

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Spectrométrie des neutrons en champs complexes : de nouveaux outils ?

Véronique Lacoste

Journées de la SFRP

*‘Les techniques de mesure en
radioprotection et les défis rencontrés
dans les milieux industriel et médical’*

19-20 Novembre 2013

IRSN/Pole Radioprotection-HOM

Service de Dosimétrie Externe

**Laboratoire de Métrologie et de
Dosimétrie des Neutrons**

Blg 159 - BP3

13115 Saint-Paul-lez Durance, Cedex
France

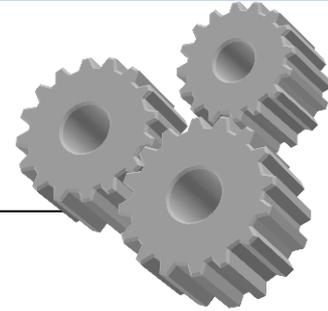
Tel: +33 4 42 19 9573

Veronique.Lacoste@irsn.fr



Généralités

De la complexité des champs neutroniques...



Processus de production des neutrons

- Processus naturel d'un isotope naturel ou artificiel
- Particules chargées ou photons de haute énergie créant de manière spontanée ou induite des neutrons après interaction avec une cible

Energie des neutrons dépendante

- Du type d'interaction
- De la cinématique de réaction
- Des niveaux excités du noyau au repos

Intensité

- Dépendante de l'énergie et de l'angle d'émission
- Des écrans et blindages autour de la source

Particules accompagnantes

- Rapport n/γ ?
- Autres (hadrons)

Distribution en énergie

- Dépendant du processus de production, du modérateur et des structures environnantes :
 - Mono énergétique
 - Quasi mono énergétique
 - Large (blanc)

Champs complexes

En milieu industriel

Production d'énergie nucléaire et cycle du combustible

Industrie nucléaire

- Production d'énergie,
- Fabrication et recyclage du combustible
- Transport

Principales caractéristiques des champs de rayonnements

- Trois domaines en énergies, un pic de haute énergie (fission), un domaine intermédiaire (modération) et une contribution thermique (thermalisation)
- Forme, amplitude, énergie du pic de haute énergie, directionnalité dépendantes fortement des blindages et des structures environnantes

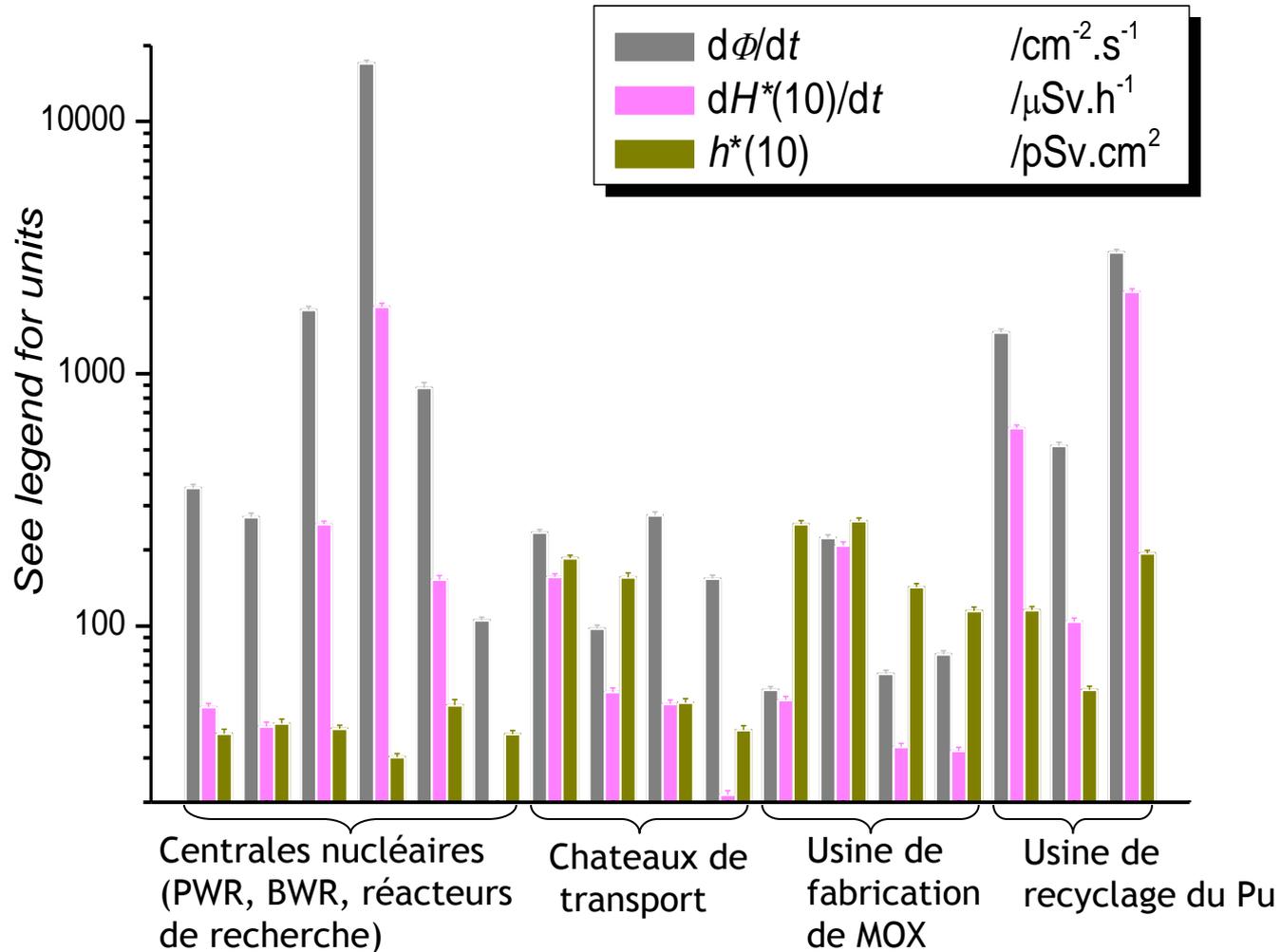


- EVIDOS : mesures récentes et exhaustives aux postes de travail représentatifs de l'industrie nucléaire en Europe, avec des informations sur l'énergie et la directionnalité des champs produits.

