



**HAL**  
open science

## Des neutrons pour faire des images dans le RJH

E. Simon

► **To cite this version:**

E. Simon. Des neutrons pour faire des images dans le RJH. 1ères Journées Scientifiques du Neutron, Sep 2018, Cadarache, France. cea-02338706

**HAL Id: cea-02338706**

**<https://cea.hal.science/cea-02338706>**

Submitted on 24 Feb 2020

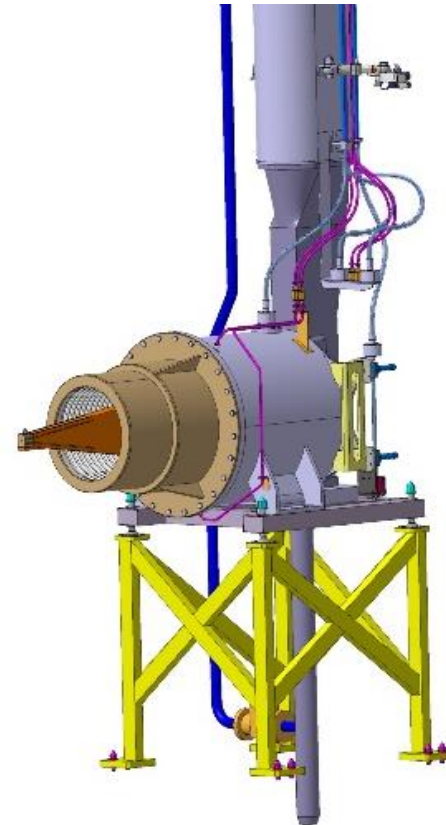
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# DES NEUTRONS POUR FAIRE DES IMAGES DANS LE RJH

**ERIC SIMON**

DEN/CAD/DTN/SMTA/ LABORATOIRE DE MESURES NUCLÉAIRES



JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU NEUTRON 25 SEPTEMBRE 2018

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

**cea den**

L'imagerie neutronique

La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

Le SIN du RJH

Imageur

## L'imagerie neutronique

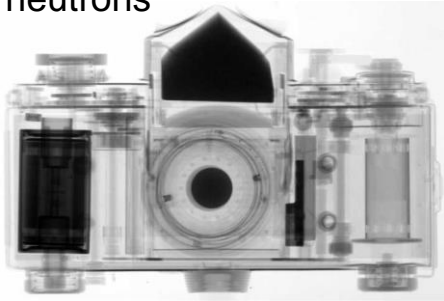
La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

Le SIN du RJH

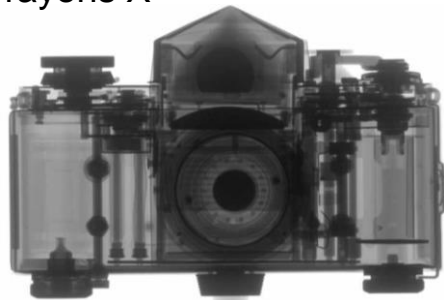
Imageur

Comme avec les rayons X, l'atténuation des neutrons en fonction de la nature et de l'épaisseur des matériaux traversés permet de produire des images en transmission

neutrons



rayons X

*Paul Scherrer Institute (Suisse)*

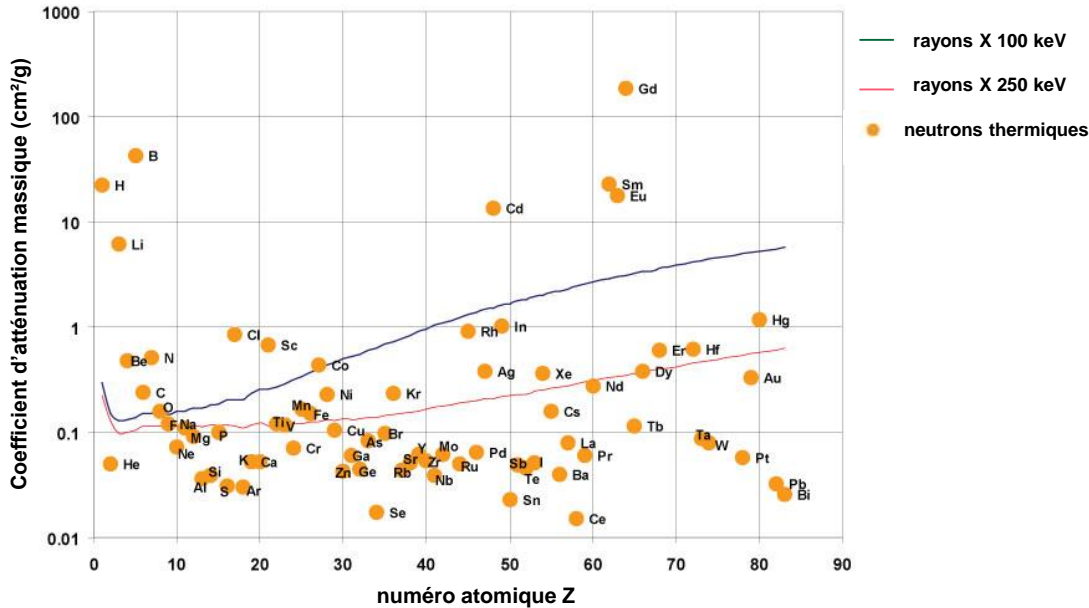
neutrons



rayons X

*NRAD (INL, USA)*

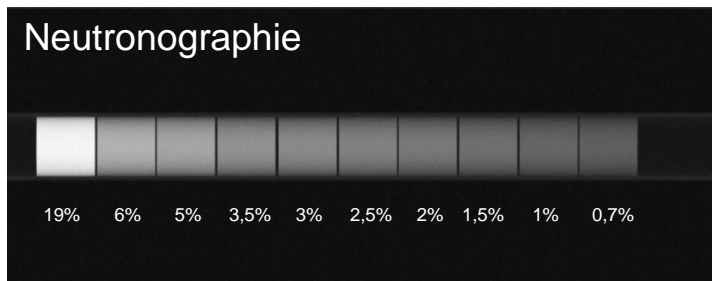
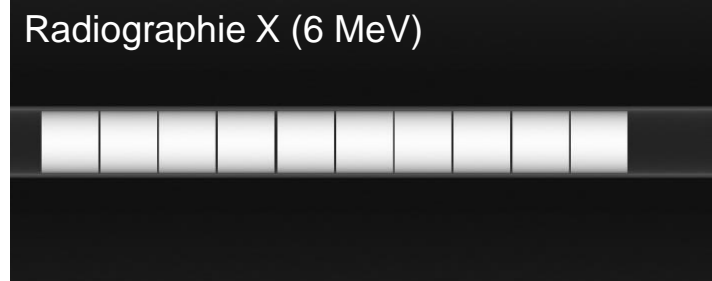
## Atténuation différentielle



Imagerie d'éléments hydrogénés situés à l'intérieur de contenants denses ou à haut Z

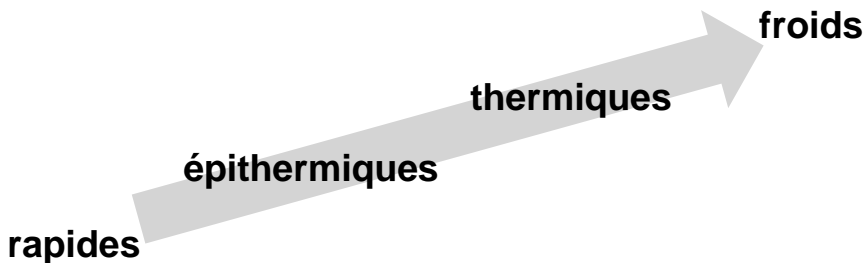
- Inclusion d'eau,
- Hydrurations,
- Défauts géométriques,
- Discrimination isotopique,
- ...

Complémentaire des rayons X



Variations d'enrichissement <sup>235</sup>U de 0,7% à 19% (simulation)

Discrimination des matériaux accentuée en fonction de l'énergie



## Détecter les neutrons pour faire des images

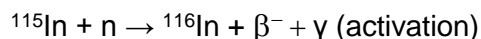
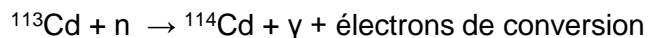
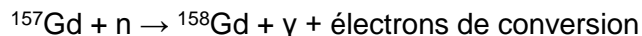
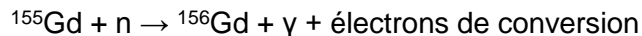
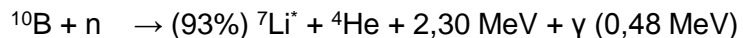
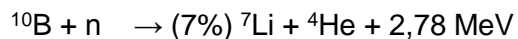
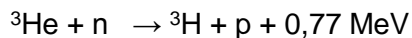
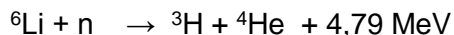
### Nécessite une conversion des neutrons

neutrons → particules ionisantes

$(n,\alpha)$ ,  $(n,\gamma)$ ,  $(n,t)$ , ...

+ Imageur 2D de faible épaisseur, sensible aux particules ionisantes produites

### Réactions exploitables



### Processus de production d'images

- Production de micro-traces (track etch)
- Opacification de film argentique par ionisation ( $\text{Ag}^+\text{Br}$ )
- Production de lumière de scintillation
- Excitation d'états métastables photostimulables (PSL  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ )
- Ionisation dans un semi-conducteur

### Systèmes d'imagerie neutronique

- Feuille cellulosique (track etch) +  ${}^6\text{LiF}$  ou  ${}^{10}\text{B}$  + traitement chimique
- Feuille Dy ou In + film argentique après transfert + développement
- Scintillateur ( $\text{ZnS(Ag)-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ) + CCD
- Imaging Plate dopée au Gd + numérisation
- Feuille Dy ou In + Imaging Plate après transfert + numérisation
- Scintillateur ( $\text{ZnS(Ag)-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ) + Flat panel aSi

## Détecter les neutrons pour faire des images

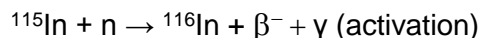
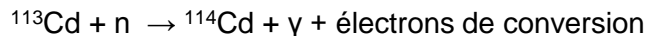
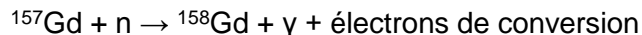
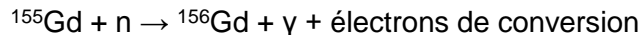
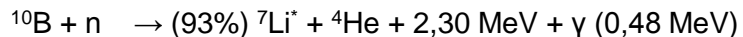
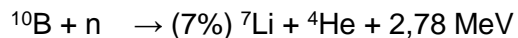
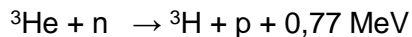
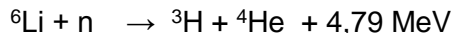
### Nécessite une conversion des neutrons

neutrons → particules ionisantes

$(n,\alpha)$ ,  $(n,\gamma)$ ,  $(n,t)$ , ...

