

**A usage officiel**

**NEA/NSC/DOC(2006)24/REV1**

Organisation de Coopération et de Développement Économiques  
Organisation for Economic Co-operation and Development

**05-Jan-2012**

**Français - Or. Français**

**AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE  
COMITE DES SCIENCES NUCLÉAIRES**

**VOLUME 2 : EXPÉRIENCES NAÏADE RELATIVES A LA PROPAGATION  
DES NEUTRONS DE FISSION DANS L'EAU LÉGÈRE  
(DIAMÈTRE DE LA SOURCE 60 CM)**

**PARTIE G**

**Jean-Claude NIMAL**

Jim GULLIFORD  
jim.gulliford@oecd.org  
+33 1 45 24 10 72

Document complet disponible sur OLIS dans son format d'origine  
Complete document available on OLIS in its original format

**JT03313990**

*This document and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.*



NEA/NSC/DOC(2006)24/REV1  
A usage officiel

Français - Or. Français

**VOLUME 2 : PARTIE G**  
**EXPÉRIENCES NAÏADE RELATIVES À**  
**LA PROPAGATION DES NEUTRONS DE FISSION DANS L'EAU LÉGÈRE**  
**(DIAMÈTRE DE LA SOURCE 60 CM)**

(26 mars 2006, révisé le 14 novembre 2011)

J.-C. NIMAL<sup>1</sup>

**I Généralités**

**II Description de l'expérience eau légère de NAÏADE 1**

**III Résultats expérimentaux bruts**

**IV Comparaison des résultats expérimentaux réévalués avec les résultats de calcul  
obtenus à l'aide du logiciel TRIPOLI-4**

**V Influence de l'origine des fonctions réponses du Rh103 sur les résultats des calculs**

**VI Estimation calculée du bruit de fond**

**VII Conclusions**

**VIII Bibliographie**

<sup>1</sup>Ancien chef du SERMA/LEPP à CEA Saclay, consultant AEN

## I Généralités

Dans sa version « source de neutrons de fission », le dispositif expérimental NAÏADE 1 [1] est constitué d'une plaque d'uranium (le convertisseur) alimentée par un courant de neutrons thermalisés à 27°C issus du réflecteur de graphite du réacteur à eau lourde ZOE. Un écran de boral sépare cette plaque fissile d'une fosse expérimentale de 27m<sup>3</sup>. Dans cette fosse on trouve une cuve en aluminium contenant la maquette à expérimenter. Ce dispositif NAÏADE 1 est décrit en détail dans la référence [2] avec les cotes et les compositions. On trouvera dans la partie B de cette même référence :

1. La définition de l'expression des résultats sous la forme de flux conventionnels (§ II) ;
2. Les procédures d'étalonnage des dosimètres utilisés dans les mesures (§ IV) ;
3. La réévaluation que nous proposons (§ V) pour les coefficients de détecteur permettant d'obtenir les flux conventionnels. Cette réévaluation résulte de l'amélioration de certaines constantes physiques (sections efficaces, périodes, etc.) entre l'époque de l'étalonnage (1960) et la date actuelle. Les facteurs multiplicatifs sur les flux conventionnels annoncés à l'époque des mesures sont rappelés dans le tableau G11 donné plus loin.

La puissance de la plaque fissile exprimée en n/s et sa distribution spatiale et énergétique sont des points très importants qui sont analysés dans la partie C de la référence [2]. Le courant de neutrons thermiques incidents génère sur l'U235 du convertisseur une densité de fissions de première génération. La plaque d'uranium naturel et les structures environnantes provoquent des diffusions de ces neutrons de première génération qui à leur tour produisent des fissions de générations suivantes essentiellement sur U238 et à moindre intensité sur U235 du convertisseur. Les deux procédures de calcul des sources complètes de neutrons de fissions sont explicitées en détail dans la partie C de la référence [2]. Ces procédures ont été appliquées pour l'étude de la propagation des neutrons de fission dans le fer (partie E référence [2]) et pour l'étude consacrée à la propagation des neutrons dans le graphite (partie F référence [2]). Une analyse de la contribution du bruit de fond résultant des rares neutrons rapides issus du cœur de ZOE est proposée.

## II Description de l'expérience eau légère de NAÏADE 1

Dans cette expérience, la cuve d'aluminium située dans la fosse expérimentale est remplie d'eau ordinaire avec un volume de 300 cm × 300 cm × 50 cm. La description exhaustive propre à cette expérience eau légère est mentionnée sur la page 21 de la référence [1] reproduite ci-après.

***Expérience dans l'eau (extrait du rapport [1])***

*Les expériences ont été faites en remplissant la cuve d'aluminium d'eau ordinaire.*

**1) Positionnement des appareils de mesure**

*Les expériences avec compteurs ont été faites à l'aide d'un « pont des instruments ».*

*Ce pont a été conçu pour pouvoir déplacer des compteurs suivant 3 directions orthogonales, ces 3 directions étant la parallèle à l'axe de la plaque convertisseuse, la verticale, l'horizontale parallèle à la plaque convertisseuse.*

*Il est constitué par un cadre rectangulaire parfaitement rigide de dimensions 50 x 300 cm. Deux roues sur chacun des côtés de 50 cm permettent un déplacement du cadre sur 2 rails placés sur les 2 côtés de la cuve de Naïade (parallèles à l'axe de la plaque). Un profilé cylindrique (diamètre 10 cm) en acier, maintenu vertical, se déplace dans ce cadre grâce à 2 moteurs, l'un lui imprimant un mouvement vertical, l'autre un mouvement dans le sens de la grande dimension du cadre (soit horizontal, parallèle à la plaque).*

*Un porte instrument est fixé au profilé.*

*L'horizontalité du cadre est assurée à l'aide de vis micrométriques sur indication de 2 niveaux d'eau.*

*La position du compteur est repérée à 1 mm près par rapport à une position de référence grâce à des index se déplaçant devant des règles graduées.*

**2) Positionnement des détecteurs**

*Les expériences avec détecteurs ont été faites en les plaçant sur des échelles en plexiglas.*

*La perpendicularité des échelles par rapport à la plaque était assurée par une large assise sur la paroi de la cuve d'aluminium.*

**3) Expériences réalisées**

*Référence [1].*

**4) Résultats**

*Référence [1].*

Les dosimètres utilisés faisaient appel aux réactions suivantes :

1. Réaction (n,p) sur le P31,
2. Réaction (n,n') sur le Rh103,
3. Des diodes au silicium (effet WIGNER),
4. Réaction (n,p) sur le S32,
5. Débit d'équivalent de dose à l'aide d'un photomultiplicateur,
6. In115 sous cadmium, réaction (n, $\gamma$ ),
7. Au197 sous cadmium, réaction (n, $\gamma$ ),
8. Chambre BF3/Cd,
9. Réaction (n, $\gamma$ ) sur le Mn55 sous cadmium,
10. Chambre nue, compteur BF3 jusqu'à 180cm de pénétration,
11. Réaction (n, $\gamma$ ) sur le Mn55 nu.

### III Résultats expérimentaux bruts

Nous entendons par résultats expérimentaux bruts les valeurs des flux conventionnels telles qu'elles ont été publiées dans la référence [1], c'est-à-dire avec les coefficients de détecteurs non réévalués utilisés vers les années 1960. Tous ces résultats sont normalisés à une puissance de ZOE de 100 kW. Le diamètre du diaphragme limitant le courant de neutrons thermalisés incidents sur le convertisseur est de 60 cm. Il y a eu quelques rares mesures avec un diaphragme de diamètre 40 cm et également quelques mesures avec des neutrons thermiques purs issus du réflecteur de ZOE. Les mesures relatives à l'atténuation des neutrons thermiques dans l'eau légère font l'objet d'une interprétation consignée dans le VOLUME 3, partie H, paragraphe VI. Les résultats et l'interprétation des mesures de propagation de neutrons de fission avec un faisceau de diamètre 40 cm font l'objet de la PARTIE L du VOLUME 4. Ces VOLUMES 3 et 4 sont en cours de parution.

