



énergie atomique • énergies alternatives



L'imagerie/tomographie pour le contrôle et la caractérisation

JL. PETTIER
DTN/SMTM/LMN
CEA Cadarache

jean-luc.pettier@cea.fr



Pourquoi de l'imagerie dans le cycle du combustible ?

- **Contrôle non destructif en vue de :**
 - > *vérifier une conformité (dénombrement, dimensions)*
 - > *estimer une dégradation suite à un cycle thermique, une irradiation ou une contrainte mécanique ...*
 - > *éviter de corrompre la pièce avant découpe avant des examens destructifs*
 - > *continuer à utiliser la pièce ... état de santé*
- **Caractérisation physico-chimique en vue de :**
 - > *Identifier et localiser les différents constituants*
 - > *Présence/absence d'hétérogénéités non autorisées (liquides interdits, volumes vides, matériaux organiques, ...)*
 - > *Modéliser l'objet sous forme de voxels ou d'arbres CSG pour les méthodes nucléaires non destructives nécessitant un modèle de l'objet aussi exact que possible*
- **Sur des objets multi-matériaux denses et épais !!!**

Les rayons X et gamma



énergie atomique • énergies alternatives

- Un rayonnement électromagnétique
- Un rayonnement \pm pénétrant suivant son énergie et son intensité
- Rayonnement d'énergie variable :
 - > *l'unité est l'électron-volt (eV)*
 - > *Rayonnement mono-énergétique (source isotopique)*
 - > *Rayonnement multi-énergétique (tube X, Linac, béta-tron)*
- Domaine d'utilisation :
 - > *qq centaines de keV (sources isotopiques et tubes X)*
 - > *à plusieurs MeV (Linac, béta-tron)*
- Interaction avec la matière en fonction de
 - > *de l'énergie du rayonnement incident,*
 - > *de la densité électronique du matériau ou du mélange*
 - > *de l'épaisseur traversée*

- Les probabilités d'interaction par unité de masse

$$\frac{\mu}{\rho}(E, Z) \approx K_{photoelec} \cdot E^{-\frac{7}{2}} \cdot Z^5 + K_{Compton}(E) \cdot Z + K_{paires}(E) \cdot Z^2$$

(cm².g⁻¹)

$$\frac{\mu}{\rho}(E)_{Cu}$$

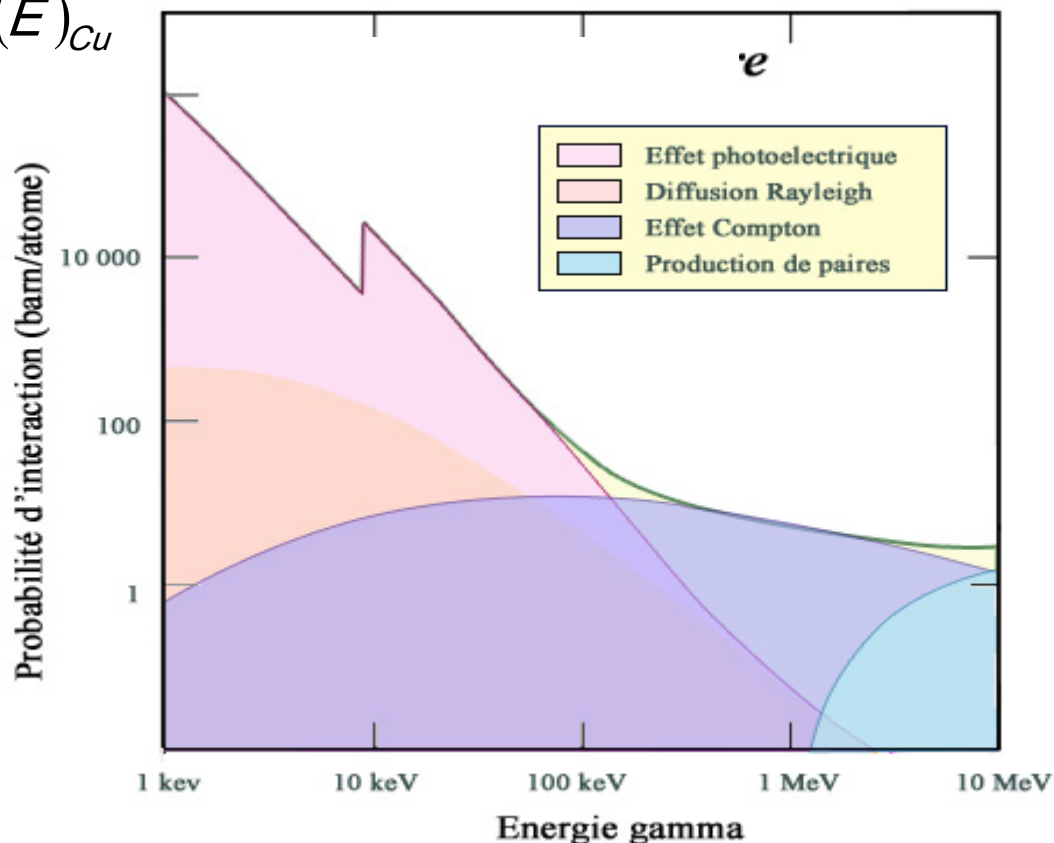
- Une loi mono-énergétique simple :

$$N = N_0 e^{-\int_{x \in L} \frac{\mu}{\rho}(x) \cdot \rho(x) \cdot dx}$$



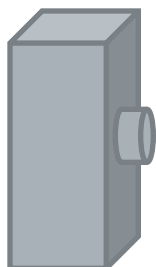
$$\ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = \int_{x \in L} \mu(x) \cdot dx$$

- + complexe si multi-énergétique et multi-matériaux

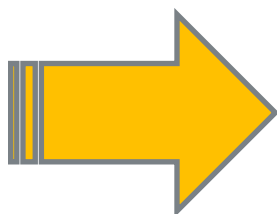


Mesures par transmission photonique

Générateur
de rayons X



Faisceau de
photons
incidents

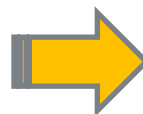


échantillon

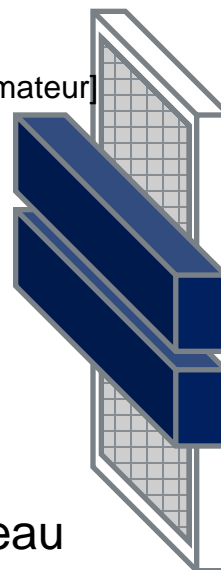


Interactions
diverses avec la
matière

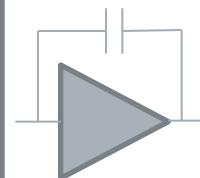
[Post-collimateur]



Faisceau
de photons
transmis



Détecteur numérique 1D
ou 2D (linéaire ou matriciel)

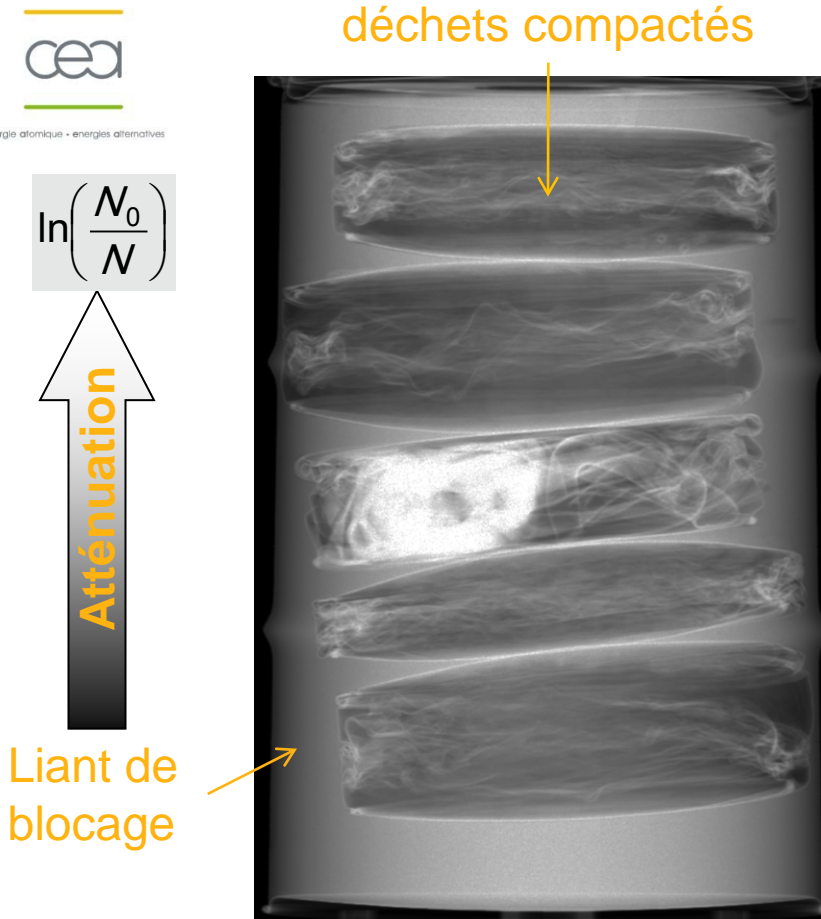


**RADIOGRAPHIE
numérique**



$$\ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = \ln\left(\frac{\text{image objet absent} - \text{background}}{\text{image objet présent} - \text{background}}\right)$$

Que voit-on ?