+ Imageur 2D de faible épaisseur, sensible aux particules ionisantes produites

### Réactions exploitables



### Processus de production d'images

- Production de micro-traces (track etch)
- Opacification de film argentique par ionisation ( $\text{Ag}^+\text{Br}$ )
- Production de lumière de scintillation
- Excitation d'états métastables photostimulables (PSL  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ )
- Ionisation dans un semi-conducteur

### Systèmes d'imagerie neutronique

- Feuille nitrate de cellulose (track etch) +  ${}^6\text{LiF}$  ou  ${}^{10}\text{B}$  + traitement
- Feuille Dy ou In + film argentique après transfert + développement
- **Scintillateur ( $\text{ZnS(Ag)}\text{-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ) + CCD**
- Imaging Plate dopée au Gd + numérisation
- Feuille Dy ou In + Imaging Plate après transfert + numérisation
- **Scintillateur  $\text{ZnS(Ag)}\text{-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  + Flat panel aSi**

## Image numérique directe



## Détecter les neutrons pour faire des images

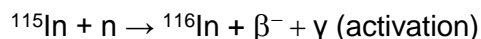
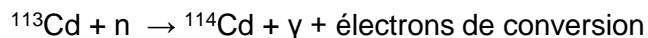
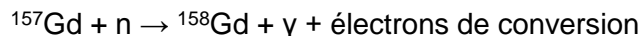
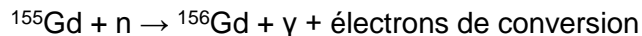
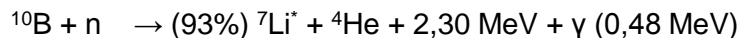
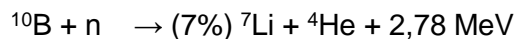
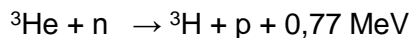
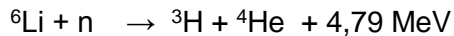
### Nécessite une conversion des neutrons

neutrons → particules ionisantes

$(n,\alpha)$ ,  $(n,\gamma)$ ,  $(n,t)$ , ...

+ Imageur 2D de faible épaisseur, sensible aux particules ionisantes produites

### Réactions exploitables



### Processus de production d'images

- Production de micro-traces (track etch)
- Opacification de film argentique par ionisation ( $\text{Ag}^+\text{Br}$ )
- Production de lumière de scintillation
- Excitation d'états métastables photostimulables (PSL  $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ )
- Ionisation dans un semi-conducteur

### Systèmes d'imagerie neutronique

- **Feuille nitrate de cellulose (track etch) +  ${}^6\text{LiF}$  ou  ${}^{10}\text{B}$  + traitement**
- **Feuille Dy ou In + film argentique après transfert + développement**
- Scintillateur ( $\text{ZnS}(\text{Ag})\text{-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ) + CCD
- Imaging Plate dopée au Gd + numérisation
- **Feuille Dy ou In + Imaging Plate après transfert + numérisation**
- Scintillateur  $\text{ZnS}(\text{Ag})\text{-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  + Flat panel aSi

**Image insensible au flux gamma**

## Détecter les neutrons pour faire des images

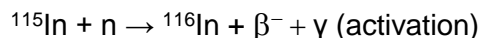
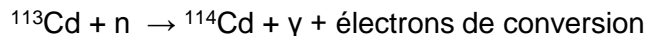
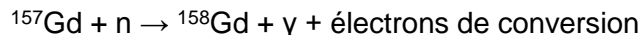
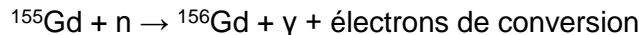
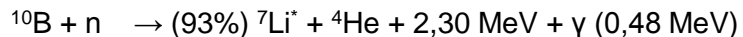
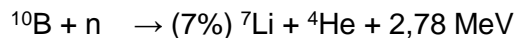
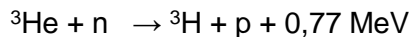
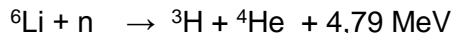
### Nécessite une conversion des neutrons

neutrons → particules ionisantes

$(n,\alpha)$ ,  $(n,\gamma)$ ,  $(n,t)$ , ...

+ Imageur 2D de faible épaisseur, sensible aux particules ionisantes produites

### Réactions exploitables



### Processus de production d'images

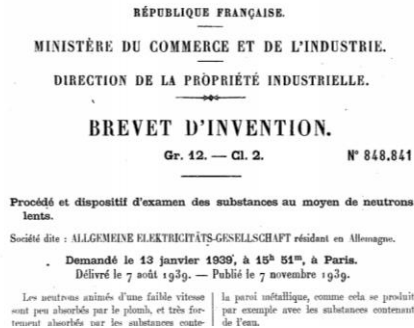
- Production de micro-traces (track etch)
- Opacification de film argentique par ionisation ( $\text{Ag}^+\text{Br}$ )
- Production de lumière de scintillation
- Excitation d'états métastables photostimulables (PSL  $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ )
- Ionisation dans un semi-conducteur

### Systèmes d'imagerie neutronique

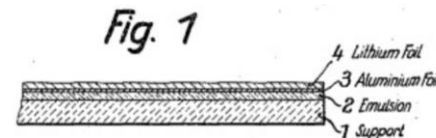
- Feuille nitrate de cellulose (track etch) +  ${}^6\text{LiF}$  ou  ${}^{10}\text{B}$  + traitement
- Feuille Dy ou In + film argentique après transfert + développement
- Scintillateur ( $\text{ZnS(Ag)-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ ) + CCD
- Imaging Plate dopée au Gd + numérisation
- Feuille Dy ou In + Imaging Plate après transfert + numérisation
- Scintillateur  $\text{ZnS(Ag)-}{}^6\text{LiF}$  ou Gadox  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$  + Flat panel aSi

**Pas d'image numérique directe  
sur des objets fortement irradiants**

- 1932 J.Chadwick *Possible Existence of a Neutron*. Nature 129 (27 février 1932).
- 1935 Imagerie possible par conversion ( $n,\gamma$  ou  $n,\alpha$ ) **Hartmut Kallmann & Ernst Kuhn (Allemagne)**



Jan. 9, 1940. H. KALLMANN ET AL. 2,186,757  
 PHOTOGRAPHIC DETECTION OF SLOWLY MOVING NEUTRONS  
 Filed March 24, 1938



- 1946 Neutronographie avec accélérateur **Peter (Allemagne)**
- 1955 Première Neutronographie avec réacteur  $10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  **Thewlis, Derbyshire @BEPO (Harwell, UK)**
- 1962 Neutronographie sur combustible irradié (méthode par transfert) **Berger (US) et Barton (UK)**
- 1963 Premières installations : US, France, Canada, Allemagne, Japon
- 1970 40 installations de neutronographie dans le monde (réacteurs)
- 1973 Première Conférence '*Radiography with neutrons*', Université de Birmingham
- 1980 Applications industrielles, hors nucléaire (aérospatial, ...)
- 2000 100 installations de neutronographie (réacteurs), surtout sur objets non irradiants
- 2018 78 installations de neutronographie opérationnelles (réacteurs), surtout sur objets non irradiants

2018 : 78 installations de neutronographie opérationnelles dans 40 pays (hors sources de spallation)

Source : AIEA



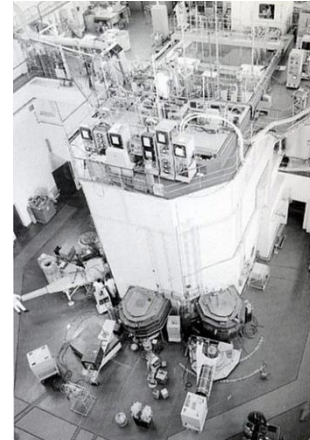
En 2017, seules 7 installations dans le monde proposaient une radiographie neutronique sur objets irradiants, toutes avec un faisceau sorti associé à une casemate blindée, convertisseur Dy ou In + film radiographique ou Imaging Plates :

- |   |   |
|---|---|
| 1) China Mianyang Research Reactor (CMRR), Mianyang, Chine            | 5) High Flux Advanced Neutron Application Reactor (HANARO), Corée Sud |
| 2) China Advanced Research Reactor (CARR), Beijing, Chine             | 6) Kalpakkam Mini reactor (KAMINI), IGCAR, Inde                       |
| 3) Neutron Radiography Reactor (NRAD), Idaho National Laboratory, USA | 7) CIRUS reactor, Bhabha Atomic Research Centre, Inde                 |
| 4) SINQ (Paul-Scherrer Institute) (source de spallation), Suisse      |   |

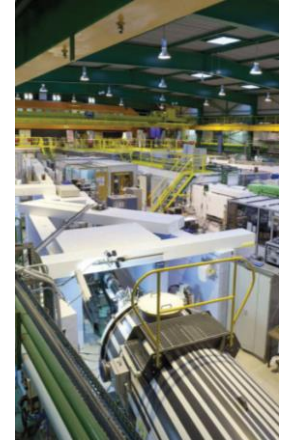
## L'imagerie neutronique en France

### Faisceau sorti (thermiques / froids)

- Mélusine (Grenoble, 1958-1988)
- Triton (Fontenay aux Roses, 1959-1979)
- Isis (Saclay)
- Orphée (Saclay, 1980 – )
- ILL (Grenoble, 1972 – )



