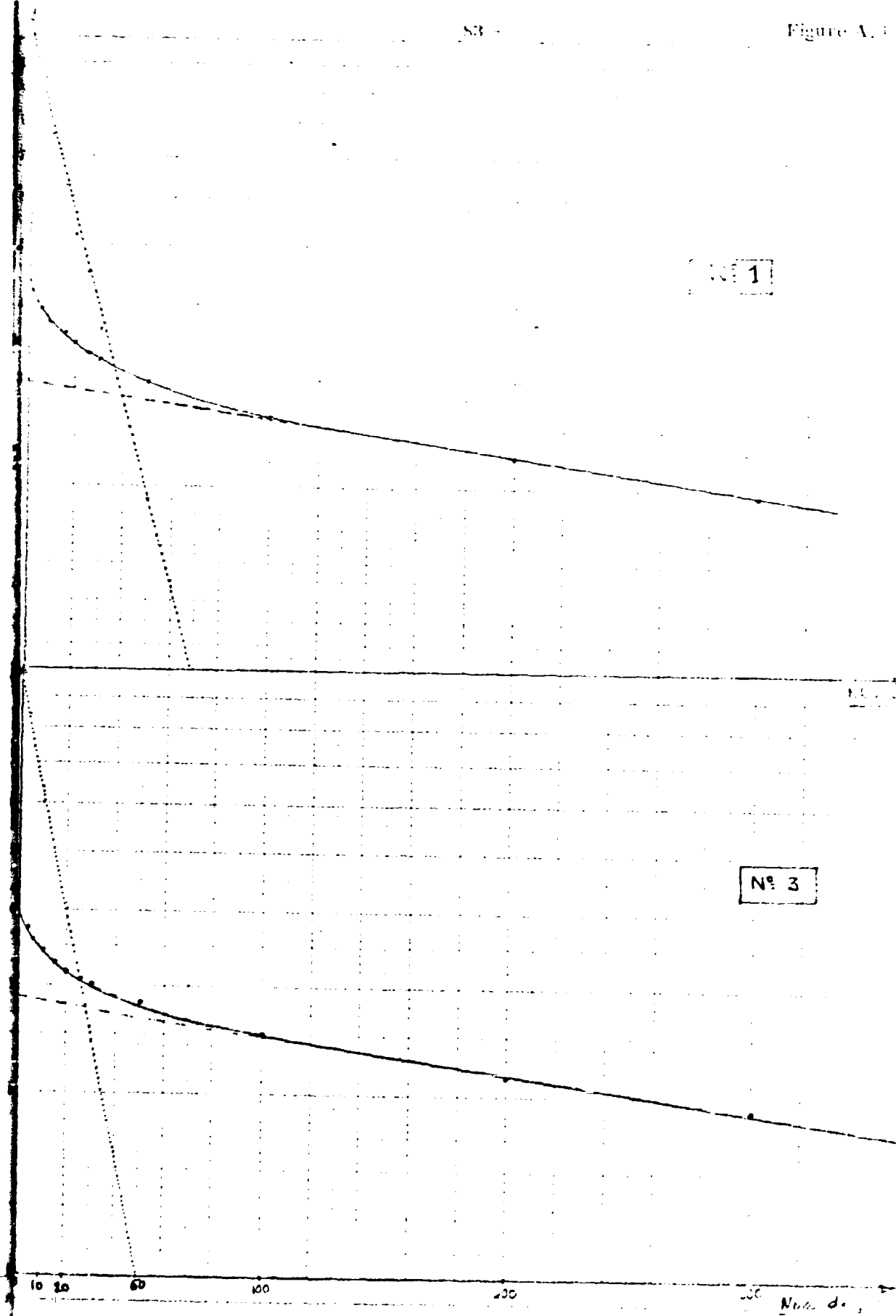


Figure A.5

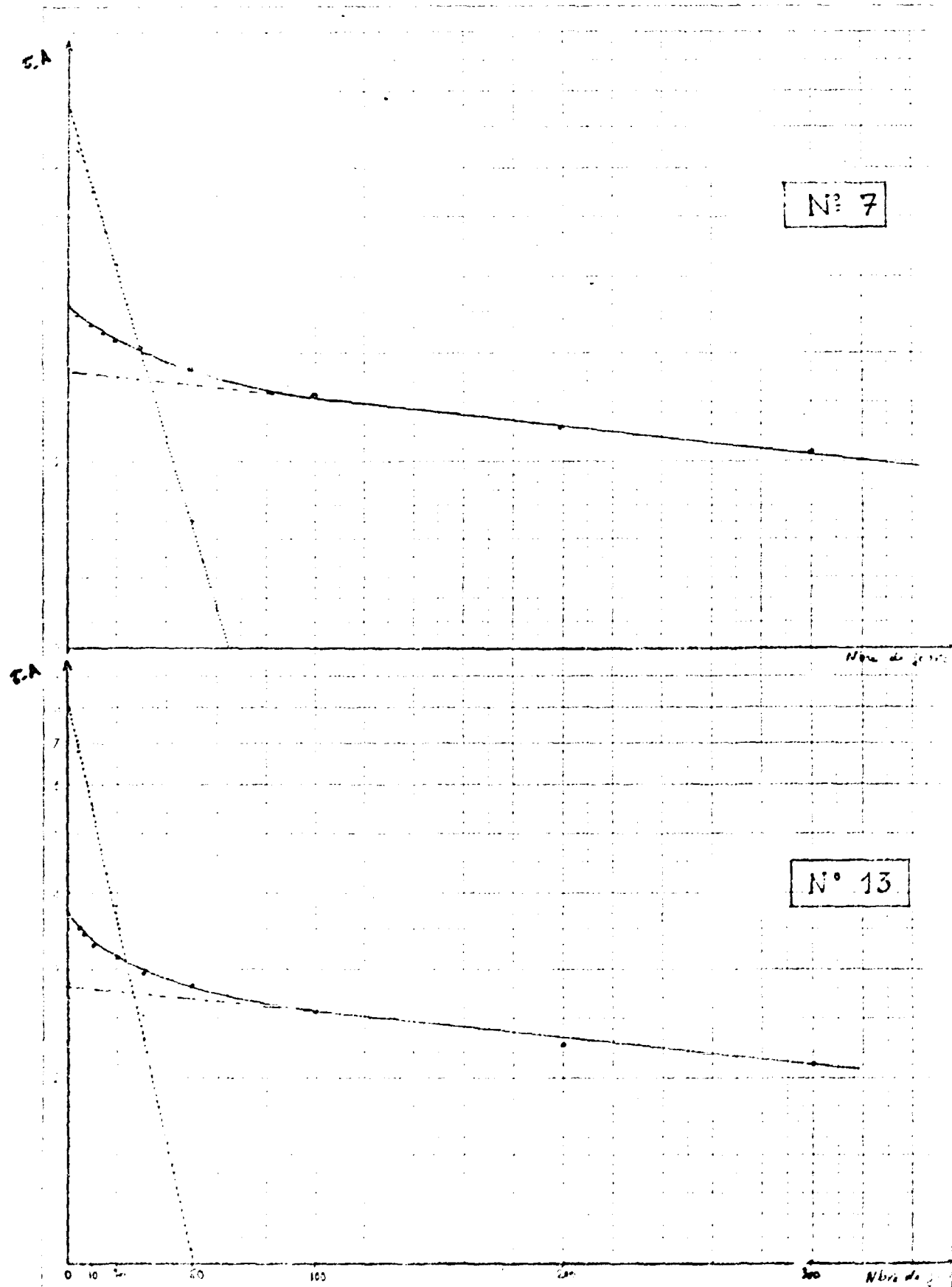
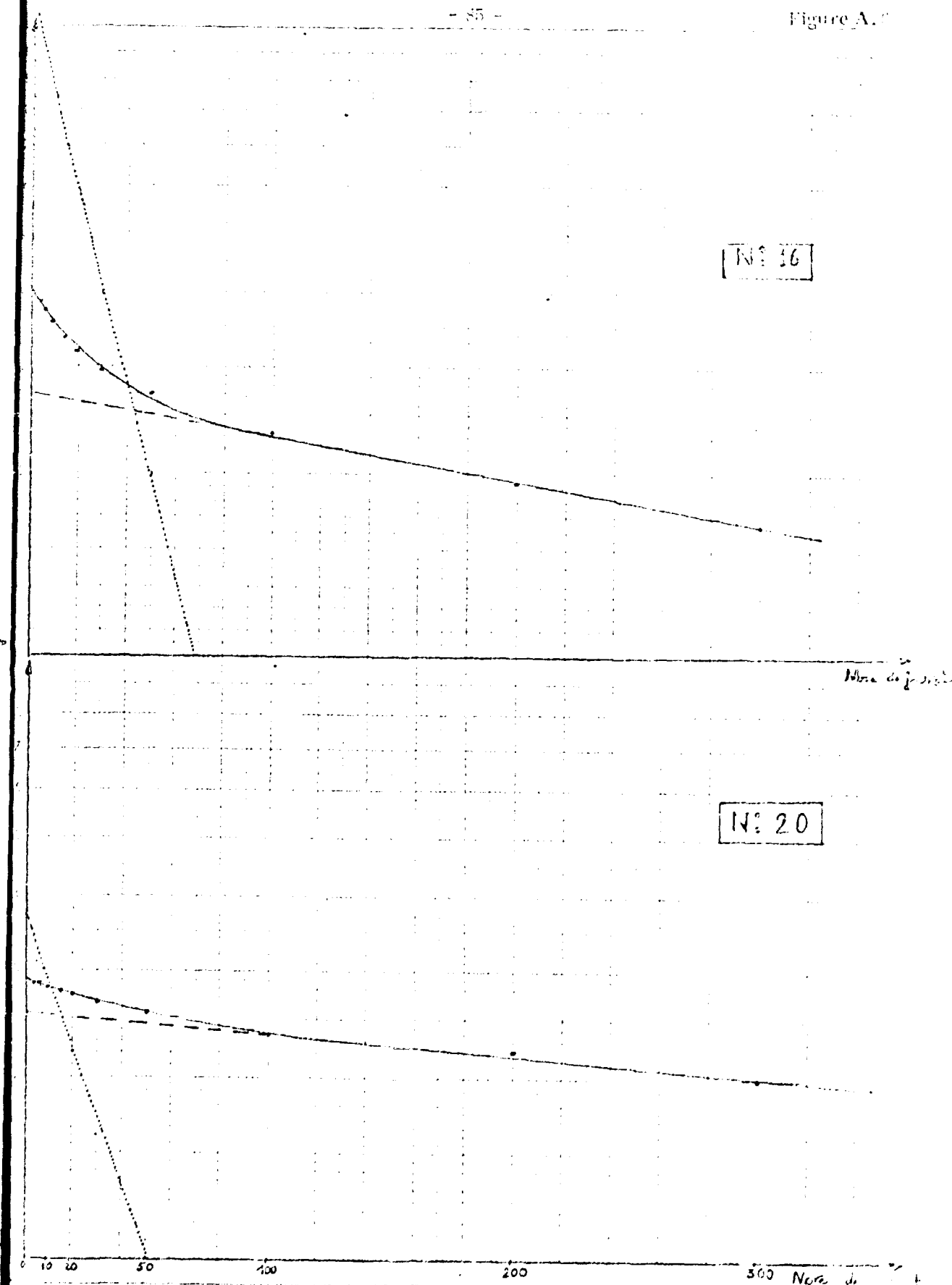
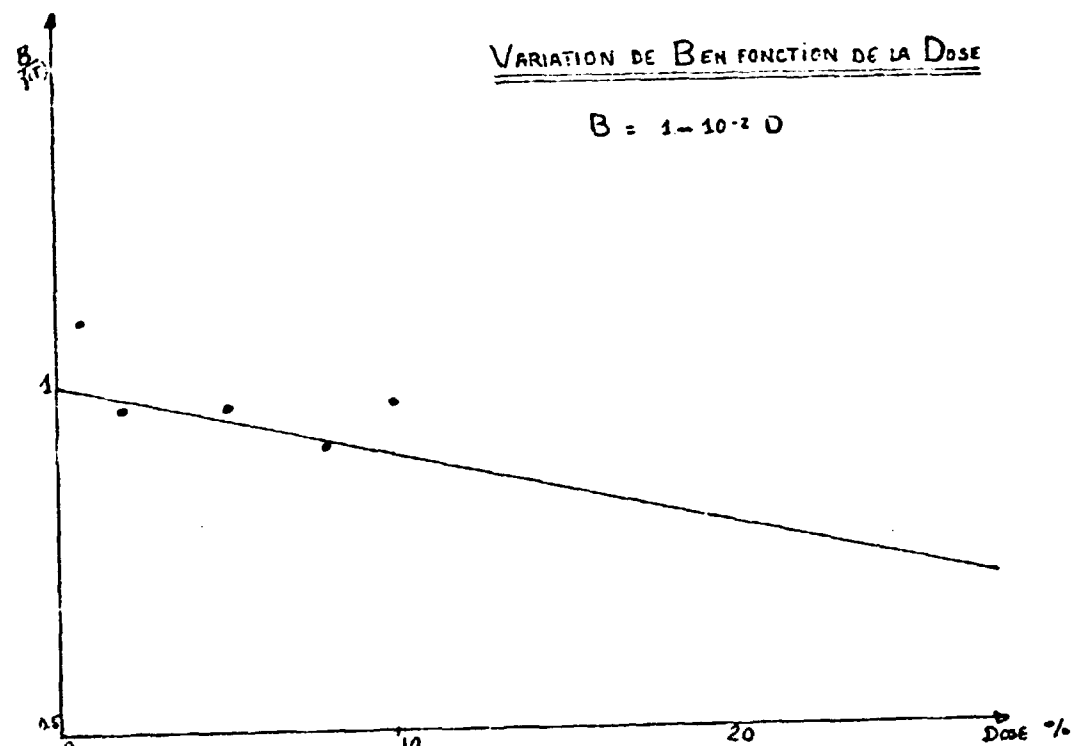


Figure A.6



VARIATION DE B EN FONCTION DE LA DOSE

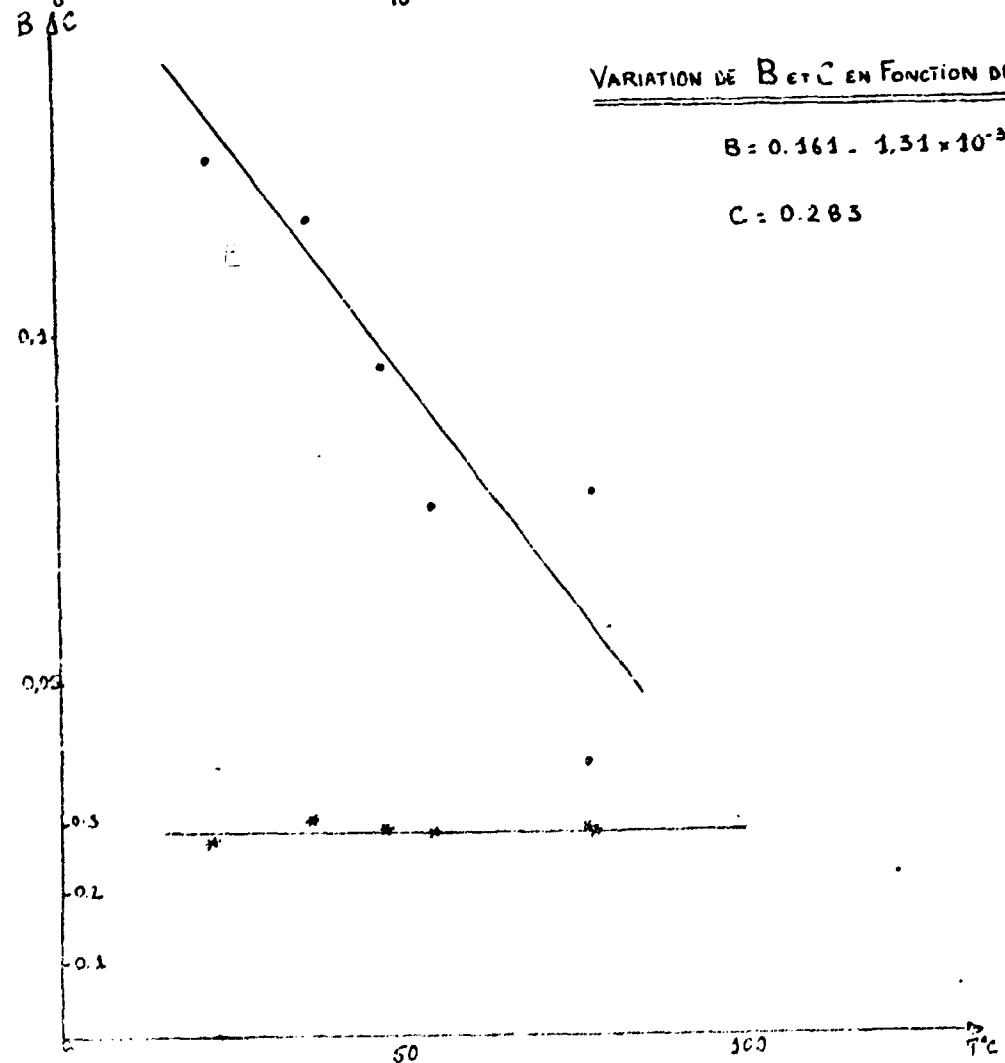
$$B = 1 - 10^{-2} D$$



VARIATION DE B ET C EN FONCTION DE T

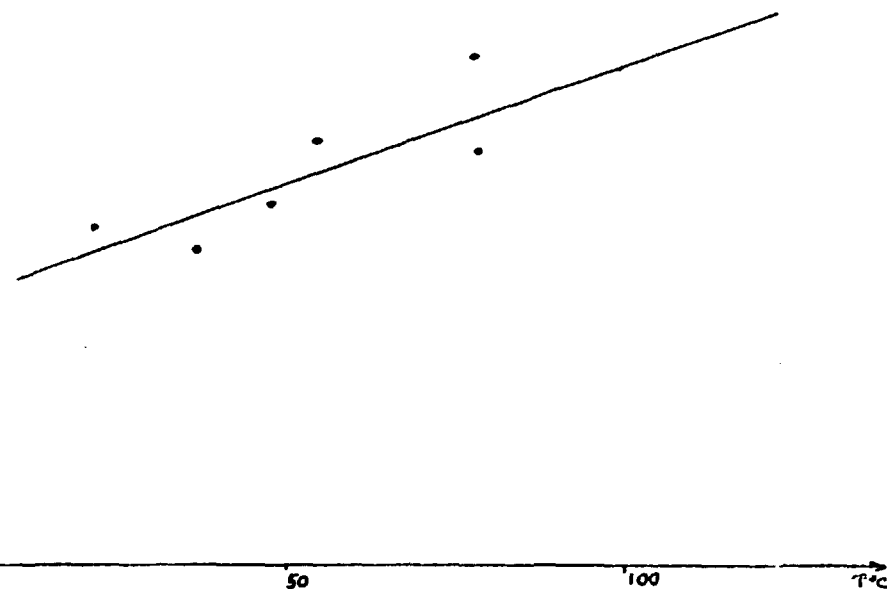
$$B = 0.161 - 1.31 \times 10^{-3} T$$

$$C = 0.283$$



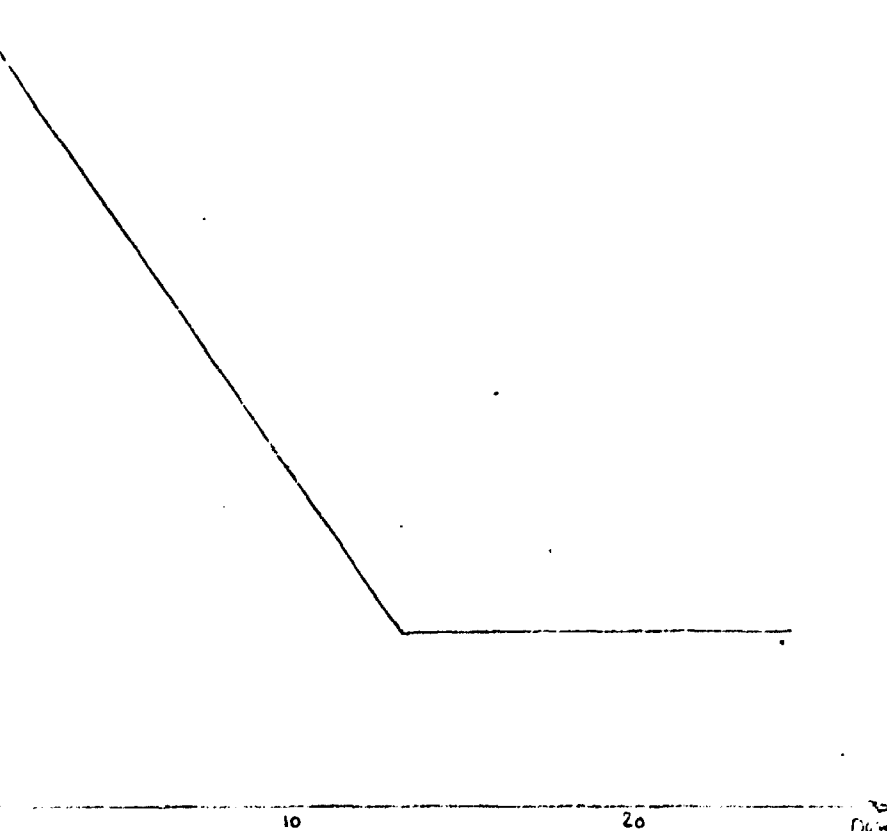
VARIATION DE A EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

