

CEA-R-5864



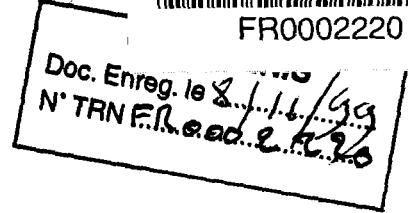
COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE

ISSN 0429 - 3460

99003054



FR0002220



**RÉSULTAT DES CAMPAGNES DE CARACTÉRISATION  
DE LA RÉPONSE DES DOSIMÈTRES ET  
DÉBITMÈTRES NEUTRONS À BRUYÈRES  
ET À VALDUC**

*par*

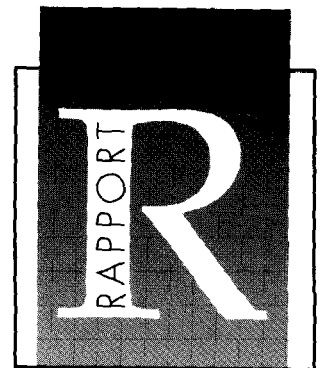
**Phillipe PRAS, Xavier LEDOUX, Yves PATIN**

CEA/DAM - ILE-DE-FRANCE

DIRECTION ILE-DE-FRANCE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

SERVICE PHYSIQUE NUCLÉAIRE



DIRECTION DE L'INFORMATION  
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

CEA/SACLAY 91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX FRANCE

**RAPPORT  
CEA-R-5864**

CEA/DAM - ILE-DE-FRANCE

1999

**RAPPORT CEA-R-5864 – Philippe PRAS, Xavier LEDOUX, Yves PATIN**

**« RÉSULTATS DES CAMPAGNES DE CARACTÉRISATION DE LA RÉPONSE DES DOSIMÈTRES ET DÉBITMÈTRES NEUTRONS À BRUYÈRES ET À VALDUC. »**

**Sommaire** - Ce rapport précise les différents résultats obtenus lors des campagnes de caractérisation des dosimètres neutrons (dosimètres à bulles) et débitmètres (Cramal, NAUSICAA, EGG Lb6411) sur sources étalons et sur accélérateur. Il propose un paramétrage de la réponse de tous ces appareils en fonction de l'énergie des neutrons. Il conclut à une bonne reproductibilité des mesures, y compris aux faibles débits d'équivalent de dose, dans le cadre strict du respect d'un mode opératoire. Il confirme l'invariance en fonction du débit d'équivalent de dose de la réponse des appareils.

*1999 – Commissariat à l'Energie Atomique - France*

**RAPPORT CEA-R-5864 – Philippe PRAS, Xavier LEDOUX, Yves PATIN**

**« RESULTS OF THE SYSTEMATIC STUDY OF NEUTRON DOSIMETERS AND NEUTRON RADIAMETERS RESPONSES FROM BRUYERES AND VALDUC'S EXPERIMENTS.**

**Summary** - This document gives the results of the systematic study of neutron dosimeters (Bubbles detectors) and neutron radiameters (Cramal, Nausicaa, EGG Lb6411) with standard sources and with the Bruyères Van de Graaff 4MV accelerator. The dose equivalent rate response as a function of the neutron energy is parameterised. Even for low dose equivalent rate, a good reproducibility of the measurements is found in the strict respect of a given method. The response of the different systems is independent of the dose equivalent rate.

*1999 – Commissariat à l'Energie Atomique - France*

- Rapport CEA-R-5864 -

CEA/DAM – Ile de France

Direction Ile de France

Département de Physique Théorique et Appliquée

Service Physique Nucléaire

RESULTATS DES CAMPAGNES DE CARACTERISATION  
DE LA REPOSE DES DOSIMETRES ET DEBITMETRES NEUTRONS  
A BRUYERES ET A VALDUC

par

Philippe PRAS, Xavier LEDOUX, Yves PATIN

- Septembre 1999 -

## Table des matières

<b>I - INTRODUCTION – OBJECTIFS.</b> .....	4
<b>II - RAPPELS ET DÉFINITIONS.</b> .....	5
1 / COMMISSION INTERNATIONALE SUR LA PROTECTION RADIOLOGIQUE (CIPR) - COMMISSION INTERNATIONALE SUR LES UNITÉS ET MESURES DES RADIATIONS (CIUR). .....	5
2 / UNITÉS – GRANDEURS OPÉRATIONNELLES. ....	5
3 / PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES ET D'ANALYSE.....	9
A – <u>CADRE GÉNÉRAL.</u> .....	9
B – <u>MODE OPÉRATOIRE.</u> .....	11
<b>III – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.</b> .....	17
1 / MESURES SUR L'ACCÉLÉRATEUR 4MV DE BRUYÈRES-LE-CHÂTEL. ....	17
A – <u>FONCTION DE RÉPONSE DES MICRO-DOSIMÈTRES NAUSICAA.</u> .....	17
B – <u>FONCTION DE RÉPONSE DES RADIAMÈTRES CRAMAL.</u> .....	23
C – <u>FONCTION DE RÉPONSE DU RADIAMÈTRE EGG-BERTHOLD LB6411.</u> .....	27
D – <u>FONCTION DE RÉPONSE DES DOSIMÈTRES À BULLES BD-PND.</u> .....	30
2 / MESURES SUR SOURCE ÉTALON – ÉTALONNAGE LPRI.....	32
A – <u>COMPARAISON DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX OBTENUS À BRUYÈRES ET À VALDUC.</u> .....	32
B – <u>COMPARAISON AVEC LES ÉTALONNAGES DU BNM-LPRI.</u> .....	34
C – <u>CONSÉQUENCES SUR LA DOSIMÉTRIE OPÉRATIONNELLE.</u> .....	36
<b>IV – CONCLUSION</b> .....	38
<b>ANNEXE 1 : SIMULATIONS NUMÉRIQUES.</b> .....	40
<b>ANNEXE 2 : PROCÉDURE ITÉRATIVE DE CORRECTION DE NEUTRONS DIFFUSÉS.....</b>	43
1 / INTRODUCTION / DÉFINITIONS. ....	43
2 / RELATIONS FONDAMENTALES.....	44
A – <u>CONDITIONS GÉNÉRALES INDÉPENDANTES DE L'ITÉRATION.</u> .....	44
B – <u>CONDITIONS DÉPENDANTES DE L'ITÉRATION <math>l \in \{0,1,2\}</math>.</u> .....	44
C – <u>INITIALISATION ET CONDITION DE CONVERGENCE.</u> .....	46
<b>ANNEXE 3 : PARAMÉTRAGE DES PSEUDO-FACTEURS DE CONVERSION.</b> .....	47
<b>ANNEXE 4 : CONFORMITÉ DES APPAREILS D'ANCIENNE GÉNÉRATION À LA CIPR60...</b>	51
1 / INTRODUCTION.....	51
2 / DOSIMÈTRES À BULLES BD-PND .....	51
3 / RADIAMÈTRE CRAMAL .....	52
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	54

## I - Introduction – Objectifs.

Ce document synthétise les différentes études de caractérisation des réponses des dosimètres ou débitmètres neutron effectuées au CEA/DAM depuis le mois de mai 1998. Il complète un premier rapport moins exhaustif [1] qui avait cependant permis de localiser les difficultés et d'en résoudre une partie avant de poursuivre l'analyse. L'ampleur des moyens mis en œuvre pour ces études est liée aux besoins du CEA/DAM en outils fiables de mesures des équivalents de doses neutron à l'heure du changement de réglementation.

Ce programme, à la demande de N. Franco et D. Ziarnowski (CP/DAN), s'appuie sur le soutien opérationnel du DPTA/SPN, DPTA/P2A et des SPR des centres de Bruyères-le-Châtel et de Valduc. Les dosimètres ou radiamètres neutrons étudiés sont ceux disponibles au SPR ou dont l'acquisition est envisagée courant 1999. Il s'agit :

- de dosimètres individuels à bulles BD-PND,
- de deux types de débitmètres : Cramal 31 et EGG-Berthold Lb6411,
- de radiamètres « équivalents tissus » de type Nausicaa.

Les objectifs sont :

- caractériser des fonctions de réponse des différents appareils de mesure en fonction de l'énergie des neutrons (quelques 10 keV <  $E_n$  < 15 MeV),
- vérifier la stabilité de cette réponse avec le Débit d'Equivalent de Dose (DED) dans la gamme ( 5 < DED( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ) < 1000 ) où l'on souhaite qualifier toute mesure ultérieure.

Les résultats de ces études ont servi de base à l'élaboration d'un protocole de mesure sur site [2] entre le CEA/DAM et le SPRA, dans lequel l'attention est attirée sur la cohérence statistique des mesures (temps d'exposition et reproductibilité en particulier).

Les moyens utilisés pour répondre à cette étude sont d'une part l'accélérateur 4MV de Bruyères-le-Châtel pour ce qui est de la production des neutrons monocinétiques et d'autre part, les sources étalons intenses de Valduc pour une qualification globale des résultats.

L'ensemble de ces résultats a fait l'objet de deux exposés devant le SPRA (07/12/98) et devant la DCN (06/01/99), ainsi que d'une communication plus large auprès de la Société Française de Radioprotection à l'occasion du congrès de la SFRP à Cadarache (15/11/98).

## II - Rappels et définitions.

### 1 / *Commission Internationale sur la Protection Radiologique (CIPR) - Commission Internationale sur les Unités et mesures des Radiations (CIUR).*

Il s'agit d'organismes constitués d'experts indépendants formés aux différentes disciplines qui touchent à la radioprotection. Les résultats de leurs travaux font régulièrement l'objet de publications dont certaines constituent la référence légale au niveau national ou européen. La CIPR édicte des recommandations sur les limites relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants ; la CIUR définit les grandeurs opérationnelles pour l'étalonnage des systèmes dosimétriques affectés aux surveillances de zone ou individuelle. La publication 21 [3] de la CIPR (1971) fait autorité à ce jour pour le droit national mais la Directive Européenne n°96/26/Euratom (mai 1996) [4] impose l'utilisation légale des recommandations de la publication 60 [5] avant le 13/05/2000. Jusqu'à cette date, les deux réglementations vont coexister au même titre que les appareils de dosimétrie conformes à l'une ou l'autre de ces recommandations. Les rapports de synthèse liés à l'ancienne réglementation sont contenus dans la CIPR21 tandis que la nouvelle fera référence à la CIPR74 [6] et la CIUR57 [7]. De façon abusive, nous parlerons de CIPR21 et CIPR60 pour évoquer ces deux cas.

### 2 / *Unités – Grandeurs opérationnelles.*

De façon générale, la grandeur physique qui traduit les dommages causés par les rayonnements, indépendamment de l'évolution des considérations d'efficacité biologique, est le dépôt d'énergie par unité de masse. Il est exprimé en Gray :  $1 \text{ Gy} = 6.242.10^9 \text{ MeV.g}^{-1} = 100 \text{ Rad}$ . Si l'on gardait une mémoire de cette *dose* intégrée par chaque agent au cours de sa vie ainsi que du couple {type de particule ; énergie} associé à chaque irradiation, il serait possible de reconstruire une « histoire radiative » conforme à la recommandation en vigueur à chaque instant.

Cette procédure, bien que satisfaisante d'un point de vue légal, ne répond pas aux besoins de la dosimétrie opérationnelle qui doit allier simplicité de traitement et transparence. Ainsi, on définit, pour une mesure en instantané, l'*équivalent de dose* dont l'unité est le Sievert ( $1 \mu\text{Sv} = 0,1 \text{ mRem} = \text{dose en Gy} \times Q$ ) et pour lequel le « facteur de qualité »  $Q$  donne la correspondance avec la *dose*.

En ce qui concerne les neutrons, le « facteur de conversion » de débit de fluence neutron en *Débit d'Equivalent de Dose* (DED) quantifie l'efficacité biologique de la radiation en fonction de l'énergie. Il est comparable à  $Q$  en ce sens qu'il relie une grandeur physique à un impact biologique des radiations mais permet de rajouter la dimension de l'énergie des particules. Ce facteur s'exprime soit en  $(\text{neutron.s}^{-1}.\text{cm}^{-2})/(\text{mrem.h}^{-1})$  dans le cadre de la CIPR21, soit en  $(\text{pSv.cm}^2)$  pour la CIPR74. Par soucis de clarté, nous avons opté pour un facteur de conversion  $C$  en  $(\mu\text{Sv.h}^{-1})/(\text{n.s}^{-1}.\text{cm}^{-2})$ .

La figure II.1 donne une représentation de la variation de  $C$  en fonction de l'énergie des neutrons. Elle indique qu'un neutron d'énergie de l'ordre du MeV est aussi nocif pour le corps humain qu'une centaine de neutrons thermiques. Du fait de leur efficacité biologique plus importante, seuls les neutrons d'énergie supérieure à la cinquantaine de keV font l'objet de ce rapport.

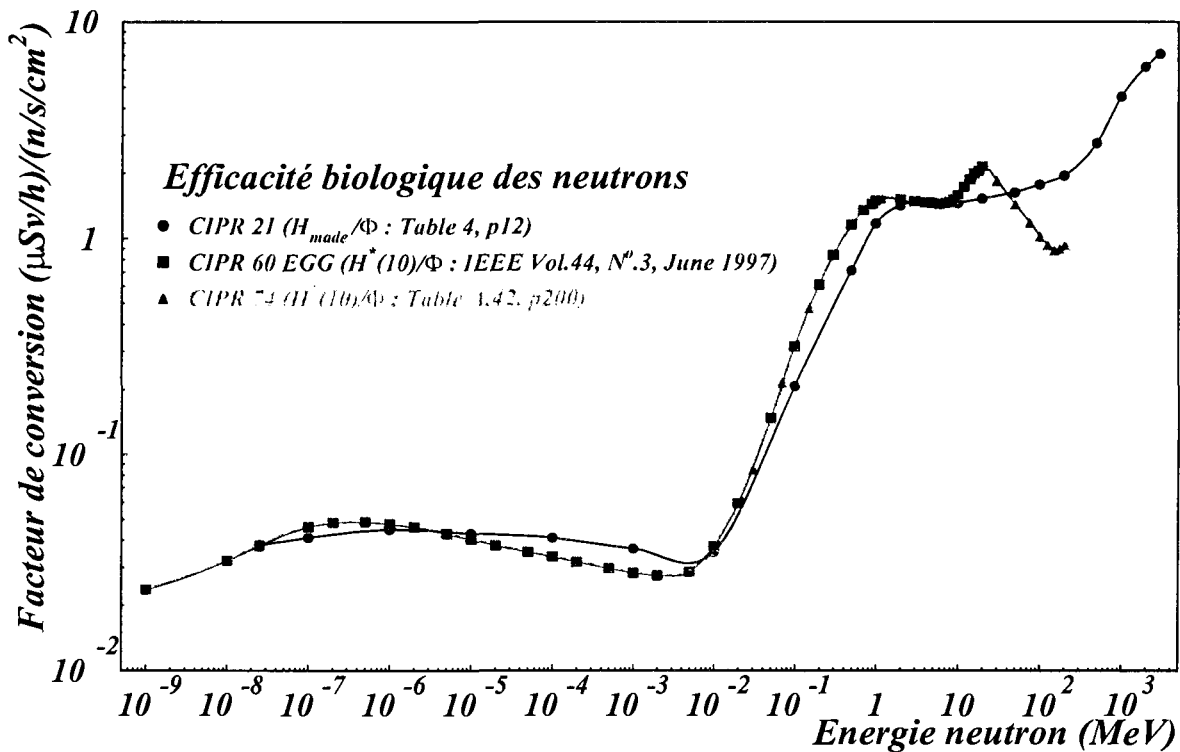


Figure II.1 : Facteurs de conversion dépendants de l'énergie cinétique des neutrons, dans le cadre des recommandations CIPR21 et CIPR60.

En ce qui concerne les grandeurs opérationnelles mesurées, il s'agit du DED ambiant à la surface de la peau pour la CIPR21 ( $H_{made}$  pour « man ambient dose equivalent ») et du DED ambiant à 10 mm de profondeur  $H^*(10)$  pour les résultats relatifs à la CIPR60. Quelle que soit l'observable, elle est obtenue de façon suivante :

$$H_{réel} (\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}) = C (\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})/(\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}) \cdot \Phi (\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}) \quad (\text{Eq. II.1})$$

où  $\Phi$  est le débit de fluence neutron soumis au système dosimétrique. Notons que dans le cas de dosimétrie individuelle, un fantôme doit simuler l'albédo du corps humain à l'endroit du port du dosimètre. Cette technique n'a cependant pas été appliquée aux dosimètres à bulles de l'étude puisqu'ils devaient être caractérisés dans le cadre de la dosimétrie d'ambiance.

Pour une utilisation avec des neutrons monocinétiques à l'énergie  $E$ , le facteur de conversion  $C(E)$  s'applique naturellement. En revanche, dans le cas d'expositions de radimètres ou dosimètres à des sources quelconques, il convient de convoluer  $C(E)$  par le spectre en énergie  $\rho(E)$  caractéristique de ces sources :

$$C_s = \frac{\int C(E) \rho(E) dE}{\int \rho(E) dE} \quad \text{avec} \quad \rho(E) = \frac{dN}{dE}$$

Le tableau II.1 donne les valeurs adoptées pour les différentes sources utilisées dans cette étude. En CIPR21, les facteurs de conversion sont définis par la norme ISO8529 de décembre 1989 [8] pour l'*AmBe* et le  $^{252}\text{Cf}$  tandis que la CEI 1322 [9] fournit ceux pour la CIPR60. Dans le cas de la source de *PuBe* proche de l'*AmBe* en distribution en énergie (spectre dur ( $\alpha, n$ )), l'évaluation utilisée est celle proposée par le CECadarache (CEA/IPSN) en CIPR21. Une simple proportionnalité avec l'*AmBe* permet de déterminer le facteur de conversion correspondant en CIPR60.

<i>Source</i>	$^{252}\text{Cf}$	<i>AmBe</i>	<i>PuBe</i>
<i>CIPR21</i> ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )/( $\text{n.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ )	1,224	1,368	1,375
<i>CIPR60</i> ( $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ )/( $\text{n.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ )	1,386	1,408	1,415

**Tableau II.1 :** Facteurs de conversion relatifs aux sources  $^{252}\text{Cf}$ , *AmBe* et *PuBe* utilisées sur l'ensemble de l'étude.

La figure II.2 montre l'influence du choix de la CIPR sur l'efficacité biologique des neutrons. En convoluant la distribution en énergie d'une source par le facteur de conversion, on obtient la distribution en DED à associer à cette source :

$$H_{\text{réel } s} = \int C(E) \rho(E) dE \quad \text{avec} \quad \rho(E) = \frac{dN}{dE}$$

Les neutrons de basse énergie (<50 keV) sont biologiquement peu « efficaces », ce qui offre quelque « tolérance » quant à la nécessité de savoir les détecter : des seuils d'énergie comparable seront donc satisfaisants pour les détecteurs opérationnels.



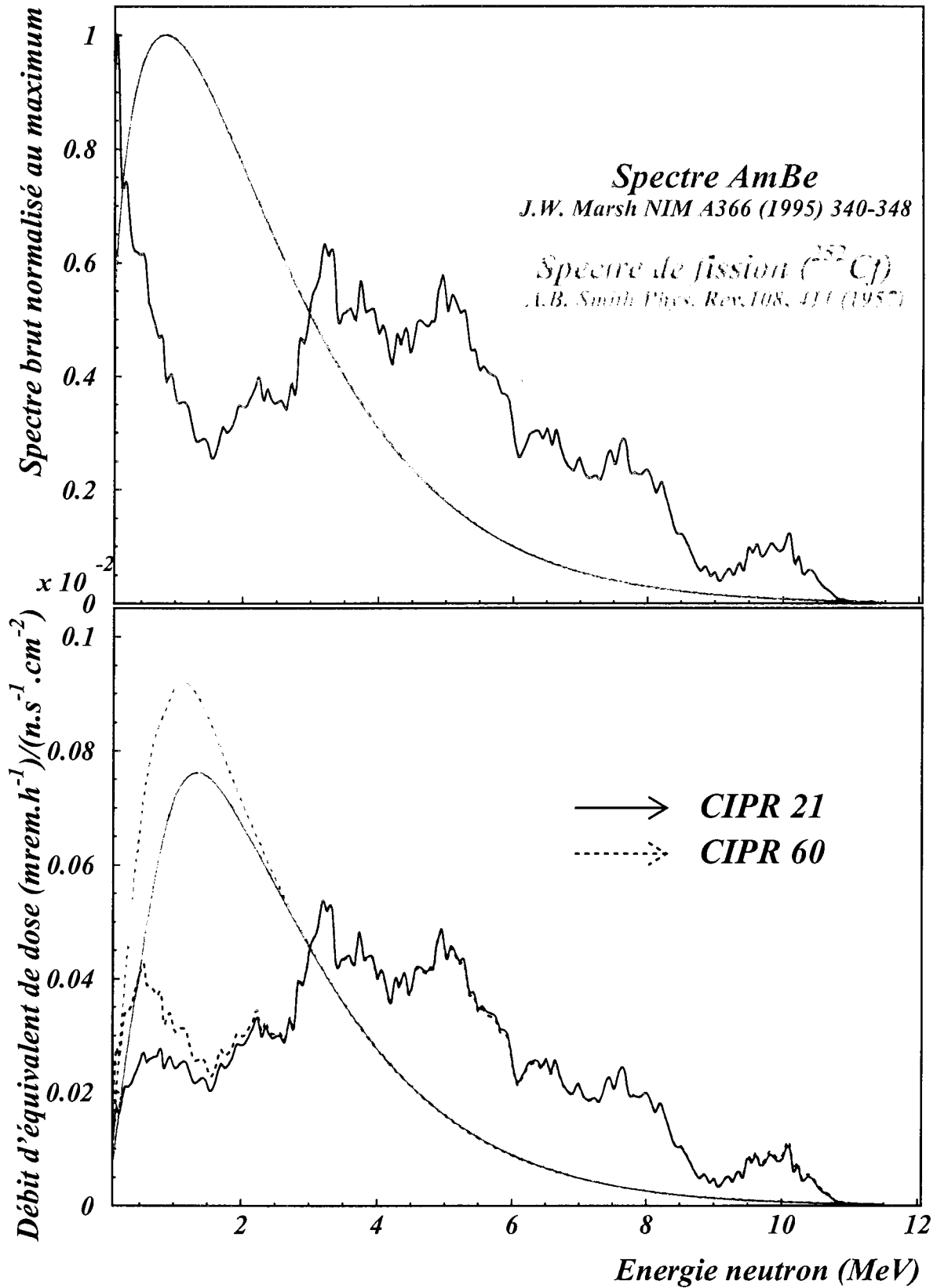


Figure II.2 : Distributions  $\rho(E)$  du  $^{252}\text{Cf}$  et de l'AmBe (en haut). Comparaison des débits d'équivalent de dose normalisés à un neutron par unité de temps et de surface pour chacune des deux CIPR (en bas).

### 3 / Procédures expérimentales et d'analyse.

#### A – Cadre général.

Si la référence [1] donne un panorama relativement complet des approches expérimentales relatives aux campagnes de mesures des semaines 18, 19, 24 et 40<sup>1</sup> à Valduc sur sources étalons et des semaines 19 et 22 sur l'accélérateur 4MV de Bruyères, il convient de préciser les améliorations (correction de mesures) apportées au cours des semaines 36 et 37 en neutrons monocinétiques. Bien qu'elles n'aient été développées qu'auprès de l'accélérateur, elles ont des conséquences sur les deux types de dispositifs expérimentaux. Les corrections apportées s'avérant non négligeables, l'ensemble des mesures a été ré-analysé avec cette méthode.