PROJECTION => contraste
Reconnaissance de formes connues
Mesures d'épaisseurs, hauteurs

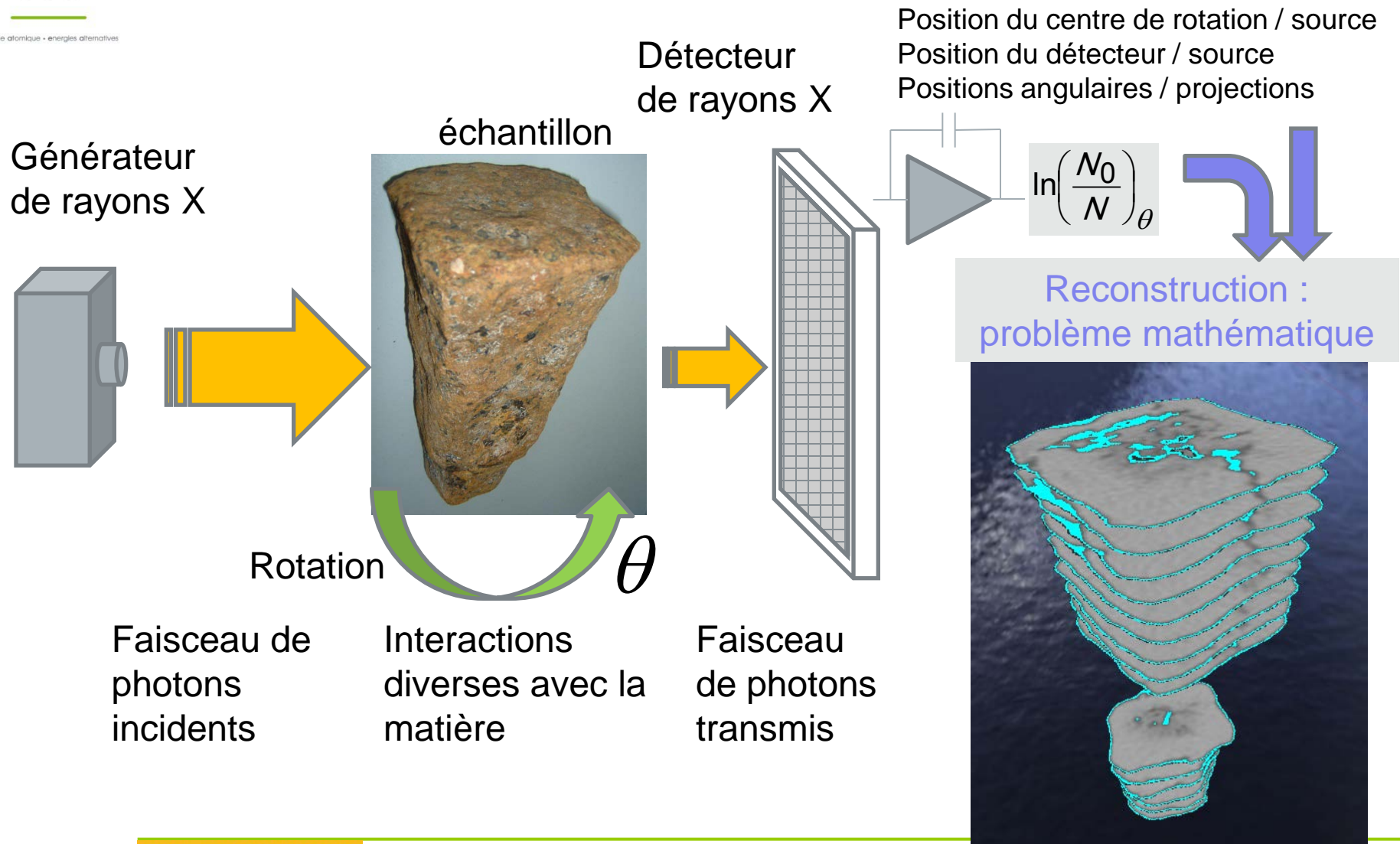
- Les rayons X ou γ interagissent avec la matière (objet et détecteur) en fonction de :
 - > Leur énergie
 - > Le numéro atomique des atomes rencontrés
 - > L'épaisseur de matière traversée
 - > La densité
- L'énergie déposée au sein de chaque pixel est convertie en signal électrique
 - > Sensibilité et rendement
 - > Proportionnel à la dose
 - > Dynamique $V_{min}-V_{max}$
 - > Bruit photonique en \sqrt{N}
 - > Bruit électronique ...
 - > Cross-talk entre pixels connexes

La tomographie (or X-ray Computed Tomography)



- **Limites d'interprétation de la radiographie :**
 - > *position des éléments en profondeur, éléments complexes, éléments cachés ... ? : on peut faire plusieurs radios (panorex)*
 - > *Pas d'information sur la nature des matériaux ... ?*
- **Solution : reconstruction 2D ou 3D = tomographie**
 - > *Découpe la pièce en tranches fines (scanner médicaux)*
 - > *Si suffisamment de tranches à intervalle constant alors reconstruction 3D*
 - > *Si faisceau mono-énergétique ou assimilé : données tomодensitométrie ou TDM*
 - > *Si faisceau mono-énergétique ou assimilé et double énergie : données Z_{eff} et densité*
 - > *Durcissement du spectre multi-énergétique : non linéarité*
 - > *Résolution spatiale limitée et flou aux interfaces*
 - > *Nombre de mesures et mesures manquantes (plus de signal sur le détecteur)*
 - > *Problème de reconstruction : quel algorithme ?*

Acquisition : mesures par transmission photonique avec rotation de l'échantillon



- **Contraintes à l'acquisition :**

- > *Invariance du centre de rotation*
- > *Perpendicularité de l'axe de rotation avec le plan du faisceau*
- > *Stabilité de la source ou monitoring du faisceau*
- > *Réduire le flou de positionnement de l'échantillon*
- > *La dynamique du détecteur doit encadrer la dynamique d'atténuation de l'objet pour mesurer N_0 (flux à vide) et N au dessus du bruit !!!*

- **La reconstruction :**

- > *un problème plus ou moins complexe suivant le nombre de mesures disponibles*
- > *adaptée à chaque géométrie de mesure !*
- > *Soit M le nombre total de mesures*
- > *Soit P le nombre de pixels à reconstruire*
- > *Si $P < M$ alors algo analytique : rétro-projection filtrée (FBP)*
- > *Si $P > M$ ou mesures manquantes alors algo itératif : pré-calcul d'un Projecteur (influence de chaque pixel dans chaque mesure) qui est par définition un système creux et donc non inversible puis résolution d'un problème inverse mal conditionné*

ART
ML-EM
MAP

Application : la radiographie temps réel



énergie atomique • énergies alternatives

Objectif :

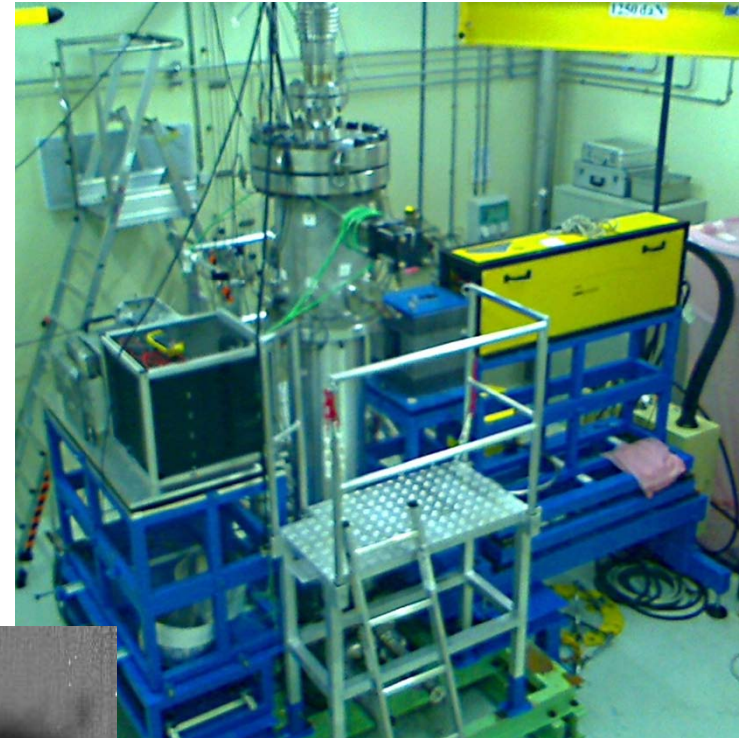
Observation de la phase de pré-mélange
corium-eau avant explosion vapeur
Données d'entrée pour le code MC3D

Moyens expérimentaux :

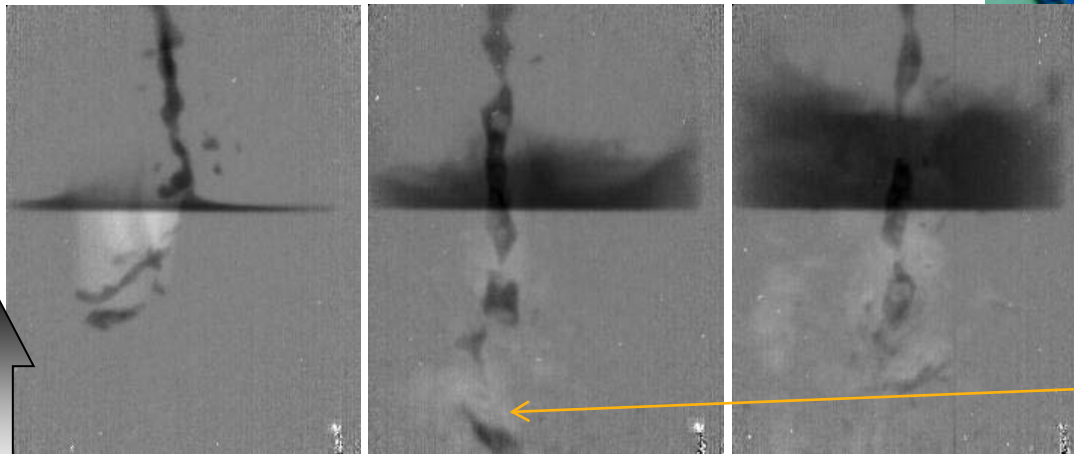
Linac 9 MeV

écran GADOX (scintillateur) + Caméra CCD

Cadence 50 images/s



Images de chute de corium après soustraction de l'image statique



Mise en place de la cuve en fortal
entre le Linac en jaune (à droite) et
la chambre noire du détecteur (à
gauche)