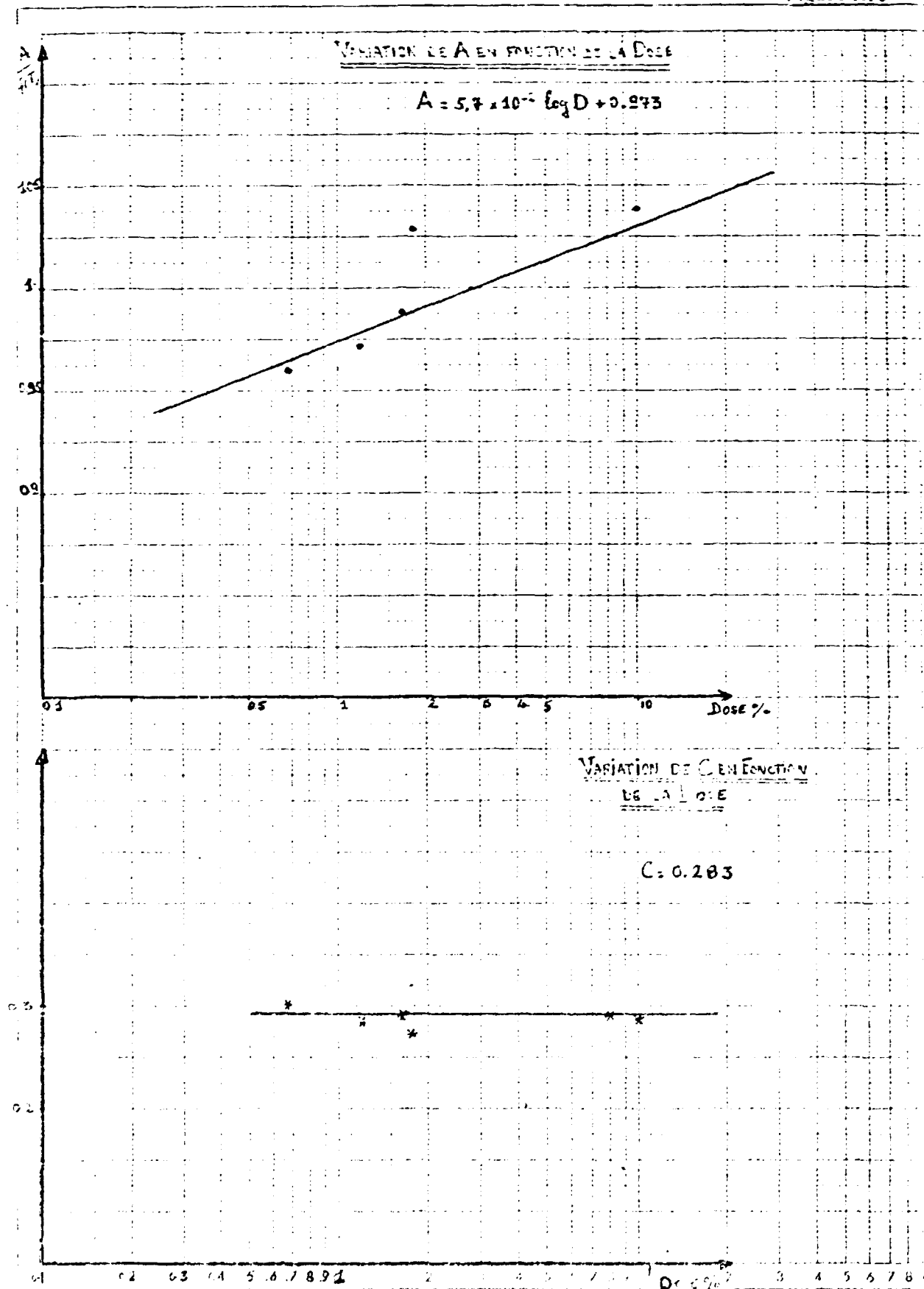
$$A = 1.65 \times 10^{-3} T + 0.538$$



VARIATION DE E EN FONCTION DE LA DOSE

$$E = 0.0367 - 2.73 \times 10^{-3} D$$





ANNEXE IV

TRAITEMENT DES MESURES G.A.M.I.N.

Description du code de calcul

Les mesures brutes de variation relative de résistance électrique des dosimètres G.A.M.I.N. doivent être corrigées de l'effet de guérison (Annexe III) et ensuite affectées du coefficient d'étalonnage s (Cf. D) (chapitre III et Annexe II) afin d'obtenir une mesure de l'indice de spectre r . Un code de calcul écrit en FORTRAN IV réalise ces diverses opérations (programme G.A.M.I.N.).

I - INTRODUCTION DES DONNEES.

1. Un entier N CAS

C'est le nombre d'ensembles de mesures indépendantes à traiter.

Dans l'exemple du paragraphe IV ci-après, on a 2 séries de mesures distinctes

- . mesure dans le réacteur BR1 (2.10.73 - fiche H de l'annexe VI)
- . mesure dans le réacteur BR2 (22.11.73 - fiche R de l'annexe VI).

N CAS = 2

2. La séquence suivante sera reproduite pour chaque ensemble de mesures

- . Une carte titre
- . Un entier N GROUP

Chaque ensemble de mesures peut être subdivisé en N GROUP sous-ensembles sur lesquels on souhaite avoir la valeur moyenne de l'indice graphite-nickel r et la dispersion de cette série caractérisée par son écart-type σ .

Ainsi, dans l'exemple du paragraphe IV :

- BR1 est subdivisé en 3 groupes de 4 G.A.M.I.N.
- BR2 est subdivisé en 2 groupes de 10 G.A.M.I.N.

. N GROUP entiers I G (I) : I G (1) I G (2) ... I G (N GROUP)

Ce sont les nombres de dosimètres dans chaque sous-ensemble.

Exemple :

BR1 : 4 4 4

BR2 : 10 10

. Un entier IDEC

Cette variable entière permet d'éviter l'application de la correction de décroissance (guérison des effets dans le graphite) lorsque celle-ci représente mal la réalité (Cas limites - voir annexe III)

IDEC = 1 la correction n'est pas appliquée

IDEC $\neq$ 1 cas normal avec correction.

. Un flottant COCOR

COCOR vaut généralement 1

Dans certains cas particuliers, on peut avoir à appliquer une correction supplémentaire aux mesures brutes G.A.M.I.N. Par exemple, pour l'ensemble des mesures d'étalonnage G.A.M.I.N. (chapitre III) dans les emplacements 42 et 46 du réacteur ISIS, on a tenu compte de l'effet, sur l'indice r, de la barre de contrôle voisine.

On a : r (barre voisine haute) = 0,98 r (barre voisine basse).

L'ensemble des mesures a été exprimé avec barre voisine haute.

On a ainsi :

. irradiation avec barre voisine haute COCOR = 1

. irradiation avec barre voisine basse COCOR = 0,98

. Un flottant TEMPS

Durée d'irradiation en minutes.

. Données propres à chaque dosimètre G.A.M.I.N. :

. Un entier N O : numéro du G.A.M.I.N.

. Un entier N R : nombre de mesures de résistance après irradiation

$$1 \leq N R \leq 10$$

. Un flottant R O : valeur de la résistance avant irradiation.

. NR fois 2 flottants R (J) D U R (J)

: valeurs de résistance après irradiation et temps écoulé en jours, entre chaque mesure et la fin de l'irradiation.

. 2 flottants F 1 (I) F 2 (I)

: valeurs des fluences neutroniques Φ_{Ni} (en $10^{15} \text{ n. cm}^{-2}$)

mesurées par les 2 détecteurs de Ni accompagnant chaque G.A.M.I.N., sur la base de $\sigma_{Ni} = 101 \text{ mb}^*$

. 1 flottant T (I) : température d'irradiation en °C

Si on a un 2ème ensemble de mesures, nouvelle séquence :

. titre,

. N GROUP,

.

.

.

II - CALCULS EFFECTUES.

. N G : nombre de G.A.M.I.N. pour l'ensemble considéré :

$$N G = \sum_{I=1, N \text{ GROUP}} I G (I)$$

. Calcul du coefficient de décroissance de l'effet d'irradiation ΔR sur le graphite suivant la formule établie en annexe III.

On corrige alors les mesures successives effectuées sur chaque G.A.M.I.N. de cet effet de décroissance de façon à avoir l'effet d'irradiation ΔR exprimé à 2 jours.

* la valeur $\sigma_{Ni} = 101 \text{ mb}$ est une constante du programme donnée par l'instruction ISN 0079 (voir programme page 7). Il est toujours possible d'employer une autre valeur de σ_{Ni} en modifiant en conséquence l'instruction ISN 0079.

après la fin de l'irradiation.

On fait, pour chaque G.A. M.I.N., la moyenne de ces diverses mesures et l'on a :

$$D = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{2 \text{ jours}}$$

. Calcul de ANI :

$$ANI = \frac{\sigma_{Ni}}{\sigma_{Ni}} \phi_{Ni}$$

$$\text{avec } \sigma_{Ni} = 101 \text{ mb}^*$$

. Calcul de l'indice brut SB :

$$SB = 10^{-7} \frac{D}{ANI}$$

. Calcul de la température équivalente :

La correction DELT permettant d'annuler l'effet de vitesse d'irradiation est déterminée par la formule :

$$\frac{DELT}{T} = 7,5 \cdot 10^{-2} \log_{10} PG$$

$$\text{cà } PG = \frac{\phi_{G1}}{\phi_{G0}}$$

ϕ_{G1} = flux équivalent graphite sur le G.A. M.I.N. considéré

ϕ_{G0} = flux équivalent graphite de référence = $3,6 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

La grandeur ϕ_{G1} n'est, a priori, pas connue. C'est en effet une des grandeurs mesurées par le dosimètre G.A. M.I.N. On procède alors à un calcul par itération (boucle 150 de ISN 97 à ISN 115).

On commence le calcul en prenant

$$PG = P$$

$$\text{cà } P = \frac{\phi_{Ni1}}{\phi_{Ni0}}$$

* Voir note page 3.

ϕ_{Ni1} = flux équivalent nickel sur le G.A. M.I.N. considéré = $\frac{F1}{2 \cdot \text{TEMPS}}$

ϕ_{Ni0} = flux équivalent nickel de référence = $2,2 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

On détermine ainsi une 1ère valeur de la correction DELT et une valeur approchée de la température équivalente d'irradiation TE.

. Calcul du coefficient d'étalonnage du G.A. M.I.N. $s(Te, D)$ (STED) suivant la formule établie en Annexe II :

On détermine ainsi :

- l'indice graphite/nickel r (RRR)

$$r = 10^{-7} \frac{\delta}{ANI}$$

où δ (DCO) est l'effet $\Delta R/R$ sur le graphite corrigé :

$$\delta = \frac{\Delta R/R}{s(Te, D)}$$

- et la fluence équivalente graphite ϕ_G (FFISG) pour le G.A. M.I.N. considéré :

$$\phi_{G1} = 0,5 \cdot r \cdot \phi_{Ni}$$

On a alors une nouvelle valeur de

$$PG = \frac{\phi_{G1}}{\phi_{G0}}$$

On reprend alors le calcul de la température équivalente avec cette nouvelle valeur de PG. On a ainsi une meilleure valeur de r et de ϕ_{G1} donc de PG. Le calcul est ainsi poursuivi par itération jusqu'à ce que 2 valeurs successives de r diffèrent de moins de 1 %.

. Calcul des valeurs moyennes et de l'écart-type (ECART) sur chaque sous-ensemble.

III - SORTIE DES RESULTATS.

Les résultats apparaissent sous forme de trois tableaux :

1) Valeur ΔR corrigée de la décroissance :

On trouve pour chaque G.A. M.I. N. les diverses mesures ΔR (1),

ΔR (2), ... ΔR (n) ramenées à 2 jours après la fin de l'irradiation. La dernière colonne donne le coefficient de décroissance DEL.

2) Tableau général des résultats :

Il donne, pour chaque G.A. M.I. N. :

. son numéro d'ordre 1, 2, 3, ...

. l'effet sur le graphite $D = \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$ à 2 jours (en %)

. l'effet corrigé δ (en %)

. ANI

. ϕ_{Ni} en $n.cm^{-2}$ avec $\sigma_{Ni} = 101 mb^*$

. ϕ_G en $n.cm^{-2}$

. T_e en $^{\circ}C$

. s

. r

. le numéro du dosimètre.

3) Tableau des valeurs moyennes :

Il donne pour chaque sous-ensemble :

. le numéro d'ordre du 1er G.A. M.I. N. et du dernier G.A. M.I. N. du sous-ensemble considéré,

. l'effet corrigé moyen $\bar{\delta}$,

. le coefficient d'étalonnage moyen $\bar{s}$,

. l'indice moyen $\bar{r}$.

. l'écart-type σ caractérisant la dispersion des n mesures de ce sous-ensemble,

. l'erreur relative à 1 écart-type affectée à $\bar{F}$ en admettant une distribution gaussienne des n mesures.

IV - PROGRAMME G.A. M.I. N.

LEVEL 21.7 (JAN 73)

CS/360 FORTRAN H

COMPILER OPTIONS - NAME= PAIR,OPT=02,LINECNT=60,SIZE=60000,

SOURCE,EBD10,ACLIST,HCHECK,LCAC,MAP,NCERT,1D,NOXREF

PROGRAMMES DE DEFOUILLEMENT DES DOSIMETRIES GAMIN

```

ISN 0002      DIMENSION R(10),F1(100),F2(100),A(100),E(100),E1(100),U(10),V(10),
              STO(10),DEL2(100,10),SDEL(10),C(100),F(100),RC(100),Y(100),Z
              S(100),DE(100),FRR(100),F(100),FHI(100),EZ(100),FE(100),TI(100),DEL
              ST(100),DEL1(100,10),FG(100),FA(100),TE(100),C2J(100),M3(100),ITE(10
              SO),ANI(100),NR(100),CCC(100),PRR(100), IG(100),CIF(100),CUR(100,1
              SO),FFISG(100),SB(100),STEC(100)
ISN 0003      CALL RPSLIC

```

```

C
C VALEURS DES CONSTANTES ET LECTURE DES DONNEES
C

```

```

ISN 0004      CALL RPSLIC(ACAS)
ISN 0005      DO 999 K=1,ACAS
ISN 0006      NG=0
ISN 0007      WRITE(6,400)
ISN 0008      REAC(5,1000)
ISN 0009      WRITE(6,1000)
ISN 0010      WRITE(6,445)
ISN 0011      CALL RPSLIC(NGFCUP)
ISN 0012      DO 776 I=1,NGFCUP
ISN 0013      CALL RPSLIC(IG(1))
ISN 0014      NG=NG+IG(1)
ISN 0015      776 CONTINUE
ISN 0016      CALL RPSLIC(ICEC)
ISN 0017      CALL RPSLIC(CCCCR)
ISN 0018      CA=8.6E-5
ISN 0019      PHIREF=2.2E12
ISN 0020      CA=1.2E-2
ISN 0021      DB=-3.E-5
ISN 0022      AA=-4.063E-3
ISN 0023      AB=1.75E
ISN 0024      BA=-6.56E-4
ISN 0025      BB=-0.12CE
ISN 0026      AAA=-2.74E-3
ISN 0027      AAB=0.2024
ISN 0028      BBA=-2.505E-4
ISN 0029      BBB=-2.593E-2
ISN 0030      CALL RPSLIC(TEMPS)
ISN 0031      TEMPS=TEMPS*60.
ISN 0032      DO1001=1,AG
ISN 0033      SDEL2=3.
ISN 0034      CALL RPSLIC(AC(1),AR(1))
ISN 0035      CALL RPSLIC(RC(1))
ISN 0036      ARR=AR(1)+1
ISN 0037      DO101J=2,ARR
ISN 0038      CALL RPSLIC(R(J),DLR(1,J))
ISN 0039      101 CONTINUE
ISN 0040      83 CALL RPSLIC(F1(1),F2(1),T(1))
ISN 0041      DO1001J=1,ARR
ISN 0042      IF(J.EQ.1)GC TC 60
ISN 0044      GO TO 777
ISN 0045      68 R(1)=R(2)
ISN 0046      DUR(1,1)=20.
ISN 0047      DI(1)=1.E2*(R(1)-R(1))/FC(1)

```

```

C
C CORRECTION DE DECROISSANCE (GLERISCN DANS LE GRAPHITE)

```

* Voir note page 3.

```

C
777 IF (IDEC.EC.1) GO TO 62
A(I)=(1.65E-3*(I)+C.530)*(5.2E-2*ALOG10(D(I))+0.972)
B(I)=(7.161-(1.31*1.E-3*(I)))+(1.-1.E-2*(I))
E(I)=0.0367-(2.73E-3*(I))
IF (E(I).GT.0.) GO TO 778
E(I)=0.
778 U(J)=EXP(-C.653*(CUR(I,J)/18.))
V(J)=EXP(-C.653*(CUR(I,J)/2.))
DEL(I,J)=A(I)+(E(I)*U(J)+(E(I)*V(J))+0.2E3
IF (CUR(I,J).EQ.2.) GO TO 62
IF (CUR(I,J).GE.2.)/AND.CEL(I,J).GE.1. GO TO 62
IF (CUR(I,J).LT.2.)/AND.CEL(I,J).LT.1. GO TO 62
IF (CUR(I,J).LT.2.)/AND.CEL(I,J).GT.1.01) DEL(I,J)=1.01
IF (DEL(I,J).GE.0.95) GO TO 62
GO TO 60
62 DEL(I,J)=1.
60 DEL(I,J)=(P(I)-97(I))/DEL(I,J)
IF (J.EC.1) GO TO 1001
DEL2=DEL2+DEL(I,J)
1001 CONTINUE

```

C C CALCUL DE LA DCSE

```

C
D2J(I)=DEL2/FLCAT(NR(I))
D(I)=D2J(I)/RC(I)
833 F(I)=1.E15*(F(I)+F2(I))/2.
883 ANI(I)=1.01E-25*(F(I)
SB(I)=1.E-7*(C(I)/ANI(I)

```

C C EVENTUELLE CORRECTION PARTICULIERE

```

C
SB(I)=CCCC*SE(I)
844 T(I)=T(I)+273.
PHI(I)=F(I)/TEMPS
P(I)=PHI(I)/PHIREF
100 CONTINUE
DO102I=1,NG
DO150I=1,10
IF (L.EC.1.) PG(I)=F(I)

```

C C CALCUL DE LA TEMPERATURE EQUIVALENTE

```

C
DELT(I)=-7.5E-2*ALOG10(FG(I))*T(I)
TE(I)=T(I)+DELT(I)-273.