Dans tous les tableaux qui suivent, les résultats des mesures sont donnés sur l'axe du convertisseur, les abscisses X étant comptées à partir de la face de la cuve d'aluminium située du côté opposé au réacteur ZOE. Le plan X=0 est donc le plan séparateur de la cuve et de l'eau qu'elle contient. Nous avons reproduit la date des mesures qui sont parfois répétées, ce qui permet de voir la dispersion.

Distances X en cm	Flux de fission équivalent P31/Cd		
	12/4/65	26/4/65	7/7/65
0.		2,22E7	
1,5			1,50E7
2,25		1,37E7	
6,0		6,50E6	6,41E6
10.		3,22E6	
15.		1,35E6	
20,5	6,05E5		
25,5	2,56E5		
30,5	1,25E5		

Tableau G-1

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Rh/Cd	
	14/4/65	26/4/65
0.		3,26E7
3,7		1,25E7
6,8		6,48E6
10,9		3,23E6
27.	2,22E5	
32.	1,03E5	
37.	4,78E4	

Tableau G-2

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Si Wigner/Cd		
	6-7/4/65	5-6-7/7/65	7/7/65
0,5	3,10 & 3,05E7		3,10E7
3.	1,75E7	1,75E7	
3,5	1,34E7		
6,0	7,50E6	7,42E6	7,48E6
10.	3,78E6		
15.	1,64E6		
20.	7,40E5	7,40E5	
25.	3,65E5		

Tableau G-3

Pour les mesures intitulées « flux de fission équivalent Si Wigner/Cd », il s'agit de mesures faites avec des diodes au silicium étalonnées dans un flux de référence connu, dont le spectre est très proche du spectre de fission de U235. La description de ce type de mesures est faite dans les références [3-a] de janvier 1965 et [3-b] de mars 1968. On notera l'excellente reproductibilité des mesures multiples :

- A 0,5 cm 3 mesures
- A 3,0 cm 2 mesures
- A 6,0 cm 3 mesures
- A 20 cm 2 mesures

Ceci traduit :

- La faible dispersion des coefficients d'étalonnage,
- Le bon positionnement des diodes (1mm d'erreur sur le positionnement correspond entre 1,7 % et 2 % d'incertitude sur le flux de fission équivalent Si).

La reproductibilité des mesures est un peu moins bonne dans les mesures de flux de fission équivalent S32/Cd (voir tableau G-4 qui suit).

Distance X en cm	Flux de fission équivalent S/Cd	
	5-6-7/7/65	12-13/7/65
0.	2,10E7	2,20E7
5.	7,51E6	8,02E6
10.		3,20E6
15.		1,36E6
20.		6,22E5
25.		2,63E5
30.		1,20E5
34,7	6,00E4	
40.	2,71E4	
44,8	1,38E4	
53	4,26E3	

Tableau G-4

Distance X en cm	Débit d'équivalent de dose (PM rapide) en mrem/h			
	11/2/58	5/7/58	7/7/58	9/7/58
0,0	1,49E6	1,48E6		
10.	2,15E5	2,37E5		1,77E5
15,5			6,91E4	
20.	3,81E4	4,16E4	3,86E4	3,00E4
30.	8,55E3	8,74E3	7,75E3	6,55E3
35,55			3,32E3	
40.	1,86E3	2,08E3		1,46E3
50.	4,67E2	5,24E2	4,40E2	
58,75	1,28E2			
70.	3,20E1	3,67E1		
80.	8,76	9,51		
90.	3,05	3,04		

Tableau G-5

Les mesures à l'aide d'un dosimètre de neutrons rapides utilisant un photomultiplicateur sont plus anciennes (1958). La référence [4] donne des précisions sur ce type de mesures, en particulier sa réponse en fonction de l'énergie des neutrons. On notera la dispersion non négligeable des débits d'équivalent de dose pour des mesures reproduites à différentes dates. Nous ne pouvons discerner s'il s'agit :

- Du positionnement de la chambre,
- Dde la puissance de ZOE par rapport à 100 kW,
- De l'alimentation du PM.

Distance X en cm	In115/Cd	Au197/Cd
	Flux par unite de léthargie à 1.46eV	Flux par unite de léthargie à 4.91eV
	13/4/65	5-6/4/65
0,0	9,20E5	9,66E5
0,5	9,95E5	9,71E5
3,0	9,53E5	9,45E5
3,5	1,00E6	8,47E5
6,0	6,37E5	5,32E5
10.	2,77E5	2,00E5
15.	8,47E4	5,95E4
20.	2,57E4	2,18E4
25.	1,11E4	9,10E3
30.	4,14E3	3,70E3
35.		1,43E3
40.	8,30E2	
45.		3,55E2
50.		1,04E2
60.		3,12E1

Tableau G-6

Ce tableau regroupe les mesures donnant des flux épithermiques par unité de léthargie à l'aide des dosimètres In115 (n,γ)/Cd (et non In115(n,n') comme actuellement) et Au197 (n,γ)/Cd.

Distance X en cm	Flux équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3/Cd
	25/5/60
5,5	4,97E5
7,5	3,52E5
10.	2,02E5
15.	6,30E4
20.	2,08E4
30.	3,13E3
40.	6,14E2
50.	1,28E2
60.	3,05E1

Tableau G-7

Cette série de mesures est antérieure aux mesures de 1965.

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn/Cd	
	12/4/65	5/7/65
0,0		7,70E5
1,0		1,00E6
2,40		1,02E6
3,5		8,50E5
4,0		7,88E5
5,0		6,98E5
10.		2,46E5
15.		7,50E4
20.	3,05E4	
25.	9,73E3	
30.	4,12E3	
35.	1,44E3	
40.	7,02E2	
45.	3,23E2	
50.	1,37E2	

Tableau G-8

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s		
	Compteur BF3 nu		
	Mai 57	8/2/58	10/5/60
0,0			8,87E6
1,0			2,42E7
2,0			3,30E7
4,0			3,46E7
5,0			3,55E7
7,5			2,66E7
10.			1,50E7
15.	7,10E6		
20.	2,44E6		2,44E6
23.	1,29E6		
27.	5,76E5		
30.	3,10E5		3,43E5
37.	1,15E5		
40.	7,27E4		6,24E4
43.	4,70E4		
45.	3,28E4		
50.	1,33E4		1,23E4
55.	4,43E3		
60.	2,75E3		2,62E3
70.			6,43E2
72.	4,88E2		

Tableau G-9 (début)

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3 nu (suite)		
	Mai 57	8/2/58	10/5/60
77.	1,95E2		
80.	1,06E2		1,70E2
85.	6,65E1		
90.	4,00E1		4,55E1
97.	1,55E1		
100.			1,31E1
107.	5,32		
110.			4,03
112.	2,84		
117.	1,33		
120.		1,46	1,32
130.			4,31E-1
132.	3,10E-1		
140.		2,13E-1	1,54E-1
147.	7,18E-2		
150.			5,72E-2
157.	3,46E-2		
160.		4,42E-2	
167.	1,29E-2		
175.	6,21E-3		
180.		1,33E-2	

Tableau G-9 (suite et fin)

Comme pour les mesures utilisant un compteur BF3/Cd, ces mesures sont plus anciennes que les mesures utilisant des dosimètres par activation (1965). Jusqu'à l'abscisse 70 cm, la dispersion varie de 5 à 15 % pour les mesures répétées. La dispersion semble s'accroître au-delà. La valeur à X=180 cm semble erronée si l'on compare aux valeurs à X=160, 167, 175 cm. Il faut noter que le massif d'eau légère faisait 250 cm d'épaisseur.

