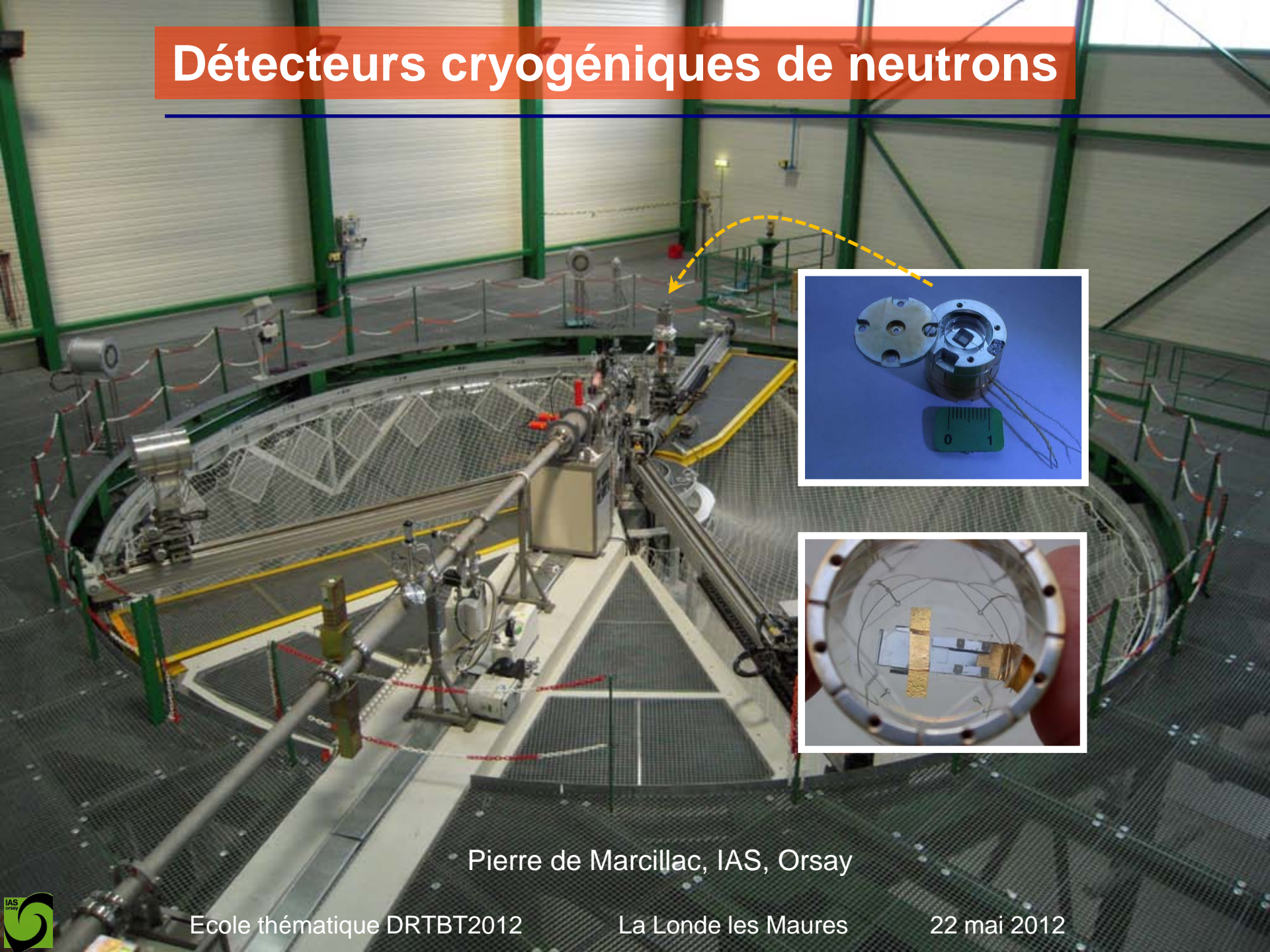


Détecteurs cryogéniques de neutrons



Pierre de Marcillac, IAS, Orsay

- ❑ La détection « cryogénique » des neutrons
 - ❑ Généralités sur les neutrons
 - ❑ Interactions des neutrons avec la matière
 - ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
 - ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives
- ❑ Sources de neutrons
- ❑ Références

- ❑ La détection « cryogénique » des neutrons
 - ❑ Généralités sur les neutrons
 - ❑ Interactions des neutrons avec la matière
 - ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
 - ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives
- ❑ Sources de neutrons
- ❑ Références

Neutrons

1. la découverte (1932)



Sir James Chadwick
(1891-1974)

- ✓ Réaction (α, n)
- ✓ Chadwick prouve que l'interprétation correcte de la réaction ${}^4\text{He} + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$ est l'émission d'une particule

- de charge nulle
- à peine plus lourde que le proton
 - $M_n \sim 939.5653 \text{ MeV}/c^2$
 - $M_p \sim 938.2720 \text{ MeV}/c^2$
 - ($M_n/M_p \sim 1.0014$)

→ fort pouvoir de pénétration dans la matière

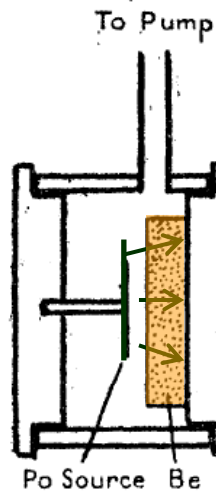
→ instabilité du neutron libre

($\tau \sim 15 \text{ mn}$; $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$)

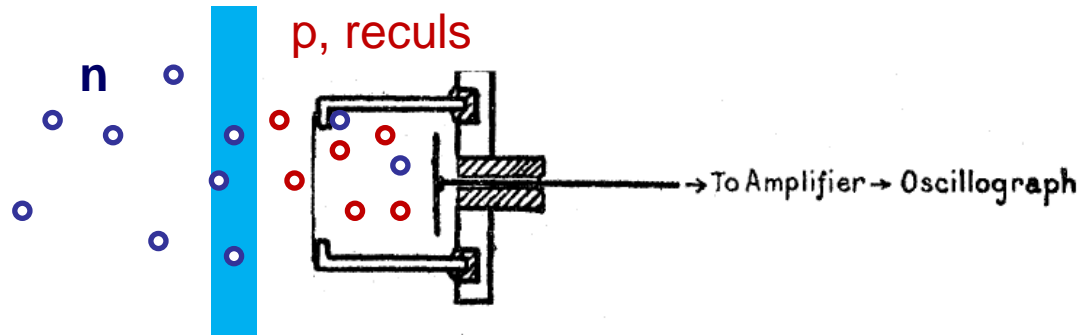
→ transfert cinématique très efficace sur les cibles hydrogénées



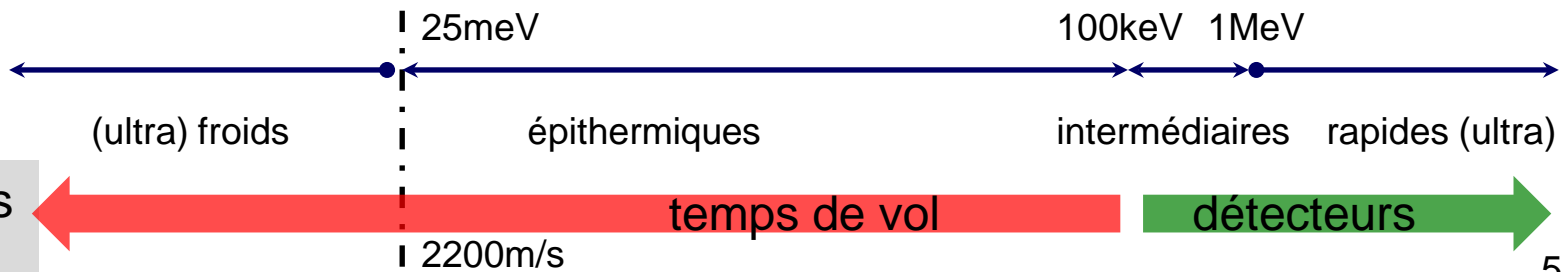
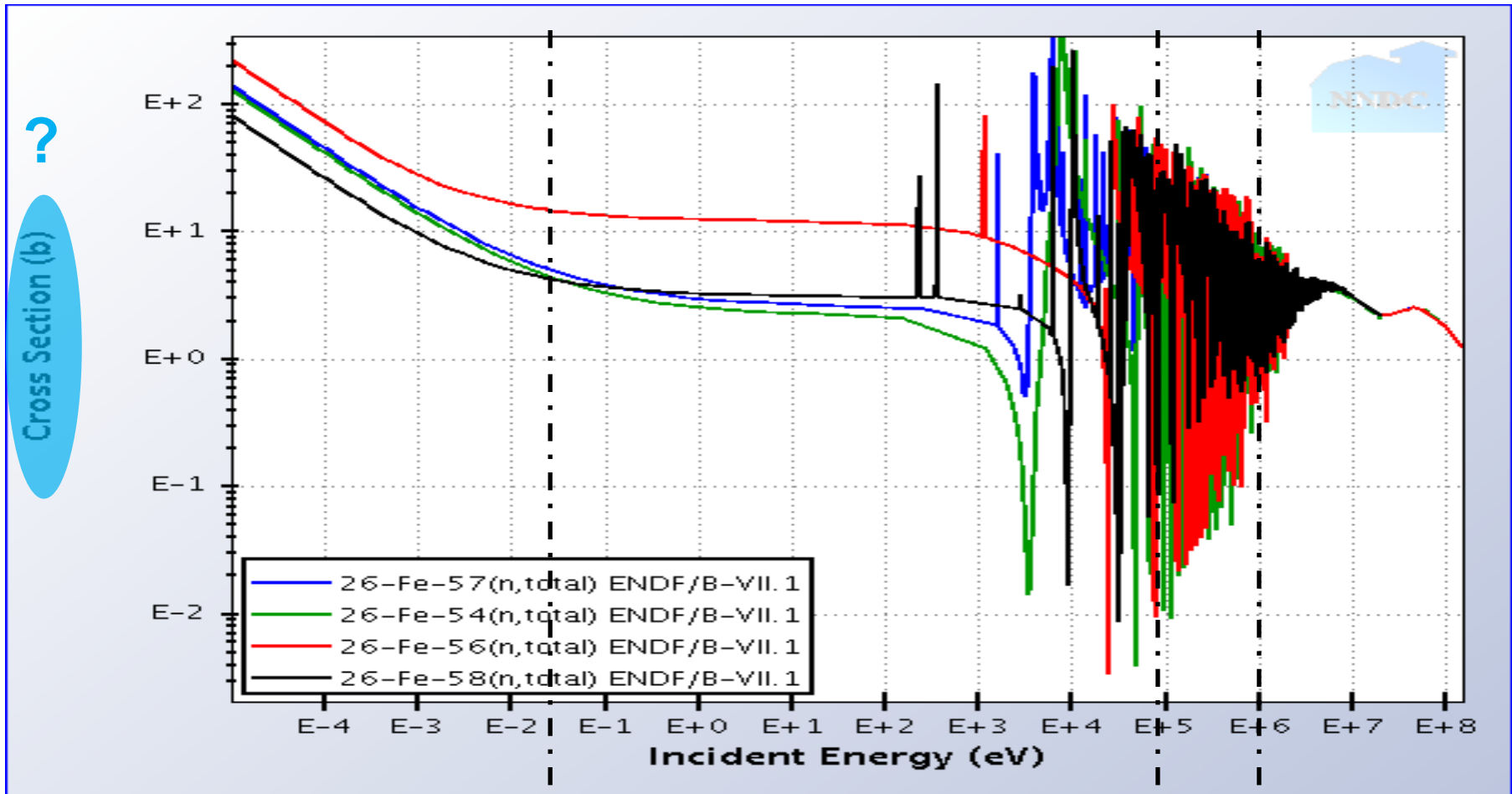
le générateur historique,
enfin une relique non radioactive !
($T_{1/2}({}^{210}\text{Po}) = 138 \text{ jours}$)



α ou β



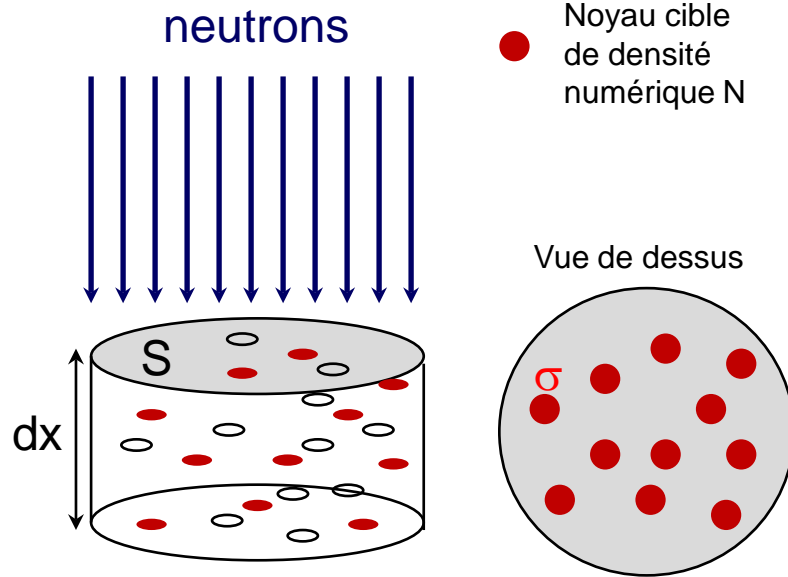
Paraffine, Li, C, N...



Neutrons

3. Sections efficaces

- interactions de nature probabiliste (cf. photons)
- probabilité d'interaction des neutrons selon une réaction donnée:



$$dP = \frac{N \times S dx \times \sigma}{S} = N dx \times \sigma$$

→ efficacité de détection pour une épaisseur x

$$\varepsilon = 1 - \exp(-N\sigma x)$$

L'outil Sigma du NNDC (Brookhaven):

Library: ENDF/B-VII.1(USA, 2011) Sublibrary: Neutron reactions

Results for Z=3

ENDF-6 format Human-readable

Whole file - introduction res. param. Cross sections: (n,total) (n,elastic) (n,non-elastic) (n,inelastic) (n,2na) (n,n') (n,y) (n,p) (n,t) Angular distributions: (n,elastic) (n,2na) (n,n') Energy distributions:

Une grande variété d'interactions !

✓ unité de σ :

barn (b) $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, soit $(10 \text{ fm})^2$

~ diamètres nucléaires

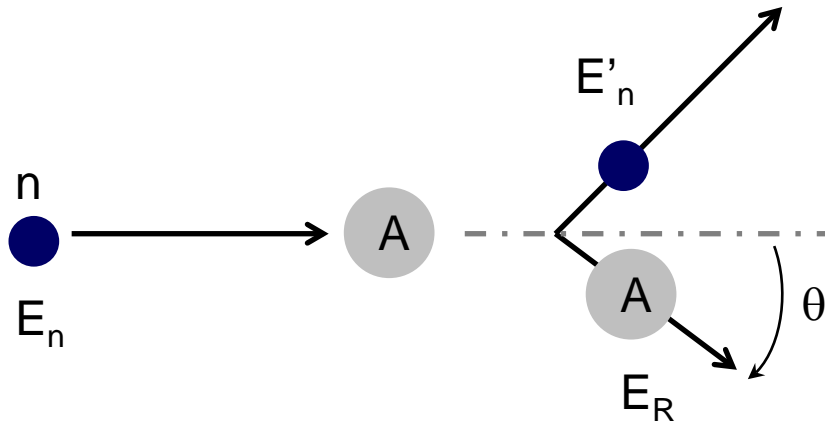
❑ La détection « cryogénique » des neutrons

- ❑ Généralités sur les neutrons
- ❑ Interactions des neutrons avec la matière
- ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
- ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives

❑ Sources de neutrons

❑ Références

- ✓ diffusion élastique (n,n)
- ✓ diffusion inélastique (n, n')
- ✓ capture radiative (n, γ)
- ✓ réactions nucléaires de capture:
(n,p), (n,t), (n, α)
- ✓ fission (n, f)
- ✓ spallation



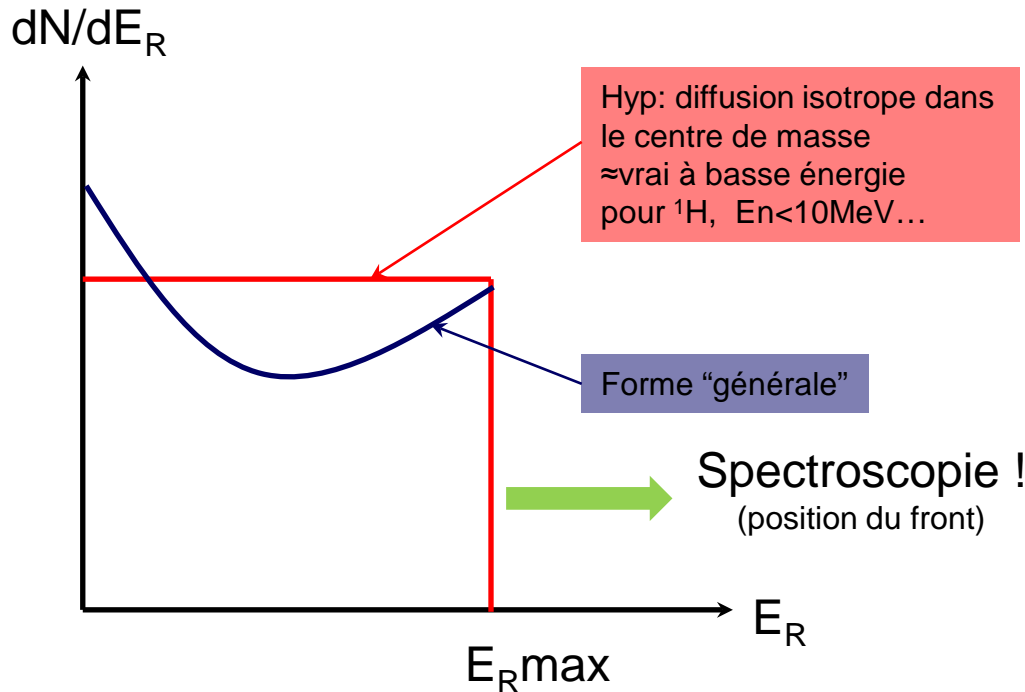
Cinématique élémentaire

$$\begin{cases} E_R = \frac{4A}{(A+1)^2} \cos^2 \theta \times E_n \\ E'_n = E_n - E_R \end{cases}$$

d'où

$$E_R \text{ max} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_n \quad (\approx \frac{4}{A} E_n \text{ si } A \gg 1)$$

Réponse théorique

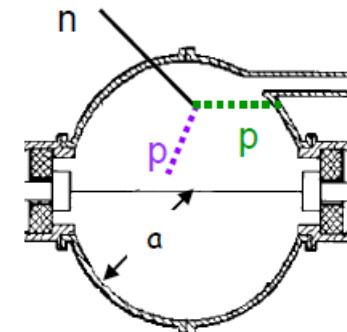
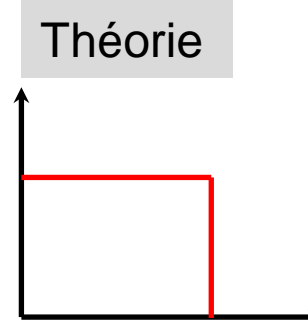


Cible	A	$E_R \text{ max}/E_n$
H	1	1
He	4	0.64
Li	6	0.49
C	12	0.28
O	16	0.22
F	19	0.19
Ge	74	0.053

$\sigma_{el} \sim$: autour du barn, $\forall A, E_n$

Diffusion élastique (n,n) 2. Spectres de reculs réels

Exemple sur le dispositif ROSPEC (kit de 6 compteurs proportionnels)



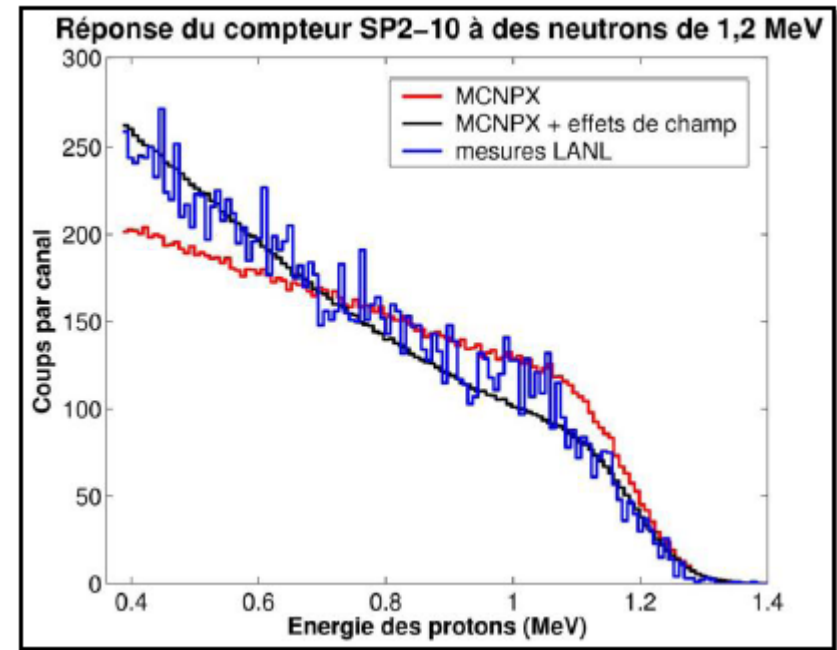
Mesure

Sphère remplie de H₂, 10 atm

→ dégradation de la réponse théorique (rectangulaire) par des effets instrumentaux: effets de bord, résolution...

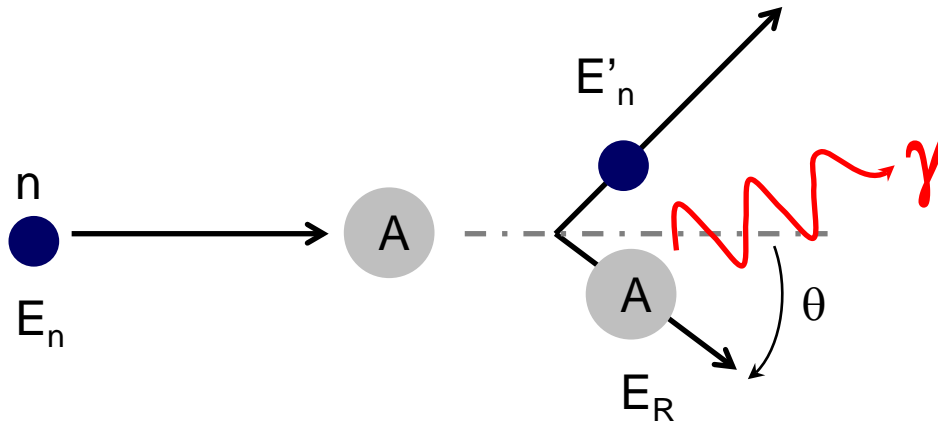
Protons de recul

- Assez bon” sur faisceau mono-En, mais dilution importante du signal
- forte dégénérescence de la réponse en “champ” neutronique: pour une impulsion donnée, on ne connaît que l’énergie minimale du neutron détecté.



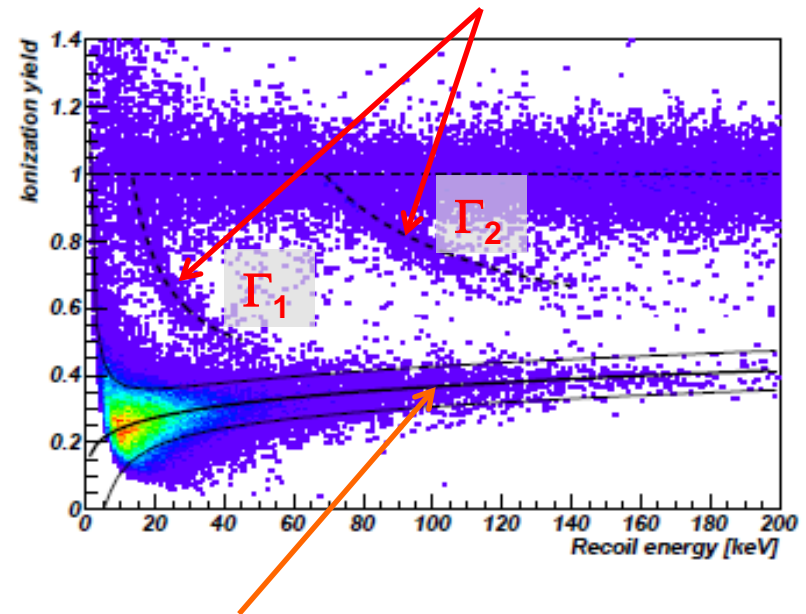
d'après J. Groetz & M. Benmsobah, 2007

Diffusion inélastique (n,n')



Ex: calibration d'EDELWEISS-II
Source n Am-Be ($E_n < 11\text{MeV}$)

Diffusions inélastiques $^{73}\text{Ge}(n,n')^{73}\text{Ge}$



Diffusions élastiques $\text{Ge}(n,n)\text{Ge}$

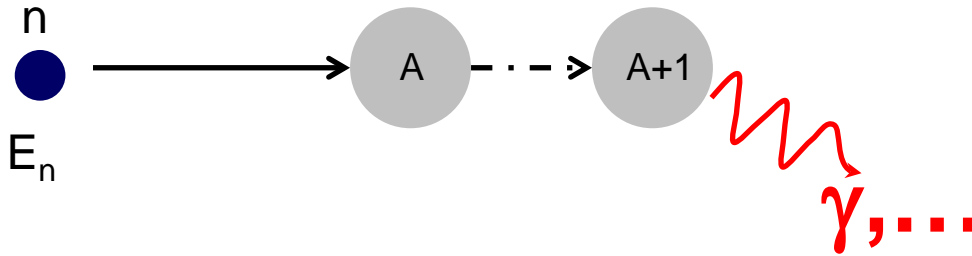
- réaction à seuil: $E_n > E_\gamma$
- si le gamma n'est pas réabsorbé, confusion de possible de deux populations de neutrons (originelle et décalée de $-E_\gamma$) dans les données des détecteurs
- façon efficace de ralentir des neutrons de haute énergie (dans des cibles lourdes, en Fe par exemple)

Gammas, e-

Reculs Ge

$E_{\Gamma_1} = 13.26\text{keV}$ ($3\mu\text{s}$) , $E_{\Gamma_2} = 68.75\text{keV}$ (1.7ns)

Capture radiative (n,γ)



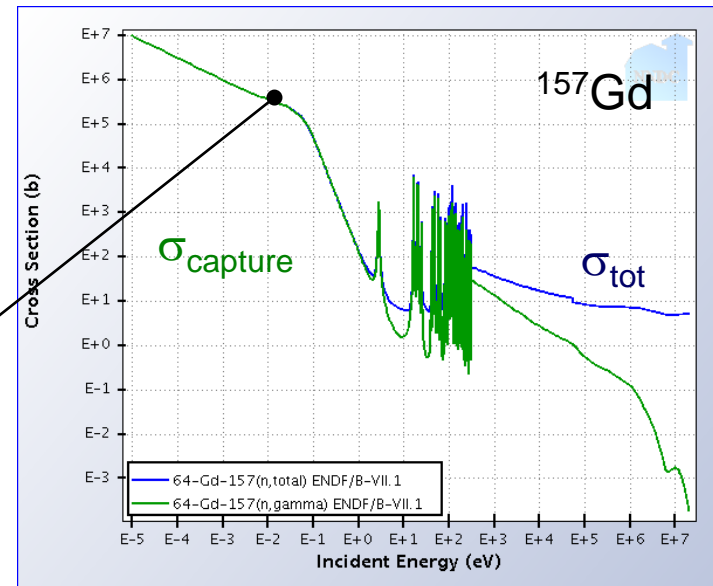
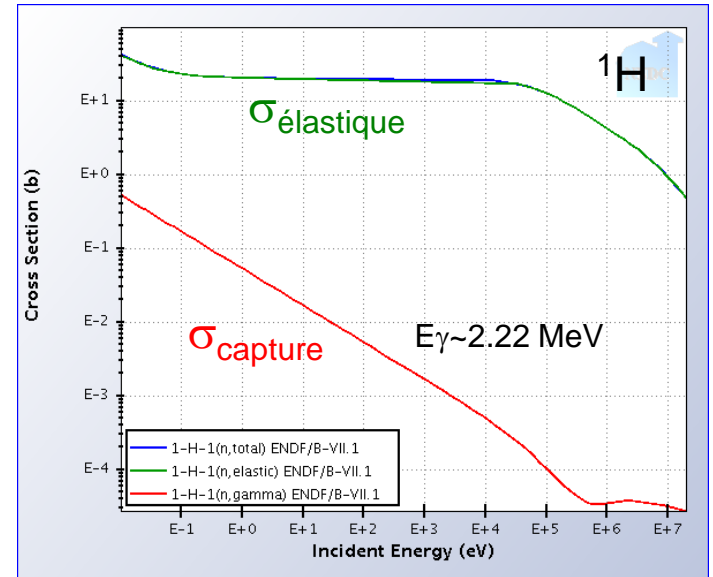
- perte du neutron
- radioactivité induite possible (*activation*)
- fabrication des thermomètres en Ge-NTD !

Abondance naturelle de l'isotope Ge	Réaction	$\tau_{1/2}$	Type impureté dopante
20.5 %	$^{70}\text{Ge}(n,\gamma)^{71}\text{Ge} \rightarrow ^{71}\text{Ga} + \text{EC}$	11 j	P
36.5 %	$^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75}\text{Ge} \rightarrow ^{75}\text{As} + e^-$	82 mn	N
7.8 %	$^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77}\text{Ge} \rightarrow ^{77}\text{As} + e^-$ ↓ $^{77}\text{Se} + e^-$	11h 39h	N

Cas particuliers figurés: ^1H , ^{157}Gd ,...