```

C C CALCUL DU COEFFICIENT D'ETALONNAGE GAMIN STEC

```

C
DZ(I)=CA+(CB*TE(I))
IF (D(I).LE.DZ(I)) GO TO 11
FF(I)=D(I)/DZ(I)
GO TO 12
11 FF(I)=1.
12 FA(I)=ALOG10(FF(I))
SZ=AA*TE(I)+AB*(FA*TE(I)+EB)*FA(I)
DSZ=AAA*TE(I)+AAB*(DEA*TE(I)+EBB)*FA(I)
IF (DSZ.LE.C.) GO TO 9
GO TO 8

```

```

ISN C104
ISN C105
ISN C106
ISN C107
ISN C108
ISN C109
ISN C110
ISN C111
ISN C112
ISN C113
ISN C114
ISN C115
ISN C116
ISN C117
ISN C118
ISN C119
ISN C120
ISN C121
ISN C122
ISN C123
ISN C124
ISN C125
ISN C126
ISN C127
ISN C128
ISN C129
ISN C130
ISN C131
ISN C132
ISN C133
ISN C134
ISN C135
ISN C136
ISN C137
ISN C138
ISN C139
ISN C140
ISN C141
ISN C142
ISN C143
ISN C144
ISN C145
ISN C146
ISN C147
ISN C148
ISN C149
ISN C150
ISN C151
ISN C152
ISN C153
ISN C154
ISN C155
ISN C156
ISN C157
ISN C158
ISN C159
ISN C160
ISN C161
ISN C162
ISN C163
ISN C164
ISN C165
9 DSZ=0.
8 STED(I)=SZ-DSZ
510 RRR(L)=SE(I)/STED(I)
PG(I)=P(I)*RRR(L)/2.21
IF (L.EQ.1) GO TO 150
TD(L)=(RRR(L)-RRR(L-1))/RRR(L-1)
TD(L)=ABS(TD(L))
LMAX=L
IF (TD(L).LE.1.E-2) GO TO 102
CONTINUE
150 RRR(L)=RRR(LMAX)
102 DCO(I)=RRR(I)*ANI(I)*1.E7
DCO(I)=1.E2*DCO(I)
FFISC(I)=C.5*RRR(I)*F(I)
102 CONTINUE
WRITE(6,400)
WRITE(6,42)
WRITE(6,44)
DO71I=1,NG
TE(I)=TE(I)+0.5
ITE(I)=AINT(TE(I))
NR=NR(I)+1
WRITE(6,445)
DO71J=2,NR
WRITE(6,45) (NC(I),CUR(I,J),DEL2(I,J),DEL(I,J))
71 CONTINUE
WRITE(6,400)
WRITE(6,1000)
WRITE(6,445)
WRITE(6,51)
WRITE(6,52)
WRITE(6,53)
WRITE(6,53)
WRITE(6,53)
DO200I=1,NG
IN=1
D(I)=D(I)+1.E2
WRITE(6,54) (IN,D(I),DCO(I),ANI(I),F(I),FFISC(I),ITE(I),STED(I),
SRRR(I),NC(I))
IF (I.NE.24) GO TO 210
WRITE(6,551)
GO TO 200
210 IF (I.NE.55) GO TO 220
WRITE(6,551)
GO TO 200
220 IF (I.NE.86) GO TO 200
WRITE(6,551)
200 CONTINUE
WRITE(6,51)
WRITE(6,400)
WRITE(6,1000)
WRITE(6,742)
WRITE(6,744)
IO=1
DO780M=1,NGRCLP
SO=0.
SX=C.
JS=0.
SR=0.

```

```

15N C166      SDIF=0.
15N C167      IIG=IC+IG(M)-1
15N C168      DO22221=IC,IIG
15N C169      SD=SD+D(I)
15N C170      SX=SX+STEC(I)
15N C171      SS=SS+RRRM(I)
15N C172      2222 CONTINUE
15N C173      DMCY=SD/FLCAT(IIG(M))
15N C174      SMCY=SX/FLCAT(IIG(M))
15N C175      RPRMCY=SS/FLCAT(IIG(M))
15N C176      DO 44441=IC,IIG
15N C177      DIF(I)=RRRM(I)-RPRMCY
15N C178      DIF(I)=(DIF(I))*2
15N C179      SDIF=SDIF+DIF(I)
15N C180      4444 CONTINUE
15N C181      IIG=IC(M)-1
15N C182      IF(IIG.EC.0) IIG=1
15N C184      ECART=SDIF/FLCAT(IIG)
15N C185      ECART= SQRT(ECART)
15N C186      ERREL=SQRT(SDIF)/FLCAT(IIG)/RPRMCY
15N C187      WRITE(6,775)(IC,IIG,DMCY,SMCY,RPRMCY,ECART,ERREL)
15N C188      IC=IIG+1
15N C189      780 CONTINUE
15N C190      743 FORMAT(//50X,'VALEURS MOYENNES',//)
15N C191      744 FORMAT(20X,'GROUPE',8X,'C MOYEN',9X,'S MOYEN',6X,'R MOYEN',
SCART TYPE',6X,'ERREL REL',//)
15N C192      775 FORMAT(15X,I4,' A',I4,5(14X,E12.4),/)
15N C193      595 CONTINUE
15N C194      445 FORMAT(1FC)
15N C195      1000 FORMAT('
15N C196      31 FORMAT('C=',E12.4)
15N C197      155 FORMAT(E12.4)
15N C198      32 FORMAT(3(E12.4))
15N C199      33 FORMAT(2(E12.4))
15N C200      65 FORMAT(I4)
15N C201      400 FORMAT(1H1)
15N C202      43 FORMAT(//50X,'COMPARAISON DES (DELTA R)2JOURS',//)
15N C203      44 FORMAT(31X,'NC',14X,'JCLS',17X,'R2J-R0',17X,'DELTA',/)
15N C204      45 FORMAT(30X,I4,5X,E12.4,11X,E12.4,14X,E12.4)
15N C205      51 FORMAT('*****
S*****
S/)
15N C206      52 FORMAT(' **,'X,'NC',1X,'**,'3X,'DELTA R/R',2X,'**,'5X,'OCOR',5X,
SIX,' A.NI ',1X,'**,'1X,'F. FIS. NI',1X,'**,'2X,'F.FIS.
S**,'1X,'TE',1X,'**,'6X,'S',7X,'**,'6X,'R',7X,'**,'1X,'N',2X,'**,'
53 FORMAT(' **,'4X,'**,'2(14X,' ' ',4X,'**'),14X,'**,'2(14X,'N/CM2',
S**),
1X,'CC',1X,'**,'5X,'CM2',6X,'**,'14X,'**,'4X,'**
15N C207      54 FORMAT(' **,'14,'**,'5(1X,E12.4,1X,'**'),14,'**,'2(1X,E12.4,1X,'
S,**,/)
15N C208      551 FORMAT(1H1)
15N C209      STOP
15N C210      END
15N C211

```

EXEMPLE DE RESULTATS.

BR1 DU 2/10/73

3 4 4 4 0 1. 330.

1	2	36572.	37386.	2.	37382.	3.	1.340	1.306	41.
2	2	36745.	39283.	2.	39275.	3.	1.339	1.304	41.
3	2	40688.	41251.	2.	41242.	3.	1.339	1.311	41.
4	2	35950.	36458.	2.	36450.	3.	1.343	1.323	41.
5	2	38223.	38795.	2.	38784.	3.	1.421	1.436	41.
6	2	45349.	46011.	2.	46002.	3.	1.416	1.430	41.
7	2	39137.	39716.	2.	39710.	3.	1.429	1.436	41.
8	2	36328.	36869.	2.	36863.	3.	1.410	1.426	41.
9	2	37561.	38143.	2.	38139.	3.	1.508	1.518	41.
10	2	37316.	37902.	2.	37896.	3.	1.512	1.504	41.
11	2	38761.	39371.	2.	39363.	3.	1.511	1.516	41.
12	2	39261.	39880.	2.	39872.	3.	1.510	1.506	41.

COMPARAISON DES (DELTA R)2JOURS

NO	JOURS	R2J-R0	DELTA
1	0.2000E 01	0.5160E 03	0.1000E 01
1	0.3000E 01	0.5164E 03	0.9876E 00
2	0.2000E 01	0.5200E 03	0.1000E 01
2	0.3000E 01	0.5367E 03	0.9875E 00
3	0.2000E 01	0.5630E 03	0.1000E 01
3	0.3000E 01	0.5610E 03	0.9875E 00
4	0.2000E 01	0.5080E 03	0.1000E 01
4	0.3000E 01	0.5062E 03	0.9877E 00
5	0.2000E 01	0.5720E 03	0.1000E 01
5	0.3000E 01	0.5677E 03	0.9883E 00
6	0.2000E 01	0.6620E 03	0.1000E 01
6	0.3000E 01	0.6609E 03	0.9880E 00
7	0.2000E 01	0.5790E 03	0.1000E 01
7	0.3000E 01	0.5799E 03	0.9882E 00
8	0.2000E 01	0.5410E 03	0.1000E 01
8	0.3000E 01	0.5414E 03	0.9882E 00
9	0.2000E 01	0.5820E 03	0.1000E 01
9	0.3000E 01	0.5846E 03	0.9886E 00
10	0.2000E 01	0.5860E 03	0.1000E 01
10	0.3000E 01	0.5866E 03	0.9888E 00
11	0.2000E 01	0.6100E 03	0.1000E 01
11	0.3000E 01	0.6088E 03	0.9888E 00
12	0.2000E 01	0.6190E 03	0.1000E 01
12	0.3000E 01	0.6179E 03	0.9888E 00

BR1 DU 2/10/73

NO	DELTA R/R	DLOR	A NI	F. FIS. NI	F. FIS. G	TE	S	R
	%	%		N/CM2	N/CM2	OC	CM2	
1*	0.1400E 01	0.1467E 01	0.1999E-09	0.1979E 16	0.7263E 16	64	0.9542E 00	0.7339E 01
2*	0.1367E 01	0.1453E 01	0.1997E-09	0.1977E 16	0.7193E 16	65	0.9546E 00	0.7276E 01
3*	0.1381E 01	0.1447E 01	0.2002E-09	0.1982E 16	0.7162E 16	65	0.9547E 00	0.7227E 01
4*	0.1411E 01	0.1479E 01	0.2014E-09	0.1994E 16	0.7320E 16	64	0.9539E 00	0.7342E 01
5*	0.1491E 01	0.1526E 01	0.2158E-09	0.2137E 16	0.7753E 16	64	0.9519E 00	0.7256E 01
6*	0.1455E 01	0.1531E 01	0.2150E-09	0.2129E 16	0.7579E 16	64	0.9527E 00	0.7121E 01
7*	0.1491E 01	0.1555E 01	0.2164E-09	0.2143E 16	0.7698E 16	64	0.9522E 00	0.7184E 01
8*	0.1490E 01	0.1565E 01	0.2145E-09	0.2121E 16	0.7747E 16	64	0.9519E 00	0.7304E 01
9*	0.1553E 01	0.1634E 01	0.2286E-09	0.2263E 16	0.8089E 16	63	0.9504E 00	0.7148E 01
10*	0.1571E 01	0.1654E 01	0.2279E-09	0.2256E 16	0.8188E 16	63	0.9500E 00	0.7259E 01
11*	0.1572E 01	0.1655E 01	0.2287E-09	0.2264E 16	0.8193E 16	63	0.9500E 00	0.7237E 01
12*	0.1575E 01	0.1658E 01	0.2279E-09	0.2256E 16	0.8210E 16	63	0.9499E 00	0.7278E 01

BR1 DU 2/10/73

VALEURS MOYENNES						
GROUPE	D MOYEN	S MOYEN	A MOYEN	ECART TYPE	ERREUR REL	
1 A 4	0.1395E 01	0.9544E 00	0.7296E 01	0.5532E-01	0.4377E-02	
5 A 8	0.1480E 01	0.9522E 00	0.7216E 01	0.5062E-01	0.6450E-02	
9 A 12	0.1568E 01	0.9501E 00	0.7230E 01	0.5760E-01	0.4599E-02	

BR2 22/11/73

2 10 10 0 1. 60.	
17 2 42092. 42092. 2. 42071. 4. 6.620 5.340	48.
27 2 35810. 37047. 2. 37026. 4. 8.227 7.117	49.
21 2 35154. 36591. 2. 36566. 4. 9.408 8.563	50.
22 2 37980. 39729. 2. 39695. 4. 10.525 9.767	52.
23 2 38341. 40212. 2. 40190. 4. 11.192 10.678	53.
24 2 43054. 45276. 2. 45159. 4. 11.152 11.081	53.
25 2 37706. 39547. 2. 39511. 4. 10.631 11.027	53.
26 2 39403. 40172. 2. 40091. 4. 9.402 10.394	52.
27 2 38566. 39515. 2. 39488. 4. 7.920 9.093	50.
28 2 36215. 37265. 2. 37249. 4. 5.735 7.345	48.
29 2 40084. 41306. 2. 41293. 4. 3.766 2.883	46.
30 2 35191. 35925. 2. 35907. 4. 5.022 4.098	47.
31 2 40245. 41317. 2. 41294. 4. 6.195 5.384	48.
32 2 36776. 37942. 2. 37916. 4. 7.201 6.491	50.
33 2 40153. 41590. 2. 41560. 4. 8.193 7.614	51.
34 2 44360. 46061. 2. 46022. 4. 8.663 8.414	51.
35 2 40631. 42195. 2. 42150. 4. 8.404 8.649	51.
36 2 35777. 37612. 2. 36983. 4. 7.69 8.294	50.
37 2 41024. 42327. 2. 42293. 4. 6.178 7.401	48.
38 2 37394. 38298. 2. 38279. 4. 4.633 5.928	46.

COMPARAISON DES DELTA 12JOURS

NO	JOURS	R2J-R0	DELTA
19	0.2000E 01	0.1098E 04	0.1000E 01
19	0.4000E 01	0.1089E 04	0.9998E 00
20	0.2000E 01	0.1237E 04	0.1000E 01
20	0.4000E 01	0.1224E 04	0.9934E 00
21	0.2000E 01	0.1437E 04	0.1000E 01
21	0.4000E 01	0.1419E 04	0.9951E 00
22	0.2000E 01	0.1740E 04	0.1000E 01
22	0.4000E 01	0.1711E 04	0.9970E 00
23	0.2000E 01	0.1849E 04	0.1000E 01
23	0.4000E 01	0.1841E 04	0.9979E 00
24	0.2000E 01	0.2152E 04	0.1000E 01
24	0.4000E 01	0.2119E 04	0.9980E 00
25	0.2000E 01	0.1841E 04	0.1000E 01
25	0.4000E 01	0.1809E 04	0.9979E 00
26	0.2000E 01	0.1719E 04	0.1000E 01
26	0.4000E 01	0.1693E 04	0.9968E 00
27	0.2000E 01	0.1459E 04	0.1000E 01
27	0.4000E 01	0.1440E 04	0.9947E 00
28	0.2000E 01	0.1059E 04	0.1000E 01
28	0.4000E 01	0.1043E 04	0.9915E 00
29	0.2000E 01	0.6220E 03	0.1000E 01
29	0.4000E 01	0.6188E 03	0.9842E 00
30	0.2000E 01	0.7440E 03	0.1000E 01
30	0.4000E 01	0.7348E 03	0.9881E 00
31	0.2000E 01	0.1072E 04	0.1000E 01
31	0.4000E 01	0.1059E 04	0.9907E 00
32	0.2000E 01	0.1165E 04	0.1000E 01
32	0.4000E 01	0.1149E 04	0.9933E 00
33	0.2000E 01	0.1437E 04	0.1000E 01
33	0.4000E 01	0.1414E 04	0.9948E 00
34	0.2000E 01	0.1701E 04	0.1000E 01
34	0.4000E 01	0.1670E 04	0.9953E 00
35	0.2000E 01	0.1554E 04	0.1000E 01
35	0.4000E 01	0.1526E 04	0.9953E 00
36	0.2000E 01	0.1305E 04	0.1000E 01
36	0.4000E 01	0.1283E 04	0.9944E 00
37	0.2000E 01	0.1299E 04	0.1000E 01
37	0.4000E 01	0.1279E 04	0.9922E 00
38	0.2000E 01	0.9040E 03	0.1000E 01
38	0.4000E 01	0.8950E 03	0.9988E 00