Distances X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn nu			
	Mai 57	5/4/65	7/4/65	26/4/65
0,0	5,50E6			1,04E7
3,0			4,23E7	3,75E7
4,5			4,19E7	
5,0	3,75E7			
6,0			3,37E7	3,38E7
7,5			3,37E7	
9,0			2,23E7	
10	1,90E7			2,10E7
10,5			1,88E7	
12			1,42E7	
13,5			9,07E6	
14	6,90E6			
15			7,90E6	7,72E6
20	2,25E6		2,66E6	2,50E6
25			8,40E5	
30			3,40E5	
35	1,60E5		1,50E5	
40	5,90E4	6,50E4	5,60E4	
45	3,10E4	2,96E4	2,94E4	
50		1,22E4		
55		6,18E3		
60		2,45E3		
65		1,30E3		
70		6,53E2		
75		3,76E2		
78,2		2,17E2		

Tableau G-10

#### IV Comparaison des résultats expérimentaux réévalués avec les résultats de calcul obtenus à l'aide du logiciel TRIPOLI-4

Ce paragraphe regroupe pour chaque dosimètre les résultats des calculs effectués à l'aide du logiciel de Monte-Carlo à trois dimensions TRIPOLI-4 [5] ainsi que les rapports calcul/expérience (C/E), les valeurs expérimentales étant réévaluées par les facteurs multiplicatifs expliqués dans la partie B de la référence [2] (paragraphe V). Ces facteurs multiplicatifs sont rappelés dans le tableau G-11 suivant.

<b>Flux thermiques équivalents Mn et Mn/Cd (n,γ)</b>	<b>1,00</b>
<b>Flux épithermiques par unité de léthargie Au/Cd et In/Cd (n,γ)</b>	<b>1,016</b>
<b>Flux de fission équivalents Rh103(n,n')</b>	<b>0,815±0,04</b>
<b>Flux de fission équivalents S32(n,p)</b>	<b>0,815±0,03</b>
<b>Flux de fission équivalents P31(n,p)</b>	<b>0.815±0,01</b>
<b>Flux de fission équivalents Si WIGNER</b>	<b>0,815±0,03</b>

**Tableau G-11**

L'interprétation de l'expérience eau légère à l'aide du logiciel TRIPOLI-4 avait comme données le fichier intitulé « naiadeeau\_60\_fission\_tripoli.data » distribué avec SINBAD-NAIADE-H2O-60. Le listing des résultats porte le numéro 05-010. Le calcul comportait 360 batches de 7600 neutrons thermiques. Il a duré 1601960 secondes sur un PC cadencé à 2.7GHz. Ce temps de simulation comprend le calcul de la puissance de la plaque de fission et le calcul de propagation dans 2.50 m d'eau. Il est augmenté par rapport à celui d'un calcul ordinaire par suite d'un surbiaisage volontaire assurant une bonne simulation des neutrons rapides à très grande distance.

La propagation des neutrons rapides dans un massif d'eau légère ne pose pas de difficultés quant au choix des paramètres de biaisage. Par suite avec l'eau légère il est possible d'utiliser l'option MONITORING 0 de TRIPOLI-4 conjointement avec l'option FIXED\_SOURCE\_CRITICALITY (problème sous critique à source imposée). Nous avons donc choisi ces options. Dès lors il était possible de définir un courant incident de neutrons Maxwelliens thermalisés à la température du hall NAIADE comme terme source. Ces neutrons induisent une première génération de neutrons rapides de fission sur l'U235 du convertisseur. Les neutrons ainsi produits diffusent dans le convertisseur (épais) et dans les structures avoisinantes. Une très faible partie est rétro diffusée par l'eau présente dans l'aire expérimentale. A leur tour, tous ces neutrons diffusés produisent des fissions qui sont prises en compte dans le calcul TRIPOLI-4 (12 % environ) sans aucune approximation quant à leur distribution spatiale et énergétique. Cette procédure, décrite dans les parties C et D du rapport (référence [2]), nécessite un réglage optimisé de la pondération (biaisage) sans possibilité de rectification et d'ajustement par le logiciel TRIPOLI-4 lui-même. Nos paramètres de biaisage ont été volontairement légèrement plus élevés que d'ordinaire avec des neutrons de fission afin d'avoir suffisamment de neutrons très rapides à très forte pénétration (250 cm). En effet, dans l'eau légère il se forme un groupe moniteur qui alimente le spectre neutronique en neutrons épithermiques et thermiques et ceci à chaque distance. Ce léger surbiaisage est, rappelons-le, consommateur de temps de calcul.

Les sections efficaces et les spectres de fission de U235 et U238 ayant servi à l'interprétation de l'expérience par le logiciel TRIPOLI-4 sont toutes tirées de l'évaluation ENDF/B-VI R4. Pour le calcul des flux conventionnels à partir des taux de réaction nous avons utilisé les valeurs moyennes sur le spectre de fission  $\sigma_f$ , les intégrales de résonance I et les sections efficaces à 2 200 m/s  $\sigma_0$  données ci-après. **Elles sont cohérentes avec les valeurs de sections efficaces ponctuelles utilisées dans le calcul des taux de réaction au cours de l'interprétation par le logiciel TRIPOLI-4.** Les taux de réaction microscopiques sont donc définis sans ambiguïté.

P31(n,p)	IRDF_90	$\sigma_f=0,02858b$	recalculé
Mn55(n, $\gamma$ )	ENDF/B-VI/R4	$\sigma_0=13,45b$	[6]
S32(n,p)	IRDF_90	$\sigma_f=0,06524b$	recalculé
Au197(n, $\gamma$ )	IRDF_90	I=1565b	[6]
In115(n, $\gamma$ )	ENDF/B-VI R4	I=3281b	[6]
Rh103(n,n')	IRDF_90	$\sigma_f=0,7033b$	recalculé
Np237(n,f)	ENDF/B-VI R4	$\sigma_f=1,305b$	[6]
Si WIGNER	[3-b]	$\ll \sigma_f \gg =1,0$	[3-b] et recalcul
B10(n, $\alpha$ )	ENDF/B-VI R4	$\sigma_0=3840b$	[6]

La coupure du cadmium a été fixée à 0.5eV. Signalons la remarque suivante sur la signification de la valeur  $\ll \sigma_f \gg =1,0$  pour la diode au silicium. Dans la référence [3-b], la fonction réponse avait été normalisée à l'unité sur le spectre de fission de U235 connu à l'époque. Nous avons vérifié cette normalisation avec le spectre de fission de U235 donné dans ENDF/B-VI R4 ce qui explique que le taux de réaction issu de TRIPOLI 4 soit égal à un flux de fission équivalent.

La description géométrique utilisée dans les calculs TRIPOLI-4 est réalisée comme suit. On conserve la description de NAÏADE 1 faite dans la partie A de la référence [2], la cuve étant remplie d'eau légère (parallélépipède de 300 cm  $\times$  300 cm  $\times$  250 cm). Dans ce volume parallélépipédique nous avons ménagé des ortho cylindres d'axe Ox (celui du convertisseur) dont les abscisses des plans limites perpendiculaires à Ox coïncident avec celles de tous les centres de dosimètres. Les deux rayons utilisés pour décrire les ortho cylindres sont respectivement 5 cm pour X inférieur à 100 cm et 10 cm pour X supérieur à 100 cm. On obtient ainsi des valeurs moyennes de flux conventionnels sur des disques de surfaces respectives 78,5398cm<sup>2</sup> et 314,159cm<sup>2</sup>. Il n'a pas été fait de correction pour passer de ces valeurs moyennes aux valeurs mesurées par les dosimètres qui sont quasi-ponctuelles.

Les nombres d'atomes par 10<sup>-24</sup> cm<sup>3</sup> adoptés pour l'eau sont 3,3373E-2 pour O16 et 6,6746E-2 pour H lié dans H2O.