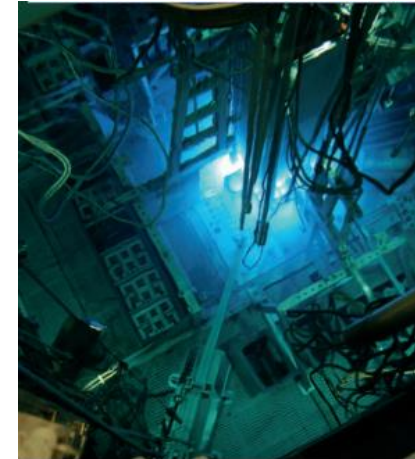
Mélusine en 1962. Yves Ballu "De Mélusine à Minatoc 1956-2006 : 50 Ans d'histoires du CEA Grenoble", Éditions du Dauphiné Libéré, 2003



Orphée en 2013 (hall des guides)

### Banc immergé (thermiques)

- Siloé (Grenoble, 1963 – 1997) : 120 x 400 mm, L/D = 380
- Osiris (Saclay, 1966 – 2015) : 100 x 650 mm, L/D = 150
- RJH (Cadarache, 2023 - ) : 70 x 650 mm, L/D = 260



Osiris (CEA DEN)

### Mini-réacteurs (épithermiques / thermiques)

- LDAC (Rapsodie, Cadarache, 1967 – 1983) : source pulsée (solution fissile ~20 L nitrate d'uranyle)
- MIRENE (Valduc, 1977) : source pulsée (solution fissile)
- Phenix (Marcoule, 1970 – 2009) : source pulsée (solution fissile)

La fluence minimale nécessaire pour permettre la production d'une image neutronographique est de l'ordre de :

$10^8 n_{th} \cdot cm^{-2}$  sur le plan détecteur dans une méthode directe

**$10^{10} n_{th} \cdot cm^{-2}$**  dans la méthode par transfert<sup>(1)</sup>

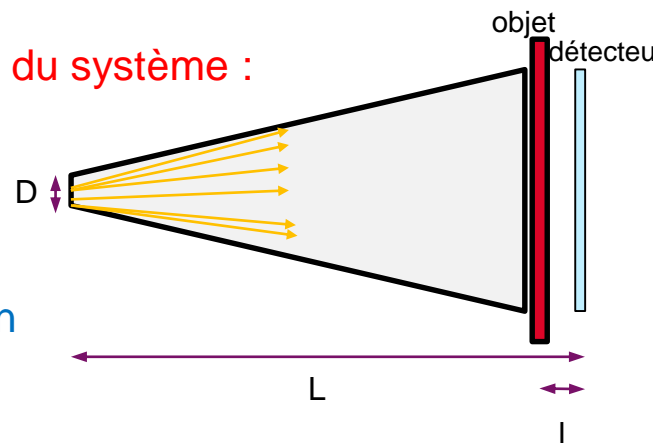
Fluence et flou géométrique sont liés via le paramètre géométrique L/D

La fluence au niveau du plan détecteur dépend de la géométrie du système :

$$\varphi_{det} = \frac{\varphi_{source}}{4\pi \left(\frac{L}{D}\right)^2}$$

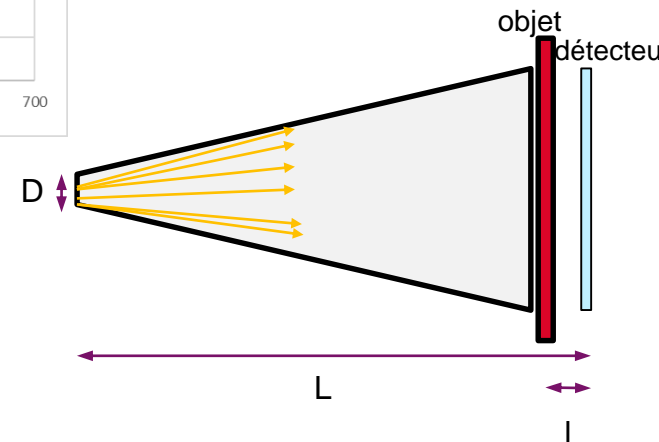
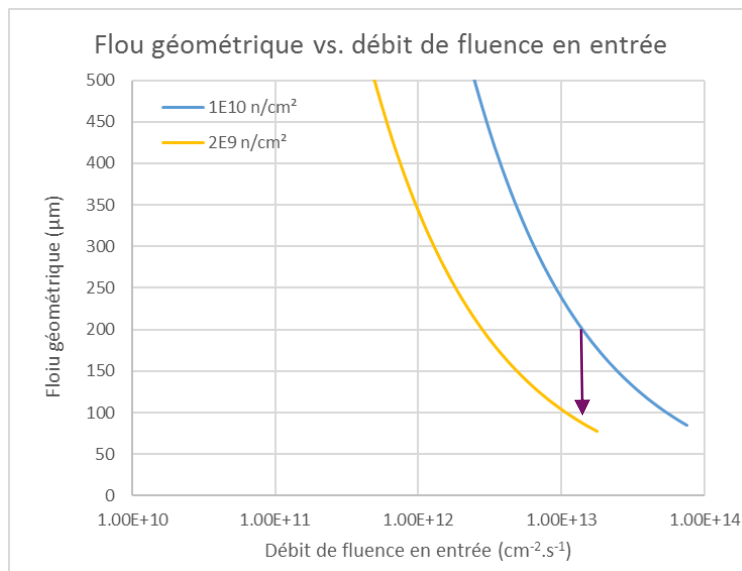
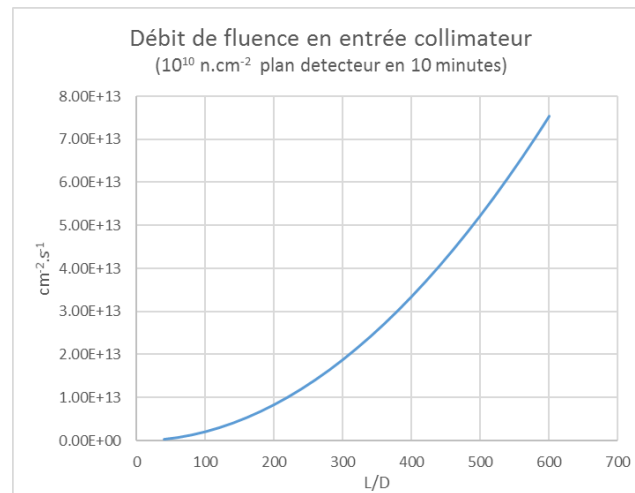
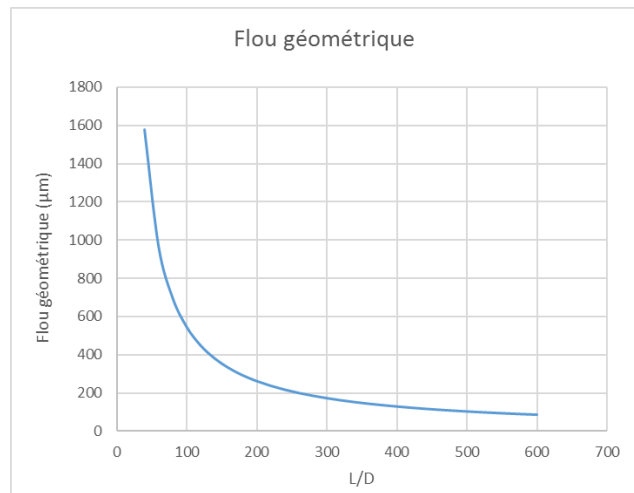
La résolution spatiale est fortement impactée par sa contribution géométrique (flou géométrique  $U_g$ ) :

$$U_g = \frac{l}{\frac{L}{D} - \frac{l}{D}}$$



(1) *Non Destructive and Analytical Techniques using Neutrons, Report of a Consultancy Meeting IAEA, Vienna, Austria, 26 – 28 Nov 2008*

Fluence et flou géométrique sont liés via le paramètre géométrique L/D



Un gain en sensibilité d'un facteur 5 du détecteur permet un gain d'un facteur 2 sur le flou géométrique, via la réduction de D