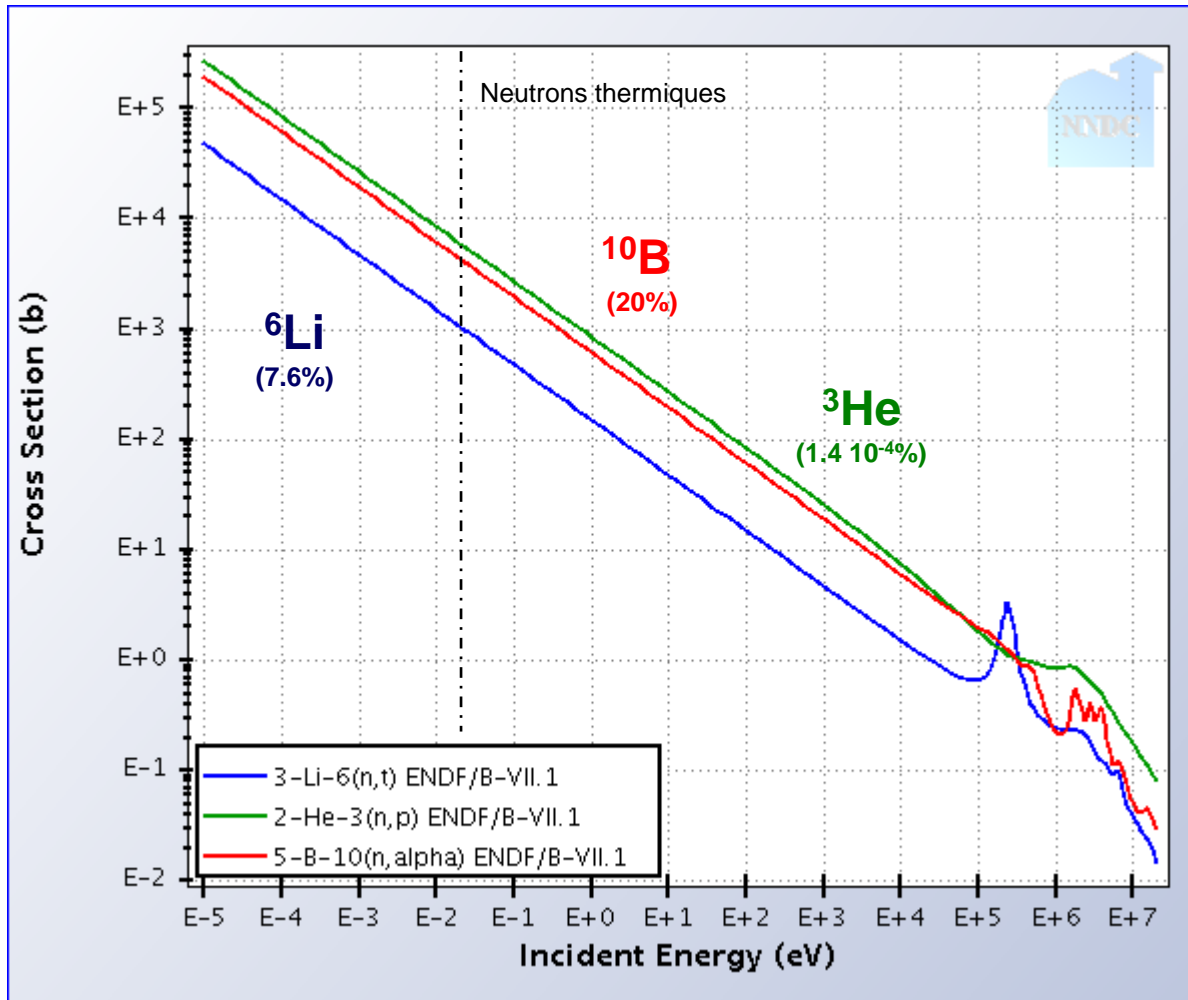
$\sigma(n_{\text{th}},\gamma) = 255\,000$ barns !
"Poison" pour les neutrons



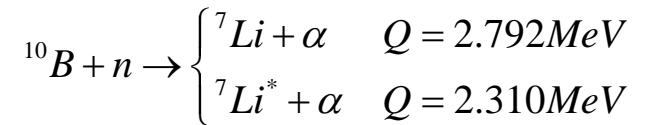
Réactions nucléaires de capture (n,p), (n,t), (n,α)

¹H

³H

⁴He


Trio de réactions



✓ Les produits de la réaction sont des particules de haute énergie, fortement ionisantes, **facilement détectables**:

→ incorporation dans ~ tous les types de détecteurs traditionnels

gaz : ³He, ¹⁰B (BF₃)

solides, liquides: ¹⁰B & ⁶Li

✓ section efficace élevée pour les neutrons thermiques, n_{th}

→ compteurs de neutrons "modérés"

→ capture de n_{th} dans des blindages

✓ section efficace décroissant fortement avec l'énergie (~1/v_n)

une mesure directe et immédiate de l'énergie du neutron capturé !



connu

mesurés

déduit

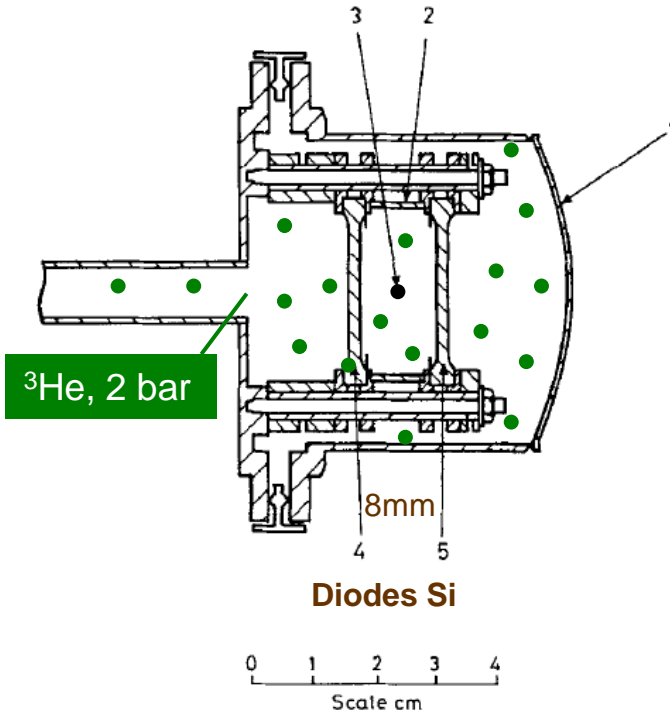
✓ précision ?

✓ efficacité ?

Le top des sandwichs

à l'Hélium-3

Compteur proportionnel



- 1 Stainless steel window
- 2 Cathode box
- 3 Anode wire
- 4 Back surface barrier detector
- 5 Front surface barrier detector

pour E_n : 100keV-15MeV
 Résolution FWHM ~50 keV & efficacité (0.1%) (TBC !)

au Lithium-6

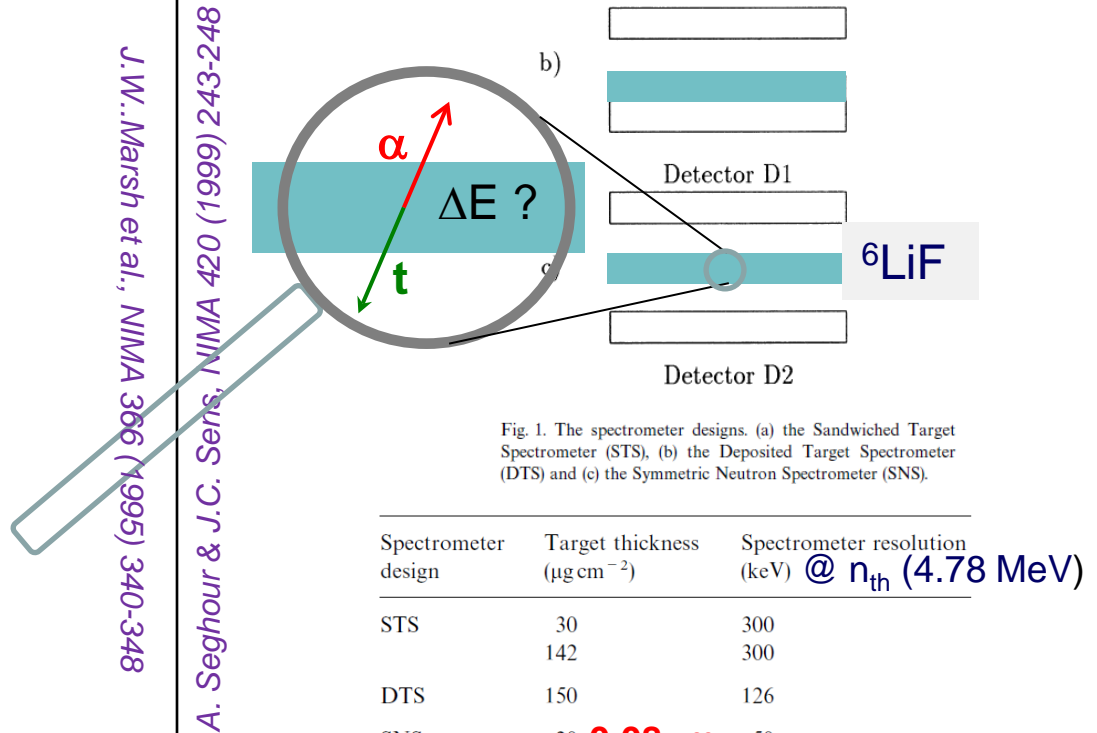


Fig. 1. The spectrometer designs. (a) the Sandwiched Target Spectrometer (STS), (b) the Deposited Target Spectrometer (DTS) and (c) the Symmetric Neutron Spectrometer (SNS).

Spectrometer design	Target thickness ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Spectrometer resolution (keV) @ n_{th} (4.78 MeV)
STS	30	300
	142	300
DTS	150	126
SNS	20	50
	57	70
	65	78
	97	120
	157	235

$0.08 \mu\text{m}$
 \downarrow
 $0.6 \mu\text{m}$

❑ La détection « cryogénique » des neutrons

- ❑ Généralités sur les neutrons
- ❑ Interactions des neutrons avec la matière
- ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
- ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives

❑ Sources de neutrons

❑ Références

Les spectromètres “traditionnels” de neutrons rapides

Table 1
Neutron spectrometer characteristics

Spectrometer				Typical characteristics for		
No.	Type	Ref.	Energy range (MeV)	Energy (MeV)	Resolution (FWHM)	Detection efficiency
1	Recoil proportional counter	[27]	0.05–5	1	10% ^a	3%
2	Organic scintillator	[31]	2–150	8	4% ^a	20%
3	Recoil proton telescope	[45]	1–250	60	4% ^a	<0.05%
4	Capture-gated	[49]	1–20	5	50% ^a	1%
5	³ He gridded ionization chamber	[61]	0.05–10	1	2% ^a	0.3%
6	³ He-semiconductor sandwich	[64]	0.1–20	1	50 keV ^a	0.1%
7	Diamond semiconductor	[68]	8–20	14	1% ^b	1%
8	Time-of-flight	[74]	1–15	2.5	5% ^c	0.05 cm ⁻²
9	Foil radioactivation	[79]	0.2–20	—	—	—
10	Superheated drop (bubble)	[82]	0.1–20	—	—	—
11	Multisphere	[91]	10 ⁻⁸ –200	—	—	—

^a Pulse height resolution.

^b Energy resolution.

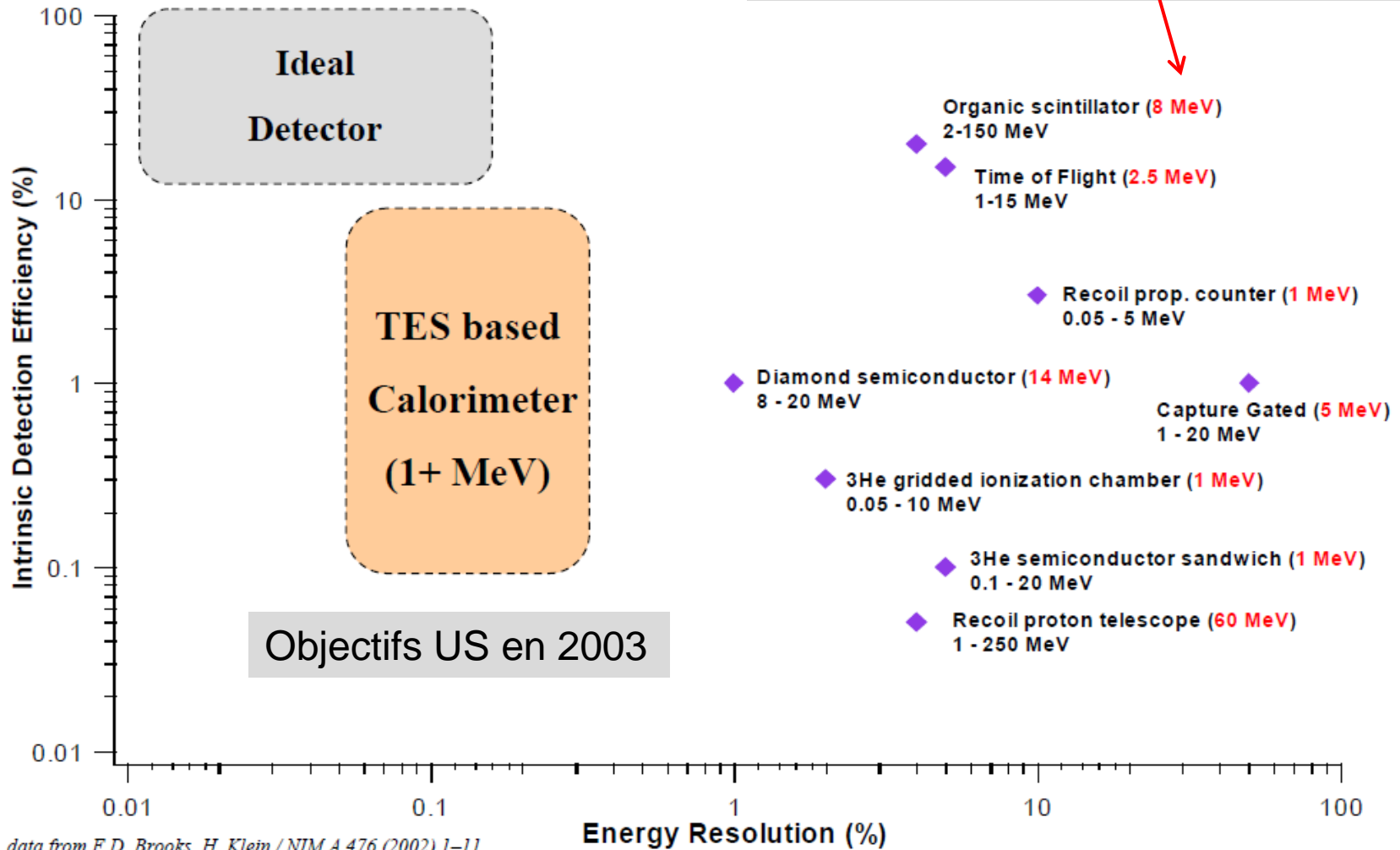
^c Time-of-flight resolution.

Toutes les techniques... sauf les cryos !

Neutron spectrometry—historical review and present status,
F.D. Brooks , H. Klein, NIMA 476 (2002) 1-11

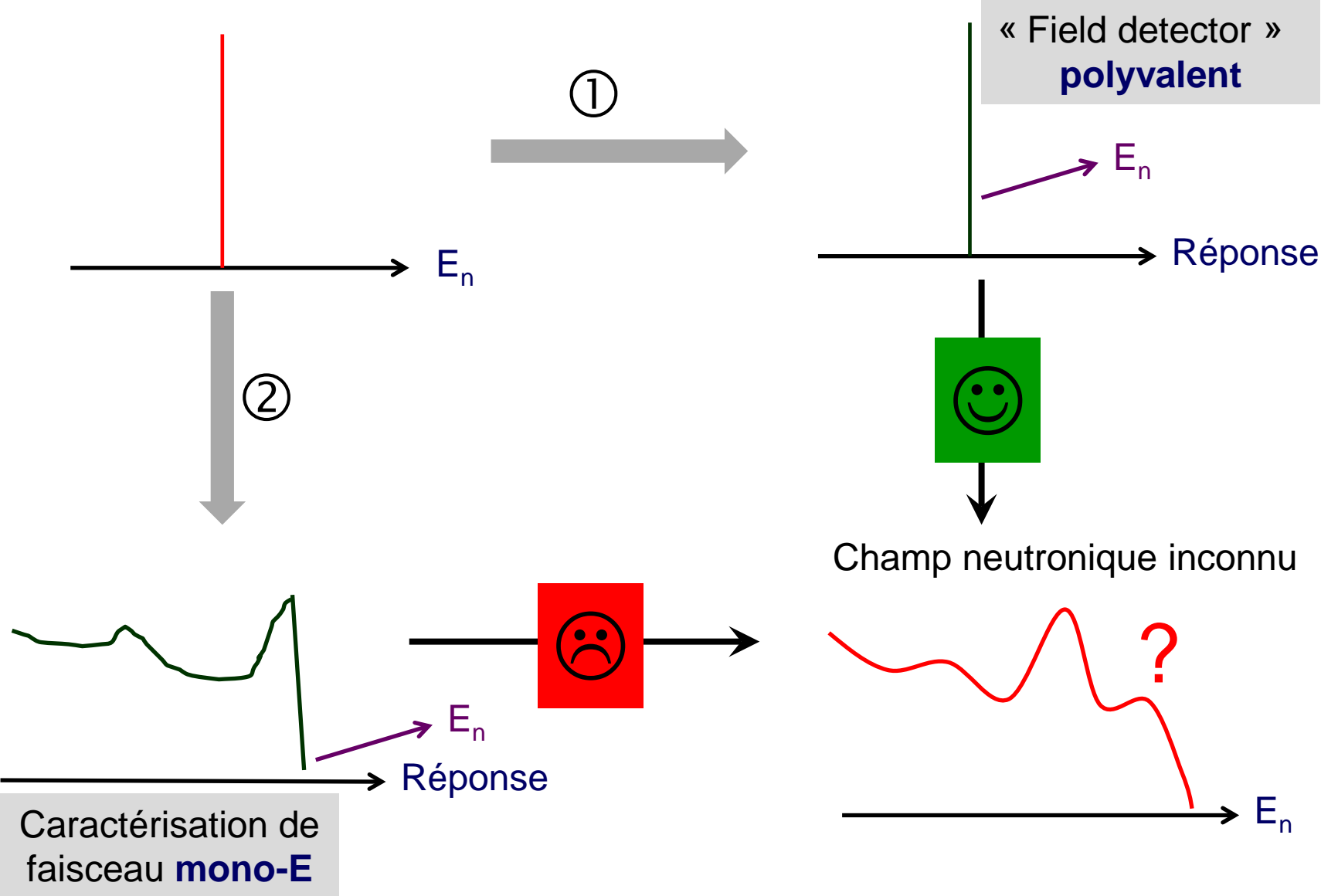
et ~ partout (ISS, satellites, pôles, montagnes, souterrains...)

une figure 3D (avec E_n) manque !



data from F.D. Brooks, H. Klein / NIM A 476 (2002) 1-11

Un « bon » spectromètre: tout dépend de l'usage !



Métamorphose d'un sandwich...

- ✓ Ça marche ?
- ✓ Transposition aux neutrons rapides des « excellentes » résolutions observées en spectrométrie alpha (en 2012, $\Delta E_\alpha/E_\alpha < 1/1000$ @ $E_\alpha \sim 5$ MeV)?

$\sim Q$ des réactions de capture



L'espoir d'une haute résolution, une histoire de quanta

Détecteur	Produits de l'interaction	Dépense énergétique par quantum d'information (QE).
Scintillateur	Photons visibles	100 eV → 1 keV
Compteur proportionnel	Ions	10 eV → 30 eV
Semi-conducteur	Paires électrons-trous	3 eV-4 eV
STJ : Jonction tunnel supra	Quasi-particules (« paires de Cooper » brisées)	10^{-3} eV
Bolomètre à cible isolante	Phonons	10^{-5} eV à 10^{-4} eV
Bolomètre à cible métallique	Excitation d'électrons de conduction	$\ll 10^{-5}$ eV

D'après Elvire Leblanc (2003)

 Détecteurs refroidis

Contribution statistique au pouvoir ultime de résolution :

$$\frac{E}{\Delta E} \approx \sqrt{n} \quad \text{avec} \quad n = \frac{E}{QE}$$

❑ La détection « cryogénique » des neutrons

- ❑ Généralités sur les neutrons
- ❑ Interactions des neutrons avec la matière
- ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
- ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives

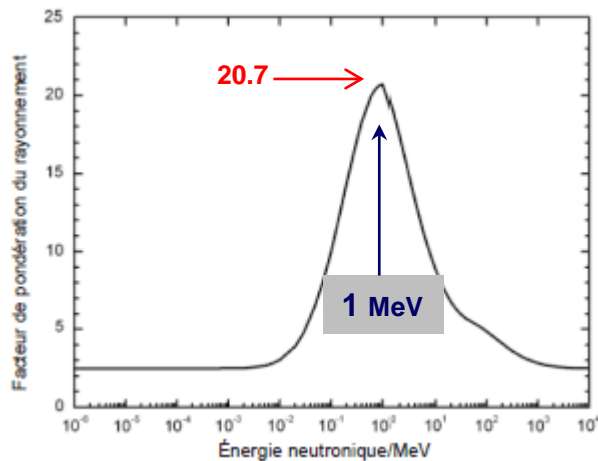
- ✓ Radioprotection
- ✓ Matière Noire
- ✓ Boron Neutron Capture Therapy ?
- ✓ Bits d'erreur /mémoires

❑ Sources de neutrons

❑ Références

Facteurs de pondérations biologiques

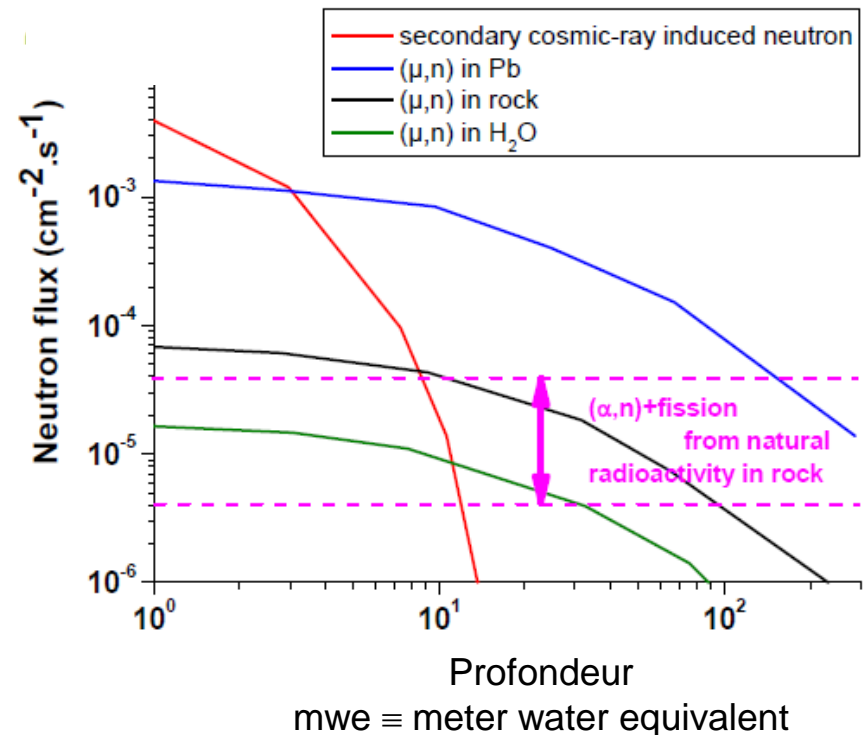
Type de rayonnement	Facteur de pondération pour les rayonnements, w_R
Photons	1
Électrons ^a et muons	1
Protons et pions chargés	2
Particules alpha, fragments de fission, ions lourds	20
Neutrons	Une fonction continue de l'énergie des neutrons (voir la figure 4.1 et l'équation 4.3)



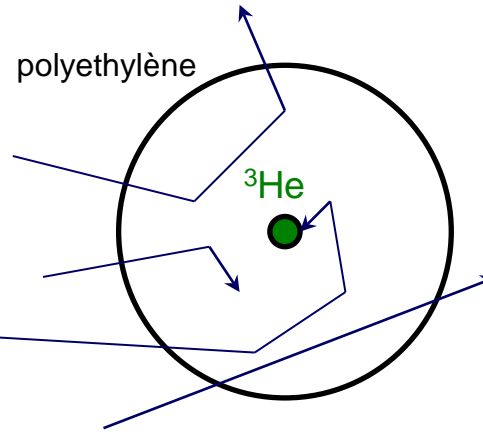
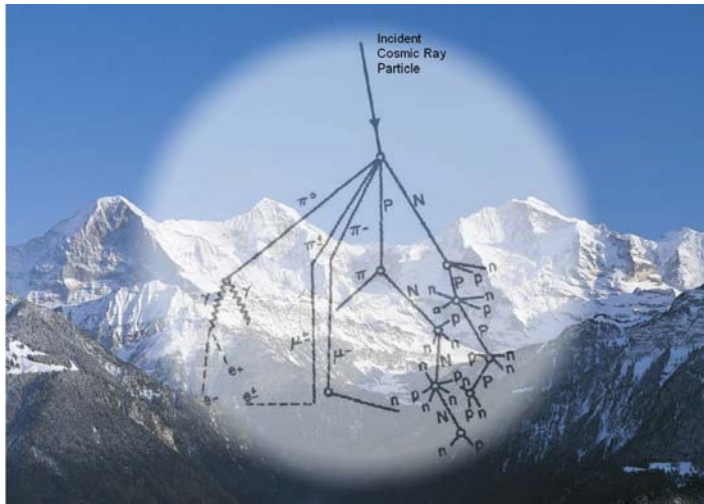
(recommandations CIPR 2007)
Commission Internationale de Protection Radiologique

Le risque “Neutrons rapides” dans notre environnement:

- ✓ réacteurs
- ✓ radioactivité naturelle
- ✓ rayonnement cosmique



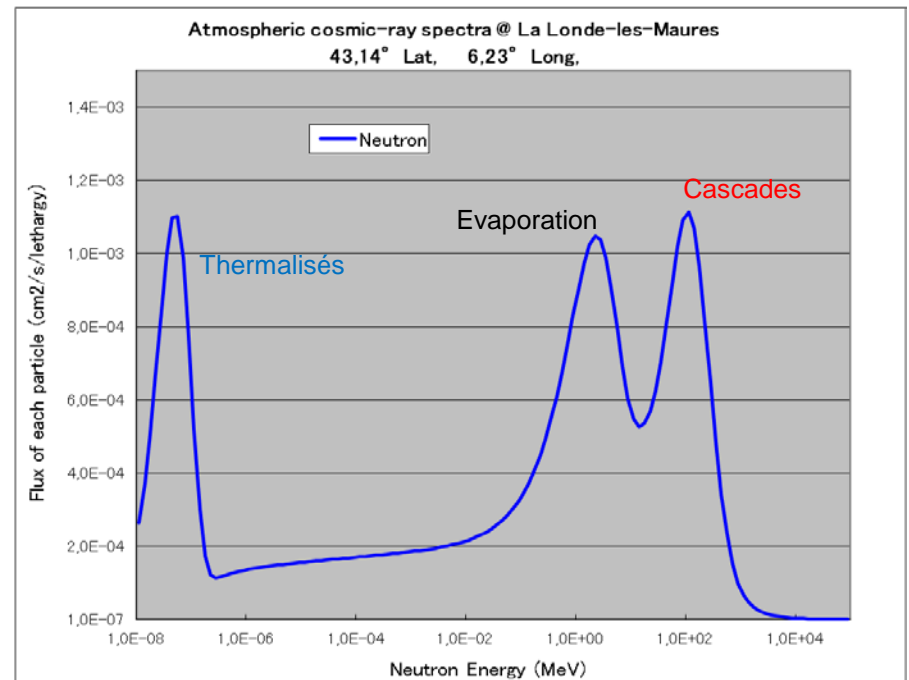
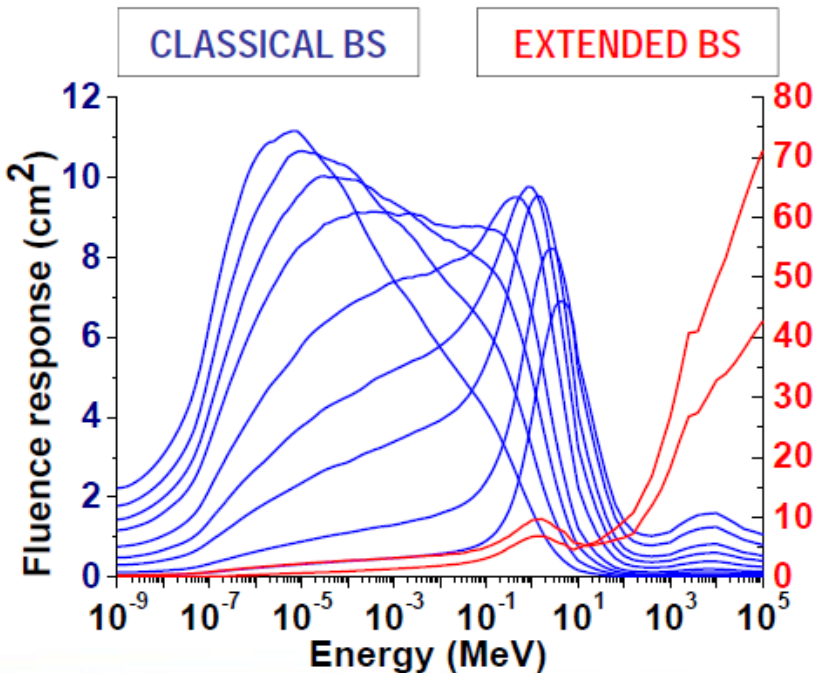
systeme à spheres de Bonner HERMEIS IRSN & ONERA



Observatoire du Pic du Midi (2011)



→ Mesure de la modulation, après une déconvolution complexe, d'un fond "type", donné *a priori*



Spectre Atmosphérique des Rayons Cosmiques

EXPACS ver. 2.22

Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum, Copyright© 2006, Japan Atomic Energy Agency
 developed by Tatsuhiko Sato, Japan Atomic Energy Agency, E-mail: nsed-expacs@jaea.go.jp

Ref.[1]: T.Sato and K.Niita, "Analytical Functions to Predict Cosmic-Ray Neutron Spectra in the Atmosphere", *Radiat. Res.* **166**, 544-555 (2006)

Ref.[2]: T. Sato *et al.*, "Development of PARMA: PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere", *Radiat. Res.* **170**, 244-259 (2008)

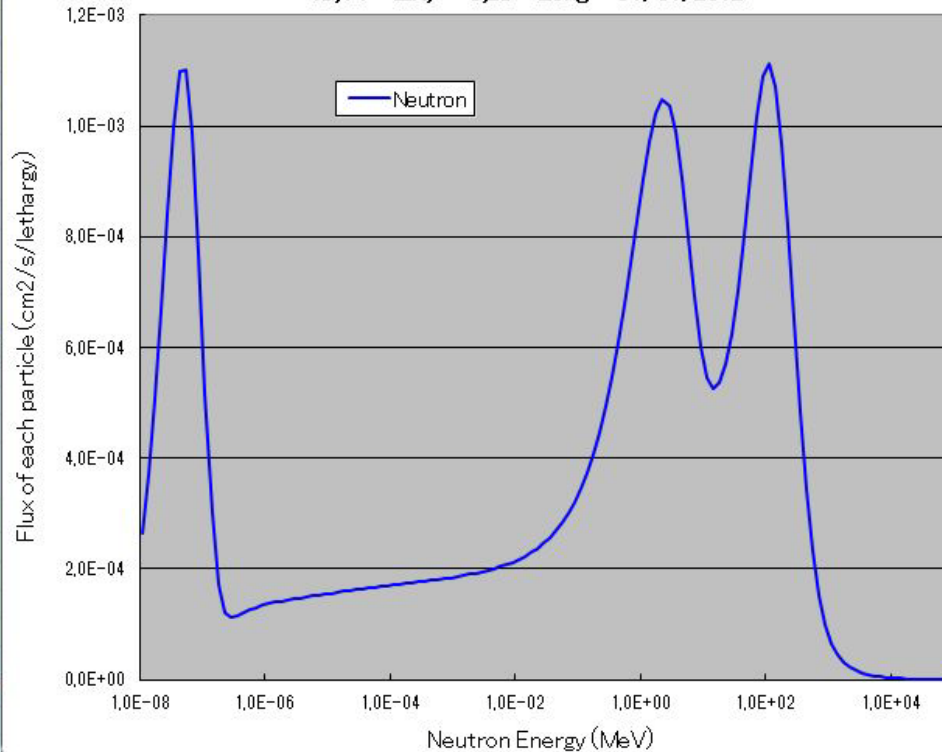
Contact E-mail: nsed-expacs@jaea.go.jp

Homepage URL: <http://phits.jaea.go.jp/expacs/>

Input conditions in the white columns

Altitude or Atmospheric depth	0 (km)
Location or	43,14 Lat. (deg)
Cut-off rigidity	6,23 Long. (deg)
Force field potential,	2012 Year
Time or Count rate of	1 Month
Thule neutron monitor	1 Day
Surrounding Environment	Ground
Local Effect Parameter	0,2 Water Frac.
Definition of effective dose	ICRP103
Output flux unit	(cm ² /s/lethargy)
Output dose unit	(mSv/year)

Atmospheric cosmic-ray spectra @ La Londe-les-Maures
 43,14° Lat, 6,23° Long 01/01/2012



Check input condition

Atmospheric depth	1034,0 (g/cm ²)
Cut-off rigidity	5,7 (GV)
Force Field Potential	528,4 (MV)
Local Effect Parameter	0,2 Water Frac.