Fragmentation + vapeur

Niveau
d'eau

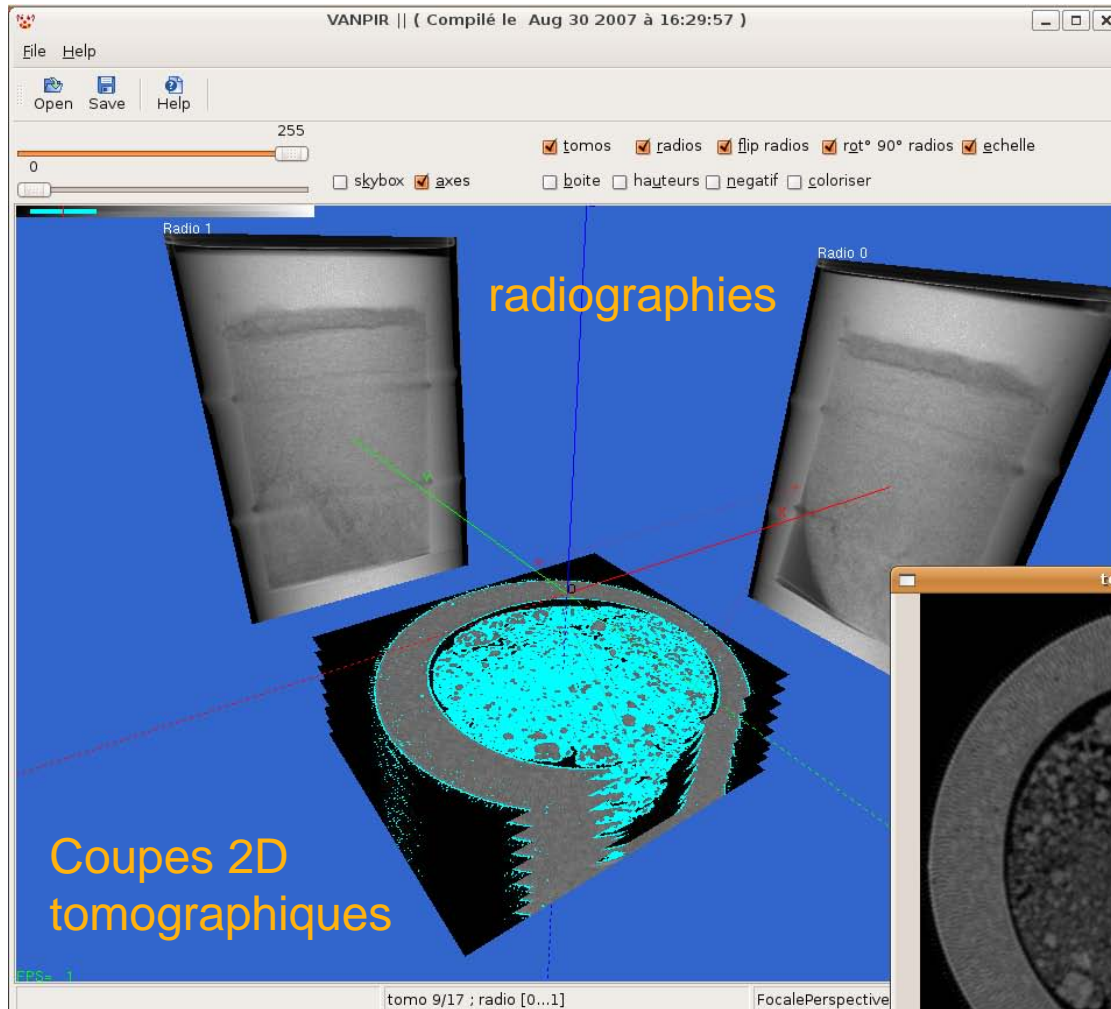
Atténuation

Temps ...

Application : super-contrôle de colis de déchets

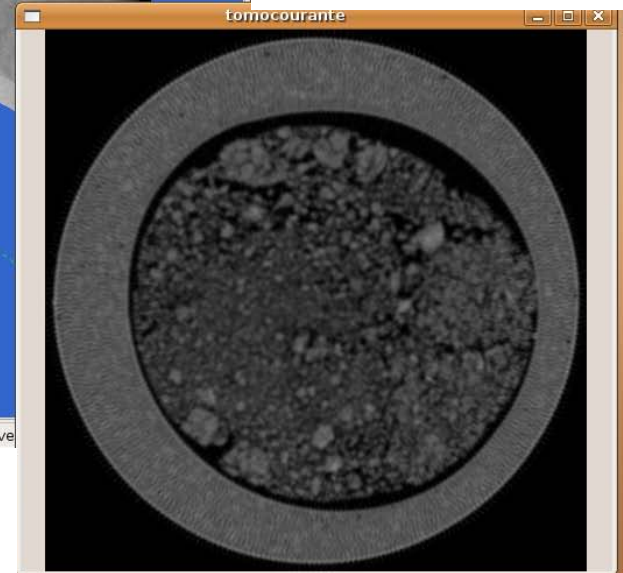


énergie atomique • énergies alternatives



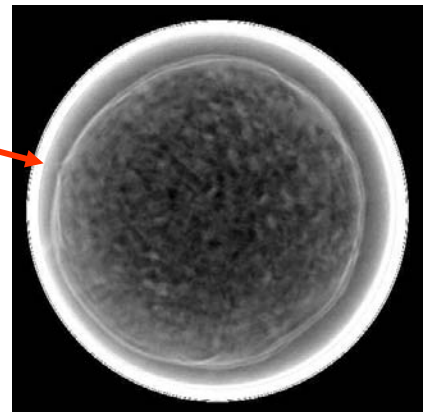
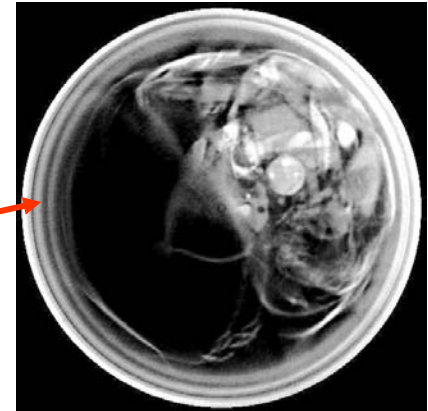
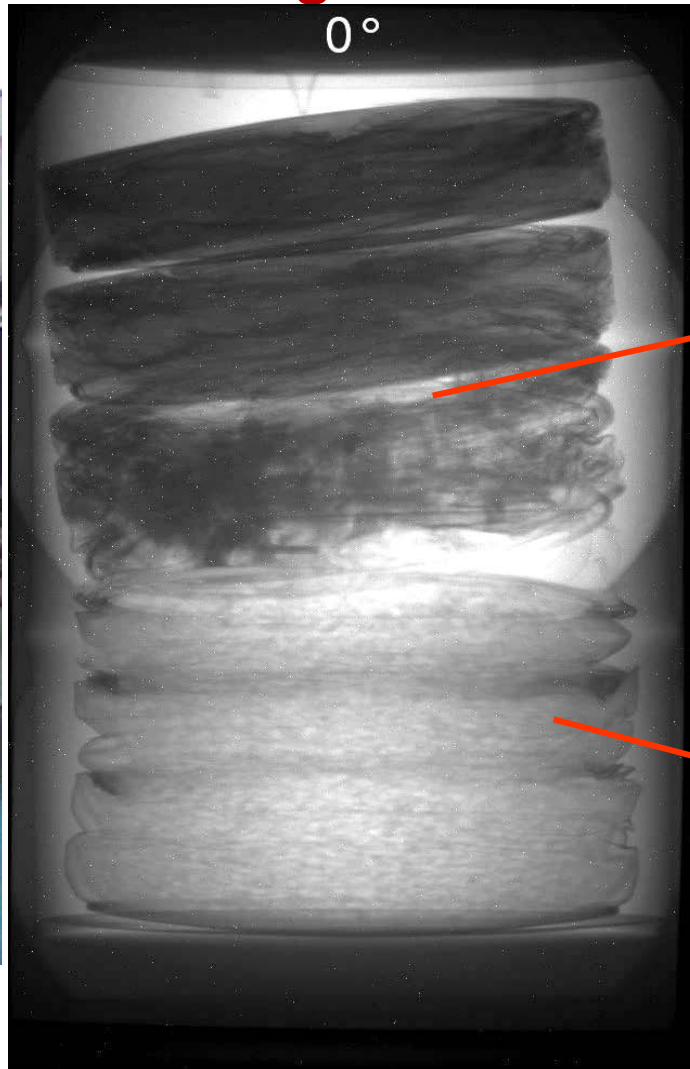
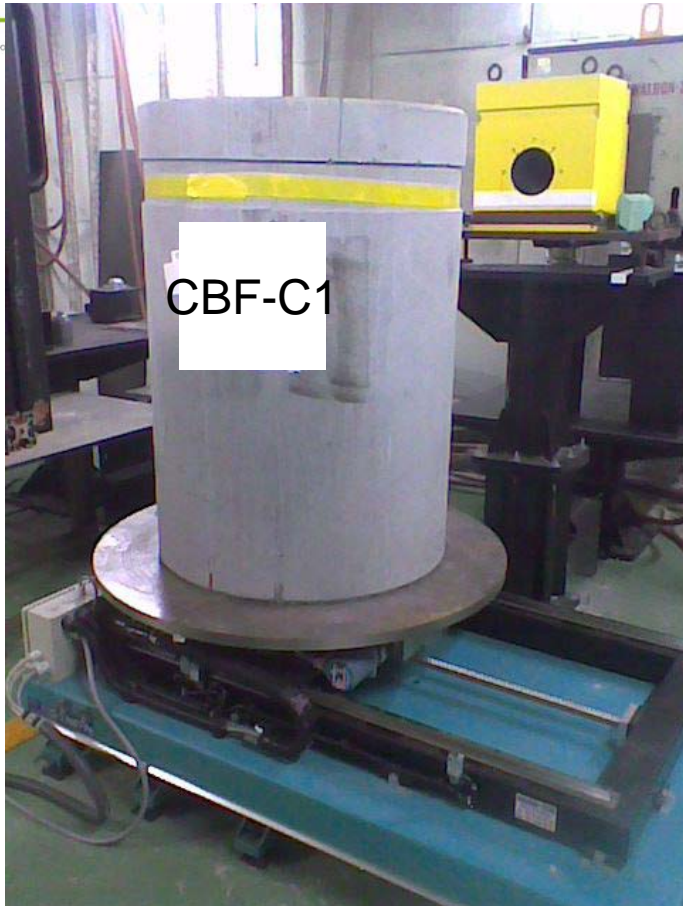
Contrôles non destructifs réalisés pour l'ANDRA à partir d'une source ^{60}Co et détecteurs à scintillation non jointifs