L'imagerie neutronique

La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

Le SIN du RJH

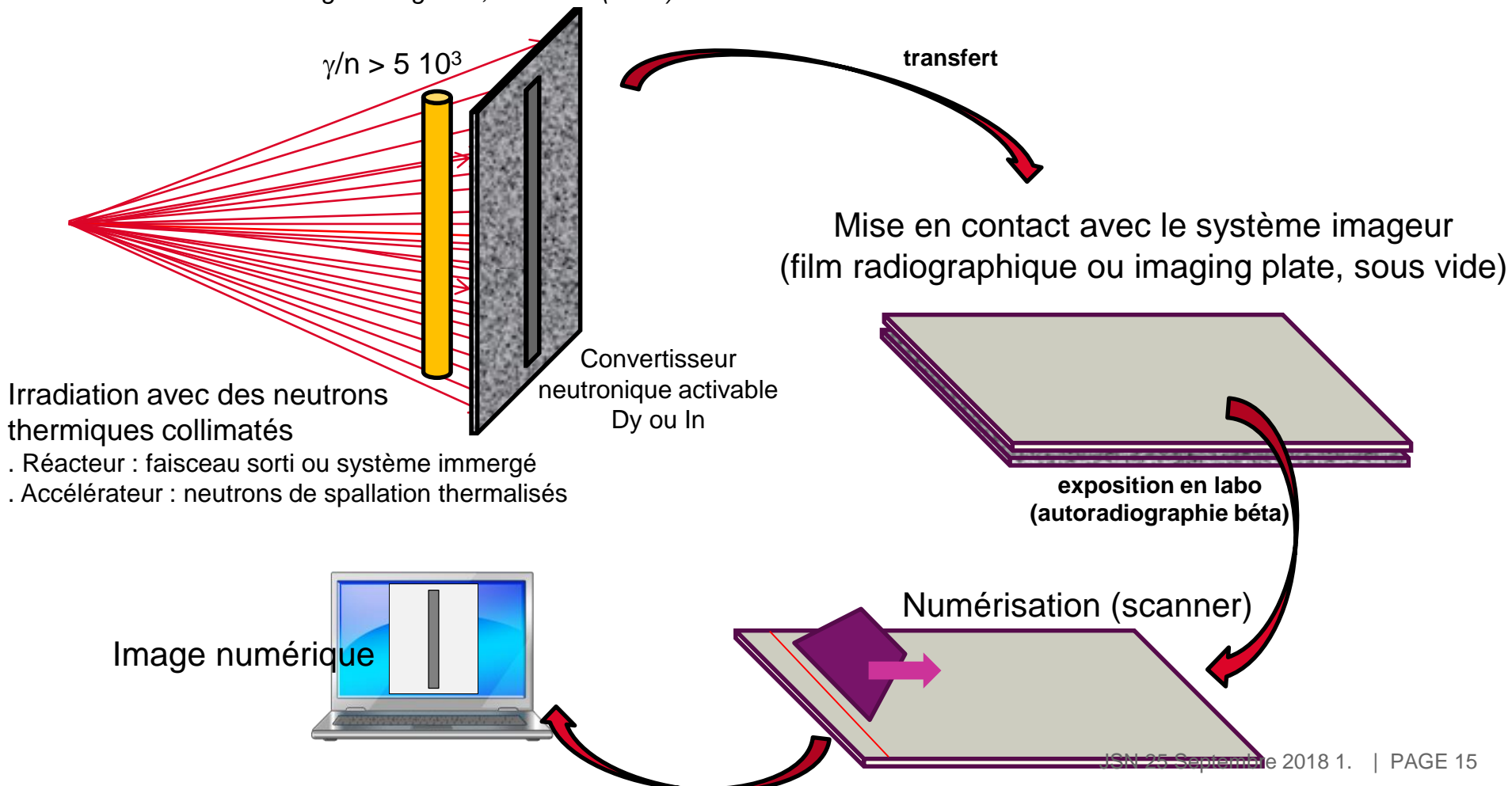
Imageur



## La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

Méthode développée à partir de 1962 par H. Berger

*Harold Berger and W.N. Beck , Neutron Radiographic Inspection of Radioactive Irradiated Reactor Fuel Specimens  
Nuclear science and engineering : 15 , 411-414 (1963)*



## La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

En 1962 ou en 2018, le convertisseur idéal est toujours le même...

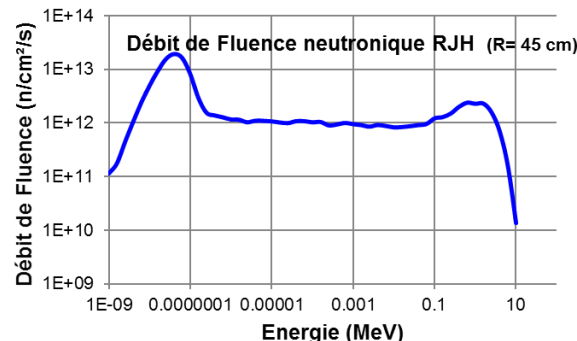
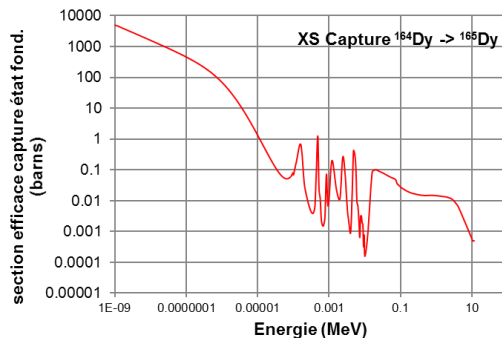
$^{164}\text{Dy}$

Conversion par activation

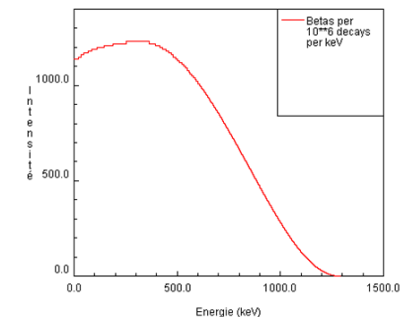
- Grande section efficace de capture neutronique
- Période de quelques heures
- émetteur  $\beta$
- Peu dosant

Parent	$T_{1/2}$	Mode de décroissance	fil
$^{165m}\text{Dy}$ (73%)	1,26 min	$\gamma$	$^{165}\text{Dy}$
$^{165m}\text{Dy}$ (73%)	1,26 min	$\beta^- \gamma$	$^{165}\text{Ho}$
$^{165}\text{Dy}$ (37%)	2,33 h	$\beta^-$ 100 %	$^{165}\text{Ho}$

isotope	Abondance (%)	Radioisotope produit	Décroissance (E keV)	Demi-vie	Section efficace de capture à 25 meV
$^{164}\text{Dy}$	28,18	$^{165}\text{Dy}$	$\beta$ (1286) 83% $\beta$ (1192) 15% $\beta$ (291) 1,7%	2,33 h	1000 barns



$^{165}\text{Dy}$  B- Decay (2.334 H), E(ave)=441.1 keV, E(max)=1286.1 keV



## La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert



L'imagerie neutronique

La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

**Le SIN du RJH**

Imageur

## Réacteur Jules Horowitz

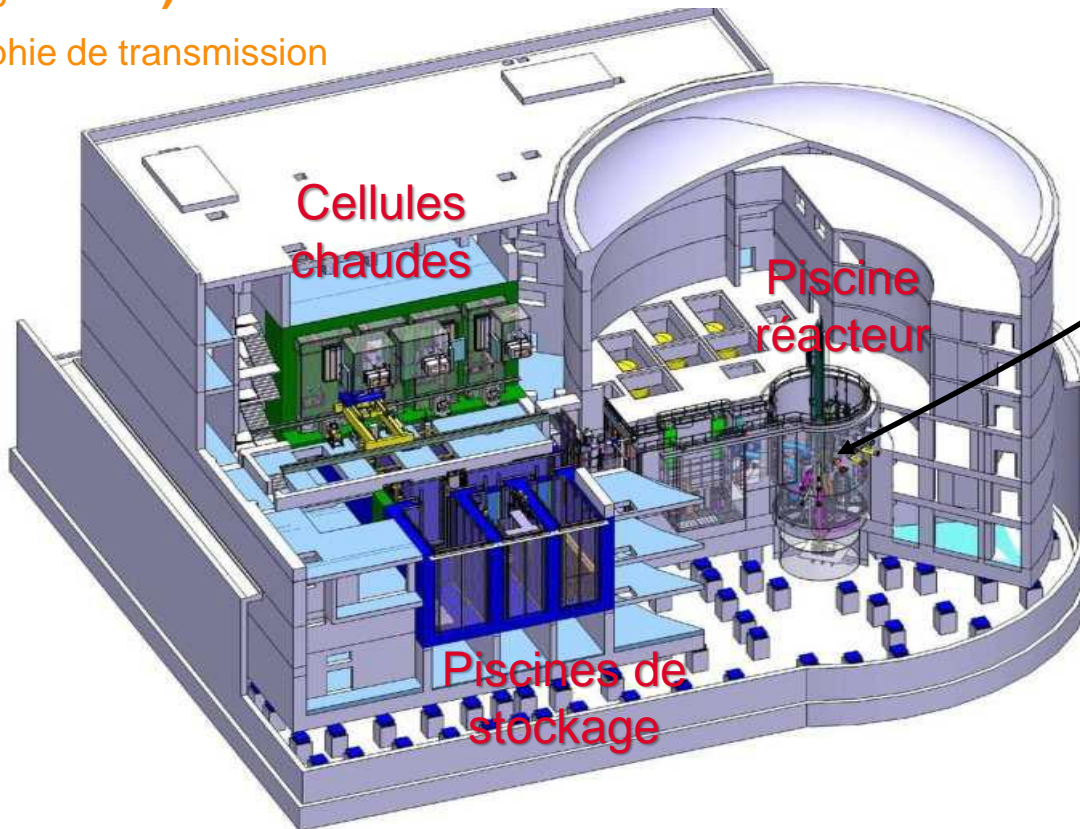
Multiples examens non destructifs sur combustibles irradiés, 3 zones dédiées

Imagerie RX haute énergie  
(UGXR, HGXR)

Tomographie de transmission

Imagerie neutronique  
(SIN)

Radiographie de transmission



Spectrométrie gamma  
(UGXR, HGXR)

Gamma scanning  
Tomographie d'émission

## Objectifs de l'examen neutronographique dans le RJH

### Des contrôles et diagnostics sur crayons combustibles

Détection d'entrées ou de migrations d'eau (double enceintes...)

Détection de remontée d'humidité (câbles d'instrumentation...) et détermination de la zone affectée

Détection de concentrations d'hydrures locales dans la gaine

Visualisation de jonction diffusée

Contrôle de composants critiques du dispositif d'irradiation

Contrôle d'intégrité ou d'état général de colonne combustible après transport et avant chargement en dispositif

Contrôle d'évolutions géométriques, fissurations (Matériaux pour Gen IV)

Contrôle de la concentration ou distribution surfacique ou volumique de particules fissiles dans une matrice

Diagnostic sur le dispositif à l'aide d'un produit absorbant les neutrons

Détection de pastilles avec enrichissement différent

Détection de structure de « rim » périphérique

Contrôle de la distribution relative locale d' $^{235}\text{U}$

Aide au diagnostic de perte d'étanchéité sur résultat de test sollicitant (transitoire incidentel, rampe de puissance...)