Il s'agit essentiellement de prendre en compte l'effet de l'environnement lors des mesures, et en particulier d'évaluer la contribution  $H_{diffusés}$  des neutrons ré-émis par le sol en béton. Elle est à soustraire du DED  $H_{lu}$  déduit des relevés sur les différents radiamètres ou dosimètres. De plus, en l'absence de source, certains appareils peuvent générer des bruits de fond  $H_{BDF}$  associés généralement à leur électronique et qui doivent également être pris en considération. Par conséquent, le DED  $H_{corrigé}$  mesuré par les différents systèmes dosimétriques qui est à comparer à  $H_{réel}$  défini par l'équation II.1, s'écrit :

$$H_{corrigé} = H_{lu} - H_{diffusés} - H_{BDF} \quad (Eq. II.2)$$

Le problème se résume donc simplement à évaluer  $H_{diffusés}$ . La méthode utilisée est la technique dite de « barre d'ombre », qui consiste à masquer le flux de neutrons directs pour ne prendre en compte que ceux renvoyés par le sol (Figure II.3).

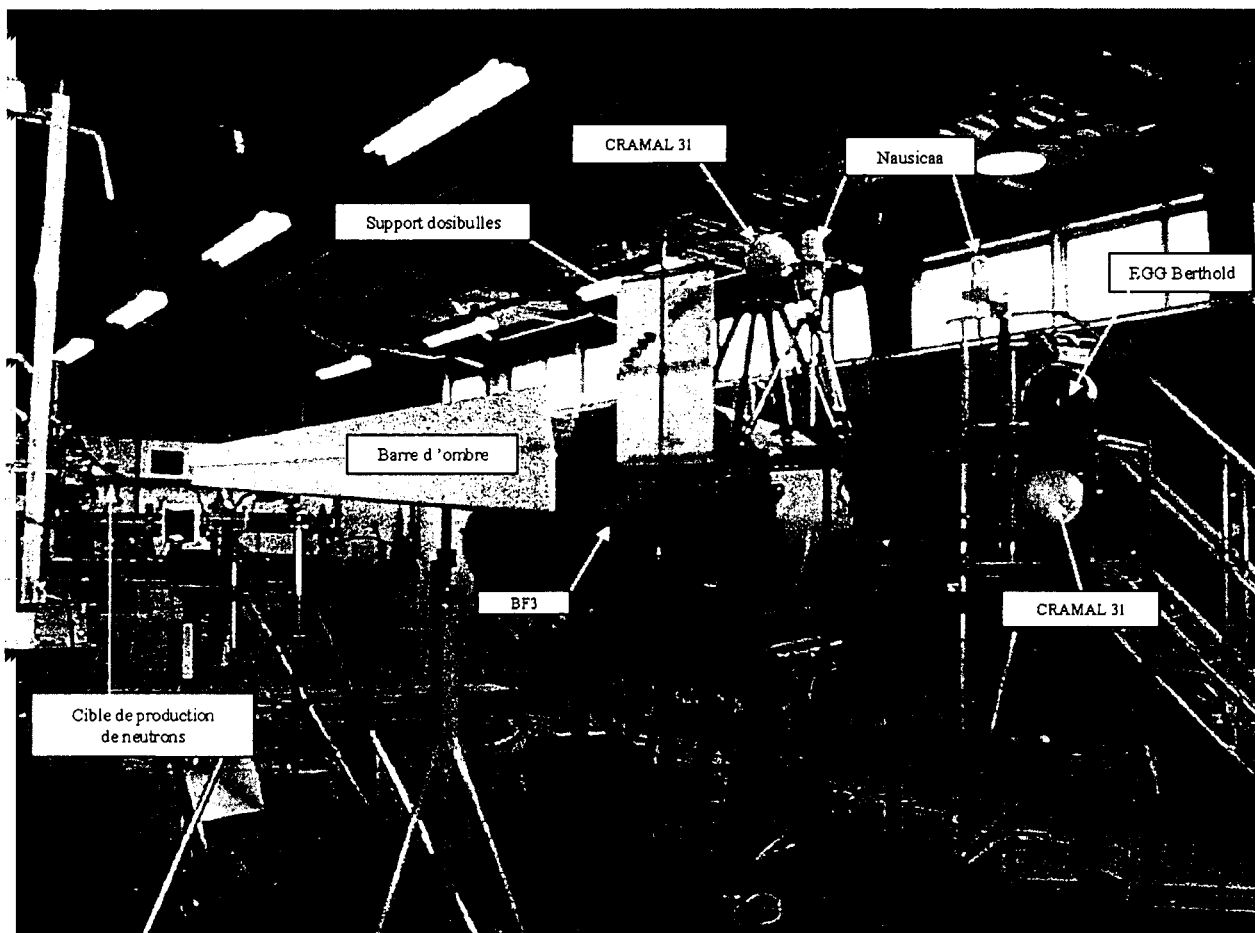
Le Groupe de Travail de Normalisation N°1 (GTN1), qui s'occupe de la dosimétrie des rayonnements ionisants, propose un protocole à ce sujet et en particulier, il définit la géométrie et les matériaux du cône d'ombre (20 cm de fer suivis de 50 cm de polyéthylène ou de paraffine borée). Après avoir obtenu l'assurance du code de calcul MCNP quant au pouvoir d'arrêt du bloc de 90 cm de polyéthylène du DPTA sur des neutrons monocinétiques de 15 MeV (les plus pénalisants), la méthode a été appliquée aux points d'énergie 144, 250, 565 et 700 keV ainsi qu'à 6 et 15,4 MeV.

Par ailleurs, la figure II.3 montre que seuls un radiamètre Cramal 31 (2) et le rem mètre de type EGG-Berthold pouvaient être masqués de la cible par la barre d'ombre. Ainsi, le fait d'avoir restreint à sept énergies et deux types d'appareils l'application de la technique de cône d'ombre retire le caractère universel de la correction de neutrons diffusés.

La technique de cône d'ombre n'étant pas réalisable à toutes les énergies et pour tous les appareils, la contribution  $H_{diffusés}$  a été évaluée par simulations numériques avec le code MCNP. L'annexe 1 donne le détail des géométries et des sources simulées, tandis que l'annexe 2 montre comment les calculs peuvent être normalisés à l'expérience par une méthode itérative. En effet, les neutrons diffusés ayant perdu le caractère monocinétique de ceux du faisceau d'origine, ne sont pas détectés avec la même efficacité par les appareils. La correction dépend donc, non seulement du taux de neutrons diffusés, mais aussi de la réponse en énergie des débitmètres ou dosimètres. Par conséquent, le problème ne peut trouver de solution que via une procédure itérative.

---

<sup>1</sup> Les dates réfèrent, dans tout le document, à des expériences effectuées en 1998.



*Figure II.3 : Dispositif expérimental adopté lors des semaines 36 et 37 sur l'accélérateur 4MV de Bruyères-le-Châtel. Les radiamètres sont sur la couronne à 20 degrés comme lors des semaines 19 et 22 mais la distance à la cible passe de 1,50 à 3,00 m. Le détecteur au BF<sub>3</sub> placé sur la même couronne sert de référence comme précédemment.*

La comparaison des résultats expérimentaux et des calculs (figure II.4) qualifie la méthode sur la gamme  $144 \text{ keV} < E < 15 \text{ MeV}$  ainsi que pour une source d'*AmBe* placée au point cible. La convolution de la réponse en énergie du détecteur BF<sub>3</sub> [15] par le spectre de la source confirme le bon accord du détecteur étalon avec le certificat d'étalonnage de la source délivré par le LMRI. Seuls les points issus du même type de réaction peuvent justifier du caractère continu qui est matérialisé sur la figure par des lignes.

L'altitude des deux détecteurs de la figure II.4 est quasiment la même. Ceci implique que le taux de neutrons diffusés est pratiquement identique. Les différences enregistrées au niveau de la correction de DED s'expliquent donc par la sensibilité plus grande du compteur Cramal aux neutrons de basse énergie devant celle du radiamètre Lb6411.

La reproduction de l'expérience par la simulation étant désormais prouvée, la contribution des neutrons diffusés peut être calculée pour toutes les énergies de l'étude ainsi que pour les spectres complexes d'*AmBe* ou de <sup>252</sup>Cf. Comme le montre la figure II.4, les erreurs induites par la correction sont au maximum de 5% de la valeur du DED réellement appliqué.

Comparaison du taux de DED de neutrons diffusés évalué par calcul et de façon expérimentale

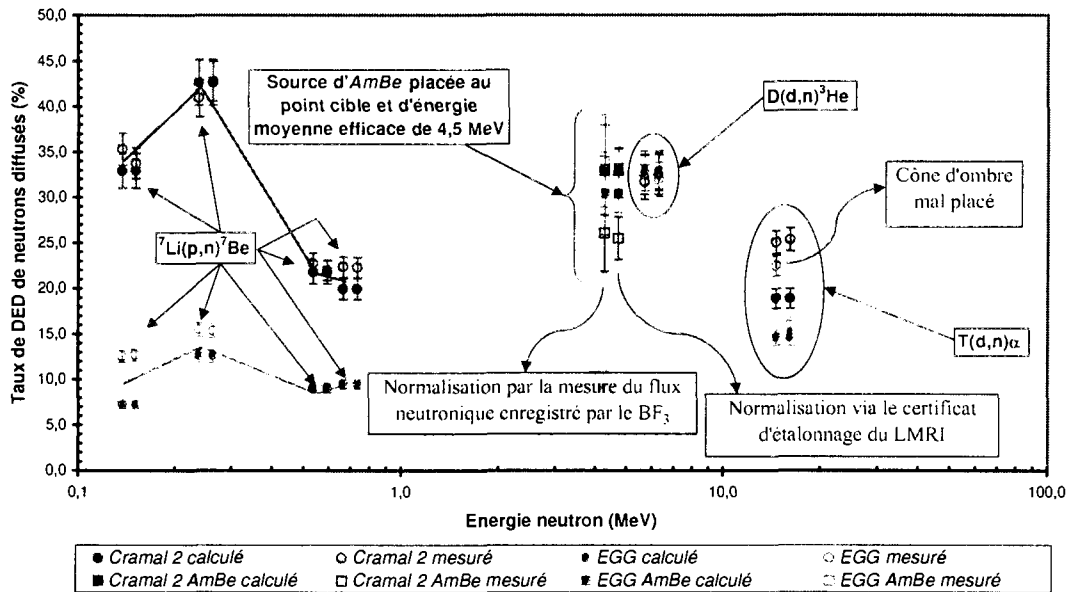


Figure II.4 : Qualification des simulations MCNP au moyen de mesures expérimentales avec le cône d'ombre sur sept points en énergie et deux types d'appareils.

## B – Mode opératoire.

Les différents programmes de mesures ont été décrits dans les rapports [10,11,12] mais il convient ici d'en rappeler les grandes lignes afin d'explicitier les incertitudes à leur associer.

### a / Les mesures sur sources (semaines 18, 19, 24 et 40).

Elles ont permis la caractérisation globale avec deux types de sources ( $\text{PuBe}$  et  ${}^{252}\text{Cf}$ ) de quatre types d'appareils de dosimétrie :

- 40 dosimètres à bulles BD-PND
- 1 compteur Cramal 21 (ancienne génération cf. ref. [1])
- 2 rem mètres de type Cramal 31 (modifiés ou non [13])
- 2 micro-dosimètres Nausicaa

De trois à six DED différents ont été étudiés mais nous ne retiendrons pour ce rapport que trois grandes classes : autour de 5, 50 et 100  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ . Le débit de fluence neutron à utiliser dans l'équation II.1, est donné par :

$$\Phi (\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}) = I (\text{n}\cdot\text{s}^{-1}) / [4\pi d^2(\text{cm}^2\cdot\text{sr})] \quad (\text{Eq. II.3})$$

où  $I$  est l'activité sous  $4\pi$  de la source (l'incertitude relative  $\sigma_I / I$  donnée par le LMRI est égale à 5% pour chacune des deux sources). L'incertitude absolue sur la distance  $d$  à la source, qui permet

de faire varier le DED appliqué, est de l'ordre de 0,5 cm. Le tableau II.2 met en évidence la différence de DED obtenue en fonction de la CIPR à distance fixée. Les sources d'*AmBe* et de  $^{252}\text{Cf}$  de Bruyères sont également mentionnées. Elles ont permis, soit une étude systématique sur les dosimètres à bulles et sur l'un des micro-dosimètres Nausicaa à un mètre, soit la qualification des calculs de neutrons diffusés présentés dans la figure II.4. Pour le Californium, dont la période est relativement courte, l'intensité relative à chaque date de mesure a été recalculée.

<i>Source</i>	<i>PuBe</i> Valduc	<i>AmBe</i> Bruyères	$^{252}\text{Cf}$ Valduc	$^{252}\text{Cf}$ Bruyères
<i>Origine des neutrons</i>	réaction ( $\alpha, n$ )		fission spontanée	
<i>Période (ans)</i>	2,41.10 <sup>4</sup>	432	2,646	
<i>Energie moyenne (MeV)</i>	4,5	4,4	2,5	
<i>Intensité (n.s<sup>-1</sup> dans 4<math>\pi</math>) (certification LMRI)</i>	9,59.10 <sup>5</sup> Du 05/98 au 09/98	4,28.10 <sup>5</sup> Le 18/05/98	6,36.10 <sup>5</sup> Le 01/10/98	8,45.10 <sup>5</sup> Le 07/08/98
<i>DED<sub>CIPR21</sub>(<math>\mu\text{Sv.h}^{-1}</math>) à 1m</i>	10,5	4,66	6,19	8,23
<i>DED<sub>CIPR60</sub>(<math>\mu\text{Sv.h}^{-1}</math>) à 1m</i>	10,8	4,82	7,01	9,32

*Tableau II.2 : Caractéristiques des sources PuBe et  $^{252}\text{Cf}$  utilisées à Valduc les semaines 18, 19, 24 et 40, ainsi que des sources AmBe et  $^{252}\text{Cf}$  utilisées à Bruyères-le-Châtel les semaines 21, 32 et 37.*

*b / Mesures sur l'accélérateur 4MV de Bruyères (semaines 19, 22, 36 et 37).*

Ces mesures ont permis d'obtenir, sur quinze points en énergie, la courbe de réponse des différents dosimètres ou radiamètres définis précédemment. Deux débitmètres de type Nausicaa et EGG-Berthold Lb6411 ont été également étudiés. Les neutrons sont produits par quatre réactions suivant l'énergie souhaitée :

- $45 < E_{\text{neutron}} \text{ (keV)} < 700$  :  ${}^7\text{Li} (p, n) {}^7\text{Be}$
- $0,9 < E_{\text{neutron}} \text{ (MeV)} < 3$  :  $\text{T} (p, n) {}^3\text{He}$
- $4 < E_{\text{neutron}} \text{ (MeV)} < 6$  :  $\text{D} (d, n) {}^3\text{He}$
- $E_{\text{neutron}} \text{ (MeV)} = 15,4$  :  $\text{T} (d, n) \alpha$

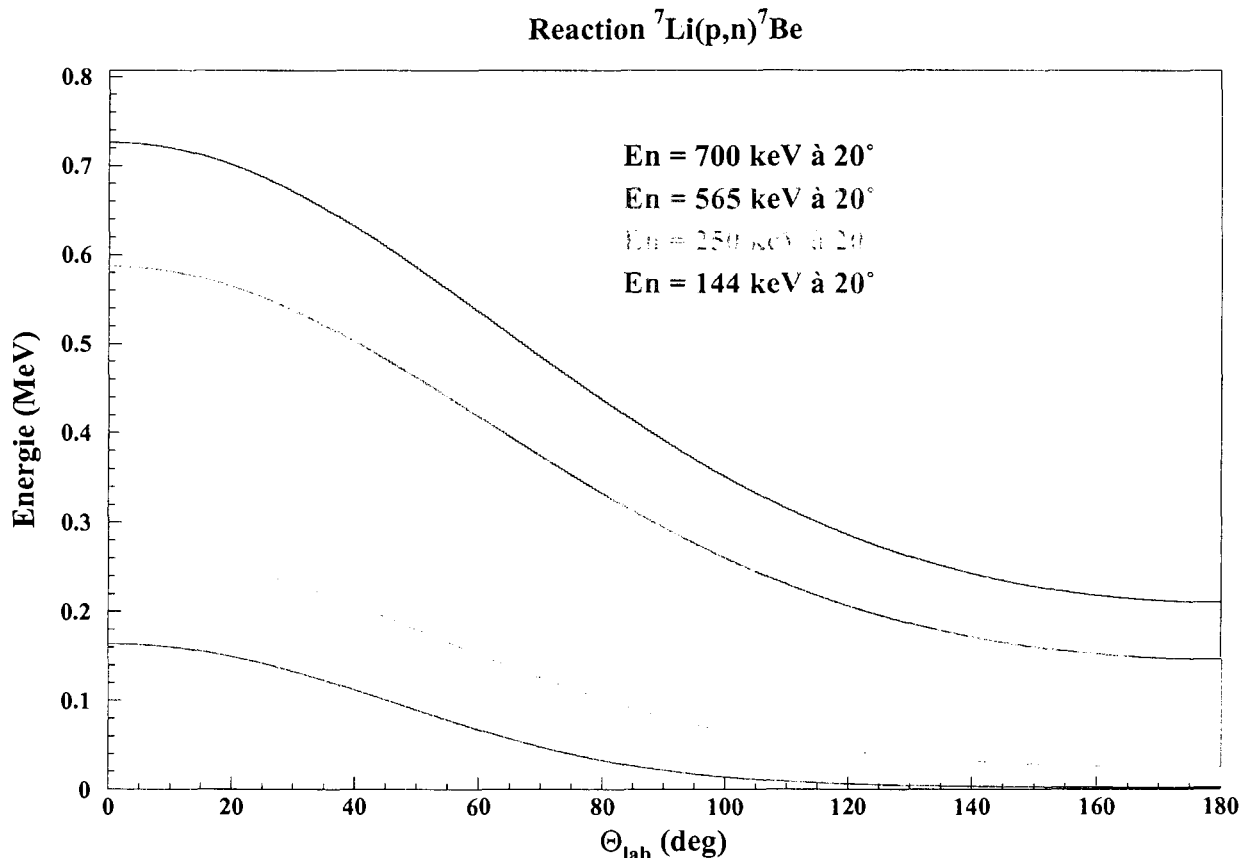
Si l'on tient à ne pas dégrader les spectres d'émission en énergie (faisceau monocinétique au pour cent près), ce qui est nécessaire pour construire une courbe de réponse, il faut accepter la rupture de continuité physique entre 6 et 15,4 MeV.

D'un point de vue expérimental, il convient de séparer la zone d'étude en trois classes justifiées par des systématiques d'analyse différentes.

Dans la majorité des cas ( $144 \text{ keV} < E_{\text{neutron}} < 6 \text{ MeV}$ ), la référence absolue des mesures est donnée par le détecteur étalon de  $\text{BF}_3$  placé à un angle de 20 degrés par rapport à l'axe du faisceau. Compte tenu de la symétrie axiale de la section efficace de production des neutrons, les détecteurs à analyser, situés sur une même couronne à 20 degrés, voient en principe le même flux, ce qui permet une normalisation simple du DED.

A 15,4 MeV, le compteur de BF<sub>3</sub> est remplacé par un scintillateur NE213, plus efficace à cette énergie. Ce détecteur, placé à hauteur du faisceau et à deux mètres de la cible, se caractérise par un seuil à 4 MeV et n'est pas protégé du rayonnement diffusé. Les calculs ont confirmé l'évaluation expérimentale (2 mesures de cône d'ombre) du taux de neutrons diffusés par le sol, de 4,7% du flux direct. Par défaut de blindage et à l'instar des détecteurs de l'étude, on prend en compte les diffusions élastiques aussi bien que l'absorption sur l'épaisseur d'air traversée (seule l'absorption est corrigée pour le BF<sub>3</sub>). Ce dernier effet reste inférieur au ‰ à 3 m.

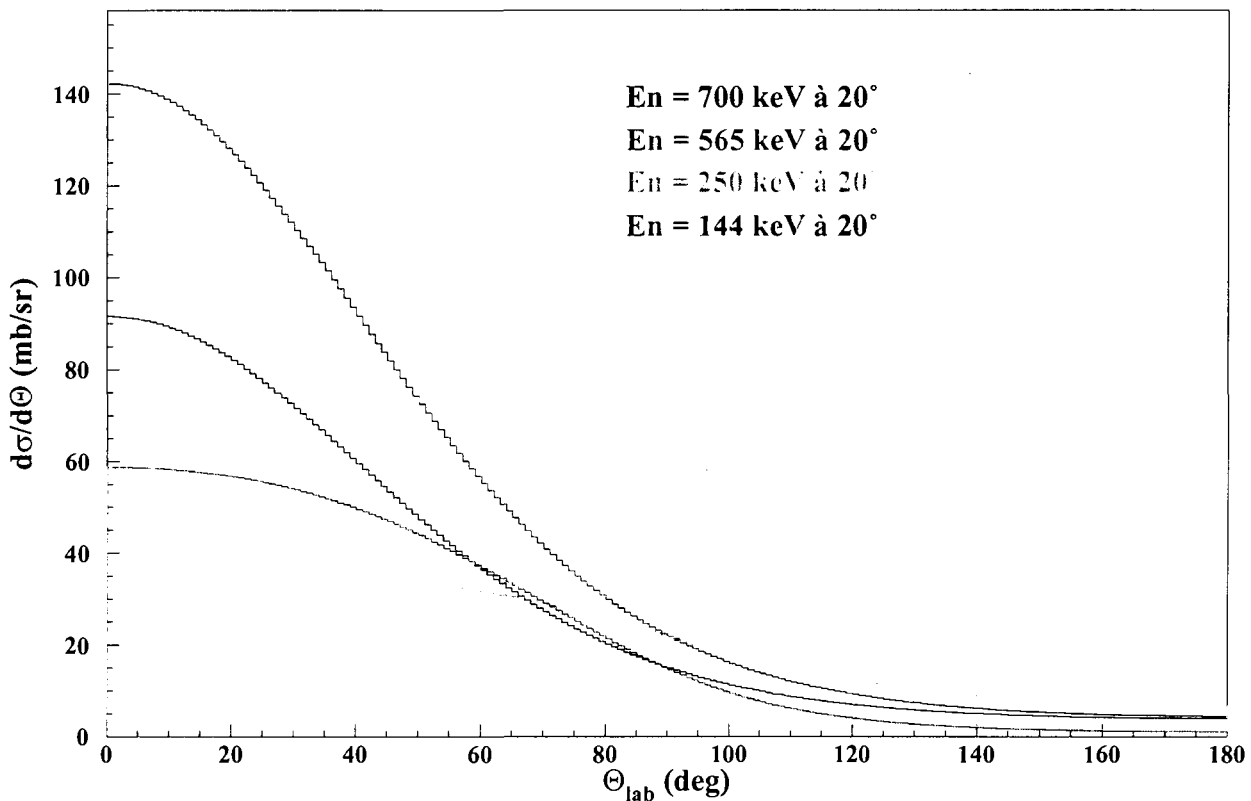
Etant donné le seuil de réaction (120 keV neutron à 20 degrés) en p-Li, des énergies plus faibles ne peuvent être atteintes qu'en plaçant les appareils à un angle supérieur. La figure II.5 montre qu'il est possible d'atteindre des énergies neutrons de 45 keV à 60 degrés et 87 keV à 40 degrés. La référence est alors donnée par le compteur de BF<sub>3</sub> à 20 degrés et la connaissance de la distribution en section efficace de production permet de normaliser le flux (Figure II.6).



**Figure II.5 :** Distribution en énergie des neutrons en fonction de l'angle d'émission pour une valeur fixée en p-Li à 20 degrés.