B02 22/11/73

NR	DELTA R/P	DCOR	A NI	F. FIS. NI	F. FIS. G	TE	S	R	N
				N/CM2	N/CM2	OC	CM2		
1*	0.2666E 01	0.2816E 01	0.8940E-09	0.8752E 16	0.1394E 17	47*	0.9473E 00	0.3196E 01	19*
2*	0.3436E 01	0.3665E 01	0.1136E-08	0.1125E 17	0.1814E 17	46*	0.9376E 00	0.3226E 01	20*
3*	0.4052E 01	0.4364E 01	0.1335E-08	0.1323E 17	0.2160E 17	45*	0.9307E 00	0.3266E 01	21*
4*	0.4542E 01	0.4915E 01	0.1502E-08	0.1487E 17	0.2433E 17	45*	0.9241E 00	0.3272E 01	22*
5*	0.4939E 01	0.5255E 01	0.1619E-08	0.1603E 17	0.2602E 17	46*	0.9205E 00	0.3246E 01	23*
6*	0.4900E 01	0.5393E 01	0.1642E-08	0.1626E 17	0.2670E 17	45*	0.9198E 00	0.3244E 01	24*
7*	0.4947E 01	0.5259E 01	0.1603E-08	0.1588E 17	0.2603E 17	46*	0.9205E 00	0.3279E 01	25*
8*	0.4443E 01	0.4814E 01	0.1466E-08	0.1451E 17	0.2378E 17	46*	0.9248E 00	0.3278E 01	26*
9*	0.3808E 01	0.4083E 01	0.1252E-08	0.1240E 17	0.2021E 17	45*	0.9329E 00	0.3261E 01	27*
10*	0.2977E 01	0.3059E 01	0.5684E-09	0.9588E 16	0.1514E 17	47*	0.9447E 00	0.3159E 01	28*
11*	0.1525E 01	0.1574E 01	0.4923E-09	0.4674E 16	0.7790E 16	51*	0.9640E 00	0.3197E 01	29*
12*	0.2102E 01	0.2197E 01	0.8752E-09	0.8685E 16	0.1088E 17	49*	0.9567E 00	0.3254E 01	30*
13*	0.2647E 01	0.2794E 01	0.8573E-09	0.8488E 16	0.1383E 17	47*	0.9475E 00	0.3259E 01	31*
14*	0.3146E 01	0.3350E 01	0.1027E-08	0.1010E 17	0.1659E 17	48*	0.9380E 00	0.3286E 01	32*
15*	0.3551E 01	0.3894E 01	0.1170E-08	0.1159E 17	0.1883E 17	47*	0.9334E 00	0.3250E 01	33*
16*	0.3799E 01	0.4080E 01	0.1264E-08	0.1252E 17	0.2020E 17	46*	0.9313E 00	0.3227E 01	34*
17*	0.3799E 01	0.4070E 01	0.1263E-08	0.1250E 17	0.2015E 17	46*	0.9313E 00	0.3224E 01	35*
18*	0.3624E 01	0.3879E 01	0.1183E-08	0.1172E 17	0.1920E 17	46*	0.9343E 00	0.3278E 01	36*
19*	0.3142E 01	0.3335E 01	0.1020E-08	0.1010E 17	0.1651E 17	46*	0.9420E 00	0.3270E 01	37*
20*	0.2606E 01	0.2522E 01	0.7819E-09	0.7742E 16	0.1249E 17	47*	0.9537E 00	0.3226E 01	38*

B02 22/11/73

VALEURS MOYENNES

GRUPPE	D MOYEN	S MOYEN	R MOYEN	ECART TYPE	ERREUR REL
1 A 1*	0.4049E 01	0.9303E 00	0.3245E 01	0.4278E-01	0.4394E-02
11 A 2*	0.2973E 01	0.9438E 00	0.3247E 01	0.2809E-01	0.2884E-02

ANNEXE V

MESURE DU RAPPORT D'ETALONNAGE ENTRE LES 2 LOTS DE GRAPHITE

Deux lots de graphite étalon ont été utilisés pour réaliser des dosimétries G. A. M. I. N. Le premier lot a permis les essais préliminaires et, après un étalonnage succinct, les mesures d'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} réalisées en 1969, 1970 et début 1971.

Un nouveau lot de graphite plus important (possibilité de faire environ 8 000 dosimètres) a été utilisé à partir de Mars 1971. Bien que de même origine et de fabrication similaire, ces 2 lots ont présenté une différence notable de sensibilité aux neutrons. Deux ensembles d'irradiations qui comportaient des dosimètres des 2 lots ont permis d'établir le coefficient de passage d'un lot à l'autre.

1. Irradiations dans ISIS des 29.3.71, 31.3.71, 6.4.71, 7.4.71 :

Cette série d'irradiation comportait 31 G. A. M. I. N. du nouveau lot et 5 de l'ancien. On a ainsi mesuré dans l'emplacement 72 d'ISIS :

- r nouveau lot de graphite : 3,40
- r ancien lot de graphite : 3,90

soit un rapport $\frac{\text{ancien G}}{\text{nouveau G}} = 1,145$.

2. Irradiation dans PLUTO-DIDO du 24.2.71 :

6 G. A. M. I. N. de l'ancien lot de graphite et 3 du nouveau ont été irradiés dans des conditions identiques et ont conduit à :

- r nouveau lot de graphite* : 3,85
- r ancien lot de graphite : 4,37

soit un rapport $\frac{\text{ancien G}}{\text{nouveau G}} = 1,135$

* Voir fiche A de l'annexe VI du présent rapport.

On retient, comme coefficient d'intercalibration des 2 lots de graphite

$$\frac{\text{ancien G}}{\text{nouveau G}} = 1,14.$$

Toutes les valeurs figurant dans ce rapport sont cohérentes : en particulier, les mesures réalisées avec l'ancien lot de graphite ont été affectées de ce rapport 1,14.

A N N E X E V I

FICHES RECAPITULATIVES DES MESURES REALISEES A CE JOUR

Ces fiches constituent un complément au tableau général 17.

On indique, pour chaque série de mesures réalisée, les conditions d'irradiation : réacteur, emplacement, positions des dosimètres, dispositif d'irradiation, température d'irradiation, ...

On donne ensuite les résultats relatifs à chaque dosimètre.

FICHE A

REACTEUR : PLUTO-DIDO à Harwell (Grande-Bretagne)

TYPE : modéré D_2O

Référence [29]

Deux irradiations ont été réalisées dans le réacteur PLUTO en février et mai 1971. Elles avaient pour but d'étalonner directement G.A. M.I. N., en flux DIDO.

Rappelons que le flux DIDO, ou flux nickel équivalent DIDO (O^{END}) est l'unité pratique la plus utilisée pour exprimer les doses de dommages dans le graphite. Ces mesures et leur interprétation détaillée font l'objet de la note [29].

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

	1ère mesure	2ème mesure
Date d'irradiation	24.2.71	22.5.71
Durée de l'irradiation	2 h 25 mn	17 h 30 mn
Puissance pile	60 kW	300 kW
Emplacement	C 3	C 5 et D 4
Type d'élément combustible	Mark 5	Mark 5
Chargement	barillet graphite	barillet aluminium
Température d'irradiation	46°C	75°C
Température équivalente	63°C	76°C
Nombre de G.A. M.I. N.	3	6

L'irradiation de février comportait, en outre, 6 G.A. M.I. N. provenant d'un ancien lot de graphite étalon (voir Annexe V), et qui ont contribué à la détermination expérimentale de la dispersion (écart-type de 0.09 donné plus loin).

II - RESULTATS.

1ère mesure : 24.2.71					2ème mesure : 22.5.71			
N° GAMIN	$\Delta R/R$ %	ϕ_{Ni} $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %	r	N° GAMIN	$\Delta R/R$ %	ϕ_{Ni} $10^{17} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %
1	1,244	3,36	1,292	3,81	1	28,17	1,012	40,20
2	1,264	3,37	1,314	3,86	2	27,98	1,000	39,91
3	1,266	3,37	1,317	3,87	3	28,89	1,040	41,24
					4	28,77	1,024	41,06
					5	27,96	1,000	39,88
					6	27,56	0,988	39,31

On a ainsi :

Mesure du 24.2.71 :

$$\bar{r} = 3,85 \pm 0,09 \text{ (écart-type de la dispersion constatée)}$$

$$\text{soit } \phi_G / \phi_{Ni} = 1,92$$

Mesure du 22.5.71 :

$$\bar{r} = 3,95 \pm 0,02 \text{ (écart-type de la dispersion constatée)}$$

$$\text{soit } \phi_G / \phi_{Ni} = 1,97$$

FICHE B

REACTEUR : DIDO à Harwell (Grande-Bretagne)

TYPE : modérateur D_2O

Référence [29]

Il s'agit d'une mesure indirecte par l'intermédiaire du graphite PGA KD RE anglais étalonné à BEPO et DIDO avant 1963.

Une irradiation simultanée de PGA et de G.A. M.I.N. à ISIS permet de reconstituer l'indice G.A. M.I.N. r à BEPO et DIDO dans les conditions de référence de DIDO antérieures à 1963.

La fiche J (BEPO) récapitule la mesure qui conduit à :

$$\phi_{Ni}^{ENB} / \phi_{Ni} = 0,417 \pm 0,006 \text{ (écart-type) à ISIS (trou 42)}$$

On déduit d'autre part de [27] le rapport des flux nickel équivalent DIDO et BEPO

$$\phi_{Ni}^{END} / \phi_{Ni}^{ENB} = 0,485 \pm 0,05$$

$$\text{soit } \phi_{Ni}^{END} / \phi_{Ni} = 0,86 \pm 0,015 \text{ à ISIS (trou 42)}$$

$$\text{or } r = 3,41 \pm 0,03 \text{ à ISIS (trou 42)}$$

$$\text{et } \phi_{Ni}^{END} / \phi_{Ni} \equiv 1 \text{ par définition de } \phi_{Ni}^{END} \text{ à DIDO}$$

$$\text{soit } r = 3,41 \frac{1}{0,86} = 3,96$$

$$r_{DIDO} = 3,96 \pm 0,08$$

définition de DIDO antérieure à 1963

FICHE C

REACTEUR : FRJ2 à Jülich (R. F. A.)

TYPE : modéré D₂O

Référence [30]

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

La mesure G. A. M. I. N. a été réalisée dans deux emplacements d'irradiation : en C2 au centre d'un élément combustible ayant un taux de combustion de 6,5 %, en D4 au centre d'un élément combustible ayant un taux de combustion de 33 %.

Chaque élément comportait 7 G. A. M. I. N. situés sur l'axe (voir les cotes rapport au plan médian dans le tableau).

Date d'irradiation 22.10.71
Durée de l'irradiation 2 heures
Puissance pile 600 kW
Emplacement C2 et D4
Type d'élément combustible Mark 5
Chargement D₂O et Al
Température d'irradiation voir tableau
Nombre de G. A. M. I. N. 14

II - RESULTATS.

On voit que l'indice r est constant sur la hauteur explorée (± 25 cm par rapport au plan médian)

. en C2 $\bar{r} = 4,02 \pm 0,03$ (écart-type de la dispersion constatée)

. en D4 $\bar{r} = 4,01 \pm 0,03$ (écart-type de la dispersion constatée).

Il y a de plus un certain doute sur les températures (qui ont dû être calculées). L'erreur correspondante est au minimum de 7°C, soit 1 % au minimum sur r ; l'erreur

totale sur r devient alors (somme quadratique) supérieure à 0,05

soit, pour fixer les idées, 0,1. L'incertitude sur les températures est la même pour les 2 cas C2 et D4, et ne doit donc pas être considérée pour une comparaison entre ces 2 cas qui apparaissent équivalents. On a donc :

$$r = 4,01 \pm 0,1$$

$$\phi_G / \phi_{Ni} = 2,0 \pm 0,05$$

quelque soit le taux de combustion compris entre 6 et 33 %.

Elément C2								Elément D4							
N° MIN	Cote cm	$\Delta R/R$ %	ϕ_{Ni} $10^{16} \text{ n. cm}^{-2}$	T °C	T _e °C	δ %	r	N° GAMIN	Cote cm	$\Delta R/R$ %	ϕ_{Ni} $10^{16} \text{ n. cm}^{-2}$	T °C	T _e °C	δ %	r
5	-25,5	6,06	1,62	36	34	6,52	4,00	12	-25,5	4,83	1,28	36	36	5,16	3,99
6	-17	7,41	1,97	39	35	8,06	4,06	13	-17	5,78	1,55	39	37	6,25	3,98
7	-8,5	7,68	2,06	42	37	8,41	4,06	14	-8,5	5,90	1,57	42	40	6,41	4,00
8	0	7,22	1,97	46	42	7,96	4,00	15	0	5,58	1,49	46	45	6,09	4,00
9	+8,5	6,30	1,70	42	39	6,86	3,99	16	+8,5	4,75	1,26	42	42	5,12	4,00
10	+17	4,94	1,30	39	39	5,30	4,05	17	+17	3,60	0,950	39	42	3,83	3,99
11	+25,5	3,22	0,840	36	40	3,39	4,00	18	+25,5	2,29	0,592	36	44	2,38	3,98

FICHE D

REACTEUR : EL.3 à Saclay (France)

TYPE : modéré D₂O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

La mesure G.A.M.I.N. a été réalisée dans l'emplacement d'irradiation DS 1 situé au centre d'un triangle équilatéral de 17,5 cm de côté, ayant un élément combustible à chaque sommet.

Le dispositif d'irradiation était constitué de 4 barillets de graphite évidés au centre : Ø extérieur 34 mm, Ø intérieur 12 mm. Deux d'entre eux comportaient 6 G.A.M.I.N. régulièrement répartis en couronne. Chaque G.A.M.I.N. était séparé de son voisin par une tige d'acier de Ø4 mm, L = 60 mm.

Date d'irradiation : 27.5.74
Puissance pile : 5 MW
Durée de l'irradiation : 70 mn
Température d'irradiation : 74 °C
Cote moyenne du barillet n°1 : 16,5 cm au dessus du plan médian
Cote moyenne du barillet n°2 : 0 cm

II - RESULTATS.

Barillet n° 1							Barillet n° 2						
N° GAMIN	ΔR/R %	Φ _{Ni} 10 ¹⁶ n.cm ⁻²	Te °C	δ %	r	$\bar{r}$	N° G	ΔR/R %	Φ _{Ni} 10 ¹⁵ n.cm ⁻²	Te °C	δ %	r	
1	4,02	1,138	70	4,58	3,99	σ = 0,07	7	4,58	1,289	68	5,23	4,02	
2	3,99	1,144	70	4,55	3,94		8	4,50	1,241	68	5,14	4,11	
3	4,13	1,148	69	4,71	4,07		9	4,51	1,273	68	5,15	4,02	
4	4,17	1,148	69	4,76	4,11		10	4,60	1,256	68	5,25	4,11	
5	4,02	1,139	70	4,58	3,98		11	4,64	1,281	68	5,30	4,11	
6	4,07	1,144	69	4,64	4,02		12	4,63	1,266	68	5,29	4,11	

On voit qu'il n'y a pas de répartition circonférentielle notable ; quant à l'écart entre les 2 barillets, il est suffisamment faible pour que l'on retienne sur l'ensemble du dispositif :

$$\bar{r} = 4,05 \pm 0,07 \text{ (écart-type de la dispersion constatée)}$$

$$\text{soit } \Phi_G / \Phi_{Ni} = 2,02$$

FICHE E

REACTEUR : HARMONIE à Cadarache (France)

TYPE : rapide

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Deux ampoules de silice contenant un échantillon de graphite (ancien lot G étalon) ont été irradiés dans le canal tangentiel d'HARMONIE. L'axe des ampoules A et B (donc les échantillons de graphite) étaient situés respectivement à environ 1 cm et 2 cm du coeur.

Date d'irradiation : 13.2.69

Durée de l'irradiation : 3 heures

Puissance pile : 2 kW

II - RESULTATS.

Les résultats ci-dessous tiennent compte du rapport d'étalonnage entre l'ancien et le nouveau lot de graphite ; ils sont donc cohérents avec l'ensemble des résultats de ce rapport.

On constate que le spectre se dégrade rapidement lorsqu'on s'éloigne du coeur.

ϕ_G / ϕ_{Ni} passe de 3,7 à 5,2 pour un éloignement d'environ 1 cm.

Ampoule	$\Delta R/R$ %	ϕ_{Ni} $10^{15} \text{ n. cm}^{-2}$	δ %	r
A	0,96	1,30	0,96	7,4
B	1,02	0,97	1,02	10,5

FICHE F

REACTEUR : PROSPERO à Valduc (France)

TYPE : réacteur source à coeur Pu

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Le réacteur source PROSPERO est constitué d'un cylindre ($\phi \approx 14$ cm) de plutonium au milieu duquel se trouve la cavité d'irradiation ($\phi = 10$ cm, $e = 1,8$ cm). Le coeur est entouré d'un réflecteur en uranium de 10 cm d'épaisseur.

Sept G.A.M.I.N. ont été irradiés dans la cavité centrale. Les dosimètres 1 à 6 situés en couronne autour du n° 7 formaient un ensemble compact.

Date d'irradiation 4.11.71

Durée de l'irradiation 6 h 30 mn

Puissance pile 250 W

Température d'irradiation 59°C

Température équivalente 98°C

II - RESULTATS.

On trouve $\bar{r} = 3,43 \pm 0,03$ (écart-type de la dispersion constatée sur 5 valeurs) soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1,71$

Les G.A.M.I.N. 3 et 5 ont été éliminés.

Un spectre de fission pur devrait conduire à $\phi_G / \phi_{Ni} = 1$ (par définition).

Le spectre neutronique dans la cavité semble donc assez éloigné d'un spectre de fission. Les échantillons eux-mêmes ont sans doute contribué à dégrader en énergie le flux neutronique régnant dans la cavité, toutefois le GAMIN n° 7 (qui était complètement entouré de graphite) donne un résultat qui n'est supérieur à la moyenne que d'environ 1 %. Ceci conduit à penser que l'influence des G.A.M.I.N. sur le spectre n'est pas prépondérante.

N° GAMIN	$\Delta R/R$ %	O_{Ni} $10^{15} \text{ n. cm}^{-2}$	δ %	r
1	0,507	1,695	0,585	3,42
2	0,500	1,668	0,577	3,43
4	0,510	1,692	0,587	3,44
6	0,511	1,719	0,588	3,39
7	0,507	1,661	0,584	3,48

FICHE G

REACTEUR : RAPSODIE à Cadarache (France)

TYPE : rapide

Référence [31]

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Les répartitions axiales et circonférentielles de δ et r ont été réalisées dans 3 emplacements situés en couronne 05 de RAPSODIE (limite coeur-réflecteur). Ces emplacements différaient essentiellement par le nombre d'éléments combustibles adjacents : 1, 2 ou 3 suivant le cas.

Les dosimètres étaient montés dans 3 capsules identiques (IVZ5) qui contenaient chacune 5 barillets de graphite de $\varnothing 42$ mm sur une hauteur totale de 700mm. Chaque barillet comprenait 7 dosimètres : 1 central et 6 régulièrement répartis sur un cercle de $\varnothing = 33$ mm (voir schéma ci-dessous).