Champs complexes

En milieu industriel

Production d'énergie nucléaire et cycle du combustible



Champs complexes

En milieu industriel

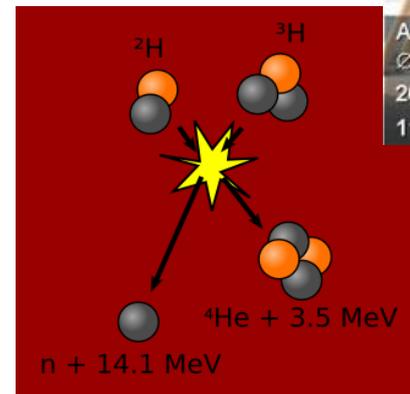
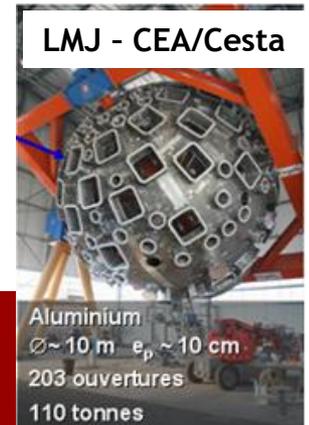
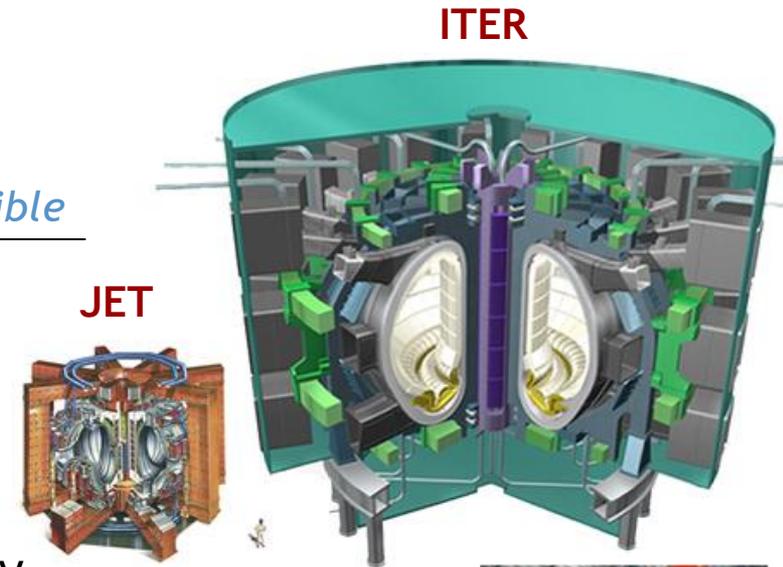
Production d'énergie nucléaire et cycle du combustible

Rayonnements neutroniques autour des installations expérimentales pour la fusion thermonucléaire

- neutrons et photons
- E_n max: 2.5 MeV pour plasmas D-D et 14.1 MeV pour plasmas D-T
- Champs complexes mixtes de grande intensité
- Pulsé x1 (Laser, ex. LMJ)

Installations

- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) :
 - Débit d'émission neutronique jusqu'à 10^{14} s^{-1} lors de la phase d'opération en DD, 10^{21} s^{-1} pour DT



Champs complexes

En milieu médical

Production de neutrons secondaires en radiothérapie et hadron thérapie

■ Autour des installations de radiothérapie (LINACs)

- Réactions (e^-,n) ou (γ,n)
- Faisceaux primaires de particules $E > 7-8$ MeV
- Champs neutroniques à 3 composantes, thermique, intermédiaire et rapide:
 - Processus d'évaporation avec une énergie moyenne autour de 1 MeV
 - Thermiques dus aux diffusions sur les structures en béton
- Isocentre : $\Phi_{\text{tot}} \sim 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{Gy}^{-1}$, $H^*(10) \sim \text{qq mSv} \cdot \text{Gy}^{-1}$

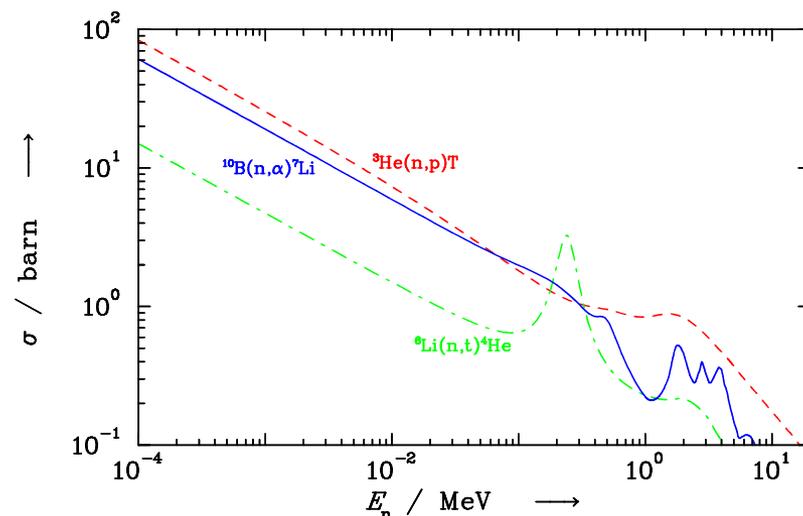
■ Autour des installations de hadron-thérapie (principalement cyclotrons)

- Réactions de diffusions inélastiques (p,n), (p,xn), ' $(^{12}\text{C},n)$ ', etc
- Spallation $E_{n\text{max}} \sim E_{pp}$ (qq dizaines à plusieurs centaines MeV) et évaporation ($E_n < 10$ MeV)
- Isocentre : $\Phi_{\text{tot}} \sim 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{Gy}^{-1}$, $H^*(10) \sim \text{qq dizaines } \mu\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$

'Nouveaux' outils : les systèmes ERBSS

Généralités

- Ensemble modérateur comprenant des matériaux hydrogénés et des coquilles métalliques
- Détecteur central sensible aux neutrons thermiques
- Quelques exemples
 - [NEMUS / PTB](#) (2002)
 - [ERBSS / INFN et UAB](#) (2006)
 - [HERMEIS / IRSN](#) (2010)



- ☞ Les systèmes BSS ou ERBSS présentent l'inconvénient d'être lourds, encombrants et nécessitent un temps de manipulation non négligeable.
- ☞ De nouveaux systèmes compacts ont été récemment étudiés et sont déjà disponibles pour les études de postes.