Cette variation de l'énergie d'émission peut induire des incertitudes sur le caractère monocinétique des neutrons vus par les détecteurs. En effet, dans le cas des appareils les plus volumineux (Cramal ou EGG Lb6411), l'angle solide sous lequel ils voient la cible peut être suffisamment important pour donner lieu à des variations significatives de l'énergie des neutrons. Ainsi, la distance détecteur-source est choisie comme un compromis entre cet effet, la minimisation du taux de neutrons diffusés par le sol et la conservation d'un débit de fluence raisonnable.

### Reaction ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$



**Figure II.6 :** Variations de la section efficace de production des neutrons pour la réaction p-Li à 4 énergies de faisceau.

Notons que si la section efficace de production varie, elle aussi, avec l'angle  $\theta$ , elle n'engendre pas d'incertitude sur le flux : les neutrons « perdus » aux plus grands angles sont « récupérés » aux plus petits dans le cadre d'une approximation linéaire toujours justifiée sur un faible  $\Delta\theta$  :  $d\sigma/d\theta(\theta) = [d\sigma/d\theta(\theta - \Delta\theta) + d\sigma/d\theta(\theta + \Delta\theta)] / 2$ .

Il faut également relever la singularité de la production de neutrons à 6 MeV. Dans le rapport [1], l'hypothèse avait été émise que l'ouverture de voies de réactions sur le carbone pouvait expliquer la sur-réponse générale des détecteurs à cette énergie. L'étude menée sur les neutrons diffusés a conduit à une estimation par technique de cône d'ombre sur les appareils Cramal 2 et EGG Lb6411, d'un bruit de fond 3,5 fois supérieur aux calculs. Dans la figure II.4, les calculs ont été normalisés par ce facteur. Ce même coefficient a été affecté aux calculs sur tous les détecteurs à 6 MeV pour universaliser l'effet. On explique ce phénomène par la cassure du deuton soit sur un diaphragme soit sur un élément constitutif de la ligne (Aluminium ou inox) de faisceau dont le seuil serait de toutes façons supérieur à 5 MeV. Il faut, donc, garder une réserve sur les neutrons produits, dont le caractère monocinétique n'est alors assuré que pour 70% d'entre eux.

Pour terminer le descriptif des mesures sur accélérateur, précisons que les résultats des détecteurs de référence sont corrigés d'un bruit de fond ambiant évalué plusieurs fois sur une dizaine d'heures et dont l'incertitude est une convolution de l'incertitude statistique et de la dispersion des différentes évaluations. Cette correction est stable à quelque 30% près mais reste inférieure à 5 % du nombre de neutrons intégrés. L'origine des incertitudes sur les détecteurs de référence tient principalement dans la connaissance du débit de fluence de la source d'*AmBe* (3%)

qui a servi à les étalonner. La fiabilité des distributions en section efficace de production de neutrons aux différentes énergies augmente quelque peu l'incertitude sur  $H_{réel}$  qui reste cependant inférieure à 5%.

*c / Procédure de calcul des incertitudes*

Les conclusions du rapport [1] ont mis en évidence la nécessité de suivre des procédures expérimentales strictes. Ainsi le temps d'exposition a été défini supérieur à 15 min afin de conserver une incertitude statistique tolérable même aux plus faibles DED. Pour chaque énergie ou chaque source, trois mesures ont été effectuées pour chaque débit d'équivalent de dose. Pour les points sur l'accélérateur où la démarche a été entreprise, les mesures avec cône d'ombre ont également été reproduites de façon systématique. L'écart observé à 15,4 MeV entre les deux mesures sur le rem-mètre EGG Lb6411 (figure II.4), tient au fait que pour l'une d'entre elle, la barre ne masquait pas complètement le détecteur. Nous l'avons laissé à titre d'exemple de cas extrême d'erreur possible en mesure.

La réponse  $\varepsilon(E)$  d'un appareil à une énergie  $E$  donnée, s'exprime par définition en fonction de la référence  $H_{réel}$  donnée, soit par une source du LMRI, soit par le nombre de neutrons comptés par les détecteurs de référence de BF<sub>3</sub> ou de NE213 :

$$\varepsilon(E) = \frac{H_{corrigé}(E)}{H_{réel}(E)} \quad \text{avec} \quad \frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\sigma(H_{corrigé})}{H_{corrigé}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(H_{réel})}{H_{réel}}\right)^2}$$

En principe, pour  $n = 3$  mesures  $R_i$  de la même observable  $R = \varepsilon(E)$ , pour lesquelles on sait calculer l'incertitude  $\sigma_i = \sigma(\varepsilon)$  à leur associer, la meilleure évaluation de la valeur moyenne est donnée par :

$$\bar{R} = \frac{1}{w} \sum_i^n w_i R_i \quad \text{avec} \quad \sigma^2(R) = \frac{1}{w} = \left[ \sum_i^n w_i \right]^{-1} \quad \text{et} \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (\text{Eq. II.4})$$

L'objectif consiste à évaluer correctement les incertitudes  $\sigma_i$ . Or, les constructeurs de matériels dosimétriques ne fournissent pas concrètement d'incertitude intrinsèque de leurs appareils et celles-ci peuvent s'avérer importantes voire prépondérantes aux vus de celles dépendant de la géométrie, de la statistique ou des références (détecteurs étalons ou sources) de l'expérience. Comme  $n$  n'est pas très grand, une simple moyenne affectée d'un écart type considérant une distribution gaussienne des mesures, n'est pas suffisante. Par conséquent, nous avons systématiquement calculé une moyenne pondérée comme dans la série d'équations II.4, en considérant que d'un point de vue relatif les poids  $w_i$  avaient un sens pour un appareil donné. L'écart type associé à cette moyenne peut alors s'écrire comme le maximum de  $\sigma(R)$  et de  $\sigma'(R)$  où :

$$\sigma'(R) = \text{MAX}(\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, |\bar{R} - R_i| / \sqrt{3})$$

Ceci correspond à une distribution carrée de l'observable sur les  $n$  points de mesures.



Lors des campagnes de mesure en neutrons monocinétiques (semaines 36 et 37), chaque énergie a été décrite par huit mesures :

- 3 à faible DED ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ) de l'ordre de 15 min avec tous les radiamètres,
- 2 dans les mêmes conditions mais à DED  $>20 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ,
- 1 autre à haut débit mais plus longue (de l'ordre de l'heure) pour répondre à la statistique requise par les dosimètres à bulles,
- 2 avec le cône d'ombre pour lesquelles les hauts débits sont préférables et où seuls un des deux radiamètres Cramal ainsi que le rem mètre EGG sont analysés.

La durée des mesures sur sources étalons est systématiquement de 15 min, exception faite des enregistrements de bruits de fond, pour lesquels elle se chiffre en heures pour respecter une certaine cohérence statistique.

Enfin, les variations inhérentes aux changements de température du local non climatisé ne sont jamais corrigées. Un suivi en ligne de la température fait état d'une plage de travail entre 19 et 26°C. La dépendance de la réponse des appareils Cramal ou EGG-Berthold dans cette gamme est inexistante d'un point de vue conceptuel, ce qui n'est pas le cas du compteur à gaz Nausicaa. L'étude du CTHIR [13] sur les dosimètres à bulle affiche quant à elle une très faible dépendance de la réponse des BD100R dans cette zone ( $< \pm 5\%$ ).

### III – Résultats expérimentaux.

#### 1 / Mesures sur l'accélérateur 4MV de Bruyères-le-Châtel.

##### A – Fonction de réponse des micro-dosimètres Nausicaa.

###### a / Principe et préliminaires.

Une description plus complète de ces radiamètres est donnée dans la référence [1]. Rappelons que cet appareil a été développé par l'IPSN et que ses phases d'industrialisation et d'exploitation ont été poursuivies par la société STEEL. Son concept est basé sur l'évaluation de la dose déposée dans un matériau équivalent tissu et l'observable (à convertir en DED) est le Transfert Linéique d'Energie TLE [ $\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ]. Ce passage s'effectue via la détermination, sur chaque spectre mesuré, du facteur de qualité  $Q[\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}]$ . Cet appareil est conçu pour travailler en champs mixtes pour lesquels la séparation entre les  $\gamma$  et les neutrons est obtenue par un seuil réglable en TLE. Les résultats pour une même mesure sont donnés soit en CIPR21 soit en CIPR60. Le détecteur subit un contrôle périodique (à la mise sous tension et à la demande) avec une source de  $^{244}\text{Cm}$  intégrée.

Trois appareils Nausicaa ont été étudiés, afin de rejeter toute singularité de fonctionnement entre les différentes séries de production. Ainsi, un problème de fuite a été détecté sur le radiamètre du DPTA entraînant une forte sous-estimation du DED. Les deux micro-dosimètres restant ont été étiquetés Nausicaa ETCA et Nausicaa Valduc de part leur origine. L'indice 21 ou 60 est ajouté pour référer à la CIPR d'affichage du DED. Un étalonnage préalable par un laboratoire accrédité COFRAC, à haut débit et sur spectre ISO  $AmBe$  certifie le point de comparaison.

Nous donnons, dans le tableau III.1, le bilan des mesures de débits d'équivalent de dose de bruit de fond obtenus pour chacun des deux radiamètres restants et dans chacune des deux recommandations. Quatre nuits de mesures sont ici synthétisées. Il ressort que les débitmètres Nausicaa présentent un bruit de fond électronique important : il représente une correction de l'ordre de 25 % sur les mesures à  $5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ . L'évaluation de ce bruit est donc un préalable nécessaire à toute mesure sur site. Le manque de reproductibilité de ce bruit est probablement lié à une électronique trop sensible aux phénomènes électromagnétiques ambiants (démarrage de pompe par exemple). Cette dernière remarque est confirmée par l'observation de pics à haut TLE, injustifiés physiquement et qui apparaissent d'autant plus facilement que la durée d'exposition est importante. Ainsi, les 15 minutes d'exposition ne doivent pas être dépassées sous peine d'avoir à rejeter la mesure.

<i>Nausicaa</i>	<i>ETCA 21</i>	<i>ETCA 60</i>	<i>Valduc 21</i>	<i>Valduc 60</i>
$H_{BDF} (\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$	0,5	0,9	1,1	1,6
<i>Incertitude (%)</i>	40	20	15	10

*Tableau III.1 : Tableau de synthèse des bruits de fond électroniques mesurés pour les deux radiamètres dans chacune des CIPR.*

## *b / Résultats expérimentaux.*

Ils correspondent aux différentes campagnes de mesures mais pour lesquelles le relevé systématique et simultané des résultats dans chacune des deux CIPR n'était pas nécessairement mis en place. Certaines énergies sont manquantes car les appareils de provenances différentes n'étaient pas toujours disponibles. Par ordre croissant, il a été obtenu :

- 3 points pour le Nausicaa ETCA 60,
- 8 points pour le Nausicaa ETCA 21,
- 10 points pour le Nausicaa Valduc 60,
- 13 points pour le Nausicaa Valduc 21.

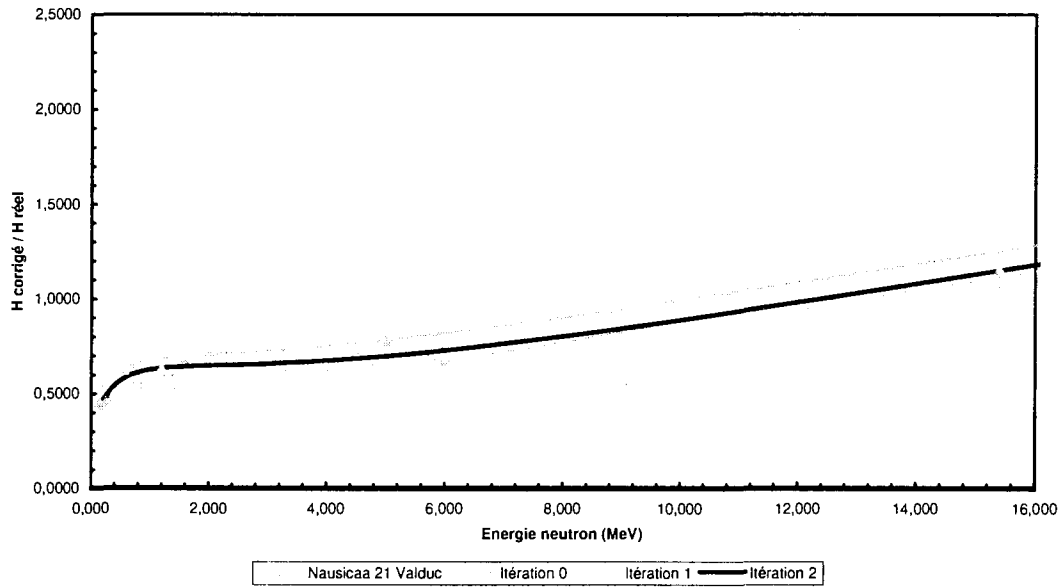
L'annexe 2 précise les itérations effectuées pour corriger de la contribution des neutrons diffusés :

- l'itération 0 correspond à la non prise en compte des neutrons diffusés,
- l'itération 1 est une correction au premier ordre,
- l'itération 2 (parfois notée « polynomial ») voit converger l'analyse.

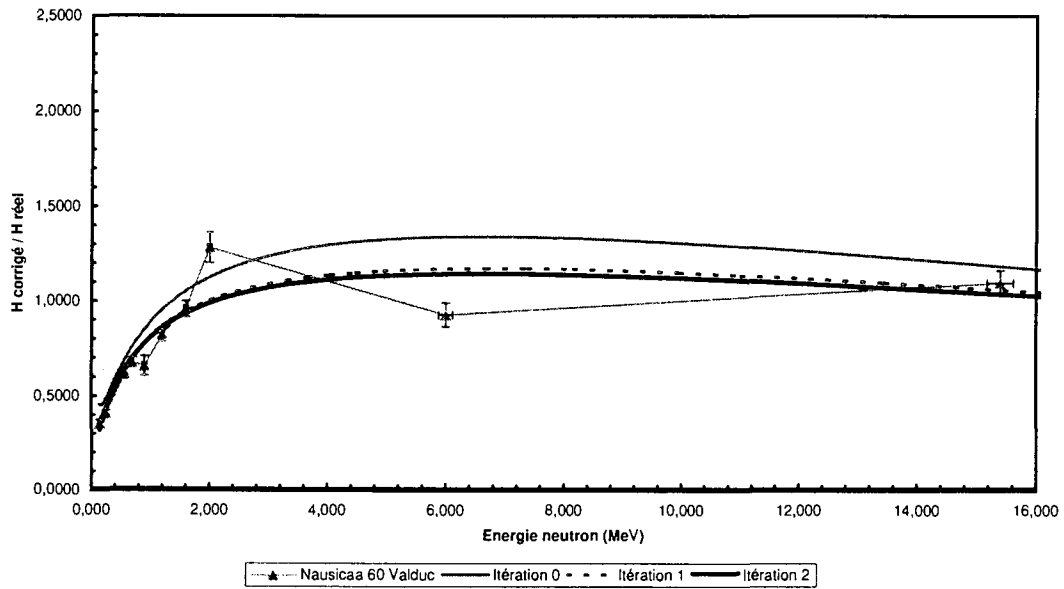
Elle définit également le « pseudo-facteur de conversion » associé à un appareil, c'est à dire la convolution du facteur donné par l'une ou l'autre des CIPR, avec la réponse du radiamètre étudié. Le paramétrage de cette valeur est nécessaire à l'itération d'ordre supérieur. Une représentation en est donnée dans l'annexe 3. Les résultats sont donnés figures III.1, III.2, III.3 et III.4. Ils appellent les commentaires suivants :

- en CIPR21, la fonction de réponse des micro-dosimètres Nausicaa étudiés pour les DED supérieurs à  $10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  présente une sous-estimation par rapport à la référence de l'ordre de 30 à 50% dans le domaine de quelques keV à 6 MeV.
- en CIPR60, la sous estimation n'est présente que dans le domaine de quelques keV à 2 MeV ; la réponse est correcte à 10% près pour les neutrons d'énergie supérieure.
- les réponses à bas et haut débits ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  et  $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ) présentent un assez bon accord. La reproductibilité à bas DED n'est toutefois assurée que de façon partielle et souligne le fait que trois mesures de 15 min sont au moins nécessaires à l'estimation du DED sur site [2].
- la correction de neutrons diffusés en fonction de l'énergie (différence entre les traits continus de couleur et en noir) est inférieure à 20% pour ces appareils qui étaient placés au sommet de la couronne à 20 degrés. Cette altitude de 2,80 m environ est en effet l'un des facteurs favorables à la diminution du taux de détection de neutrons ré-émis par le sol (cf figure A2.1).
- l'équation de la réponse des différents appareils Nausicaa en fonction de l'énergie des neutrons (paramétrée en  $x = Ln [ E (\text{MeV}) ]$ ) est donnée figures III.2, III.3 et III.4. Elle sera utilisée ci-après dans le cadre de la convolution de la réponse avec les spectres en énergie sur source complexe (cf chapitre II).
- l'artéfact relevé à 6 MeV d'énergie neutron pour le Nausicaa Valduc 60 est un miroir du point correspondant en CIPR21, qui par opposition s'inscrit dans la continuité de la courbe. Une variation exceptionnelle de la température du local, ne peut pas expliquer cet écart. C'est plus probablement une rupture de continuité dans la description du facteur de qualité de la CIPR60 qui est à l'origine de cette anomalie. Rappelons cependant qu'une remontée du facteur de conversion à 15,4 MeV doit apparaître en CIPR60.

*Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*

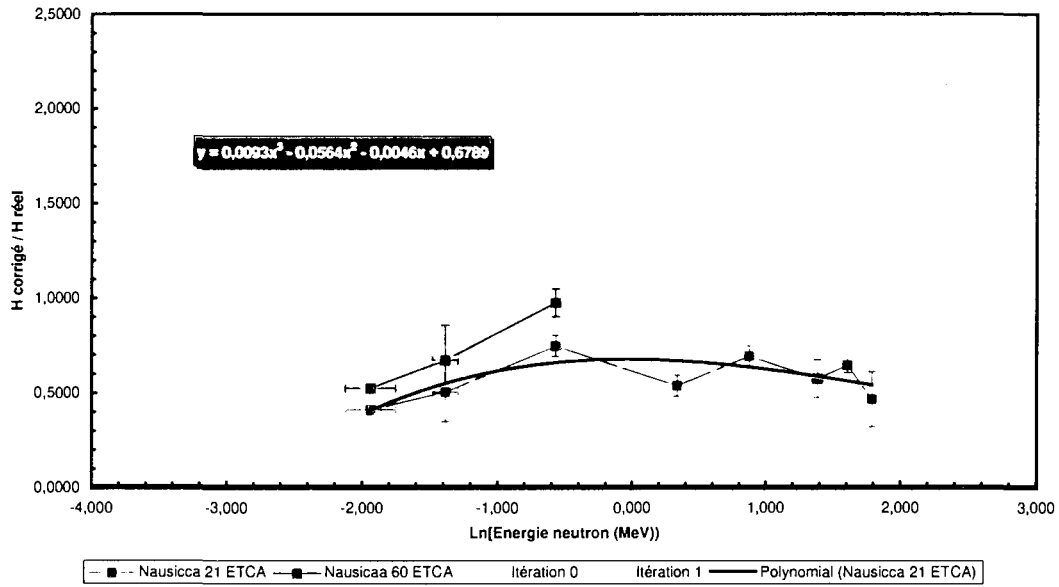


*Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*

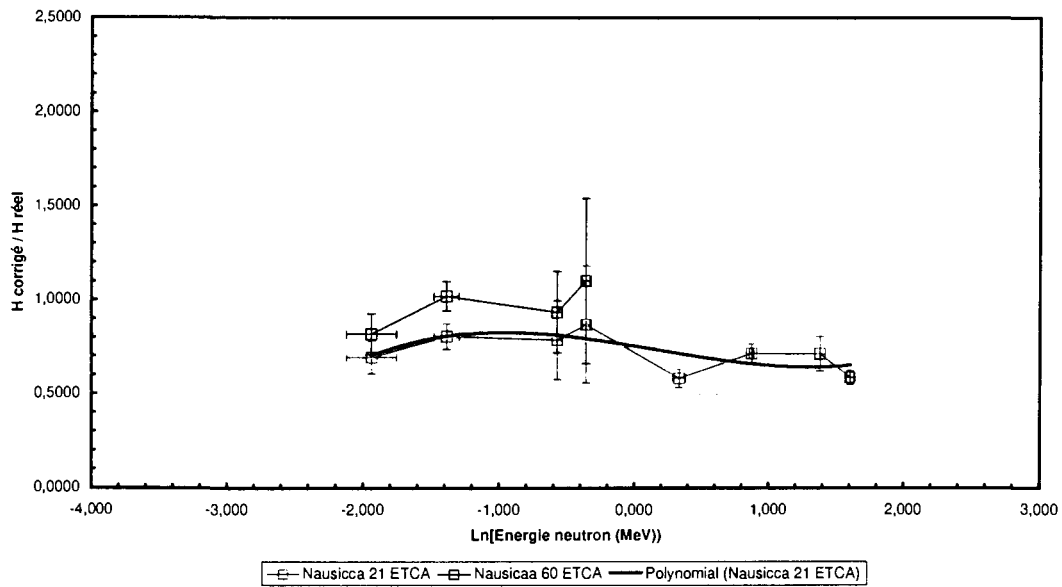


*Figure III.1 : Réponses du Nausicaa Valduc en fonction de la CIPR.*

*Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu \text{Sv.h}^{-1}$ )*

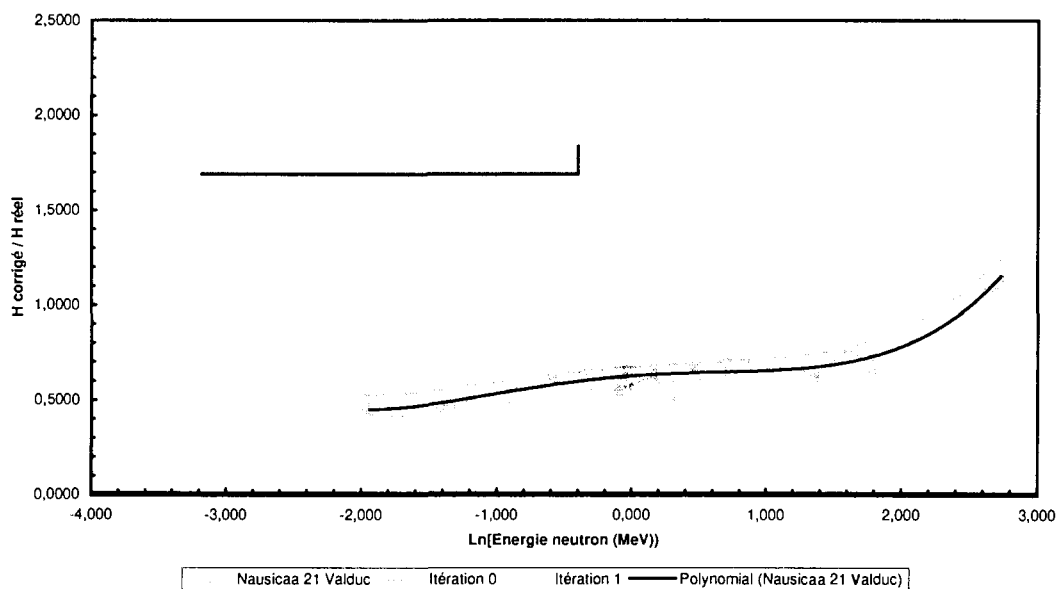


*Etude en fonction de l'énergie neutron à bas débit ( $<10 \mu \text{Sv.h}^{-1}$ )*