colis de déchets bloqués dans un fut métal de 220 litres (500 kg)
Déchet non lié
volume vide détecté entre le déchets et le liant de blocage



Super-contrôle haute énergie d'un colis de déchets

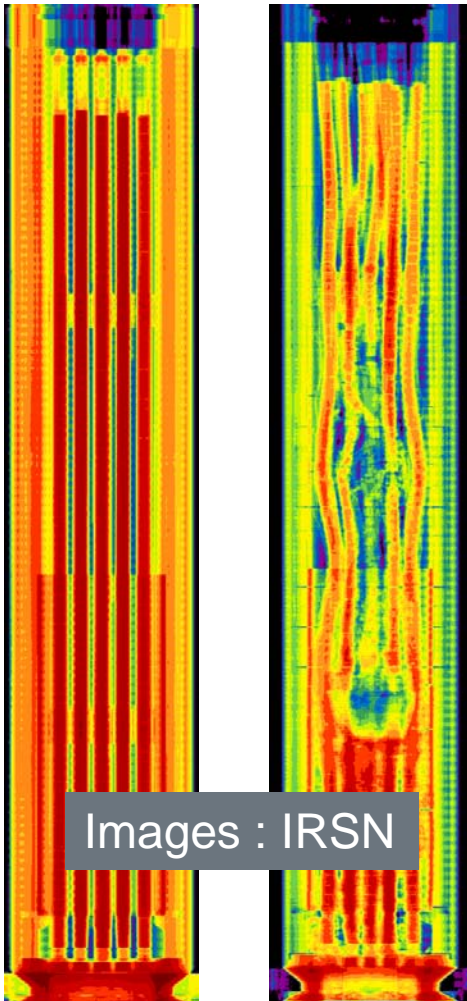
cea



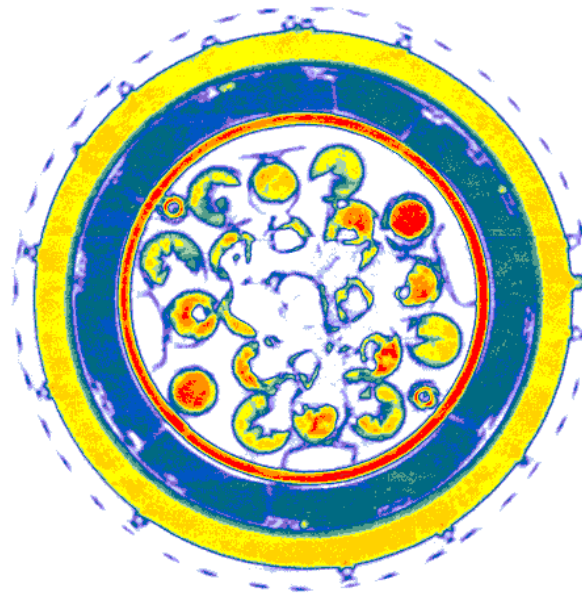
masse : 1,2 tonnes
hauteur = 1200 mm, diamètre = 840 mm

Radiographies et Tomographies grappe combustible

- 480 coupes tomographiques (au moins une tous les 3 mm)
- 20 minutes d'acquisition par coupe
- Résolution géométrique $\simeq 500 \mu\text{m}$
- Résolution en densité $< 1 \text{ g/cm}^3$



Images : IRSN



- Coupes longitudinales
- Animation 3D
- Calcul de masse
- Défilement interactif html

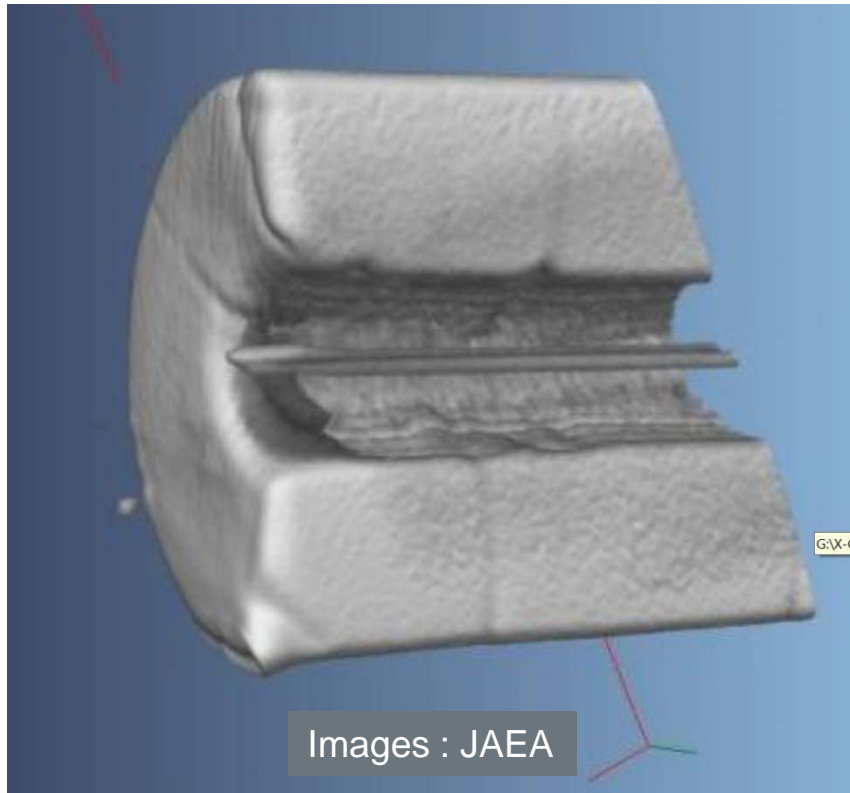
Applications



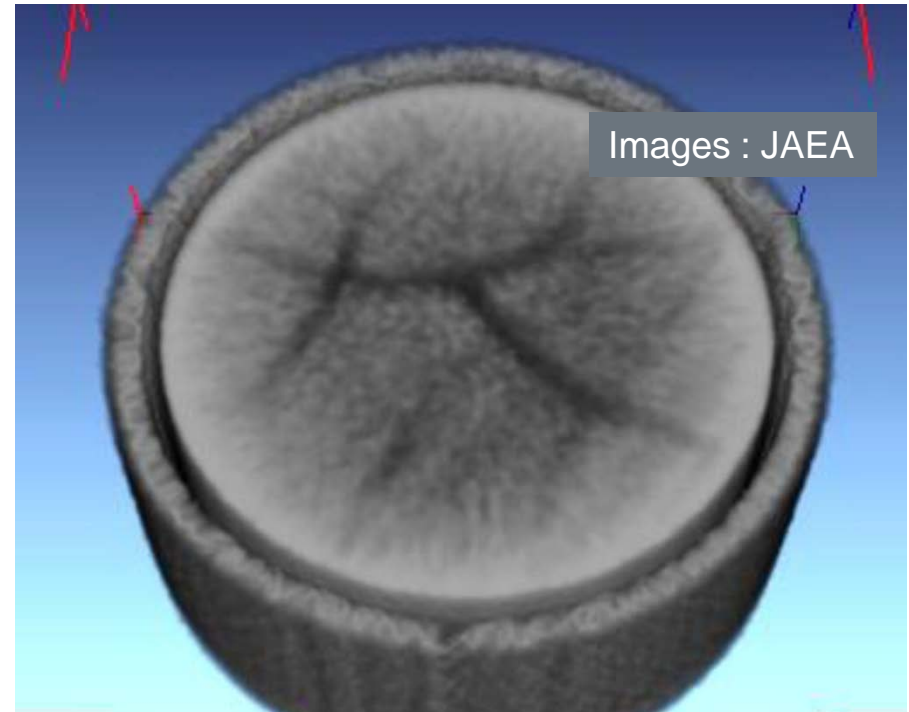
énergie atomique • énergies alternatives

- Reconstructions 3D portions de combustible irradié avec résolution spatiale de l'ordre de $160\ \mu\text{m}$

Trou central et position instrumentation



Fissuration et jeu pastille-gaine



Effet de durcissement de spectre : périphérie plus dense que le centre ! Biais de la tomographie multi-photonique