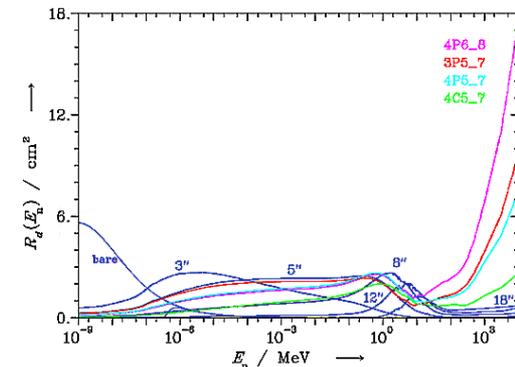


Le système ERBSS du PTB : NEMUS

- 12 sphères en polyéthylène (3 à 18 pouces)
- 4 sphères avec des coquilles métalliques de Pb, Cu
- Compteur proportionnel sphérique à ^3He (type SP9, Centronic Ltd., UK)

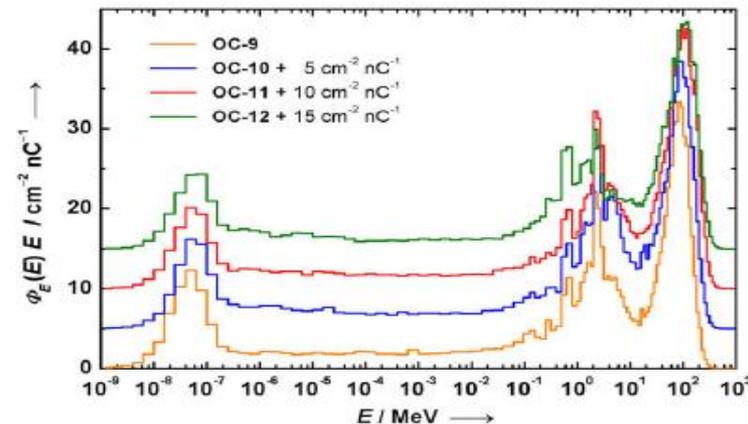


- Applications :**
 - Hadron thérapie / Médical (ex PSI)
 - Dosimétrie aérospatiale (à bord)
 - Rayonnement cosmique naturel



- Spectres neutrons en hadron thérapie (GSI⁽¹⁾)**

- ions ^{12}C à 400 MeV/u
- Mesures derrière le blindage de la salle de traitement
- Neutron spectral fluence
 - Pic d'évaporation ~ 2-3 MeV
 - H.E pic centré ~ 100 MeV



(1) Wiegel, B., et al., *Intercomparison of radiation protection devices in a high-energy stray neutron field*, Radiation Measurements (2009)



Les systèmes ERBSS : INFN et UAB

■ Système INFN

- 7 sphères en polyéthylène (3 à 12 pouces)
- 3 sphères avec des coquilles métalliques de Pb, Cu
- Compteur proportionnel cylindrique à ${}^6\text{LiI}$

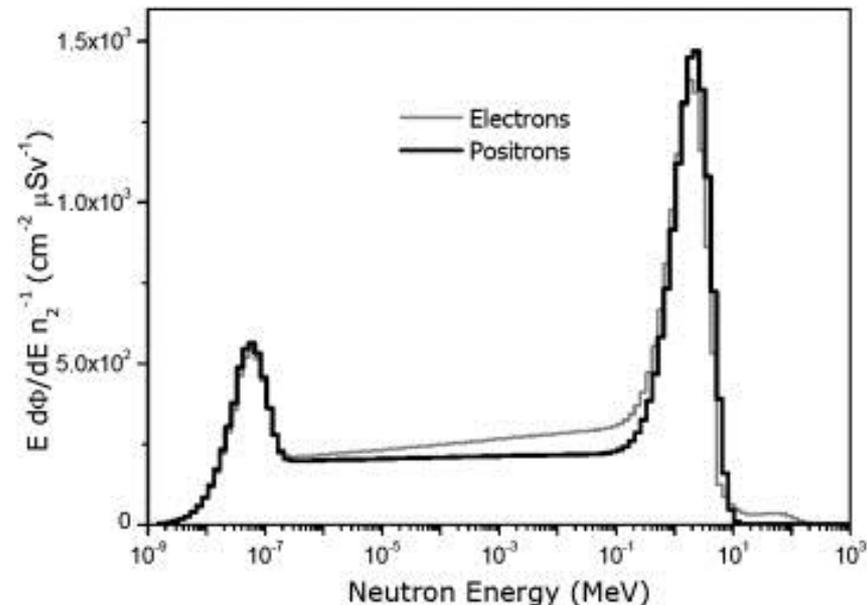
■ Applications :

- Hadron thérapie / Médical (ex PSI)
- Recherche

Spectres neutrons mesurés auprès de l'installation de recherche DAΦNE - 510 MeV électron-positron collisionneur

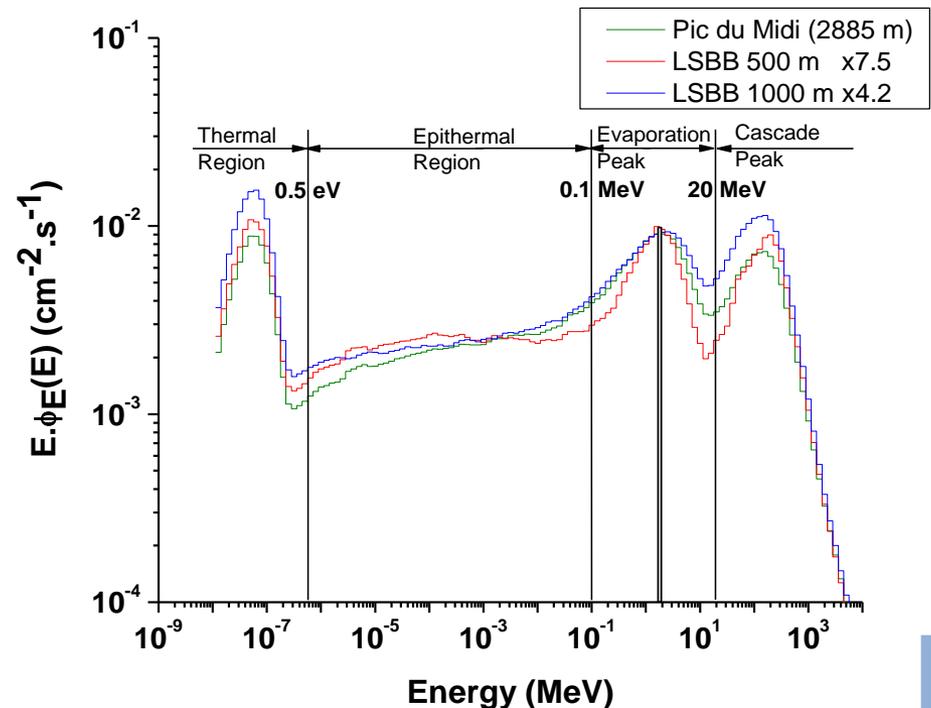
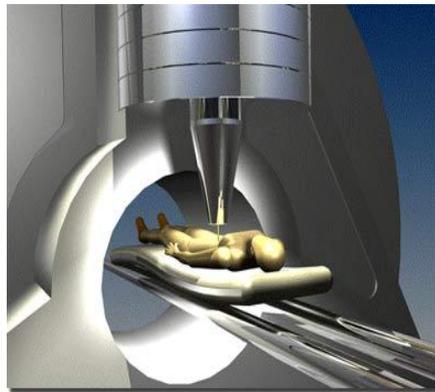
■ Système UAB