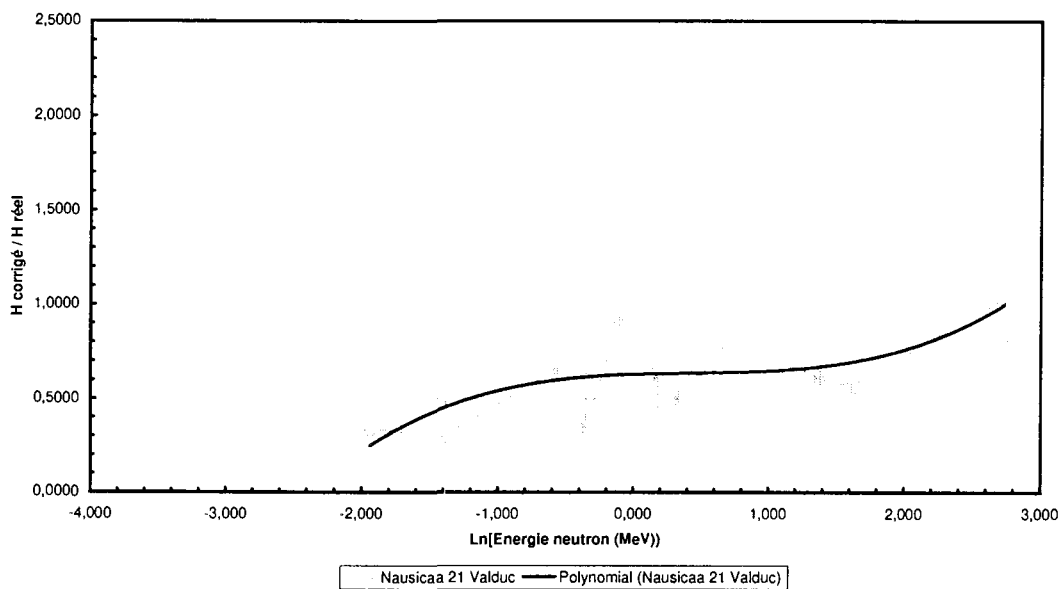


*Figure III.2 : Paramétrage de la réponse du Nausicca ETCA en fonction de l'énergie.*

*Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*

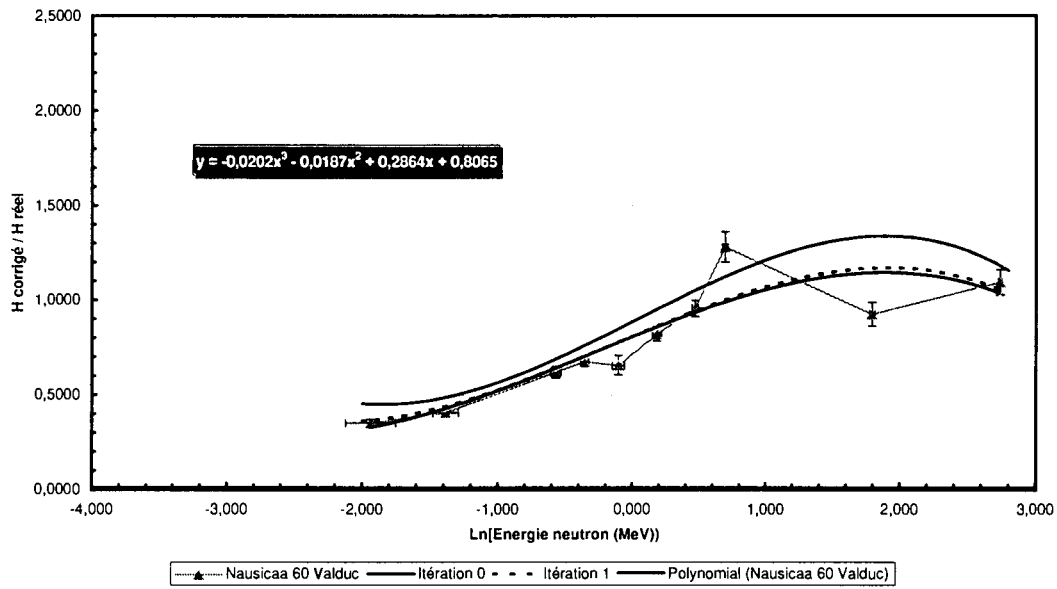


*Etude en fonction de l'énergie neutron à bas débit ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*



*Figure III.3 : Paramétrage de la réponse du Nausicaa Valduc 21 en fonction de l'énergie.*

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )



Etude en fonction de l'énergie neutron à bas débit ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

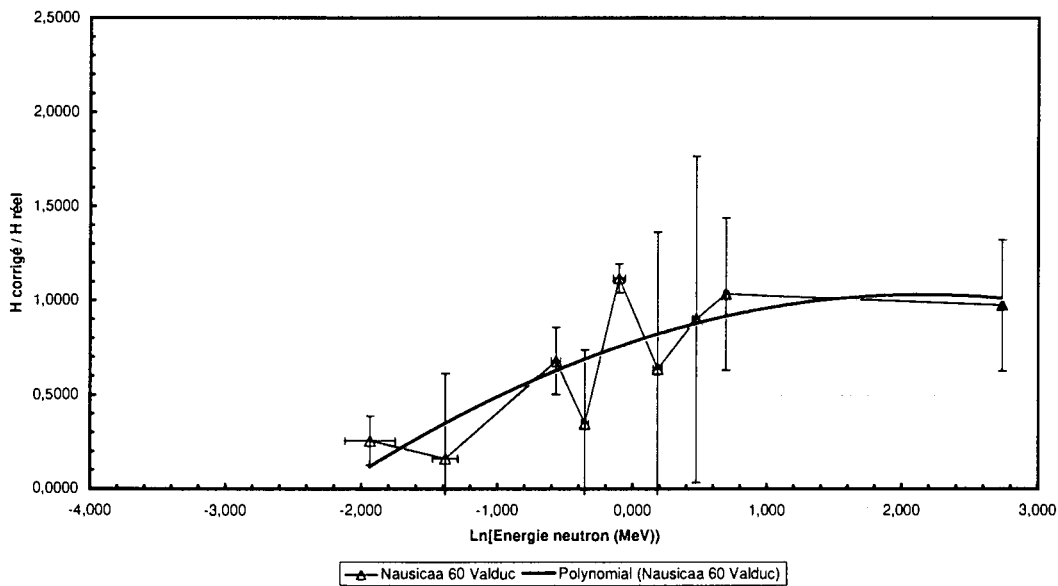


Figure III.4 : Paramétrage de la réponse du Nausicaa Valduc 60 en fonction de l'énergie.

## B – Fonction de réponse des radiamètres Cramal.

### a / Principe et préliminaires.

Ce sont des appareils dont le concept a été développé par le CEA et dont la commercialisation est assurée par Eurisys-Mesures. Ils fonctionnent selon un principe simple de quasi thermalisation des neutrons dans une boule de polyéthylène de diamètre 20 cm, pour être détectés via une particule chargée grâce à la réaction :  ${}^3\text{He} (n, p) \text{T}$ .

Deux modes de lecture sont disponibles sur ce radiamètre d'ambiance : soit en équivalent de dose intégrée, soit en débit d'équivalent de dose. C'est le premier mode qui est conseillé notamment pour des sources peu actives, afin de disposer d'un nombre suffisant d'impulsions pendant une durée d'irradiation d'au moins 15 min. Ces appareils sont conformes à l'ancienne recommandation et délivrent une réponse en CIPR21 uniquement.

Une approche préliminaire de ces appareils au cours des semaines 18, 19 et 24 à Valduc ainsi que les semaines 19 et 22 à Bruyères, a mené à écarter la génération 21 de compteur Cramal. En effet, l'affichage de l'équivalent de dose sur trois digits et en mrem s'est avéré incompatible avec les faibles DED. Elle a également permis la mise en évidence de problèmes de logiciel sur la nouvelle génération de rem mètre Cramal 31 (les divergences entre la dose appliquée et la réponse de l'appareil à très bas débit ont été expliquées par la division entière de deux nombres relativement proches).

Les deux radiamètres Cramal 31 (modifiés après une action auprès du constructeur [14]), ont été étudiés les semaines 36 et 37 sur l'accélérateur et semaine 40 sur les sources de Valduc. Seule l'analyse de ces expériences fait l'objet de cette partie du document.

Comme pour les débitmètres Nausicaa, l'électronique de ces appareils présente un manque de stabilité ; en particulier leur réponse semble réagir au type d'alimentation utilisée (batterie ou transformateur). Notons cependant que cette fragilité n'a été relevée que sur l'un des deux appareils et qu'elle n'a de conséquences que pour la reproductibilité du bruit de fond électronique. Celui-ci s'avère compatible avec les DED mesurés :

- Cramal 1 :  $H_{BDF} = 0,2 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1} \pm 100\%$  (N° de série 85)
- Cramal 2 :  $H_{BDF} = 0,04 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1} \pm 10\%$  (N° de série 53)

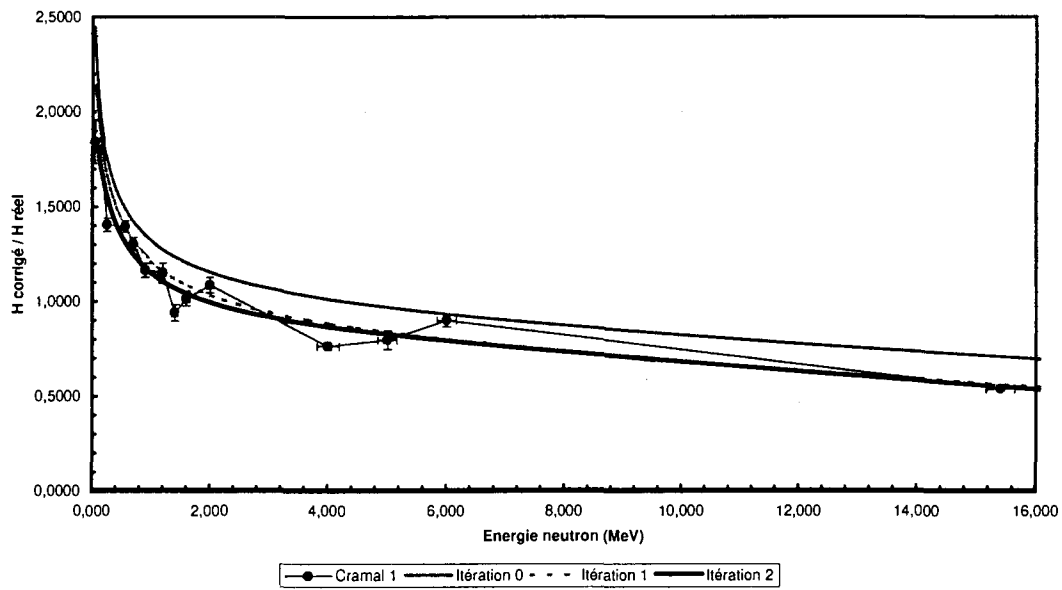
### b / Résultats expérimentaux.

Le paramétrage (à l'itération 2) du pseudo-facteur de conversion des appareils est reporté dans l'annexe 3. Il est sensiblement comparable d'un compteur à l'autre et retombe à haute énergie pour s'écarter de la courbe théorique de la figure II.1.

La détermination de ce paramétrage n'a évidemment de sens qu'à haut débit, c'est à dire quand les incertitudes statistiques sont minimisées. Le choix de la fonctionnelle d'ordre trois en logarithme de l'énergie neutron semble suffisant pour décrire la correction  $H_{diffusés}$ .



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

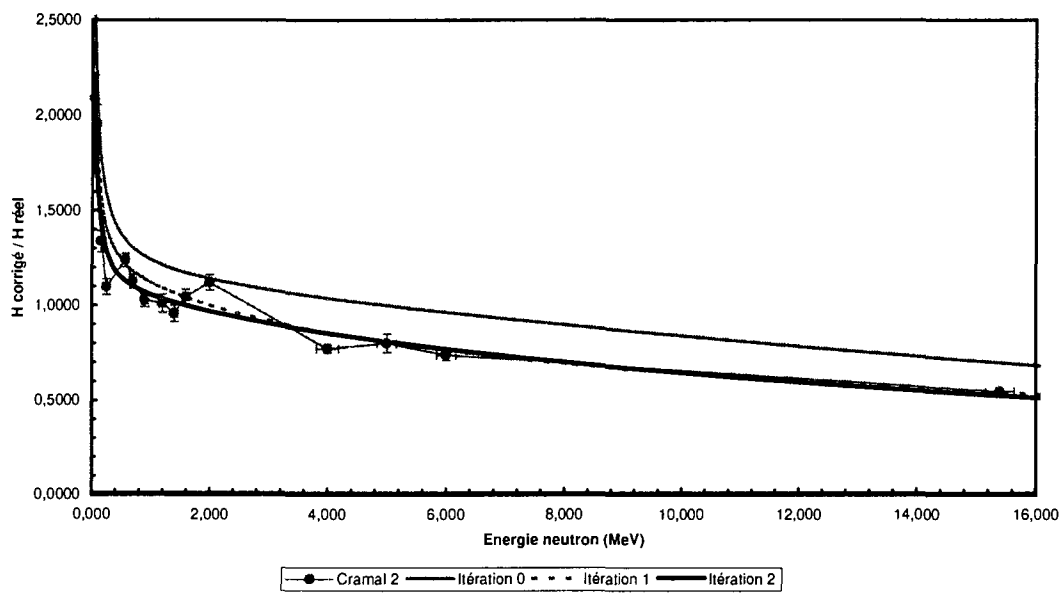
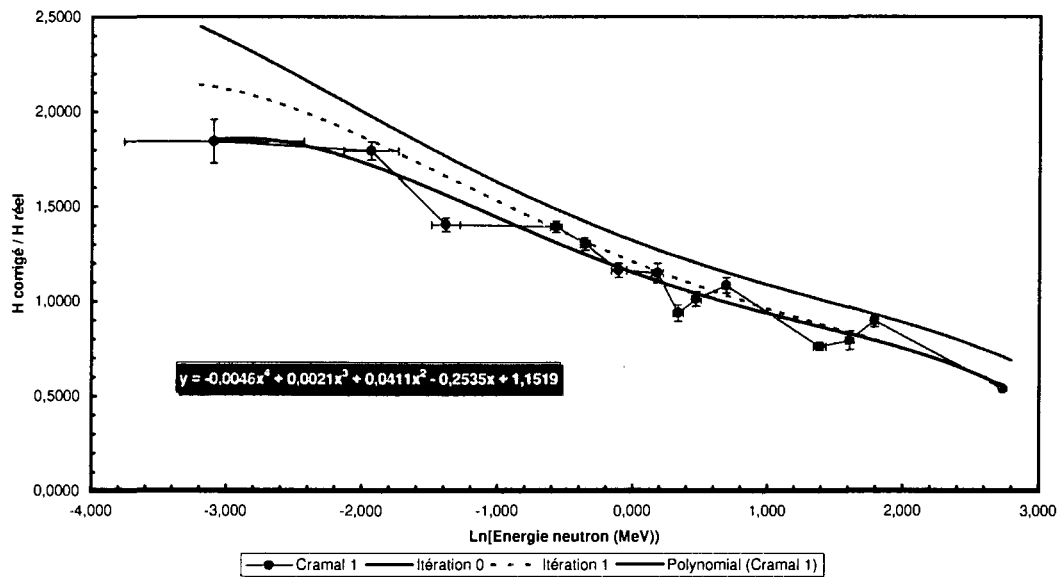


Figure III.5 : Réponses des appareils de type Cramal en fonction de l'énergie. La différence entre les itérations 0 et 2 est moins importante pour le Cramal 1 placé plus haut que le Cramal 2 et qui voit par conséquent moins de neutrons diffusés.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )



Etude en fonction de l'énergie neutron à bas débit ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

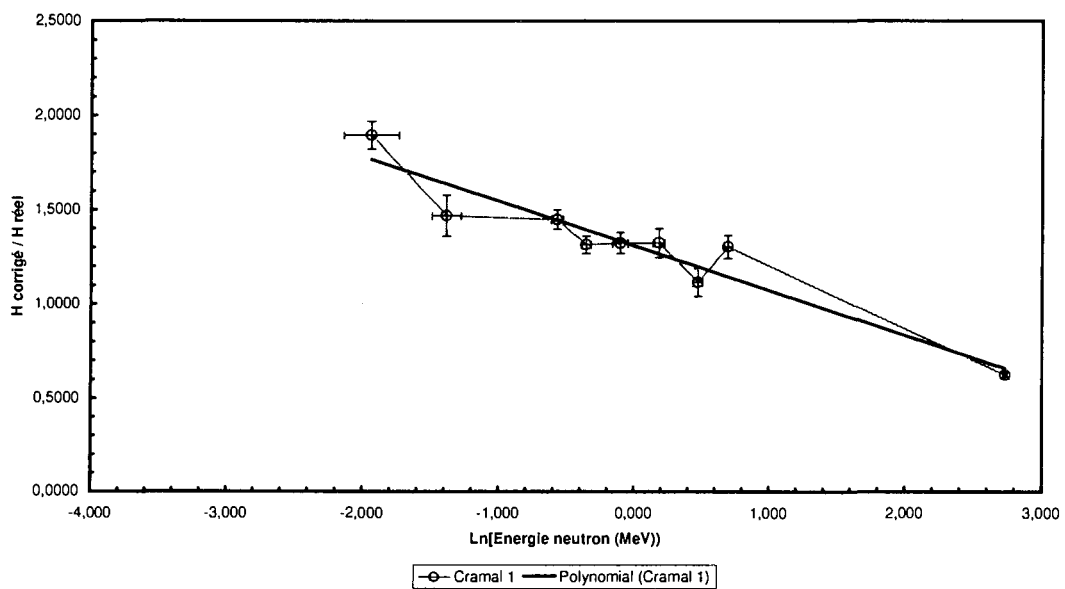
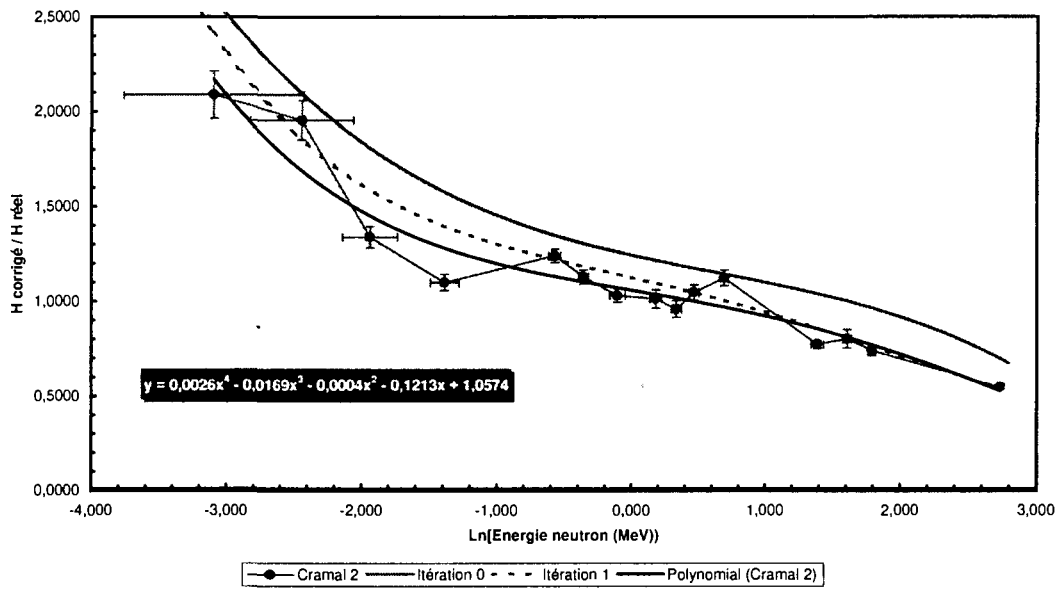
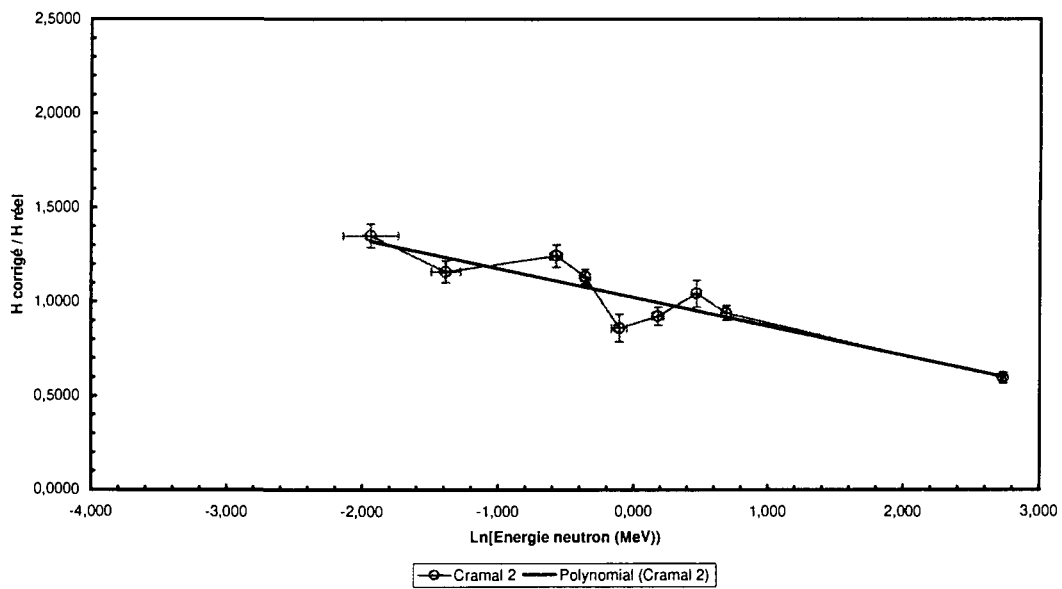


Figure III.6 : Paramétrage de la réponse du Cramal 1 en fonction de l'énergie.

*Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*



*Etude en fonction de l'énergie neutron à bas débit ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*



*Figure III.7 : Paramétrage de la réponse du Cramal 2 en fonction de l'énergie.*

Les résultats sont donnés figures III.5, III.6 et III.7. Ils appellent les commentaires suivants :

- les fonctions de réponse en fonction de l'énergie des neutrons des deux rem-mètres Cramal sont semblables pour un débit supérieur à  $10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ; ces deux appareils montrent une surestimation du DED pour des énergies inférieures à 2 MeV qui peut aller jusqu'à un facteur 2 à quelques keV.
- lorsque l'énergie augmente, on note une chute d'efficacité des appareils qui atteint 50% à 14 MeV. Ce phénomène s'explique par l'épaisseur de polyéthylène qui devient insuffisante pour thermaliser les neutrons rapides.
- la différence sur la contribution des neutrons diffusés est en accord avec la variation d'altitude des deux rem-mètres pendant l'irradiation.
- les allures semblables des réponses à haut et bas DED ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  et  $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ) pour chacun des deux radiamètres Cramal montre une bonne reproductibilité de ces appareils en fonction du DED.

La réponse de ces appareils relative à la recommandation CIPR60 est développée dans l'annexe 4. Cette réponse est sensiblement constante en fonction de l'énergie des neutrons (variations inférieures à 40%). Ainsi, un simple étalonnage sur source en CIPR60 permettra d'utiliser ces appareils de façon légale après le 13 mai 2000.

## C – Fonction de réponse du radiamètre EGG-Berthold Lb6411.

### a / Principe et préliminaires.

C'est un appareil de conception allemande (nouveau sur le marché) qui fonctionne sensiblement sur le même principe que les rem mètres de type Cramal mais dont la réponse en fonction de l'énergie a été améliorée pour répondre au cahier des charges de la CIPR60 et de la CEI 1322 [9].