Calculated dose rate (mSv/year)

	Effective dose	H*(10)
Total	2,87E-01	3,22E-01
Neutron	5,83E-02	7,60E-02
Proton	1,26E-02	1,50E-02
He nucleus	1,55E-05	3,82E-06
Positive muon	9,52E-02	9,50E-02
Negative muon	7,97E-02	7,98E-02
Electron	1,02E-02	2,85E-02
Positron	9,77E-03	2,00E-02
Photon	2,17E-02	7,91E-03

Atmospheric cosmic-ray spectra calculated by the PARMA model

Flux of each particle (cm²/s/lethargy)

Energy(MeV/n)	Neutron	Proton	He nucleus	Positive muon	Negative muon	Electron	Positron	Photon
1,13E-08	0,000264							
1,42E-08	0,000372							
1,79E-08	0,000508							
2,25E-08	0,00067							

- ✓ en libre accès
- ✓ neutrons → 1/4 dose annuelle due aux rayons cosmiques

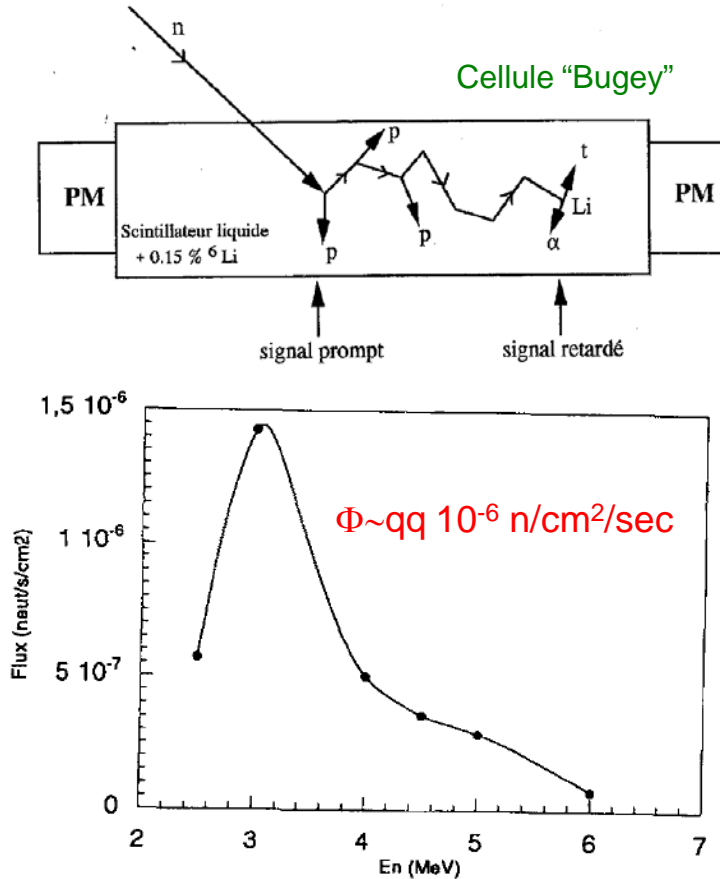
Motivations

2. "Matière Noire"

- ✓ voir cours de Jules Gascon
- ✓ une même signature: des atomes de reculs (mais des σ très \neq : barn / 10^{-20} barn !)
- ✓ le fond neutron rapide des expériences souterraines: une donnée très recherchée !

au LSM:

Neutrons rapides

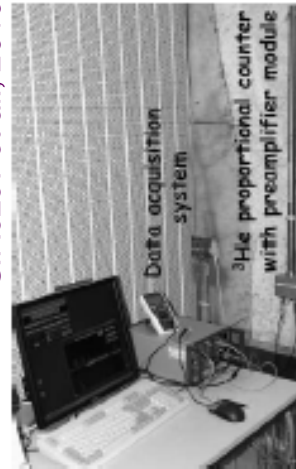


V.Chazal et al (1998)

V. Yu. Kozlov et al (2010)

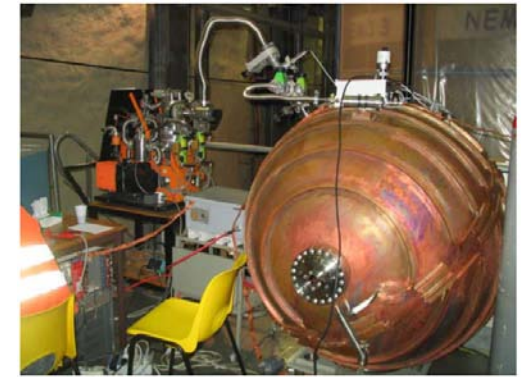
S.Rozov et al., 2010

He-3, 4bar



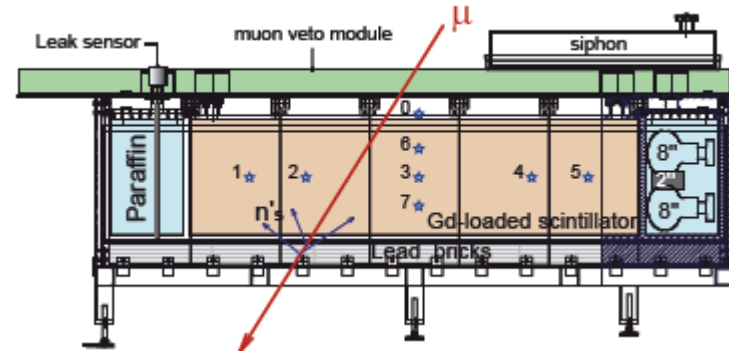
Neutrons lents

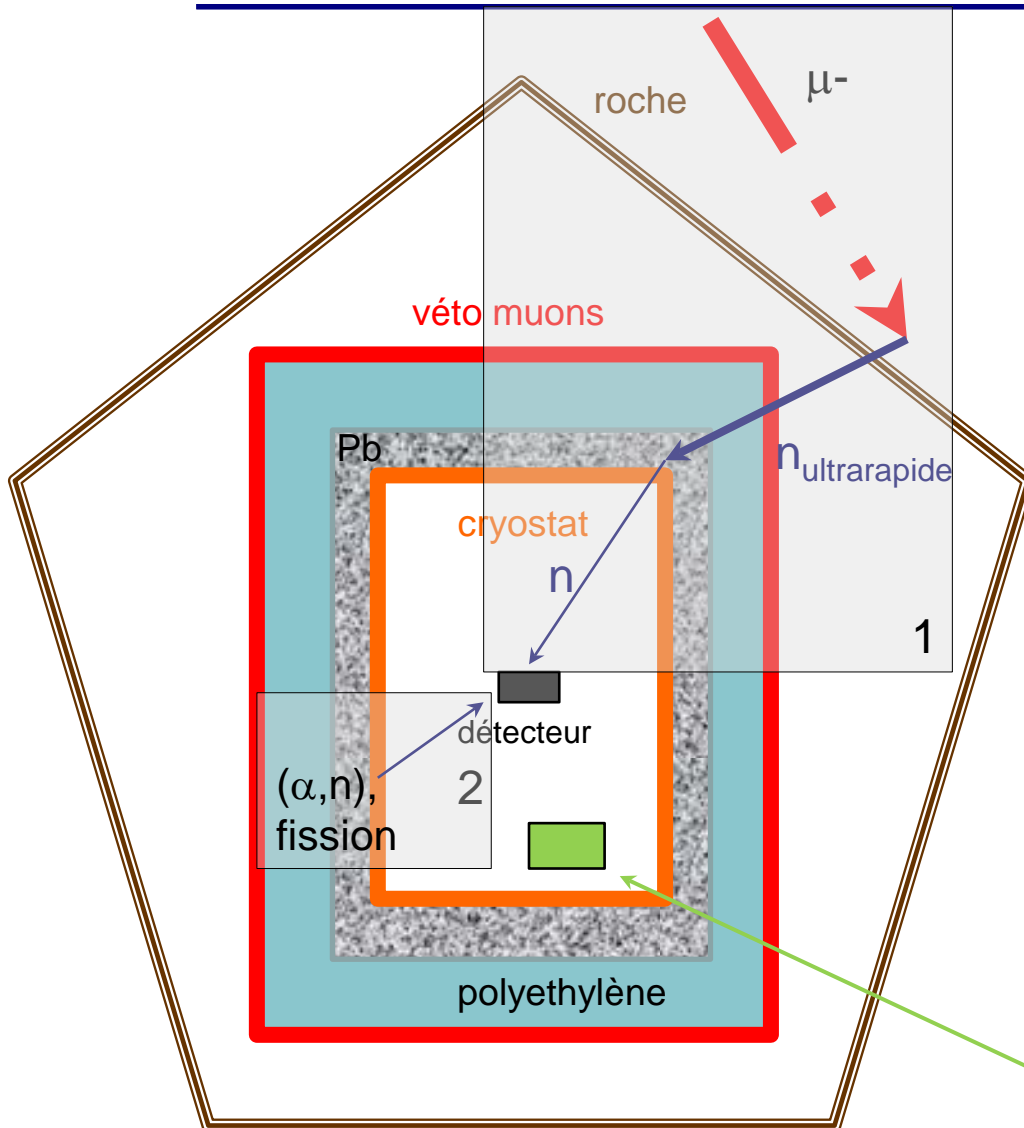
Sphère 1m³ 3 gr He-3 (+Ar et CH4)



I.Savvidis et al, TAUP 2009

Neutrons induits par muons





Run 12 (EDELWEISS II)

Expected background (90% CL) :

- Gammas < 0.9
 - Betas < 0.3
 - Neutrons from μ 's < 0.4
 - Neutrons from rock < 0.1
 - Neutrons from shield < 0.2
 - Neutrons from set-up inside shield < 1.1
- (more materials are under investigation)

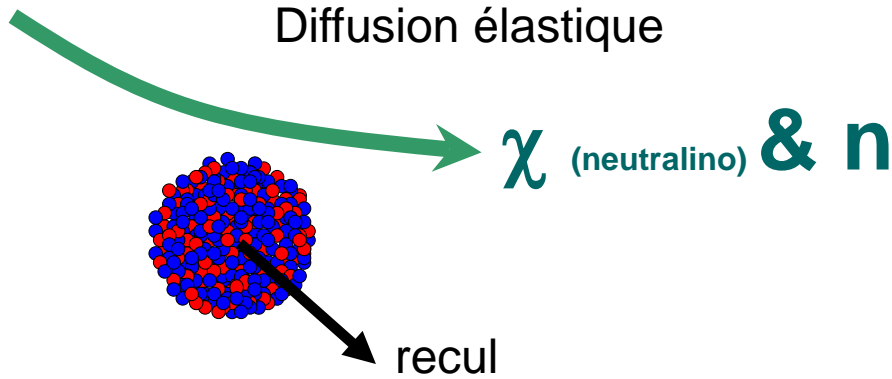
→ Fond attendu: 3 évts

5 candidats reportés:

- 4 entre 20.8 & 23.2 keV
- 1 à E=172 keV

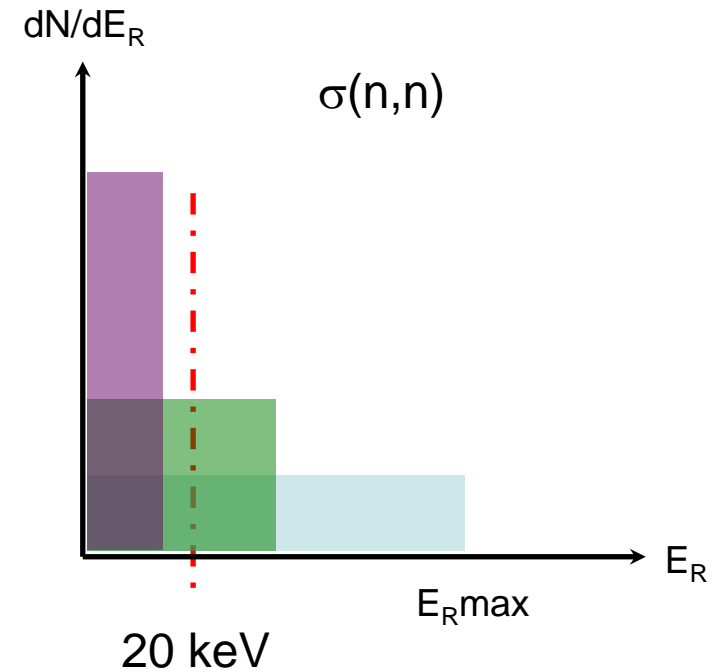
En 1 & 2, les neutrons gênant...

Peut-on mettre ici un (bon) détecteur de neutrons rapides ?

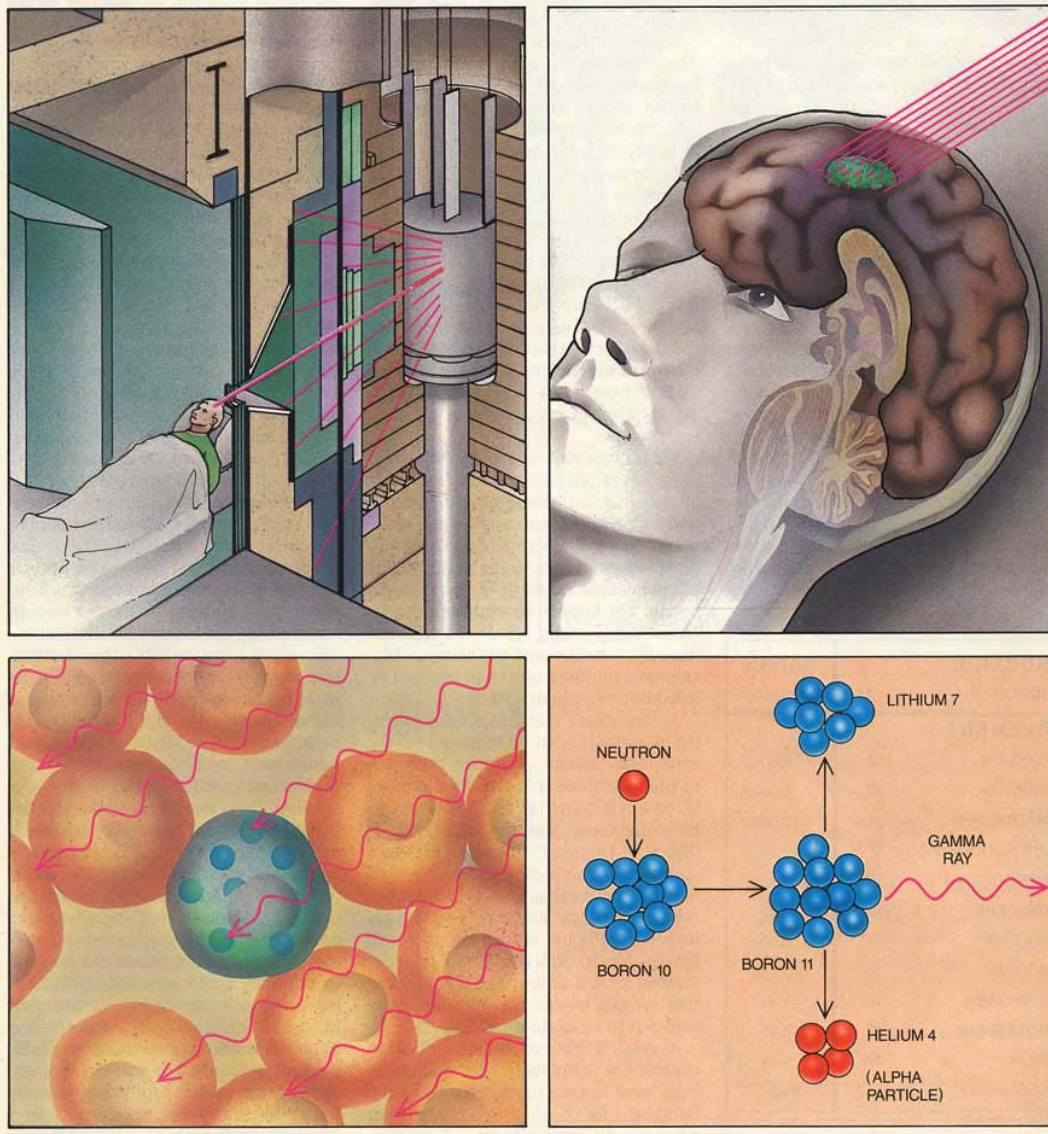


Hypothèse:
seuil 20keV après discrimination

Cible	A	$E_R \text{ max}/E_n$	Contribution "neutrons" possible si $E_n >$
Li	6	0.49	41 keV
O	16	0.22	91 keV
F	19	0.19	105 keV
Ge	74	0.053	377 keV



→ Fond neutron gênant:
50keV-2MeV et au delà



- ✓ **BNCT** ≡ Boron Neutron Capture Therapy
- ✓ Traitement de tumeurs difficilement opérables
- ✓ Fixation de molécules borées sur les cellules malignes
- ✓ irradiation par neutrons “épithermiques” ($E \leq \text{qq. } 10\text{keV}$)
- ✓ $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$, $Q = 2.31\text{MeV}$

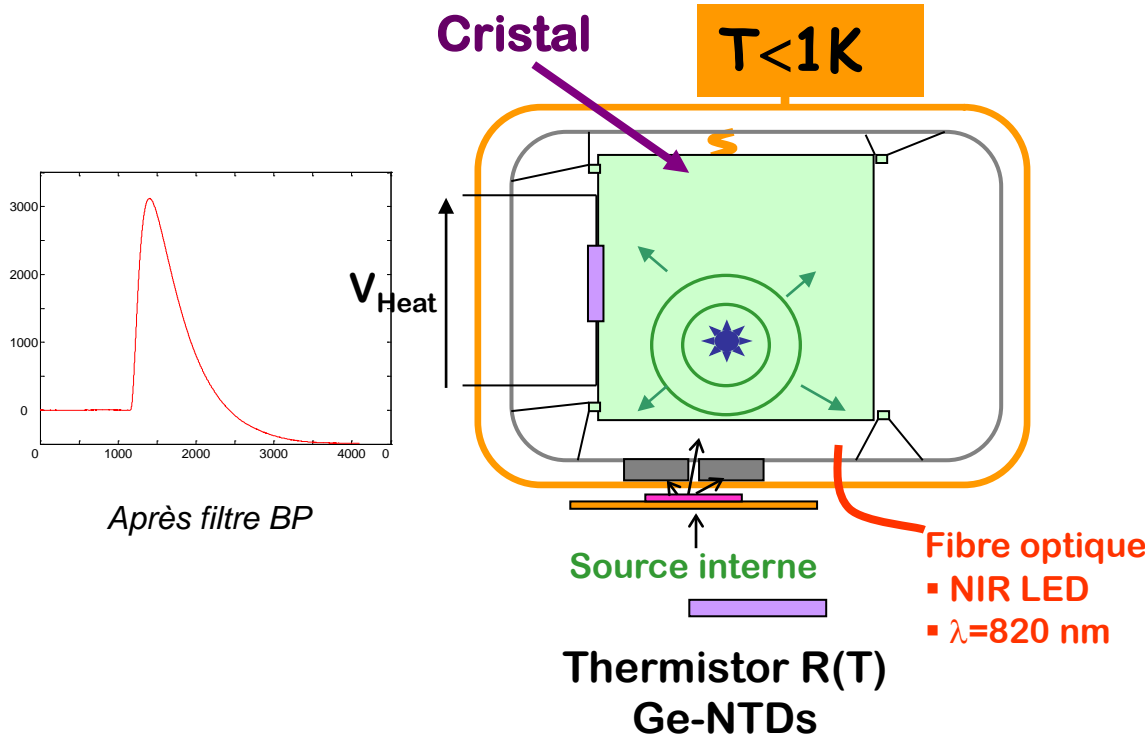
Aide à la caractérisation du faisceau par un bon détecteur de neutrons rapides ?

Pour un rapport sur la BNCT en 2011, voir:
✓ la présentation de F.Wagner @ FNDA2011
✓ la page wikipedia, conseillée.

R.F. Barth et al., Scientific American, 1990

- ❑ La détection « cryogénique » des neutrons
 - ❑ Généralités sur les neutrons
 - ❑ Interactions des neutrons avec la matière
 - ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
 - ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ **Principes de base**
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives
- ❑ Sources de neutrons
- ❑ Références

(⁶Li) Bolomètres et capture de neutrons



- Pros**
- **cible solide** \equiv **détecteur**
 - pas de straggling
 - forte efficacité
 - **haute résolution**
 - Pour des diélectriques, Quantum énergie=phonon
 - $\sim kT < 10^{-4} \text{ eV}$ à $T < 1K$
 - un large **choix de cibles**
 - **voit ~toutes les particules**

- Contras**
- **cryogénie** nécessaire
 - constantes de temps $> \text{ms}$

$$\Delta E_{FWHM} \text{ultime} = \xi \sqrt{kT^2 C(T)} \propto (MT^5)^{1/2} \text{ pour diélectriques}$$

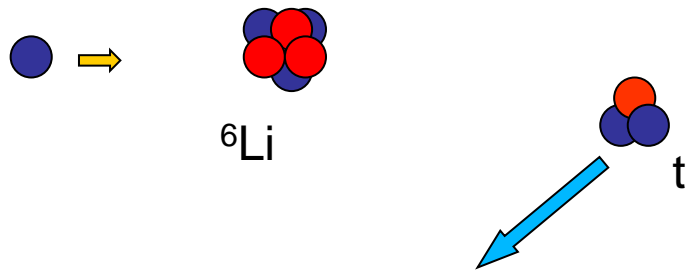
- ❑ Fluences élevées → faible M → $T \leq 1 \text{ K}$ suffit
- ❑ Événements rares → M élevée → $T \leq 100 \text{ mK}$ est nécessaire

Spectroscopie de neutrons rapides & bolomètres ${}^6\text{LiF}$

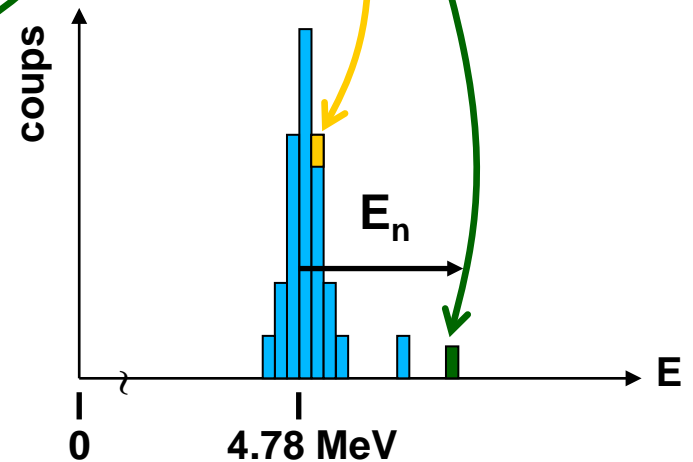
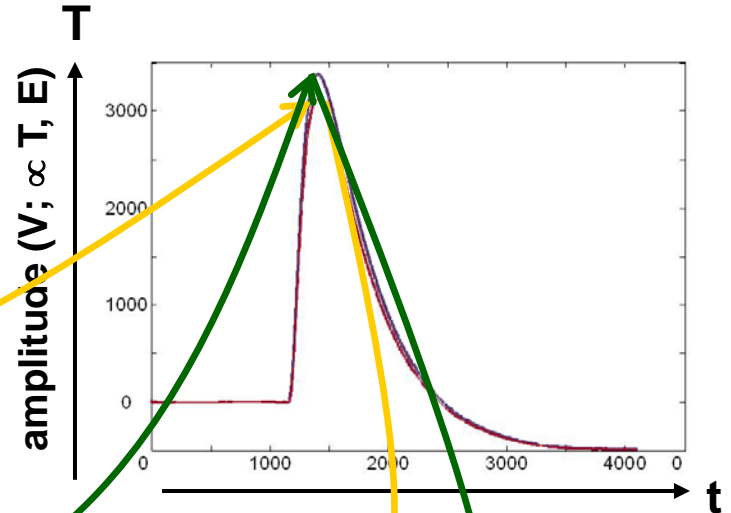
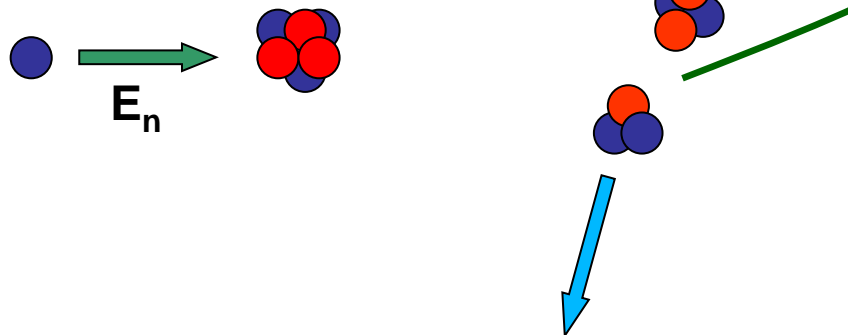


- E_n recouvré facilement, en principe
- fond: alphas (~~gammas~~)

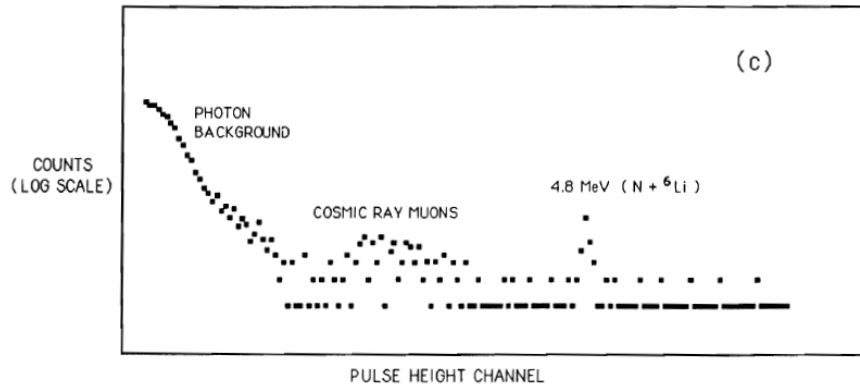
Neutron thermique (25 meV)



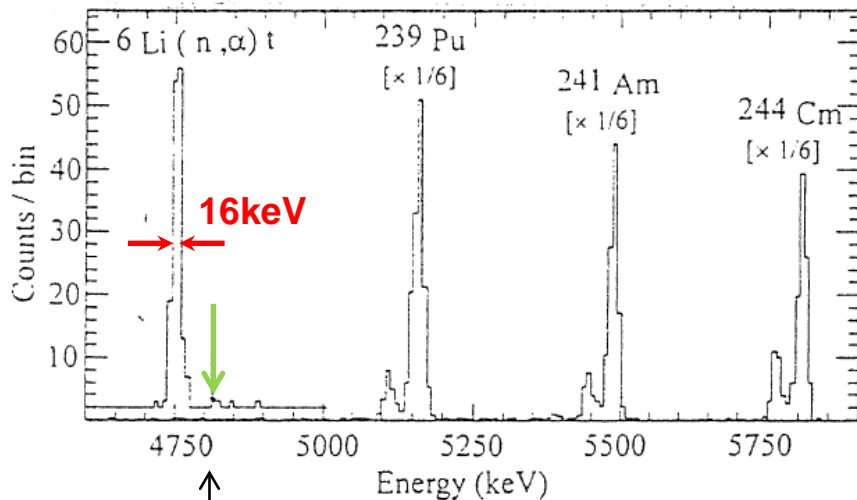
Neutron rapide (1keV-20MeV-...)



Petit historique



- ✓ Smith et al (UK) **1990**
- ✓ Première observation du pic n+ ^6Li par calorimétrie dans un cristal de 8g natLiF @ T~70mK
- ✓ Résolution non donnée (a “sharp” peak)



(*) défaut de -30keV confirmé avec une source α de ^{233}U
 $E_{\alpha 2}=4783.5 \text{ keV}$ ($\cong Q$ de la réaction n+Li, à 4783.4 keV !)

- ✓ Nous autres (INSU & IN2P3 @ IPNL) **1992**
- ✓ 2g natLiF @ T~80mK
- ✓ 7.5keV FWHM sur la ligne de base
- ✓ ce détecteur détient toujours le record de résolution
 $\Delta E_{FWHM} \sim 16\text{keV}$ sur n_{th}+ ^6Li
- ✓ un léger défaut de thermalisation signalé / α 's (*)
- ✓ spectroscopie de neutrons rapides proposée

Univ. Wisconsin
2002

LLNL
2003

Tokyo
1999

LiF “Matière
 noire”
 abandonné
 (tritium !)