Le tableau G-12 ci-dessous donne le nombre de neutrons émis toutes générations confondues. La distribution spatiale et énergétique du courant incident de neutrons thermalisés à 27°C est décrite dans la partie D de la référence [2] (paragraphe II-2-1). Rappelons que l'intégrale du nombre de neutrons thermiques émis et servant à la normalisation du calcul est 2.17104E11n/s. Afin de connaître la puissance de la plaque fissile en présence de l'eau, nous avons scindé le convertisseur en uranium naturel en deux parties égales de 1 cm d'épaisseur :

1. Le volume 11 côté réacteur ZOE (V11)
2. Le volume 12 côté fosse NAÏADE 1 (V12)

<b>U235 premier centimètre Volume 11</b>	<b>1,1582E11 n/s</b>	<b>±0,0059 %</b>
<b>U235 deuxième centimètre Volume 12</b>	<b>5,6358E10 n/s</b>	<b>±0,0091 %</b>
<b>U235 TOTAL</b>	<b>1,7218E11 n/s</b>	
<b>U238 premier centimètre Volume 11</b>	<b>1,0572E10 n/s</b>	<b>±0,15 %</b>
<b>U238 deuxième centimètre Volume 12</b>	<b>8,9246E09 n/s</b>	<b>±0,14 %</b>
<b>U238 TOTAL</b>	<b>1,9497E10 n/s</b>	
<b>GRAND TOTAL</b>	<b>1,9168E11 n/s</b>	

**Tableau G-12**

Les tableaux qui suivent, numérotés de G-13 à G-22, regroupent successivement :

- Tableaux de type (a) : les résultats des calculs effectués par le logiciel de Monte-Carlo TRIPOLI 4 avec les écarts types d'origine stochastique seule ( $\sigma$  en %) et les flux conventionnels aux différentes abscisses.
- Tableaux de type (b) : les rapports C/E pour chaque abscisse en séparant les campagnes de mesures faites à des dates différentes.

Distance X en cm	Flux de fission équivalent P31/Cd	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0.	0,59	1,952E7
1,5	0,61	1,316E7
2,25	0,62	1,116E7
6,0	0,69	5,220E6
10.	0,75	2,485E6
15.	0,81	1,050E6
20,5	0,95	4,335E5
25,5	1,08	2,000E5
30,5	1,16	9,486E4

Tableau G-13 (a)

Distances X en cm	Flux de fission équivalent P31/Cd		
	C/E 12/4/65	C/E 26/4/65	C/E 7/7/65
0.		1,08	
1,5			1,08
2,25		1,00	
6,0		0,99	1,00
10.		0,95	
15.		0,95	
20,5	0,88		
25,5	0,94		
30,5	0,93		

Tableau G-13 (b)

L'accord entre calcul et expérience est relativement bon en ce qui concerne le flux de fission équivalent P31. On notera toutefois une diminution significative du rapport C/E en fonction de la distance qui atteint presque 10 % à une trentaine de centimètres.

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Rh/Cd	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0.	0,30	2,822E7
3,7	0,33	9,696E6
6,8	0,37	4,826E6
10,9	0,40	2,090E6
27.	0,66	1,257E5
32.	0,73	5,676E4
37.	0,84	2,648E4

Tableau G-14 (a)

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Rh/Cd	
	C/E 14/4/65	C/E 26/4/65
0.		1,06
3,7		0,95
6,8		0,91
10,9		0,79
27.	0,69	
32.	0,68	
37.	0,68	

Tableau G-14 (b)

On notera le désaccord très net concernant le flux de fission équivalent Rh103 et son atténuation trop forte par le calcul en fonction de la distance de pénétration. Ce point était légèrement visible sur le flux de fission équivalent P31 qui voit les neutrons plus énergétiques que le Rh103.

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Si Wigner/Cd	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI 4
0,5	0,56	2,665E7
3.	0,61	1,295E7
3,5	0,64	1,140E7
6,0	0,71	6,308E6
10.	0,77	2,686E6
15.	0,84	1,021E6
20.	1,03	4,204E5
25.	1,23	1,806E5

Tableau G-15 (a)

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Si Wigner/Cd		
	C/E 6-7/4/65	C/E 5-6-7/7/65	C/E 7/7/65
0,5	1,055 & 1,075		1,055
3.	0,908	0,908	
3,5	1,044		
6,0	1,032	1,043	1,035
10.	0,872		
15.	0,764		
20.	0,697	0,697	
25.	0,607		

Tableau G-15 (b)

On notera d'une part la très bonne cohérence des mesures répétées et d'autre part la sous-estimation pour les fortes pénétrations du flux de fission équivalent Silicium par le calcul. Le désaccord trouvé lors de la présentation des mesures faites avec le Rh103 semble confirmé par les mesures avec les diodes au silicium de sensibilité assez voisine. Les annexes de la référence [2] donnent la réponse de ces diodes en fonction de l'énergie des neutrons [3-a] et [3-b].

Distance X en cm	Flux de fission équivalent S/Cd	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0.	0,63	1,921E7
5.	0,69	6,248E6
10.	0,77	2,457E6
15.	0,82	1,042E6
20.	0,96	4,664E5
25.	1,09	2,152E5
30.	1,18	1,018E5
34,7	1,23	5,107E4
40.	1,36	2,416E4
44,8	1,47	1,247E4
53	1,66	4,218E3

Tableau G-16 (a)

Distance X en cm	Flux de fission équivalent S/Cd	
	C/E 5-6-7/7/65	C/E 12-13/7/65
0.	1,12	1,07
5.	1,02	0,96
10.		0,94
15.		0,94
20.		0,92
25.		1,00
30.		1,04
34,7	1,04	
40.	1,09	
44,8	1,11	
53	1,21	

Tableau G-16 (b)

Les mesures à l'aide du dosimètre de S32 confirment les mesures utilisant le dosimètre de P31 jusqu'à 30 cm de pénétration. La réponse du S32 a un profil de sensibilité assez voisin de celui du dosimètre de P31, toutefois un peu plus dur. L'indice de spectre S32/P31 est donc alors très voisin de l'unité. Au-delà de 40 cm les résultats du calcul semblent surestimer ceux de l'expérience. (L'abscisse maximale des mesures à l'aide de dosimètres de Rh103 était 30 cm).

Distance X en cm	Débit d'équivalent de dose (ANS77) en Rem/h	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0,0	0,24	4,251E3
10.	0,34	4,371E2
15,5	0,43	1,486E2
20.	0,47	6,422E1
30.	0,66	1,146E1
35,55	0,71	4,739
40.	0,80	2,372
50.	1,01	5,412E-1
58,75	1,41	1,637E-1
70.	1,56	3,711E-2
80.	1,92	1,067E-2
90.	2,29	3,148E-3

Tableau G-17 (a)

Distance X en cm	Débit d'équivalent de dose (PM rapide) en mRem/h			
	C/E 11/2/58	C/E 5/7/58	C/E 7/7/58	C/E 9/7/58
0,0	2,85	2,87		
10.	2,03	1,84		2,47
15,5			2,15	
20.	1,69	1,54	1,66	2,14
30.	1,34	1,31	1,48	1,75
35,55			1,43	
40.	1,28	1,14		1,62
50.	1,16	1,03	1,23	
58,75	1,28			
70.	1,16	1,01		
80.	1,22	1,12		
90.	1,03	1,04		

Tableau G-17 (b)

Il est difficile de comparer le calcul avec l'expérience : la fonction réponse utilisée par le calcul pour obtenir des débits d'équivalent de dose est la norme ANS\_77 qui diffère peut-être de la réponse du compteur avec photomultiplicateur (PM rapide [4]). Un calcul utilisant le logiciel TRIPOLI-4 avec un nombre réduit de neutrons (360 batches de 760 neutrons thermiques sources, calcul référencé 05-011) a été réalisé d'une part avec la fonction de réponse ANS\_77 et d'autre part avec le facteur de conversion de flux en débit d'équivalent de dose préconisé en 1958 pour les calculs de protection [4]. Cette fonction réponse est donnée ci-après dans le tableau G-17 (c). La comparaison entre les deux débits d'équivalent de dose en fonction de l'épaisseur d'eau traversée dans NAÏADE 1 est donnée dans le tableau G-17 (d).

