



energie atomique • energies alternatives

EFMMIN 2011
Marseille - France
16-20 mai 2011

Les mesures neutroniques passives

Principe et application au cycle du combustible

Laboratoire de Mesures Nucléaires, CEA Cadarache



Rappels

1. Besoins et motivations

2. Le comptage total

- a) Principe physique
- b) Origine du signal enregistré
- c) Performances et limitations

3. Le comptage des coïncidences

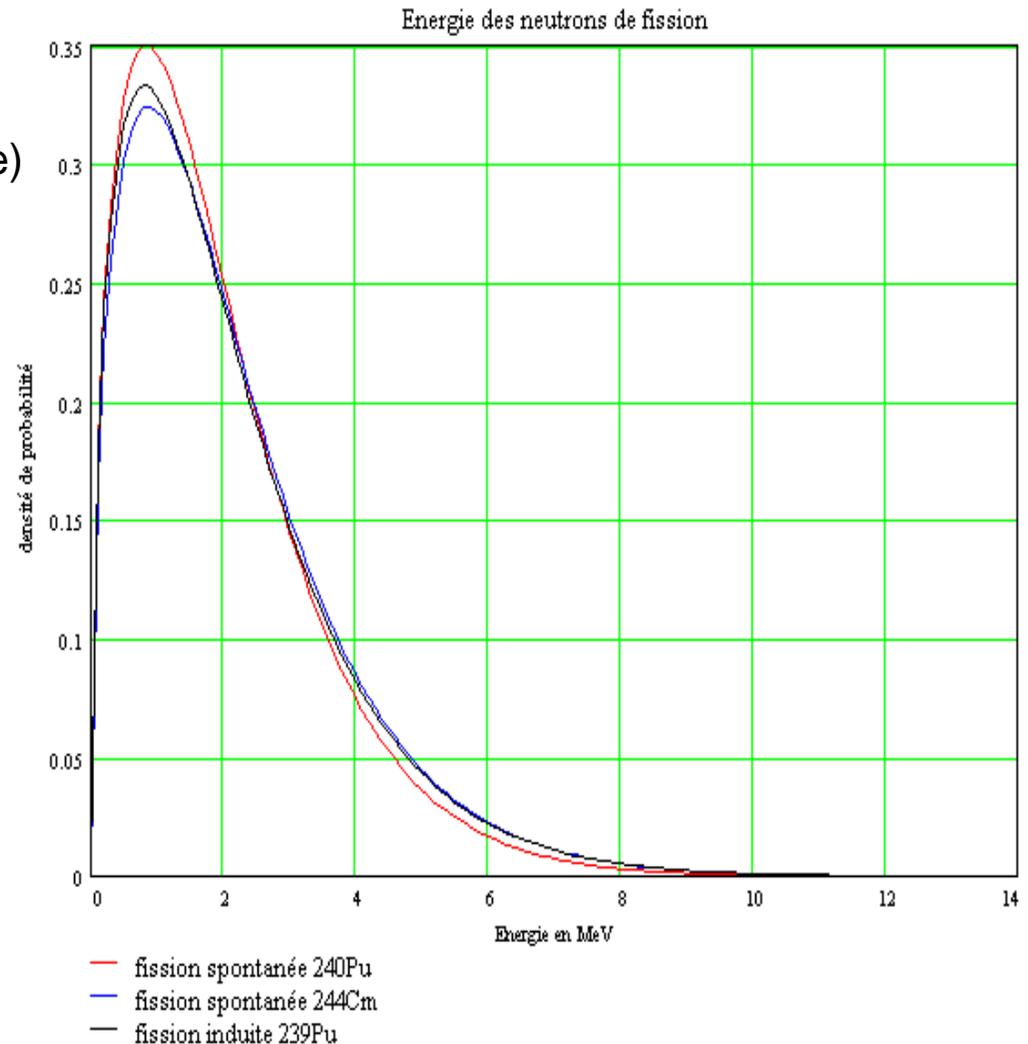
- a) Principe physique
- b) Origine du signal enregistré
- c) Performances et limitations

4. L'analyse des multiplicités

- a) Principe physique et d'interprétation
- b) Performances et limitations

5. Exemples d'applications

- **Neutre mais détectable** : milieu convertisseur (^1H : diffusion élastique, ^3He , ^6Li , ^{10}B , Gd : absorption thermique)
- **Pouvoir de pénétration**
- Emission « naturelle » réservée aux noyaux lourds (^{240}Pu , ^{238}Pu , ^{244}Cm) : **fission spontanée**, réaction (α, n)
- Emission « induite » favorisée pour les noyaux lourds (^{239}Pu , ^{235}U , ^{238}U) : fission thermique, photofission
- **Impossibilité d'identifier l'isotope émetteur grâce à l'énergie du neutron**