Date d'irradiation 6.1.73, de 0h24 à 2h24
 Puissance pile 120 kW
 Durée de l'irradiation 2 h
 soit JEPC* reçus $2,7.10^{-4} \pm 5\%$
 Température sodium 150 ± 1 °C
 Cote des barres toutes à +11,5 cm (distance entre bas du B_4C et plan moyen)

Emplacement	N° de la capsule IVZS	Nombre d'éléments combustibles voisins	Chargement en pile le 5.1.73 à	Déchargement le 6.1.73 à
0507	0020	2	3h 15mn	10h 15 mn
0504	0021	3	2h 30mn	8h 55mn
0518	0022	1	4h 00 mn	9h 35 mn

* JEPC : Jours Equivalents de fonctionnement à Puissance Caractéristique de Rapsodie

II - TEMPERATURE DES DOSIMETRES PENDANT L'IRRADIATION.

Il est essentiel de connaître précisément la température d'irradiation des G.A. M. L. N. Les capsules ne pouvant pas être équipées de thermocouples, les températures ont été déterminées par des témoins de température (pastille blanche virant au noir lorsque leur température nominale est atteinte ou dépassée). Ces témoins ont conduit à retenir les températures figurant au tableau 1. On voit qu'il y a un écart de température de 13°C entre les extrémités et le centre d'un montage. Cet échauffement, incompatible avec la puissance de fonctionnement mesurée, est attribué pour l'essentiel au rayonnement γ de désactivation (puissance résiduelle de RAPSODIE le 6.1.73 évaluée à 100 kW).

Des témoins de température identiques à ceux utilisés ici ont été testés à flux et sous flux à des températures et des fluences voisines de celles réalisées à RAPSODIE. Ces témoins ont présenté un comportement normal (sauf ceux de température nominale 160°C).

L'incertitude sur les températures ainsi déterminées est évaluée à $\pm 2^\circ\text{C}$.

N° étage \ N° capsule	IVZ5 0020 IVZ5 0022	IVZ5 0021
1	153°C	154°C
2	159	160
3	166	167
4	159	160
5	152	153

Tableau 1 - Répartition des températures

III - EFFET DE GUERISON DES DEFAUTS RADIO-INDUITS DANS LE GRAPHITE

APRES LA FIN DE L'IRRADIATION :

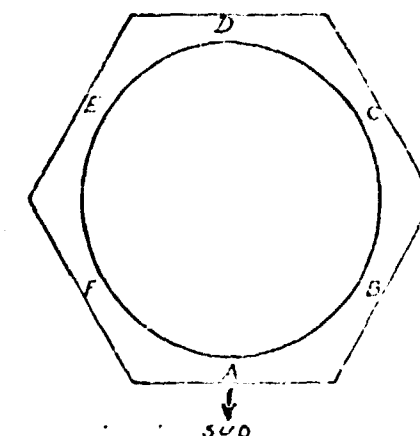
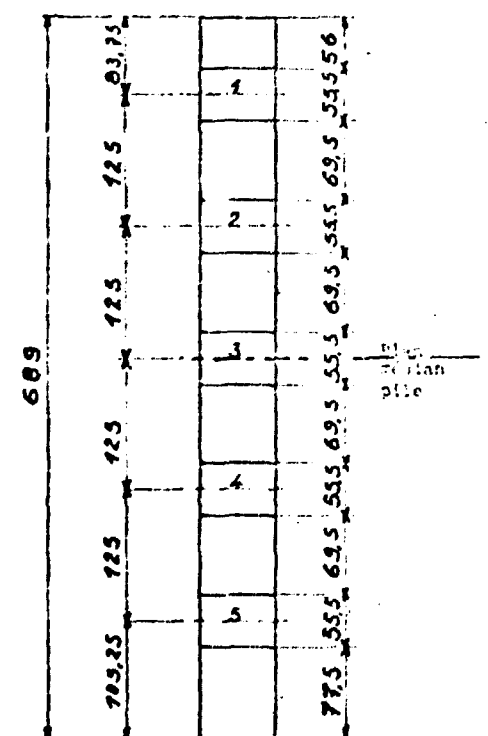
Les échantillons sont restés à la même température que pendant l'irradiation jusqu'au défournement des capsules (soit pendant 6h30 à 8h suivant la capsule). Ce maintien à température élevée a provoqué une guérison partielle des défauts radio-induits créés au cours de l'irradiation. Des échantillons irradiés dans ISIS

à 155°C et 173°C et ayant subi des effets $\Delta R/R$ compris entre 1 et 3 (donc tout à fait représentatifs des G.A. M. L. N. de RAPSODIE) ont été recuits aux mêmes températures pendant 10 heures par sauts de 2 heures. On a pu mesurer ainsi l'effet de ce recuit sur le ΔR dû à l'irradiation (voir figure 1).

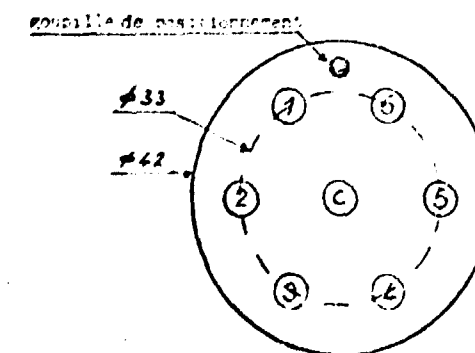
Le tableau 2 ci-dessous donne les coefficients multiplicatifs qui ont été appliqués aux mesures brutes ΔR pour tenir compte de ce phénomène. L'incertitude de ces coefficients est estimée à $\pm 2\%$.

N° étage \ N° capsule	IVZ5 0020	IVZ5 0021	IVZ5 0022
1 et 5	1,28	1,26	1,265
2 et 4	1,33	1,31	1,315
3	1,39	1,36	1,37

Tableau 2



Contour d'un échantillon d'irradiation



Répartition des températures dans la pile

Figure 1.013

Etage	Cote cm	Position	N° GAMIN	$\Delta R/R$ 2J %	ϕ NI $10^{16} \text{ n.cm}^{-2}$	Te °C	δ %	r
Haut	+25	Centre	1	1,201	1,166	165	2,18	18.
			2	1,100	0,993	167	1,93	17.
			3	1,090	0,944	167	1,96	20.
			4	1,147	1,079	168	2,07	19.
			5	1,253	1,358	164	2,33	17.
			6	1,338	1,421	164	2,44	17.
			7	1,218	1,227	165	2,21	17.
2	+12,5	Centre	8	2,446	4,40	160	4,85	11.
			9	2,254	3,47	161	4,45	12.
			10	2,178	3,17	162	4,29	13.
			11	2,431	3,87	160	4,82	12.
			12	2,763	5,55	158	5,52	9.
			13	2,893	6,31	158	5,79	9.
			14	2,626	4,97	159	5,23	10.
3	0	Centre	15	3,498	6,53	161	7,51	11.
			16	3,160	5,18	163	6,74	12.
			17	3,064	4,70	163	6,53	13.
			18	3,375	5,77	162	7,23	12.
			19	3,806	8,22	160	8,21	9.
			20	3,994	9,26	159	8,64	9.
			21	3,597	7,37	161	7,74	10.
4	-12,5	Centre	22	2,715	4,85	159	5,42	11.
			23	2,470	3,85	160	4,90	12.
			24	2,408	3,53	160	4,77	13.
			25	2,670	4,28	159	5,32	12.
			26	3,055	6,10	157	6,13	10.
			27	3,181	6,89	156	6,40	9.
			28	2,732	5,45	158	5,58	10.
5 bas	-25	Centre	29	1,447	1,385	162	2,63	18.
			30	1,355	1,181	163	2,46	20.
			31	1,303	1,109	163	2,36	21.
			32	1,459	1,272	162	2,66	20.
			33	1,623	1,626	160	2,97	18.
			34	1,681	1,706	159	3,09	18.
			35	1,555	1,473	161	2,84	19.

Tableau 3

Emplacement 05 - 07 (2 éléments combustibles voisins)
capsule IVZ5 0020

Etage	Cote cm	Position	N° GAMIN	$\Delta R/R$ 2J %	ϕ NI $10^{16} \text{ n.cm}^{-2}$	Te °C	δ %	r
1 Haut	+25	Centre	71	1,190	1,154	167	2,17	18.
			72	1,311	1,204	165	1,81	17.
			73	1,200	1,079	167	2,19	17.
			74	1,139	1,007	167	2,07	20.
			75	1,077	0,987	167	1,95	20.
			76	1,222	1,189	165	2,23	20.
			77	1,337	1,320	165	2,46	18.
2	+12,5	Centre	78	2,479	4,68	161	4,96	10.
			79	2,800	6,40	160	5,64	10.
			80	2,614	5,41	160	5,24	9.
			81	2,269	3,82	161	4,51	11.
			82	2,245	3,44	160	4,46	10.
			83	2,298	4,19	161	4,79	11.
			84	2,311	5,03	159	5,66	10.
3	0	Centre	85	3,439	6,97	162	7,44	10.
			86	3,982	9,55	160	8,69	9.
			87	3,643	8,07	161	7,91	9.
			88	3,162	5,73	163	6,85	11.
			89	3,00	5,08	164	6,44	10.
			90	3,295	6,32	163	7,11	11.
			91	3,913	8,82	160	8,53	9.
4	-12,5	Centre	92	2,842	5,28	159	5,73	10.
			93	3,282	7,28	157	6,67	9.
			94	3,015	6,15	158	6,12	9.
			95	2,62	4,35	160	5,26	10.
			96	2,505	3,81	161	5,01	10.
			97	2,728	4,76	160	5,49	11.
			98	3,119	6,52	160	6,32	9.
5 bas	-25	Centre	99	1,567	1,430	161	2,89	20.
			100	1,725	1,728	160	3,20	18.
			101	1,561	1,517	161	2,48	18.
			102	1,423	1,247	163	2,61	20.
			103	1,341	1,172	164	2,45	19.
			104	1,449	1,353	163	2,66	19.
			105	1,627	1,628	161	3,00	18.

Tableau 4

Emplacement 05 - 04 (3 éléments combustibles voisins)
capsule IVZ5 0021

Etage	Cote cm	Position	N° G.A.M.I.N.	ΔU_R 2J %	ϕ_{Ni} 10^{16} n.cm ⁻²	Te °C	δ %	r
1Haut	+25	Centre	36	1,124	1,077	166	2,03	18.
		1	37	1,229	1,230	165	2,23	18.
		2	38	1,217	1,191	165	2,25	18.
		3	39	1,157	0,986	166	2,09	21.
		4	40	1,068	0,880	167	1,92	21.
		5	41	1,058	0,893	167	1,90	21.
		6	42	1,151	1,058	166	2,08	19.
2	+12,5	Centre	43	2,157	3,44	162	4,24	12.
		1	44	2,404	4,73	160	4,95	10.
		2	45	2,46	4,35	160	4,88	11.
		3	46	2,171	3,18	162	4,27	13.
		4	47	1,974	2,62	163	3,86	14.
		5	48	1,971	2,70	163	3,86	14.
		6	49	2,185	3,56	162	4,30	12.
3	0	Centre	50	3,067	4,98	163	6,53	13.
		1	51	3,378	6,82	162	7,24	10.
		2	52	3,33	6,35	162	7,13	11.
		3	53	2,886	4,60	164	6,13	13.
		4	54	2,594	3,72	166	5,47	14.
		5	55	2,690	3,88	165	5,68	14.
		6	56	3,113	5,15	163	6,64	12.
4	-12,5	Centre	57	2,393	3,67	161	4,74	12.
		1	58	2,755	5,18	158	5,50	10.
		2	59	2,672	4,73	159	5,33	11.
		3	60	2,344	3,44	161	4,63	13.
		4	61*	2,270	2,80	161	4,48	15.
		5	62	2,124	2,94	162	4,18	14.
		6	63	2,475	3,87	160	4,91	12.
5Bas	-25	Centre	64	1,384	1,216	162	2,51	20.
		1	65	1,533	1,469	161	2,80	18.
		2	66	1,489	1,397	161	2,71	19.
		3	67	1,310	1,164	163	2,37	20.
		4	68	1,237	1,023	164	2,23	21.
		5	69	1,265	1,053	164	2,28	21.
		6	70	1,38	1,246	162	2,50	19.

* éliminé

Tableau 5

Emplacement 05 - 18 (1 élément combustible voisin)
capsule IVZ5 0022

FICHE II

REACTEUR : BRI à Mol (Belgique)

TYPE : modéré graphite

Référence [32]

I - CONDITIONS D'IRRADIATIONS.

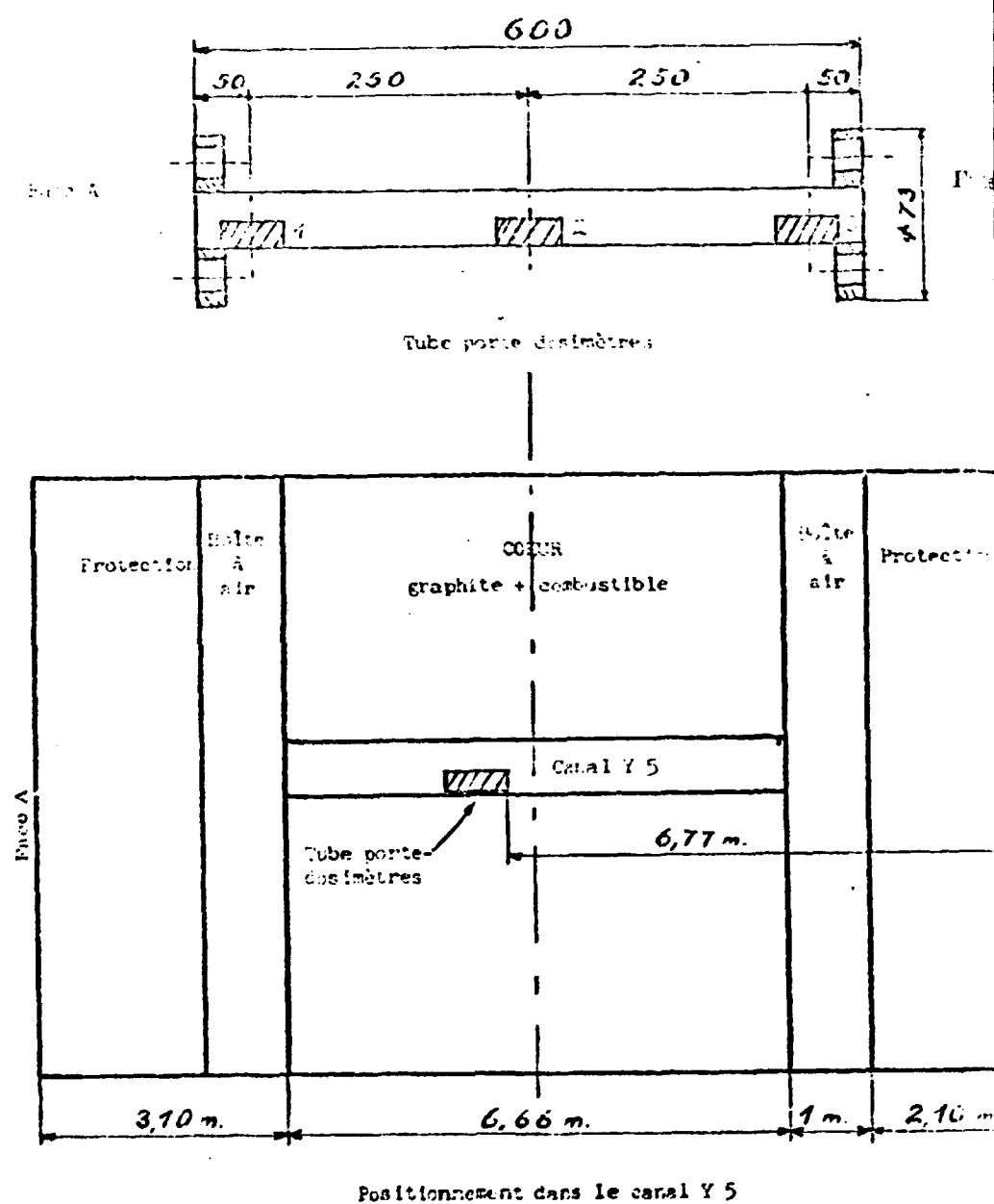
Deux mesures ont été réalisées dans le canal Y5 de BRI. Ce canal est situé sensiblement au centre du réacteur, parallèlement aux éléments combustibles. Les éléments combustibles sont disposés suivant un réseau carré à pas de 18 cm.

Le canal Y5 est au centre d'une cellule élémentaire, son axe est à 12,5 cm des 4 éléments combustibles voisins.

L'emplacement des dosimètres G. A. M. I. N. est précisé sur le schéma ci-dessous. Ces dosimètres étaient disposés par paquets de 4 situés dans un tube d'aluminium pouvant coulisser dans le canal et formant centreur.

Chaque irradiation comportait 3 groupes de 4 dosimètres distants de 25 cm.

	1ère mesure	2ème mesure
Date d'irradiation	3.7.72	2.10.73
Puissance pile	3,2 MW	3,2 MW
Durée de l'irradiation	4 h	5h 30 mn
Température d'irradiation	18°C	41 °C
Température équivalente	38°C	64 °C
Nombre de G. A. M. I. N.	12	12



II - RESULTATS.

Le tableau ci-joint donne l'ensemble des résultats relatifs à chaque dosimètre pour les 2 irradiations.

La 1ère mesure conduit à $\bar{r} = 7,42 \pm 0,14$ (écart-type de la dispersion constatée)

La 2ème mesure conduit à $\bar{r} = 7,25 \pm 0,07$ (écart-type de la dispersion constatée)

La 1ère série de mesures est plus dispersée que la seconde ; de plus, cette irradiation a été réalisée à une température située tout à fait à la limite de la gamme d'étalonnage G.A.M.I.N. ; nous retiendrons donc :

$$r = 7,25 \pm 1\% \text{ soit } O_G / O_{Ni} = 3,62.$$

N° tube	N° G.A.M.I.N.	1ère mesure : 3.7.72					2ème mesure : 1.10.73				
		$\Delta R/R$ %	σ_{Ni} $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %	r	$\bar{r}$	$\Delta R/R$ %	σ_{Ni} $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %	F	F
1	1	1,217	1,586	1,219	7,62	7,46	1,400	1,990	1,555	7,74	7,23
	2	1,140	1,582	1,190	7,45		1,587	1,947	1,452	7,23	
	3	1,177	1,593	1,177	7,32		1,351	1,930	1,513	7,23	
	4	1,101	1,587	1,192	7,44		1,411	1,911	1,476	7,34	
2	5	1,228	1,673	1,230	7,29	7,51	1,491	2,137	1,509	7,26	7,22
	6	1,235	1,674	1,237	7,32		1,459	2,129	1,539	7,12	
	7	1,231	1,676	1,236	7,31		1,481	2,113	1,551	7,19	
	8	1,236	1,677	1,239	7,32		1,490	2,121	1,564	7,21	
3	9	1,504	1,727	1,509	7,51	7,50	1,553	2,203	1,623	7,19	7,23
	10	1,281	1,726	1,505	7,38		1,571	2,256	1,653	7,11	
	11	1,355	1,727	1,480	7,79		1,572	2,201	1,654	7,24	
	12	1,291	1,728	1,505	7,33		1,576	2,259	1,668	7,28	

FICHE I

REACTEUR : DRAGON à Winfrith (Grande-Bretagne)

TYPE : H.T.R.