Détection de grains fissiles ou de fragments de combustible isolés

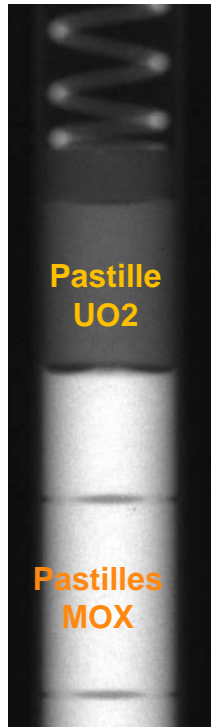
Contrôle global d'échantillon

Détection des amas Pu fissiles

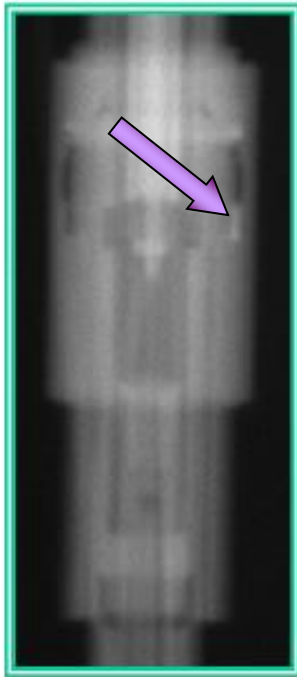
Résolution < 200  $\mu\text{m}$   
Image numérique disponible en quelques heures

## Objectifs de l'examen neutronographique dans le RJH

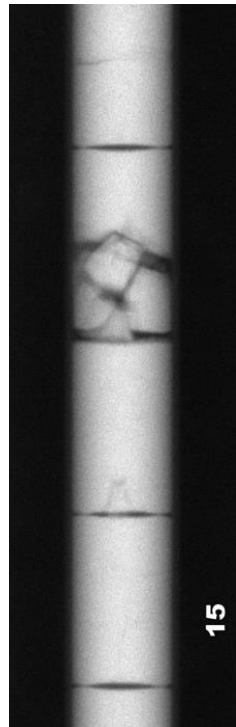
Des contrôles et diagnostics sur crayons combustibles



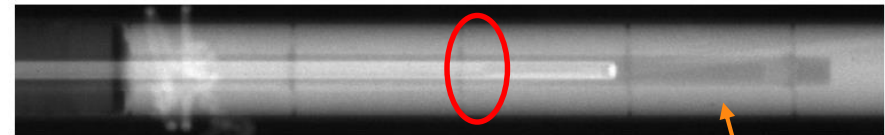
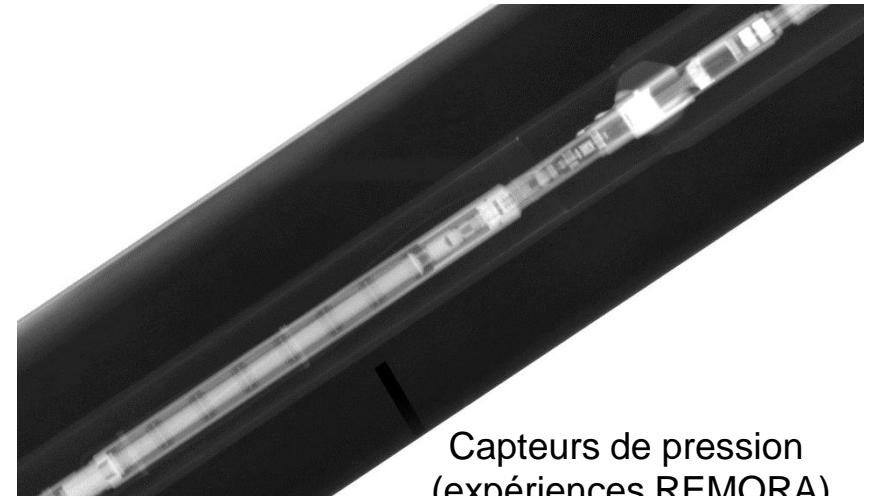
Type de combustible



Fuite de soudure (présence d'eau)



Fractures de pastilles



Thermocouple: Hot junction

Pastille perforée

Vérifications de crayons après fabrication et/ou transport

Contrôle d'instrumentations

## Objectifs de l'examen neutronographique dans le RJH

Des mesures de paramètres physiques sur crayons combustibles

Mesure de longueur de colonne fissile

Visualisation et quantification  
d'interpastilles, dishings, fissures, éclats...

Quantification d'isotopes d'un élément particulier

Mesure de la concentration moyenne ou locale d'un élément  
neutrophage dans divers matériaux fissiles ou autres :  
combustible, gaine, autres céramiques, pièces d'extrémité etc...

Mesure de la cinétique de consommation  
d'un élément neutrophage

Quantification d'échanges d'eau (jeu  
combustible-gaine, volumes libres...)

Mesure du niveau de liquide (eau, NaK) dans la partie en pile  
du dispositif ou dans un réservoir associé

Quantification de la teneur moyenne en hydrures  
d'un alliage métallique. Quantification de profils  
axiaux et radiaux de concentration

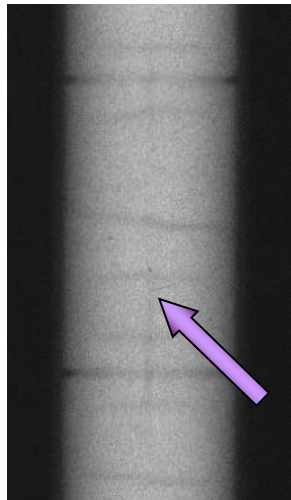
Mesure de la déformation globale  
d'une colonne fissile après test

Résolution < 200  $\mu\text{m}$   
Image numérique disponible en quelques heures

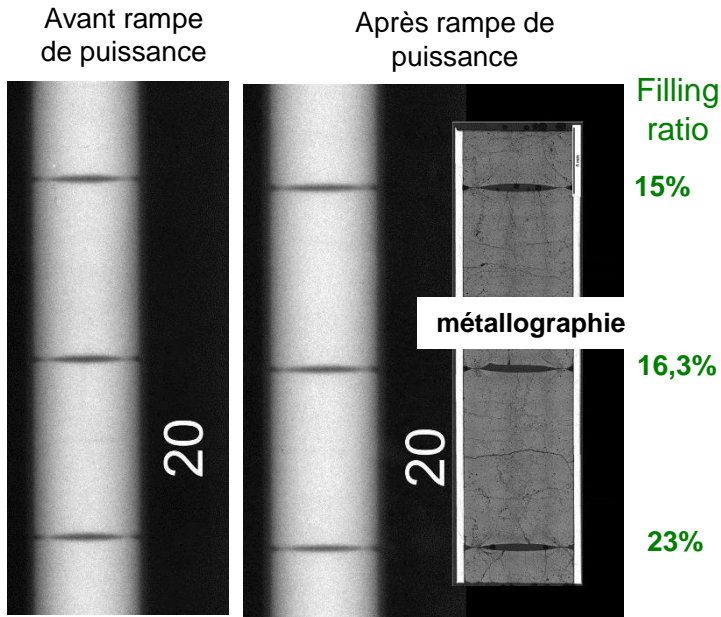


## Objectifs de l'examen neutronographique dans le RJH

Des mesures de paramètres physiques sur crayons combustibles



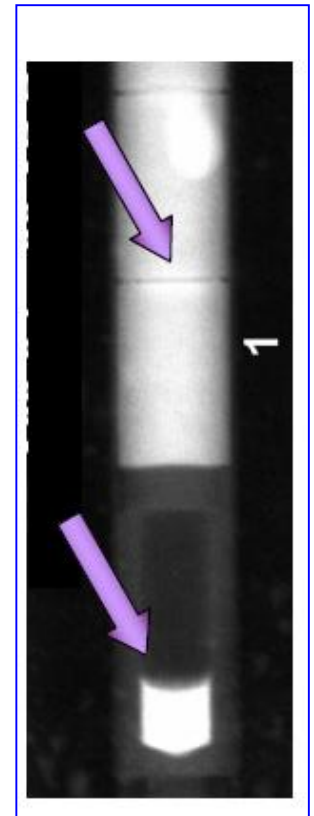
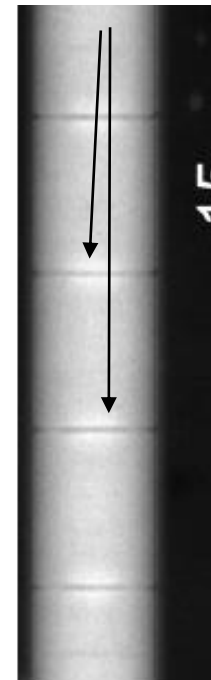
Formation d'un trou central dans une pastille



Mesure du *dishing filling ratio* après une transitoire de puissance

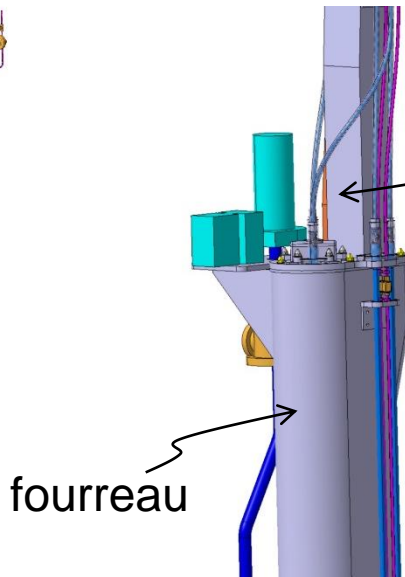
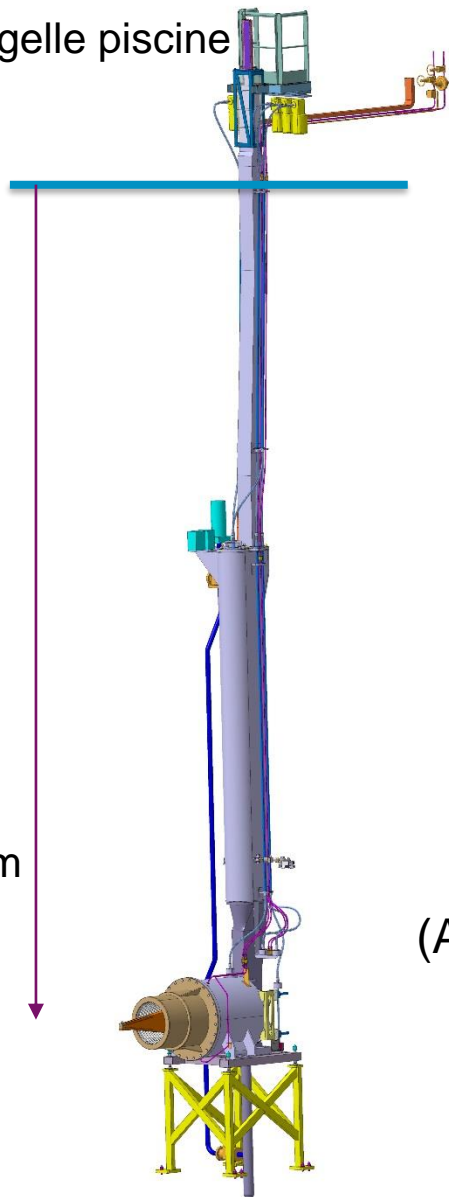
### Mesures d'évolutions géométriques