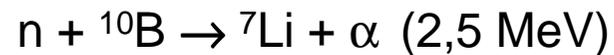
Elément	période (années)	En fissions spontanées (n/s/g)	En (α ,n) oxyde (n/s/g)	En (α ,n) fluor (n/s/g)
^{234}U	$2,45 \cdot 10^5$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	3,0	580
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$	$2,99 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	0,08
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$	0,028
^{238}Pu	87,7	2 590	13 400	$2,2 \cdot 10^6$
^{240}Pu	6560	1 020	141	21 000
^{242}Pu	$3,76 \cdot 10^5$	1 720	2,0	270
^{241}Am	433,6	1,2	2 690	-----
^{242}Cm	0,45	$2,1 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^6$	-----
^{244}Cm	18,1	$1,08 \cdot 10^7$	$7,73 \cdot 10^4$	-----
^{252}Cf	2,65	$2,34 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^5$	-----

Rappels : la détection des neutrons (1)

– Réaction (n,α) :

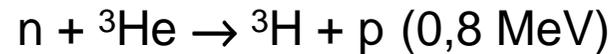


$$\sigma_{\text{th}} = 950 \text{ b}, \sigma_{\text{rapide}} = 0,3 \text{ b}$$



$$\sigma_{\text{th}} = 3830 \text{ b}, \sigma_{\text{rapide}} = 0,2 \text{ b}$$

– Réaction (n,p) :

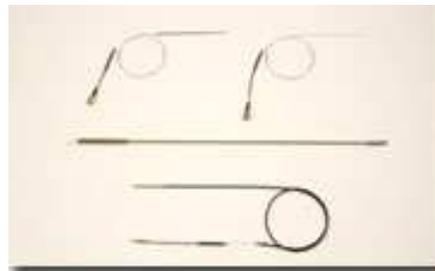


$$\sigma_{\text{th}} = 5330 \text{ b}, \sigma_{\text{rapide}} = 0,8 \text{ b}$$

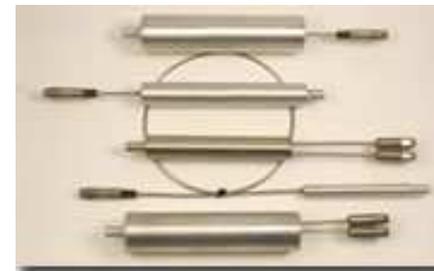
– Réaction (n,f) :

- Chambres à fission à ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{237}\text{Np}$...

« in core »



« out of core »



Rappels : la détection des neutrons (2)

- Meilleur compromis pratique : le compteur proportionnel à ^3He
 - ⇒ **+ de 90 % des dispositifs de mesure de déchets**
 - quelle que soit la méthode**
- Adaptation à la méthode de mesure et à l'application :
 - Thermalisation des neutrons par du polyéthylène ou autre
 - Mise en œuvre d'écrans en plomb pour réduire le ddd γ
 - Utilisation d'amplificateurs spécifiques (de charge ou de courant)
 - Utilisation de blocs de détection (CH_2 + cadmium et/ou B_4C)



1. Besoins et motivations

Estimer une grandeur proportionnelle à l'émission neutronique

Pallier les déficiences d'autres techniques non destructives

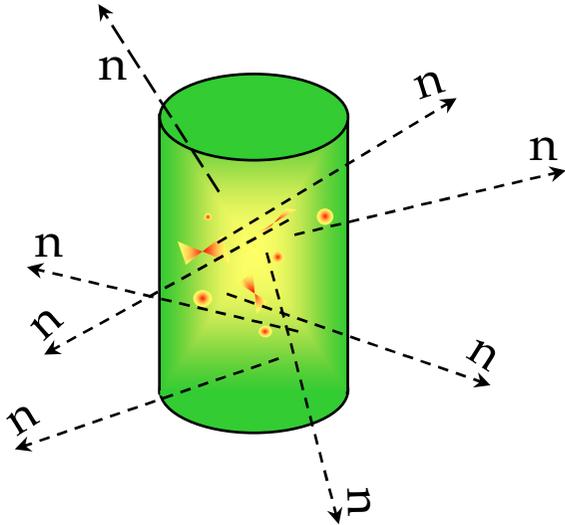
- **Mesures directes :**
 - d'un(e) flux/ fluence
 - d'un débit de dose
 - d'un indicateur de présence/absence
- **Mesures indirectes :**
 - d'une masse « totale » (U, Pu)
 - d'une masse « équivalente » (^{240}Pu)
 - d'une activité ($A_{\alpha} \text{ } ^{244}\text{Cm}$)

- **COMPTAGE TOTAL**
- **COMPTAGE DES COINCIDENCES**
- **ANALYSE DES MULTIPLICITES**

2. Le comptage total (1)

- Principe physique :