- 8 sphères en polyéthylène (2.5 à 12 pouces)
- 2 sphères avec des coquilles métalliques de Pb, Cu
- Compteur proportionnel ortho-cylindrique à ${}^3\text{He}$ (type EURYSIS, modèle 05NH1)



Le système ERBSS de l'IRSN : HERMEIS

- 11 sphères en polyéthylène (3 à 15 pouces)
- 3 sphères avec des coquilles métalliques de Pb, W
- Compteur proportionnel sphérique à ^3He de diamètre 5 cm (type LND, USA) (10 atm)
- Grande efficacité, adapté aux faibles débits
- Applications :
 - Rayonnement cosmique naturel
 - Hadron thérapie / Médical (ex ICPO)



Nouveaux outils : du BSS au NNS !

Nested Neutron Spectrometer

7 cylindres en polyéthylène (22 cm de diamètre max)

Masses: 0.2, 0.33, 0.50, 1.0, 1.75, 4.2 et 8.1 kg

Compteur proportionnel cylindrique à ^3He (2 atm)

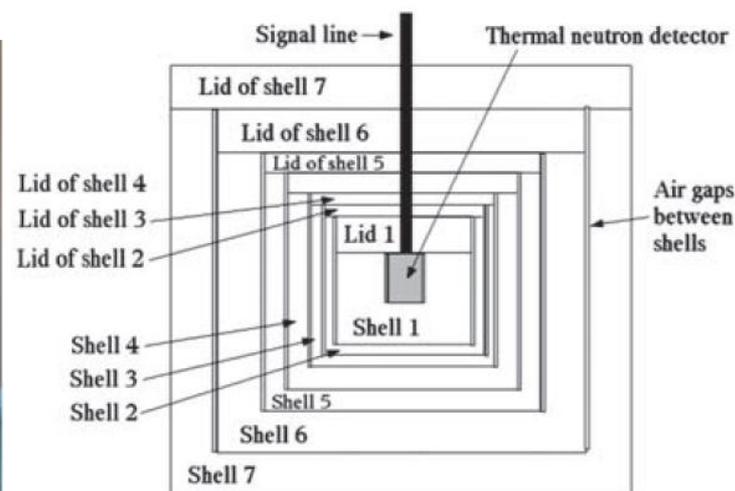
Adaptation pour le domaine médical

- cylindre en Cuivre
- mesures en forts débits avec le mode courant (débits $>10^4 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) avec un nano ampèremètre
- 7.0 fA par réaction $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ par seconde

TABLE 1. INSTRUMENT COMPARISON OF $H^*(10)$ RATES ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)

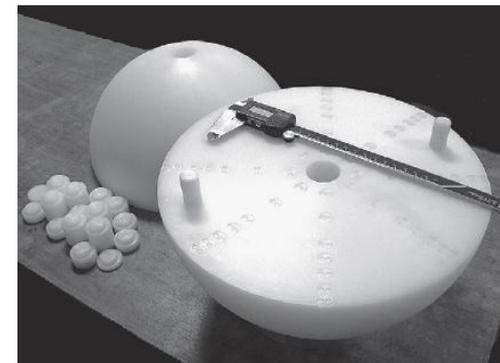
Fields	Expected	NNS	BSS	TEPC
Bare Cf-252 (2 m)		566	620	
Mod. Cf-252 (1 m)		399	453	
AmBe	18.3	17.2	18.3	
88 keV neutron [#]		17	23	
510 keV neutron [#]		442	470	
G2 – BPW		42	46	14.6
G2 – HTAR		51	67	23.3

[#] These results, for accelerator based neutrons, are in units of nSv μC^{-1} , i.e. normalized to integrated proton beam charge.



Nouveaux outils : Spectromètre à modérateur unique

- Deux 1/2 sphères modératrices en polyéthylène de 30 cm de diamètre
- Paires de TLD(*) ($^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ Mg, Cu, P) ou feuilles d'activation de Dysprosium (Dy-Single Sphere Spectrometer**)
- Dy : insensibles aux photons, σ_{th} élevée (2700 b), demi-vie 2.334 h, émetteur beta (comptage sur place)
- Applications



■ Domaine médical (radiothérapie)

Quantity	Dy-BSS	Dy-SSS
$\dot{\phi}$ ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$(3.18 \pm 0.10) \times 10^5$	$(2.9 \pm 0.2) \times 10^5$
ϕ/D ($\text{cm}^{-2} \text{MU}^{-1}$)	$(3.82 \pm 0.14) \times 10^4$	$(3.5 \pm 0.3) \times 10^4$
$H^*(10)/D$ (mSv Gy^{-1})	0.383 ± 0.018	0.36 ± 0.04
Fluence fractions		
E < 0.4 eV	22.0%	21.3%
0.4 eV < E < 10 keV	21.8%	22.2%
E > 10 keV	56.2%	56.5%

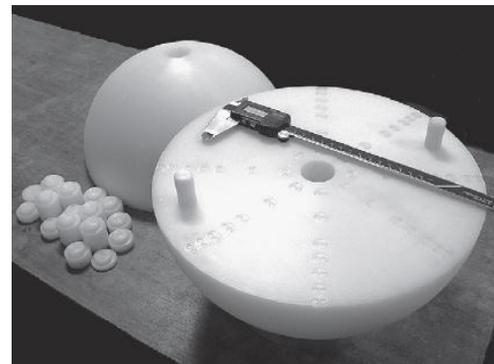
Comparaison de résultats entre BSS (Dy) et SSS (Dy) auprès d'un LINAC médical de 15 MV ($500 \text{ MU} \cdot \text{min}^{-1}$) (photo-neutrons)