Humidité à l'interface interpastille



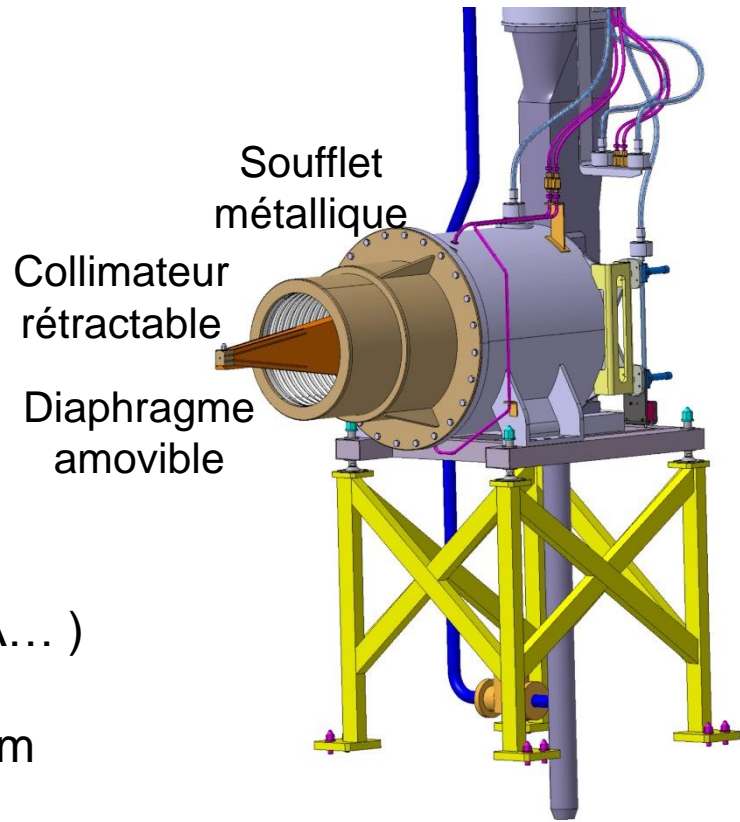
### Tests des limites technologiques sur échantillons de combustible

Margelle piscine



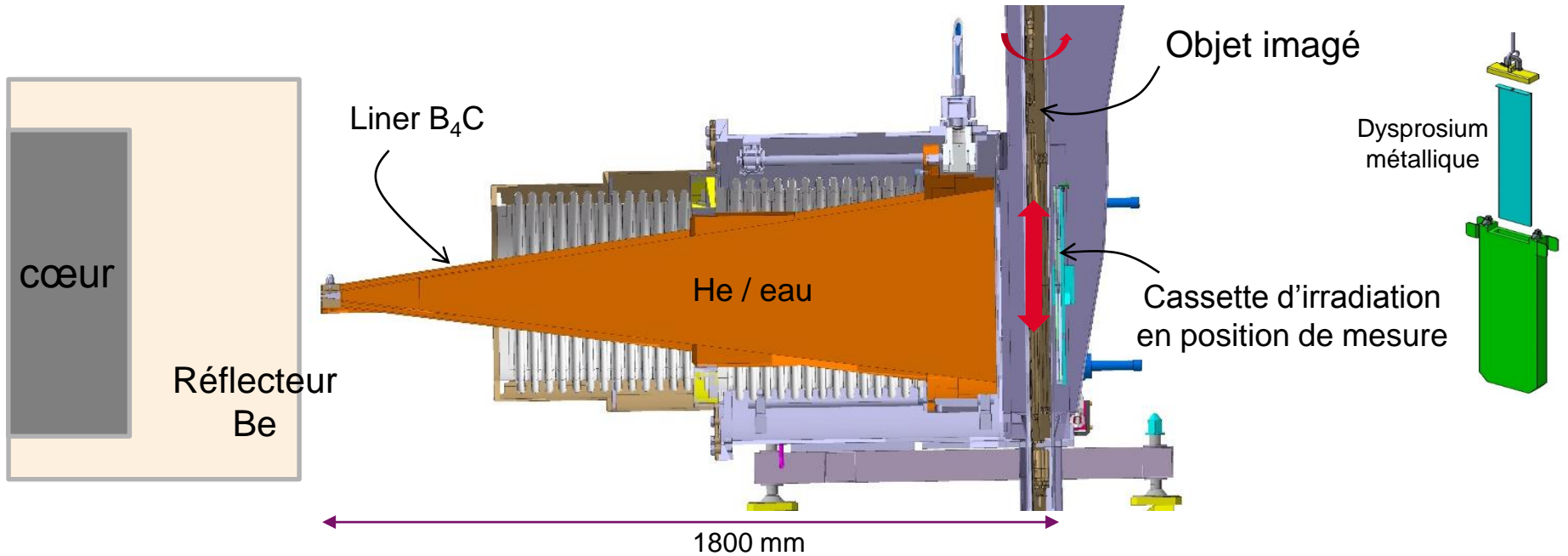
Convoyeur de la cassette  
(convertisseur)

fourreau



Nombreux dispositifs  
compatibles avec le SIN  
(ADELINE, MADISON, MICA... )

Translation verticale 100 cm  
Rotation 360°



$L = 1800 \text{ mm}$

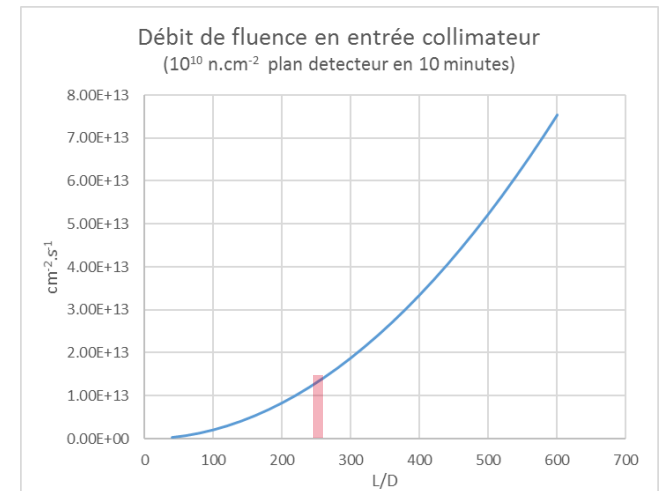
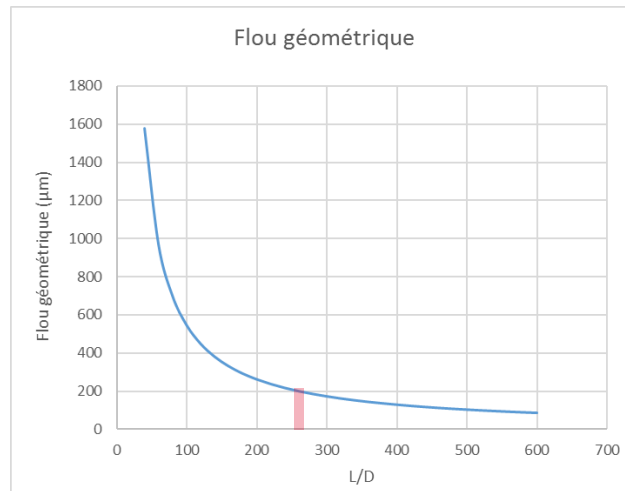
$D = 7 \text{ mm}$

$l = 50 \text{ mm}$

$L/D = 260$

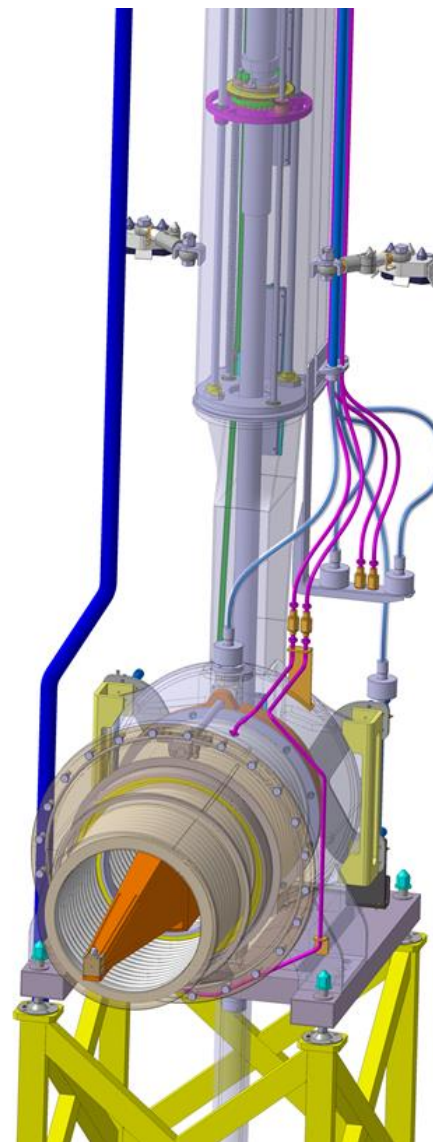
Flou géométrique

$U_g = 200 \text{ } \mu\text{m}$



**Le design du système s'est focalisé sur l'optimisation des performances et la maintenance :**

- Convoyeur pour le transfert de la feuille de dysprosium dans sa cassette. Réduction significative de la durée du processus et optimisation du flou géométrique.
- Design de la chambre arrière abritant la cassette d'irradiation et le dispositif expérimental en examen incluant un système d'étanchéité de la chambre (en air) durant l'examen.
- Système de positionnement des dispositifs en azimuth et en altitude assurant une course verticale de 100 cm et une rotation sur 360° pour les différents types de dispositifs expérimentaux envisagés.
- Technologie de détection (formation de l'image à partir du convertisseur). La technologie de référence au démarrage du SIN sera la même que celle utilisée précédemment sur OSIRIS (films radiographiques à couche simple) mais leur pérennité incertaine et leurs inconvénients (faible sensibilité, non-linéarité, processus chimique) amènent à rechercher une alternative du type Imaging Plate, dont des premiers tests ont été menés en 2016-2017.