Mesure des neutrons sortant de l'objet à caractériser sans distinction



Origine : Fissions spontanées, réactions (α, n)

- Pas d'information sur la nature des noyaux
- Pas d'information sur l'origine de l'émission
- Pas d'information exploitable sur l'énergie des neutrons

Évaluation de l'émission neutronique totale de l'objet : $En \text{ (n.s}^{-1}\text{)}$

2. Le comptage total (2)

- Origines du signal enregistré :

- Neutrons émis par l'objet :

FISSIONS SPONTANÉES + (α, n)

= Signal utile

- Signaux parasites dus :

- aux sources de neutrons externes à la mesure
- au rayonnement cosmique (n de spallation)
- au bruit électronique
- au rayonnement gamma

= Bruit de fond

Signal mesuré = Signal utile + Bruit de fond

2. Le comptage total (3)

Performances ☺	Limitations ☹
<ul style="list-style-type: none">• simplicité de mise en œuvre (outils commerciaux)• applicable aux objets de grand volume (800 l,...)• rapide• faible sensibilité aux effets de répartition de la MF (étalonnage sinon)• faible sensibilité à la matrice• accès à des informations impossibles à obtenir par d'autres MND ($A\alpha^{244}\text{Cm}$)• possibilité de dispositif transportable• bonne statistique de comptage	<ul style="list-style-type: none">• interprétation partielle si pas de CI• nécessité de connaître la forme chimique• sensible à l'environnement (humidité peut modifier le taux (α,n))• sensible aux variations de bdf ambiant (⚠ à l'environnement radiologique)• sensible à l'effet de multiplication (forte masse Pu > 100 g)• si méconnaissance de l'objet, risque de sur/sous estimation de la masse• très forte dépendance au mode opératoire de l'étalonnage (représentativité)• ⚠ aux émetteurs parasites (Cm, Am,...) : mesure inexploitable

3. Le comptage des coïncidences (1)

- Principe physique :

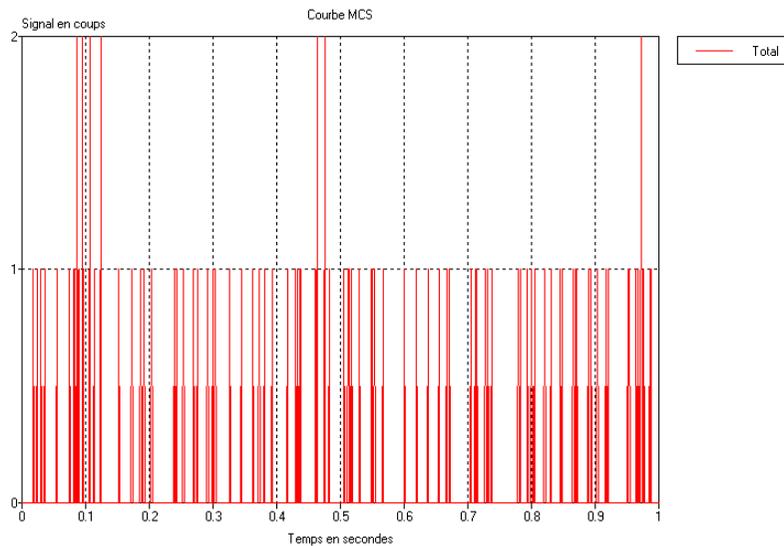
- Limitation comptage total : taux (α, n)
- Exploitation de propriétés discriminantes :
 - ✓ Réactions (α, n) :

neutrons célibataires = 1 neutron émis par réaction

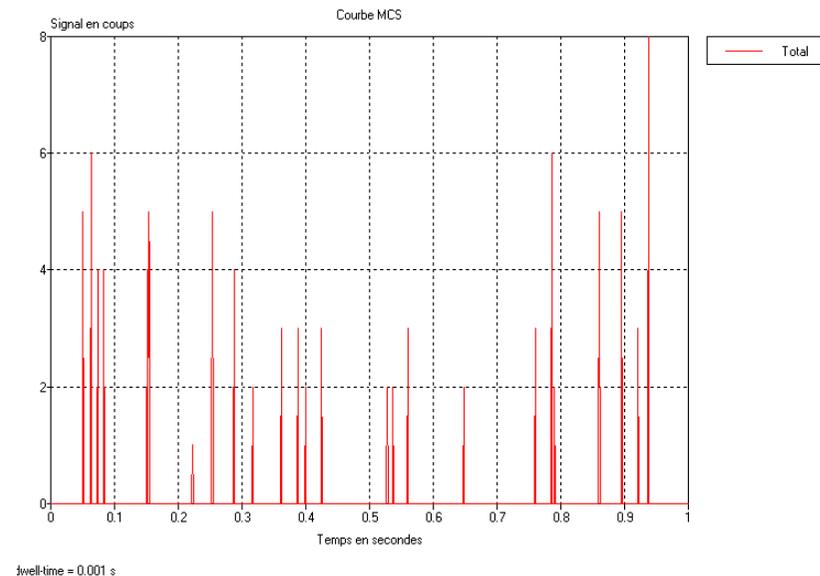
- ✓ Fissions spontanées (ou induites) :

neutrons corrélés = 0 à 8 neutrons par fission (en moyenne 2 à 4 = $\bar{\nu}$)