(*) Gomez-Ros et al. *Radiation Measurements*, 45 (2010) 1220-1223

(**) Bedogni et L., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 684 (2012) 105-108

Nouveaux outils : spectromètre à modérateur unique : NESCOFI@BTF

- **Projet NESCOFI@BTF: 2 spectromètres, l'un isotrope, l'autre directionnel, permettant de réaliser des mesures en temps réel, entre eV - GeV**
- **Un seul ensemble modérateur, équipé de multiples détecteurs actifs sensibles aux neutrons thermiques (TND)**
 - SP² : spectromètre avec une réponse isotrope
 - CYSP : spectromètre directionnel
- **Applications**
 - Accélérateurs de recherche
 - Domaine médical et industriel
 - Aérospatial
 - Sécurité
 - Rayonnement cosmique



Avec l'aimable autorisation de R. Bedogni et co-auteurs - NEUDOS12, 3-7 Juin 2013, Aix-en-Provence.

Nouveaux outils : spectromètre à modérateur unique : NESCOFI@BTF

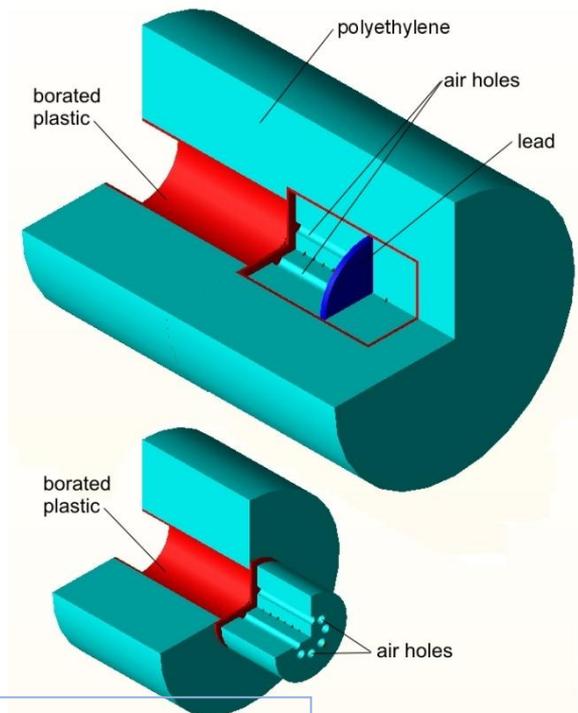
SP2 :

- 31 TNDs arrangés selon 3 axes perpendiculaires et à 5 distances radiales (5,5; 7,5; 9,5; 11 et 12,5 cm (externe)) et au centre d'une sphère modératrice en PEHD de 25 cm de diamètre
- Coquille de 1 cm de Plomb pour les hautes énergies (entre 3,5 et 4,5 cm)

CYSP:

- Cylindre en PE + multiples TNDs disposés selon l'axe du cylindre
- Collimateur et blindage : plastique boré pour éliminer les contributions latérales sur tout le domaine en énergie

Les deux prototypes, en version active (SP² caractérisé en version passive avec Dy) sont en cours de caractérisation.



Avec l'aimable autorisation de R. Bedogni et co-auteurs - NEUDOS12, 3-7 Juin 2013, Aix-en-Provence.

De la fluence à la dose efficace...?

Dose efficace

- Grandeur de protection pour l'exposition aux rayonnements, qui dépend de la direction d'incidence (AP, PA, LLAT, RLAT) et des distributions ISO ou ROT.

Dosimétrie aux postes de travail

- Débitmètres neutrons
 - Généralement isotrope, sur-réponse aux postes de travail (réacteurs nucléaires) d'un facteur 2 si étalonnés auprès des sources standard ($^{241}\text{Am-Be}$ ou ^{252}Cf)
 - Mesure de l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$, grandeur opérationnelle qui est indépendante de la direction du rayonnement incident.
 - Si l'on veut comparer $H^*(10)$ à la dose efficace, il faut supposer que l'incidence du rayonnement est **antero-posterior (AP)**, cette direction étant celle pour laquelle les coefficients fluence-à-dose efficace sont les plus élevés.
- Dosimètres personnels
 - Mesure de l'équivalent de dose personnelle $H_p(10,\theta)$, grandeur opérationnelle qui dépend de la direction du rayonnement incident.
 - La réponse des dosimètres personnels est généralement optimisée pour l'incidence à 0° , où les valeurs des coefficients de conversion fluence-à- $H_p(10)$ sont les plus élevés.

Distribution angulaire et en énergie de la fluence neutronique ?



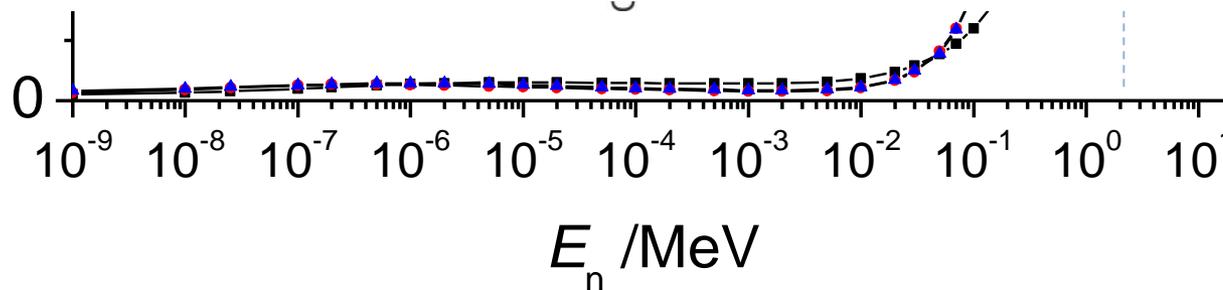
Dose efficace aux postes de travail de l'industrie nucléaire en Europe

GO or GP (see legend) / pSv.cm²
H_p(10) / H*(10)

Table 1. Ratio of dose values for different workplace fields (see text).