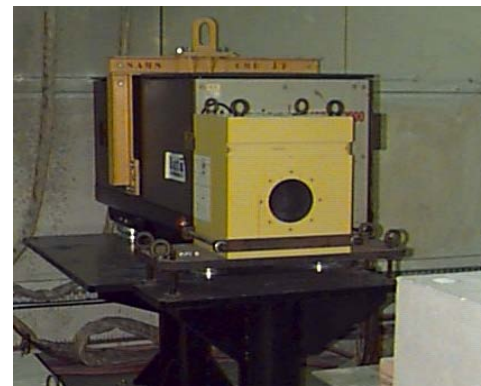
< 100 mm d'acier



< 150 mm d'acier



< 380 mm d'acier

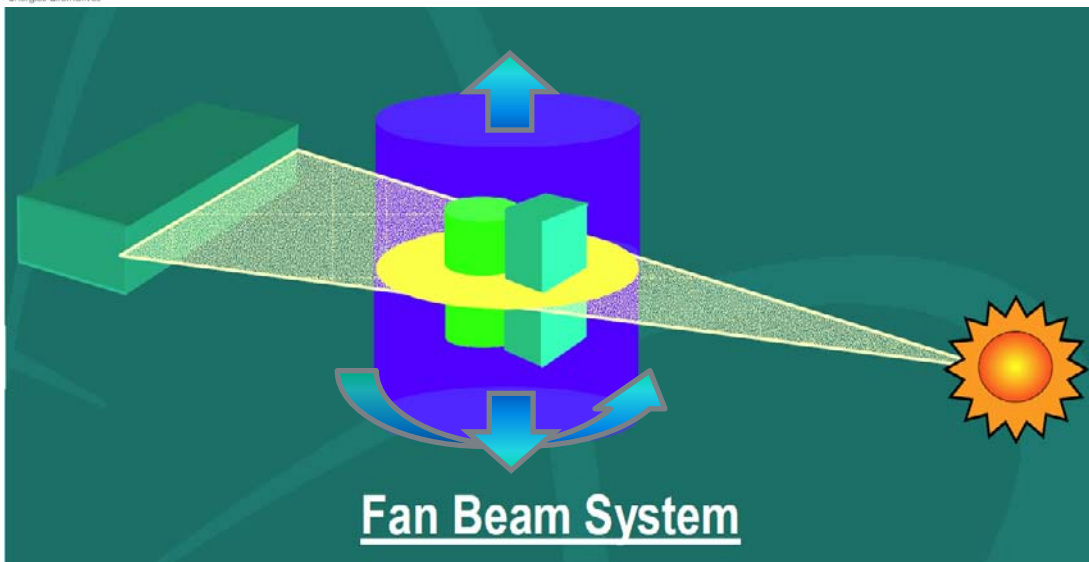


Choix d'une source X ou gamma :

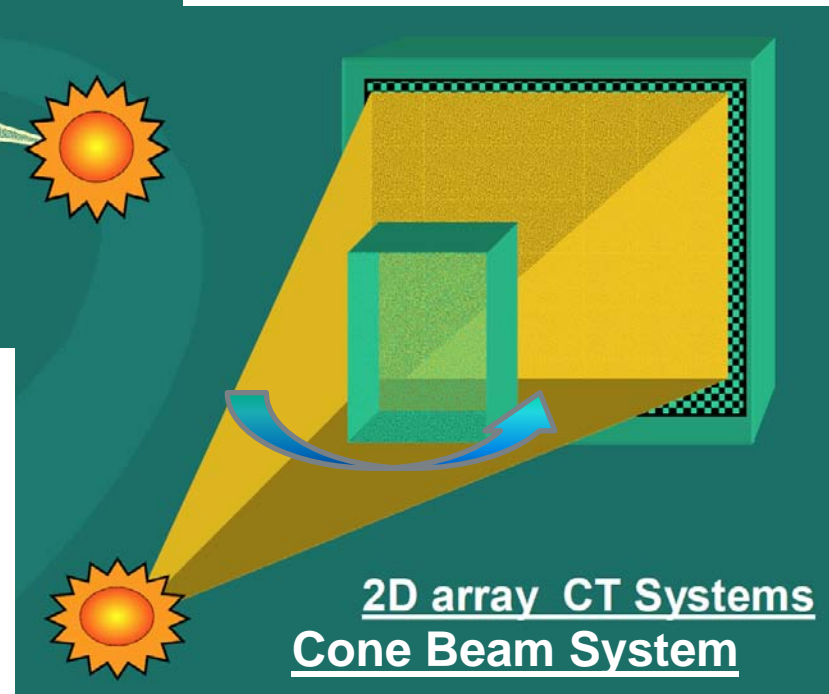
- *Cône utile en degrés*
- *Faisceau isotrope – anisotrope*
- *Flux élevés (10^4 à 10^7 ph.mm⁻².s⁻¹ à 1 m du foyer)*
- *Mono – multi énergie (spectre)*
- *Taille du foyer émissif (qq dizaine de μ m à qq mm)*
- *Refroidissement (eau, huile)*
- *Pouvoir de pénétration (en mm d'acier : ancienne référence aux films)*
- *Débit de dose dans l'axe à 1 m : qq dizaines à plusieurs centaines de Gy.h⁻¹*
- *Conditions d'utilisation : NF C 15-160 (< 600 kV), NF M 62-105 (plusieurs MeV)*
- *Maintenance – contrôles périodiques*

- Géométrie : éventail ou conique ?

Si l'objet est irradiant : géométrie +++



Sur des objets peu irradiants et de moyennes dimensions

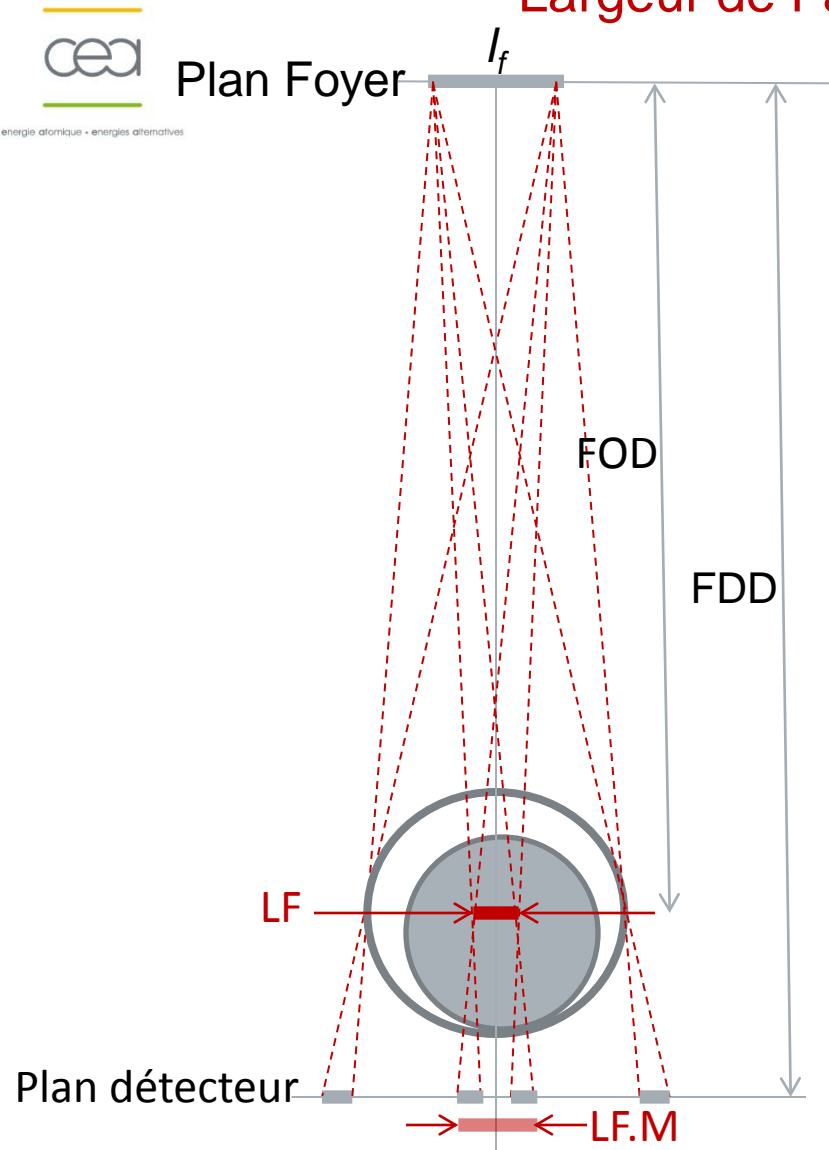


Déplacement de l'objet plutôt que l'ensemble source-détecteur (contrairement aux scanners médicaux)

Objet plus large que le faisceau alors mouvement de balayage parallèle au plan du faisceau

Pré-collimateur pour mettre en forme le faisceau et limiter le rayonnement diffusé