2012

- ❑ La détection « cryogénique » des neutrons
 - ❑ Généralités sur les neutrons
 - ❑ Interactions des neutrons avec la matière
 - ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
 - ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ **Etat des lieux**
 - ❑ **Outre Atlantique**
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives
- ❑ Sources de neutrons
- ❑ Références

Outre-Atlantique Spectroscopie n dans le Wisconsin

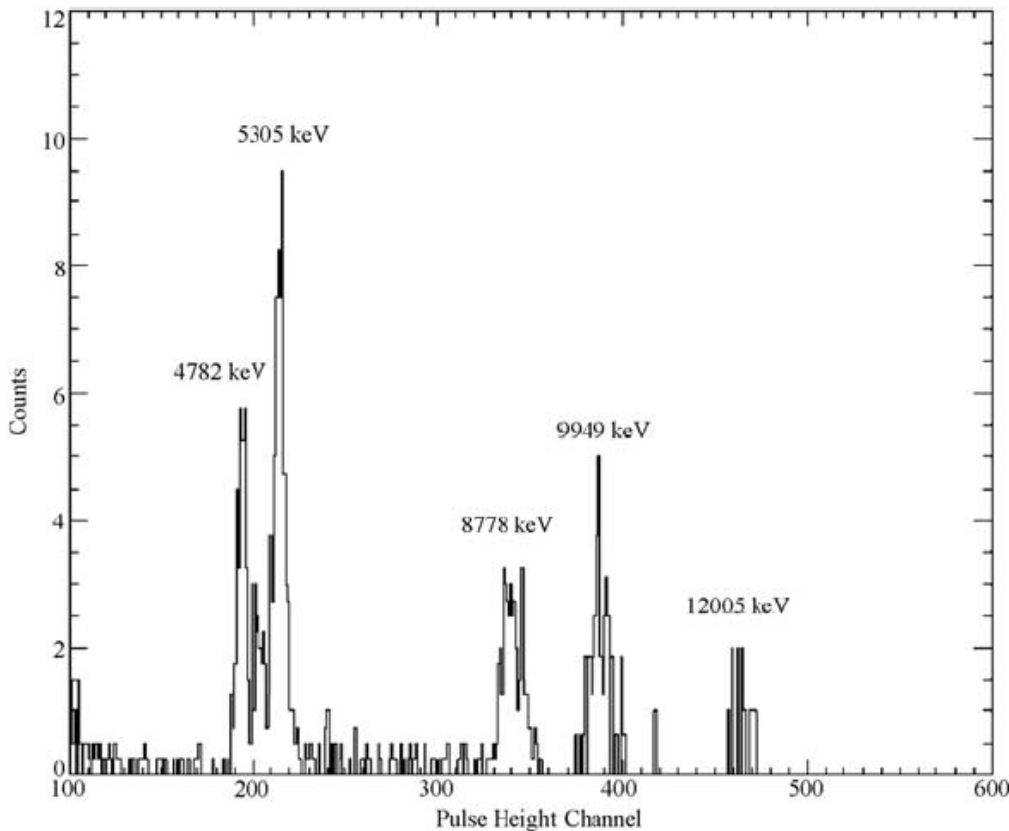
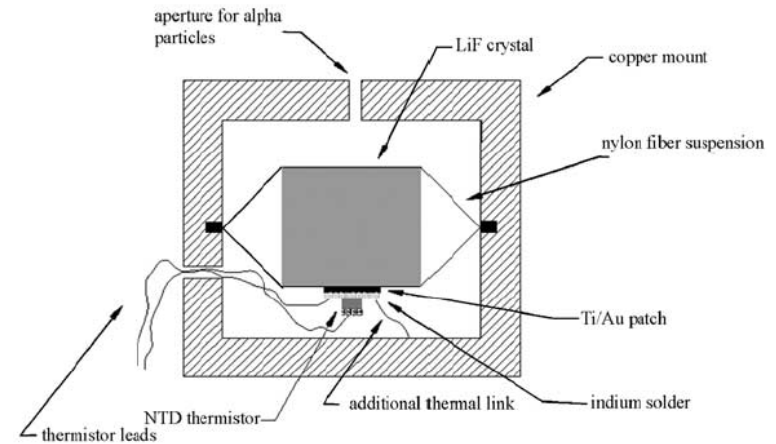
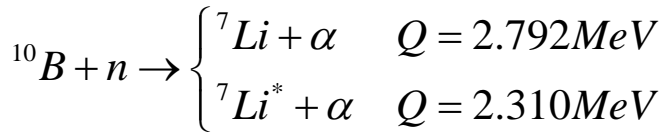


Fig. 2. Superimposed pulse height spectra of thermal neutrons, 5305 keV alpha particles, and monoenergetic fast neutrons at 3996, 5167, and 7223 keV. The labeled energies are the total energy deposited in the bolometer. Each spectrum is normalized to the exposure time of the 7223 keV neutrons.



- ✓ Étude systématique de # configurations de bolomètres LiF
- ✓ cube ${}^6\text{LiF}$ (99,99% !) de $(6\text{mm})^3$
- ✓ Résolution 78keV FWHM à 5.3MeV @ $T_{\text{bain}}=328\text{mK}$ (ADR)
- ✓ 1ère preuve de la faisabilité spectroscopique sous faisceau n

Outre-Atlantique Spectroscopie n en Californie (^{10}B)

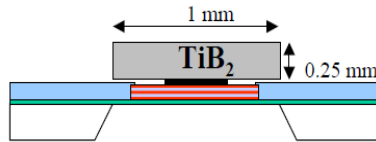


TiB_2 absorber for neutron detection:
large heat capacity per unit mass (metal)

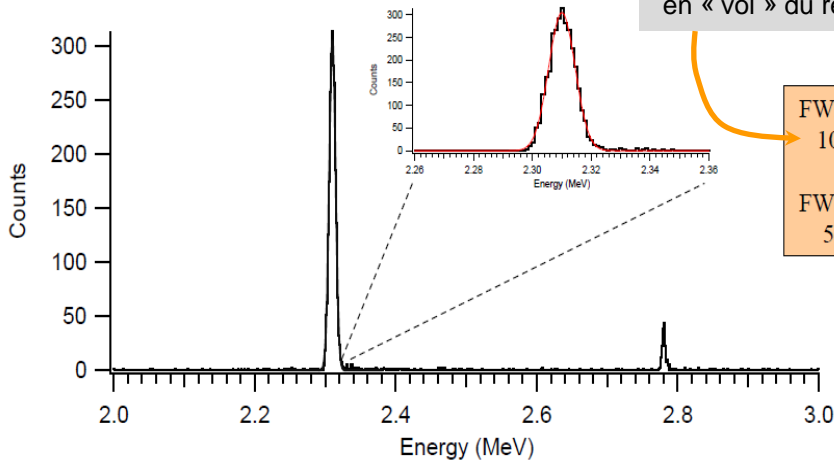
$$C_{\text{absorber}} = 10 \text{ nJ/K}$$

$$m_{\text{abs}} = 4 \text{ mg}$$

T=148mK, Mo/Cu TES



Thermal neutrons spectrum



Élargissement Doppler
de la raie: gamma émis
en « vol » du recul de $^7\text{Li}^*$

FWHM @ 2.31 MeV:
10.5 keV @ 0.5 %

FWHM @ 2.79 MeV:
5.5 keV @ 0.2 %

T. Niedermayr et al., 2004



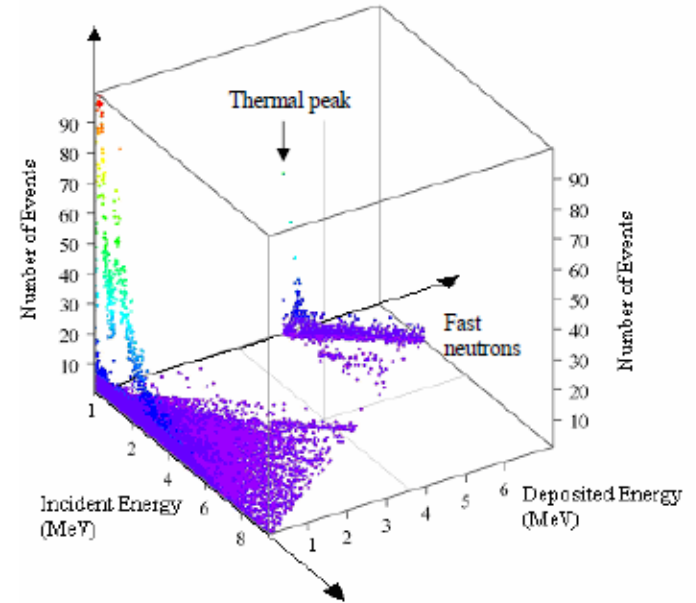
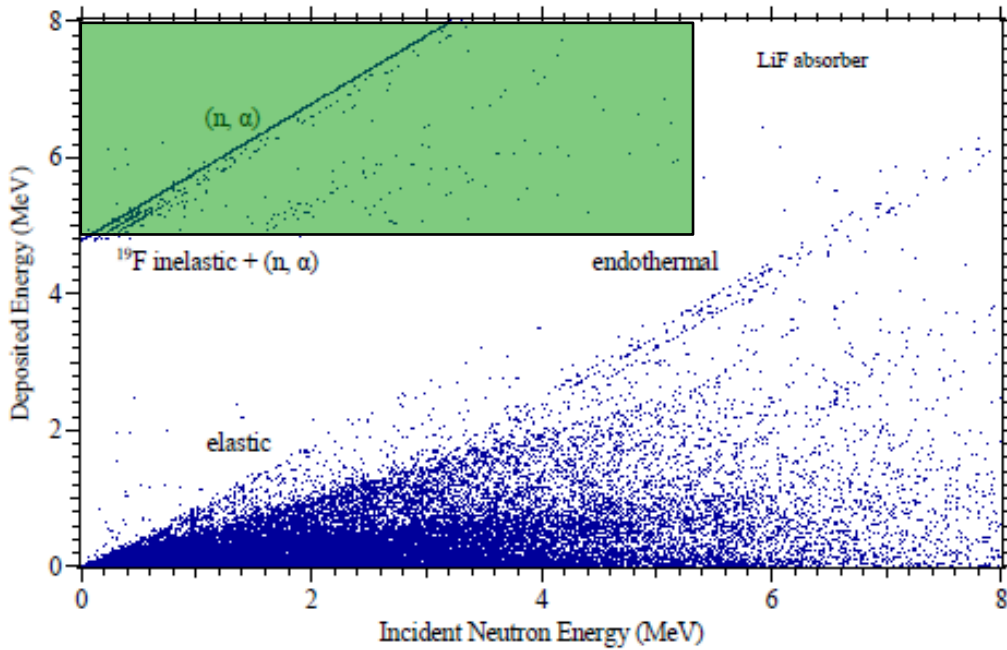
“UltraSpec”

- R&D awards 2006
- brevet 2008
- ADR & pulse tube
- cible interchangeable pour spectroscopies gammas et neutrons
- licence ?

Outre-Atlantique Spectroscopie n en Californie (${}^6\text{Li}$)

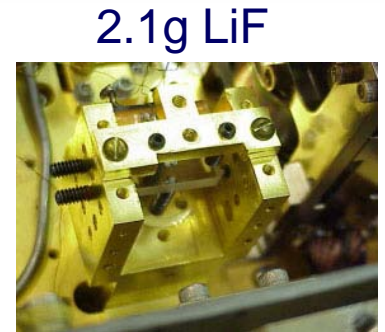
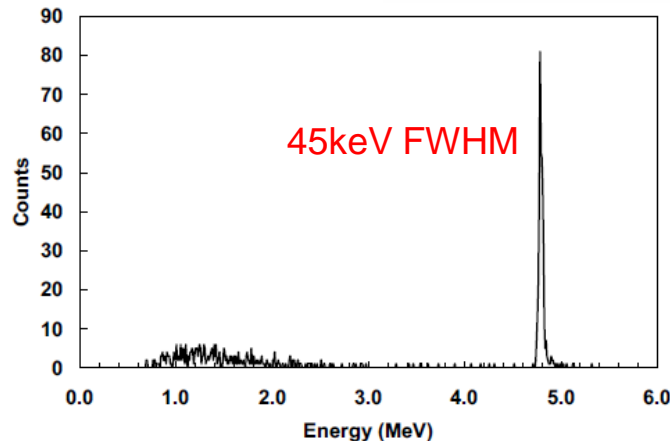


Simulation MCNP-POLIMI (Monte Carlo N-Particle Transport Code System To Simulate Time-Analysis Quantities. Polytechnic of Milan)



Mesures:
 ${}^{252}\text{Cf}$ thermalisée

Très peu d'interférences
100keV \rightarrow 4.8MeV

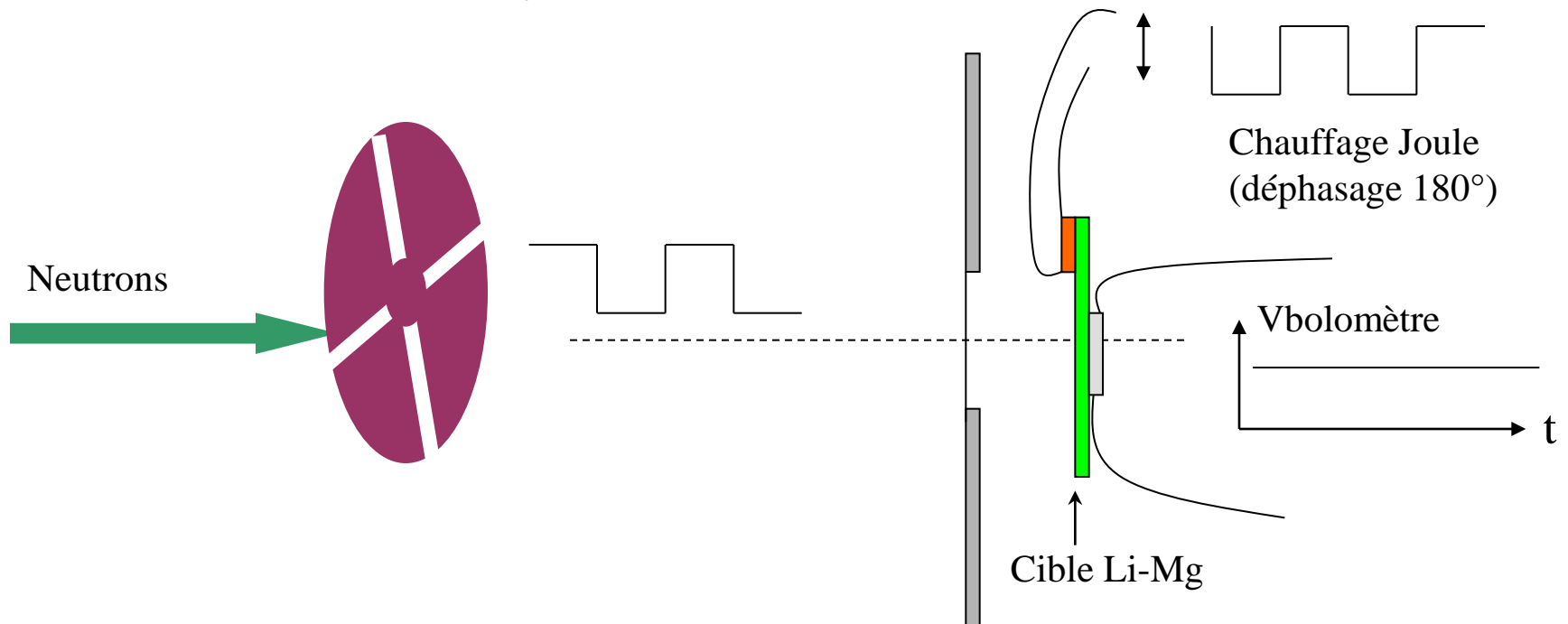


Bolomètres fonctionnant en mode ESR: « Electronic Substitution Radiometry »

L'énergie du paquet de particules absorbé au niveau du bolomètre est déduite de l'énergie injectée par effet Joule (dans une résistance couplée au bolomètre) produisant la même élévation de température...

✓ Radiomètre n_{th} (NIST/Univ. Indiana; **Z. Chowdhuri et al., in RSI 2003**)

- mesure de flux de neutrons thermiques $> 10^5 \text{ s}^{-1}$ avec une précision absolue de 0.1 %
- Bolomètre en alliage Li-Mg (${}^6\text{Li}_{0.74}\text{Mg}_{0.26}$) refroidi à 2K
- on exploite la réaction $n_{th} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ $Q=4.78 \text{ MeV}$ (charge $P=50 \rightarrow 500 \text{ nW}$ sur bolo)



❑ La détection « cryogénique » des neutrons

- ❑ Généralités sur les neutrons
- ❑ Interactions des neutrons avec la matière
- ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
- ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives

❑ Sources de neutrons

❑ Références

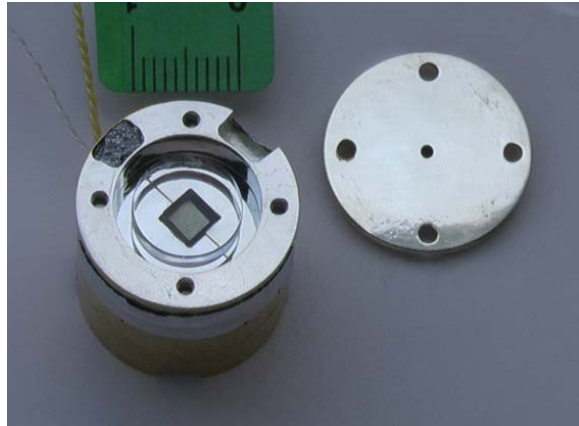
- ❑ Performances d'un bolomètre de 0.5g en ^6LiF
 - ❑ Calibration à l' IRSN, Cadarache (installation AMANDE)
 - ❑ Discussion
- ❑ Bolomètres massifs scintillants en LiF
 - ❑ un détecteur de 16g en LiF naturel
 - ❑ 32g en souterrain
 - ❑ 32g enrichi en ^6LiF
- ❑ Cibles alternatives
- ❑ Prospectives

≡ présentation @ FNDA2011

Un spectromètre de neutrons transportable

(thèse, J. Gironnet, 2010)

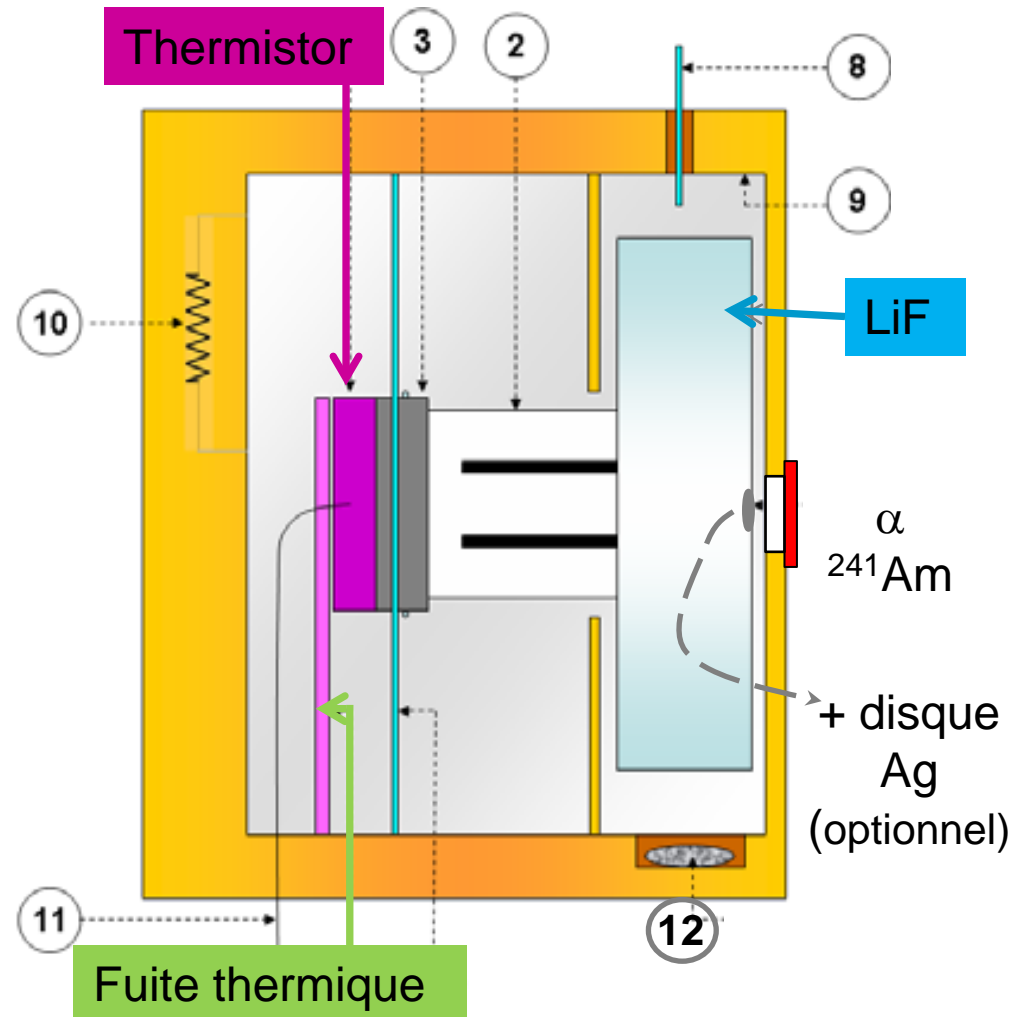
bolomètre **0.5g** ${}^6\text{LiF}$ (${}^6\text{Li}\approx 95\%$)



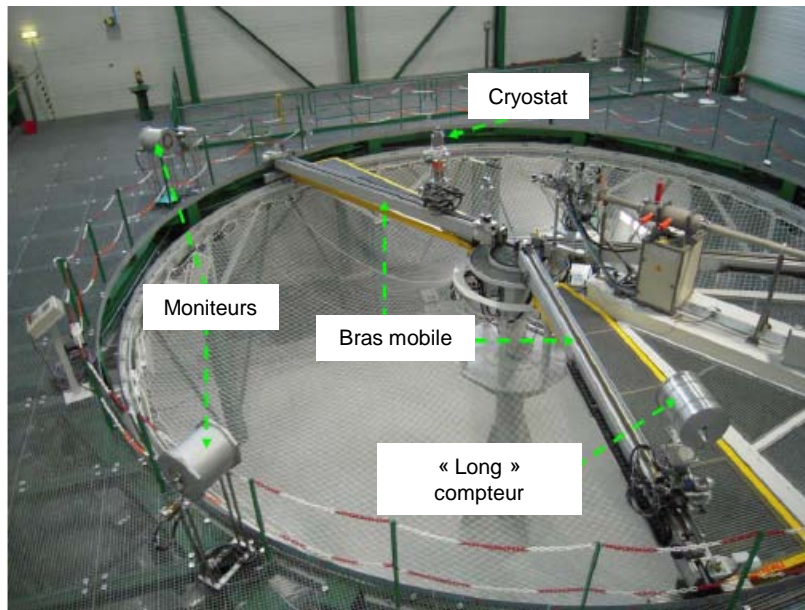
...dans un cryostat 300mK ...



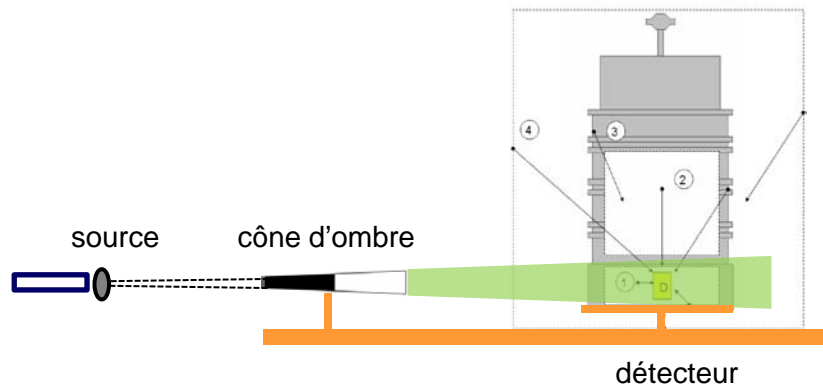
Réfrigérateur ${}^3\text{He}$



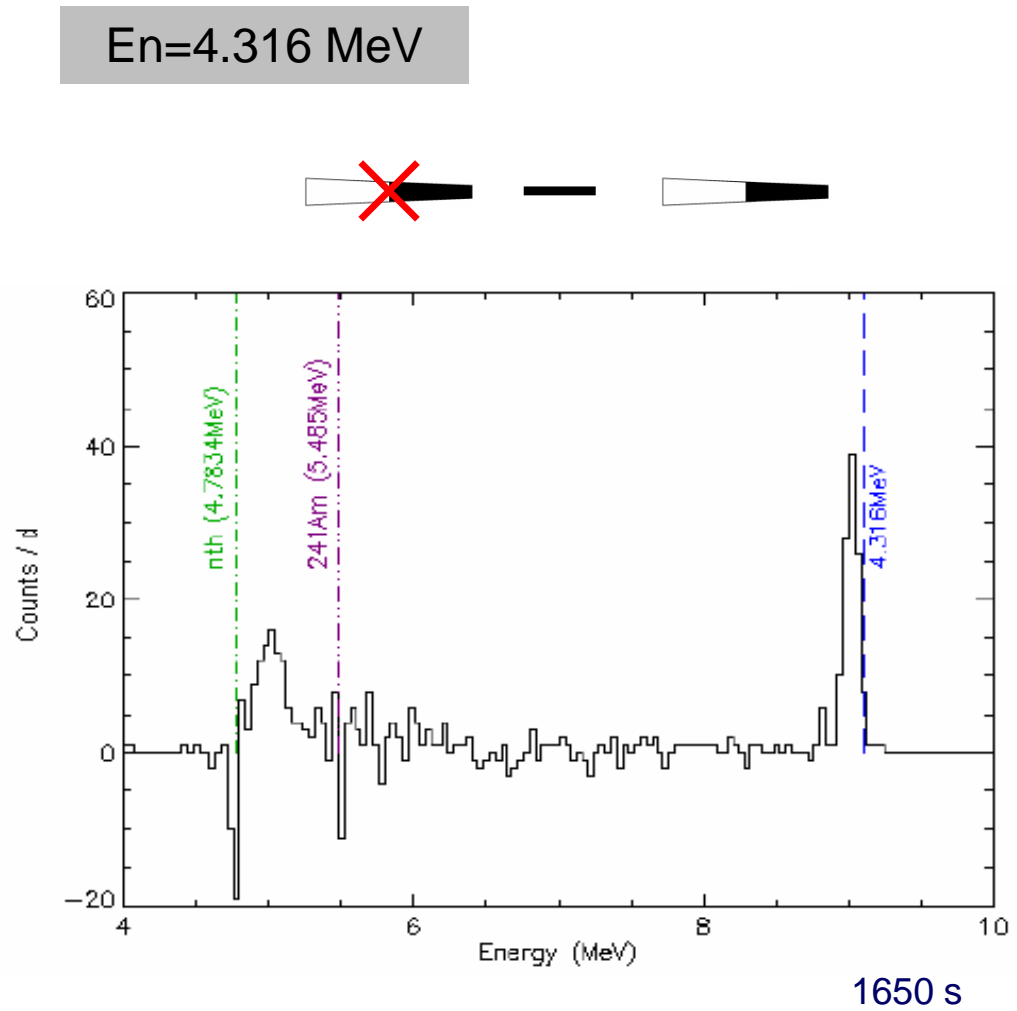
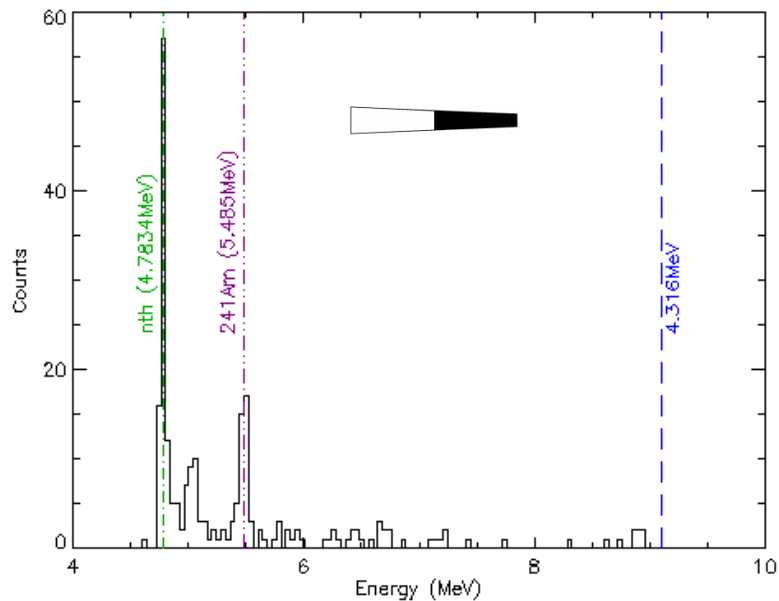
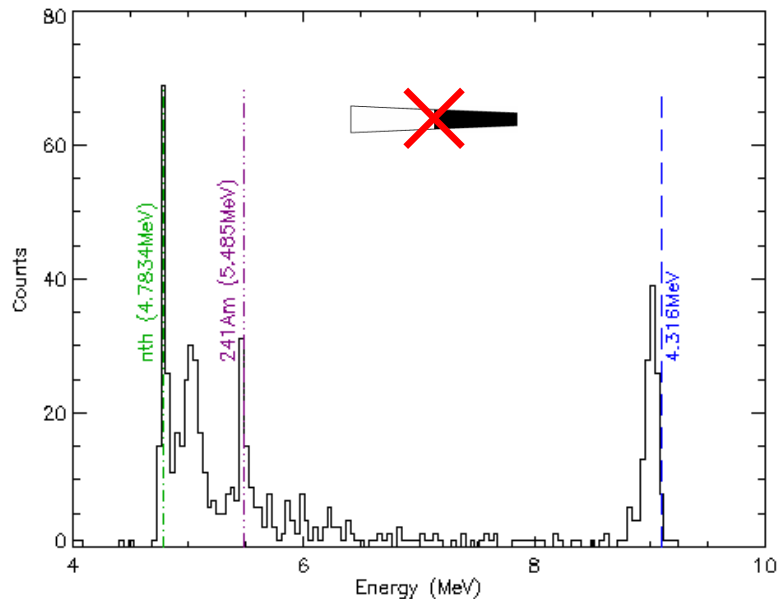
Calibration @ AMANDE (IRSN, Cadarache)