Source (α, n) : 100 n/s



Source ^{252}Cf (FS) : 100 n/s

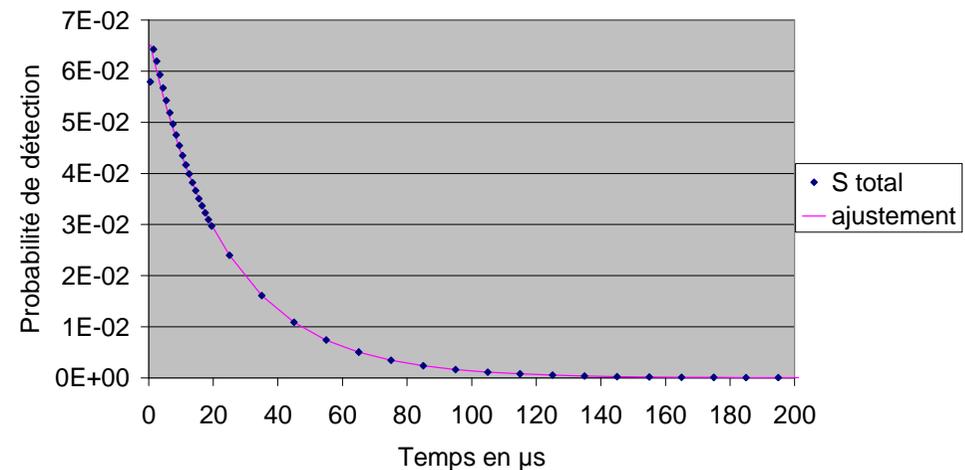


3. Le comptage des coïncidences (2)

Durée de vie d'un neutron limitée dans un système de mesure ($\approx 100 \mu\text{s}$)

⇒ Les neutrons issus de la même fission seront comptés dans un court laps de temps ($100 \mu\text{s}$) ou ne le seront jamais !!!

Durée de vie d'un neutron dans un dispositif de mesure



- Pas d'information sur la nature des noyaux
- Pas d'information sur l'origine de l'émission
- Pas d'information exploitable sur l'énergie des neutrons

Évaluation du nombre de paires de neutrons émises par l'objet ($\text{paires} \cdot \text{s}^{-1}$)
DISCRIMINATION STATISTIQUE

3. Le comptage des coïncidences (3)

- Origines du signal enregistré :
 - Neutrons émis par l'objet : coïncidences Réelles (R)
FISSIONS SPONTANÉES
 - Signaux parasites dus :
 - aux coïncidences Accidentelles (A) : 2 neutrons non corrélés (fission + Bdf, fission + (α, n) , 2 (α, n) , fission+fission...)
 - au bruit de fond corrélé (R_0) : sources de neutrons externes à la mesure, rayonnement cosmique (n de spallation), ...
 - Bruit électronique (perte d'adaptation d'impédance,...)