Largeur de Faisceau et Flou géométrique



$$M = \frac{FDD}{FOD}$$

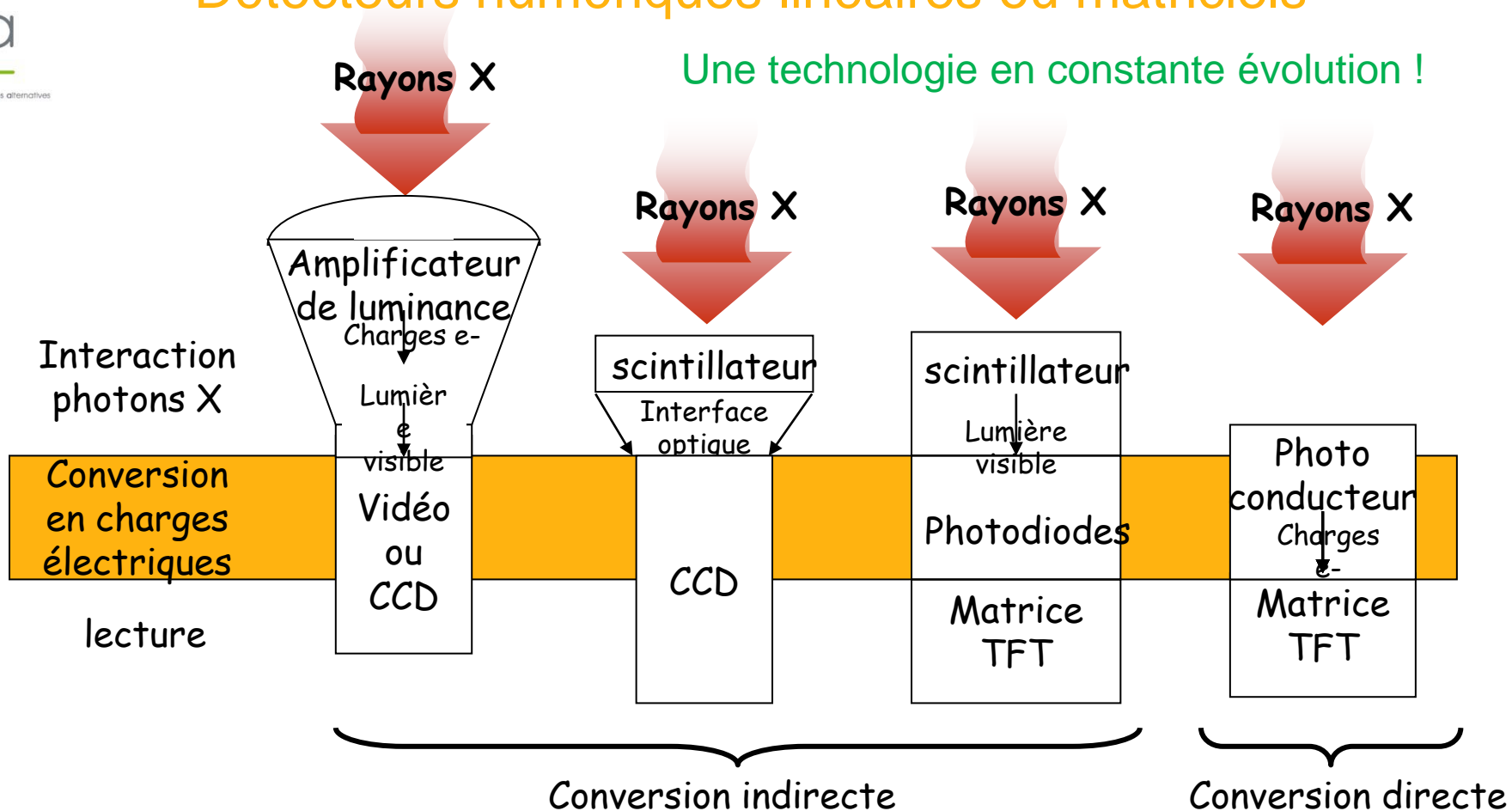
$$LF = \sqrt{\left[l_f \cdot \frac{(FDD - FOD)}{FDD} \right]^2 + \left[l_d \cdot \frac{FOD}{FDD} \right]^2}$$

$$\text{flou} \approx 2.LF$$

- > M : facteur de grandissement ~ 1
- > LF : largeur du faisceau au centre de l'objet
- > La taille du foyer induit une ombre sur le plan détecteur
- > Il ne sert à rien d'avoir des l_d pixels $<$ l'ombre portée !

Détecteurs numériques linéaires ou matriciels

Une technologie en constante évolution !



- nombre de pixels, surface active, DQE, FTM ...
- Choix souvent un compromis (source X, résolution, temps, ...)

- **Caractéristiques génériques**

Extrait du document COFREND « Radiographie numérique : description et guide d'utilisation »

Caractéristiques / Famille	IIR	Écran + CCD	Écran plat indirect	Écran plat direct
Résolution spatiale (μm)	125 à 350	50 à 500	50 à 1000	50 à 250
Taille du champ matriciel (mm)	$f < 300$	illimité	$< 400 \times 400$	$< 400 \times 400$
Taille du champ linéaire (mm)			200 – 1500	200 – 1000
Dynamique utile (bits)	< 10	< 10	< 12	< 12
Encombrement	élevé	élevé	Faible à moyen	Faible à moyen
Taux de transfert (image/s)	1 à 500	50	30	10
Spécificité	sensibilité	adaptabilité	résolution dynamique	Résolution dynamique
Temps réel	Oui	Oui	Oui	Oui

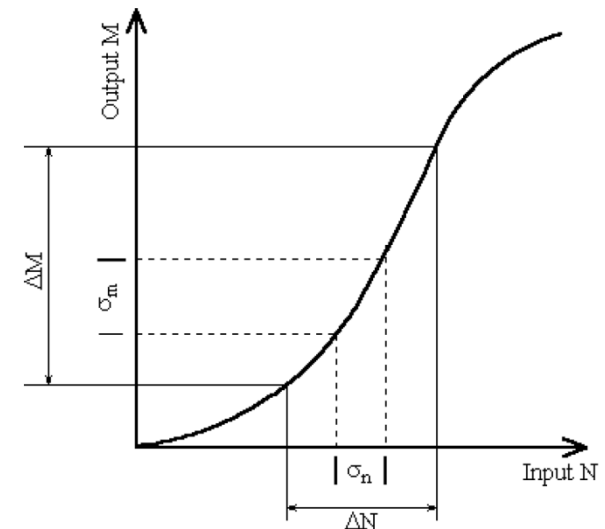
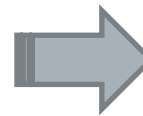
- **Protections complémentaires à haute énergie (Pb,W)**
- **Traitement du signal spécifique à chaque détecteur**

Caractéristiques des détecteurs numériques

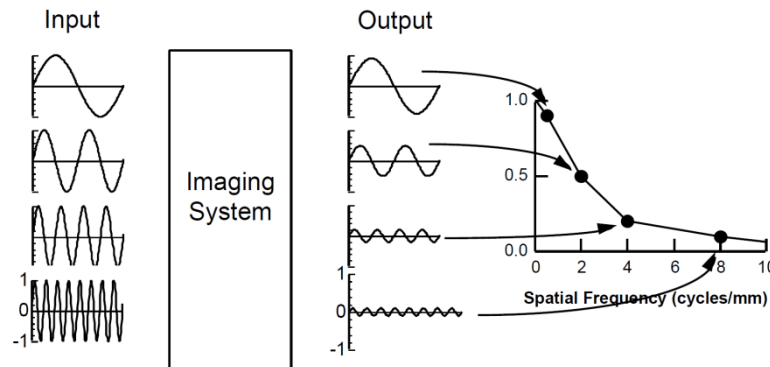
- DQE : Detection Quantum Efficiency**

$$DQE = \frac{SNR_{out}^2}{SNR_{in}^2} = \frac{(\Delta M)^2 / \sigma_m^2}{(\Delta N)^2 / \sigma_n^2}$$

Fonction combinant le bruit et le contraste
Dégradation du RSB par rapport au bruit
photonique en entrée

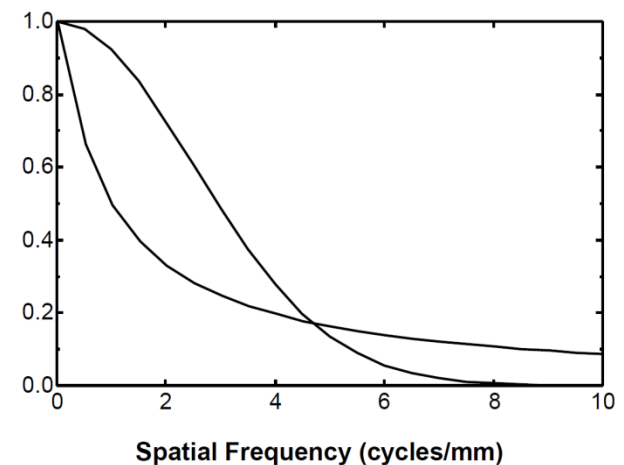
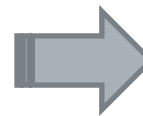


- MTF(ω) : Modulation Transfer Function**

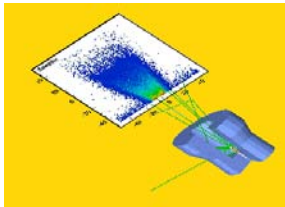


measures change in the amplitude of sine waves

Dégradation de l'amplitude du signal en fonction
de son contenu fréquentiel



- **Banc mécanique porte-échantillon**
 - > *Compatibilité par rapport à la taille et à la masse de l'échantillon*
 - > *Positionner l'échantillon de manière suffisamment précise vis-à-vis de la résolution spatiale recherchée (réduire le flou de positionnement ou synchroniser la prise de mesure)*
 - > *Pour chaque mesure, connaître la position exacte de l'échantillon entre la source et le détecteur*
 - > *Deux à trois degrés de liberté en fonction de la géométrie*
- **Cabine/casemate : protection biologique**
 - > *Zonage en périphérie détermine le débit de dose admissible*
 - > *Calculs de dimensionnement spécifiques à chaque implantation*
 - > *Code de transport Monte Carlo si nécessaire*
 - > *Passage et longueur de câbles, vitesse de transfert des mesures*
 - > *Boucle de sécurité validée par des contrôles périodiques*
- **Logiciels**
 - > *Pour le contrôle-commande et l'acquisition des mesures*
 - > *Pour la reconstruction et l'analyse des images*



- Codes de transports Monte Carlo (MCNPX, GEANT4) :

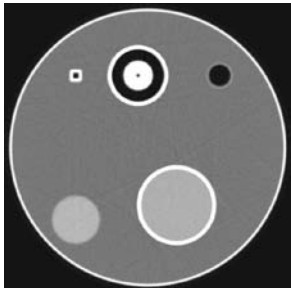
- > Rayonnement de freinage
- > Dépôt d'énergie, transport de lumière
- > Dimensionnement des fenêtres de collimation
- > Influence des rayonnements gamma (émission) et diffusé
- > Calculs de RP