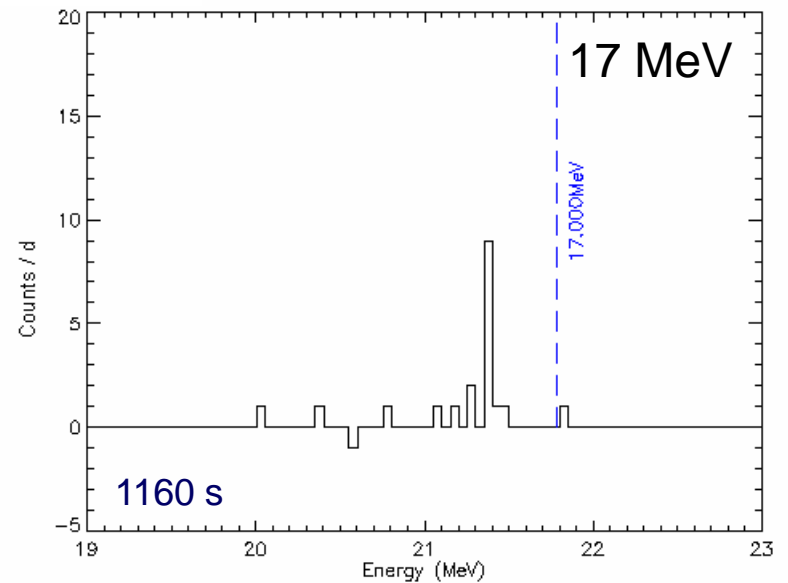
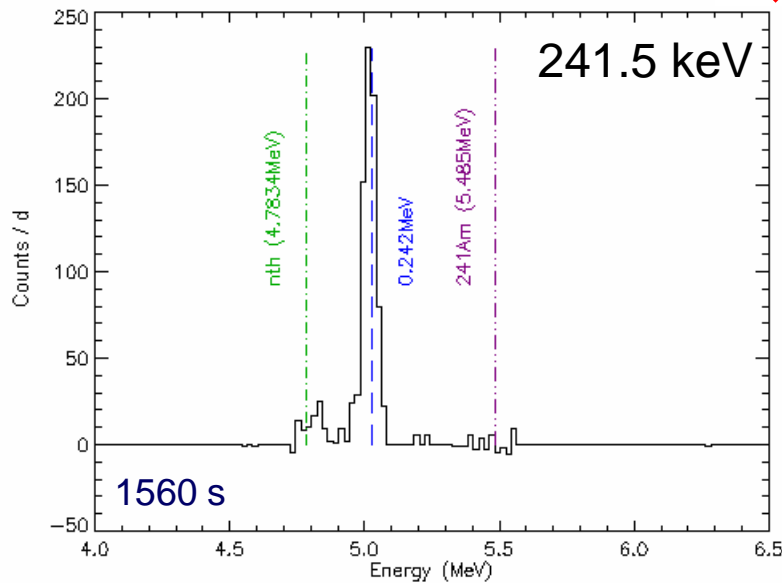
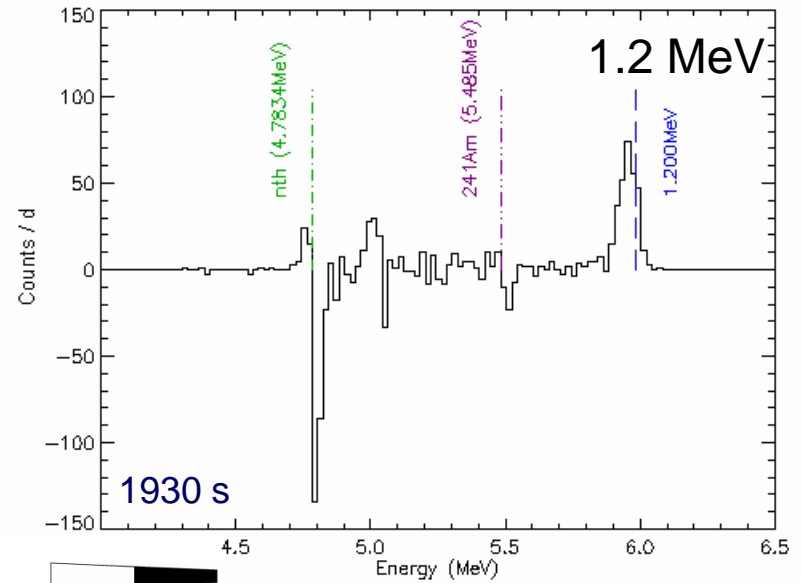
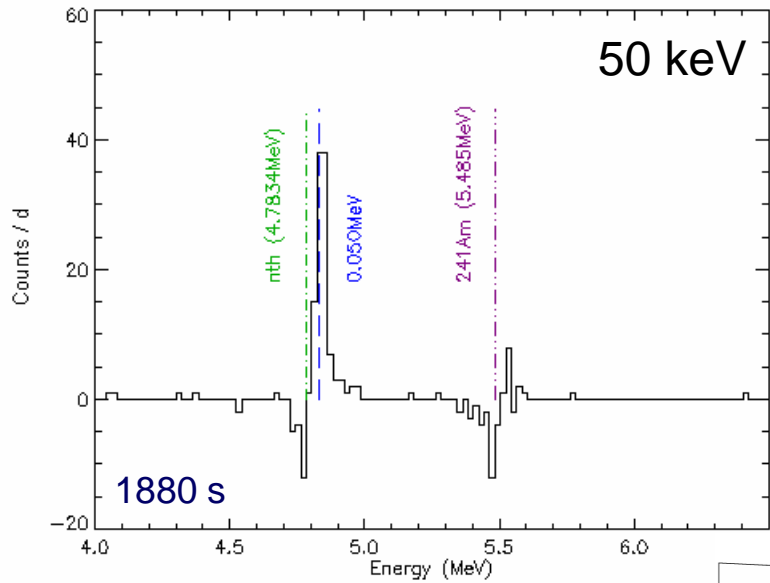
Spectromètre 0.5g ^6LiF @
430mK



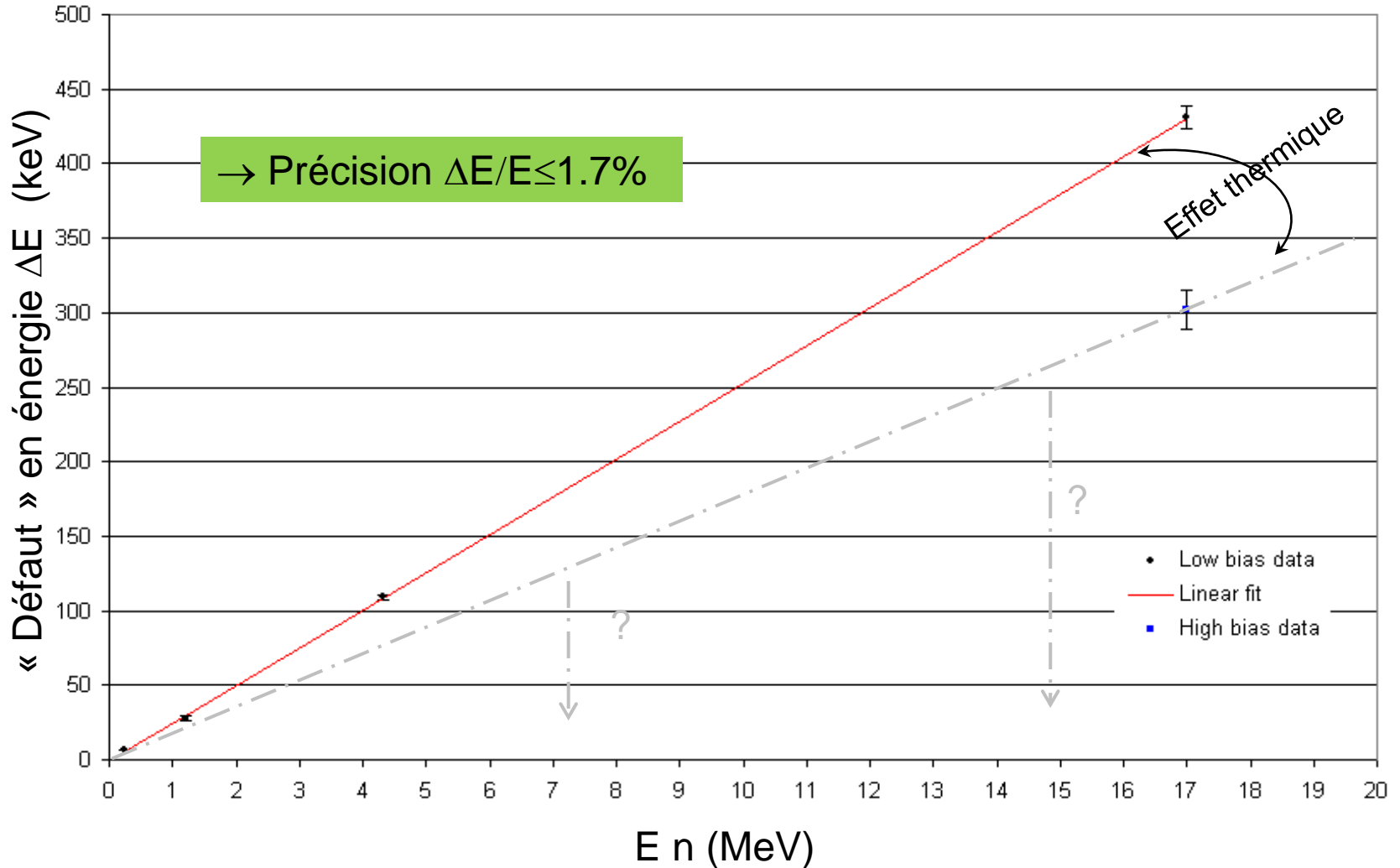
Observation de « pics neutrons »

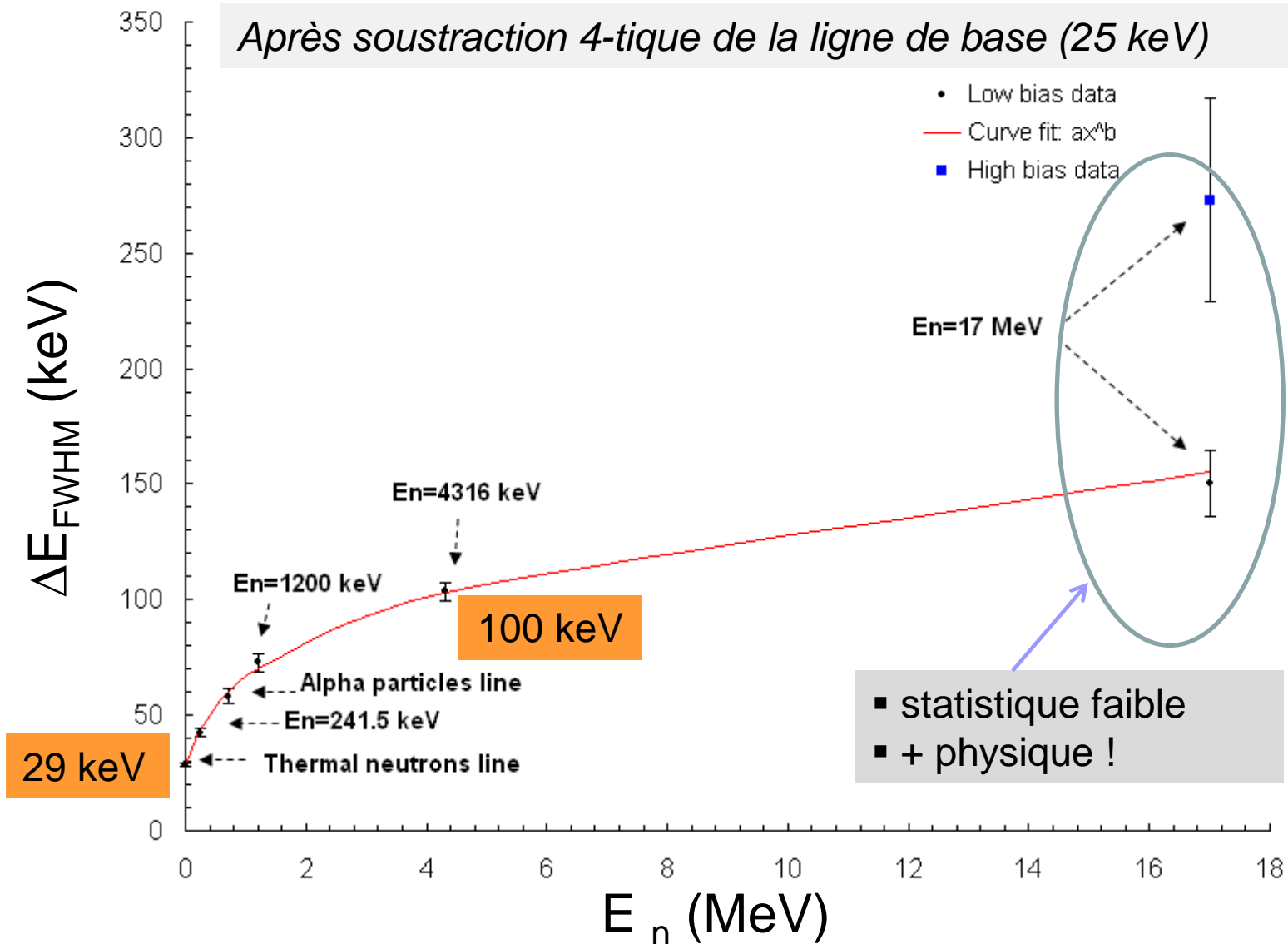


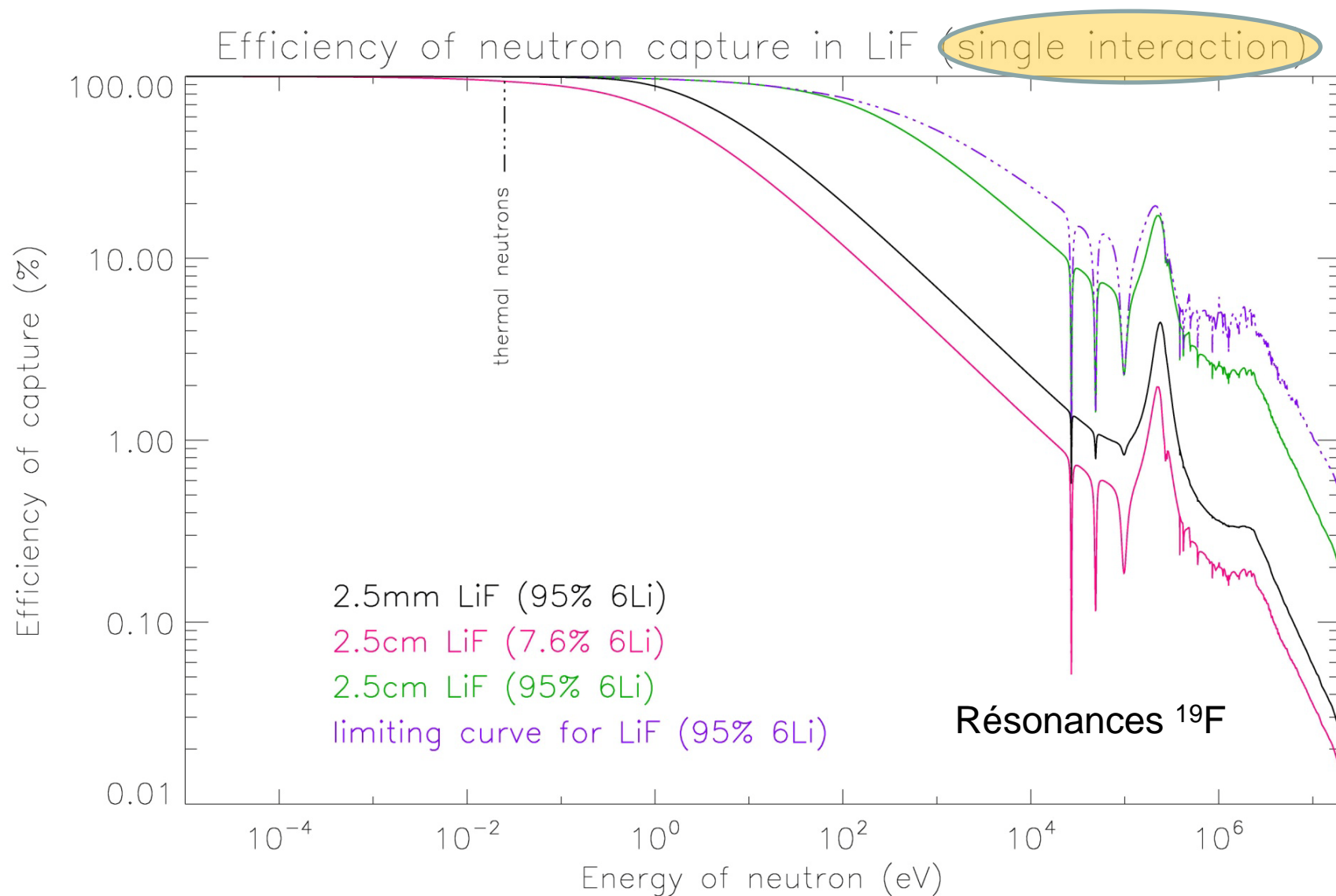
Tendance générale (calibration à partir du pic des thermiques)

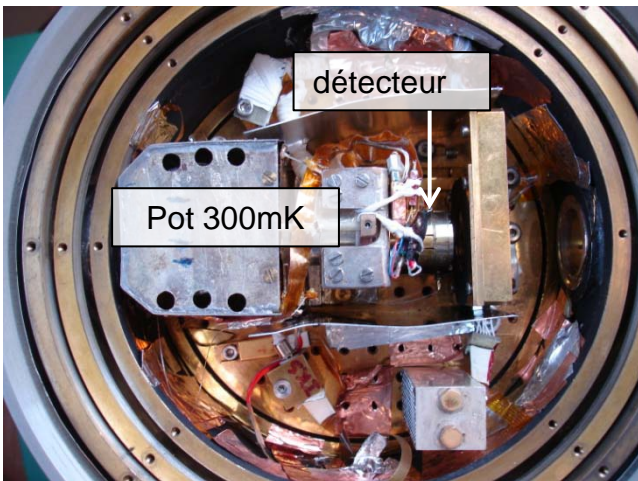
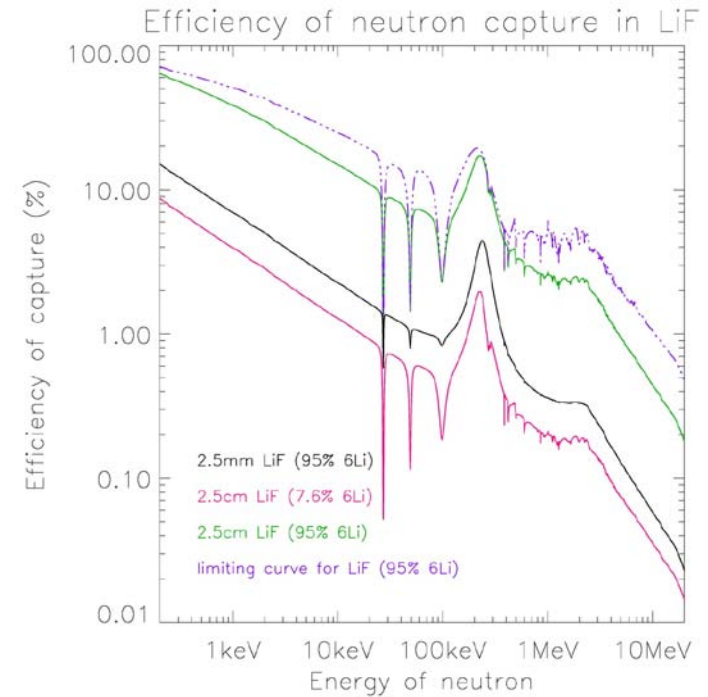
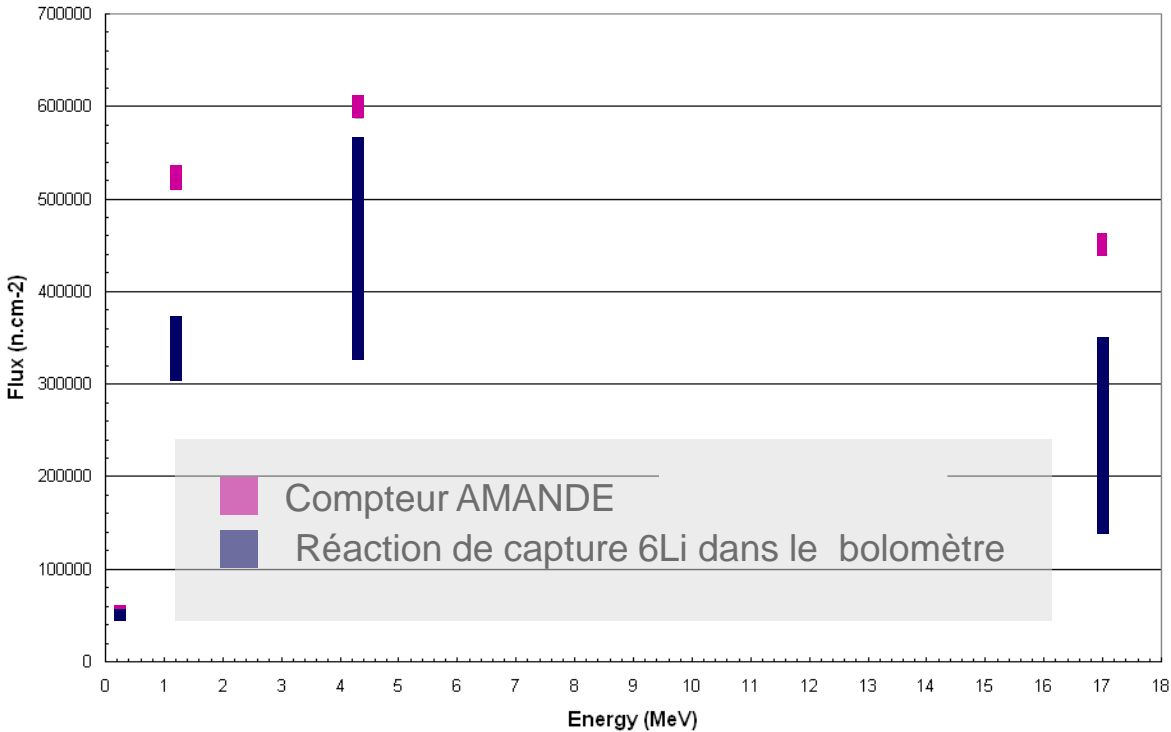


Restitution de l'énergie du neutron avec précision...









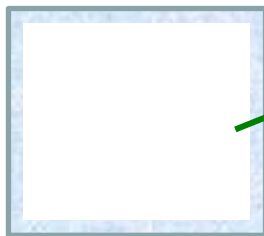
Faisceau n

- pas mal de matière « inutile »
- neutrons perdus en ligne
- simulations détaillées manquantes
→ nécessité d'un doigt froid

Discussion / Résolution
sources d'élargissement de ΔE_{FWHM} ?

- tailles à comparer avec les parcours des alpha & tritium:

Parcours (max)	Neutrons thermiques	$E_n=20$ MeV
Alphas	6 μm	160 μm
Tritium	34 μm	1 mm




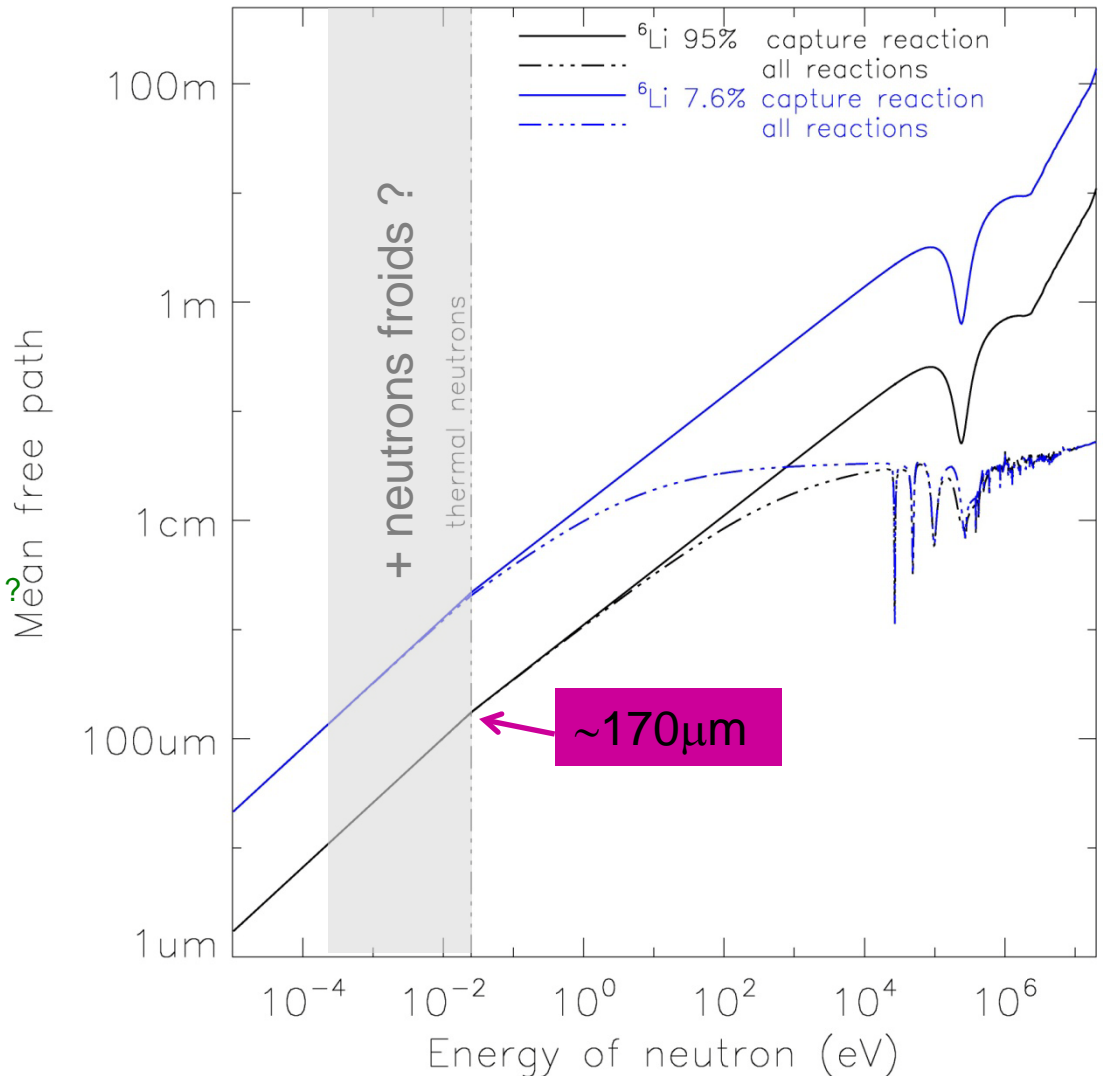
tritium échappement?

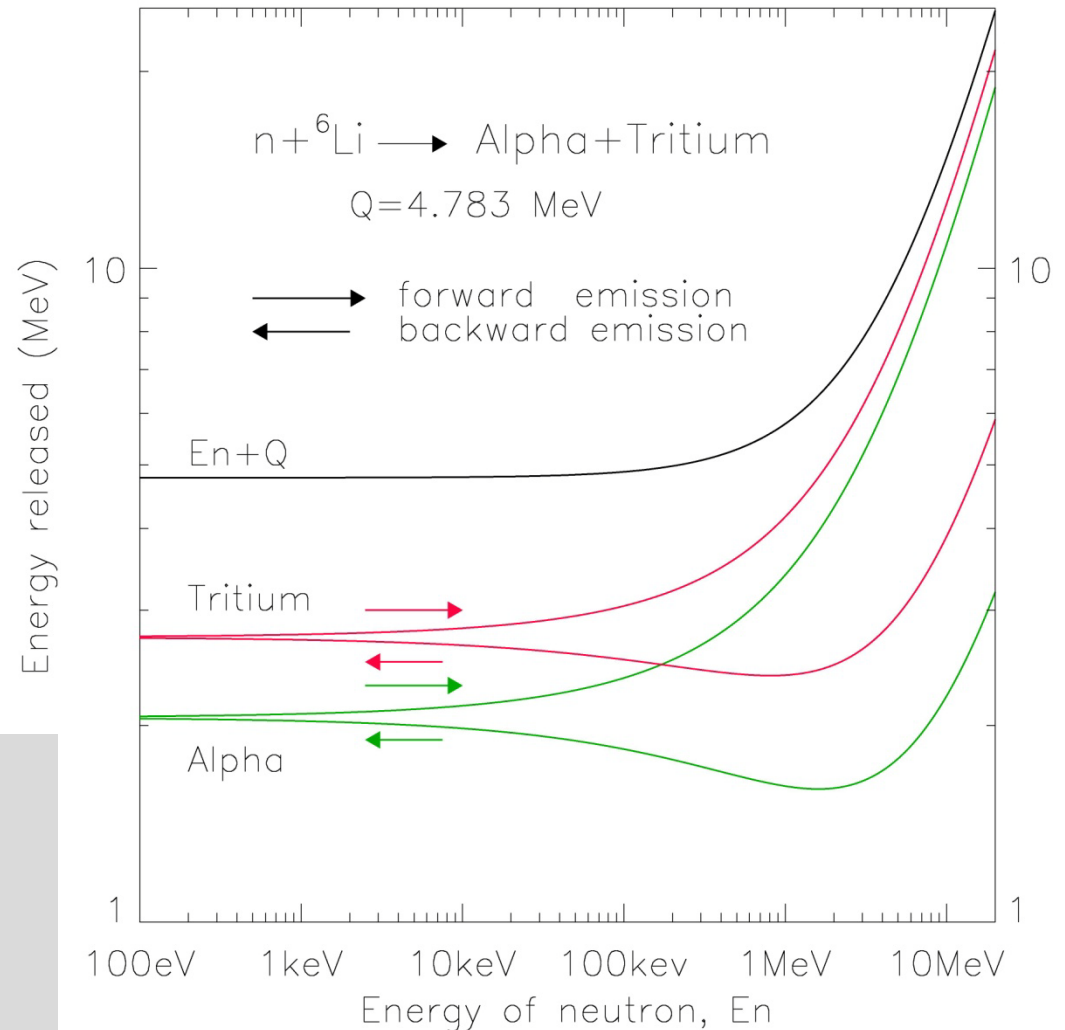
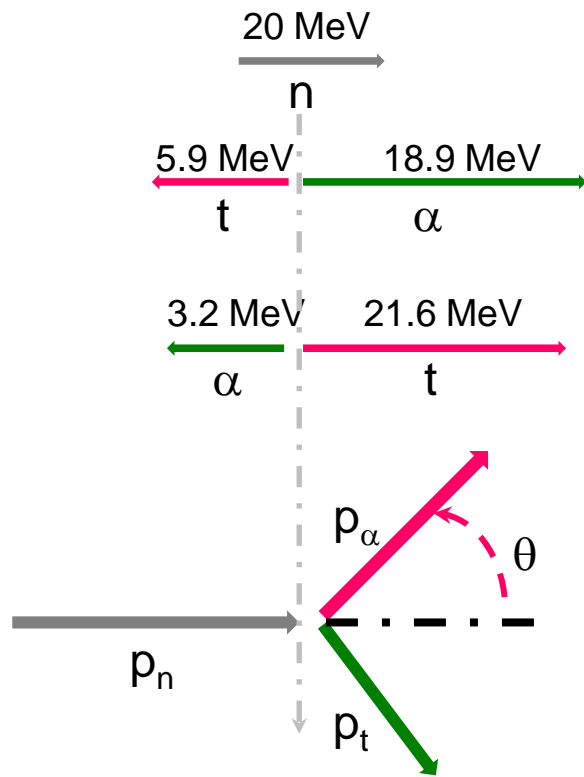
Neutrons lents



Neutrons rapides

 partie sensible





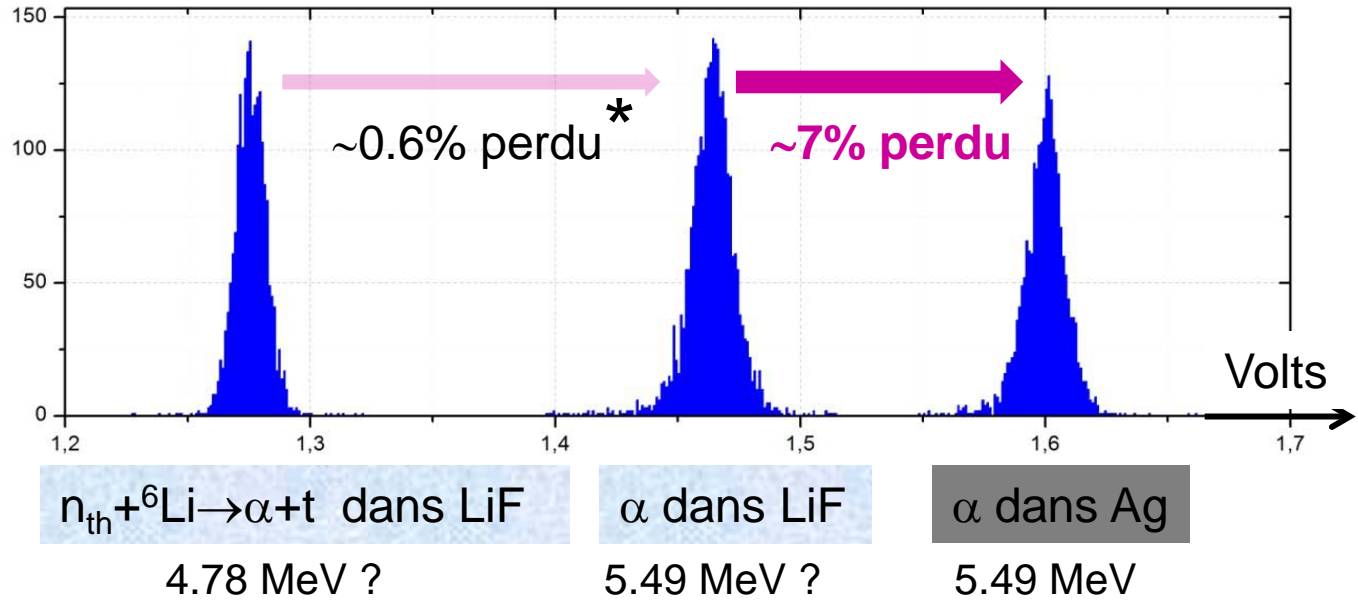
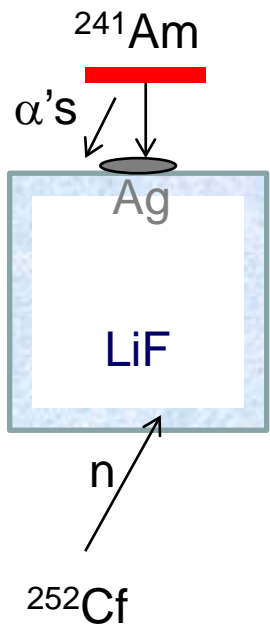
Lois de conservation (E, p)
 → un paramètre libre (θ, \dots)

- probablement la cause principale de dispersion de l'énergie si alphas & tritium ne sont pas également thermalisés dans le cristal

→ $\Delta E_{\text{FWHM}} \uparrow$ with $E_n \uparrow$

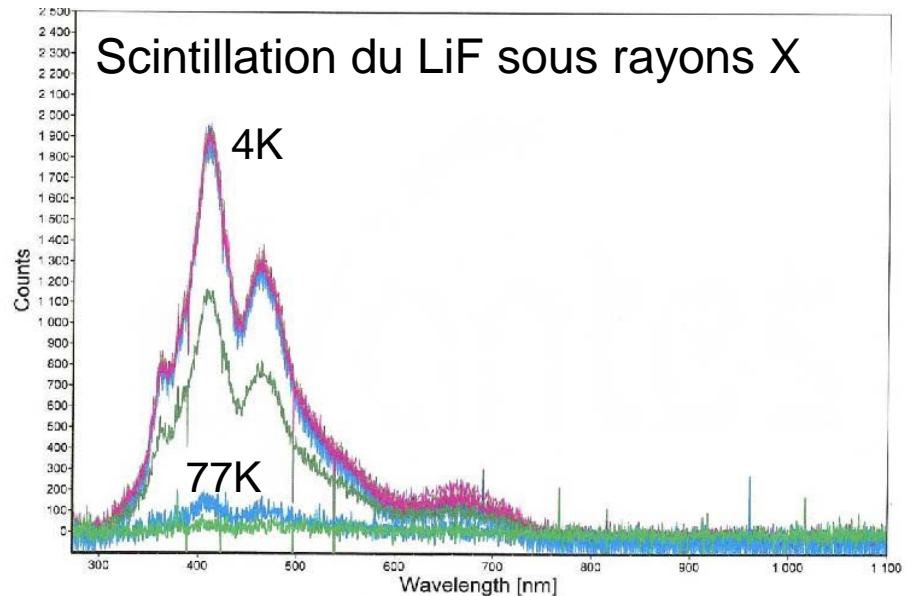
Discussion

3. Thermalisation à 100% ?



« thermalisée »

- une perte d'énergie est attendue !
LiF est thermoluminescent @ 300K (dosimètres...)...
& **le piégeage** est pire à basse T !
- **+ émission de lumière ? OUI**, à basse T précisément !