Ainsi la boule de polyéthylène a un diamètre de 25 cm pour être plus efficace à haute énergie. La présence de Cadmium dans le modérateur permet, en revanche, de diminuer la sur-efficacité induite à basse énergie par une sphère plus volumineuse que celle des radiamètres Cramal.

L'affichage autorise la lecture simultanée du temps d'irradiation et de l'équivalent de dose. Deux modes de lecture sont disponibles sur ce radiamètre : soit en équivalent de dose, soit en débit d'équivalent de dose. C'est le premier mode qui a été utilisé.

Afin de comparer sa reproductibilité à celle des compteurs Cramal, des temps d'intégration de 15 min ont été adoptés comme référence.

Sa sensibilité supérieure à celle des matériels déjà disponibles au sein des SPR a conduit à étudier ce détecteur en détail à partir des semaines 36 et 37. Comme premier point de comparaison, il faut souligner que le bruit de fond électronique observé pour cet appareil est le plus faible et le plus stable parmi les appareils étudiés :

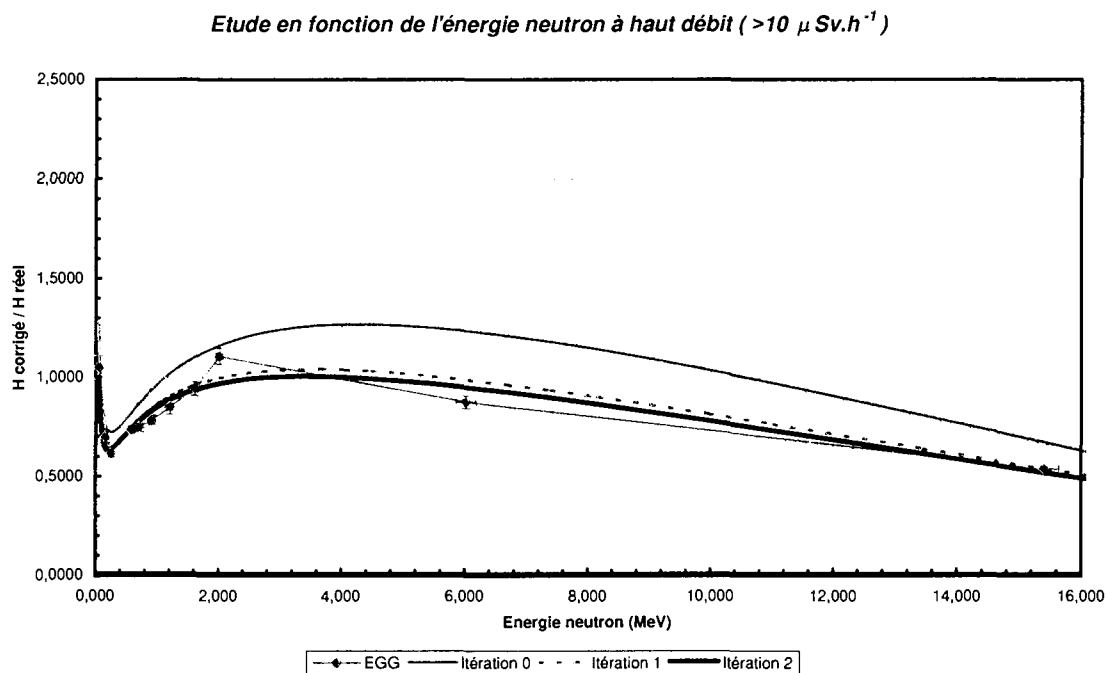
- EGG :  $H_{BDF} = 0,02 \mu\text{Sv.h}^{-1} \pm 5\%$

### *b / Résultats expérimentaux.*

Comme pour les autres détecteurs, la réponse de l'appareil EGG-Berthold a été corrigée de la contribution des neutrons diffusés par le sol. Les calculs ont été qualifiés par des mesures de cône d'ombre sur toute la gamme en énergie. Le paramétrage du pseudo-facteur de conversion introduit dans la dernière itération du calcul, est donné dans l'annexe 3.

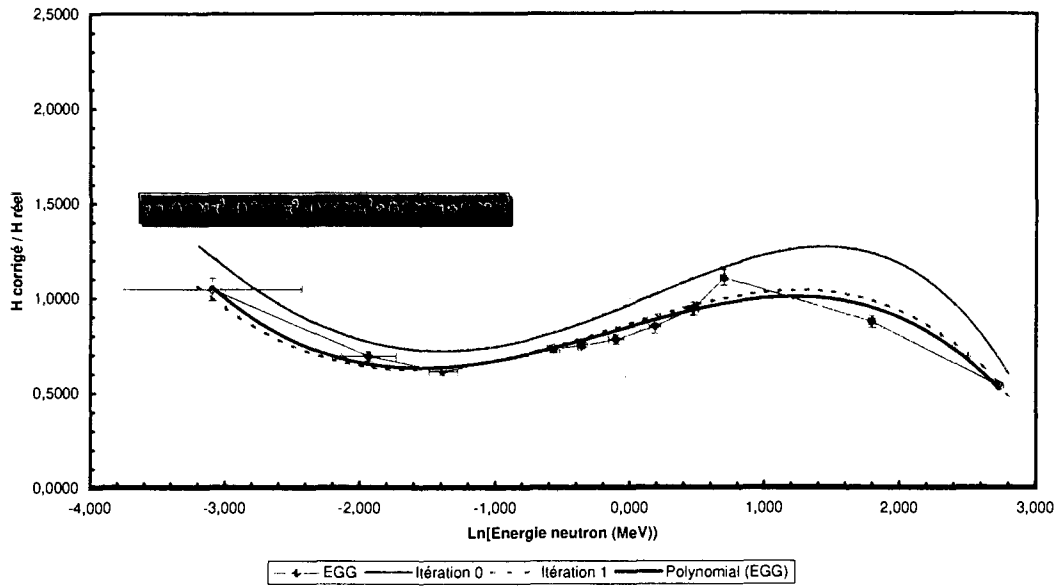
Les résultats sont présentés figures III.8 et III.9. Ils appellent les commentaires suivants :

- la fonction de réponse reste sensiblement constante dans tout le domaine en énergie exploré. On note cependant une sous-estimation de l'ordre de 30% dans la gamme 500 keV - 1 MeV ainsi que pour les énergies supérieures à 12 MeV. La figure III.8 montre toutefois que des points de mesures à 4 et 5 MeV auraient mieux contraint la courbe de réponse dans sa zone de surestimation du DED.
- l'excellente reproductibilité des mesures à très bas débit est constatée figure III.9. Les points obtenus se superposent exactement avec ceux obtenus au-delà de  $10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  ce qui montre la sensibilité supérieure de cet appareil par rapport à celle du radiamètre Cramal.

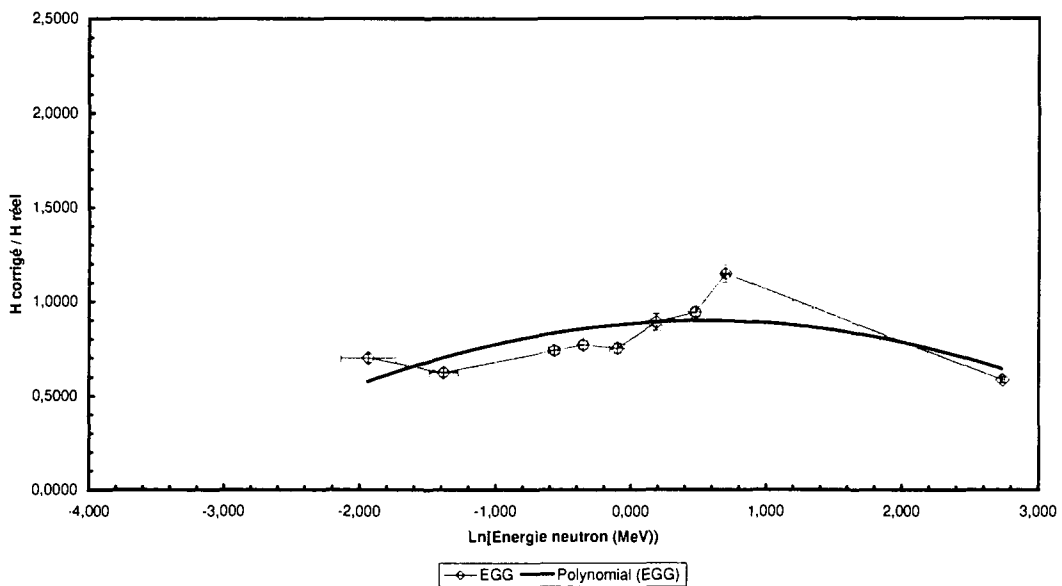


*Figure III.8 : Réponse du compteur EGG Lb6411 en fonction de l'énergie.*

*Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*



*Etude en fonction de l'énergie neutron à bas débit ( $<10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )*



*Figure III.9 : Paramétrage de la réponse de radiamètre EGG Lb6411 en fonction de l'énergie.*

## D – Fonction de réponse des dosimètres à bulles BD-PND.

### a / Principe et préliminaires.

Les différents types de dosimètres à bulles et les tests opérés par le CTHIR [13] sur les BD-100R ont été abordés dans la référence [1]. Etant donné la nature différente de ces stylos à bulles, il n'existe en réalité, pas de point de comparaison à notre étude. Ces dosimètres à vocation individuelle et distribués par la société ARIES sont utilisés dans cette étude, en dehors de leur domaine de qualification théorique<sup>2</sup>.

Le principe de fonctionnement de ces dosimètres est basé sur un phénomène statistique dont l'idée remonte à l'invention des chambres à bulles. Par suite du dépôt d'énergie de neutrons dans un gel en surfusion, les noyaux chargés ainsi mis en mouvement, créent une bulle. Le nombre de bulles  $Nb$  dépend de l'énergie et du flux de neutrons qui ont traversé le gel et l'on se ramène au DED intégré pendant le temps  $t$  [h] via un facteur de sensibilité  $S$  [bulles.mrem<sup>-1</sup>] évalué par le constructeur :

$$H_{lu} [\mu\text{Sv.h}^{-1}] = 10 [\mu\text{Sv.mrem}^{-1}] \cdot Nb / (S \cdot t).$$

Les études préliminaires développées dans la référence [1] ont amené des conclusions sur un certain nombre de paramètres dont l'influence sur la reproductibilité des mesures n'était pas triviale. Ainsi, il a été relevé :

- une invariance de la réponse des dosimètres en fonction de la sensibilité, aux erreurs statistiques près. Ceci a conduit à écarter les dosimètres dont la sensibilité était inférieure à 10 bulles.mrem<sup>-1</sup> peu adaptés à la mesure des faibles DED.
- un comportement à seuil quant à la durée de vie des stylos : au bout de 80 utilisations environ, le vieillissement se traduit par la persistance des bulles après recompression.
- la nécessité d'utiliser 10 bubbles simultanément et dans les mêmes conditions si l'on doit se satisfaire d'une trentaine de bulles par stylo. L'incertitude statistique, facile à appréhender pour ces systèmes, est le facteur prépondérant.
- une insensibilité au débit d'équivalent de dose dans le mode opératoire décrit ci-dessus. Ceci justifie la détermination de la courbe de réponse en énergie des bubbles à haut débit seulement.

Il est également important de signaler l'insensibilité des dosimètres à l'environnement radiatif ambiant. Par conséquent, seul le bruit de fond dû aux neutrons diffusés est pris en compte. Pour décrire correctement le seuil de détection des stylos au fur et à mesure que l'énergie des neutrons diminuait, une caméra a permis le comptage sous faisceau du nombre de bulles créées. Ainsi, la statistique requise a pu être atteinte sans faire l'hypothèse d'une durée d'exposition a priori.

Si la mise en œuvre de tels dosimètres peut sembler lourde avec un minimum de 2h de mesure pour une dizaine de stylos en simultané, elle peut être justifiée par le faible encombrement de ces détecteurs.

---

<sup>2</sup> En aucun cas, ces dosimètres n'ont droit de citer dans le cadre de la dosimétrie réglementaire qui reste l'apanage des films photographiques. En effet, la possibilité qu'ont les agents de comprimer les bulles afin de les faire disparaître nuit à l'exigence de traçabilité requise par les systèmes dosimétriques individuels.

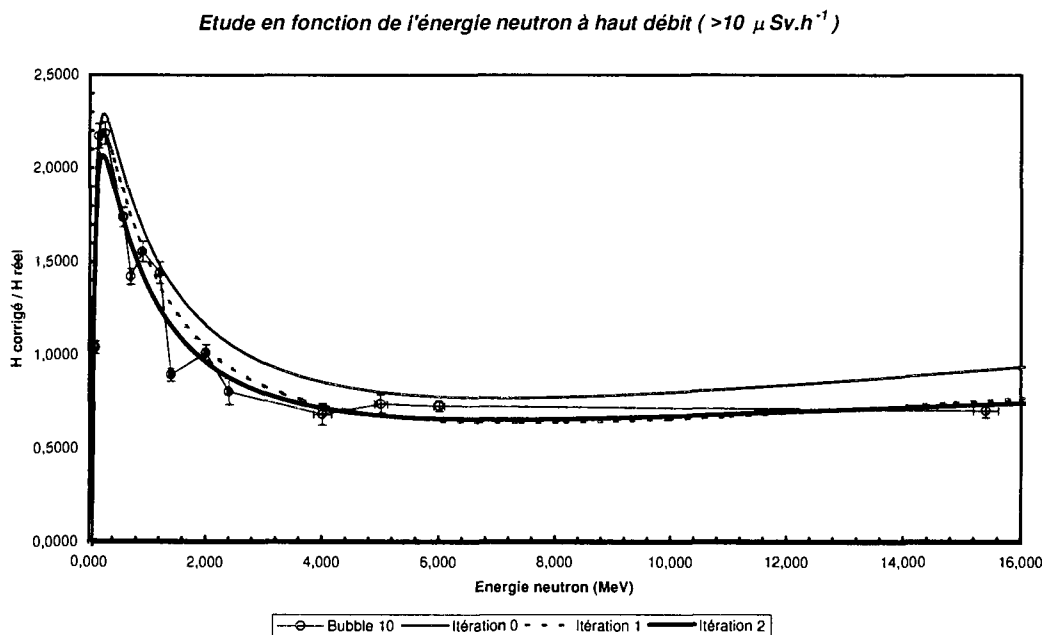
*b / Résultats expérimentaux.*

La détermination du paramétrage du pseudo-facteur de conversion des dosimètres à bulles présenté dans l'annexe 3, met en évidence des ruptures de continuité dans le tracé de la courbe. Les variations de température du hall d'expérience peuvent probablement expliquer ces décrochements bien que l'effet ne soit pas quantifié sous forme d'incertitude. Le choix de la fonctionnelle de degrés quatre en logarithme de l'énergie est suffisant pour stabiliser la correction des neutrons diffusés autour de 20% du DED appliqué. L'indice 10 pour les bubbles, dans les légendes, réfère à la sensibilité des stylos qui font l'objet de l'étude.

Les résultats sont donnés figures III.10 et III.11. Ils appellent les commentaires suivants :

- la fonction de réponse des dosimètres à bulles présente une surestimation du débit d'équivalent de dose d'un facteur 2 dans le domaine d'énergies 100 keV – 500 keV et une sous-estimation de l'ordre de 30% pour les neutrons d'énergie supérieure à 3 MeV.
- la surestimation du débit d'équivalent de dose à basse énergie n'a jamais été observé pour les BD-PND qui étaient présumés fonctionner de façon analogue aux BD-100R [13].
- le seuil de détection de ces dosimètres a été établi de façon précise grâce aux mesures supplémentaires à 45 et 87 keV neutron. Il se situe aux environs de 50 keV soit plus bas que celui indiqué dans la littérature [13].

Tout comme pour les radiamètres Cramal, la conformité des dosimètres à bulles à la CIPR60, est évaluée dans l'annexe 4. Cette étude montre que les dosimètres BD-PND seront utilisables légalement si ARIES fournit, après le 13/05/2000, une sensibilité relative à la CIPR60.



*Figure III.10 : Réponse des dosimètres à bulles de sensibilité  $10 \text{ bulles.mrem}^{-1}$  en fonction de l'énergie des neutrons.*



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu \text{Sv.h}^{-1}$ )

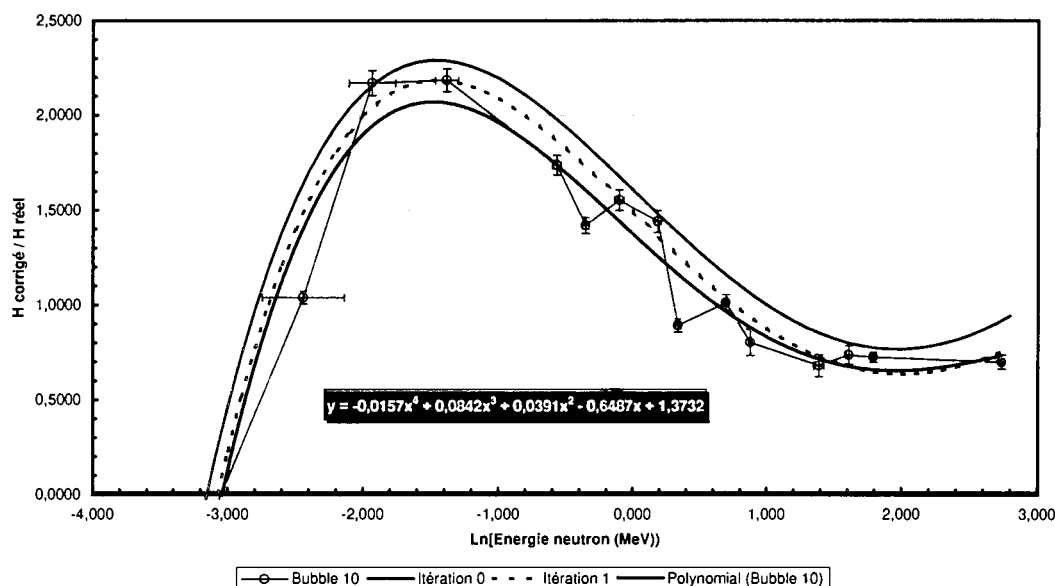


Figure III.11 : Paramétrage de la réponse des dosimètres à bulle en fonction de l'énergie des neutrons.

## 2 / Mesures sur source étalon – Etalonnage LPRI.

### A – Comparaison des résultats expérimentaux obtenus à Bruyères et à Valduc.

Afin de synthétiser les résultats obtenus en neutrons monocinétiques sur des points comparables à ceux obtenus sur sources étalons à Valduc, il convient, dans un premier temps, de paramétrer les fonctions de réponse des appareils de dosimétrie étudiés. L'ensemble des figures du paragraphe 1 / donne une idée de leur forme mais le tableau III.2 fixe les paramètres adoptés pour le choix de la fonctionnelle :

$$\varepsilon(E) = A_4 (\text{Ln } E)^4 + A_3 (\text{Ln } E)^3 + A_2 (\text{Ln } E)^2 + A_1 \text{Ln } E + A_0$$

Détecteur	$A_4$	$A_3$	$A_2$	$A_1$	$A_0$
Nausicaa ETCA 21	0	0,0093	-0,0564	-0,0046	0,6789
Nausicaa Valduc 21	0,0097	0,0072	-0,0418	0,0542	0,6269
Nausicaa Valduc 60	0	-0,0202	-0,0187	0,2864	0,8065
Cramal 1	-0,0046	0,0021	0,0411	-0,2535	1,1519
Cramal 2	0,0026	-0,0169	-0,0004	-0,1213	1,0574
EGG-Berthold	-0,0010	-0,0353	-0,0133	0,2002	0,8492
Bubbles	-0,0157	0,0842	0,0391	-0,6487	1,3732

Tableau III.2 : Tableau de synthèse des paramétrages adoptés pour les appareils qui disposaient de suffisamment de points de mesure en neutrons monocinétiques.

Dans un deuxième temps, comme  $\varepsilon(E)$  est définie comme un rapport de débits d'équivalent de dose, sa valeur moyenne  $\varepsilon^a_s$  pour une source  $S$  de spectre en énergie  $\rho(E)$ , doit s'écrire :

$$\varepsilon^a_s = \frac{\int \varepsilon(E) C(E) \rho(E) dE}{\int C(E) \rho(E) dE} \quad \text{avec} \quad \rho(E) = \frac{dN}{dE} \quad \text{et} \quad C(E) \text{ est le facteur de conversion.}$$

Cette convolution s'effectue dans tout le domaine en énergie des sources et pour chaque appareil  $a$ . Une incertitude de type B est affectée à l'estimation de la validité du paramétrage pour un système dosimétrique donné. Elle rend compte des écarts observés entre l'ajustement et les points de mesures dans la zone d'énergie efficace des sources. Le tableau III.3 donne les valeurs calculées de  $\varepsilon^a_s$  pour tous les radiamètres et dosimètres dont la réponse en fonction de l'énergie a pu être déterminée.

<i>Détecteur</i>	$\varepsilon^a_{AmBe} \pm \Delta\varepsilon^a_{AmBe}$	$\varepsilon^a_{Cf} \pm \Delta\varepsilon^a_{Cf}$
<i>Nausicaa ETCA 21</i>	<b>0,58 ± 0,09</b>	<b>0,63 ± 0,09</b>
<i>Nausicaa Valduc 21</i>	<b>0,70 ± 0,07</b>	<b>0,66 ± 0,07</b>
<i>Nausicaa Valduc 60</i>	<b>1,06 ± 0,21</b>	<b>0,98 ± 0,20</b>
<i>Cramal 1</i>	<b>0,89 ± 0,13</b>	<b>1,00 ± 0,15</b>
<i>Cramal 2</i>	<b>0,86 ± 0,13</b>	<b>0,95 ± 0,14</b>
<i>EGG-Berthold</i>	<b>0,94 ± 0,14</b>	<b>0,93 ± 0,14</b>
<i>Bubbles</i>	<b>0,83 ± 0,08</b>	<b>1,00 ± 0,10</b>

**Tableau III.3 :** Réponse des différents appareils à des sources complexes d'AmBe et de  $^{252}Cf$ , dans le cadre de convolution de  $\varepsilon(E)$  par les spectres de la figure II.1.

Les résultats obtenus sont comparés figure III.12 avec ceux de Valduc pour deux types de sources ( $^{252}Cf$  et  $\alpha,n$ ) et trois classes de débit d'équivalent de dose (5, 50 et 100  $\mu Sv.h^{-1}$ )<sup>3</sup>. Les principaux points à retenir sont les suivants :

- les convolutions des réponses des appareils en fonction de l'énergie sont compatibles avec les mesures directes sur sources. Seul le Nausicaa Valduc montre des incohérences entre ces deux types de mesures. L'explication tient certainement dans le manque de points voisins de l'énergie de 4 MeV dans l'étude monocinétique qui induit une perte de caractérisation de la fonction de réponse. Par ailleurs, il subsiste des difficultés à trouver un critère pour valider chaque mesure effectuée avec ce compteur équivalent tissu.
- la réponse des dosimètres à bulles exposés à une source de fission présente un manque de reproductibilité. Toutes les incertitudes sont données en écart type et sont donc représentatives de 68% de taux de confiance ce qui autorise un léger recouvrement. En l'absence d'étalonnage légal pour les *bubbles*, c'est la sensibilité donnée par le constructeur qui fait foi et l'on s'attend à une réponse unité sur source d'AmBe. Dans le cas de mesures avec « Phantom » ( $H_p(10)$ ), pour ces dosimètres individuels, l'effet d'albédo pourrait combler les 20 % de sous estimation enregistrés ici.
- Les résultats relatifs aux appareils de type Nausicaa ETCA, EGG Lb6411 et Cramal 1 sont cohérents dans toutes les conditions.