$$\text{Signal mesuré} = R + A + R_0$$

3. Le comptage des coïncidences (4)

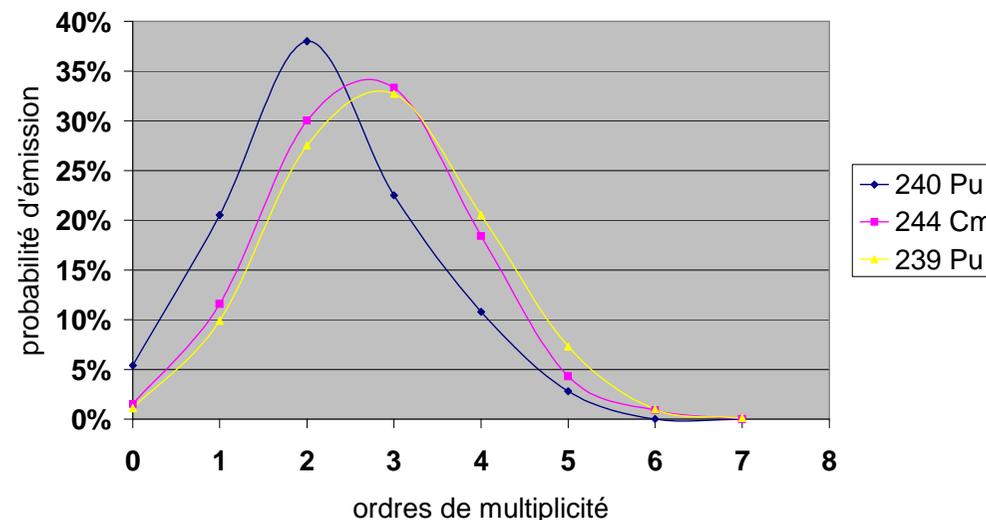
Performances ☺	Limitations ☹
<ul style="list-style-type: none"> • simplicité de mise en œuvre (outils commerciaux) • applicable aux objets de volume moyen (200 l,...) • insensible à la forme chimique et aux émetteurs α • accès à des informations impossible à obtenir par d'autres MND (Pu, Cm) • possibilité de dispositif transportable • 1 seule mesure pour (R+A) et A (si Bdf non corrélé) • connaissance a priori de l'objet moins importante qu'en comptage total • en général, plus précise que le comptage total 	<ul style="list-style-type: none"> • interprétation partielle si pas de CI • ε min (~ 5 %, 10 % mieux) • ⚠ aux variations de ε (réponse plate) • sensible aux variations de bdf ambiant (rayonnement cosmique) • sensible à l'effet de multiplication (forte masse Pu > 100 g) • + sensible aux effets de répartition de la matière que le comptage total ($\propto \varepsilon^2$) • + sensible aux effets de matrice que le comptage total ($\propto \varepsilon^2$) • très forte dépendance au mode opératoire de l'étalonnage (représentativité) • ⚠ aux taux (α, n) élevés, risque de dégradation de σR • ⚠ aux émetteurs parasites (Cm,...) : risque de surestimation • pb de correction du temps mort

4. L'analyse des multiplicités (1)

Principes physique et d'interprétation :

- **Dénombrement différencié** de 1 ou 2 ou 3 ou 4, etc... neutrons : ordres de multiplicité M_i
- Le **signal enregistré** provient :
 - des neutrons corrélés de fission et de bruit de fond (neutrons de spallation)
 - et des neutrons non corrélés (M_1) de fission et de bruits de fond (réactions (α, n) , ...) $\Rightarrow M_1$ généralement pas exploité

Nombre de neutrons émis par fission



4. L'analyse des multiplicités (2)

Les neutrons sont comptés par multiplets :

- n fenêtres $(R + A)_i$ et A_i : 1 par ordre recherché ($n \sim 256 - 1024!$)
- Toutes les fenêtres ont une durée identique : θ
- M_i proportionnel à $\varepsilon^i \Rightarrow$ ordre 4 (5)
- En théorie : reconstruction de la distribution de multiplicité caractéristique de chaque isotope pouvant subir la fission
- En pratique : peu de contraste

Performances ☺	Limitations ☹
<ul style="list-style-type: none"> • accès à des informations complémentaires pour interpréter les mesures passives (estimation expérimentale de ε, discrimination d'interférences, facteur de multiplication, taux (α, n) ...) • Filtrage ordres élevés (neutrons de spallation, parasites, ...) • méthode la plus complète 	<ul style="list-style-type: none"> • interprétation partielle si pas de CI • ε min 10 % (20 % mieux) • statistique de comptage mauvaise aux ordres élevés • sensible aux neutrons non corrélés (pb si beaucoup de Am ou forme fluorée) • pb de correction du temps mort • instable si beaucoup de paramètres à évaluer (ddl) • électronique élaborée et interprétation complexe (opérateur expérimenté) • manque de maturité

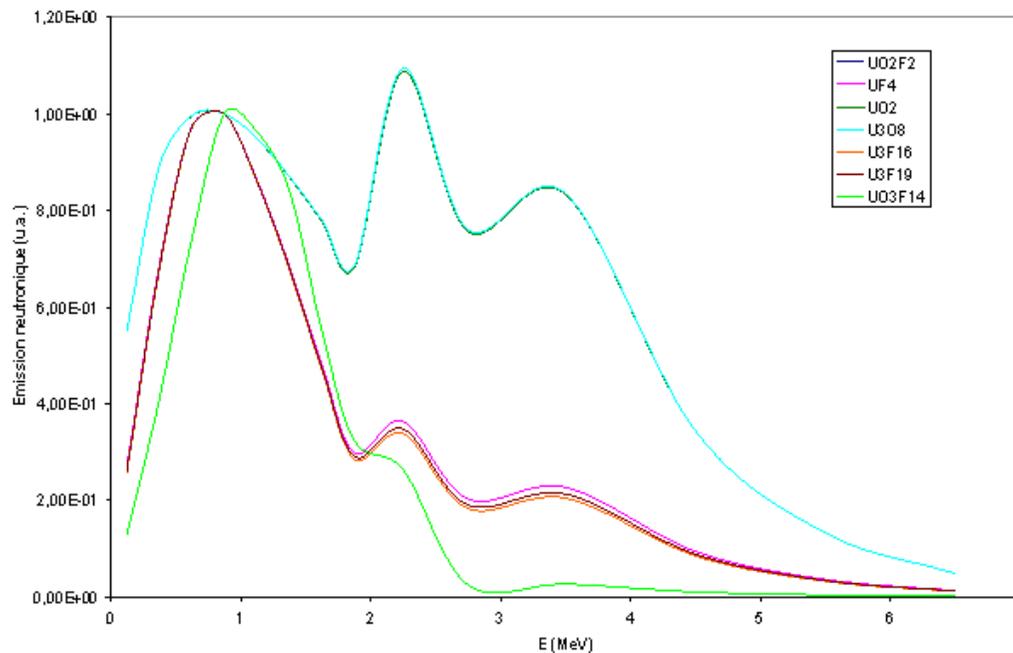
5. Applications : mesure de l'uranium dans le procédé d'enrichissement