Geant 4

MCNPX

- Code d'atténuation en 3D : MODHERATO

- > Définition de fantômes 3D
- > modélisation du durcissement de spectre
- > Calculs d'atténuation sur fantômes suivant différentes géométries et trajectoires (radiographies, sinogrammes)
- > Prise en compte du bruit photonique
- > Prise en compte du flou géométrique
- > Outils de reconstruction
- > Correction du durcissement de spectre sur sinogramme
- > Calculs d'images $Z(x,y,z)$ et densité (x,y,z) en double énergie



- **Objectif**

- > *Mesures des photons émergents : spectrométrie gamma segmentée*
- > *Localiser les émetteurs gammas et quantifier leur activité*
- > *S'apparente à la PET (Positron Emission Tomography) et à la SPECT (Single Photon Emission Tomography)*

- **Sur quel type d'objet**

- > *Les colis de déchets plus ou moins irradiants*
- > *Le crayon combustible irradié*
- > *Une grappe, étui, assemblage de crayons*
- > *Un dispositif d'essai après irradiation (RJH)*

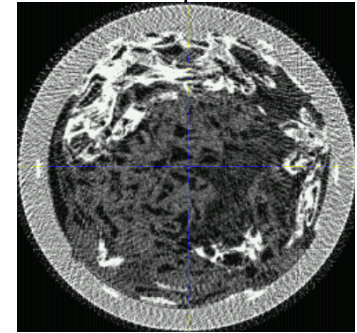
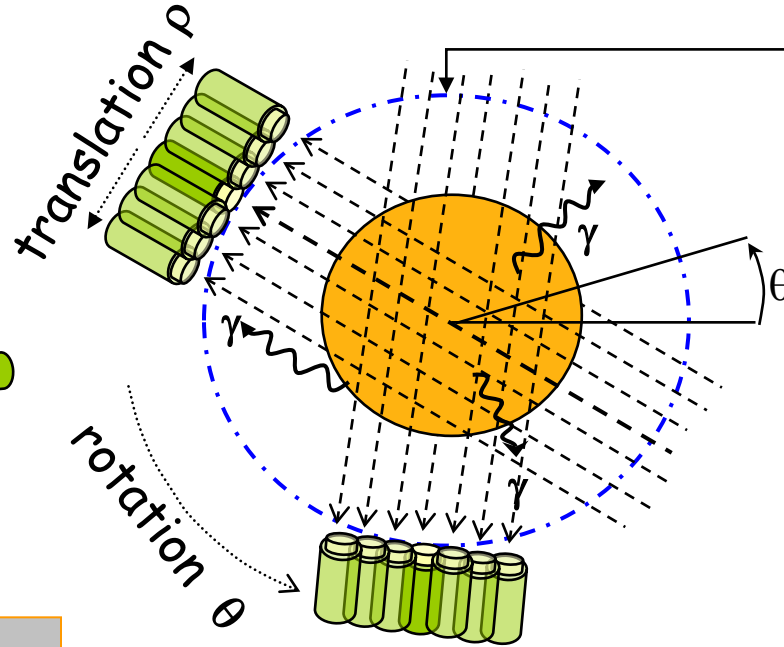
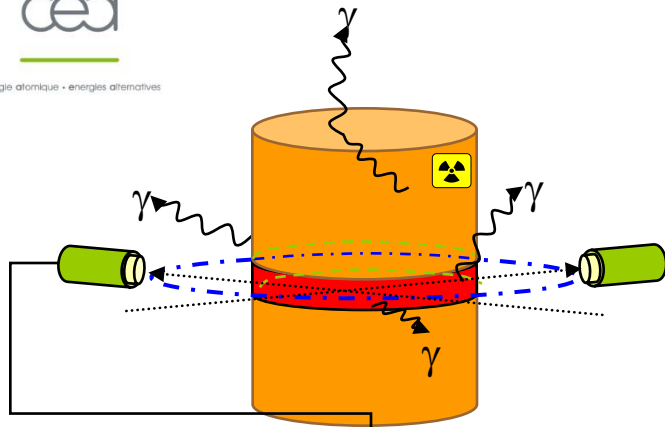
- **Mise en œuvre :**

- > *Un ou plusieurs détecteurs HpGE avec collimation*
- > *Gamma caméra à ouverture codée (caméra ANGER)*
- > *Détecteur HpGe télescope avec collimation électronique (thèse)*
- > *Logiciel de spectrométrie, traitement des spectres, logiciel de reconstruction adapté sur hardware musclé !*

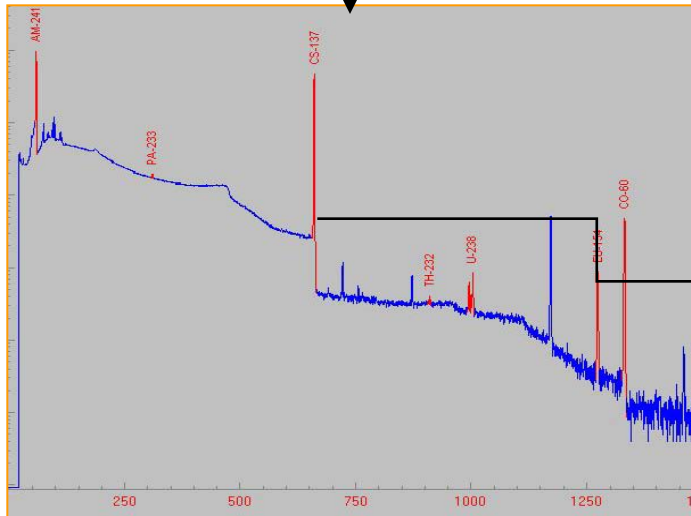
Principe



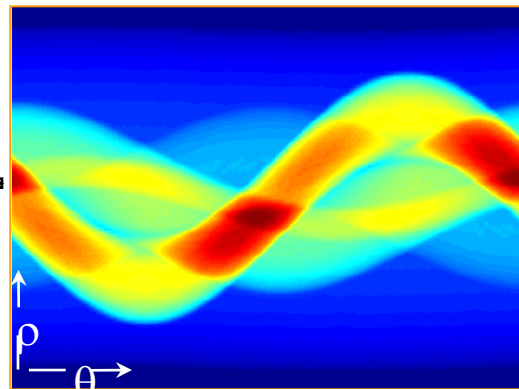
energie atomique • energies alternatives



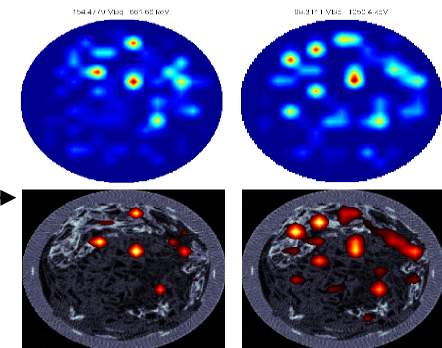
Attenuation MAP



HPGe SPECTRUM



SINOGRAM FOR SPECIFIED RN



ACTIVITY RECONSTRUCTION

Reconstruction en 2D



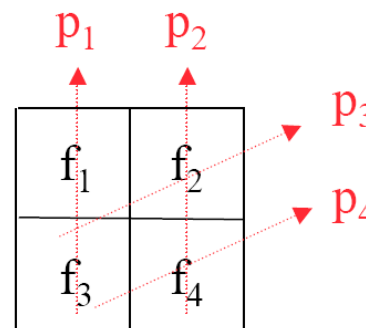
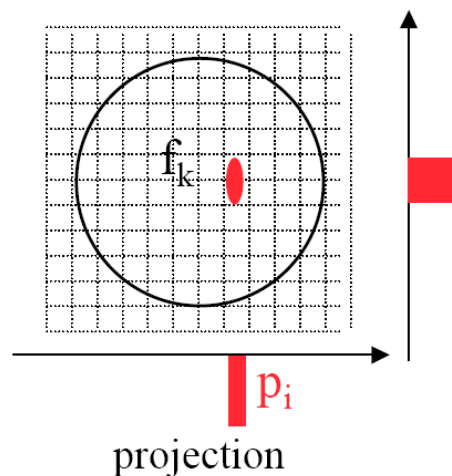
- Soit \mathbf{p} les mesures acquises autour d'une coupe (sinogramme)
- Soit \mathbf{R} la matrice de projection (projecteur) ou influence de chaque pixel dans chaque mesure
- On cherche à estimer \mathbf{f} ou l'activité présente dans une coupe

Un exemple :