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

I.1 - Renseignements généraux :

25 dosimètres G.A. M.I.N. ont été irradiés en 4 emplacements (tubes de circulation d'hélium) numérotés dans la suite 1, 2, 3, 4, en partant du centre du réacteur et situés approximativement suivant un rayon. La disposition verticale des G.A. M.I.N. est montrée sur la figure 1.

Emplacements 1 et 2 : dans l'élément combustible 1/2,

Emplacements 3 et 4 : dans l'élément combustible 5/2.

Date d'irradiation : 30.6.73, 21h35 au 1.7.73, 1h35.

Puissance pile : 130 kW.

Durée de l'irradiation : 4 h

Position des barres : 1 - 9 - 17 hautes
les autres à 49 %

Température moyenne d'entrée de l'hélium pendant l'irradiation: 81°C

Température moyenne de sortie de l'hélium pendant l'irradiation : 84°C

II - TEMPERATURE DES G.A. M.I.N. PENDANT L'IRRADIATION.

Les températures des dosimètres G.A. M.I.N. ont été déterminées pendant l'irradiation à l'aide de témoins de température (pastilles blanches virant au noir lorsque leur température nominale est atteinte ou dépassée).

Les températures ainsi obtenues figurent au tableau 1. L'incertitude, sur ces valeurs, est estimée à $\pm 2^\circ\text{C}$. Ces valeurs de températures sont en très bon accord avec les valeurs calculées par le "Projet DRAGON".

La température n'ayant diminué que très lentement après la fin de l'irradiation (la température moyenne de l'He est passée de 82°C à 62°C en 2 heures), un effet de guérison des défauts radio-induits a eu lieu. Cet effet a été mesuré en réalisant dans ISIS une irradiation semblable en dose, durée et température à celle réalisée

DRAGON. Après cette irradiation, les échantillons ont été mesurés puis placés dans les mêmes conditions de température qu'à DRAGON, pendant les 2 heures qui ont suivi la fin d'irradiation.

L'effet de recuit a ainsi été déterminé égal à 3 %. La valeur $\Delta R/R$ mesurée sur chaque G.A. M.I.N. irradié à DRAGON a donc été augmentée de 3 % pour tenir compte de cet effet.

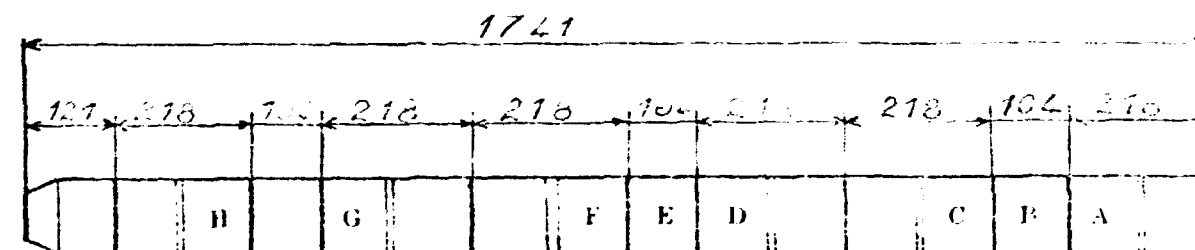


Figure 1

Emplacement		1 - 2 - 3	4
Position en hauteur			
Haut	A B C	90°C	-
Milieu	D E F	90°C	95°C
Bas	G H	85°C	90°C

Tableau 1

III - RESULTATS.

On remarque que l'indice r varie peu sur la hauteur explorée par les G.A. M.I.N. (écart d'environ 4 % entre point milieu et point bas).

Dans l'emplacement 1, le point bas et le point haut donnent le même résultat ($\bar{r} = 5,6$).

Les résultats relatifs au point haut de l'emplacement 3 ne peuvent être retenus car la dose d'irradiation sur ces 2 dosimètres a été trop faible pour conduire à une mesure précise du ΔR .

Suivant le rayon, l'indice r dans le plan médian varie de 5,8 à 4,8 lorsque l'on passe du centre à la périphérie du réacteur.

L'incertitude (écart-type) sur chaque résultat (sauf étage 3 haut) est estimée à $\pm 2\%$. Il s'agit de la somme quadratique des erreurs partielles (écart-type estimées) suivantes :

- . erreur sur la mesure de l'activité du Co^{58} : 1 %
- . erreur sur la mesure et l'interprétation de l'effet $\Delta R/R$ sur le graphite
- . erreur due à l'incertitude sur les températures : 1,5 %
- . erreur sur la correction de recuit après irradiation : 0,5 %

Emplacement		N° G.A.M.I.N.	$\Delta R/R$ %	ϕ_{N1} $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	Te °C	ϕ %	r	$\bar{r}$
1 Haut	A	21	0,851	1,87	113	1,069	5,65	5,64
	B	22	1,060	2,37	111	1,324	5,54	
	C	23	1,324	2,93	109	1,670	5,65	
1 Milieu	D	1	1,910	4,16	105	2,450	5,83	5,82
	E	2	2,060	4,50	104	2,651	5,84	
	F	3	2,182	4,82	103	2,816	5,79	
1 Bas	G	4	2,144	4,63	93	2,614	5,59	5,59
	H	5	1,622	3,46	96	1,947	5,60	
2 Milieu	D	6	1,731	3,88	106	2,212	5,65	5,71
	E	7	1,901	4,25	105	2,440	5,69	
	F	8	2,086	4,62	104	2,687	5,77	
2 Bas	G	9	2,024	4,44	94	2,462	5,49	5,50
	H	10	1,556	3,36	96	1,872	5,52	
3 Haut	A	24	0,482	0,993	119	0,624	6,23	5,99
	B	25	0,585	1,29	117	0,750	5,76	
3 Milieu	D	11	1,207	2,86	110	1,517	5,25	5,20
	E	12	1,388	3,36	108	1,756	5,17	
	F	13	1,581	3,85	107	2,012	5,18	
3 Bas	G	14	1,583	3,91	95	1,906	4,83	4,88
	H	15	1,269	3,03	99	1,513	4,94	
4 Milieu	D	16	0,858	2,25	119	1,107	4,87	4,75
	E	17	1,045	2,81	116	1,343	4,73	
	F	18	1,194	3,30	115	1,543	4,64	
4 Bas	G	19	1,261	3,42	109	1,587	4,59	4,61
	H	20	1,012	2,70	112	1,262	4,64	

Tableau 2

FICHE J

REACTEUR : BEPO à Harwell (Grande-Bretagne)

TYPE : modérateur graphite

Référence [29]

Il s'agit d'une mesure indirecte par l'intermédiaire du graphite PGA KD/RE anglais étalonné à BEPO.

Toutes les données de mise en oeuvre du PGA sont récapitulées en [29]. En résumé, une variation relative de résistance $\Delta R/R$ détermine une fluence équivalente BEPO ϕ^{ENB}_{10} suivant :

$$\Delta R/R = 0,162 \left(1 - 0,00514 T\right) \left(\phi^{ENB}_{10} 10^{-16}\right)^{0,75}$$

avec T en °C et ϕ en cm^{-2} .

Une irradiation simultanée de PGA KD/RE et de G.A.M.I.N. à ISIS permet de reconstituer l'indice G.A.M.I.N. r à BEPO (emplacement TE 10).

I - CONDITIONS D'IRRADIATIONS.

a) Etalonnage du PGA KD/RE à BEPO (TE 10) avant 1962.

b) Comparaison PGA-G.A.M.I.N. à ISIS :

Date d'irradiation	16.6.71	
Durée	12h 56 mn	
Puissance pile	685 kW	
Emplacement	42 (conditions standard définies chap.II)	
Température d'irradiation	54 C	
	PGA	G.A.M.I.N.
Nombre de mesure	4 (+3)	5
Température équivalente d'irradiation	35 C	52 C

Les températures équivalentes ne sont pas les mêmes pour PGA et GAMIN. A la différence de la mise en oeuvre GAMIN, il s'agit dans le cas de PGA d'une d'une équivalence BEPO avec $Q_{BEPO} = 0.9 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ et d'autre part d'un type de calcul d'une seule énergie d'activation $Q = 1.2 \text{ eV}$ (voir annexe b).

Les 4 échantillons PGA sont découpés dans le sens $\perp$. 3 échantillons découpés dans le sens $\parallel$ sont mentionnés pour mémoire ; il n'existe pas d'étalonnage correspondant.

II - RESULTATS.

L'indice G.A. M.I.N. dans les conditions standard de l'emplacement 42 est de $r = 3.41 \pm 0.03$ (voir chapitre III.3)

Les 5 détecteurs G.A. M.I.N. mis en oeuvre ici à titre de contrôle conduisent à $r = 3.39$ avec une dispersion caractérisée par un écart-type $\sigma_r = 0.06$. On admet que la valeur $r = 3.41$ est bien vérifiée.

N° échantillons P.G.A.	O_{Ni} 10^{16} cm^{-2}	$\Delta R/R$	O^{ENB} 10^{16} cm^{-2}	O^{ENB} / O_{Ni}
$\parallel$ { 1 2 3 4	12.49	0.467	5.33	0.427
	11.68	0.433	4.81	0.412
	12.54	0.459	5.21	0.415
	11.88	0.410	4.93	0.415
$\perp$ { 5 6 7	12.01	0.426		
	12.12	0.426		
	11.83	0.419		

Soit :

$$O^{ENB} / O_{Ni} = 0.417 \pm 0.006 \text{ (écart-type)} \quad \text{à ISIS}$$

et sachant

$$O^{ENB} / O_{Ni} = 1 \quad \text{par définition de } O^{ENB} \quad \text{à BEPO}$$

$$\text{et } r = 3.41 \pm 0.03 \quad \text{à ISIS}$$

on a :

$$r = 3.41 \cdot \frac{1}{0.417} = 8.08 \quad \text{à BEPO}$$

$$r_{BEPO} = 8.20 \pm 0.15$$

FICHE K

REACTEUR : H. F. R. à Petten (Pays-Bas)

TYPE : modéré H_2O

Référence [31]

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Deux séries de mesures ont été réalisées dans 9 emplacements de HFR :

. 6 emplacements situés dans le coeur : C5, E5, C3, C7, E3, E7.

. 3 emplacements situés dans le réflecteur Be : A2, G2, H3.

	Dosimétrie préliminaire	2ème dosimétrie
Date	14.9.71	10.11.71
Puissance pile	191 kW	136 kW
Durée d'irradiation	2 heures	2 heures
Cote des barres de commande	469 mm	482 mm
Nombre d'emplacements coeur	1	6
Nombre d'emplacements périphérie	1	3
Nombre de G.A.M.I.N.	6	27
Température des G.A.M.I.N.	21°C	30°C

II - RESULTATS.

On a les valeurs typiques suivantes :

Coeur : $\bar{r} = 3.70$ soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1.85$ Périphérie : $\bar{r} = 4.28$ soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 2.14$

Il y a donc un écart de 15 % entre positions coeur et positions périphérie. Cet effet est dû essentiellement au voisinage du Be. L'examen du tableau 2 montre que les 2 emplacements les plus centraux C5 et E5 situés entre les barres de commande conduisent à un indice ϕ_G / ϕ_{Ni} sensiblement plus faible que les 4 autres emplacements :

C5 et E5 : $\bar{r} = 3.62$ soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1.81$ C3, C7, E3, E7 : $\bar{r} = 3.74$ soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1.87$

NB : Chaque mesure est la moyenne de 3 valeurs dont la dispersion est caractérisée par un écart-type moyen de 1 %.

Emplacement	Cote (cm)	N° du G.A.M.I.N.	$\Delta R/\Delta t$ (2 jours)	$\phi_{Ni} \cdot 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %	T_m °C	r	$\bar{r}$
C5 coeur	+ 15	1	1,75	2,73	1,50	36	3,70	3,70
	0	2	1,71	4,69	1,75	41	3,69	
	- 20	3	1,62	4,39	1,55	42	3,72	
H3 périphérie	+ 15	4	0,968	2,63	0,968	46	3,75	3,75
	0	5	1,69	4,49	1,72	41	3,73	
	- 20	6	1,59	4,30	1,52	42	3,73	

TABLEAU 1
Dosimétrie G.A.M.I.N. à H.F.R. du 14.9.71

Emplacement	Cote (cm)	N° du G.A.M.I.N.	$\Delta R/\Delta t$ (2 jours)	$\phi_{Ni} \cdot 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %	T_m °C	r	$\bar{r}$
C3	+ 15	4	1,01	2,73	1,01	40	3,70	3,70
	0	5	1,71	4,69	1,75	41	3,69	
	- 20	6	1,62	4,39	1,55	42	3,72	
C5	+ 15	7	0,835	2,49	0,835	48	3,55	3,57
	0	8	1,81	5,00	1,85	40	3,67	
	- 20	9	1,82	5,07	1,85	40	3,65	
C7	+ 15	29	0,968	2,63	0,968	46	3,75	3,75
	0	11	1,69	4,49	1,72	41	3,73	
	- 20	12	1,59	4,30	1,52	42	3,73	
E3	+ 15	13	1,03	2,75	1,04	46	3,73	3,73
	0	14	1,74	4,68	1,78	41	3,72	
	- 20	15	1,65	4,44	1,59	41	3,73	
E5	+ 15	16	0,925	2,59	0,933	47	3,73	3,73
	0	17	1,82	5,24	1,93	40	3,71	
	- 20	18	1,91	5,36	1,96	40	3,72	
E7	+ 15	30	1,02	2,74	1,02	46	3,70	3,70
	0	20	1,75	4,67	1,79	41	3,73	
	- 20	21	1,68	4,48	1,72	41	3,73	

TABLEAU 2
Dosimétrie G.A.M.I.N. à H.F.R. du 10.11.71 - Emplacements dans le coeur

Emplacement	Cote (cm)	N° du G.A.M.I.N.	$\Delta R/\Delta t$ (2 jours)	$\phi_{Ni} \cdot 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	δ %	T_m °C	r	$\bar{r}$
A2	+ 15	28	0,573	0,872	0,590	56	4,32	4,28
	0	2	0,598	1,40	0,607	51	4,28	
	- 20	3	0,590	1,27	0,548	52	4,24	
G2	+ 15	22	0,524	1,20	0,532	53	4,38	4,34
	0	23	0,782	1,81	0,740	49	4,33	
	- 20	24	0,704	1,64	0,713	50	4,30	
H3	+ 17	25	0,902	0,956	0,910	55	4,25	4,22
	+ 2	26	0,671	1,60	0,683	50	4,23	
	- 18	27	0,675	1,78	0,733	49	4,19	

TABLEAU 3
Dosimétrie G.A.M.I.N. à H.F.R. du 10.11.71 - Emplacements en périphérie

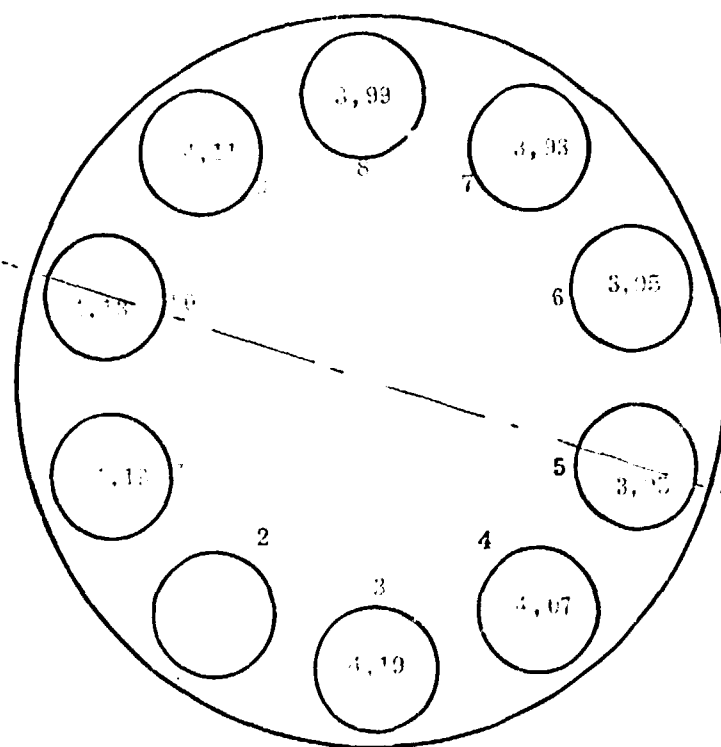
FICHE 1

REACTEUR : PEGASE à Cadarache (France)

TYPE : modéré H_2O

Une répartition circonférentielle de l'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} a été réalisée en avril 1971 dans une boucle d'irradiation EL 4 de PEGASE.

Les valeurs de l'indice r trouvées figurent sur le schéma ci-dessous :



FICHE M

REACTEUR : MELUSINE à Grenoble (France)

TYPE : modéré H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATIONS.

Une répartition verticale de l'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} a été réalisée en 2 emplacements de MELUSINE.

- dans le coeur : emplacement 35 avec 1.2 élément.

La mesure a eu lieu dans le trou coté BC 3. Le second trou était occupé par un moyen d'aluminium.

- en 2ème périphérie : emplacement 62 avec une boîte à eau (mesure sur l'axe de l'emplacement)

Il y a 8 points de mesure à chaque emplacement. En 35, 2 des 8 points de mesure ont été réalisés avec 4 G.A. M.I.N.

	Emplacement 35	Emplacement 62
Date d'irradiation	5.6.72	5.6.72
Puissance pile	0,5	1,5
Durée de l'irradiation	27 mn	1h50 mn
Température d'irradiation	32°C	22°C
Position des barres	BC 2 : 300 BC 3 : haute BC 4 : 300	BC 2 : 355 BC 3 : 355 BC 4 : 355

II - RESULTATS.

L'indice ϕ_G / ϕ_{Ni} est constant sur toute la hauteur explorée en 65. En 62 par contre, les 2 points extrêmes (haut et bas) conduisent à une valeur d'indice inférieure de 2,5 % à celle de la partie centrale (± 14 cm autour du plan médian).