<sup>3</sup> Les mesures sur sources concernant les dosimètres à bulles ont été effectuées à Bruyères.

## B – Comparaison avec les étalonnages du BNM-LPRI.

« Le Commissariat à l’Energie Atomique est un des sept membres du GIP-BNM (Bureau National de Métrologie) et au sein du CEA/DTA, le BNM-LPRI est le laboratoire responsable, dans le domaine des rayonnements ionisant, de la métrologie fondamentale ainsi que des références primaires et de transfert. Il procède en outre, au raccordement des utilisateurs en tant que de besoin. » A. KELLER (BNM)

Si le BNM-LPRI s’estime le plus compétent au niveau national pour les problèmes liés à la radiothérapie, il n’en est pas de même pour ce qui concerne la radioprotection (congrès de la SFRP du 05/11/98). Dans ce cadre, il préfère raccorder ses étalons à ceux de l’IPSN/DPHD/SDOS, laboratoire qui tient un rôle privilégié au sein de la chaîne nationale d’étalonnage BNM-COFRAC.

Ainsi, ce service est déjà accrédité comme « laboratoire associé » et est habilité à délivrer des procès verbaux d’étalonnage d’appareils sur sources étalons. Ces étalonnages certifiés, dont la périodicité réglementaire est de deux ans pour tous les systèmes dosimétriques opérationnels, constituent une référence pour nos évaluations. Cependant, les facteurs d’étalonnage qui en résultent n’ont de sens que dans le domaine de qualification des irradiations des tests du LPRI et n’offrent souvent qu’une caution légale à l’utilisation des appareils. Ils ne seront donc comparés qu’aux résultats obtenus à Valduc dans les mêmes conditions (débits d’équivalent de dose élevés).

Notons qu’il n’existe pas, à l’heure actuelle, de laboratoire accrédité COFRAC pour les neutrons monocinétiques. L’IPSN/DPHD/SDOS possède toutefois une chaîne de mesure neutron sur une ligne de faisceau de l’accélérateur 4MV de Bruyères et il a déjà établi des relations de collaboration avec l’institut national allemand PTB pour bénéficier d’un transfert.

Parmi les appareils étudiés, seul le micro-dosimètre Nausicaa de Valduc en CIPR21 et les deux appareils Cramal disposent d’étalonnage légaux. La référence pour le Nausicaa ETCA a été effectuée en interne, par ce laboratoire, sur une chaîne de mesure qui avait obtenu l’accréditation COFRAC par le passé. Le détecteur EGG ne faisant l’objet que d’un prêt du constructeur, aucun étalonnage légal n’est disponible ; cependant, des mesures conformes à l’ISO8529 sont effectuées en sortie de production.

Les procès verbaux édités par les organismes accrédités COFRAC donnent un coefficient d’étalonnage  $N = G / I$  où  $G$  est la grandeur de référence en DED et  $I$  correspond à la valeur indiquée par l’appareil. C’est la définition inverse de  $\epsilon^a_s$ . Les étalonnages de référence sont corrigés des effets de neutrons diffusés par les techniques dites semi-empiriques ou de cône d’ombre. Les résultats de ces étalonnages (inverse des mesures de SDOS) sur source d’ $AmBe$  et  $^{252}Cf$  sont reportés figure III.12. Ils montrent :

- un assez bon accord avec les mesures précédentes notamment celles réalisées sur sources étalon à Valduc et à Bruyères. Il est toutefois important de signaler le désaccord pour le Cramal 2 sur source de  $^{252}Cf$ .
- un accord correct avec les convolutions des réponses des appareils par les spectres sources, abstraction faite du Nausicaa Valduc 21.

• $(\alpha, n)$ à $5\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	○ $^{252}\text{Cf}$ à $5\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
• $(\alpha, n)$ à $50\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	○ $^{252}\text{Cf}$ à $50\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
• $(\alpha, n)$ à $100\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$	○ $^{252}\text{Cf}$ à $100\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
• $(\alpha, n)$ convolué par $\varepsilon(E)$	○ $^{252}\text{Cf}$ convolué par $\varepsilon(E)$

*Etalonnage AmBe du laboratoire accrédité COFRAC*

*Etalonnage  $^{252}\text{Cf}$  du laboratoire accrédité COFRAC*

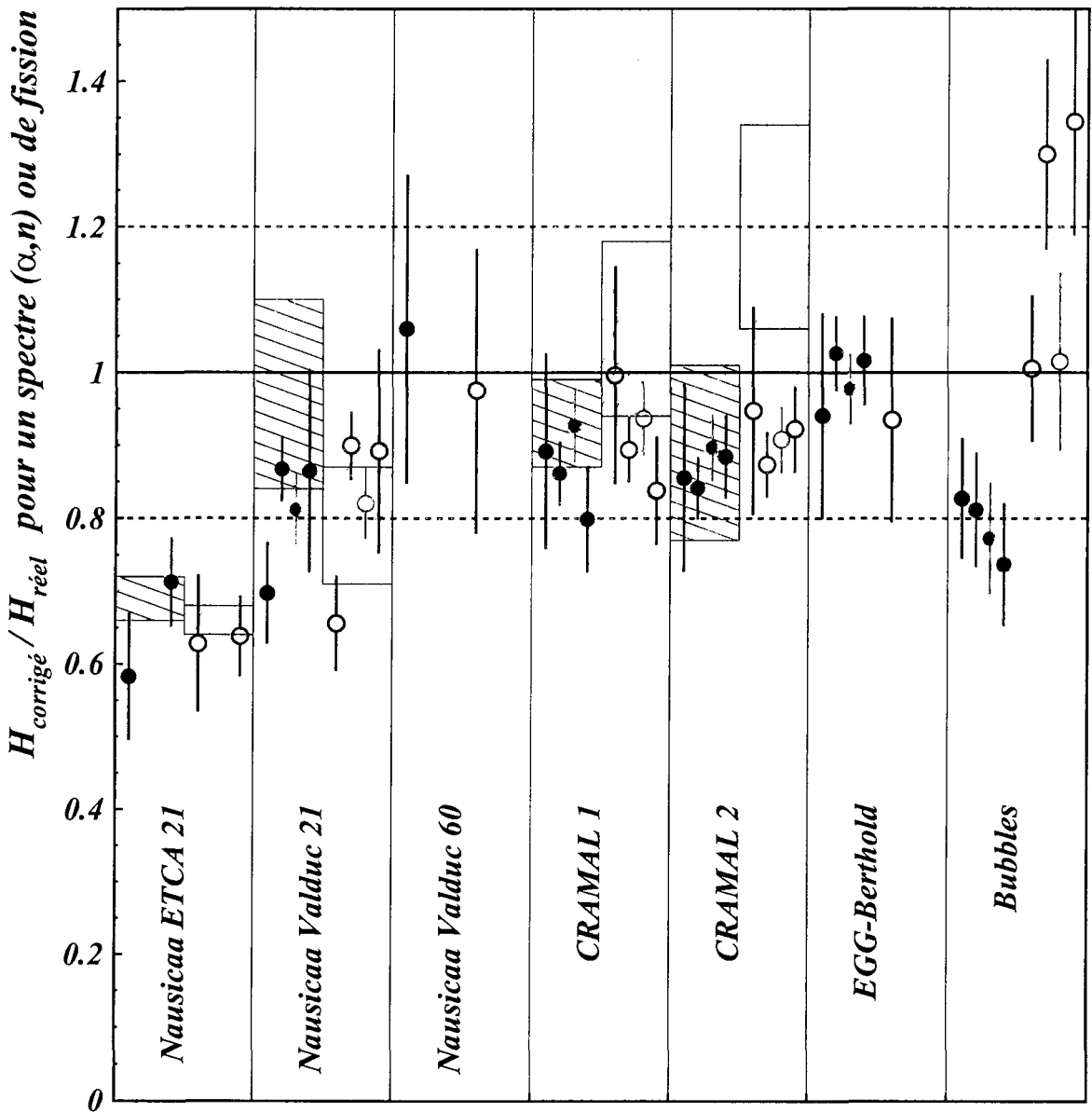


Figure III.12 : Comparaison de toutes les réponses obtenues par intégration du débit d'équivalent de dose neutron sur les différents systèmes dosimétriques.

### C - Conséquences sur la dosimétrie opérationnelle.

Différentes situations peuvent se présenter :

- la distribution en énergie de la source est connue ; il est possible de déduire par convolution le coefficient d'étalonnage à appliquer aux appareils pour que la mesure ait un sens. Cette procédure est valide pour n'importe quel radiamètre Lb6411 ou Cramal ainsi que pour une série quelconque de dosimètres à bulles. Il faut en revanche étudier ponctuellement la fonction de réponse associée au micro-dosimètre Nausicaa utilisé sur site pour prendre en compte l'ensemble des réglages propre à chaque appareil.
- on est en présence d'un mélange de sources de fission et de type  $(\alpha, n)$  ; il vaut mieux se référer à l'étalonnage préalable sur ces deux types de sources. Il faut alors faire la moyenne des facteurs d'étalonnage  $N_{Cf}$  et  $N_{AmBe}$  définis dans les deux procès verbaux. L'incertitude à affecter à la mesure tient compte des écarts maxima possibles :

$$\bar{N} = \frac{(N_{Cf} + N_{AmBe})}{2} \quad \text{et} \quad H_{\text{corrigé}} = \left\{ \bar{N} \pm \left[ \left| \bar{N} - N_{Cf} \right| + \text{MAX}(\sigma_{N_{Cf}}, \sigma_{N_{AmBe}}) \right] \right\} \times H_{lu}$$

Il est indispensable que les facteurs d'étalonnage soient systématiquement appliqués et ne prendre l'affichage brut d'une mesure que pour déterminer un ordre de grandeur à 50% près. Le tableau III.4 dresse le bilan des facteurs  $N = G / I$  à prendre en considération ainsi que l'incertitude qui doit leur être associée.

<i>Détecteur</i>	N	$\sigma_N$	$\sigma_N / N$ (%)
<i>Nausicaa ETCA 21</i>	1,43	0,20	14
<i>Nausicaa Valduc 21</i>	1,18	0,20	18
<i>Nausicaa Valduc 60</i>	1,00	0,20	20
<i>Cramal 1</i>	1,05	0,10	10
<i>Cramal 2</i>	1,05	0,10	10
<i>EGG-Berthold</i>	1,05	0,10	10
<i>Bubbles</i>	1,05	0,25	25

*Tableau III.4 : Facteurs d'étalonnage à appliquer aux différents capteurs dans ce cas.*

- on soupçonne un taux élevé de neutrons diffusés par les parois en béton ou le passage des neutrons dans un modérateur, le spectre dégradé est d'énergie relativement basse. L'affectation directe d'un facteur d'étalonnage évalué avec du  $^{252}\text{Cf}$  voire du  $^{252}\text{Cf}/\text{D}_2\text{O}$  sous Cadmium semble plus indiquée.
- les neutrons thermiques risquent d'être majoritaires (100 fois plus que les neutrons d'énergie proche du MeV) ; aucune des études effectuées ici ne peut présumer d'une réponse des appareils en dehors des spécifications données par le constructeur. Un choix de systèmes dosimétriques adaptés doit être envisagé.

Ces différentes situations impliquent donc le recours à un étalonnage par un laboratoire accrédité COFRAC de tous les appareils au moins sur source d'*AmBe* et de  $^{252}\text{Cf}$ . Eventuellement, le passage sur source de fission modérée permet de garantir la mesure à plus basse énergie. Si l'on se restreint à ces quatre types d'appareils, un étalonnage à haut débit suffit ( $>100\mu\text{Sv.h}^{-1}$ ). En effet, les mesures à plus bas débit confirment les premières dans la mesure où l'enregistrement d'une statistique suffisante est respecté.

Dans le cadre de l'analyse d'un nouvel appareil de dosimétrie, une étude en fonction du DED par les laboratoires du CEA/DAM (VA/DSTA/SPR ou DIF/DPSL/SPR), permet de s'affranchir d'un éventuel dysfonctionnement de logiciel (comme celui rencontré sur l'intégrateur Cramal).

Une autre stratégie consisterait à n'effectuer qu'un étalonnage certifié sur source d'*AmBe*, pour rester dans le cadre légal, et de faire les études sur un type de source dont le spectre en énergie est proche de celui rencontré sur site. Dans ce cas, un mode opératoire de mesure d'étalonnage pourrait être rédigé afin, en particulier, de soustraire correctement les bruits de fond (neutrons diffusés ou électronique).

Le dernier point à souligner réfère au type de qualification effectuée ici. En effet, toutes les valeurs proposées sont données hors environnement et permettent simplement de garantir la mesure d'un appareil avec une certaine incertitude.

## IV – Conclusion

Les travaux réalisés par le CEA/DAM, depuis le mois de mai 1998, sur les différents dosimètres ou débitmètres neutrons utilisés pour sa radioprotection ont permis de mieux connaître ces appareils et de lever certaines ambiguïtés.

Les objectifs étaient d'étudier la stabilité des appareils en fonction du DED, de déterminer leur réponse en fonction de l'énergie des neutrons et de définir des conditions d'utilisation correcte. Ces études ont nécessité des expositions à des neutrons monocinétiques dans la gamme 50 keV – 14 MeV (accélérateur Van De Graaff 4MV du DIF/DPTA) et à des sources de neutrons étalonnées ( $^{252}\text{Cf}$  et de  $\text{PuBe}$  du VA/DSTA).

### 1. Résultats relatifs aux caractéristiques intrinsèques des dosimètres et débitmètres :

- Tous les appareils étudiés n'ont pas été conçus pour être conformes aux mêmes recommandations. Les systèmes d'ancienne génération (dosimètres à bulles et radiamètres CRAMAL) donnent une réponse relative à la CIPR21, tandis que les appareils plus récents fournissent un résultat exclusivement en CIPR60 (EGG-Lb6411) ou offrent encore l'alternative (micro-dosimètre Nausicaa). Ces études ont montré que quelle que soit leur date de mise en service, ces systèmes étaient capables de passer le cap du 13 mai 2000, moyennant un étalonnage sur source en CIPR60 .
- La réponse de ces appareils est indépendante du DED : seule la précision de la mesure (incertitudes statistiques) se détériore quand le débit diminue. Pour la plupart des systèmes dosimétriques étudiés, si la durée de mesure reste inférieure au quart d'heure, la sensibilité n'est pas suffisante pour accéder aux faibles DED ( $< 5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ ) avec une précision raisonnable. Le bruit de fond électronique varie d'un appareil à l'autre (nul pour les dosimètres à bulles, jusqu'à  $1 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  pour les débitmètres Nausicaa) et s'avère pénalisant s'il n'est pas soustrait lors de mesures de très faibles débits.
- La fonction de réponse des appareils présente une variation importante ( $> \pm 50\%$ ) avec l'énergie des neutrons (dans le domaine 50 keV - 14 MeV). Une surestimation de l'équivalent de dose à basse énergie ( $< 1 \text{ MeV}$ ) engendre systématiquement une sous-estimation à haute énergie (et inversement). Du fait de la compensation entre les réponses « basse » et « haute » énergie, un résultat correct est cependant obtenu avec les sources étalons de l'ISO8529 ( $\text{AmBe}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ ). A énergie donnée, un type d'appareil peut sous-estimer le DED alors qu'un autre le surestime : les recouvrements de mesures doivent donc être effectués avec précaution.

### 2. Résultats relatifs aux conditions d'utilisation :

- Les neutrons diffusés par l'environnement (sol, murs, opérateur...) peuvent influencer très fortement sur la mesure. Les fonctions de réponse présentées dans ce rapport sont les réponses intrinsèques des appareils : la contribution des neutrons diffusés a été soustraite. Une mesure sur le terrain avec ces appareils (non collimatés, non blindés) donne l'équivalent de dose à l'emplacement du débitmètre ou dosimètre en intégrant la contribution de l'environnement. Par conséquent, un relevé systématique de la géométrie de mesure sur site doit être envisagé pour effectuer des inter comparaisons (y compris pour des appareils identiques placés à une même distance de l'objet).

- L'utilisation d'un matériel certifié par le constructeur conforme à la CEI 1322 conduit, sans étude préalable ni connaissance du spectre en énergie de la source, à la prise en compte d'une incertitude de mesure de  $\pm 50\%$ .
- Il est nécessaire d'appliquer le facteur d'étalonnage adapté. Deux conditions doivent donc être remplies. Il faut d'une part connaître la réponse de chaque appareil à différentes sources étalons (*AmBe*,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  modéré) caractéristiques de différentes énergies moyennes (resp. 4.5, 2.5 et 0.8 MeV). Dans un deuxième temps, il faut savoir trouver, avec ces trois sources, la combinaison qui permet d'approcher le spectre en énergie de l'objet mesuré. Les études ont montré que faire abstraction de cette correction induit des erreurs systématiques qui atteignent 40% et qui pourraient facilement être évitées.
- La dispersion de plusieurs résultats de mesures réalisées dans les mêmes conditions avec un même appareil permet d'affecter l'incertitude statistique nécessaire à la crédibilité de la mesure.

Ces diverses constatations ont conduit le CEA/DAM à étendre ce travail réalisé sur les détecteurs neutrons aux détecteurs  $\gamma$ .



## ANNEXE 1 : Simulations numériques.

Pour compléter les mesures de neutrons diffusés réalisées avec barre d'ombre, des simulations numériques ont été effectuées afin de déterminer le spectre des neutrons (directs et diffusés) atteignant les détecteurs. Le code de transport neutron Monte-Carlo MCNP version 4.a a été utilisé.

L'influence du sol du hall neutron et le volumineux blindage du détecteur BF<sub>3</sub> ont été pris en compte en simulant 3 configurations pour chaque type de sources de neutrons :

1. seul l'air de la salle est considéré,
2. le sol en béton est ajouté à la configuration 1,
3. le détecteur BF<sub>3</sub> est ajouté à la configuration 2.

Le hall du 4 MV a été représenté par un parallélépipède dont les cotes sont :

- sur l'axe Z : -5 m , 10 m,
- sur l'axe X : -10 m, 10 m,
- sur l'axe Y : -0.5 m , 4 m.

Le sol est une dalle de béton de 50 cm (cote -0,5 m, 0 m) d'épaisseur dont la composition est donnée tableau 1. Les éléments en plus faible proportion entrant dans la composition d'un béton classique (hydrogène, sodium, magnésium, soufre et potassium) n'ont pas été pris en compte. La pièce est remplie d'air à la pression atmosphérique (mélange d'azote (79%) et d'oxygène (21%)).

<i>Elément</i>	<i>Z</i>	<i>% massique</i>
<i>Oxygène</i>	<b>8</b>	<b>52,89</b>
<i>Aluminium</i>	<b>13</b>	<b>4,85</b>
<i>Silicium</i>	<b>14</b>	<b>33,46</b>
<i>Calcium</i>	<b>20</b>	<b>8,80</b>

*Tableau 1 : Composition du béton utilisé lors des simulations.*

Les détecteurs sont représentés par des sphères de 10 cm de rayon, ils sont positionnés selon les configurations expérimentales de mai (semaines 19 et 22) et de septembre (semaines 36 et 37), c'est à dire sur le cône d'émission à 20° (par rapport à l'axe Z) à des distances de 150 à 300 cm et des hauteurs comprises entre 100 cm et 280 cm. La source de neutrons est placée à l'endroit de la cible (au bout de la ligne faisceau), c'est à dire au point de coordonnées x=0, y=1,76 m et z=0.

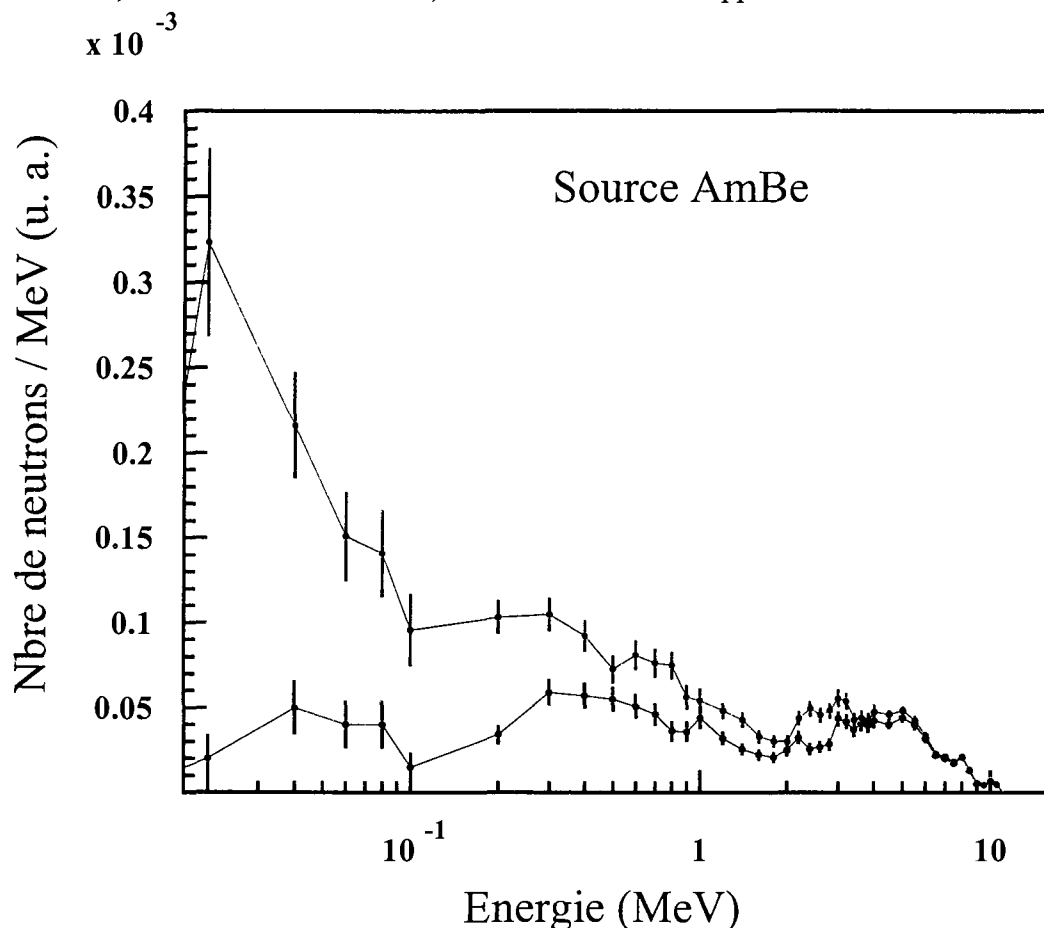
- Dans le cas des neutrons fournis par l'accélérateur, les distributions angulaires et énergétiques des neutrons sources sont calculées selon les sections efficaces doublement différentielles des quatre réactions utilisées. La section efficace de production et l'énergie des neutrons pour la réaction  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  sont représentées en fonction de l'angle sur les figures II.5 et II.6.
- Dans le cas d'une source étalon, l'émission est considérée isotrope et la distribution énergétique est simulée suivant un spectre de fission pour la source de  ${}^{252}\text{Cf}$  ou d'après le spectre *AmBe* issu de la référence [NIM A366 (1995)].