* Notre article dans NIM A 337 (1993) 95-100

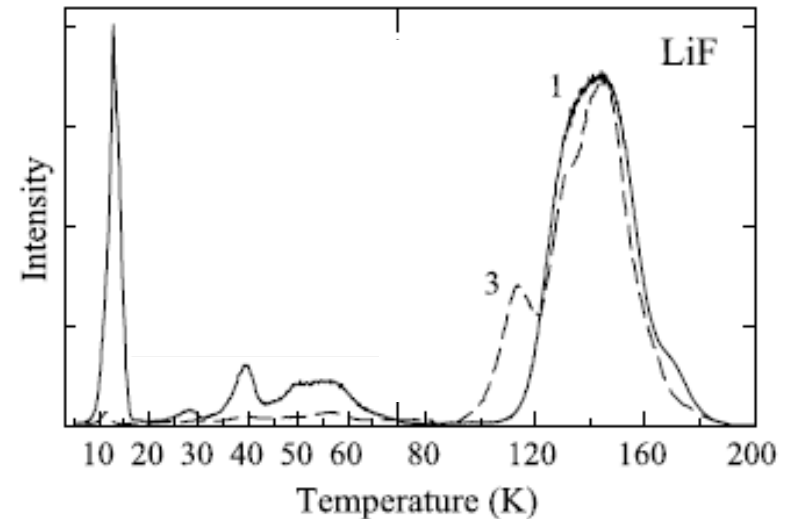
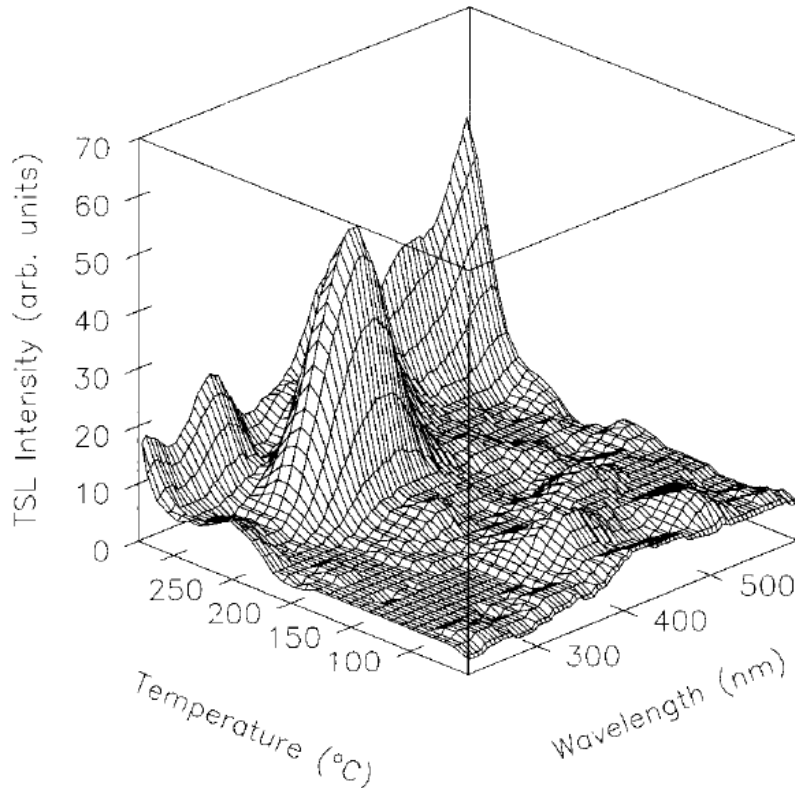
Thermoluminescence @ 300K → perte d'énergie à TBT

LiF



- ✓ Le LiF est utilisé en dosimétrie
- ✓ $E_{\text{gap}} \sim 12\text{eV}$
- ✓ lecture par thermo-luminescence de la dose reçue
- ✓ pastilles de LiF fritté, vendues sous les appellations TLD100 (%naturel), TLD600 (95% ^6Li), TLD 700 (99% ^7Li)
- ✓ sans compter la partie BT de la thermoluminescence, également perdue à TBT

Thermoluminescence HT de LiF:Mg, Cu, P.
(irradiation bêta $50\mu\text{Gy}$; pente de réchauffage $9^\circ\text{C}/\text{sec}$)



Thermoluminescence BT de LiF:Na
(irradiation e^- de 30keV @ 6K ; réchauffage $10\text{K}/\text{mn}$)

Lushchik et al., 2006

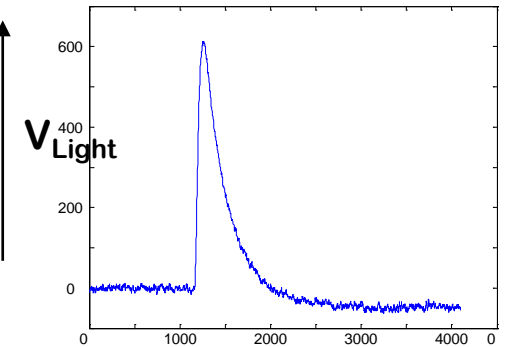
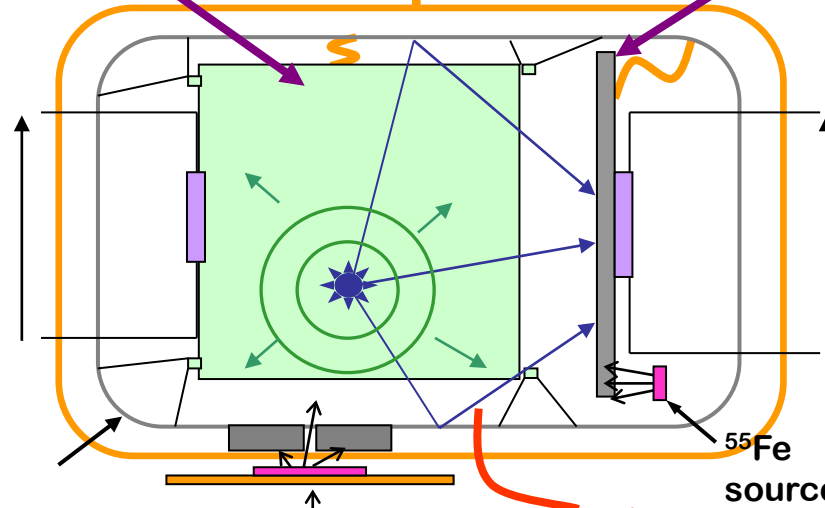
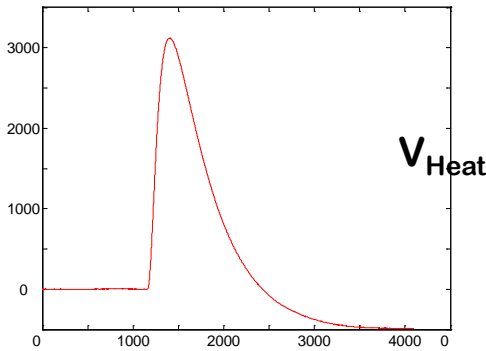
Martini et al., 1997

Bolomètres Scintillants

**Cristal
(Scintillant)**

20 mK

**Détecteur optique
(disque Ge)**



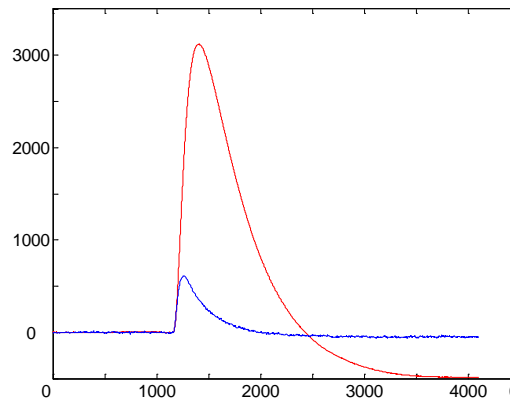
**Cavité
Réfléchissante
(dépôt Ag sur Cu)**

Source interne

Fibre-optique
▪ NIR LED
▪ $\lambda = 820 \text{ nm}$

^{55}Fe
source

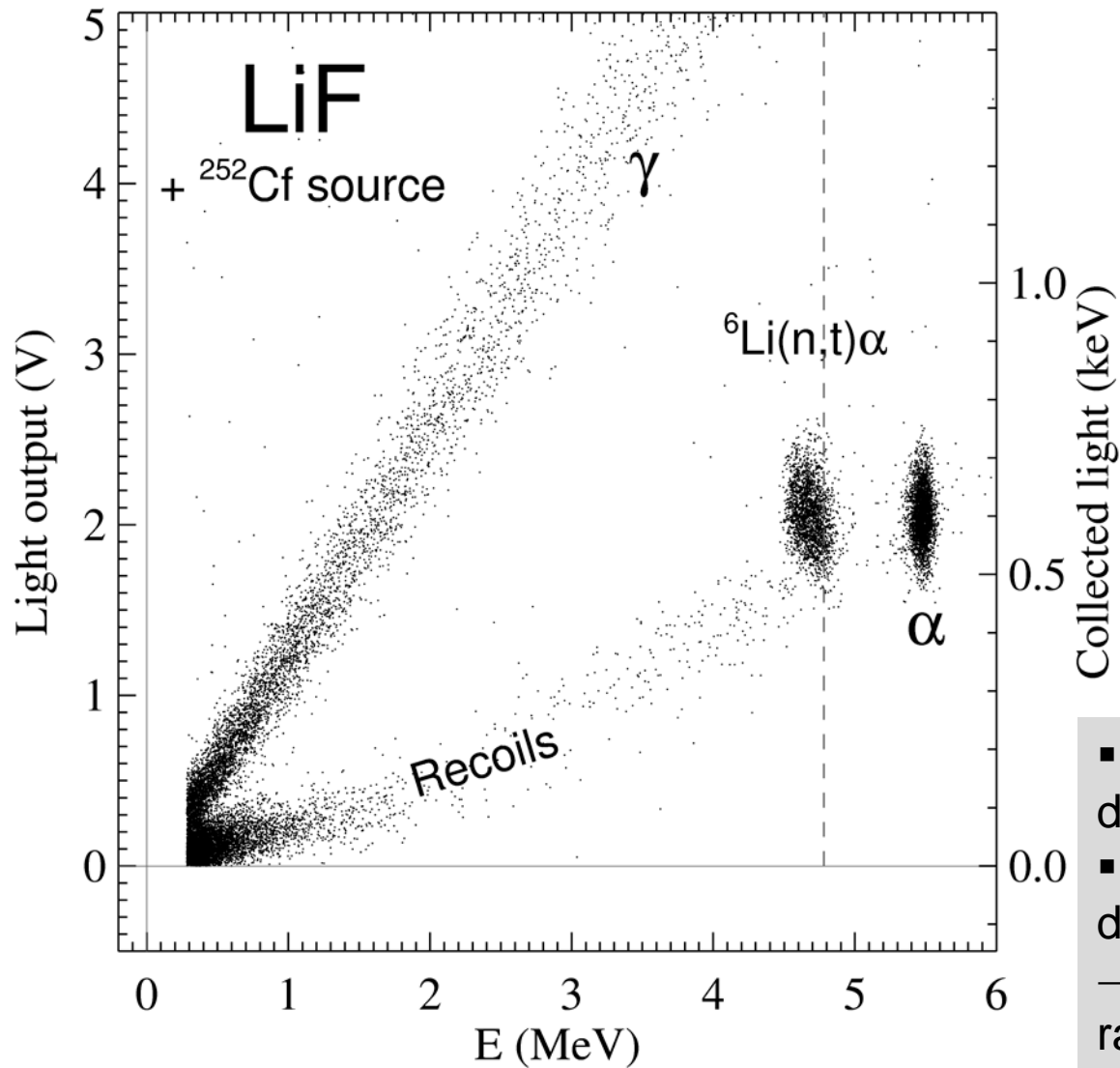
**Ge-NTDs
thermistor**



BGO, saphir, LiF...



Bolomètres Scintillants en LiF: 16g de LiF naturel (2003)



- rendement lumineux faible du LiF
- mais une très bonne discrimination des particules
→ un espoir de mesurer de rarissimes neutrons (rapides) en souterrain

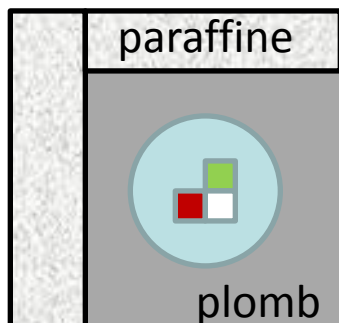
Bolomètres Scintillants en LiF: 32g de LiF naturel (2007)

20mK



LiF
33g

Saphir
50g

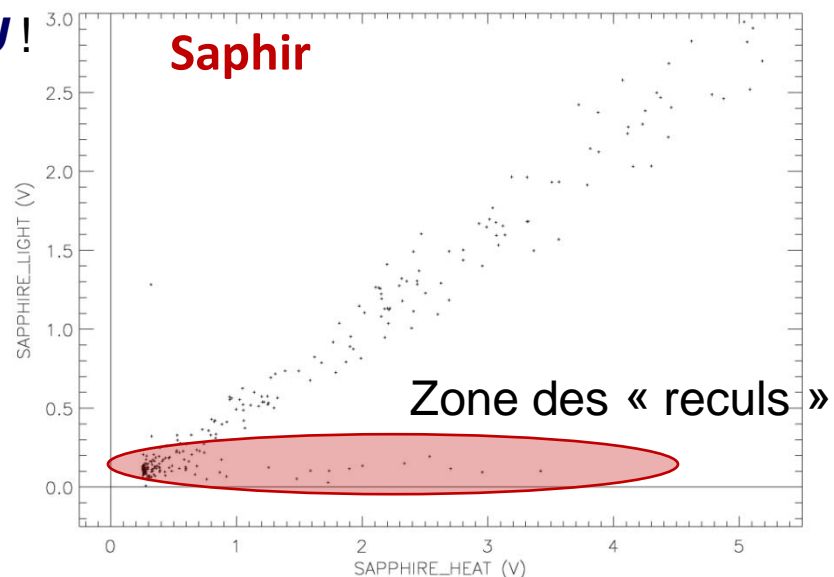
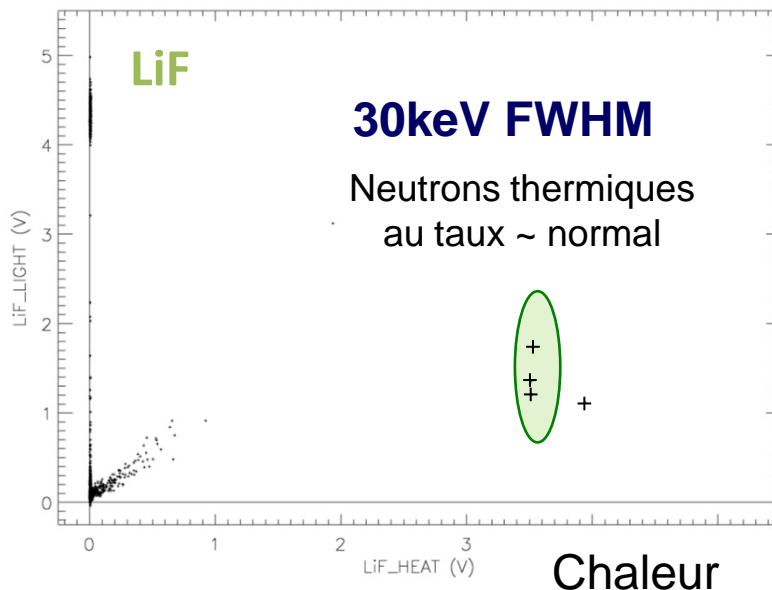


Fonds dans le labo. souterrain
de Canfranc \approx 1 nuit

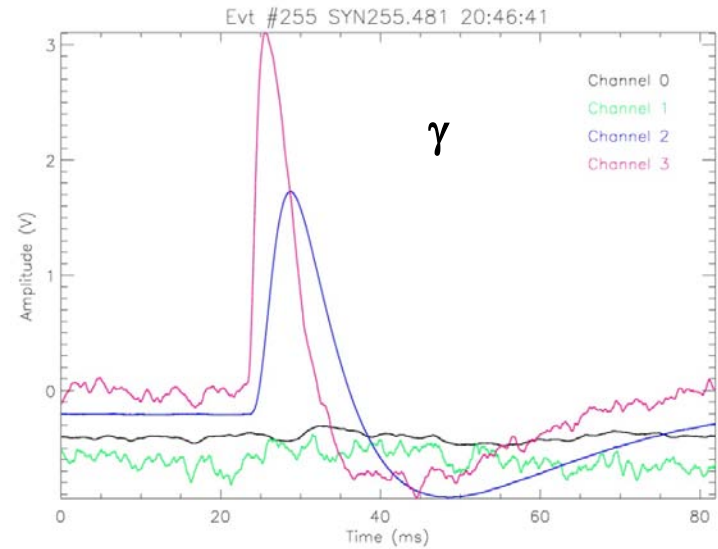
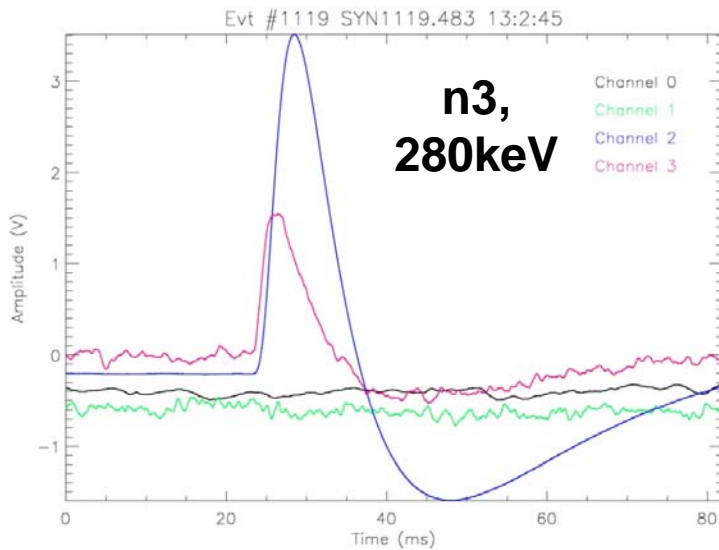
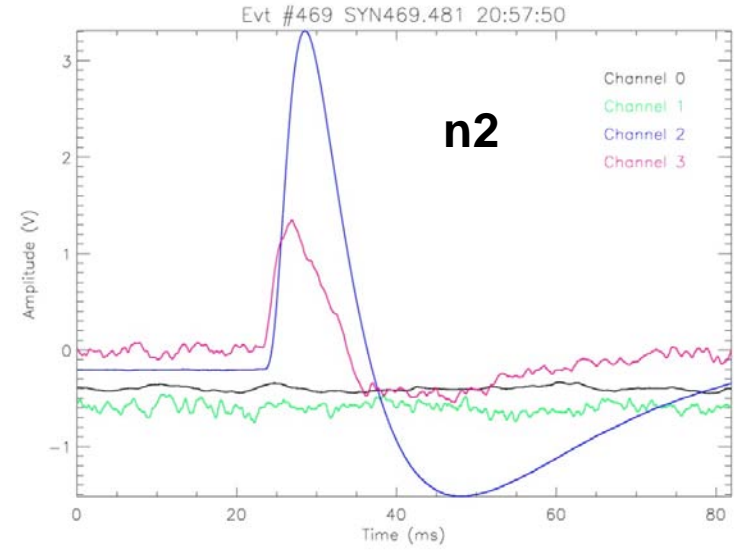
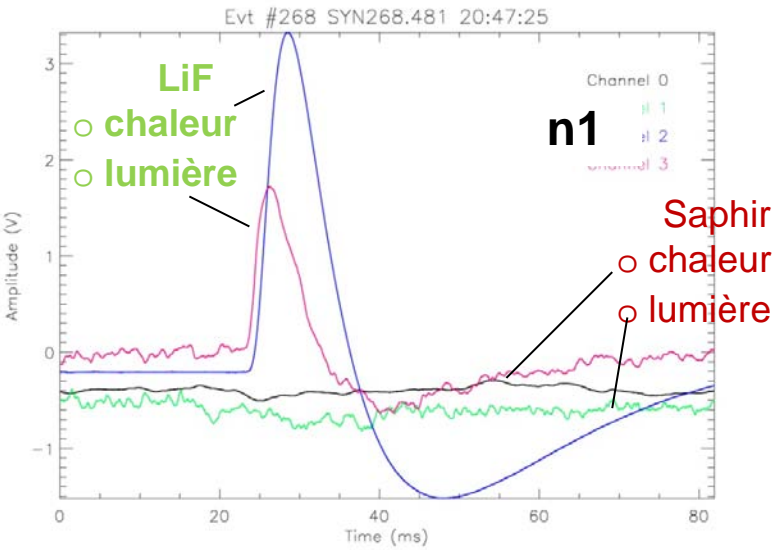
Mesure de Neutrons *IN SITU* !

Les calibrations ^{252}Cf ont
montré que l'enrichissement
en ^6Li du LiF était nécessaire
pour conclure sur l'hypothèse
d'une origine neutron au fond
mesuré dans le saphir
(cf. les prochains transparents)

Lumière

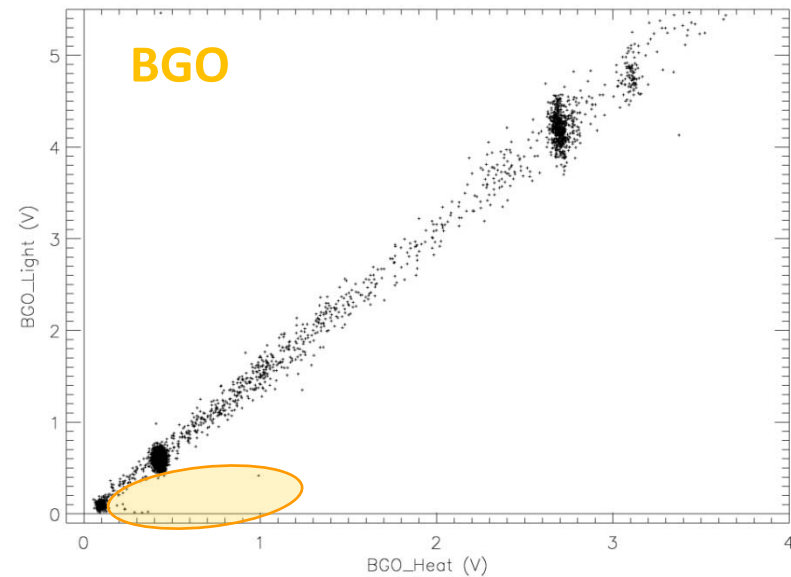
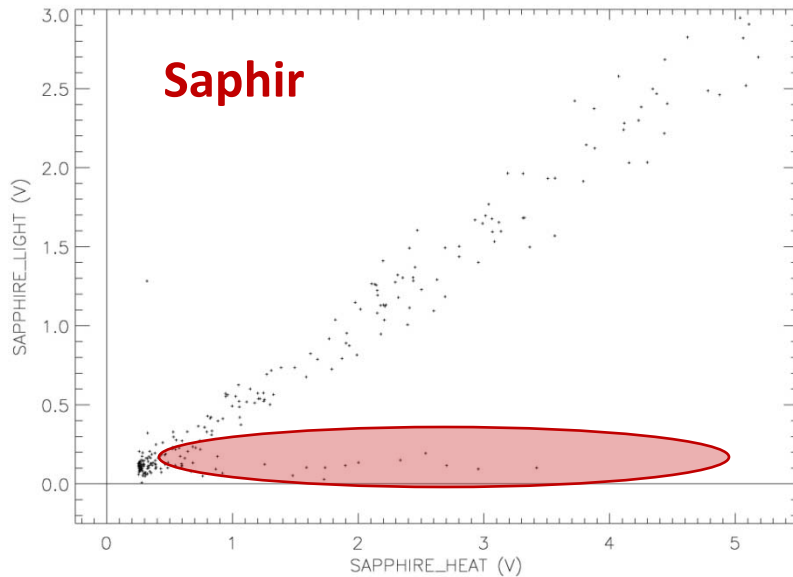
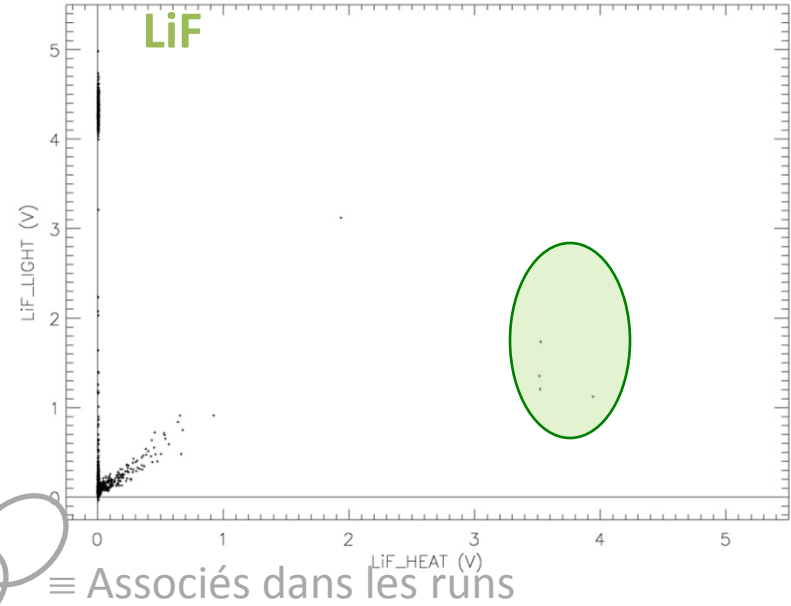
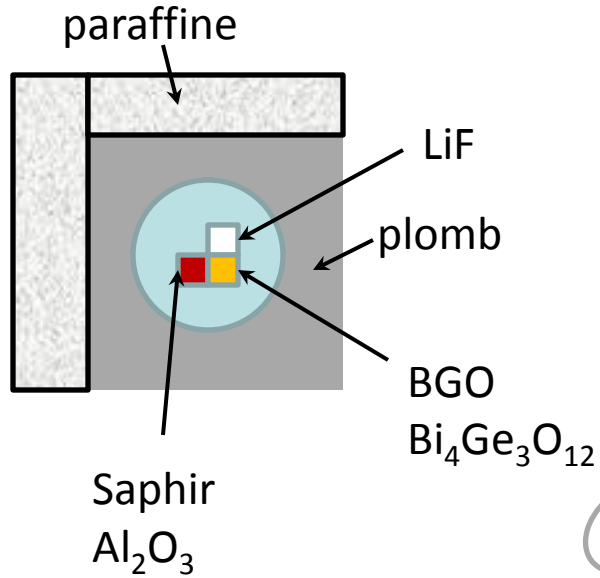