En 35 : $\bar{r} = 2,23 \pm 0,04$ (écart-type de la dispersion constatée)
soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1,46$

En 62 : $\bar{r} = 2,69 \pm 0,06$ (écart-type de la dispersion constatée)
soit $\phi_G / \phi_{Ni} = 1,34$

N° G. A. M. I. N.	Cote cm	$\Delta R/R$ %	$O_{Ni} 10^{15} n.cm^{-2}$	Te °C	δ %	r
* 8b 72	+ 27,3	0,826	2,75	36	0,821	2,95
* 7b 72	+ 19,5	1,302	4,45	31	1,295	2,88
3b 73	11,7	1,683	5,72	29	1,687	2,92
5b 73		1,639	5,52	29	1,641	2,95
4b 73		1,676	5,71	29	1,679	2,91
* 6b 72		1,665	5,62	29	1,668	2,91
* 5b 72	+ 3,9	1,859	6,47	28	1,869	2,86
* 4b 72	- 3,9	2,126	7,13	26	2,146	2,98
9b 72	11,7	2,197	7,30	26	2,220	3,01
2b 72		2,056	7,07	26	2,073	2,91
1b 73		2,124	7,27	26	2,141	2,92
* 7b 73		2,121	7,22	26	2,141	2,91
* 6b 73	- 19,5	1,819	6,36	28	1,858	2,90
* 1b 72	- 27,3	1,281	4,34	31	1,273	2,91

Tableau 1 - Emplacement 35 (coeur)

N° G. A. M. I. N. (boite 66)	Cote cm	$\Delta R/R$ %	$O_{Ni} 10^{15} n.cm^{-2}$	Te °C	δ %	r
8	+ 27,3	0,584	2,20	40	0,581	2,63
7	+ 19,5	1,019	3,88	35	1,011	2,66
6	+ 11,7	1,423	5,37	32	1,422	2,62
5	+ 3,9	1,878	6,66	29	1,893	2,81
4	- 3,9	2,089	7,69	28	2,113	2,72
3	- 11,7	2,113	7,72	28	2,138	2,71
2	- 19,5	1,821	6,80	29	1,833	2,67
1	- 27,3	1,314	4,87	33	1,309	2,66

Tableau 2 - Emplacement 62 (1ère périphérie)

(*) G. A. M. I. N. situés sur une même ligne verticale

FICHE N

REACTEUR : TRITON à Fontenay-aux-Roses (France)

TYPE : modéré H₂O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Les mesures G. A. M. I. N. ont été réalisées dans 3 dispositifs d'irradiation situés en 1ère périphérie dans l'emplacement 61. Les dosimètres G. A. M. I. N. étaient situés dans des éprouvettes d'acier pour essais de résilience (5,5 x 1 x 1 cm). Le bloc d'aluminium comportait 3 trous destinés à recevoir les dispositifs d'irradiation :

- . trou A Ø2 cm axe à 2 cm du coeur
- . trou B Ø2 cm axe à 6 cm du coeur
- . trou C FOUR CHOUCA Ø3 cm axe à 4 cm du coeur

Date d'irradiation 13.6.72

Durée de l'irradiation 120mn

Puissance pile 1,4 MW

Position des barres BC 1 : 569 BC2 : 361
BC 3 : 677 BC4 : basse

II - RESULTATS.

On mesure :

Trou A : $\bar{r} = 3,30 \pm 0,05$ (écart-type de la dispersion constatée) soit $O_G/O_{Ni} = 1,63$

Trou B : $\bar{r} = 3,37 \pm 0,025$ (écart-type de la dispersion constatée) soit $O_G/O_{Ni} = 1,68$

FOUR CHOUCA :

$\bar{r} = 3,47 \pm 0,05$ (écart-type de la dispersion constatée) soit $O_G/O_{Ni} = 1,73$

Emplacement	N° G.A. M.I.N.	Cote cm	Zk R %	$O_{Ni} \cdot 10^{16} \text{ n. cm}^{-2}$	T C	Te C	δ %	r
FOUR CHOUCA	1	- 25	3.26	1.010	58	62	3.57	3.1
	2	- 19	4.29	1.368	62	62	4.78	3.1
	3	- 13	4.92	1.606	65	64	5.55	3.1
	4	- 7	5.43	1.743	67	65	6.20	3.1
	5	0	5.43	1.761	67	65	6.21	3.1
	6	7	4.52	1.493	67	67	5.14	3.1
	7	+ 7	5.24	1.683	65	61	5.93	3.1
	8	+ 13	4.91	1.516	63	63	5.50	2.1
	9	+ 19	4.10	1.290	61	63	4.55	3.1
TROU A	5	- 16	9.09	2.95	38	32	9.94	3.1
	6	- 3.5	10.35	3.50	38	30	11.36	3.1
	7	- 3.5	10.59	3.48	38	30	11.63	3.1
	8	- 16	8.78	2.86	38	32	9.59	3.1
TROU B	1	- 16	4.02	1.261	34	36	4.26	3.1
	2	- 3.5	4.75	1.489	34	34	5.06	3.1
	3	- 3.5	4.74	1.474	34	34	5.04	3.1
	4	- 16	3.98	1.227	34	36	4.21	3.1

FICHE 0

REACTEUR : TRITON 2 Fontenay-aux-Roses (France)

TYPE : modéré H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Une mesure G.A. M.I.N. a été effectuée dans un tube $\Phi = 0.711 \text{ cm}$ situé dans un bloc d'aluminium à l'emplacement 67. L'écran d'aluminium situé contre le cœur avait été remplacé par un écran de plomb. Les 8 dosimètres G.A. M.I.N. étaient situés dans des éprouvettes en acier pour les 18 et résilleux.

Les G.A. M.I.N. 1, 4, 6, 7 et 8 étaient situés sur une même verticale et le cœur.

Les G.A. M.I.N. 2, 3, 4 et 5 étaient répartis en couronne dans le 2ème étage : n° 4 - côté cœur, n° 2 à l'opposé, n° 3 et 5 intermédiaires.

Date d'irradiation : 11.10.72

Durée : 2.5 h

Puissance pile : 500 kW

Température : 63 C

II - RESULTATS.

On remarque une variation de l'indice dans l'étage 2 :

côté cœur : $r = 3.48$ soit $O_G - O_{Ni} = 1.74$

zone intermédiaire et arrière : $r = 3.66$ soit $O_G - O_{Ni} = 1.83$

La valeur moyenne sur l'ensemble du dispositif est :

$$\bar{r} = 3.61 \text{ soit } O_G - O_{Ni} = 1.80$$

N G.A. M.L.N.	N étage	Cote cm	ΔR (s)	$O_{Ni} 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	Te C	δ %	r
8	6	+ 31	1.026	4.93	71	1.799	3.60
7	5	+ 20	2.772	8.46	71	3.095	3.63
6	3	+ 12	3.122	9.55	70	3.496	3.63
5	2	- 5	2.235	6.66	71	2.482	3.69
4	2		3.216	10.26	70	3.604	3.48
3	2		2.786	8.36	71	3.111	3.69
2	2		2.136	6.31	71	2.368	3.72
1	1	- 2	3.205	10.23	70	3.592	3.48

FICHE P

REACTEUR : TRITON à Fontenay-aux-Roses (France)

TYPE : modéré H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATIONS.

Des mesures ont été faites dans 2 emplacements :

. emplacement 18 : 11 dosimètres G.A. M.L.N. étaient régulièrement répartis dans un bloc d'acier parallélépipédique de 35 cm de long et ayant une section de $1 \times 3,75 \text{ cm}$. Ce bloc a été irradié en 1ère périphérie dans l'eau. Son grand axe était confondu avec l'axe de l'emplacement d'irradiation.

. emplacement 62 : une répartition verticale de l'indice $O_G - O_{Ni}$ a été réalisée en 1ère périphérie dans une boîte à eau. 7 dosimètres G.A. M.L.N. étaient répartis suivant l'axe de l'emplacement d'irradiation.

Date d'irradiation 10.4.73

Puissance pile 750 kW

Durée de l'irradiation 128 mn

Température d'irradiation : en 48 62 C

en 62 35 C

Position des barres BC 1 : 6 00 BC 2 : 272

BC 3 : 676 BC 4 : 175

II - RESULTATS.

a) emplacement 18 :

Il n'apparaît pas de répartition de l'indice r dans le bloc :

on a :

$$\bar{r} = 2.93 \pm 0.01 \text{ (écart-type de la dispersion constatée)}$$

$$\text{soit } O_G - O_{Ni} = 1.46.$$

N° G.A.M.I.N.	Cote cm	$\Delta R/R$ %	$O_{Ni} 10^{16} \text{ n.cm}^{-2}$	Te °C	δ %	r
8		3,168	1,180	67	3,502	2,97
9	+ 12,5	3,470	1,282	66	3,844	2,97
10	+ 8	3,526	1,307	66	3,908	2,96
11	+ 6	3,793	1,476	65	4,212	2,89
12	+ 4	3,501	1,324	66	3,879	2,90
13	0	3,757	1,408	65	4,171	2,93
14	- 3	3,703	1,394	65	4,108	2,92
15		3,736	1,380	65	4,146	2,98
16	- 8,5	3,665	1,337	66	4,061	3,01
17	- 11,5	3,415	1,278	66	3,781	2,93
18	- 11,5	3,420	1,298	66	3,787	2,89

b) emplacement 62 :

Il n'apparaît pas ici non plus de répartition de l'indice r sur la hauteur explorée.

$\bar{r} = 2,46 \pm 0,03$ (écart-type de la dispersion constatée) soit $O_G / O_{Ni} = 1,23$

N° G.A.M.I.N.	Cote cm	$\Delta R/R$ %	$O_{Ni} 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	Te °C	δ %	r
1	+ 22	1,080	4,38	51	1,095	2,48
2	+ 18,5	1,367	5,76	48	1,397	2,40
3	+ 15,5	1,837	7,60	45	1,897	2,47
4	+ 12,5	1,953	8,07	45	2,020	2,48
5	+ 10	1,907	8,09	45	1,971	2,41
6	+ 7,5	1,737	7,18	46	1,790	2,45
7	+ 5	1,498	6,14	48	1,536	2,48

FICHE Q

REACTEUR : TRITON 3 Fontenay-aux-Roses (France)

TYPE : modéré H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

11 dosimétries G.A.M.I.N. étaient régulièrement répartis dans un bloc d'acier parallélépipédique de 37,5 cm de long et ayant une section de 6 cm x 2,5 cm. Ce bloc a été irradié en tôle périphérique (emplacement 67). Son grand axe étant confondu avec l'axe de l'emplacement d'irradiation.

Date d'irradiation : 9.10.73

Durée de l'irradiation : 3 h

Puissance pile : 500 kW

Position des barres : BC 1 : 600 BC 2 : 172
BC 3 : 576 BC 4 : basse

II - RESULTATS.

L'indice O_G / O_{Ni} varie suivant la cote dans le bloc d'acier.

Aux extrémités : $r = 2,46$ soit $O_G / O_{Ni} = 1,73$

Au centre : $r = 3,75$ soit $O_G / O_{Ni} = 1,87$

soit une variation de 8 % entre le centre et les extrémités.

N° G.A.M.I.N.	Cote cm	$\Delta R/R$ %	$O_{Ni} 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	T °C	Te °C	δ %	r
1	+18	2,194	7,16	63	76	2,455	3,40
2	+14	2,714	8,37	65	75	3,085	3,63
3	+12	2,851	8,87	66	76	3,261	3,64
4	+8	3,167	9,78	68	77	3,669	3,72
5	+4	3,319	10,38	71	79	3,946	3,77
6	0	3,367	10,72	73	81	4,099	3,70
7	-4	3,461	10,73	71	78	4,082	3,77
8	-8	3,360	10,53	68	76	3,899	3,67
9	-12	3,183	9,93	66	75	3,651	3,61
10	-14	3,015	9,56	65	74	3,433	3,56
11	-18	2,706	8,55	63	73	3,015	3,53

FICHE R

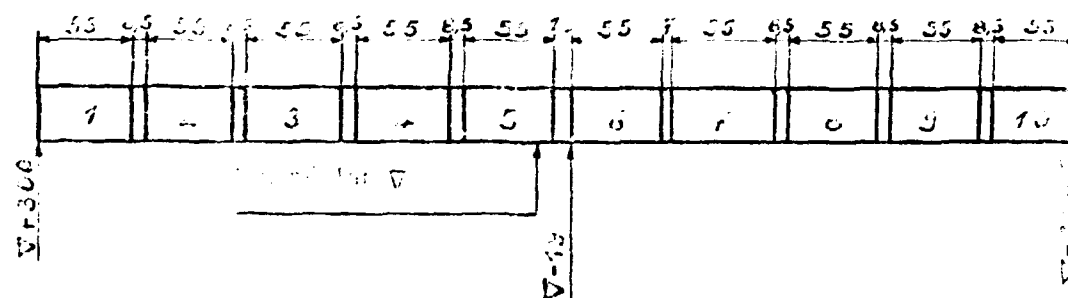
REACTEUR : BR.2 à Mol (Belgique)

TYPE : modéré H₂O

Référence : [35]

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Deux capsules d'irradiation étaient équipées de 10 dosimètres G.A. M.I.N. situés suivant l'axe des barillets de graphite de Ø 18 mm. Le schéma ci-après précise la cote des G.A. M.I.N.



Positionnement des G.A. M.I.N.

Les températures des dosimètres au cours de l'irradiation ont été déterminées à l'aide de témoins de température (pastille blanche virant au noir lorsque leur température nominale est atteinte ou dépassée). De plus, chaque capsule était équipée de 2 thermocouples arrivant au centre du barillet n° 5. Ces thermocouples ont permis de s'assurer de la parfaite stabilité de la température ($\pm 1^\circ\text{C}$) au cours de l'irradiation et du refroidissement rapide dès la fin de l'irradiation.

Date d'irradiation : 22.11.73 de 9h35 à 10h35
 Puissance pile : 1,1 MW
 Durée de l'irradiation : 1 heure
 Emplacements : D 240 : 5 éléments combustibles voisins
 F 166 : 1 élément combustible voisin
 Position des barres : 40 mm
 Température d'irradiation : voir tableau

II - RESULTATS.

On remarque que l'indice graphite-nickel est rigoureusement le même dans les 2 emplacements malgré un environnement très différent :

en D.240 : $\bar{r} = 3.24 \pm 0.04$ (écart-type de la dispersion constatée sur les 10 valeurs)

en F.166 : $\bar{r} = 3.25 \pm 0.03$ (" " " " " ")

soit $O_G / O_{Ni} = 1.62$.

Les effets de voisinage sont donc inexistants à l'intérieur du cœur BR.2 (la structure de la capsule et de son chargement aurait par contre une incidence sans doute notable).

On voit une légère variation axiale de l'indice r : écart de 3 % entre les extrémités et le centre de la maquette. L'écart-type constaté sur les 10 points de mesure de chaque dispositif caractérise cette répartition.

Tableau page suivante

FRUIT

REACTEUR : OSIRIS-ISIS à Saclay (France)

TYPE : modéré H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

L'emplacement 42 d'ISIS, utilisé pour l'étalonnage G.A. M.I.N., est normalement équipé d'un bloc aluminium de 81 x 81 mm percé sur l'axe d'un trou de Ø 28 mm.

Toutes les irradiations G.A. M.I.N. effectuées en 42 l'ont été dans ces conditions, sauf les 2 mesures faisant l'objet de la présente fiche. On a mesuré :

- 1) l'effet de la suppression du bloc d'aluminium (qui est alors remplacé par de l'eau)
- 2) l'effet de remplacement du bloc d'aluminium par un 1/2 élément combustible. Dans ce cas, l'emplacement est occupé par moitié par du combustible et le reste par une partie en aluminium comportant 2 trous de Ø 36,5 mm.

	42, dans l'eau	42, 1/2 élément combust
Date d'irradiation	23.1.74	17.1.74
Puissance pile	350kW	750 kW
Durée d'irradiation	90 mn	30 mn
Température d'irradiation	34°C	35°C

II - RESULTATS.

Emplacement 42, dans l'eau						Emplacement 42 avec 1/2 élément combust					
N° G	$\Delta R/R$ %	O_{Ni}^* $10^{15} \text{ n. cm}^{-2}$	Te C°	δ %	r^*	N° G	$\Delta R/R$ %	O_{Ni}^* $10^{15} \text{ n. cm}^{-2}$	Te C°	δ %	
1	1.243	4.27	45	1.258	2.92	1	1.540	5.25	33	1.547	1
2	1.220	4.30	46	1.234	2.84	2	1.587	5.30	33	1.596	2
3	1.277	4.28	45	1.294	2.99	3	1.600	5.36	33	1.609	3
4	1.289	4.26	45	1.306	3.05	4	1.646	5.28	33	1.657	4
5	1.169	4.23	46	1.180	2.77	5	1.563	5.14	33	1.571	5
6	1.190	4.23	46	1.202	2.82	6	1.591	5.11	33	1.600	6
7	1.269	4.30	45	1.285	2.96	7	1.557	5.14	33	1.565	7

* Valeurs corrigées des modifications du cœur d'ISIS survenues en avril 1973 qui changent r de 3.2 environ la valeur $r = 3.41$ standard ISIS (trou 42).

Emplacement 42, dans l'eau :

$$\bar{r} = 2.91 \pm 0.09 \text{ (écart-type de la dispersion constatée) soit } O_{G-Ni} = 1.45$$

Emplacement 42, avec 1/2 élément combustible

$$\bar{r} = 3.01 \pm 0.06 \text{ (écart-type de la dispersion constatée) soit } O_{G-Ni} = 1.51$$

Ces 2 valeurs sont à comparer à $r = 3.41$ qui est la valeur standard dans l'emplacement 42 muni de son bloc d'aluminium ; on a ainsi :

- . effet du remplacement du bloc d'aluminium par l'eau : - 15 %
- . effet du remplacement du bloc d'aluminium par le 1/2 élément combustible : - 11 %

FICHE N°

REACTEUR : OSIRIS-ISIS à Saclay (France)

TYPE : modéré H₂O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Une mesure de l'indice $O_G = O_{Si}$ a été réalisée dans 3 emplacements différents du réacteur équipés de dispositifs d'irradiation du type "Colibri".

Deux dispositifs "Colibri" identiques (B23 et B24) comportaient un empilement de 7 barillets de graphite (de Ø 2,5 mm) dans les quels étaient logés les dosimètres G.A.M.I.N.

Un dispositif "Colibri K.5" semblable aux 2 précédents mais dont les barillets de graphite faisaient Ø 3,1 cm.

	B.23	B.24	K.5
Date d'irradiation	11.1.71	12.1.71	21.1.71
Durée d'irradiation	1h	1h30mn	4h
Puissance pile	220 kW	700kW	820kW
Emplacement d'irradiation	46	26	K.5
Température d'irradiation	32°C	52°C	40°C

Chaque emplacement était muni d'un bloc d'aluminium à 4 trous (l'un occupé par le dispositif, les 3 autres par leur bouchon d'aluminium).

L'emplacement 46 est situé dans le cœur.

L'emplacement 26 est situé en limite du cœur entre 2 blocs de Be.

L'emplacement K.5 est situé en lère périphérie.

II - RESULTATS.