Energie MeV	Conversion mrem/h	Energie MeV	Conversion mrem/h
0.	0.	2,50	0,212
0,25	0,0585	2,75	0,221
0,50	0,0900	3,00	0,230
0,75	0,115	3,25	0,238
1,00	0,134	3,50	0,246
1,25	0,150	3,75	0,254
1,50	0,164	4,00	0,261
1,75	0,177	4,25	0,269
2,00	0,190	4,50	0,275
2,25	0,200	4,75	0,281
		5,00	0,287

Tableau G-17 (c)

X cm	ANS_77 (A) TRIPOLI-4 Rem/h	$\sigma$ %	1958 [4] (B) TRIPOLI-4 mrem/h	$\sigma$ %	Rapport A/B
0,0	4,227E3	0,74	5,016E6	0,80	0,843
10.	4,459E2	1,07	4,125E5	1,02	1,081
15,5	1,503E2	1,29	1,416E5	1,12	1,061
20,0	6,537E1	1,50	6,217E4	1,22	1,051
30,0	1,133E1	2,07	1,145E4	1,67	0,990
35,55	4,786	2,30	4,633E3	1,67	1,033
40,0	2,379	2,42	2,316E3	1,82	1,027
50,0	5,394E-1	2,99	5,203E2	2,26	1,037
58,75	1,599E-1	3,84	1,509E2	2,84	1,060
70,0	3,536E-2	4,2	3,339E1	3,47	1,059
80,0	9,921E-3	5,01	8,951	3,61	1,108
90,0	2,982E-3	7,14	2,656	5,81	1,123

Tableau G-17 (d) (au cours d'un même calcul donc avec les mêmes spectres)

Distance X en cm	Flux par unité de léthargie à 1.46eV (In115/Cd)			
	$\sigma$ en % (a)	TRIPOLI-4 (a)	$\sigma$ en % (b)	TRIPOLI-4 (b)
0.	7,97	6,169E5	2,84	5,640E5
0,5	7,10	8,247E5	2,87	8,408E5
3,0	48	2,409E6	7,93	1,262E6
3,5	5,46	1,090E6	2,33	1,177E6
6,0	6,48	8,836E5	2,26	8,281E5
10.	8,31	3,401E5	2,69	3,256E5
15.	9,12	1,117E5	3,60	1,029E5
20.	12.	3,249E4	4,42	3,664E4
25.	10.	1,085E4	4,15	1,497E4
30.	13.	5,230E3	5,97	5,123E3
40.	21.	8,805E2	6,10	9,413E2
0 à 40	Produit (a) →	7,279E55	Produit (b) →	5,169E55

Tableau G-18 (a)

La colonne intitulée TRIPOLI-4 (a) donne le flux par unité de léthargie à 1,46eV obtenu en divisant le taux de réaction microscopique par l'intégrale de résonance de l'In115. Cette valeur de densité de flux présente une erreur statistique importante due à la présence de cette fine résonance de l'In115 à 1,46eV (les scores sont très dispersés selon la distance séparant l'énergie de la résonance de l'énergie du neutron au moment de l'encaissement). Nous proposons une autre méthode pour obtenir le flux par unité de léthargie (voir colonne b) : nous divisons le flux intégré dans un intervalle centré autour de 1.46eV [4,38eV, 0,4867eV] par la largeur en léthargie de cet intervalle (1.099 correspondant à un facteur 3 de part et d'autre de 1,46eV). Pour vérifier que cette dernière méthode n'entraînait qu'un léger biais, nous avons effectué les deux produits des 11 valeurs des densités de flux obtenus dans chacune des colonnes TRIPOLI-4(a) et TRIPOLI-4(b), puis nous avons effectué le quotient  $Q_{In}$  de ces deux produits.

On obtient enfin un ordre de grandeur du biais : environ 3 % puisque  $\sqrt[11]{Q_{In}} = 1.0316$ . Notons que cette estimation est polluée par l'incertitude statistique.

Distance X en cm	Flux par unité de léthargie à 4.91eV (Au197/Cd)			
	$\sigma$ en % (c)	TRIPOLI-4 (c)	$\sigma$ en % (d)	TRIPOLI-4 (d)
0.	9,54	5,799E5	3,30	6,169E5
0,5	8,69	8,939E5	2,39	8,377E5
3,0	7,73	1,168E6	1,85	1,164E6
3,5	6,52	1,050E6	2,27	1,155E6
6,0	12.	8,863E5	2,63	7,788E5
10.	7,24	2,815E5	2,66	3,081E5
15.	12.	1,003E5	3,56	9,453E4
20.	16.	3,015E4	4,43	3,253E4
25.	15.	1,360E4	5,00	1,333E4
30.	19.	4,956E3	6,71	4,722E3
35.	20.	1,732E3	8,55	2,328E3
45.	27.	4,243E2	9,77	4,126E2
50.	25.	1,442E2	9,26	2,085E2
55.	27.	1,274E2	8,82	1,167E2
60.	25.	4,121E1	11.	4,772E1
65.	29.	2,949E1	11.	2,402E1
0. à 65.	Produit (c) →	5,366E65	Produit (d) →	8,716E65

Tableau G-18 (a')

Ce procédé de dépouillement a été repris pour le dosimètre d'Au197 (résonance à 4,91eV) dans le

tableau G-18 (a') qui donne aussi un biais de l'ordre de 3 % :  $\sqrt[16]{Q_{Au}} = 0.970$ .

L'intervalle en énergie est encore d'un facteur 3 autour de 4.91eV soit [14,73eV, 1,6367eV].

Distance X en cm	In115/Cd	Au197/Cd
	Flux par unite de léthargie à 1.46eV	Flux par unite de léthargie à 4.91eV
	C/E 13/4/65	C/E 5-6/4/65
0,0	0,60	0,63
0,5	0,83	0,85
3,0	1,30	1,21
3,5	1,16	1,34
6,0	1,28	1,44
10.	1,16	1,52
15.	1,20	1,56
20.	1,40	1,47
25.	1,33	1,44
30.		1,26
35.		1,60
40.	1,12	
45.		1,15
50.		1,97
60.		1,51

Tableau G-18 (b)

Ce tableau montre une sous-estimation des valeurs calculées par rapport aux valeurs expérimentales pour les très faibles abscisses et une surestimation après 3 cm de pénétration.

Distance X en cm	Flux équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3/Cd	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
5,5	2,05	4,016E5
7,5	2,05	2,585E5
10.	2,05	1,434E5
15.	2,88	4,471E4
20.	3,48	1,595E4
30.	4,66	2,298E3
40.	4,84	4,234E2
50.	6,26	9,357E1
60.	8,84	2,161E1

Tableau G-19 (a)

Distance X en cm	Flux équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3/Cd
	C/E 25/5/60
5,5	0,81
7,5	0,73
10.	0,71
15.	0,71
20.	0,77
30.	0,73
40.	0,69
50.	0,73
60.	0,71

Tableau G-19 (b)

La sous-estimation par le calcul est constante en fonction de l'abscisse : le facteur C/E est de l'ordre de 0,7 à 0,8. Il serait intéressant de voir l'influence de la coupure du cadmium que nous avons prise égale à 0,5eV et qui est plus influente pour une réponse en  $1/v$  (comme celle du compteur BF3) que pour un dosimètre résonant comme l'Au197 par exemple.