2 n thermiques, 1 n rapide & 1 γ dans le détecteur LiF

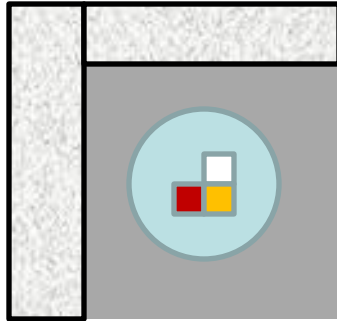


Fond Type

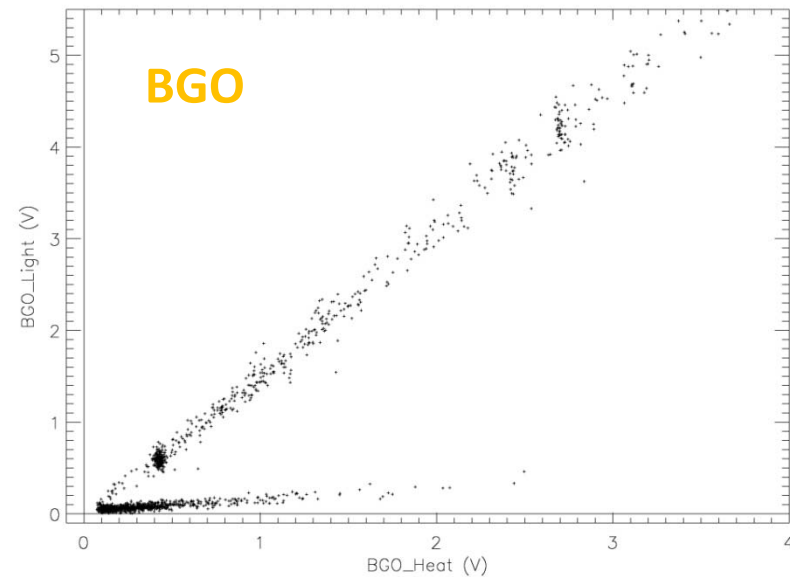
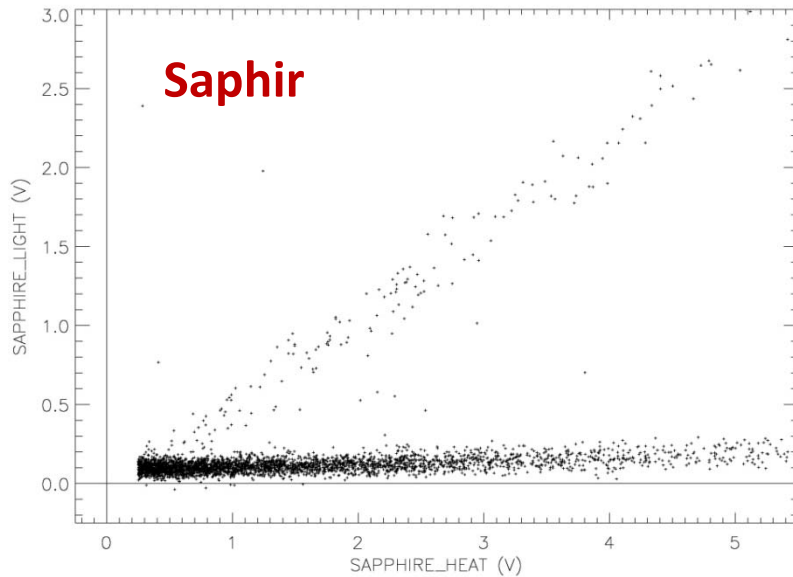
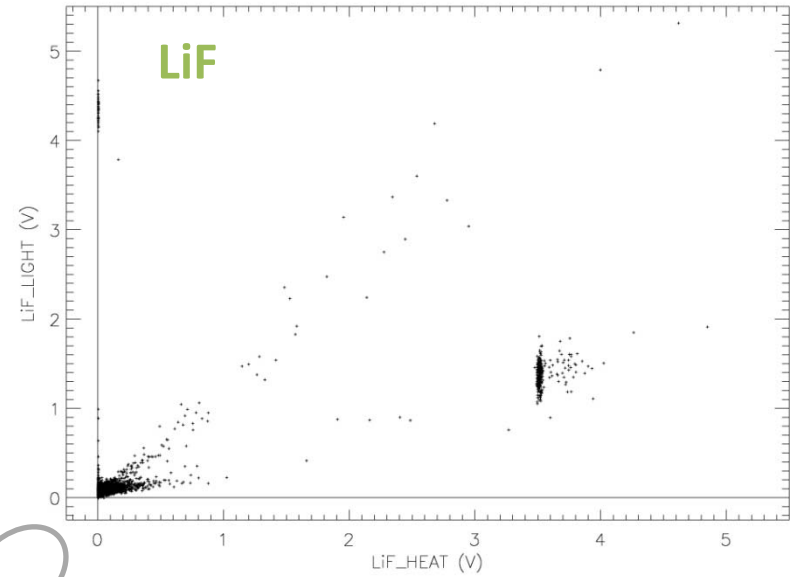
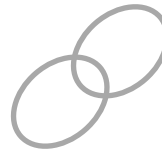
Nov. 2007
≈ 1 nuit



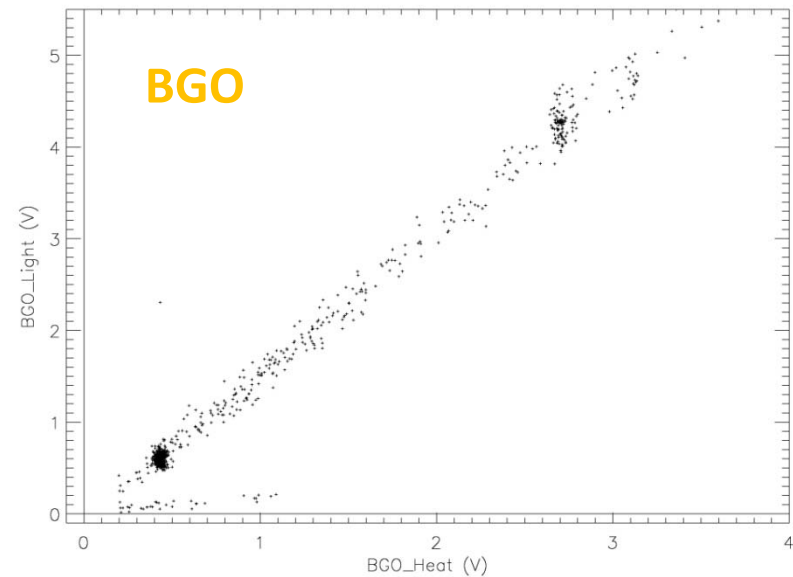
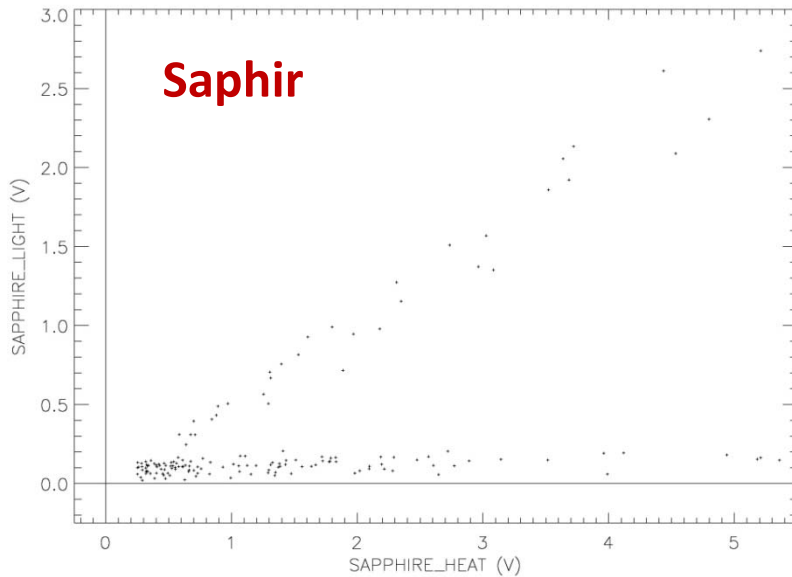
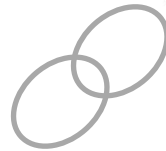
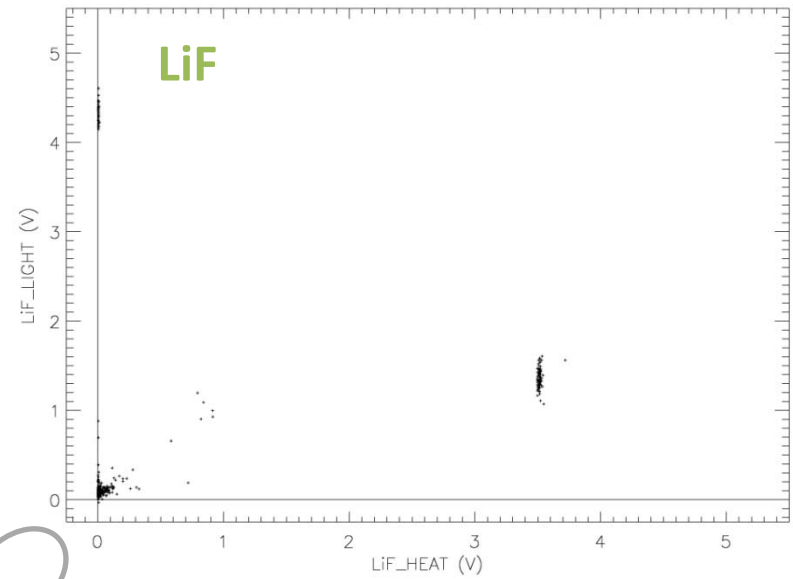
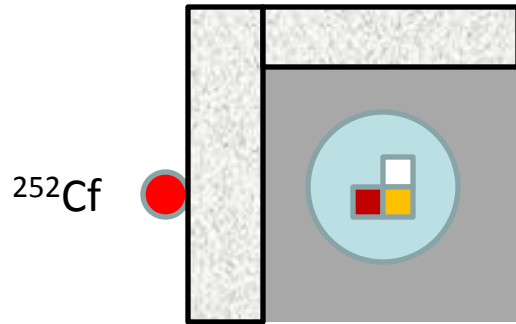
Neutrons rapides



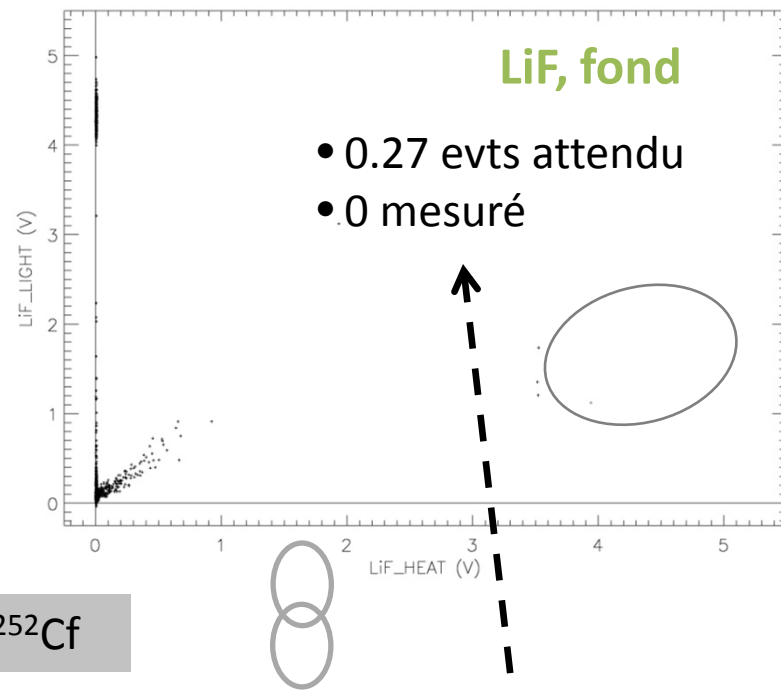
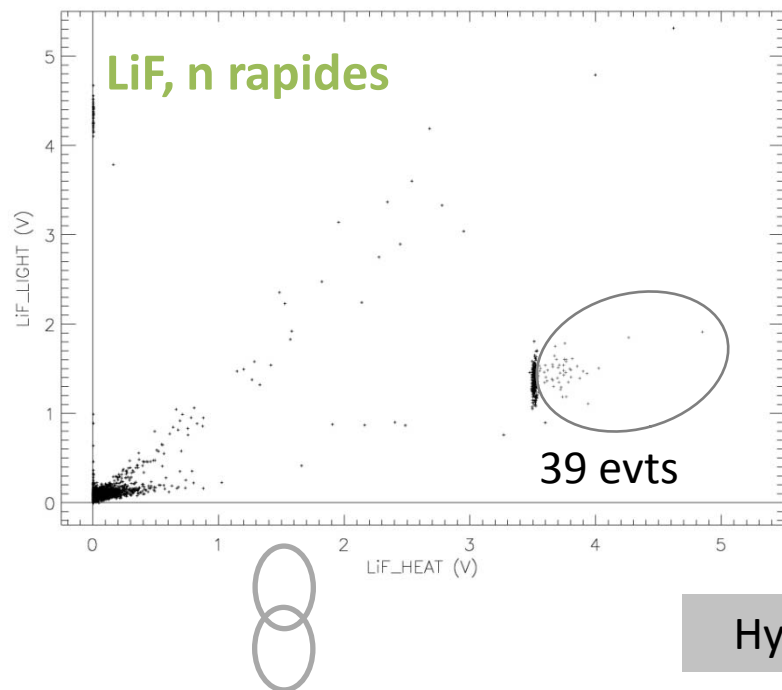

 ^{252}Cf



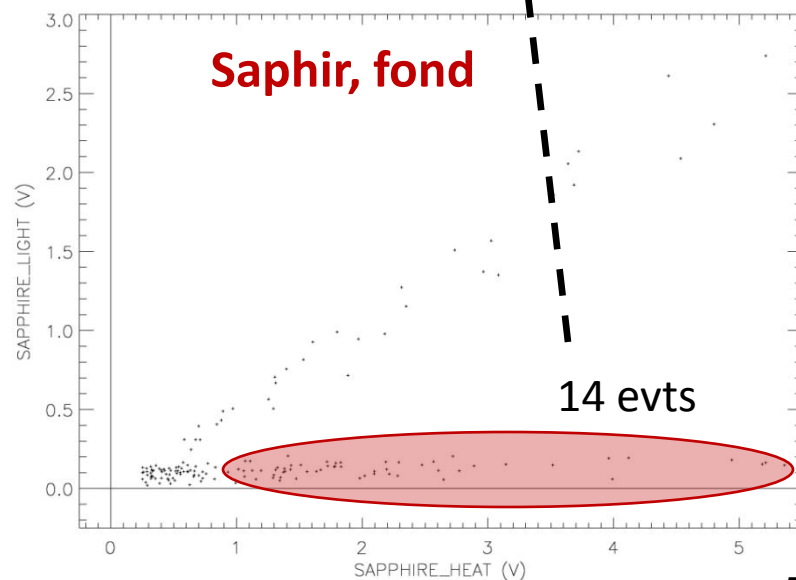
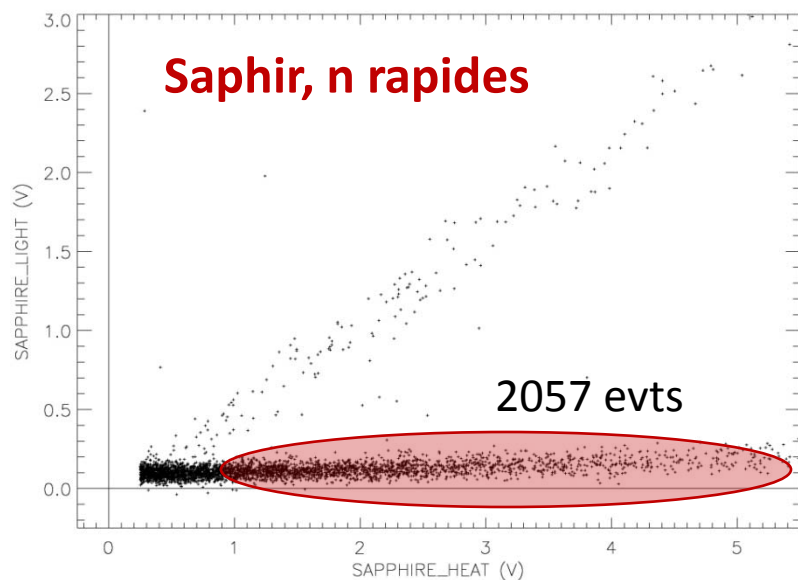
Neutrons lents



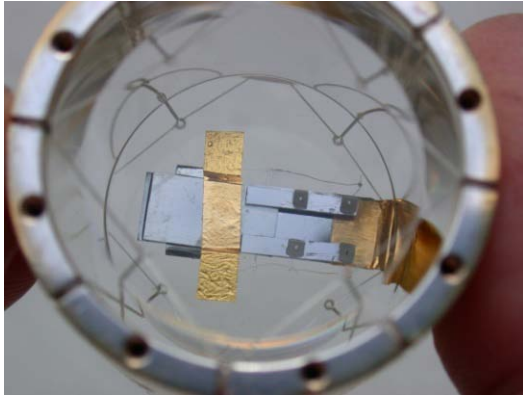
Enseignements tirés de la combinaison LiF & saphir ?



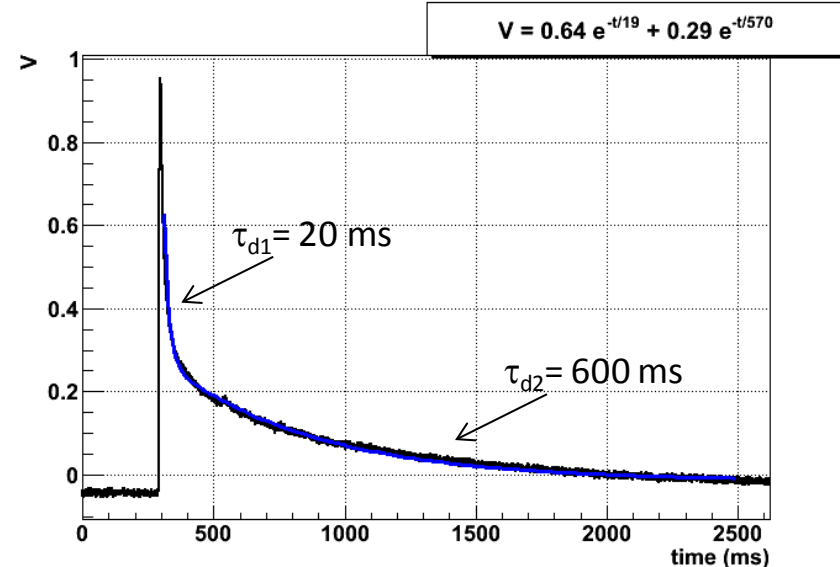
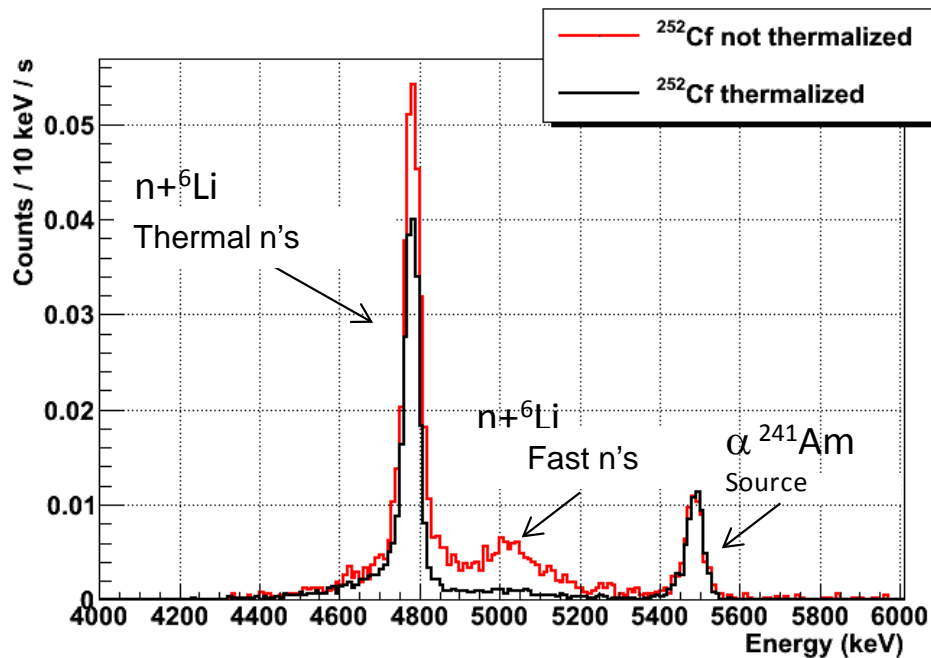
Hyp.: spectre $n \approx {}^{252}\text{Cf}$



Bolomètres scintillants en LiF 32g de ^6LiF enrichi à 95% (2011)



- résolution **50keV FWHM** @ neutrons thermiques
- cible tirée à l'ICMCB (Bordeaux, France)
- échappements par les surfaces observés, compliquant l'analyse !
- chaleur spécifique anormale observée pour une raison inconnue (en cours d'investigation)
 - un détecteur lent, mais sensible aux neutrons rapides
 - sera testé en souterrain en 2012



Bolomètres Scintillants Cibles alternatives de neutrons

- mauvaises résolutions
- rendement ~ meilleur LiF
- un effet poison *a priori* intéressant (^{157}Gd sur n thermiques)

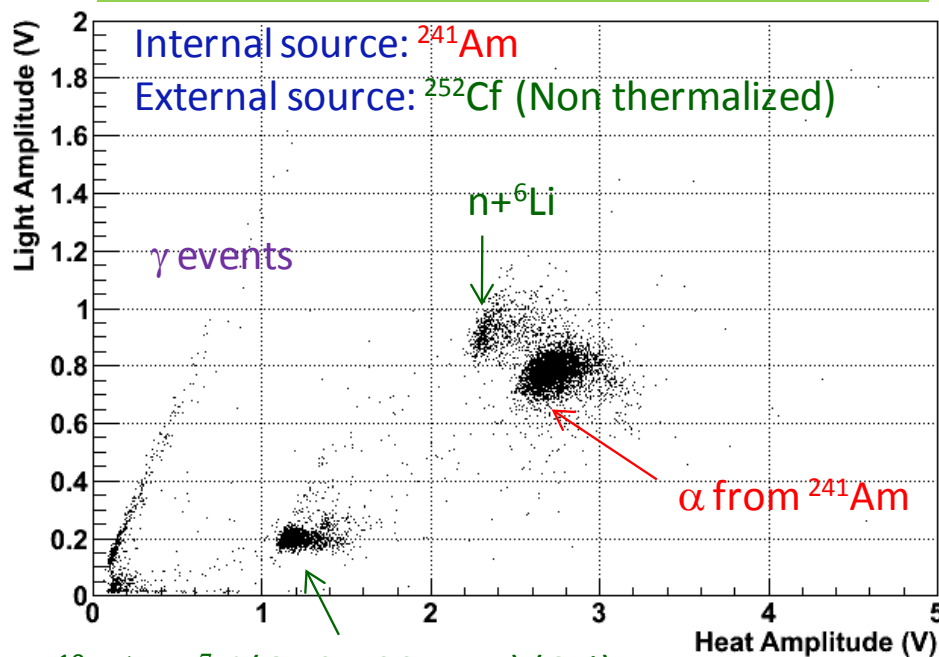


- bonnes résolutions obtenues
32 keV FWHM sur ^{241}Am
 13 keV FWHM à 2.3MeV (^{10}B)
- bon rendement lumineux

→ Un échantillon plus récent bientôt testé

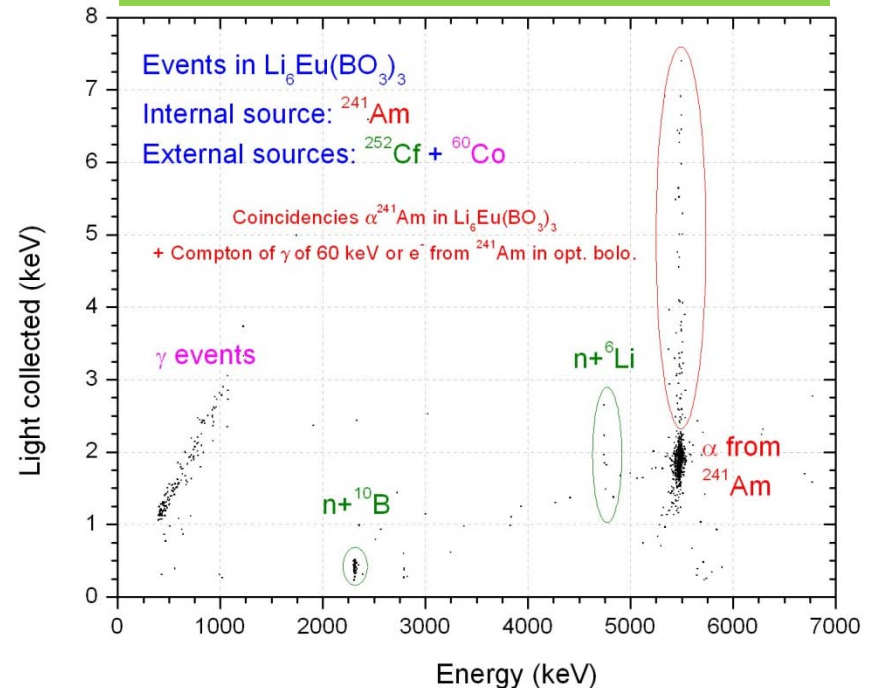
→ Un matériau prometteur !

Vieil $^6\text{Li}_6\text{Gd}(\text{}^{10}\text{BO}_3)_3$ source ICMCB

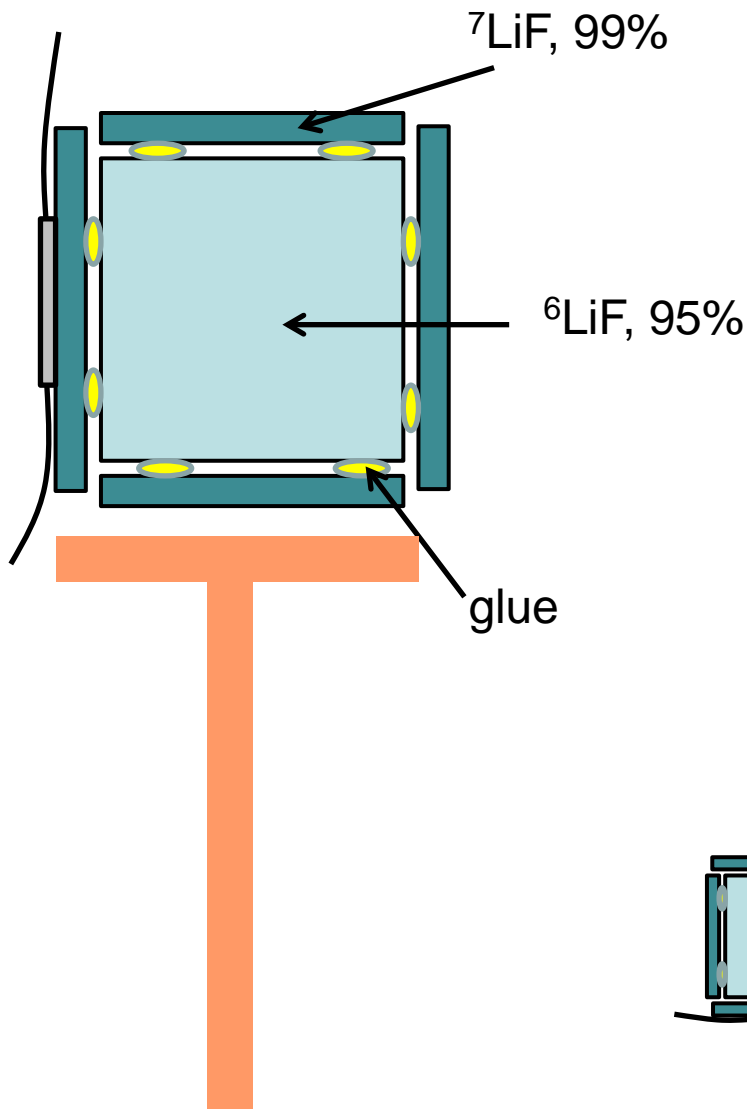


$n+^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + ^7\text{Li}$ ($Q=2.792$ MeV) (6%)
 $n+^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + ^7\text{Li} + \gamma$ ($Q=2.31$ MeV) (94%)

$\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$ source INR Kiev



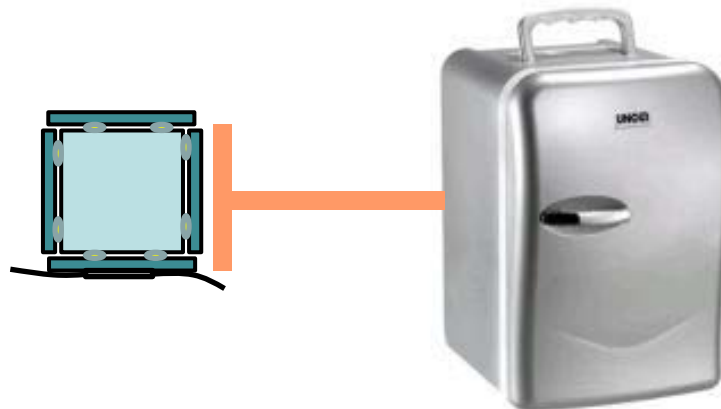
Prochaines étapes ?



1. Concevoir un détecteur à « contention totale » utilisant une combinaison de matériaux enrichis/apauvris en ${}^6\text{Li}$

2. Ajouter un doigt froid et réduire la matière environnant le détecteur au strict nécessaire

3. Concevoir un moniteur transportable $T < 50\text{mK}$ de neutrons rapides pour des mesures de champs neutroniques



❑ La détection « cryogénique » des neutrons

- ❑ Généralités sur les neutrons
- ❑ Interactions des neutrons avec la matière
- ❑ La détection traditionnelle (@ 300K)
- ❑ Le développement de détecteurs cryogéniques
 - ❑ Motivations
 - ❑ Principes de base
 - ❑ Etat des lieux
 - ❑ Outre Atlantique
 - ❑ R&D IAS
 - ❑ prospectives

❑ Sources de neutrons

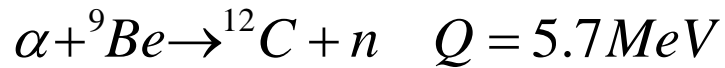
- ❑ Références

Sources transportables sur le site expérimental

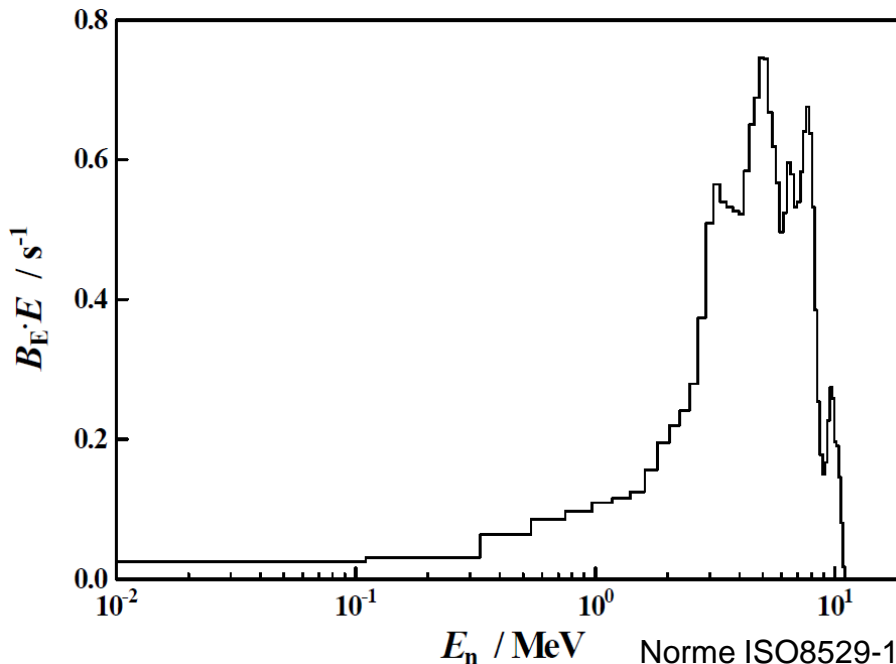
- ✓ continuum:
 - ✓ sources (α, n): $^{241}\text{Am-Be}$,..
 - ✓ sources de fission: ^{252}Cf ,..
- ✓ mono-énergétiques
 - ✓ sources de photo-fission (γ, n)
 - ✓ générateurs
 - ✓ portable (tubes HT)
 - ✓ de table (pyroélectrique) **NEW !**

Sources à continuum E

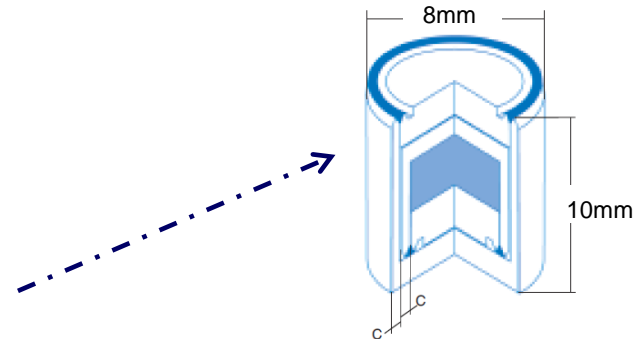
(α, n): ^{241}Am -Be, ...