Dispositif	N° GAMIN	Cote cm	$\Delta R/R$ %	O_{Si} $10^{17} \text{ neutrons cm}^{-2}$	r	$\bar{r}$
B.23	1	- 16,5	1.013	2.96	3.36	3.55
	2	- 11	1.130	3.19	3.38	
	3	- 5,5	1.195	3.32	3.36	
	4 A	0	1.201	3.19	3.38	
	4 B		1.215	3.71	3.18	
	4 C		1.151	3.14	3.27	
	4 D		1.144	3.18	3.42	
B.24	5	- 5,5	1.130	3.31	3.32	4.03
	6	- 11	1.045	3.01	3.42	
	7	- 16,5	0.883	2.57	3.40	
	1	- 16,5	1.391	3.40	3.92	
	2	- 11	1.476	3.74	4.03	
	3	- 5,5	1.570	3.95	4.08	
	4 A	0	1.558	3.96	4.03	
K.5	4 B		-	3.44	-	
	4 C		1.156	2.99	3.94	
	4 D		1.350	3.50	3.99	
	5	- 5,5	1.527	3.81	4.11	
	6	- 11	-	3.44	-	
	7	- 16,5	1.170	2.93	4.10	
K.5	1	- 16,5	1.842	5.48	3.43	3.42
	2	- 11	2.081	6.22	3.42	
	3	- 5,5	2.205	6.63	3.39	
	4 A	0	2.247	6.75	3.43	
	4 B		2.367	7.00	3.46	
	4 C		2.018	6.06	3.43	
	4 D		1.640	5.01	3.34	
	4 E		1.556	4.68	3.40	
	4 F		1.825	5.54	3.36	
	5	- 5,5	2.207	6.49	3.47	
	6	- 11	-	5.98	-	
	7	- 16,5	1.747	5.16	3.46	

Les G.A.M.I.N. 4A à 4D pour B.23 et B.24, et 4A à 4F pour K.5 étaient régulièrement répartis en couronne dans l'étage 1.

REACTEUR : OSIRIS-ISIS (Saclay (France))

TYPE : réacteur H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Deux mesures ont été réalisées dans l'emplacement 46 :

- dans le bloc d'aluminium,
- dans une maquette de la boucle d'irradiation Spiffire ($O_{ext} = 7 \text{ cm}$) chargée de compacts combustibles IFTR.

Dans les 2 cas, 5 dosimètres G.A.M.I.N. étaient disposés suivant l'axe.

	Bloc Al	Maquette Spiffire
Date d'irradiation	17.9.71	17.9.71
Puissance pile	400 kW	100 kW
Température d'irradiation	48°C	50°C

II - RESULTATS.

Etage	Cote cm	Bloc Al			Maquette Spiffire		
		$\Delta R/R$ %	O_{Ni} $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	r	$\Delta R/R$ %	O_{Ni} $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	r
1	- 9.9	1.53	4.44	3.56	1.04	2.93	3.6
2	- 5.2	1.675	4.77	3.62	1.16	3.23	3.6
3	- 0.5	1.65	4.92	3.65	1.22	3.44	3.6
4	- 4.2	1.695	4.88	3.58	1.24	3.46	3.6
5	- 8.9	-	4.67	-	1.175	3.37	3.56
				$\bar{r} = 3.60$			

REACTEUR : OSIRIS-ISIS (Saclay (France))

TYPE : réacteur H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Deux irradiations très détaillées (Cf. Tableaux 1 et 2) ont été réalisées dans une maquette du dispositif "Maxi-Clad". Il s'agit d'un tube $O_{ext} = 7 \text{ cm}$ chargé de barillets graphites ($O = 6 \text{ cm}$) empilés sur une hauteur totale de 40 cm.

Ces 2 irradiations (MC 1 et MC 2) ont eu lieu dans l'emplacement 46. Il s'agissait, outre la détermination de l'indice $O_G = O_{Ni}$, en tout ou partiel, de mesurer une éventuelle variation de cet indice sur deux moments de barre de contrôle au cours du cycle de fonctionnement d'OSIRIS.

Les 2 irradiations qui diffèrent par la position de la barre 4 voisine de l'emplacement 46) représentent les 2 cas extrêmes.

Les barillets de graphite comportaient 7 trous (0.5 mm) dans lesquels étaient situés les dosimètres G.A.M.I.N. Les trous 1 à 6 étaient régulièrement répartis sur un cercle de 0.37.6 mm et le trou 7 était situé suivant l'axe.

	MC 1	MC 2
Date d'irradiation	2.8.72	9.8.72
Durée d'irradiation	3h	3h
Puissance pile	100 kW	100 kW
Température d'irradiation	43°C	45°C
Position des barres	1, 2, 5, 6 hautes 3 à 200 mm 4 basse	1, 2, 4, 5, 6 hautes 3 à 300 mm

II - RESULTATS.

Le tableau 1 montre l'ensemble des valeurs r mesurées lors des 2 irradiations MC 1 et MC 2.

Les tableaux ci-dessous donnent les résultats relatifs à l'essai G.A.M.I.N. p.

TABLEAU 1

La valeur de $\sigma_{G.A.M.I.N.}$ sur l'ensemble des dispositifs est :

selon les conditions :

$$\begin{aligned} \text{MC 1 : } \bar{r} &= 3,74 & \bar{r} &= 3,73 & \text{sur } \sigma_G &= \sigma_{NI} &= 1,86 \\ \text{MC 2 : } \bar{r} &= 3,71 & \bar{r} &= 3,73 & \text{sur } \sigma_G &= \sigma_{NI} &= 1,86 \end{aligned}$$

N°	Cote	N°	Trou	Trou	Trou	Trou	Trou	Trou	Trou
de	en	mesure	n° 7	n° 6	n° 5	n° 4	n° 3	n° 2	n° 1
7	- 25,5	MC 1			3,67		3,69		3,67
		MC 2			-		3,65		3,67
6	- 14,5	MC 1	-	3,77	3,75	3,78	3,85	3,90	3,68
		MC 2	3,77		3,77		3,76		3,70
5	- 7	MC 1	-				3,68		3,73
		MC 2	3,81				3,70		3,61
4	0	MC 1	3,81	3,75	3,76	3,76	3,74	3,66	3,65
		MC 2	3,72		3,63		3,61		3,62
3	- 7	MC 1	3,71				3,72		3,69
		MC 2	3,71				3,72		3,73
2	- 14,5	MC 1	3,79	3,73	3,77	3,71	3,72	3,74	3,68
		MC 2	3,80		3,76		3,78		3,76
1	- 25,5	MC 1			3,73		3,81		3,73
		MC 2			3,80		3,78		3,75

Tableau 1

N° ALIEN	N° ALIEN	N° ALIEN	Δ B.L.	$\sigma_{G.A.M.I.N.}$	σ_G	σ_{NI}	δ	r
5H	7	1	1,134	1,19	60	1,517	3,67	
7H		3	1,379	3,74	61	1,332	3,69	
8H		5	1,423	3,99	62	1,179	3,67	
9I	6	1	2,332	6,16	55	2,551	3,68	
18		2	2,350	6,56	55	2,184	3,90	
2K		3	2,391	6,29	55	2,411	3,85	
3K		4	2,369	6,92	55	2,184	3,78	
4K		5	2,199	6,14	55	2,369	3,75	
5K		6	2,135	6,86	54	2,611	3,77	
6K		7	-	-	-	-	-	
6J	5	1	2,814	7,98	53	2,667	3,75	
7J		4	2,658	7,93	54	2,835	3,68	
8J		7	-	-	-	-	-	
8I	1	1	2,839	8,19	53	3,062	3,65	
9I		2	2,718	7,95	53	2,651	3,66	
1J		3	2,725	7,71	53	2,909	3,74	
2J		4	2,833	7,98	53	3,029	3,76	
3J		5	2,931	8,27	53	3,110	3,76	
4J		6	2,978	8,43	52	3,160	3,75	
5J		7	2,855	7,91	53	3,063	3,81	
5I	3	1	2,812	8,16	53	3,039	3,69	
6I		4	2,787	7,78	53	2,912	3,72	
7I		7	2,728	7,78	53	2,910	3,71	
5H	2	1	2,495	7,11	54	2,655	3,68	
6H		2	2,197	6,78	55	2,358	3,71	
9H		3	2,313	6,54	55	2,454	3,72	
1I		4	2,329	6,90	55	2,582	3,71	
2I		5	2,534	7,11	54	2,708	3,77	
3I		6	2,549	7,21	54	2,714	3,73	
4I		7	2,151	6,81	54	2,605	3,79	
1H	1	1	1,591	4,44	59	1,668	3,73	
2H		3	1,469	3,98	60	1,533	3,81	
3H		5	1,585	4,40	59	1,655	3,73	

Tableau 2

Résultats MC 1

N GMIN	N étage	N trou	$\Delta R/R$ %	$\frac{O}{Ni}$ $10^{15} \text{ n.cm}^{-2}$	Te °C	δ %	r
9K 3 5.O	7	1 3 5	1.719 1.508 -	4.89 4.29 -	60 62 -	1.810 1.578 -	3.67 3.65 -
9N 2.O 4.O 6.O	6	1 3 5 7	2.929 2.581 2.871 2.752	8.42 7.29 8.09 7.75	55 56 55 55	3.145 2.711 3.081 2.948	3.70 3.76 3.77 3.77
6N 7N 8N	5	1 4 7	3.351 3.071 3.252	9.86 8.87 9.13	53 54 53	3.619 3.307 3.506	3.61 3.70 3.81
2N 3N 4N 5N	4	1 3 5 7	3.506 3.069 3.427 3.338	10.36 9.07 10.12 9.59	53 54 53 53	3.790 3.302 3.701 3.602	3.62 3.61 3.63 3.72
8L 9L 1N	3	1 4 7	3.454 3.161 3.224	10.04 9.08 9.28	53 54 54	3.780 3.405 3.475	3.73 3.72 3.71
4L 5L 6L 7L	2	1 3 5 7	3.081 2.701 3.033 2.888	8.73 7.58 8.61 8.08	54 55 54 55	3.315 2.892 3.261 3.100	3.76 3.78 3.76 3.80
1L 2L 3L	1	1 3 5	1.581 1.685 1.901	5.25 4.65 5.24	59 61 59	1.987 1.772 2.009	3.75 3.78 3.80

Tableau 3

Résultats MC 2

FICHE N

REACTEUR : OSIRIS-ISIS à Saclay (France)

TYPE : modéré H_2O

I - CONDITIONS D'IRRADIATION.

Les répartitions axiales et circonferentielles de l'indice $\frac{O}{G} = \frac{O}{Ni}$ ont été réalisées dans trois dispositifs de type Colibri (four neutro) chargés de barillets de graphite.

Ces trois dispositifs ont été irradiés simultanément dans un bloc d'aluminium à 4 trous situé dans l'emplacement 62.

	SG 11	SG 12	SG 13
Date d'irradiation	22.10.73	22.10.73	22.10.73
Durée d'irradiation	1h 1h	1h	1h
Puissance pile	300 kW	300 kW	300 kW
Température d'irradiation	56 °C	62 °C	44 °C
Diamètre des barillets graphite	Ø 19.3 mm	Ø 21.2 mm	Ø 25.8 mm
Emplacement	62 S.E.	62 S.O.	62 N.O.
Nombre de dosimètres GAMIN	12	14	14

II - RESULTATS.

Le tableau ci-joint donne les résultats détaillés relatifs à chaque dispositif. L'incertitude (écart-type) sur les résultats G.A.M.I.N. est de $\pm 1.7\%$ à l'exception des barillets supérieurs (n° 6) où elle est de 2.5% . De plus, les valeurs relatives à l'étage n° 6 de SG 12 comportent une erreur systématique par excès difficilement chiffrable (due aux chocs qu'il a reçus lors de la récupération en cellule).

SG 11 $\bar{r} = 3.24$ SG 12 $\bar{r} = 3.22$ SG 13 $\bar{r} = 3.17$

Dispositif	N. Ecran	C. de cm	N. GAMMA	$\Delta R/R$ (%)	^{15}Ni 10^{15} neutrons/cm ²	Temp. °C	δ (%)	
SG. 11	1	11	1	1,350	1,26	71	1,412	2
	2	-5,5	2	1,755	5,66	71	1,889	3
	3	0	3	1,824	5,95	71	1,964	2
			7	1,729	5,75	72	1,860	3
			8	1,810	5,89	71	1,919	3
			9	1,828	6,04	71	1,969	3
	4	5,5	4	1,563	5,18	73	1,676	3
	5	11	5	1,256	4,02	75	1,339	3
	6	16,5	6	0,725	2,34	81	0,782	3
			10	0,705	2,26	81	0,761	2
			11	0,679	2,31	82	0,734	3
			12	0,675	2,36	82	0,730	3
SG. 12	1	-11	13	1,169	4,20	82	1,279	3
	2	-5,5	14	1,523	5,27	79	1,679	3
	3	0	15	1,626	5,50	78	1,795	2
			16	1,639	5,42	78	1,811	3
			17	1,503	5,28	79	1,656	3
			18	1,443	5,23	80	1,588	3
			19	1,636	5,37	78	1,807	3
	4	5,5	20	1,575	4,85	79	1,738	3
	5	11	21	1,131	3,71	82	1,235	3
	6	16,5	22	(0,670)	2,12	88	(0,745)	2
			23	(0,701)	2,10	87	(0,777)	3
			24	(0,661)	2,06	88	(0,738)	3
			25	(0,635)	2,02	88	(0,708)	3
			26	(0,637)	2,07	88	(0,709)	3
SG. 13	1	-11	27	1,172	4,09	63	1,214	2
	2	-5,5	28	1,481	5,21	61	1,551	2
	3	0	29	1,508	5,53	60	1,685	2
			30	1,676	5,16	60	1,760	3
			31	1,587	5,18	60	1,662	3
			32	1,662	5,30	60	1,766	3
			39	1,673	5,36	60	1,756	3
	4	5,5	33	1,528	4,99	61	1,598	3
	5	11	34	1,205	3,82	63	1,250	3
	6	16,5	35	0,659	2,05	69	0,685	3
			36	0,655	2,09	69	0,681	3
			37	0,691	1,97	70	0,628	3
			38	0,623	2,09	70	0,618	3
			40	0,645	2,05	70	0,670	3

REFERENCES

- [1] J. P. GENTHON, J. W. HASEN CLEVER, P. MAY, W. SCHLIEDER, S. D. WRIGHT et W. L. ZIEP
"Recommandations sur les mesures des irradiations reçues par les matériaux de structure de pile" *Rapport EURATOM 5274* 1974
- [2] J. P. GENTHON
"Modèle élémentaire sur les effets macroscopiques d'irradiation neutronique" *CEA, N. 1574* 1970
- [3] J. P. GENTHON, G. MICAUD
"Modèle élémentaire sur les dommages radio-induits dans le graphite en pile : corrélation entre température et flux" *J. N. M. 51-2 p. 237-245* 1971
- [4] Compte rendu de la réunion de dosimétrie AIEA-Seattle - Nov. 1972
Nuclear Engineering and Design à paraître 1975
- [5] J. R. EELER
dans "Radiation damage in reactor materials" *A. I. E. A. SM 120 - E1* 1969
- [6] J. P. GENTHON
"Dommages sous irradiation - Zone de déplacements" *CEA, R. 3712* 1967
- [7] M. CANCE
"Le détecteur neutronique au tungstène" *CEA, R. 1288* 1969
- [8] P. BOUVARD
"Comptage de ^{58}Co et méthode d'analyse" *CEA, N. 1781* 1971
- [9] M. W. THOMPSON et S. D. WRIGHT
"A new damage function for predicting the effect of reactor irradiation ..." *J. N. M. 16 - p. 416-424* 1967

- [10] J. LINDEN et autres
"Notes on atomic collisions - II and III" Mat. Fys. Medl. Dan. Vid. Selsk 33 n 1061
- [11] P. DUTREUIL, J. RASTOIN
"Influence de la forme du spectre des neutrons ..." CEA, N. 522 1971
- [12] J. P. GENTHON, E. GERVAISE, M. LOTT, P. MAS, J. C. MOUGNIOT, NGUYEN VAN DOAN
"Sections efficaces de création de dommages" A.I.E.A. SM-170/65 1971
- [13] W. C. MORGAN
"Atomic displacement cross-section for carbon ..." J. N. M. 51 p. 209-214 1971
et correctif du 10.10.71
- [14] W. L. ZIPP et autres
"Compilation of evaluated cross section data ..." R. C. N. 196 1973
- [15] H. LISKEN, A. PAULSEN
"Compilation of cross-section ..." EUR. 119 1966
- [16] P. CARTER
"Activation cross-section ..." Radiations Measurements in Nuclear Power 1973
- [17] W. L. ZIPP - Communication personnelle (Petten) 1973
- [18] H. LORAIN et autres
"APOLLO - Code multigroupe de résolution de l'équation de transport ..." CEA, N. 1610 1971
- [19] S. KATZ, J. C. NIMAL, T. VERGNAUD
"Programme de MONTE-CARLO à trois dimensions polycinétique TRIPOLI
Conf. de Paris sur la protection des Réacteurs 9-13.10.71
- [20] M. LABROUSSE - Communication personnelle (Saclay) 1973
- [21] M. DESTOT - Communication personnelle (Saclay) 1971
- [22] J. DUCCO - Communication personnelle (Saclay) 1973
- [23] J. C. NIMAL et T. VERGNAUD - Communication personnelle (Saclay) 1973
- [24] P. MAS - Communication personnelle (Grenoble) 1974
- [25] N. MAENE et DE RAEDT - Communication personnelle (Mol) 1971
- [26] J. BLONS, G. PERRIOT, G. TOURAND
"Etude comparative des effets des neutrons rapides ..." dans "Radiation Damage in Reactors Materials" p. 499-507 AIEA-Vienne 1963
- [27] H. BRIDGE, B. S. GRAY, B. T. KELLY, H. SORENSEN
"An effect of flux level and flux spectrum ..." dans "Radiation Damage in Reactors Materials" p. 531-551 AIEA-Vienne 1963
- [28] J. P. GENTHON
"Dommages d'irradiation produits par les neutrons de pile" AIEA SM 120/E-4 1969
- [29] J. P. GENTHON, S. B. WRIGHT, B. T. KELLY
"Irradiation damage flux characteristics in DIDO type reactor. Use of the G. A. M. I. N. technique" A paraître
- [30] J. P. GENTHON et W. SCHNEIDER
"Messung der Strahlenschädenanzahl in Graphit ... im Reaktor FRJ-2 ..." A paraître (KERNTECHNIK)
- [31] M. CANCE et autres
"Dosimétrie de dommages radio-induits à Rapsodie" CEA, N. 1644 1973
- [32] "Mesures G. A. M. I. N. à BR. 1" A paraître en collaboration avec MM. MEANE et DE RAEDT

- [37] M. R. EVERTON et autres
 "A graphite damage calculation experiment in the Dungen reactor"
 A paraître (D. P. REPORT)
- [38] V. L. ZIL'BER et autres
 "The damage to reflection ratio for graphite irradiations in the DTR"
 A paraître (G. N. M.)
- [39] Mesures G. A. M. L. N. et autres
 A paraître en collaboration avec M. L. MAREL et DEBRUE
- [40] M. DESPOT, M. LAVERGNE
 "Calcul de l'usure graphite n° 1 de DIDO par code APOLLO"
 CEA, N. 1731 1971
- [41] B. CHÉDRY, J. P. GENTHON, M. CANCE
 "Dommages d'irradiation sous neutrons de pile" CEA, N. 871 1968
- [42] J. P. GENTHON
 "Détermination de doses Vignier dans le graphite" CEA, R. 3226 1967
- [43] M. DESPOT et autres
 "Laction, le dommage sont empirique pour les propriétés mécaniques
 des aciers" A paraître Colloque Dosimétrie de Peleu, Septembre 1971

*

*

*