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn/Cd	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0,0	3,58	7,056E5
1,0	3,12	1,059E6
2,40	2,65	1,126E6
3,5	2,91	1,055E6
4,0	2,39	9,331E5
5,0	3,02	8,305E5
10.	4,54	2,709E5
15.	3,72	8,967E4
20.	4,80	2,717E4
25.	5,08	1,063E4
30.	26	5,679E3
35.	8,10	2,161E3
40.	6,62	7,442E2
45.	9,54	3,559E2
50.	8,95	1,662E2

Tableau G-20 (a)

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn/Cd	
	C/E 12/4/65	C/E 5/7/65
0,0		0,92
1,0		1,06
2,40		1,10
3,5		1,24
4,0		1,18
5,0		1,19
10.		1,10
15.		1,20
20.	0,89	
25.	1,09	
30.	1,38	
35.	1,50	
40.	1,06	
45.	1,10	
50.	1,21	

Tableau G-20 (b)

Les conclusions sur la partie du spectre neutronique au-dessus de la coupure du cadmium sont tout à fait cohérentes avec celles déduites des analyses des dosimètres de In115 et Au197. Notons cependant que la précision stochastique de nos calculs de Monte-Carlo n'est pas très bonne puisque  $\sigma$  varie (tableau G-20 (a)) de 4 % à 10 % si l'on élimine le point à l'abscisse X=30 cm.

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3 nu	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0,0	2,29	5.654E6
1,0	1,19	2,109E7
2,0	1,02	3,216E7
4,0	0,91	4,096E7
5,0	0,91	4,081E7
7,5	1,01	3,190E7
10.	0,87	2,212E7
15.	1,35	8,320E6
20.	1,43	3,016E6
23.	1,63	1,644E6
27.	1,75	7,260E5
30.	2,36	4,318E5
37.	2,73	1,240E5
40.	2,10	7,714E4
43.	2,83	4,776E4
45.	3,52	3,331E4
50.	3,42	1,564E4
55.	3,23	7,375E3
60.	4,47	3,729E3
70.	3,70	9,068E2
72.	3,81	6,789E2

Tableau G-21 (a) (*début*)

Distance X en cm ( <i>suite</i> )	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3 nu	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI 4
77.	3,62	3,630E2
80.	3,62	2,630E2
85.	4,02	1,303E2
90.	5,54	6,904E1
97.	5,23	2,766E1
100.	4,46	2,009E1
107.	3,12	8,441
110.	8,21	5,898
112.	3,61	4,438
117.	3,68	2,440
120.	4,08	1,816
130.	3,93	5,802E-1
132.	4,03	4,674E-1
140.	4,05	2,019E-1
147.	5,11	9,227E-2
150.	5,30	6,982E-2
157.	7,00	3,435E-2
160.	6,19	2,375E-2
167.	6,61	1,178E-2
175.	7,90	5,070E-3
180.	8,39	2,964E-3

Tableau G-21 (a) (*suite et fin*)

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s		
	Compteur BF3 nu		
	C/E Mai 57	C/E 8/2/58	C/E 10/5/60
0,0			0,64
1,0			0,87
2,0			0,97
4,0			1,18
5,0			1,15
7,5			1,20
10.			1,47
15.	1,17		
20.	1,24		1,24
23.	1,27		
27.	1,26		
30.	1,39		1,26
37.	1,08		
40.	1,06		1,24
43.	1,02		
45.	1,02		
50.	1,18		1,27
55.	1,66		
60.	1,36		1,42
70.			1,41
72.	1,39		

Tableau G-21 (b) (*début*)

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3 nu (suite)		
	C/E Mai 57	C/E 8/2/58	C/E 10/5/60
77.	1,86		
80.	2,48		1,55
85.	1,96		
90.	1,73		1,52
97.	1,28		
100.			1,53
107.	1,59		
110.			1,46
112.	1,56		
117.	1,83		
120.		1,24	1,38
130.			1,35
132.	1,51		
140.		0,95	1,31
147.	1,29		
150.			1,22
157.	0,99		
160.		0,54	
167.	0,91		
175.	0,82		
180.		0,22	

Tableau G-21 (b) (suite et fin)

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn nu	
	$\sigma$ en %	TRIPOLI-4
0,0	2,14	6,059E6
3,0	0,95	3,914E7
4,5	0,96	4,159E7
5,0	0,90	4,109E7
6,0	1,07	3,771E7
7,5	1,01	3,202E7
9,0	0,83	2,614E7
10.	0,86	2,219E7
10,5	0,83	2,017E7
12.	0,94	1,524E7
13,5	1,07	1,131E7
14.		
15.	1,35	8,335E6
20.	1,42	3,007E6
25.	1,60	1,081E6
30.	2,34	4,341E5
35.	2,35	1,776E5
40.	2,09	7,703E4
45.	3,51	3,339E4
50.	3,40	1,567E4
55.	3,24	7,419E3
60.	4,45	3,741E3
65.	4,11	1,894E3
70.	3,70	9,093E2
75.	4,95	4,963E2
78,2	4,39	3,167E2

Tableau G-22 (a)

Distances X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn nu			
	C/E Mai 57	C/E 5/4/65	C/E 7/4/65	C/E 26/4/65
0,0	1,10			0,58
3,0			0,93	1,04
4,5			0,99	
5,0	1,10			
6,0			1,12	1,12
7,5			0,95	
9,0			1,17	
10.	1,17			1,06
10,5			1,07	
12.			1,07	
13,5			1,25	
14.				
15.			1,06	1,08
20.	1,34		1,13	1,20
25.			1,29	
30.			1,28	
35.	1,11		1,18	
40.	1,31	1,19	1,38	
45.	1,08	1,13	1,14	
50.		1,28		
55.		1,20		
60.		1,53		
65.		1,46		
70.		1,39		
75.		1,32		
78,2		1,46		

Tableau G-22 (b)

Les comparaisons des valeurs calculées par TRIPOLI-4 avec les valeurs mesurées relatives aux dosimètres de neutrons thermiques (tableau G-21 (b) pour le compteur BF3 nu et tableau G-22 (b) pour le dosimètre de Mn55 nu) sont tout à fait cohérentes avec les conclusions tirées pour les dosimètres épithermiques et ceci jusqu'à des pénétrations de 80 cm environ. Il y a une sous-estimation par le calcul à très courte distance et une surestimation après quelques centimètres de propagation. Dans le tableau G-21 (b) (BF3 nu), on constate une chute du rapport C/E à partir de 150cm de pénétration ; peut-être s'agit-il de la manifestation d'un bruit de fond ou de celle des photoneutrons à très grande distance.

## V Influence de l'origine des fonctions réponses du Rh103 sur les résultats des calculs

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats calculés relatifs aux flux de fission équivalent Rhodium pose un problème : l'atténuation calculée dans l'eau est beaucoup plus forte que celle obtenue par l'expérience (voir tableau G-14 (b)). Ce désaccord semble bien confirmé par l'analyse des rapports C/E relatifs aux mesures par diodes au Silicium. Nous avons toutefois calculé les rapports C/E avec d'autres évaluations de la section efficace du Rh103(n,n') :

- IRDF90 703.3mb 255 valeurs
- RRDF98 707.7mb 201 valeurs
- IRDF02 712.6mb 255 valeurs

Le tableau G-23 donne les valeurs des rapports C/E pour les différentes origines de fonction réponse en fonction de la distance. Il faut remarquer que ces rapports peuvent être comparés de façon précise entre eux car ils sont obtenus au cours d'un même calcul (05\_012) donc rigoureusement avec le même spectre calculé.