L'imagerie neutronique

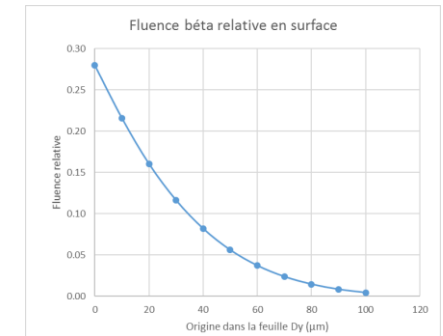
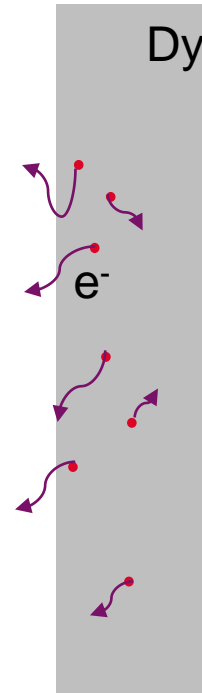
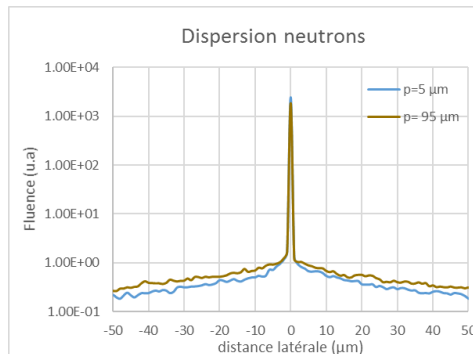
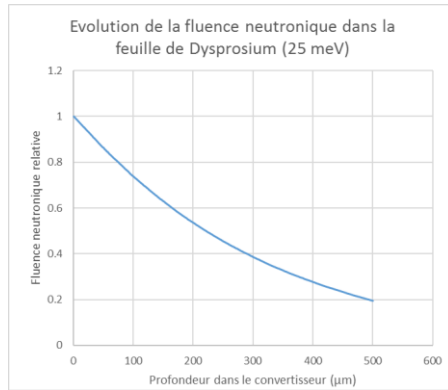
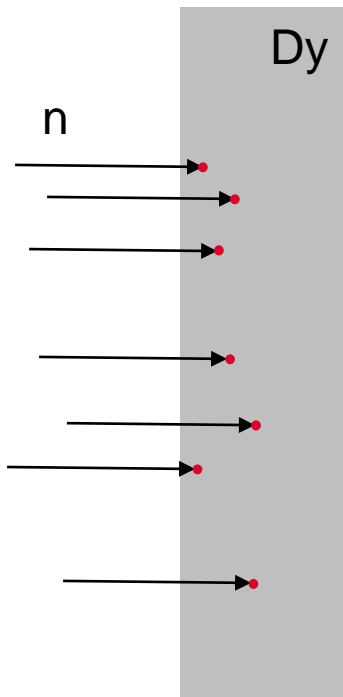
La neutronographie d'objets irradiants : méthode par transfert

Le SIN du RJH

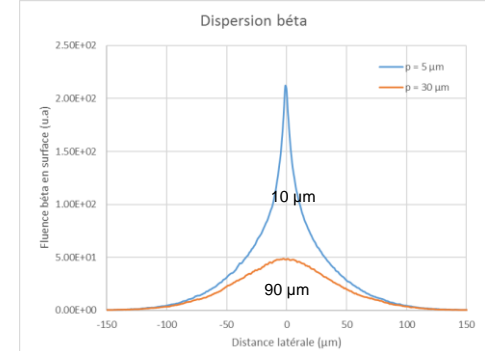
**Imageur**

## La performance d'un imageur dépend :

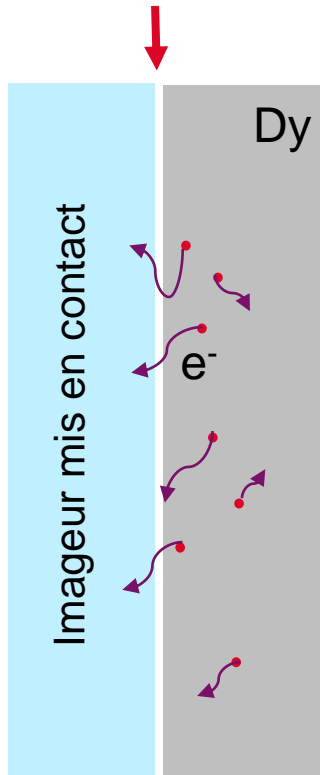
- De la géométrie de l'examen → résolution spatiale (flou géométrique)
- Des systèmes utilisés
  - source (énergie, fluence) → dynamique de signal, contraste
  - collimateur (qualité du faisceau) → contraste
  - détecteur imageur → résolution spatiale, sensibilité
  - qualité du transfert → résolution spatiale, contraste



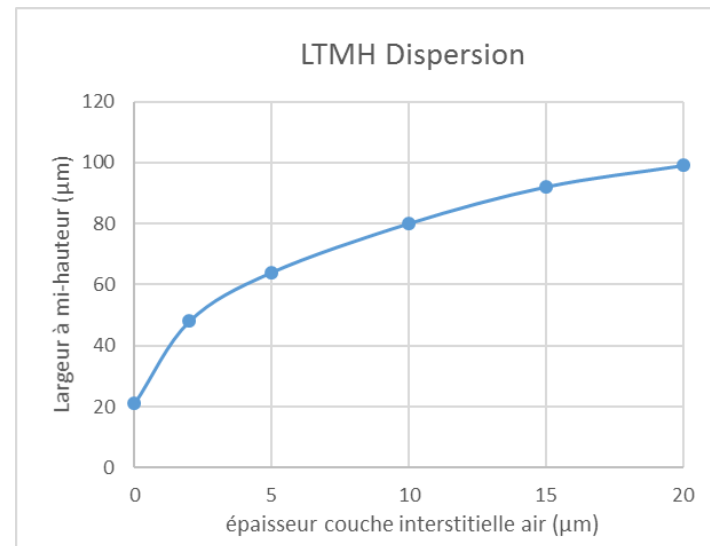
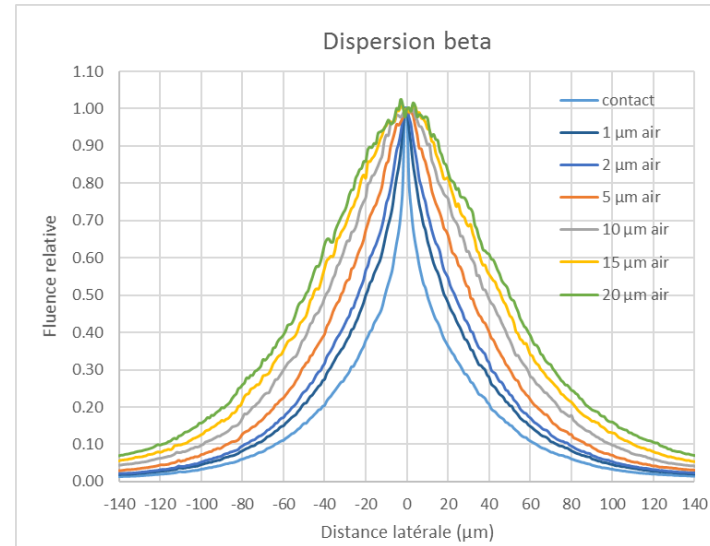
77% du flux beta provient des 30 premiers µm



## Mise en contact convertisseur - imageur



Contact à effectuer sous vide  
(dépressurisation)



Solution de référence au démarrage du SIN :

Feuille Dysprosium métallique + **film radiographique monocouche** (Agfa D3sc ou Fuji IX20)

➔ Référence par rapport aux examens neutronographiques antérieurs effectués à Osiris

Solution alternative (remplacement des films radiographiques en obsolescence) :

Feuille Dysprosium métallique + **imaging plate haute résolution** (type Fuji BAS-TR)

### Film radiographique

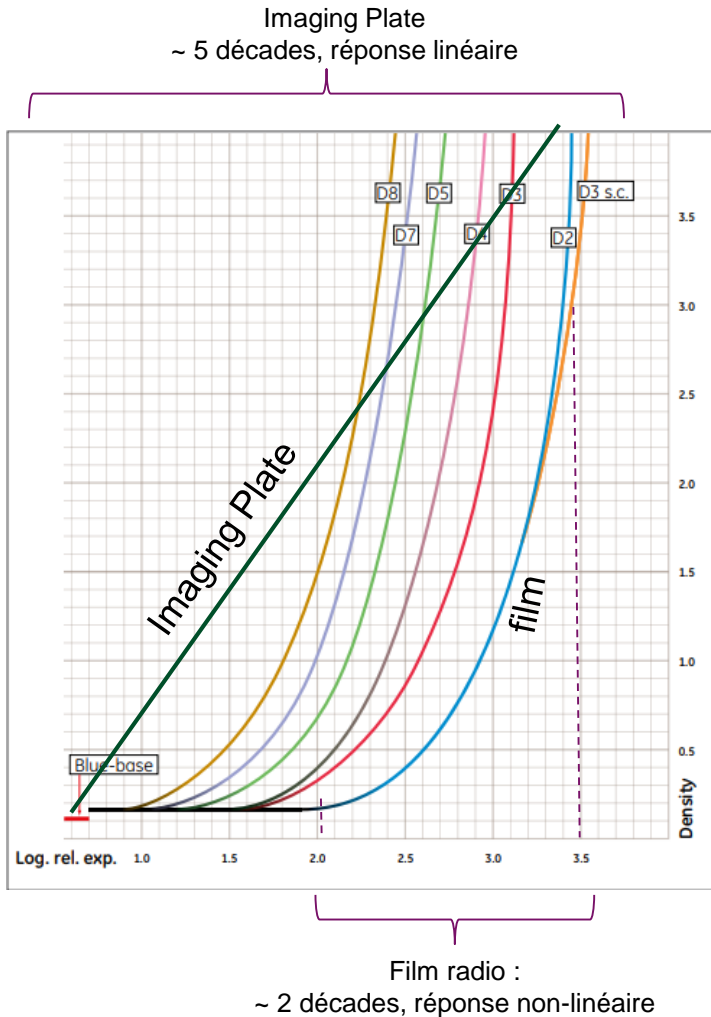
- **Résolution spatiale très bonne**
- Retour d'expérience sur films très important
- Permet un gain de résolution spatiale important par la variation du diaphragme du collimateur
- Modèle à simple couche peu utilisé
- **Réponse non-linéaire**
- **Dynamique faible (2 décades)**
- Dimensions non adéquates
- Image numérique du convertisseur en 3 étapes
- Traitement chimique, Processus long, Mal adapté pour la numérisation