energie atomique • energies alternatives

Caractéristiques des mesures

- En très faible essentiellement due à ^{234}U sous forme fluor
- Neutron issu de la réaction $^{19}\text{F} (\alpha, n) ^{22}\text{Na}$
 - ⇒ connaissance de la forme chimique
- Faible signal
 - ⇒ maîtrise du bruit de fond



Spectre énergétique des neutrons émis selon la forme chimique

Applications :

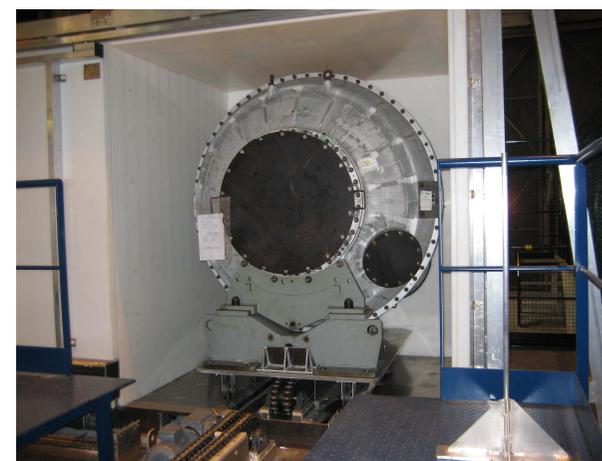
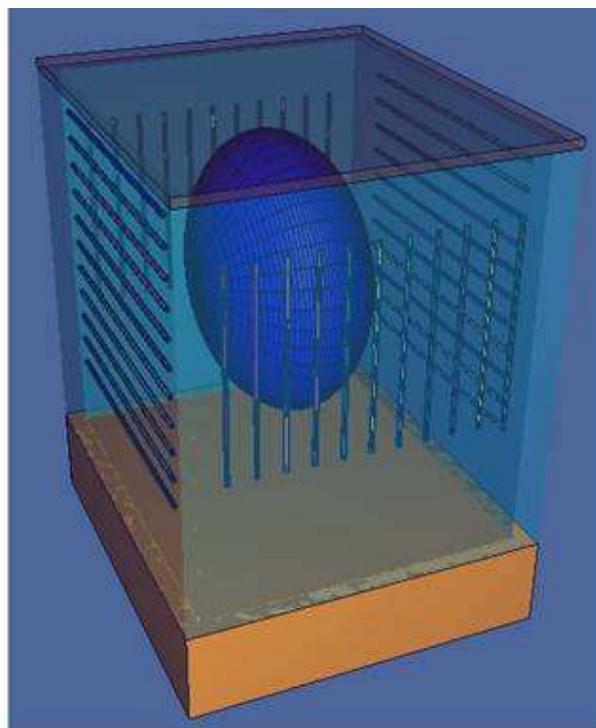
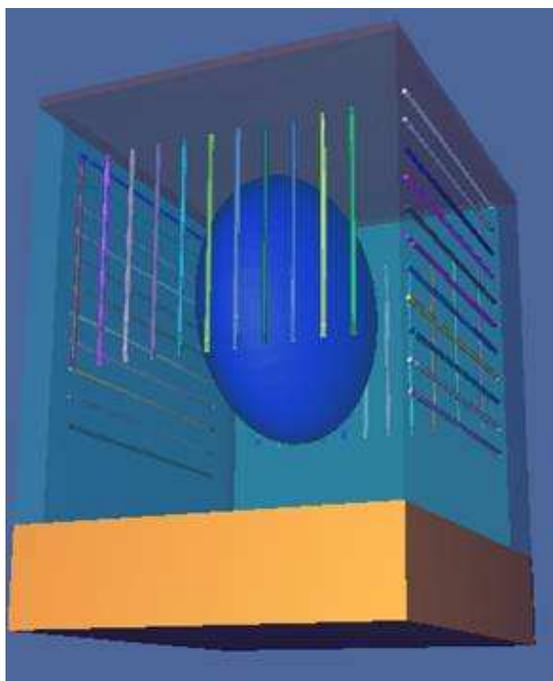
- Contrôle d'enrichissement
- Contrôle de la rétention uranium dans les compresseurs