<b>Influence de l'origine des sections du Rh103(n,n')</b>						
<b>X cm</b>	<b>IRDF90</b>		<b>RRDF98</b>		<b>IRDF02</b>	
	<b>C/E</b>	<b><math>\sigma</math> %</b>	<b>C/E</b>	<b><math>\sigma</math> %</b>	<b>C/E</b>	<b><math>\sigma</math> %</b>
<b>0.</b>	<b>1,064</b>	<b>0,80</b>	<b>1,035</b>	<b>0,83</b>	<b>1,061</b>	<b>0,80</b>
<b>3,7</b>	<b>0,952</b>	<b>0,89</b>	<b>0,932</b>	<b>0,92</b>	<b>0,950</b>	<b>0,89</b>
<b>6,8</b>	<b>0,903</b>	<b>0,94</b>	<b>0,888</b>	<b>0,98</b>	<b>0,901</b>	<b>0,95</b>
<b>10,9</b>	<b>0,792</b>	<b>1,07</b>	<b>0,785</b>	<b>1,11</b>	<b>0,792</b>	<b>1,09</b>
<b>27,0</b>	<b>0,691</b>	<b>1,57</b>	<b>0,695</b>	<b>1,63</b>	<b>0,693</b>	<b>1,60</b>
<b>32,0</b>	<b>0,684</b>	<b>1,85</b>	<b>0,689</b>	<b>1,88</b>	<b>0,686</b>	<b>1,86</b>
<b>37,0</b>	<b>0,690</b>	<b>2,84</b>	<b>0,697</b>	<b>2,10</b>	<b>0,693</b>	<b>2,08</b>

Tableau G-23

## VI Estimation calculée du bruit de fond

Un calcul de contribution du bruit de fond dû aux neutrons rapides et épithermiques ( $E > 0,5\text{eV}$ ) issus du cœur du réacteur ZOE a été fait à l'aide du logiciel TRIPOLI-4. Les neutrons thermiques maxwelliens issus du réflecteur de ZOE sont atténués par la plaque d'uranium puis sont absorbés par l'écran épais de boral. La détermination de la source de neutrons générant le bruit de fond a été faite dans la partie D de la référence [2] (§ IV).

Rappelons (voir détails dans le tableau D-15 de la référence [2]) les niveaux de flux expérimentaux dans les conditions suivantes :

- Absence de la plaque d'uranium assurant la conversion des neutrons thermiques en neutrons de fission,
- Absence de l'écran épais de boral,
- Diaphragme de 60 cm,
- Cuve d'aluminium en place,
- Puissance de ZOE ramenée à 100 kW,
- Mesures dans l'axe du convertisseur sur la face interne de la cuve ( $x=y=z=0$ ).

Dans ces conditions les valeurs expérimentales des flux sont :

- Flux thermique équivalent à 2 200 m/s            6,4E7
- Flux par unité de léthargie                            1,e4 à 2,e4
- Flux de fission équivalent                            4,0E4 à 5,0e4

Rappelons également l'ordre de grandeur du flux de fission équivalent au même point avec, cette fois-ci, la présence de la plaque de fission (convertisseur) et l'écran de boral : 1,8E7, soit environ 0,3 % comme rapport bruit/signal.

Les résultats ci-après sont obtenus avec une source de bruit de fond conforme à celle décrite au paragraphe IV-2 de la partie D (référence [2]). Les neutrons ne sont émis que dans un cône d'axe Ox et d'angle au sommet  $\text{Arccos}(0,95)$  afin de limiter le temps de calcul inutile dans les structures de béton entourant le réacteur ZOE. Le calcul TRIPOLI-4 utilisait le fichier : « bruitdefond\_eau\_60\_fission.data » distribué avec SINBAD-NAIADE-H2O-60. Il comportait 450 batches de 210000 neutrons et a duré 289399s.

La dernière colonne des tableaux suivants, relatifs à un dosimètre donné, reproduit le pourcentage de bruit de fond (Calcul TRIPOLI-4 05-014) par rapport au signal direct, ce dernier étant la valeur calculée par TRIPOLI-4. La seconde colonne donne l'écart type stochastique sur le bruit de fond. Cet écart type est dû uniquement à la méthode de Monte-Carlo.

Distance X en cm	Flux de fission équivalent P31/Cd	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/signal TRIPOLI-4 %
0.	0,64	0,217
1,5	0,52	0,237
2,25	0,71	0,249
6,0	0,62	0,298
10.	0,65	0,347
15.	0,83	0,410
20,5	0,93	0,475
25,5	0,92	0,533
30,5	1,04	0,586

Tableau G-24

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Rh/Cd	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/signal en % TRIPOLI-4
0.	0,48	0,200
3,7	0,40	0,251
6,8	0,47	0,290
10,9	0,59	0,338
27.	0,98	0,516
32.	0,95	0,567
37.	1,05	0,613

Tableau G-25

Distance X en cm	Flux de fission équivalent Si Wigner/Cd	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI 4
0,5	0,37	0,200
3.	0,39	0,233
3,5	0,48	0,241
6,0	0,43	0,272
10.	0,50	0,318
15.	1,45	0,381
20.	1,14	0,432
25.	0,82	0,482

Tableau G-26

Distance X en cm	Flux de fission équivalent S/Cd	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0.	0,70	0,217
5.	0,65	0,287
10.	0,69	0,349
15.	0,88	0,412
20.	0,90	0,468
25.	0,92	0,528
30.	1,12	0,582
34,7	1,13	0,648
40.	1,27	0,698
44,8	1,38	0,783
53	1,99	0,884

Tableau G-27

Distance X en cm	Débit d'équivalent de dose (ANS77) en Rem/h	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0,0	0,43	0,208
10.	0,44	0,317
15,5	0,50	0,365
20.	0,99	0,414
30.	0,72	0,512
35,55	0,85	0,577
40.	1,26	0,632
50.	1,15	0,757
58,75	1,47	0,840
70.	1,47	0,990
80.	5,53	1,15
90.	3,05	1,24

Tableau G-28

X en cm	Flux par unité de léthargie (1.46eV In115/Cd)	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0.	1,55	0,838
0,5	1,52	0,848
3,0	1,38	0,497
3,5	1,03	0,458
6,0	1,86	0,322
10.	2,68	0,283
15.	2,21	0,309
20.	1,99	0,373
25.	2,46	0,392
30.	3,61	0,502
40.	3,87	0,659

Tableau G-29

X en cm	Flux par unité de léthargie (4.91eV Au197/Cd)	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0.	1,82	0,917
0,5	1,32	0,965
3,0	1,46	0,508
3,5	1,09	0,432
6,0	2,02	0,307
10.	2,63	0,264
15.	2,25	0,308
20.	3,24	0,381
25.	2,68	0,400
30.	3,62	0,520
35.	2,71	0,500
45.	3,15	(0,715)*
50.	4,48	(0,679)*
55.	3,11	(0,644)*
60.	3,93	(0,828)*
65.	3,21	(0,862)*

Tableau G-30

\* Le signal utile comporte une imprécision stochastique notable.

Distance X en cm	Flux équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3/Cd	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
5,5	1,15	0,321
7,5	1,34	0,277
10.	2,22	0,278
15.	1,72	0,312
20.	2,34	0,374
30.	2,77	0,511
40.	3,21	0,601
50.	2,85	0,698
60.	3,08	0,854

Tableau G-31

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn/Cd	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0,0	2,14	1,15
1,0	1,20	0,723
2,40	1,06	0,501
3,5	1,39	0,380
4,0	2,09	0,368
5,0	2,40	0,318
10.	3,62	0,266
15.	2,58	0,336
20.	2,85	0,385
25.	3,36	0,448
30.	3,76	(0,374)
35.	3,58	0,474
40.	4,82	0,647
45.	3,18	0,693
50.	6,47	(0,792)

Tableau G-32

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3 nu	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0,0	1,00	0,620
1,0	0,67	0,600
2,0	0,50	0,546
4,0	0,58	0,455
5,0	1,77	0,426
7,5	0,67	0,362
10.	0,88	0,326
15.	0,68	0,320
20.	0,99	0,345
23.	0,92	0,370
27.	1,00	0,438
30.	1,19	0,463
37.	1,04	0,525
40.	1,24	0,546
43.	1,33	0,576
45.	1,11	0,625
50.	1,40	0,662
55.	1,27	0,712
60.	1,34	0,733
70.	1,31	0,893
72.	1,58	0,951

Tableau G-33 (*début*)