Workplace	H _{p,DS} (10)/H* _{DS} (10)	E _{DS} /H* _{DS} (10)	E _{DS} /H _{p,DS} (10)	H* _{BS} (10)/H* _{DS} (10)
CANEL	0.83 (21)	0.52 (8)	0.63	1.08 (20)
SIGMA	0.91 (26)	0.67 (19)	0.73	0.98 (36)
Krümmel SAR control rod room	0.22 (2)	0.32 (3)	1.43	1.11 (33)
Krümmel reactor top	0.60 (2)	0.45 (3)	0.75	1.02 (39)
VENUS Pos. F reactor	0.29 (3)	0.33 (2)	1.14	1.19 (22)
VENUS Pos. C control room ^a				
Ringhals Pos. L lock	0.47 (4)	0.42 (3)	0.89	1.19 (25)
Ringhals Pos. A containment	0.33 (3)	0.35 (3)	1.06	1.41 (35)
Krümmel cask midline	0.70 (8)	0.36 (5)	0.51	0.96 (32)
Krümmel cask side	0.52 (12)	0.30 (7)	0.59	1.41 (30)
Ringhals Pos. N cask end	0.61 (4)	0.39 (2)	0.64	1.05 (31)
Ringhals Pos. D cask midline	0.73 (14)	0.40 (3)	0.55	0.72 (15)
Belgonucléaire Pos. 1 Bare rods	0.57 (11)	0.43 (13)	0.75	1.05 (25)
Belgonucléaire Pos. 2A Unshielded rack	0.78 (2)	0.48 (7)	0.62	1.02 (30)
Belgonucléaire Pos. 2B Shielded rack	0.64 (3)	0.39 (5)	0.61	1.09 (36)
Belgonucléaire Pos. 3 Stockroom	0.54 (2)	0.36 (2)	0.66	1.35 (30)

^aNo measurements performed with the directional spectrometer because of limited time and low dose rates



De la fluence à la dose efficace...?

Distribution angulaire de la fluence neutronique ?

▪ Luszik-Bhadra et al., 2004



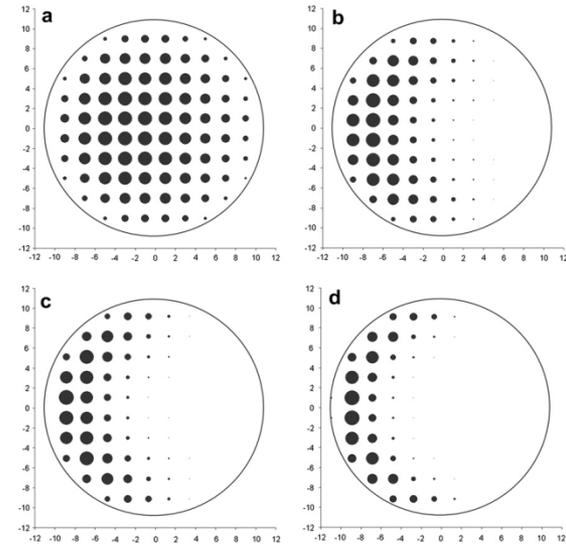
▪ D'Errico et al., 2004



▪ Taylor et al., 2010

Principe du 'Moniteur de Dose Efficace'

- Scintillateur sphérique (8 in) dopé avec un élément de grande section efficace à l'énergie thermique (^{10}B ou ^6Li) (ex BC523A, scintillateur dopé au bore)
- 4 photo multiplicateurs (ou plus) qui détectent en coïncidence les captures (localisation dans le scintillateur \Rightarrow informations sur la direction et l'énergie)
- Calcul de la réponse en dose efficace à partir des données de capture et des coefficients de E pour les directions conventionnelles et moyennés

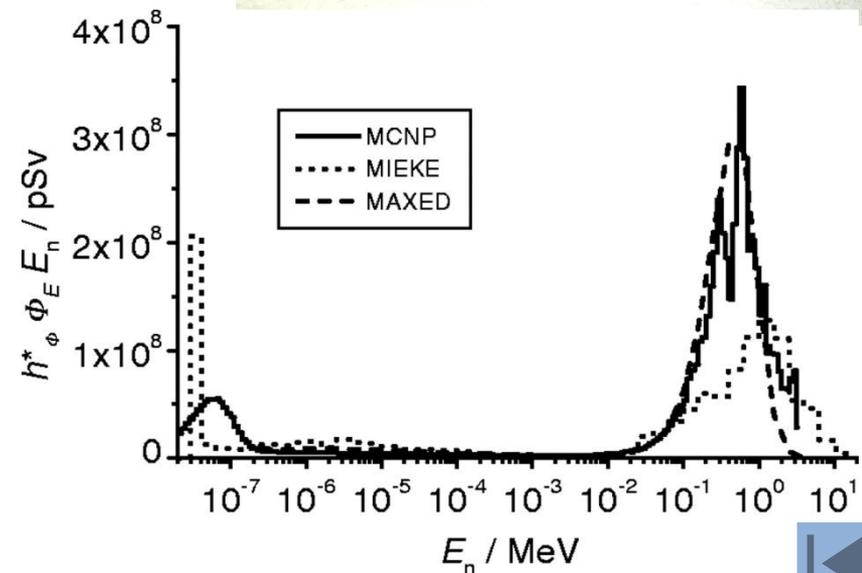
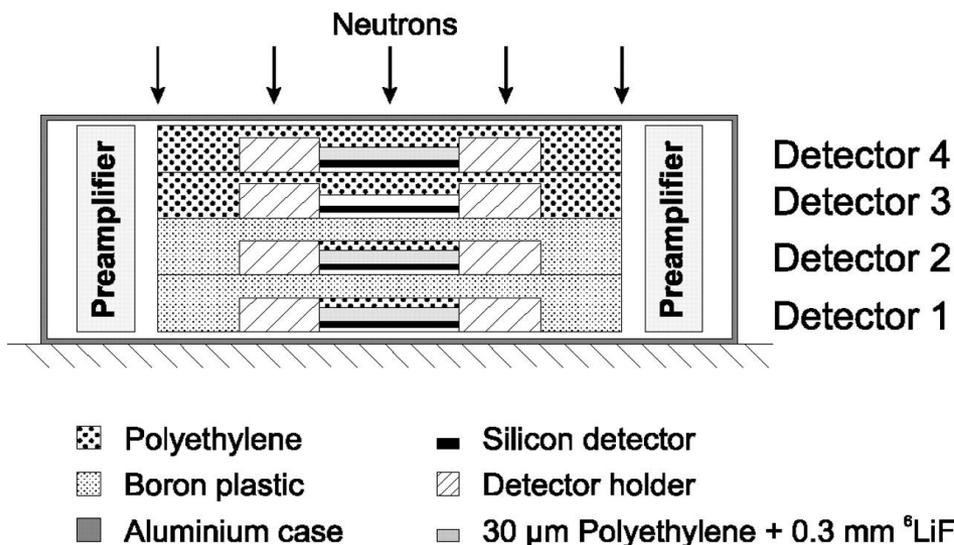