5. Applications : mesure de l'uranium dans le procédé d'enrichissement



energie atomique • energies alternatives

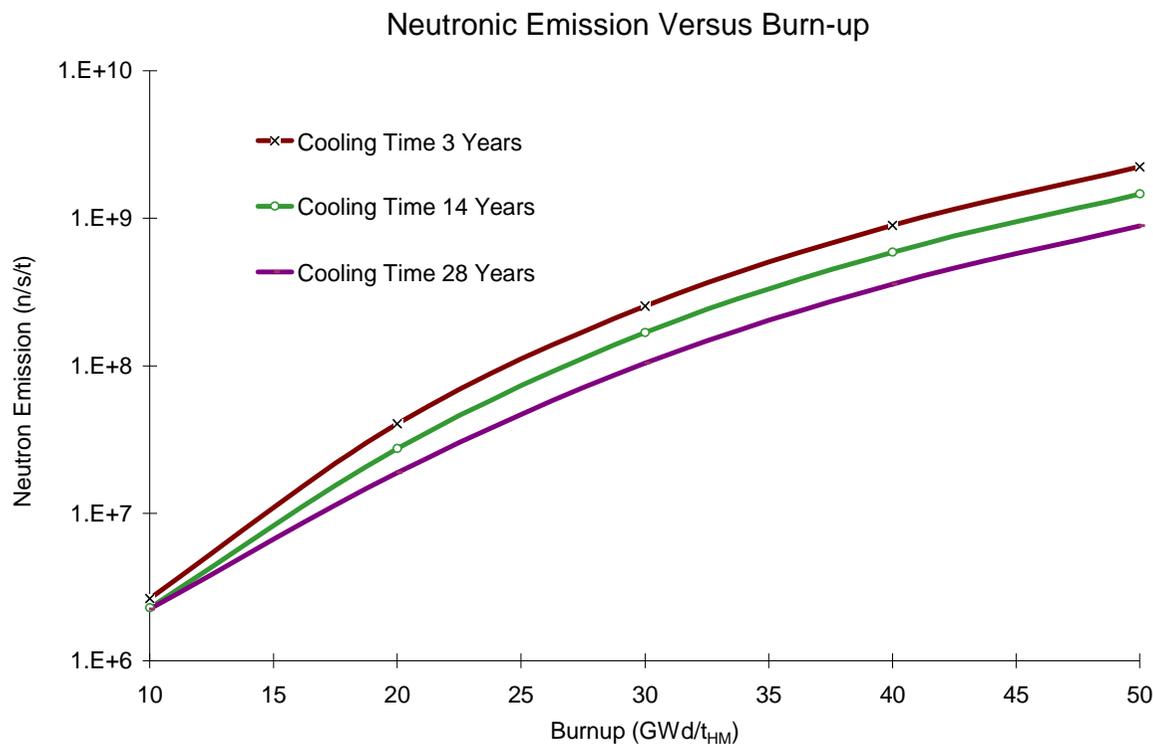
Contrôle de la rétention ^{235}U dans les compresseurs



Caractéristiques des assemblages irradiés

- En très élevée en présence de fort ddd γ : $\approx 10^8$ à 10^9 n/s/t U
- En due en grande majorité aux Cm ($\approx > 95\%$) : $^{242}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{246}\text{Cm}$
- En fortement liée au taux de combustion