Distance X en cm (suite)	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Compteur BF3 nu	
	$\sigma$ en % bruit	Bruit/Signal en % TRIPOLI 4
77.	1,74	0,978
80.	2,92	0,957
85.	1,53	1,07
90.	1,53	1,11
97.	1,68	1,25
100.	1,82	1,24
107.	1,89	1,33
110.	2,04	1,36
112.	2,01	1,45
117.	2,22	1,50
120.	2,29	1,46
130.	2,51	1,55
132.	2,60	1,56
140.	2,82	1,54
147.	3,01	1,62
150.	3,04	1,57
157.	3,25	1,57
160.	3,26	1,66
167.	3,39	1,61
175.	3,55	1,62
180.	3,64	1,66

Tableau G-33 (suite et fin)

Distance X en cm	Flux thermique équivalent à 2 200 m/s Mn nu	
	$\sigma$ en % (bruit)	Bruit/Signal en % TRIPOLI-4
0,0	0,95	0,667
3,0	0,52	0,495
4,5	0,55	0,434
5,0	1,75	0,441
6,0	0,62	0,398
7,5	0,69	0,362
9,0	0,71	0,331
10.	0,88	0,326
10,5	0,88	0,324
12.	0,74	0,317
13,5	0,85	0,320
14.		
15.	0,68	0,320
20.	0,99	0,347
25.	1,78	0,406
30.	1,19	0,445
35.	0,99	0,506
40.	1,24	0,547
45.	1,11	0,625
50.	1,39	0,664
55.	1,26	0,711
60.	1,33	0,737
65.	1,26	0,785
70.	1,32	0,895
75.	1,45	0,885
78,2	1,37	0,970

Tableau G-34

## VII Conclusions

Les dosimètres qui ont été mis en oeuvre pour la mesure des neutrons rapides sont les suivants :

1. Le soufre (réaction  $S32(n,p)$ ) et le phosphore (réaction  $P31(n,p)$ ) de réponses relativement voisines (seuil de l'ordre de 2MeV). L'indice de spectre calculé dans l'eau à partir des deux flux de fission équivalents est pratiquement égal à l'unité.
2. Le rhodium (réaction  $Rh103(n,n')$ ) et la diode au silicium qui intègrent les neutrons d'énergie un peu plus faible que le soufre et le phosphore (seuil d'intégration de l'ordre de la centaine de keV pour les deux dosimètres).

On constate un accord calcul/expérience satisfaisant en ce qui concerne le S32 et le P31. Toutefois, on notera que les résultats des calculs montrent une tendance à la surestimation du flux de fission équivalent S32 pour les grandes distances ( $X > 40$  cm) et une tendance à la sous-estimation du flux de fission équivalent P31 ; cette dernière s'accroît en fonction de la distance ( $C/E = 0,93$  à 30,5 cm), ce qui laisse un peu présager le sens des résultats calculés pour le flux de fission équivalent Rhodium. (Les mesures faites à l'aide du dosimètre de P31 n'ont été réalisées que pour des distances inférieures à 30,5 cm).

L'étude des rapports C/E relatifs à la réponse du Rh103 et des diodes au silicium pose manifestement un problème. Le flux de fission équivalent Rh103 calculé est atténué plus rapidement que ne l'indiquent les mesures ( $C/E = 0,68$  à 37 cm). Il en est de même pour les valeurs de flux de fission équivalent obtenues par le calcul pour les diodes. On notera la très bonne reproductibilité des mesures faites à l'aide des diodes réalisées à 3 mois d'intervalle. Ultérieurement à la publication de ce VOLUME 2, des interprétations des mesures d'atténuation des neutrons de fission dans l'eau légère ont été réalisées, toujours à l'aide du logiciel TRIPOLI 4 mais cette fois avec la bibliothèque de données nucléaires ENDF/B/VII. Les principales conclusions sont les suivantes, excellent accord pour l'atténuation du flux de fission équivalent P31 entraînant une nette amélioration des rapports C/E du rhodium à grande distance.

Nous ne tirerons pas de conclusions fermes sur les rapports C/E des valeurs de débits d'équivalent de dose biologique faute de connaissances plus précises sur la fonction réponse en fonction de l'énergie du compteur utilisé et de son étalonnage. La seule tendance que l'on peut signaler est l'atténuation plus forte pour les valeurs calculées que pour celles obtenues par l'expérience.

L'examen des rapports C/E des dosimètres faisant intervenir les neutrons lents (épicadmiques et thermiques) conduit aux conclusions exposées ci-après. Si l'on excepte les mesures par BF3 sous cadmium (le calcul sous-estime l'expérience uniformément de 20 à 25 %), les autres rapports C/E sont cohérents entre eux qu'il s'agisse des mesures de neutrons épithermiques (Mn55/Cd, Au197/Cd, In115/Cd) comme des mesures mettant en jeu les neutrons thermiques. Il y a une sous-estimation à très courte distance (comme pour les autres benchmarks tels que le fer et le graphite) et une légère surestimation quasi constante ensuite. Après 150 cm de pénétration, il apparaît un signal parasite peut-être dû au bruit de fond neutronique, peut-être dû aux photoneutrons qui se manifestent à grandes distances dans l'eau légère (Traces de deutérium). On remarquera que les mesures de neutrons thermiques dans l'eau ont été faites jusqu'à de très fortes pénétrations : 180 cm.

## VIII BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lott, M., Pepin, P., Bourdet, L., Cabaret, G., Capsie, J., Dubor, M., Hot, M., Goulet, C., (décembre 1970), *Étude expérimentale de l'atténuation des neutrons dans différents matériaux de protection à l'aide du dispositif NAÏADE 1 du réacteur ZOE*, Note CEA 1386.
- [2] Nimal, J.C., (December 2011), *New interpretation of the NAÏADE 1 Experiments – Part 1 The Iron and Graphite Experiments*, [NEA/NSC/DOC\(2005\)15/REV1](#).  
Nimal, J.C., (décembre 2011), *Nouvelles interprétations des expériences NAÏADE 1 - Volume 1 : Généralités sur le dispositif NAÏADE 1, Expérience sur le fer (Source de fission diamètre 60 cm), Expérience sur le graphite (Source de fission diamètre 60 cm)*, [NEA/NSC/DOC\(2005\)15/REV1](#).
- [3-a] Dulieu, P., (janvier 1965), *Utilisation pratique du détecteur de dommages au silicium*, Note CEA 514.  
[3-b] De Cosnac, B., Dulieu, P., Le Ralle, J. C., Manent, G., (4-8 Mars 1968), *Mesure des flux de neutrons rapides au moyen de diodes en Silicium sensibles aux dommages*, Colloque d'électronique nucléaire et radioprotection ; Tome 1, Toulouse, France.
- [4] Lott, M., Oceraiès, Y., Passe, S., Rastoin, J., *Étude d'un dosimètre à neutrons rapides*, Note CEA 445.
- [5] Both, J. P., Lee, Y.K., Mazzolo, A., Petit, O., Penelieu, Y., Roesslinger, B., Soldevila, M., (September 2003), *TRIPOLI-4 – A Three Dimensional Polykinetic Particle Transport Monte-Carlo Code*, SNA'2003, Paris.  
Both, J. P., Lee, Y.K., Mazzolo, A., Penelieu, Y., Petit, O., Roesslinger, B., (2003) *Notice d'utilisation du code TRIPOLI-4.3 : code de transport de particules par la méthode de Monte-Carlo*, Rapport-CEA-R-6043.  
Both, J. P., Mazzolo, A., Penelieu, Y., Petit, O., Roesslinger, B., (2003), *User manual for version 4.3 of the TRIPOLI-4 Monte-Carlo method particle transport computer code*, Rapport CEA-R-6044.
- [6] AEN/NEA/OECD, *JEF report 14. Table of simple integral neutron cross section data from JEF-2.2, ENDF/B-VI, JENDL-3.2, BROND-2 and CENDL-2*.