La simulation d'un événement s'achève lors d'un des trois scénarii suivant :

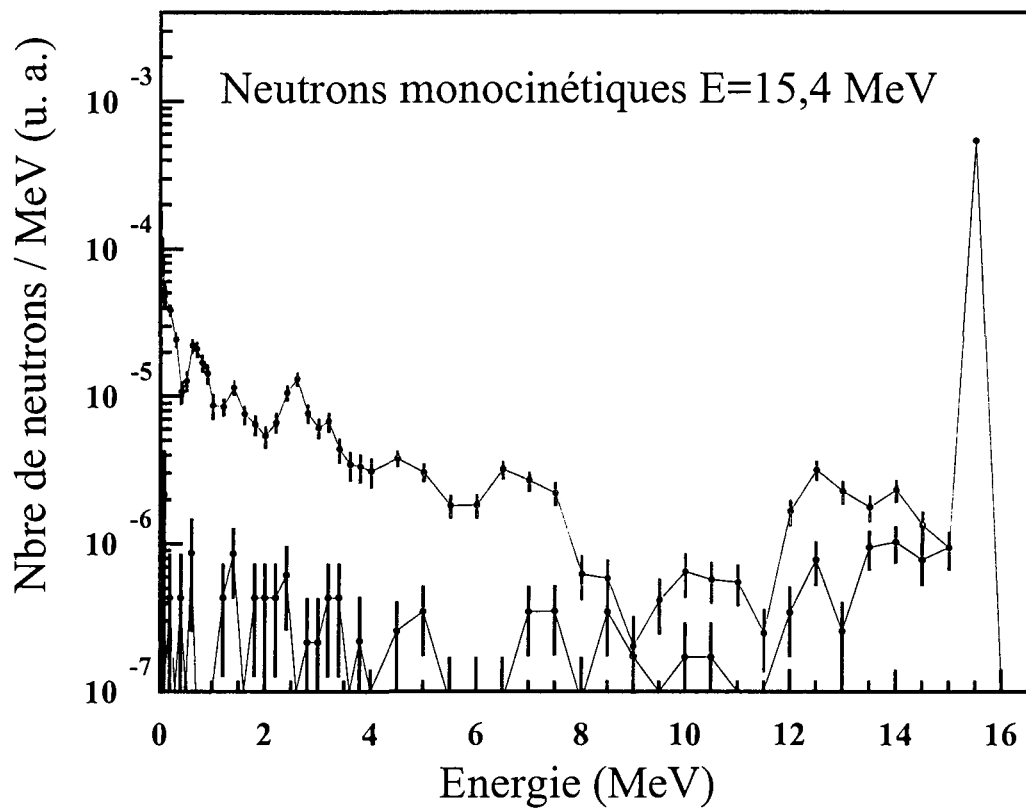
- le neutron quitte la zone de simulation,
- le neutron pénètre une sphère représentant un détecteur,
- le neutron atteint l'énergie de 10 keV.

Les deux derniers cas ont été choisis afin de limiter le temps de calcul. L'influence réciproque des détecteurs n'a pas été prise en compte. Le but de l'expérience étant la détermination de la réponse des dosimètres et débitmètres pour des énergies supérieures à 45 keV, le suivi du neutron jusqu'au domaine thermique, très coûteux en temps de calcul était inutile. L'influence du blindage du BF<sub>3</sub> sur le nombre de neutrons diffusés vers les détecteurs étant toujours très faible (< 1 %), seules les simulations avec et sans sol ont été prises en compte.

Les figures 1 et 2 représentent les spectres neutrons « vus » par un détecteur pour une simulation sans sol (trait noir) et avec le sol (trait rouge). La différence entre ces spectres représente les neutrons diffusés par le sol. On constate que leur importance dépend de la source (énergie et spectre). Les détecteurs n'ayant pas une réponse indépendante de l'énergie (voir chapitre III), l'influence des neutrons diffusés ne peut être évaluée par simple soustraction. Une méthode itérative, décrite dans l'annexe 2, a donc dû être développée.



**Figure 1 :** Spectre de neutrons reçus par un détecteur placé à 3 m de la source et à 1,76 m du sol. Les courbes rouge et noire résultent des simulations avec et sans sol.



*Figure 2 : Spectre de neutrons reçus par un détecteur placé à 3 m de la source et à 1,76 m du sol. Les courbes rouge et noire résultent des simulations avec et sans sol.*

## Annexe 2 : Procédure itérative de correction de neutrons diffusés.

### 1 / Introduction / Définitions.

Cette annexe a pour objet de préciser la procédure de normalisation, sur l'expérience, du calcul des neutrons diffusés par le sol. Le point crucial, qui régit la philosophie de cette correction, tient dans le fait que ces neutrons diffusés perdent leur caractère monocinétique en interagissant avec l'air ou le béton. Ainsi, le taux de DED diffusé, qui perturbe l'appareil de mesure, dépend de sa réponse en fonction de l'énergie. Le problème ne peut trouver une solution que dans le cadre d'une procédure itérative où la correction est réévaluée, à chaque étape, après un nouveau calcul de la réponse. La correction étant du deuxième ordre, on obtient la convergence du système au bout de deux itérations seulement quel que soit l'appareil de dosimétrie. Cette convergence est caractérisée par l'invariance de la réponse en fonction de l'énergie des neutrons, à une nouvelle évaluation du taux de DED diffusé.

Pour appréhender correctement les calculs, il convient de préciser les notations utilisées dans les formules :

$\Phi$	[n.s <sup>-1</sup> .sr <sup>-1</sup> ] :	débit de fluence neutron par unité d'angle solide,
$\Phi$	[n.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup> ] :	débit de fluence neutron par unité de surface de l'appareil,
$D^2$	[cm <sup>2</sup> .sr <sup>-1</sup> ] :	facteur de conversion entre $\Phi$ et $\Phi$ qui dépend de la distance $D$ entre la source et le centre du détecteur,
$H$	[ $\mu$ Sv.h <sup>-1</sup> ] :	débit d'équivalent de dose neutron,
$C$	[ $\mu$ Sv.h <sup>-1</sup> ]/[n.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup> ] :	objet de la dimension d'un facteur de conversion,
$E$	[MeV] :	énergie des neutrons monocinétiques mesurés,
$e$	[MeV] :	énergie prise dans le spectre de neutrons diffusés ( $\leq E$ ),
$\rho_{sans}$	[n.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup> ] :	distribution en énergie des neutrons vus par le détecteur à une distance $D$ de la source, dans le cas d'un calcul <i>sans</i> le sol,
$\rho_{avec}$	[n.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup> ] :	distribution en énergie des neutrons vus par le détecteur à une distance $D$ de la source, dans le cas d'un calcul <i>avec</i> le sol,
$X_r$	:	objet relatif à une valeur réelle ou appliquée,
$X_l$	:	objet relatif à une valeur lue sur l'appareil et déjà corrigée du bruit de fond électronique,
$X_d$	:	objet relatif aux neutrons diffusés,
$X_c$	:	objet relatif à une valeur corrigée de tous les bruits,
$X^i$	:	objet relatif à l'itération $i$ de la procédure.

## 2 / Relations fondamentales.

### A – Conditions générales indépendantes de l'itération.

Dans le rapport [1], nous avons montré que pour un détecteur assimilé à un disque de rayon  $R$  vu de la source et si  $R/D \ll 1$ , on peut appliquer la relation :  $\Phi = \Phi / D^2$ .

De façon générale, on a :  $H_\alpha = C_\alpha \Phi_\alpha$  avec  $\alpha \in \{r, l, d, c\}$

Donc :  $H_r(E) = C_r(E) \Phi_r(E)$  avec  $C_r(E)$  en CIPR 21 ou 60

De plus :  $H_l(E) = H_c(E) + H_d(E)$

### B – Conditions dépendantes de l'itération $i \in \{0,1,2\}$ .

Définissons une géométrie  $g$  comme l'ensemble des paramètres hauteur  $h$  / distance  $D$ , qui positionnent le centre du détecteur par rapport à celui de la source (soit un étalon, soit la cible de l'accélérateur). En tenant compte de toutes les variables qui modifient les observables, on a :

$$H_c^i(E, g) = C_c^i(E, g) \Phi_r(E) = H_l(E) + H_d^i(E, g)$$

$$H_d^i(E, g) = C_d^i(E, g) \Phi_r(E)$$

$$C_d^i(E, g) = \frac{\int C_c^{i-1}(e, g) [\rho_{avec}(E, e) - \rho_{sans}(E, e)] de}{\int \rho_{sans}(E, e) de}$$

$$C_c^{i+1}(E, g) = \frac{H_l(E)}{\Phi_r(E)} - C_d^i(E, g)$$

On appelle  $C_c^i$  le pseudo-facteur de conversion propre à l'appareil considéré. Il est réintroduit à chaque itération et s'éloigne quelque peu du facteur de conversion  $C_r$ , conforme aux recommandations 21 ou 60.

En revanche,  $C_d^i$  a la dimension d'un pourcentage de facteur de conversion et sa variation en fonction de la géométrie est représentée sur les figures 1, 2 et 3. Il est à noter que pour une position donnée, la sensibilité aux neutrons diffusés dépend fortement de la réponse propre de chaque appareil. Typiquement, un appareil de dosimétrie qui présente une sur-réponse à basse énergie est d'autant plus sensible au spectre dégradé de neutrons réfléchis par le sol. Ainsi, sur la figure II.4, le taux de DED de neutrons diffusés est beaucoup plus faible pour le compteur EGG Lb6411 que pour le Cramal 2, dans des géométries sensiblement identiques.

La figure 1 rend compte des variations de  $C_d^i$  en fonction du paramètre géométrique défini par  $h/(h^2+D^2)$ . Ces points correspondent à la configuration expérimentale des semaines 19 et 22 où  $150 \text{ cm} < D < 200 \text{ cm}$  et  $100 \text{ cm} < h < 240 \text{ cm}$ . Pour les semaines 36 et 37, la distance à la source est maintenue égale à 300 cm et la hauteur, qui reste le seul paramètre libre, varie entre 170 et 280 cm. Ainsi, sur les figures 2 et 3,  $g$  est simplement définie par  $h$ . La figure 3 donne également une idée des différences de réponse, obtenues en fonction du type d'appareils, aux neutrons durs d'une source d'*AmBe* placée au point cible.

Etude en fonction de l'appareil, de la géométrie et de l'énergie

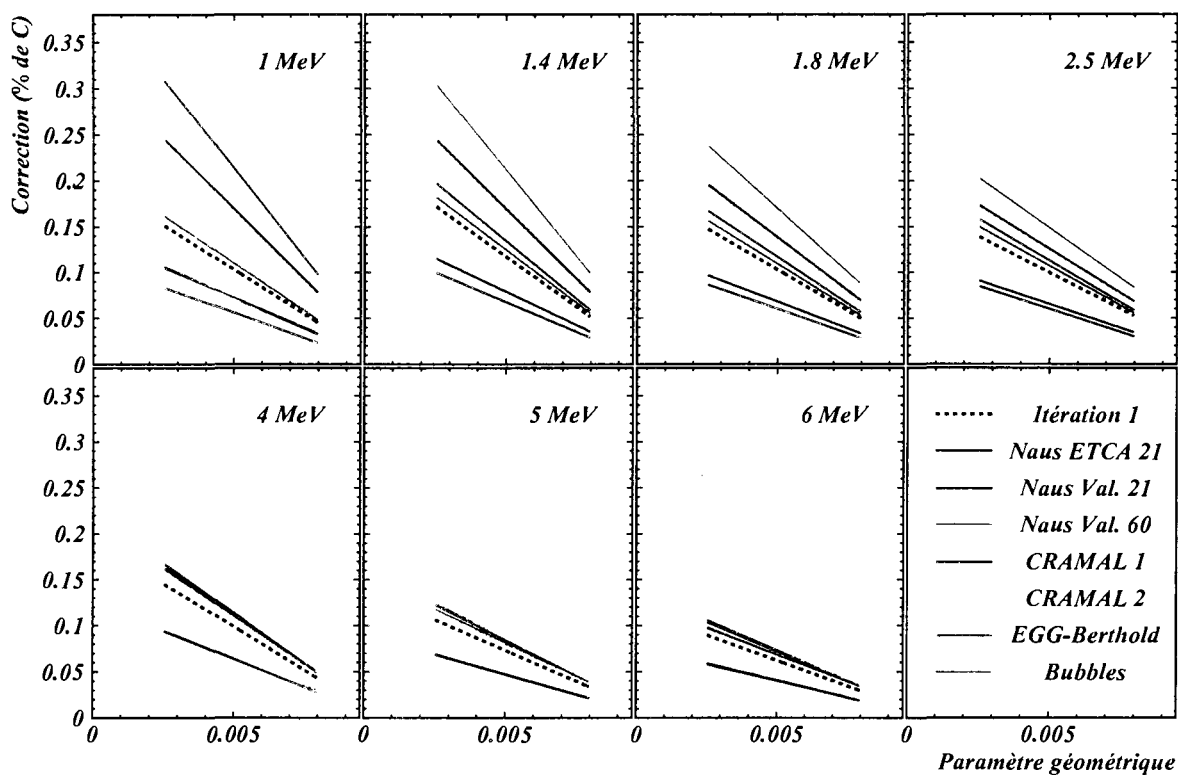


Figure 1 : Dépendance de  $C^1_c$  et  $C^2_c$  en fonction de la géométrie des semaines 19 et 22.

Etude en fonction de l'appareil, de la hauteur et de l'énergie

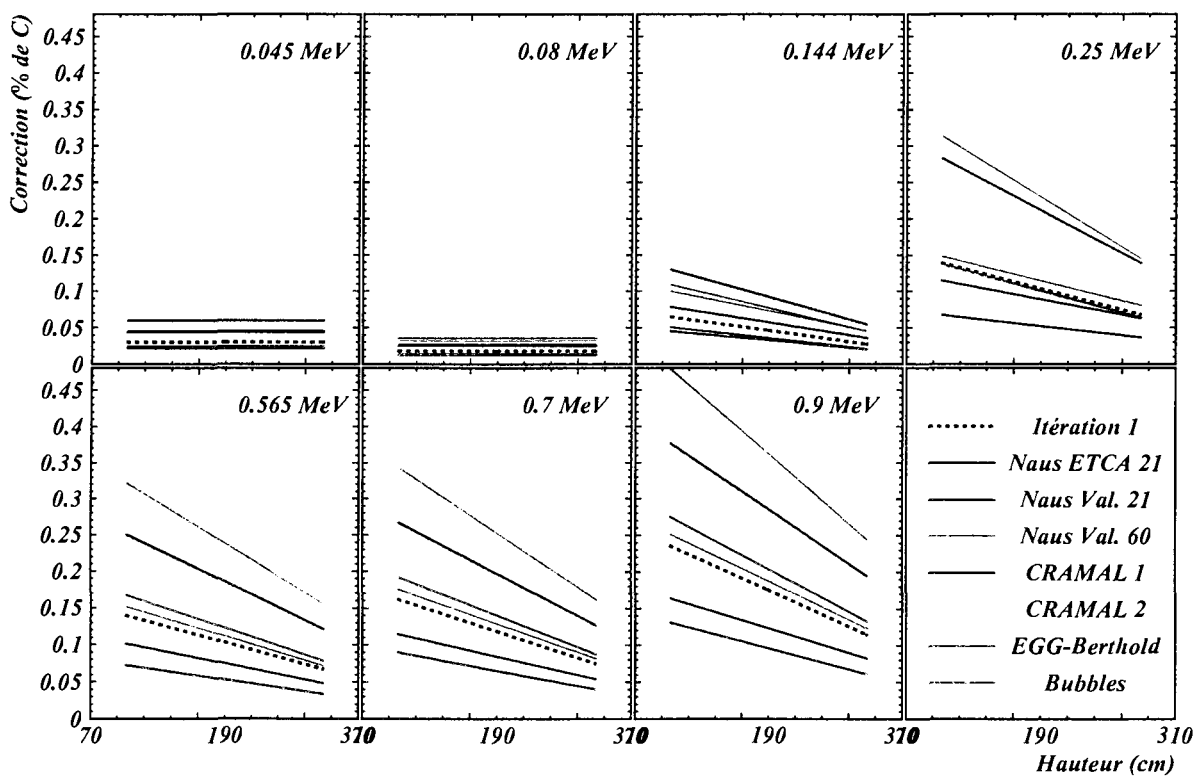
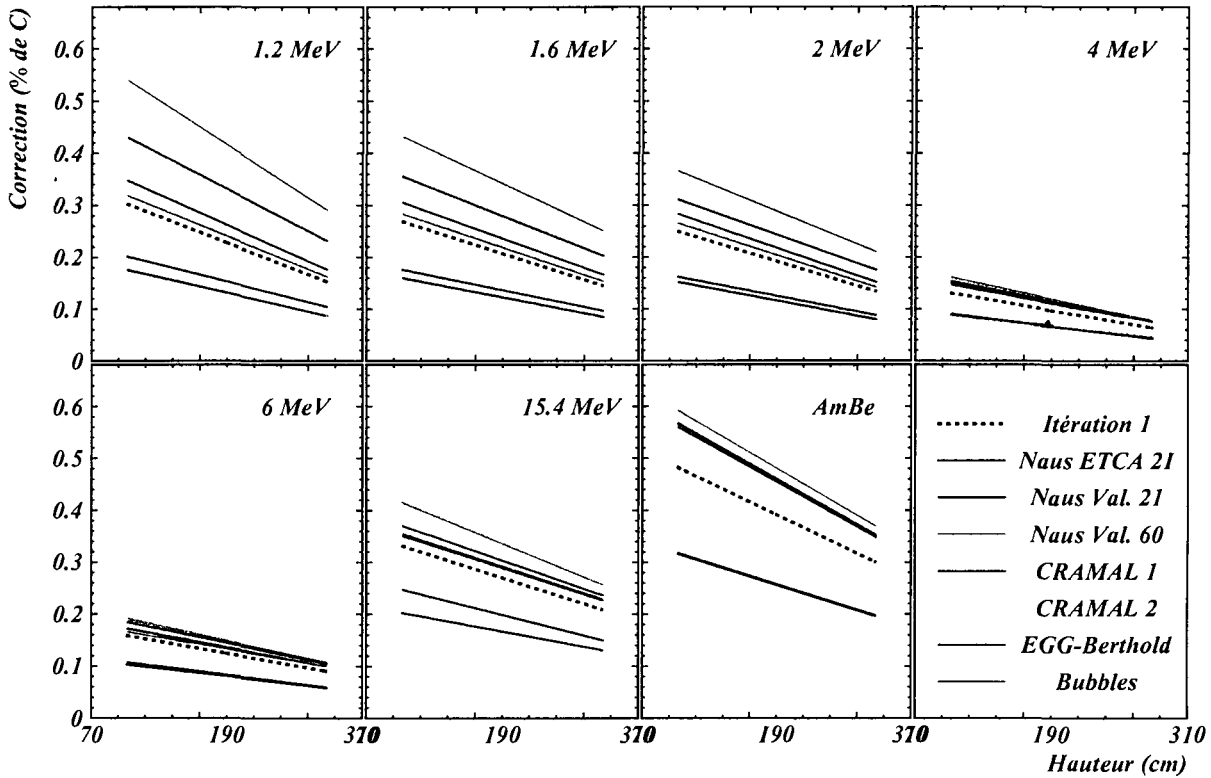


Figure 2 : Dépendance de  $C^1_c$  et  $C^2_c$  en fonction de la géométrie des semaines 36 et 37.

*Etude en fonction de l'appareil, de la hauteur et de l'énergie*



**Figure 3** : Dépendance de  $C_c^1$  et  $C_c^2$  en fonction de la géométrie des semaines 36 et 37.

Si les détecteurs utilisés étaient idéaux, c'est à dire si leur réponse était constante et égale à l'unité quelle que soit l'énergie des neutrons, la variation des lignes en couleur (deuxième itération), serait identique à celle en pointillés. Les figures 1, 2 et 3 montrent comment la correction de neutrons diffusés varie en fonction du type de détecteur pour une géométrie donnée. Ainsi, à une position donnée, même si les débitmètres voient le même nombre de neutrons, ils n'y sont pas sensibles de la même façon.

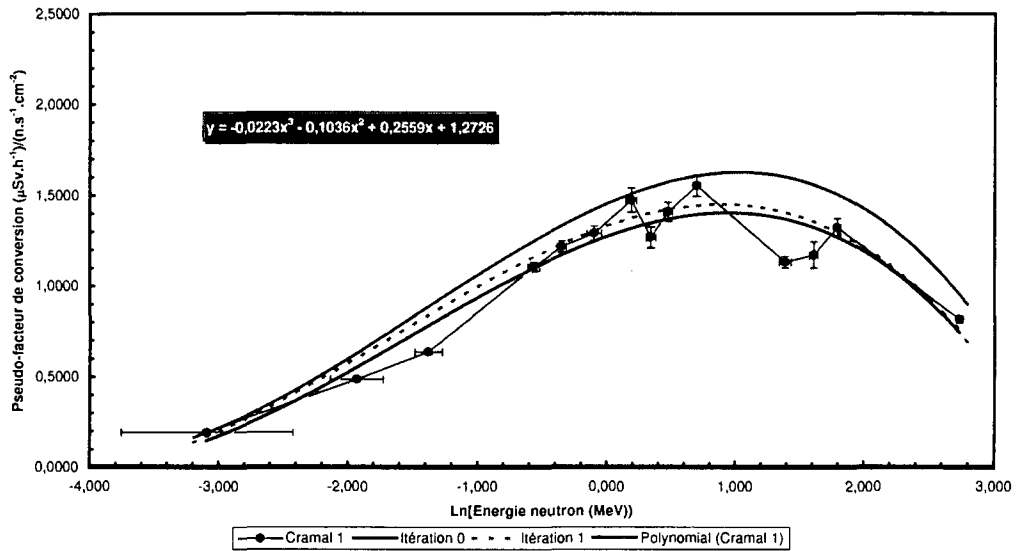
**C – Initialisation et condition de convergence.**

Pour obtenir la convergence la plus rapide de la procédure, le mieux est d'initialiser les coefficients de conversion aux valeurs recommandées par les CIPR :  $C_c^0(E, g) = C_r(E) \forall g$ . Le critère d'arrêt de l'opération est donné par ailleurs par :  $C_c^i(E, g) - C_c^{i-1}(E, g) < \sigma_c^i(E) \forall E$ , où  $\sigma_c^i(E)$  est l'écart type évalué pour le point de mesure à l'énergie  $E$ .

Pour les sept systèmes dosimétriques étudiés, la correction de neutrons diffusés est stabilisée à la fin de la deuxième itération seulement. L'ensemble des courbes de réponse en fonction de l'énergie décrites dans le rapport permet de comparer la situation sans aucune correction (itération 0) et au terme de la convergence de la correction (itération 2).