En $\propto \text{TC}^4$ à $4,5$ dès que TC > 20 GWj/t



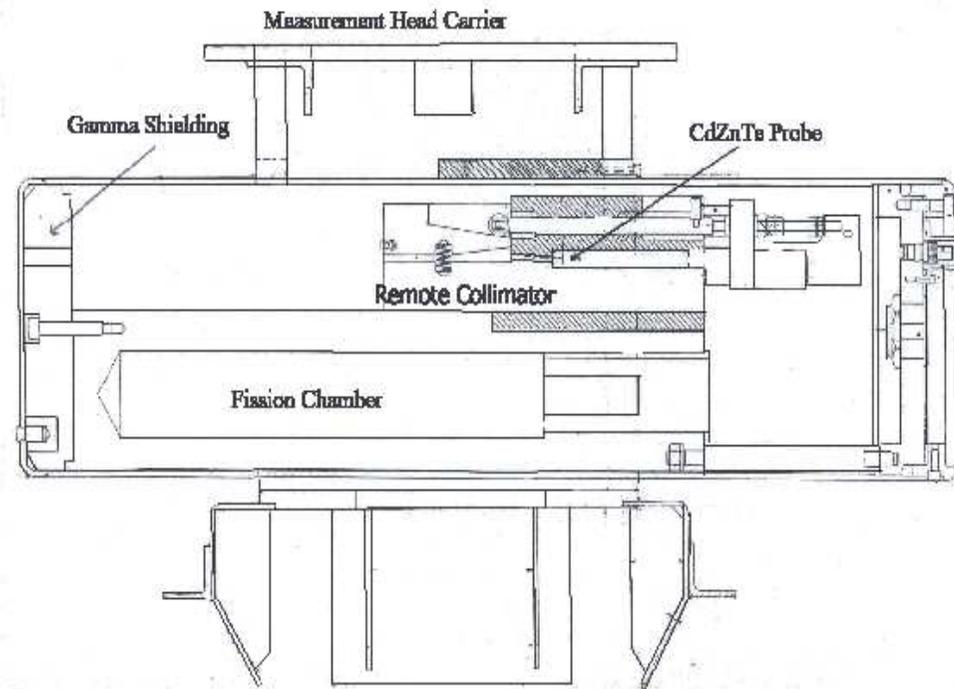
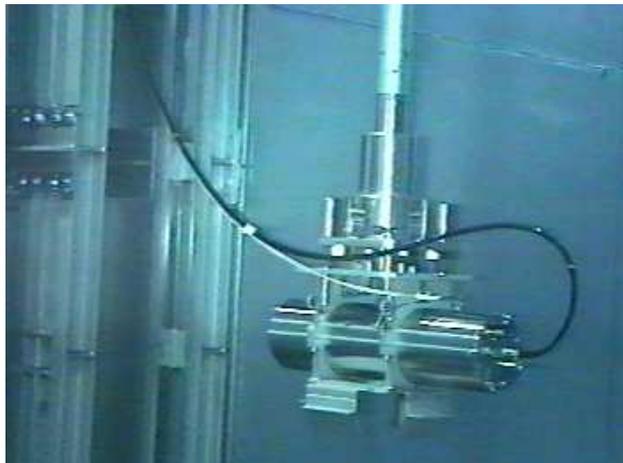
Applications :

- Contrôle crédit burn-up pour entreposage ou transport
- Contrôle Safeguards AIEA (détrompage UOx/MOx...)
- Contrôle sûreté / criticité avant retraitement

SMOPY

Association de la spectrométrie gamma et du **comptage neutronique total**

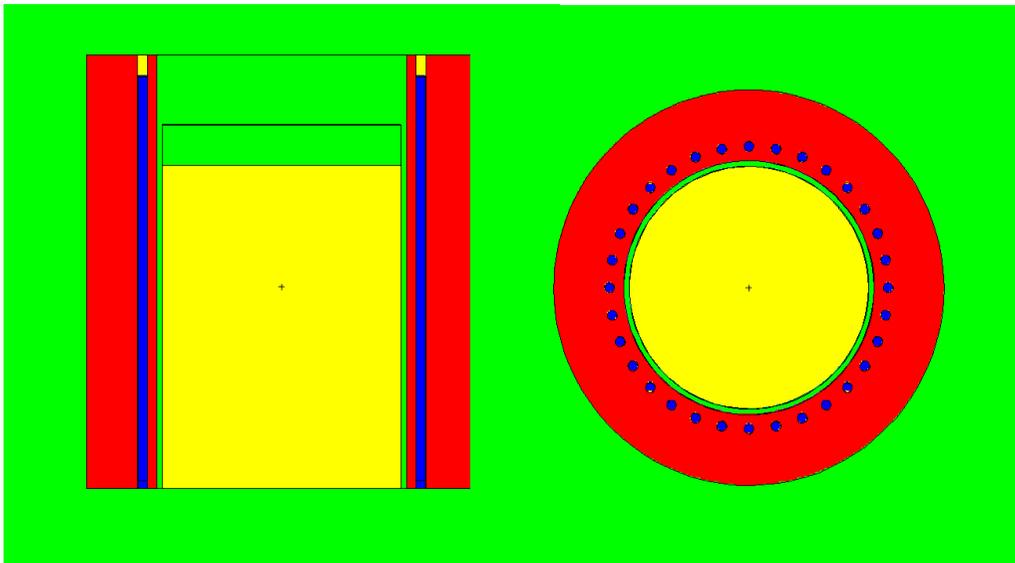
développé au CEA/CAD/DTN/SMTM/LMN



5. Applications : mesure des matières et déchets

Caractéristiques des mesures

- En très variable
- Recherche de la quantification Pu le plus souvent
- Dispositif de mesure à fort rendement
⇒ mesure des coïncidences ou multiplicités



Applications :

- Contrôle des matières nucléaires Pu
- Contrôle des déchets du retraitement
 - Contrôle des coques et embouts après dissolution
 - Contrôle des déchets technologiques



Dispositif FUNE (IRSN)



JCC62 (CANBERRA)