Distribution spatiale des captures dans le ^{10}B en fonction de l'énergie incidente (6,31 MeV, 63,1 keV, 631 eV, 6,31 eV) avec un champ parallèle, incident de gauche à droite



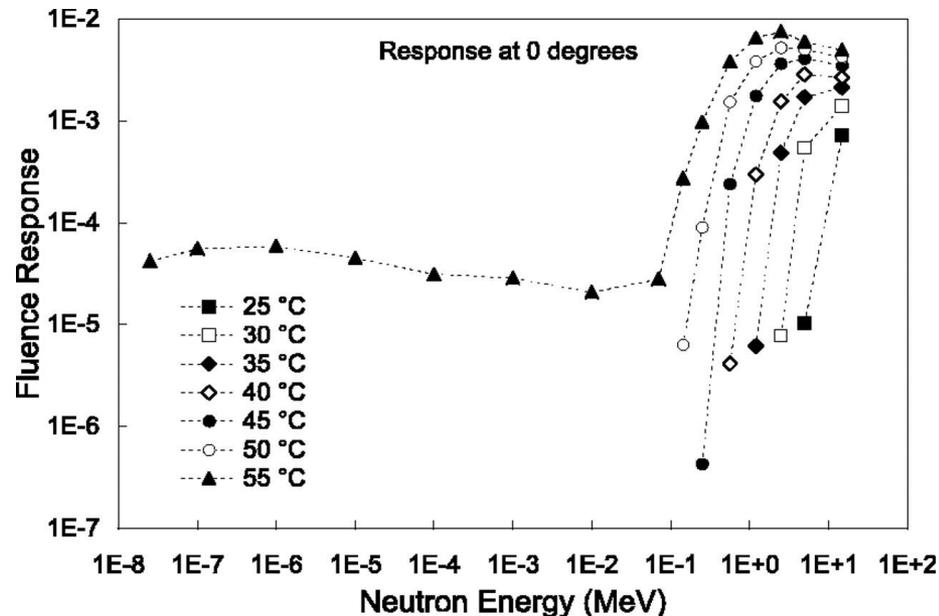
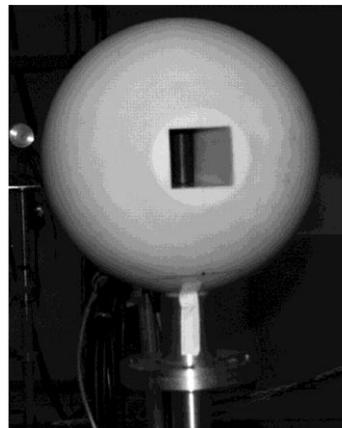
Spectromètre directionnel (PTB)

- 6 capsules sur une sphère de 30 cm de diamètre en $(\text{CH}_2)_n$
- Chaque capsule contient 4 diodes Silicium
- Chaque diode est couverte d'un modérateur d'une épaisseur différente
- $H^*(10)_{\text{DS}}/H^*(10)_{\text{ref}} = 1,06$ (CANEL/T400)



Spectromètre directionnel (DIMNP)

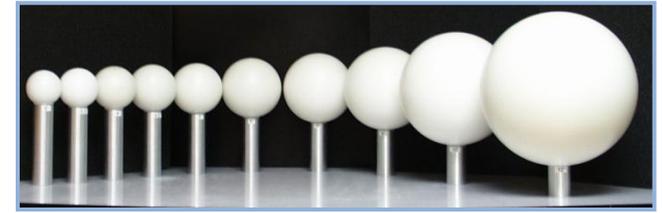
- Sphère en nylon de 30 cm de diamètre
- Détecteur = détecteur à émulsion surchauffée, avec une ouverture angulaire de 1/6 stéradian
- Signaux détectés acoustiquement, température du détecteur variables entre 30 et 55°C.
- Temps de mesure trop long (variation de la température, rotation du spectromètre, et comptage des bulles)



Conclusions

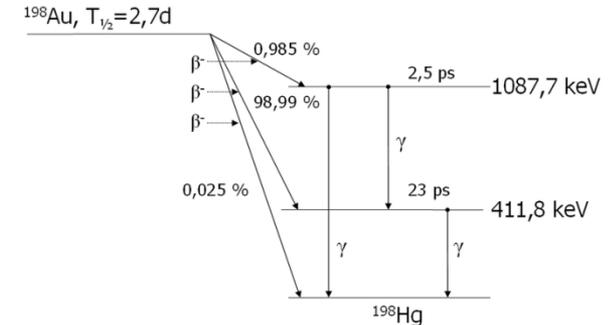
- Emergence de nouveaux champs dans le médical mais aussi dans le nucléaire
- Hauts flux, hautes énergies
- Nouveaux outils plus compacts et adaptés aux hautes énergies
- Peu/pas de R&D pour la spectrométrie directionnelle depuis 10 ans
- Surestimation systématique de la dose efficace
 - Quelles conséquences pour les études épidémiologiques ?
 - Cette surestimation a-t-elle un coût pour les exploitants ?

Neutrons en radiothérapie



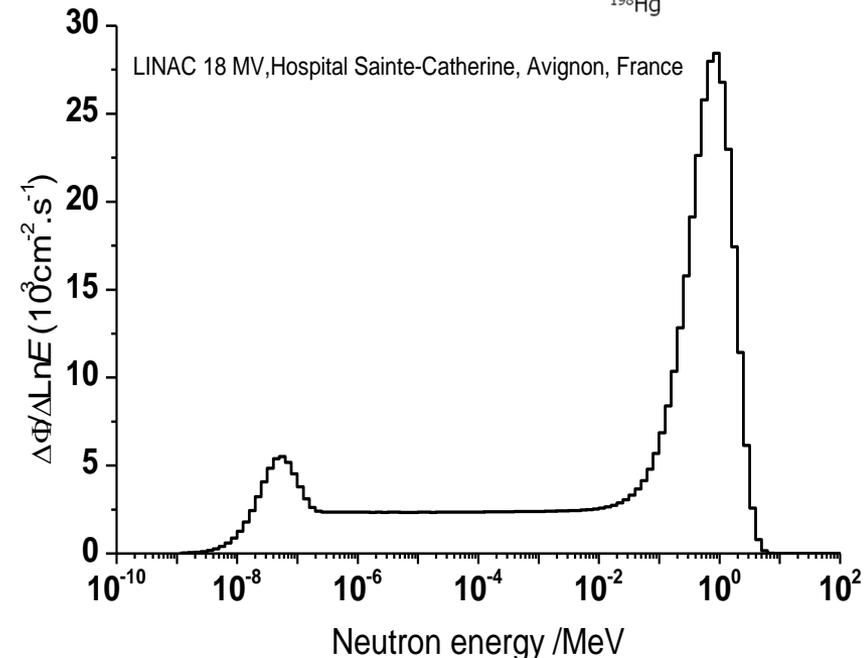
Installation de radiothérapie, LINAC de 18 MV⁽¹⁾:

- LINAC : Varian Clinac 2100C, 18MV,
Champ X-ray = $10 \times 10 \text{ cm}^2$;
X-ray débit de dose = 1 Gy/min
- Mesures avec un système de sphères de Bonner passif + $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
- E_{moy} du pic rapide ~ 1 MeV
- Fluence et débits de dose rates à l'**isocentre**



➤ Résultats à l'isocentre

Φ_{tot} ($10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ Gy}^{-1}$)	280 ± 26
$E_{\text{av.}}$ (keV)	516 ± 66
$H^*(10)$ ($\mu\text{Sv Gy}^{-1}$)	$(54.9 \pm 2.9) \times 10^2$

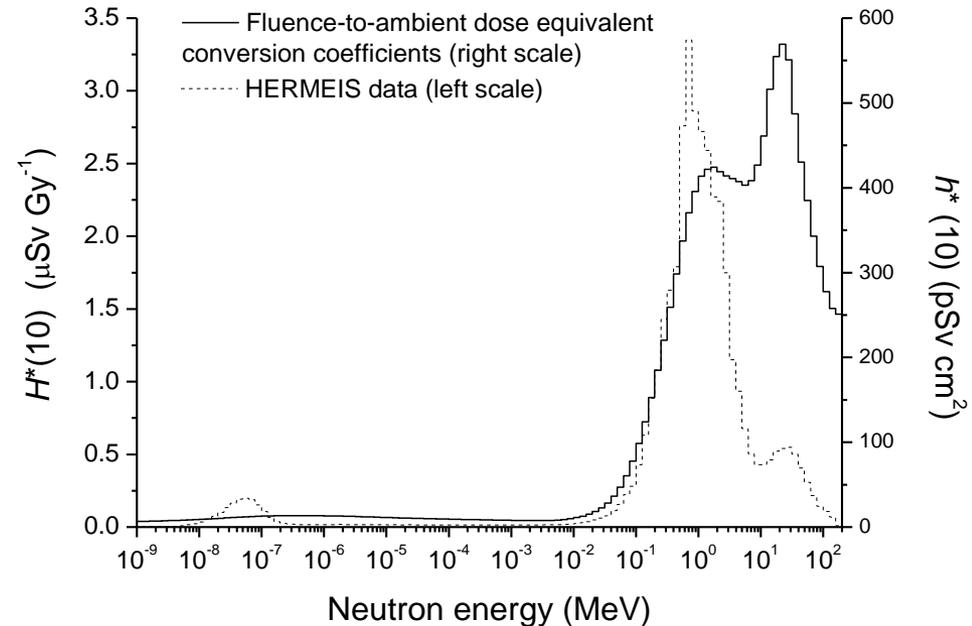


⁽¹⁾ K. Amgarou, V. Lacoste, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **56** (2009) 2885

Neutrons secondaires en proton thérapie

Installation de proton thérapie

- Cyclotron de 200 MeV dégradé 73 MeV et 178 MeV
- Mesures avec un système ERBSS
- E_{moy} du spectre ~ 1,5 MeV et 2,5 MeV
- Débits de fluence et de d'équivalent de dose ambiant

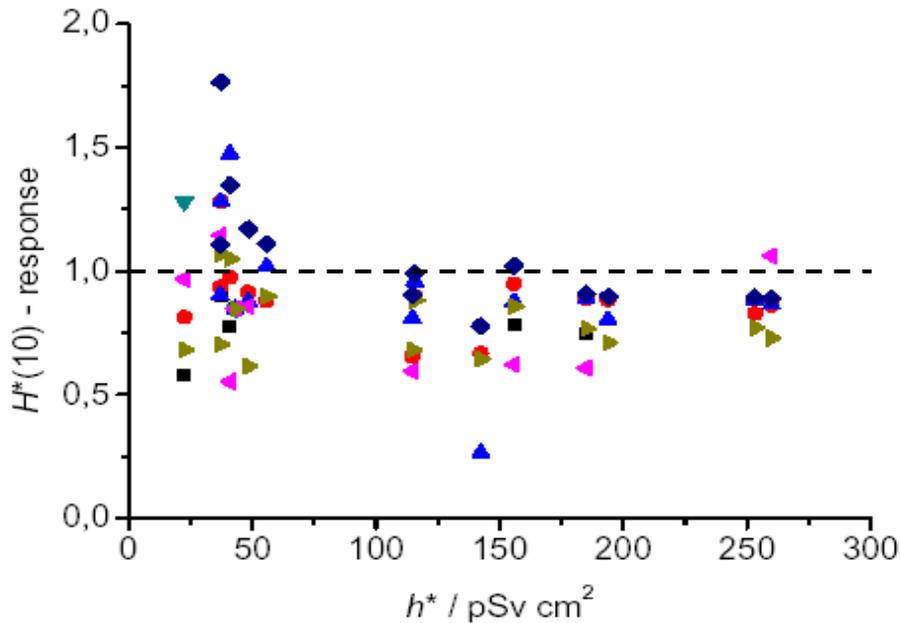


➤ Résultats

Group	Fluence ($10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ Gy}^{-1}$)	E_{av} (MeV)	$H^*(10)$ ($\mu\text{Sv Gy}^{-1}$)	Fluence fractions			
				$E < 0.5 \text{ eV}$	0.5 eV - 10 keV	10 keV - 10 MeV	$E > 10 \text{ MeV}$
HERMEIS	353 ± 18	1.45 ± 0.22	40 ± 10	41%	20%	37%	3%
MCNPX	754 ± 23	1.51 ± 0.05	83.0 ± 2.5	44%	20%	33%	3%

Réponses de débits-mètres et de dosimètres personnels aux postes de travail de l'industrie nucléaire

Réponses des débitmètres d'ambiance en fonction du coefficient de conversion moyen $h^(10)$*



Réponses des dosimètres personnels en fonction du coefficient de conversion moyen $h^(10)$*