### Annexe 3 : Paramétrage des pseudo-facteurs de conversion.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

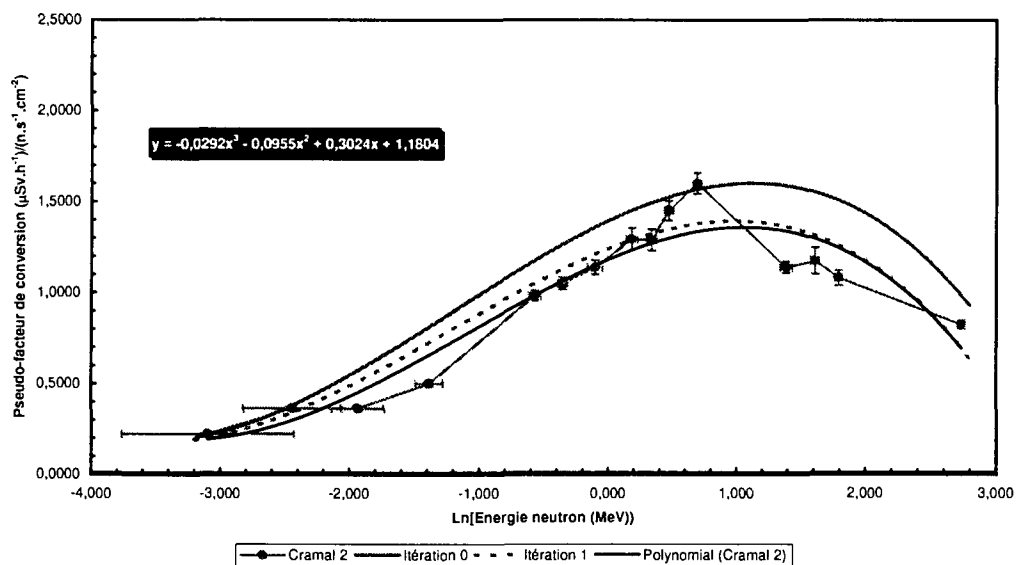


Figure 1 : Variation du pseudo-facteur de conversion du radiamètre Cramal en fonction de l'énergie



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

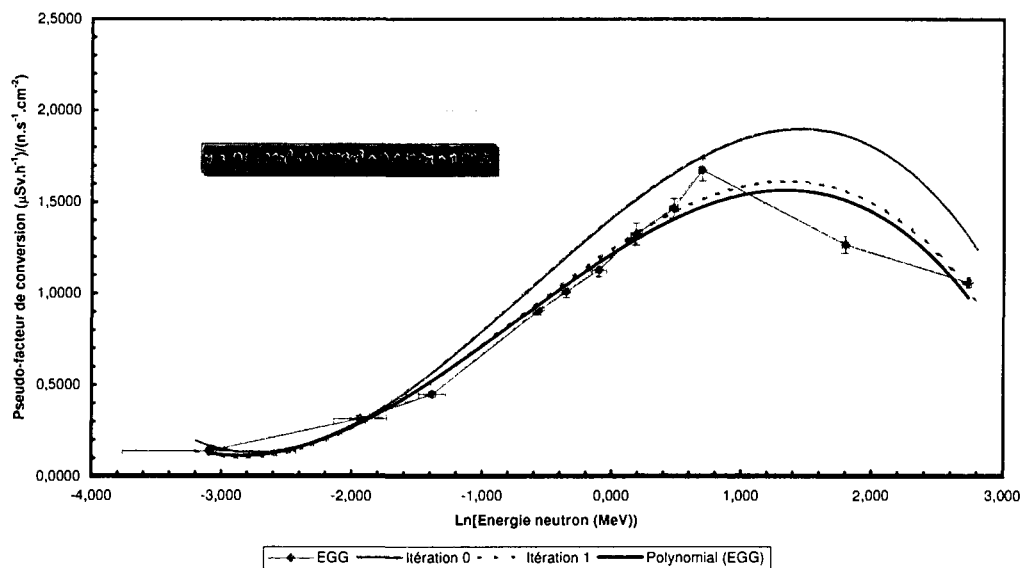


Figure 2 : Pseudo-facteur de conversion associé au radiamètre EGG-Berthold Lb6411.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

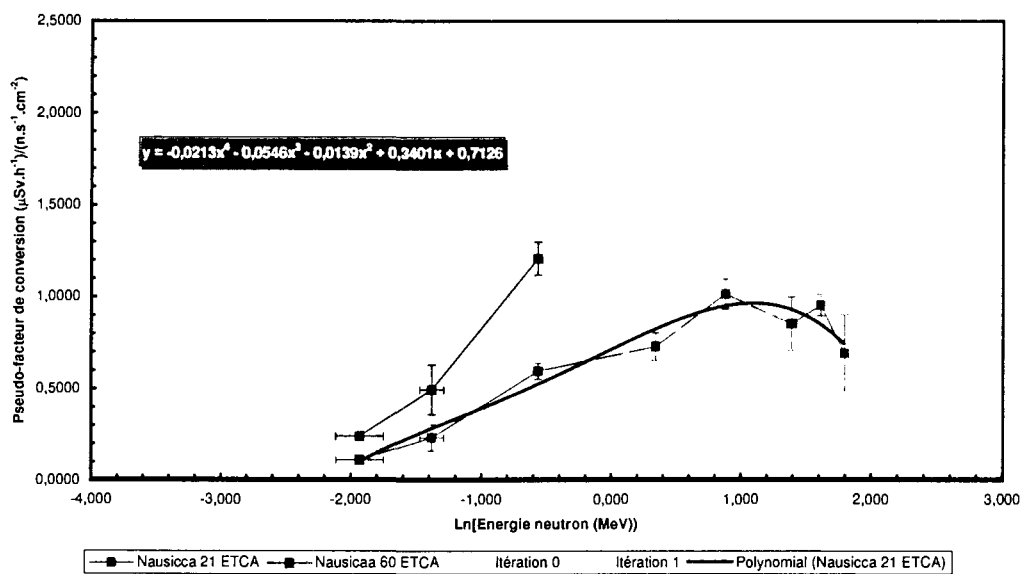
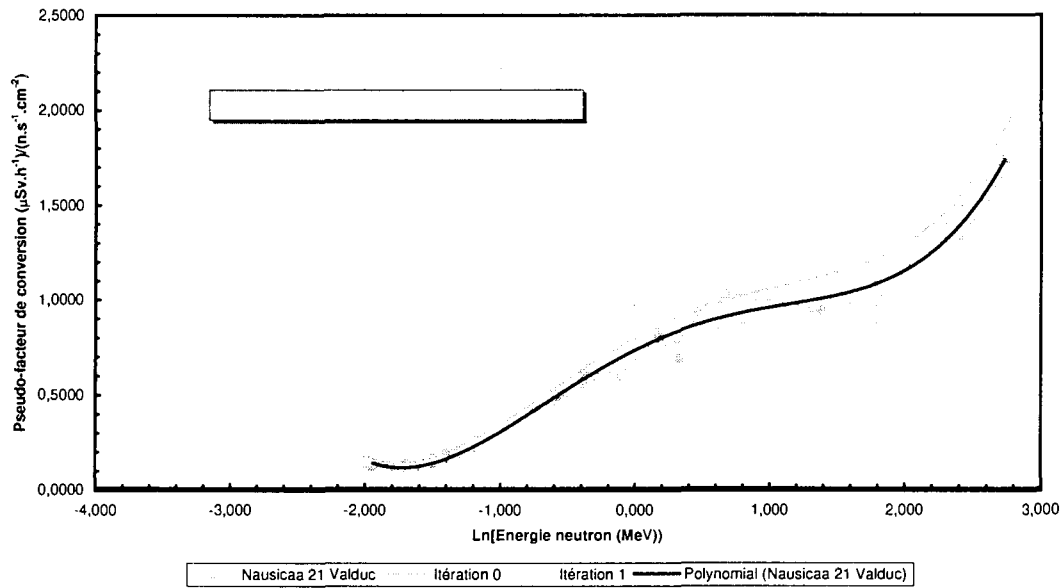


Figure 3 : Variation du pseudo-facteur de conversion associé au Nausicca ETCA.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

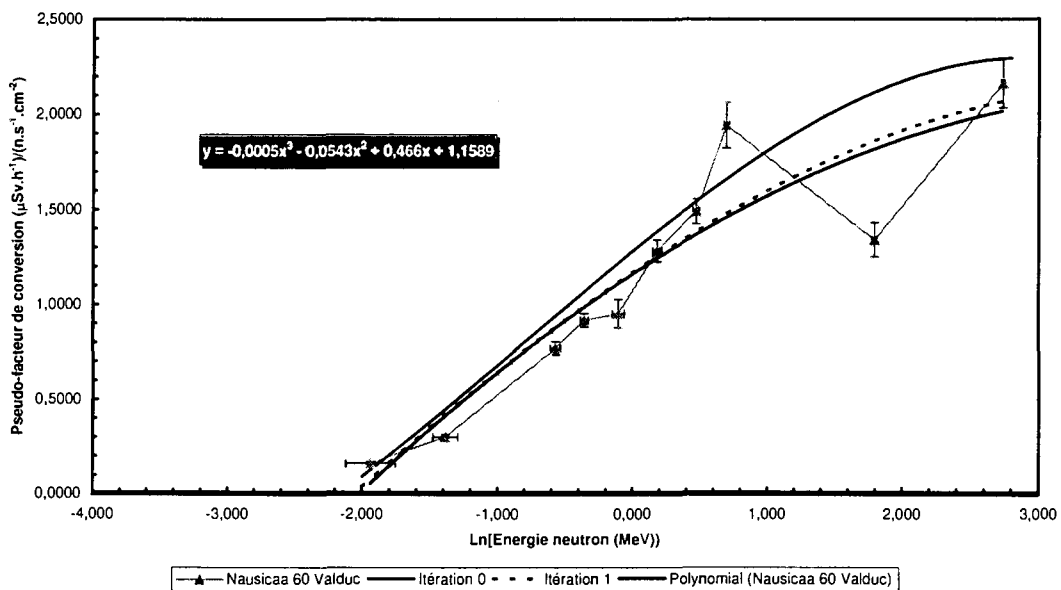


Figure 4 : Variation du pseudo-facteur de conversion associé au Nausicaa Valduc.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

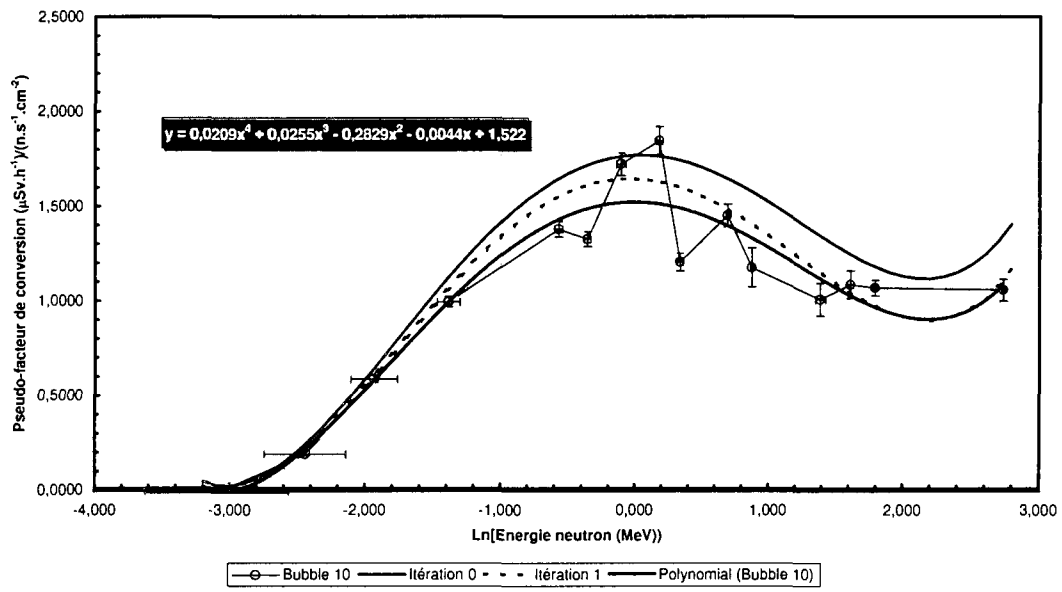


Figure 5 : Variation du pseudo-facteur de conversion associé aux dosimètres à bulles.

## Annexe 4 : Conformité des appareils d'ancienne génération à la CIPR60.

### 1 / Introduction

Cette étude n'est pas incluse dans le corps du texte où l'objectif est d'obtenir la réponse des appareils dans le cadre du domaine de qualification théorique des appareils : la documentation proposée par le constructeur indique la CIPR d'utilisation du matériel. Par ailleurs, la comparaison entre la fonction de réponse en énergie du détecteur et le facteur d'étalonnage obtenu sur source n'a de sens que si la même recommandation est adoptée dans chacun des deux cas.

Il s'avère cependant intéressant de savoir si le parc de systèmes dosimétriques dont dispose le CEA/DAM doit être renouvelé (pour sa part conforme uniquement à la CIPR21) à compter de la date d'entrée en vigueur exclusive de la CIPR60 (le 13/05/2000). Pour effectuer ce contrôle sur les dosimètres à bulles et les radiamètres Cramal, il suffit de changer la valeur du facteur de conversion dans l'équation 2.1 (§II.2) qui définit le DED  $H_{r\acute{e}el}$  de normalisation. La fonction de réponse  $\varepsilon(E)$  est ainsi obtenue de façon relative à la CIPR60.

L'aptitude à être conforme à la CIPR60 est garantie si certains critères requis par la CEI 1322 [9] sont respectés. En particulier, il faut étudier la variation de la réponse des appareils en fonction de l'énergie. Si elle est inférieure à  $\pm 50\%$ , quand elle est évaluée en CIPR60, le système de dosimétrie peut être déclaré apte à être utilisé de façon légale après le 13 mai 2000.

### 2 / Dosimètres à bulles BD-PND

Ces dosimètres individuels sont un des deux systèmes de dosimétrie d'ancienne génération étudiés dans ce rapport. Il est donc pertinent de leur appliquer le test de conformité à la nouvelle recommandation.

La figure 1 présente les fonctions de réponse établies dans le cas des dosimètres à bulles et pour des DED relativement élevés. La courbe rose rend compte de la réponse normalisée avec le facteur de conversion de la CIPR21 (identique à celle du corps du texte) et la noire permet la comparaison en CIPR60.

L'indépendance de la réponse des dosimètres en fonction du DED permet de généraliser les conclusions suivantes :

- naturellement, au-delà de 1 MeV d'énergie neutron, les fonctions de réponses évaluées dans les deux CIPR sont très comparables. En effet, les facteurs de conversions des recommandations sont quasi identiques dans cette zone. En revanche, dans la partie des énergies inférieures, il semble que la réponse des dosimètres à bulles soit plus constante en CIPR60 qu'en CIPR21. Cela signifie que ces dosimètres seront à même de respecter les critères de la CEI 1322 alors que cela n'était pas le cas en CIPR21.
- la stabilisation de la réponse en CIPR60 a cependant pour effet de sous-estimer le DED sur une large gamme en énergie et une réponse unité sur une source de l'ISO8529 n'est plus obtenue. Pour que cela soit à nouveau réalisé, il suffit de demander à ARIES d'évaluer la « sensibilité constructeur » (bulles.mrem<sup>-1</sup>) en CIPR60 plutôt qu'en CIPR21. Les dosimètres à bulles pourront alors être utilisés en toute légalité après la date d'entrée en vigueur de la CIPR60.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

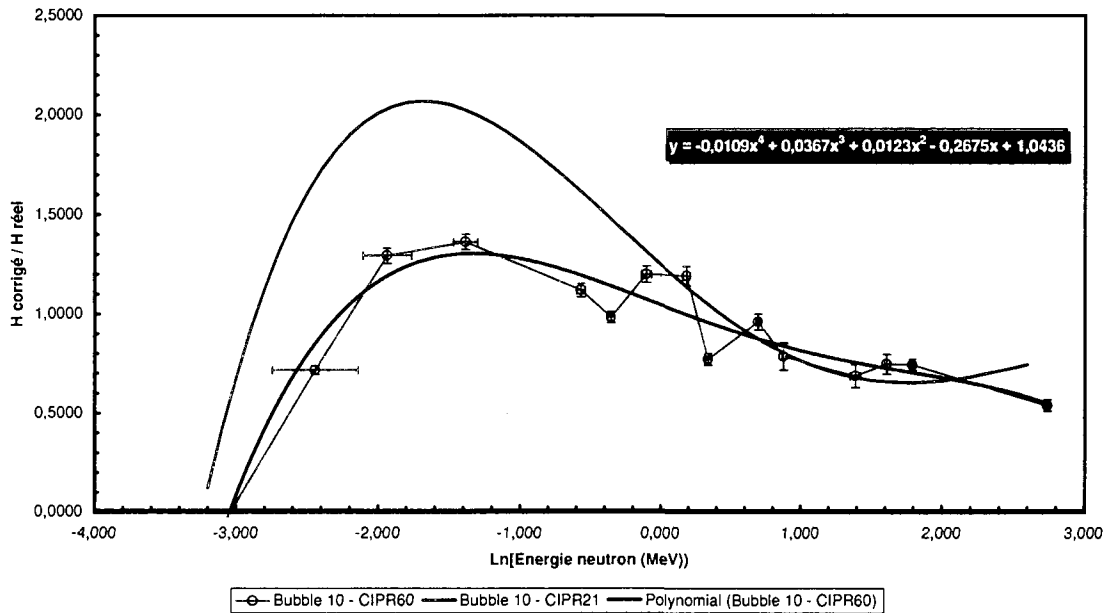


Figure 1 : Comparaison des réponses obtenues en CIPR21 et CIPR60 avec les dosimètres à bulles de sensibilité  $10 \text{ bulles.mrem}^{-1}$ .

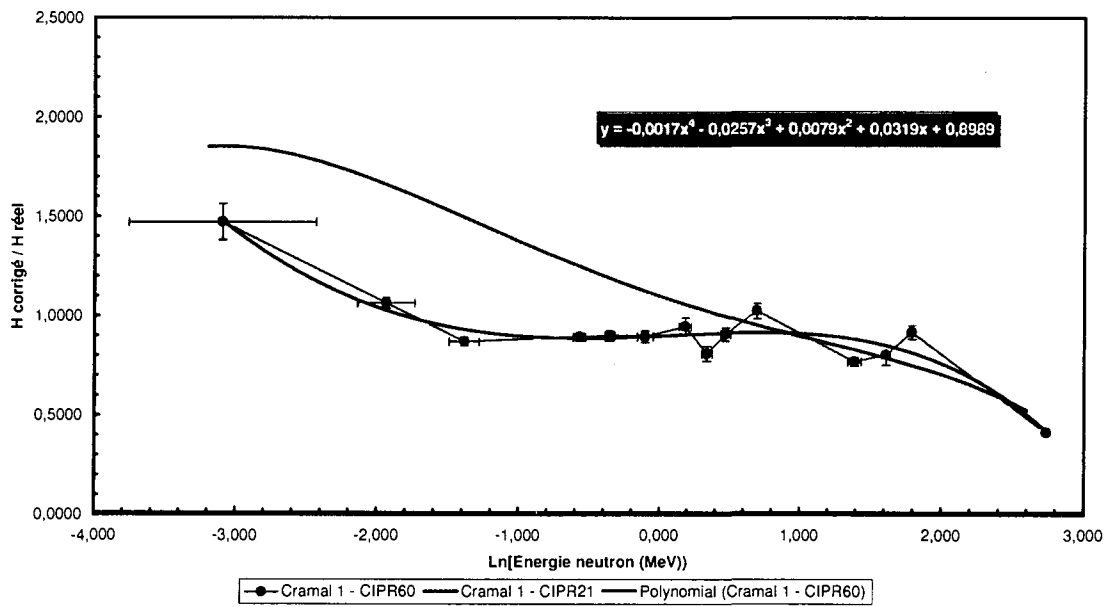
### 3 / Radiamètre Cramal

Ce compteur à Hélium 3, d'ancienne génération mais de conception voisine de celle du rem-mètre EGG-Lb6411, devrait être capable de satisfaire à la CIPR60 au même titre que son concurrent. Ce paragraphe a pour objet de démontrer cette réalité.

Les résultats qui permettent de comparer les réponses obtenues dans les deux CIPR et pour les deux radiamètres Cramal étudiés dans ce rapport sont présentés figures 2. Une nouvelle fois, l'indépendance au DED de la réponse de ces appareils permet de tirer des conclusions générales en s'appuyant sur une étude à haut débit :

- la stabilité des réponses des deux appareils Cramal est améliorée quand on passe de la CIPR21 à la CIPR60. La dépendance en énergie de cette réponse reste désormais dans la limite des  $\pm 50\%$  exigée par la CEI 1322 quel que soit le radiamètre Cramal utilisé.
- en accord avec les différences entre les facteurs de conversion des deux CIPR, les fonctions de réponse obtenues avec l'une ou l'autre des recommandations sont semblables au-delà de 1 MeV d'énergie neutron ( $\text{Ln}(E_n) = 0$ ).
- en CIPR21, la surestimation du DED à basse énergie est compensée à haute énergie pour obtenir une réponse unité avec une source d'*AmBe*. Cela n'est plus le cas en CIPR60 mais un simple étalonnage sur source avec cette dernière recommandation permettra de trouver le nouveau facteur de normalisation à appliquer aux mesures.

Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )



Etude en fonction de l'énergie neutron à haut débit ( $>10 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ )

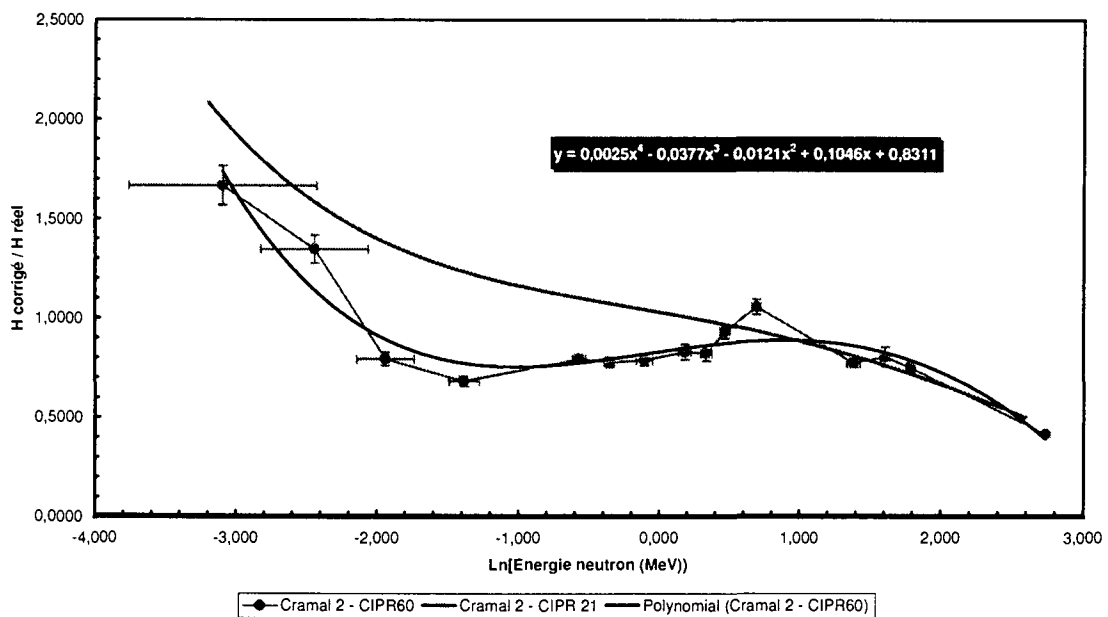


Figure 2 : Comparaison des réponses obtenues en CIPR21 et CIPR60 avec les deux radiamètres Cramal de l'étude.

## Références bibliographiques

- [1] Rapport interne
- [2] Convention d'interface : Protocole CEA/DAM-SPRA
- [3] ICRP Publication 21, Data for Protection Against Ionizing Radiation from External Sources, Pergamon press, Oxford 1973.
- [4] Directive Européenne n°96/26/Euratom du 13 mai 1996, parue au JOCE du 29/06/96
- [5] ICRP Publication 60, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon press, Oxford 1990.
- [6] ICRP Publication 74, Conversion Factor for use in Radiological Protection against External Radiation, Annals of the ICRP Volume 26 N° 3-4 (1996).
- [7] ICRU Report 57, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation.(August 1998).
- [8] Norme ISO 8529 (1989).
- [9] Norme CEI (Commission Electronique Internationale) 1322, « Débitmètres à poste fixe, ensemble d'alarme et moniteurs pour rayonnement neutroniques compris entre l'énergie thermique et 15 MeV » (1994).
- [10] Rapport interne
- [11] Rapport interne
- [12] Rapport interne
- [13] Rapport d'essais CTHIR / 94 – 101 (DPEI/STESR) « Dosimètres neutrons à bulles types BD 100 R PND et BDT ».
- [14] Rapport interne
- [15] Bulletin BNM, n°37, Juillet 1979