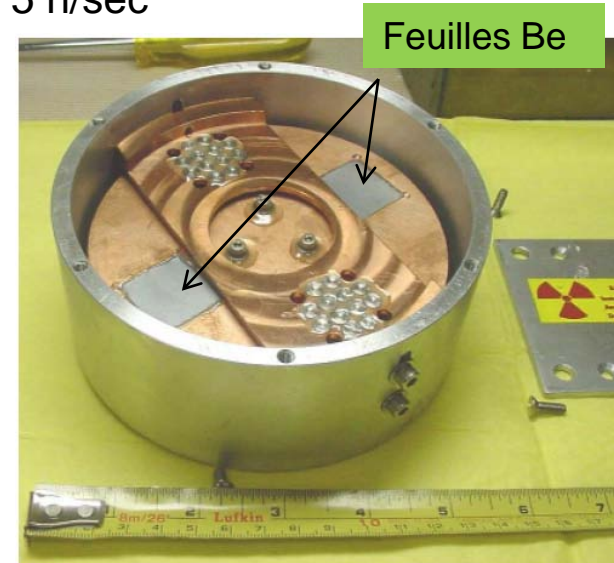
- ✓ $E_n \text{ max} = E_\alpha + Q \sim 11.2\text{MeV}$
- ✓ structure fine (états excités de ^{12}C) & γ 's
- ✓ encore des incertitudes (partie BE, ...)
- ✓ **spectre "source dépendant"** (du mélange)
- ✓ émission $\sim 10^5$ n/sec pour 1.5 GBq ^{241}Am
 $2 \cdot 10^7$ n/sec 370 GBq
- ✓ peu de décroissance ($T_{1/2} \sim 433$ ans)



☐ au catalogue CERCA/LEA

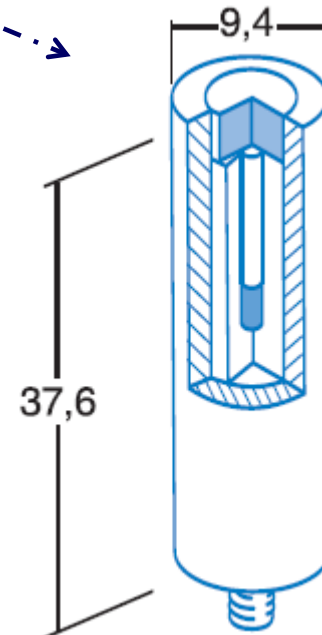
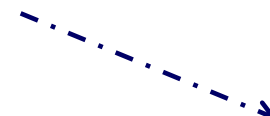
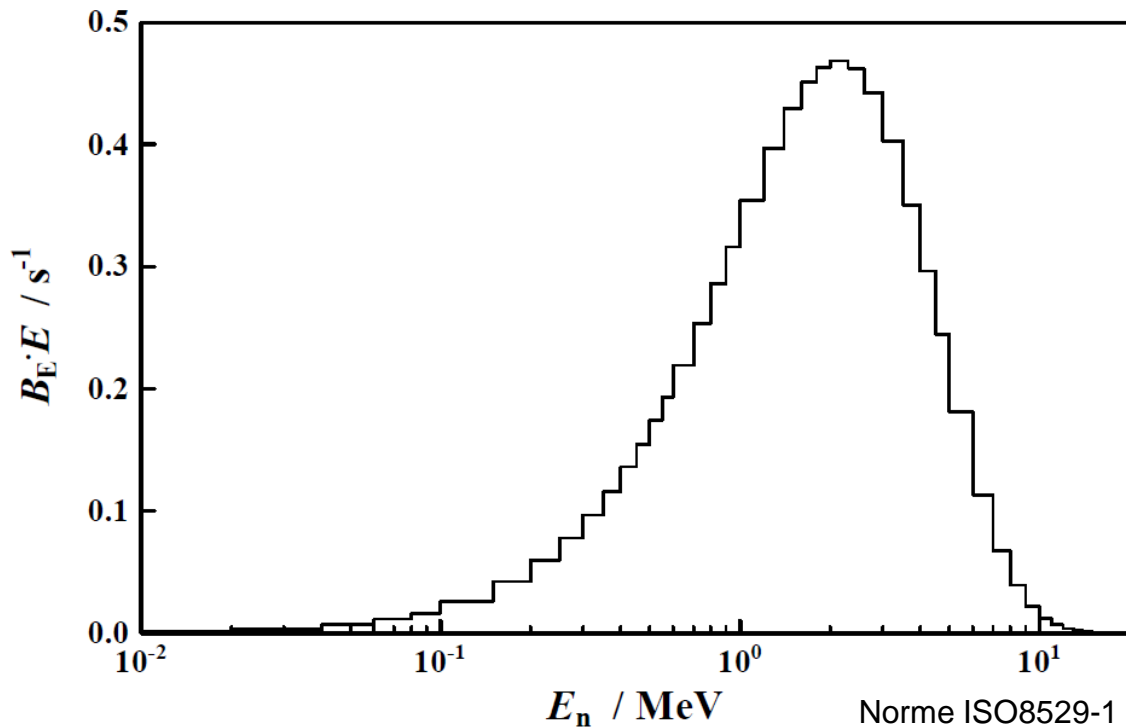


☐ source commutable (**COUPP**)
 ~ 30 détecteurs de fumée ^{241}Am $1\mu\text{Ci}$
 ~ 5 n/sec



- ✓ **continuum régulier** (spectre d'évaporation)
- ✓ $\langle E_n \rangle \sim 2\text{MeV}$
- ✓ émission $\sim 2 \cdot 10^6$ n/sec pour 20MBq ^{252}Cf
- ✓ décroissance de ^{252}Cf ($T_{1/2} \sim 2.65\text{ans}$)

catalogue CERCA/LEA



~7k€
(TBC)

Bon ajustement par

$$B_E = \frac{2}{\sqrt{\pi T^{3/2}}} \times \sqrt{E} \times e^{-E/T} \times B$$

avec $T=1.42 \text{ MeV}$

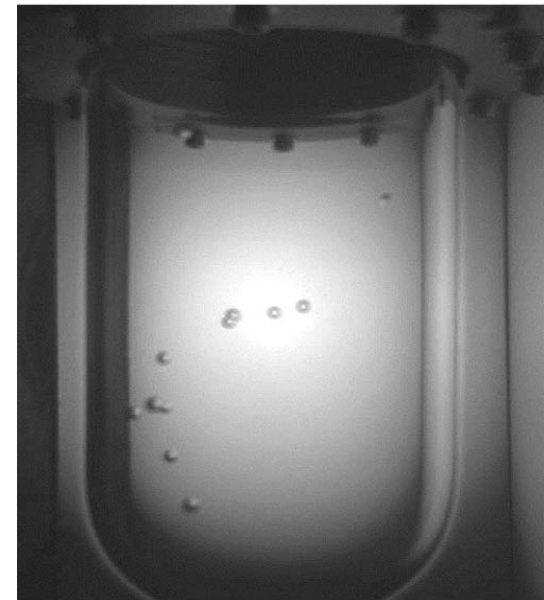
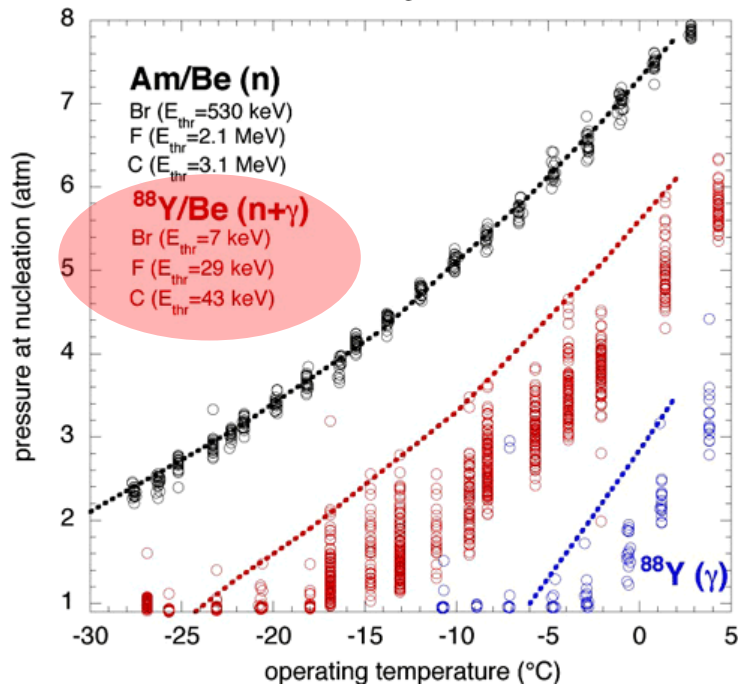
Sources mono-E

1. Photo-fission (γ, n)

- ✓ photo-fission possible si $E_\gamma > E_{\text{liaison}}$ du neutron dans le noyau
- cibles légères Deutérium ($E_{\text{liaison}}=2.226\text{MeV}$) ou Beryllium ($E_{\text{liaison}}=1.666\text{MeV}$)
- ✓ rendement faible et fond gamma important → utilisation réservée aux détecteurs discriminants (et un très bon test pour les autres !)

^{88}Y ($T_{1/2}=87\text{j}$) +Be → $E_n=152\text{ keV}$ rendement $\eta \sim 10^5\text{ n/sec/Ci}$ dans 1g Be à 1cm
 ^{124}Sb ($T_{1/2}=60\text{j}$) +Be → $E_n=23\text{ keV}$ 2.10^5 n/sec/Ci

Détecteur 20 cc CF_3Br de COUPP



Détection de neutrons (40°C)

✓ Générateurs $D+D \rightarrow {}^3\text{He}$ (820keV) + n (**2.45 MeV**)

$D+T \rightarrow {}^4\text{He}$ (3.5MeV) + n (**14.1 MeV**)

✓ modèles compacts scellés ← recherche pétrolière

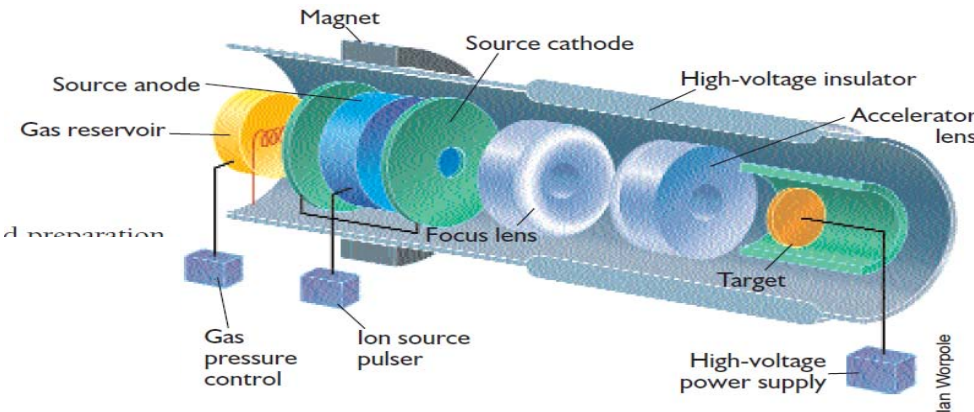
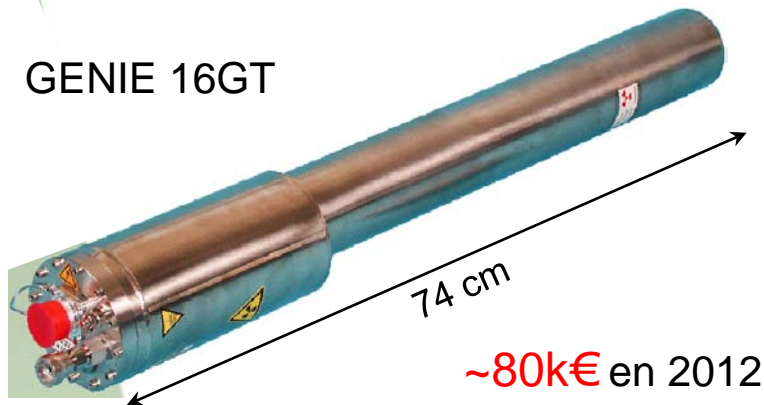


Figure 2. Schematic design of a sealed-tube neutron generator with a Penning ion source.

GENIE 16GT



Caractéristiques du GENIE 16GT (EADS Sodern) :

Neutron output

- Neutron Energy: 14 MeV (2.5 MeV for D-D)
- Neutron yield: up to $2 \cdot 10^8$ n/s ($2 \cdot 10^6$ n/s for D-D)
- Typical tube lifetime: 4000 working hours (for $1 \cdot 10^8$ n/s) or 8000 working hours (for $5 \cdot 10^7$ n/s)

Pulsing parameters

- Pulse rate: 10Hz to 10kHz
- Duty factor: 5% to 100%
- Rise and fall time <math>< 1.5 \mu\text{s}</math>

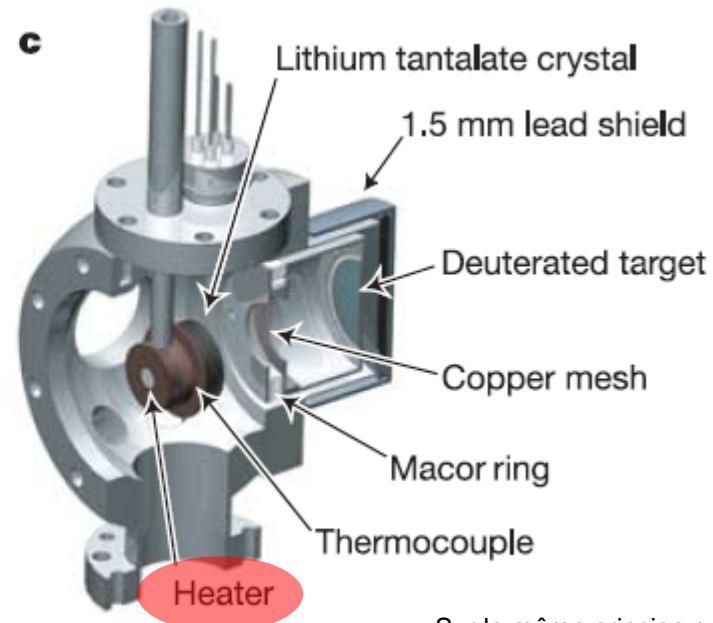
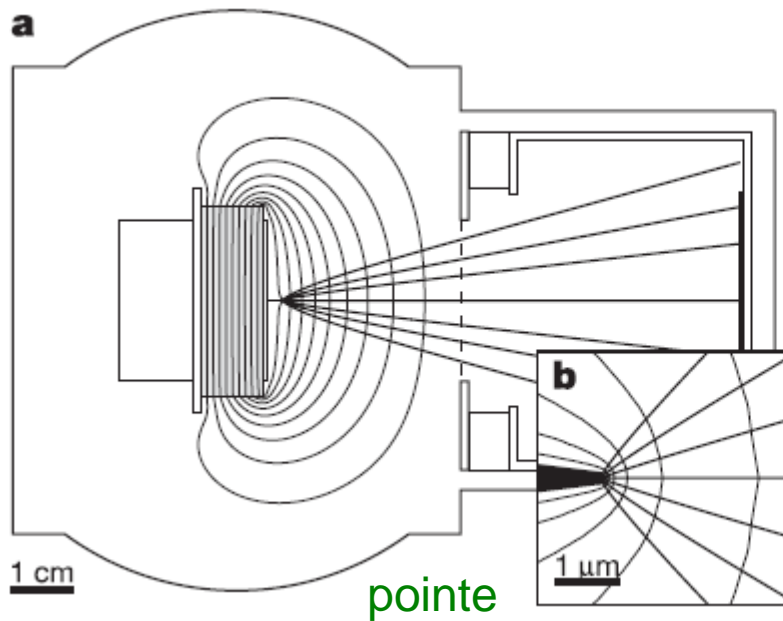
Electrical

- Accelerator Voltage: Up to 110kV
- Maximum Beam current: $80 \mu\text{A}$
- Power supply: 220V/50Hz or 110V/60Hz
- 2 synchronisation output (TTL) are provided.

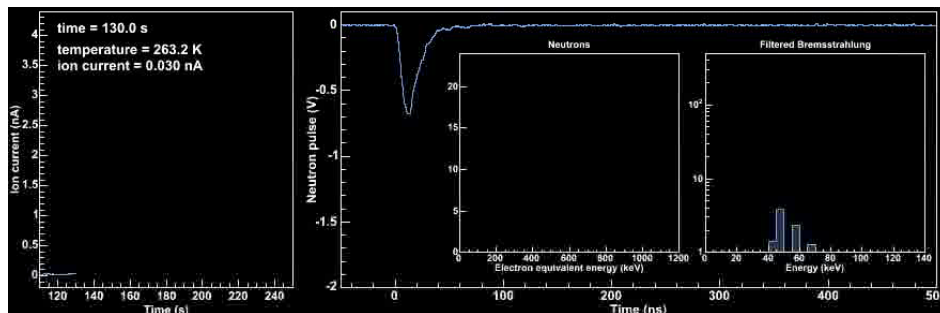
Mechanical

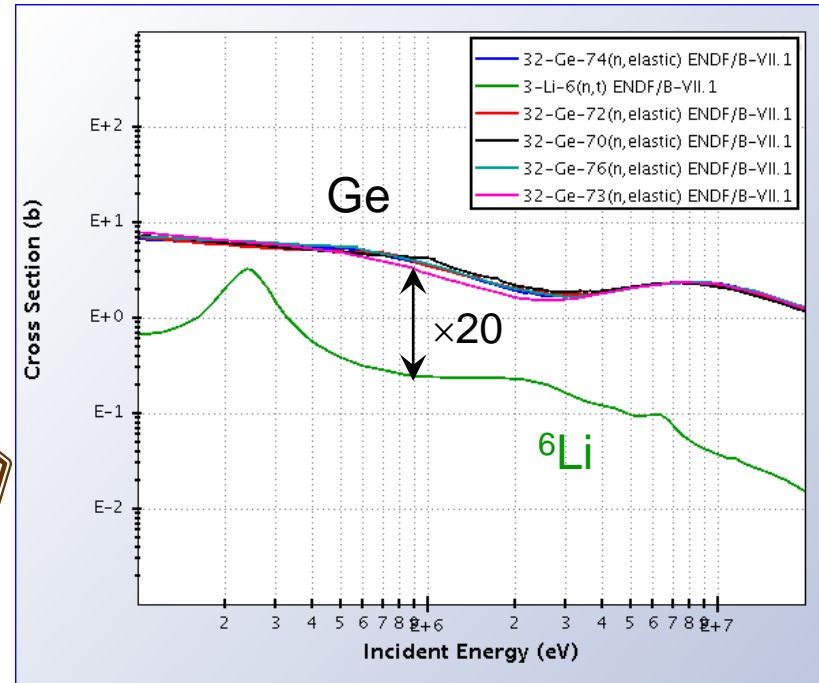
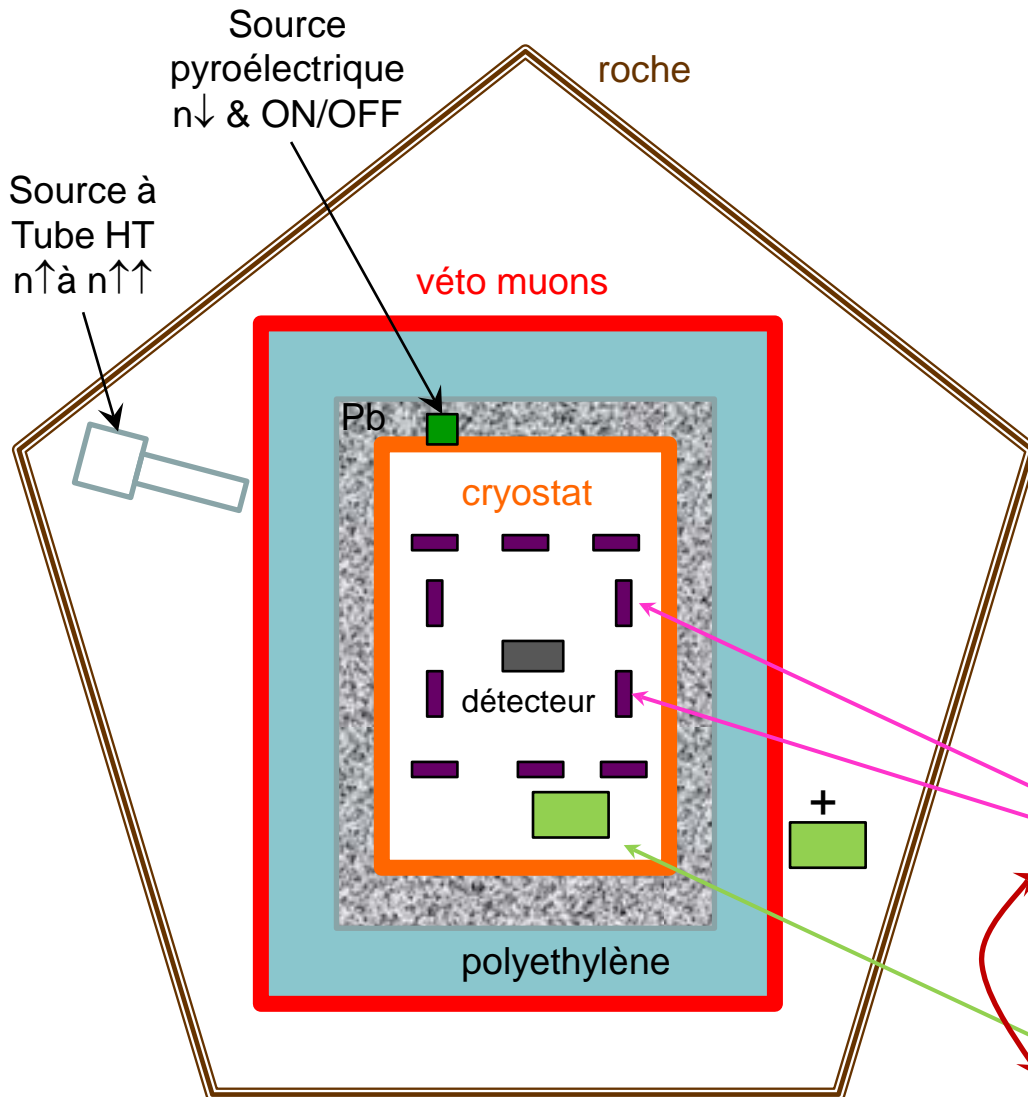
- Neutron Emitting module: 8kg
- MC16: Rack 19"/3U (133 mm) - Length=680 mm - 23 Kg

- ✓ Générateurs $D+D \rightarrow {}^3\text{He}$ (820keV) + n (2.45 MeV)
 $D+T \rightarrow {}^4\text{He}$ (3.5MeV) + n (14.1 MeV)
- ✓ Pyroélectricité (LiTaO_3) \rightarrow HT
- ✓ Émission / cyclage thermique (\sim qq. 10^3 n/sec par cycle de qq mn)



Sur le même principe pyroélectrique, un géné X miniature (COOL-X, AmpTek)





Sur la base de 1 évt signal n/1 évt ${}^6\text{Li}$,
 → mettre 20× plus de ${}^6\text{Li}$ que de Ge ?!

détecteurs de neutrons
 thermalisés ($\epsilon=1$)?

$\Phi_{\text{nth}} \sim 10^{-10}$ n/cm²/sec visé

un détecteur de
 neutrons rapides ?

Corrélations $n_{\text{thermiques}}/n_{\text{rapides}}$ établies pendant la phase de calibration avec la source à tube HT,
 puis contrôle des seuls $n_{\text{thermiques}}$?

- ✓ une spectrométrie (neutron) difficile / α , X, γ ,...
 - ✓ variété des interactions
 - ✓ multiplicité des cibles pour un même détecteur
- ✓ les détecteurs cryogéniques de neutrons ont (auront ?)
 - ❑ **des avantages indéniables:**
 - ✓ incorporation du « convertisseur de neutron » dans le détecteur
 - ✓ haute résolution
 - ✓ montages complexes faisables *a priori* par collages (bien pensés...)
 - ✓ sommation naturelle des dépôts d'énergie laissés indistinctement par les interactions (élastiques, captures) → meilleur contraste possible raie/continuum, pourvu que les détecteurs ne soient pas trop petits
 - ✓ possibilité de détecter et mesurer 1 par 1 des neutrons rarissimes
 - ❑ **quelques inconvénients:**
 - ✓ la « peur » de la cryogénie
 - ✓ leur coût
 - ✓ leur lenteur
 - ✓ une communauté encore peu avertie de leurs mérites potentiels !

❑ **Ateliers FNDA (Fast Neutron Detectors and their Applications)**

1ère édition en 2006 (Le Cap) & 2^{nde} édition: 2011 (Israël)

❑ **Thèses**

❑ **Johann Gironnet** (2010, Université Paris Sud)

Spectrométrie de neutrons rapides par bolomètres à cible lithium pour la réduction du fond des expériences de détection directe de la matière noire

❑ **Ionel Dragos Hau** (2006, University of California)

Superconducting High resolution Fast-Neutron Spectrometers

❑ **G. Knoll , Radiation Detection and Measurement**

Chap. 14 (Slow Neutron Detection Methods) & Chap. 15 (Fast Neutron detection and Spectroscopy)

❑ **E. Segré, Experimental Nuclear Physics , Vol II 1953**

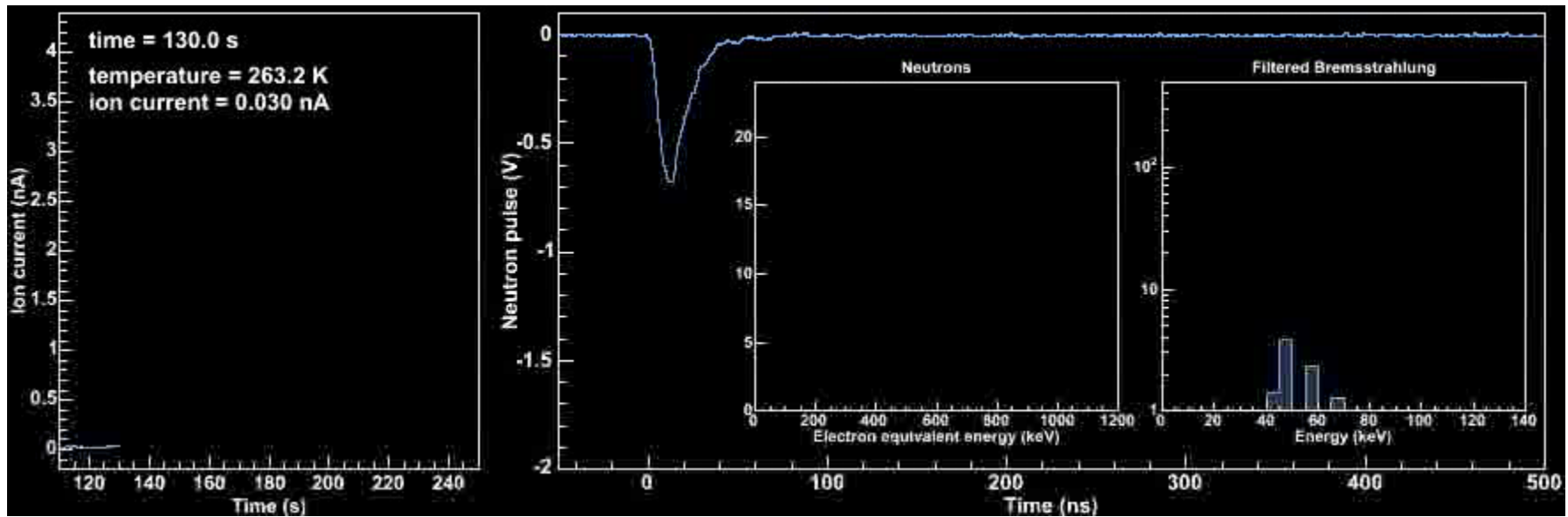
❑ **Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes**, AIEA, Technical Reports Series n° 318 (1990) & 403 (2001)

- ❑ à l'IAS, les permanents, retraités, docs et post-docs
 - ❑ Noël Coron, Jacques Leblanc, Thierry Redon
 - ❑ Johann Gironnet
 - ❑ Lidia Torres
 - ❑ Maria Martinez
- ❑ l'équipe de Vincent Gressier à l'IRSN Cadarache (Calibration AMANDE)
- ❑ l'équipe de Matias Vélazquez à l'ICMCB de Bordeaux (Cristallogénèse)
- ❑ Patrick Pari (CEA/SPEC) : cryogénie $T < 100\text{mK}$
- ❑ les collaborations passées et présentes
 - ❑ IPNL (2g ^6LiF)
 - ❑ ROSEBUD (32g natLiFau Laboratoire Souterraine Canfranc)
- ❑ les programmes du CNRS (PNCG, R&D CSAA, Particules et Univers[†])
- ❑ le système de bourses BDI du CNRS[†]
- ❑ votre patience



[†] ≡ *de profundis*

Générateur pyroélectrique de table



Génération de neutrons pendant la rampe de T

Film à télécharger sur

<http://www.nature.com/nature/journal/v434/n7037/suppinfo/nature03575.html>

Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal

B. Naranjo, J.K. Gimzewski & S. Putterman

Nature 434, 1115-1117(28 April 2005)