### Imaging Plate

- Utilisation courante, de nouveaux modèles sortent fréquemment
- **Grande sensibilité**
- **Réponse linéaire**
- **Grande dynamique du signal (5 décades)**
- Dimensions adaptées au convertisseur
- Imagerie numérique en 2 étapes
- Processus plus rapide, image numérique, Réutilisable
- **Résolution spatiale moyenne**
- **Existence de phénomène de fading (désexcitation spontanée, perte de signal)**
- Fragilité
- Faible gain de résolution spatiale par la variation du diaphragme du collimateur



## Film radio monocouche vs. Imaging plate haute résolution



Deux imageurs très différents pour l'autoradiographie bêta du dysprosium

- Dynamique
- Réponse
- Sensibilité

Parfois difficile pour un industriel de changer de technologie (perte de références engrangées sur des dizaines d'années...)

## 2 modèles de film radiographiques monocouches sur le marché après l'arrêt du Kodak SR-45 :

- Agfa D3sc
- Fuji IX 20

	KODAK SR-45	AGFA D3sc	FUJI IX 20
Couche de protection ( $\mu\text{m}$ )	6	5	1
Emulsion ( $\mu\text{m}$ )	12,5	12,5	12,5
Support ( $\mu\text{m}$ )	175	175	175

Résolution spatiale intrinsèque excellente ( $40 \mu\text{m}$ ) grâce à la faible épaisseur de l'émulsion argentique

Dépendance forte de la couche de protection en surface séparant l'émulsion de la surface du convertisseur dysprosium

### Formation d'une image avec un film radio (3 étapes) :

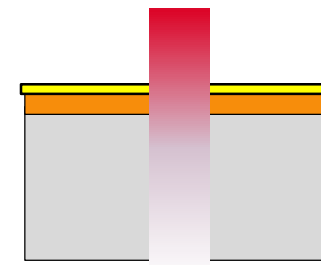
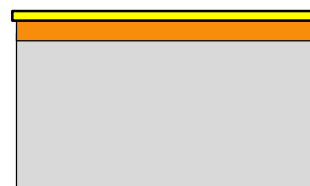
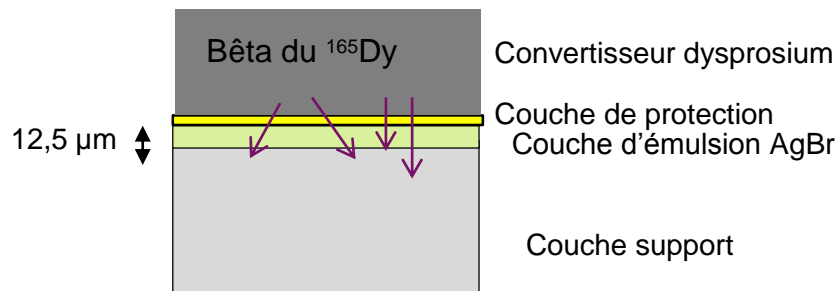
Exposition (contact Dy-Film)



Développement (traitement chimique)



Numérisation (scanneur optique)



Nombreux modèles d'imaging plates sur le marché de l'imagerie RX en remplacement des films :

- Fuji BAS TR, Fuji UR1
- Carestream Flex XL Blue

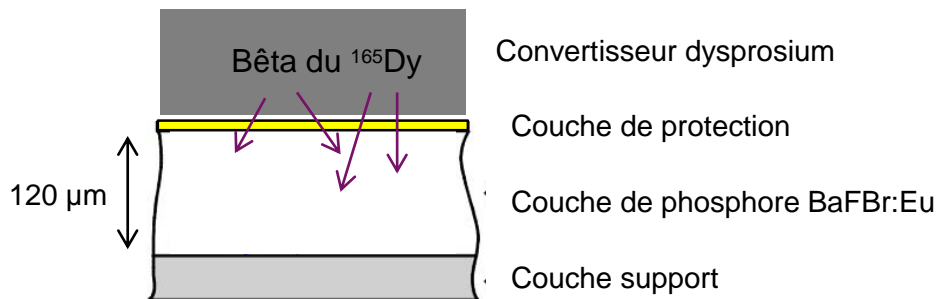
	Fuji BAS-TR	Fuji UR1	Flex XL Blue
Couche de protection (µm)	0	6	6
Couche phosphore (µm)	50	130	120
Support (µm)	250	188	190

Formation d'une image avec une IP (2 étapes) :

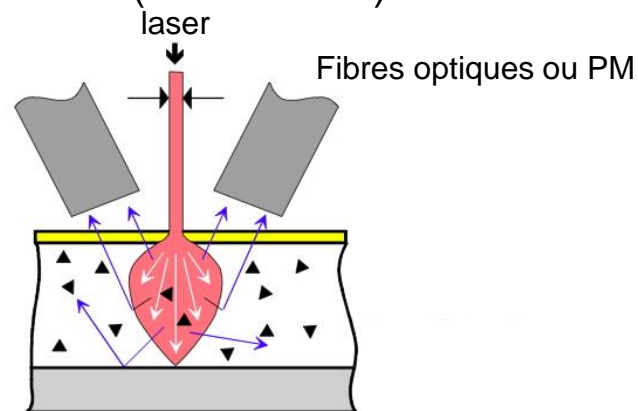
Exposition (contact Dy-IP)



Lecture (scanneur IP)



**Création de niveaux excités sur des centres de luminescence**



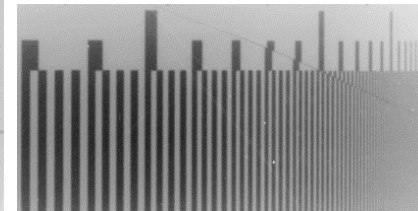
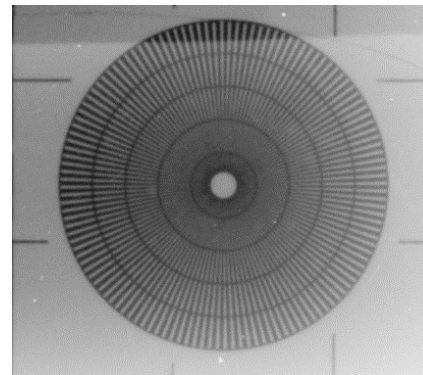
**Désexcitation induite par laser**

## Tests d'IP effectués à Orphée avec neutrons froids en 2016 et 2017

### Résolution spatiale

IP TYPE	10% MTF (lp/mm)	Spatial resolution (μm)
Fuji BAS-TR	5.2	100
Fuji-UR1	3.7	135
Carestream XL Blue	3.7	135
Prototype Dy-doped	3.8	130
Fuji BAS-ND	5.8	85

Mire Siemens Gd sur Fuji BAS-TR

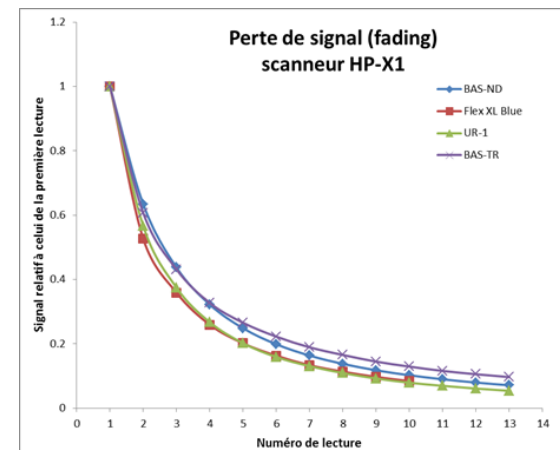


### Fading

Perte de signal entre deux lectures successives par le processus de lecture

Perte de signal par l'exposition à la lumière ambiante :  
3 min à 1000 lux → signal / 1.5

Aucune perte de signal mesurée durant plusieurs heures à l'obscurité



## Performances de résolution sur l'image comparées Film – IP

DETECTEUR	Résolution spatiale intrinsèque ( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale intrinsèque après numérisation ( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale finale (avec flou géométrique) L/D = 260	Résolution spatiale finale (avec flou géométrique) L/D = 350
Film Agfa D3sc	40	50	206	
IP Fuji BAS-TR	80	100	224	178

Avec IP : Perte de résolution globale sur l'image d'environ  $20 \mu\text{m}$  à L/D=260 : de  $206 \mu\text{m}$  avec Film, à  $224 \mu\text{m}$  avec IP

Les IP sont beaucoup plus sensibles que les films, mais leur résolution intrinsèque moins bonne.

Au final, avec **IP**: latitude *a priori* pour réduire la fluence neutronique sur Dy par un facteur  $\sim 4$  à durée d'examen égale à celle du film radio, et donc multiplier L/D par  $\sim 2$ , réduire le flou géométrique par le même facteur et ainsi atteindre une résolution finale sensiblement inférieure à  $200 \mu\text{m}$ .

Par exemple avec une réduction modérée de la fluence neutronique sur Dy, contrebalancée par la meilleure sensibilité des IP par rapport au film radio (fluence divisée par 1,9 avec  $D=5,1 \text{ mm}$ , L/D = 350) on parviendrait à une résolution finale de  $178 \mu\text{m}$  avec IP BAS-TR.

Merci de votre attention



Banc neutronographie OSIRIS

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Cadarache | 13108 St-Paul Lez Durance  
Eric.Simon@cea.fr

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

DEN  
Cadarache  
DTN  
SMTA  
LMN