\mathbf{f} : 12^2 pixels

\mathbf{p} : 12^2 mesures
alors

\mathbf{R} : 144^2 éléments



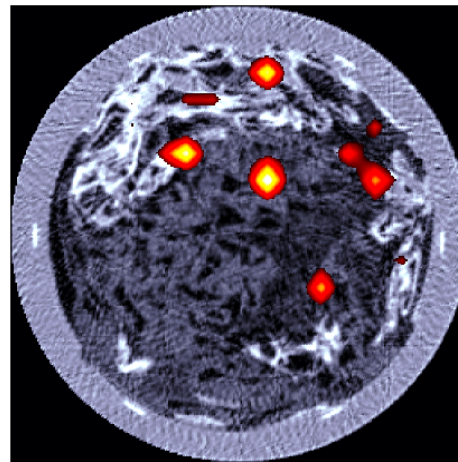
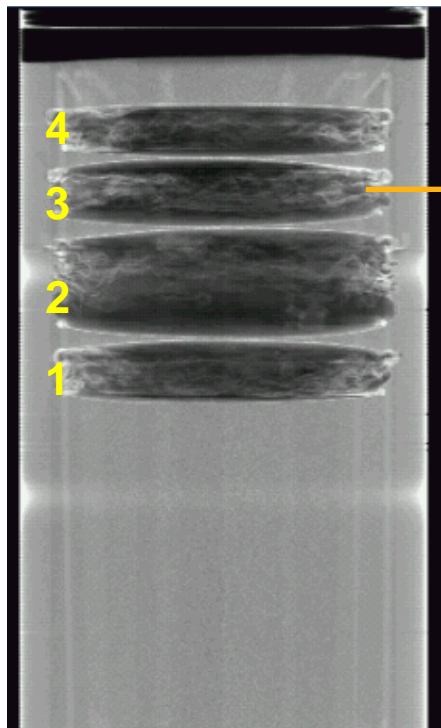
$$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{f}$$

$$\begin{aligned} p_1 &= r_{11} f_1 + r_{12} f_2 + r_{13} f_3 + r_{14} f_4 \\ p_2 &= r_{21} f_1 + r_{22} f_2 + r_{23} f_3 + r_{24} f_4 \\ p_3 &= r_{31} f_1 + r_{32} f_2 + r_{33} f_3 + r_{34} f_4 \\ p_4 &= r_{41} f_1 + r_{42} f_2 + r_{43} f_3 + r_{44} f_4 \end{aligned}$$

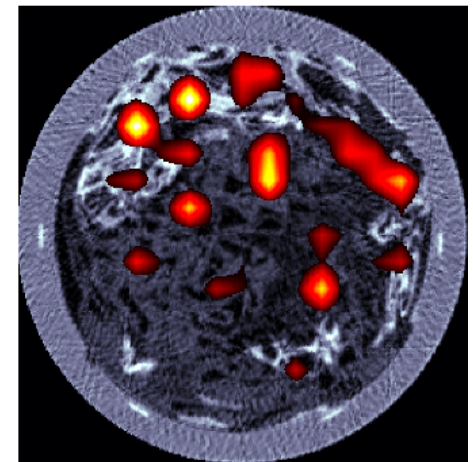
$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{41} & \cdots & r_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

Déterminer \mathbf{f} connaissant \mathbf{p} et \mathbf{R} : problème inverse !!!

- Contrôle par radiographie et tomographie dans un colis hétérogène : localisation et centrage des galettes, homogénéité du liant de blocage, hauteur remplissage, épaisseur de liant, densités moyennes locales
- Caractérisation radioactive de deux isotopes au sein de la galette n° 3 pour localisation et quantification



^{137}Cs : 662 keV



^{106}Ru : 1050 keV

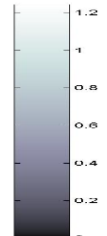
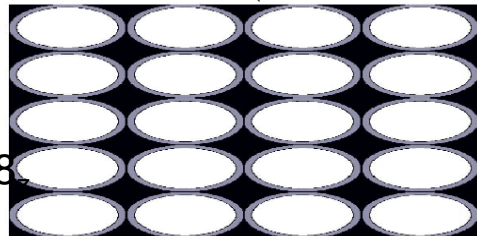
Superposition des tomographies active et passive :
Tomographie active (65536 pixels) : échelle de gris
Tomographie passive (289 pixels) : échelle de couleurs

- **Détection spectrométrique :**
 - > *Semi-conducteur HpGe pour leur résolution énergétique*
 - > *Refroidissement*
 - > *Plusieurs voies en parallèle ou matrice de pixels*
- **Banc mécanique multi-axes**
- **Contrôle-commande**
 - > *Pilotage des axes et retour de positions*
 - > *Acquisition séquentielle des spectres (10^2 à 10^3 spectres par tranche) en mode 2D*
 - > *Acquisition en mode liste des événements gamma en 3D*
- **Logiciel de traitement**
 - > *Dépouillement de spectres*
 - > *Mise en forme des vecteurs de mesures*
 - > *Calcul du projecteur sans ou avec couplage de données d'atténuation*
 - > *Reconstructions le + souvent itératives (ML-EM)*
 - > *Analyse quantitative par isotope*

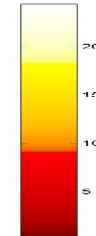
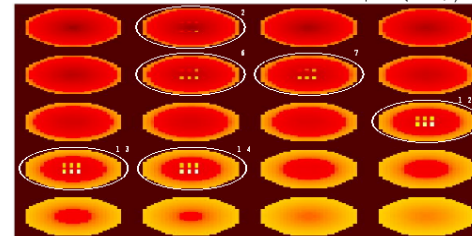
- Données d'entrée : pastille UO_2 dans sa gaine Zr_4 , isotope ^{137}Cs

$M = 45_\theta \times 25_u \times 18_\phi$
(pas 0,2 mm)

Atténuation (z-invariante)

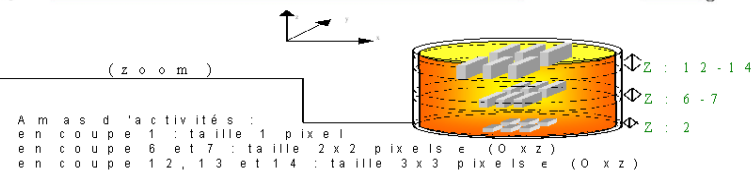


Activité # $\rho(x, y, z)$



$$A(x, y, z) = \frac{9}{R_{obj}} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + 1}$$

gas z
Zr₄, e = 0.57 mm
UO₂, R = 4.1 mm
activité A (ρ)

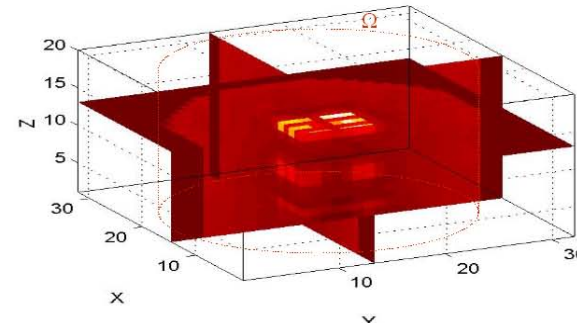
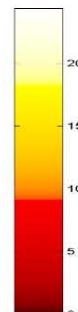
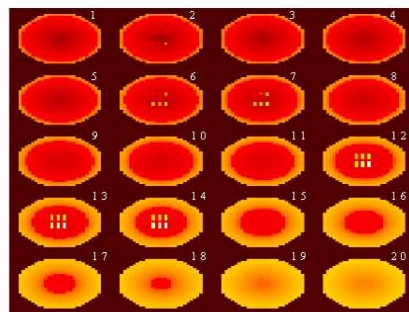


- Données de sortie : 20 coupes successives de 32 x 32 pixels

Reconstruction ML-EM



Résolution spatiale
~ 250 μm



Conclusion

- **Imagerie par transmission**

- > *Contrôle non destructif : radiographie souvent suffisante*
- > *Caractérisation physico-chimique : tomographie quantitative*
- > *Couplage avec les méthodes de mesures nucléaires (interrogation photonique ou neutronique, spectrométrie gamma segmentée) sur objets hétérogènes (extraction d'un modèle CAO volumique de l'objet)*
- > *Tendance à privilégier une géométrie fan beam sur objets irradiants, augmente les temps d'acquisition*
- > *Objets denses et/ou grande longueur (crayon combustible) et/ou volumineux (colis de déchets)*

- **Grande diversité d'applications dans le cycle du combustible**

- > *Fab., tests endommagements, sûreté, R&D combustible et matériaux (RJH), contrôle, caractérisation et R&D gestion des déchets*

- **Mise en œuvre :**

- > *accessibilité autour de l'objet*
- > *cabine ou casemate d'irradiation,*
- > *coût d'investissement élevé pour la très haute énergie*
- > *temps d'acquisition qui peuvent être longs ... compromis à trouver*

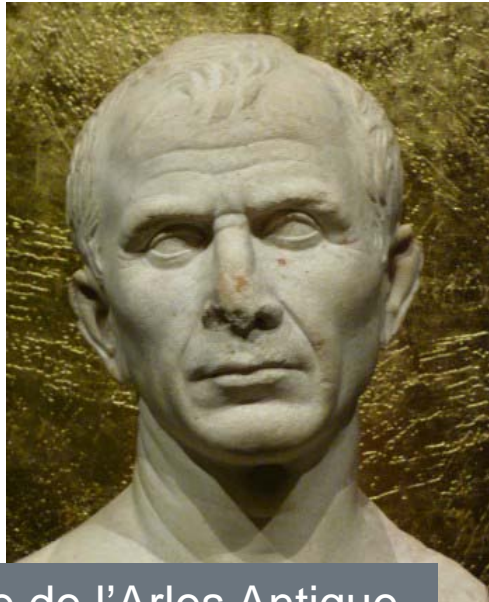
- **Imagerie d'émission multi-photonique**
 - > *Complexité des spectres sur combustible*
 - > *Auto-atténuation dans l'objet élevée*
 - > *Temps de mesures important au prorata du nombre de voies*
 - > *Bruit photonique élevé dans les sinogrammes (mesures)*
 - > *Processus de reconstruction particulier prenant en compte le bruit et un a priori afin d'accélérer la convergence*
 - > *Fortes compétences en mathématiques appliquées et résolution de problème inverse*
 - > *Problématique liée à la fabrication d'étalons représentatifs*
 - > *Nécessité de disposer des outils de simulations ad hoc (GEANT4, GATE, et outils propriétaires pour la reconstruction)*
- **Peu d'applications dans le cycle du combustible et donc compétences en voie de disparition ...**
- **Mise en œuvre**
 - > *Une seule plate-forme en sommeil à Cadarache : TEMISEC pour les colis bloqués de 220 litres*

Du contrôle non destructif au service de l'archéologie



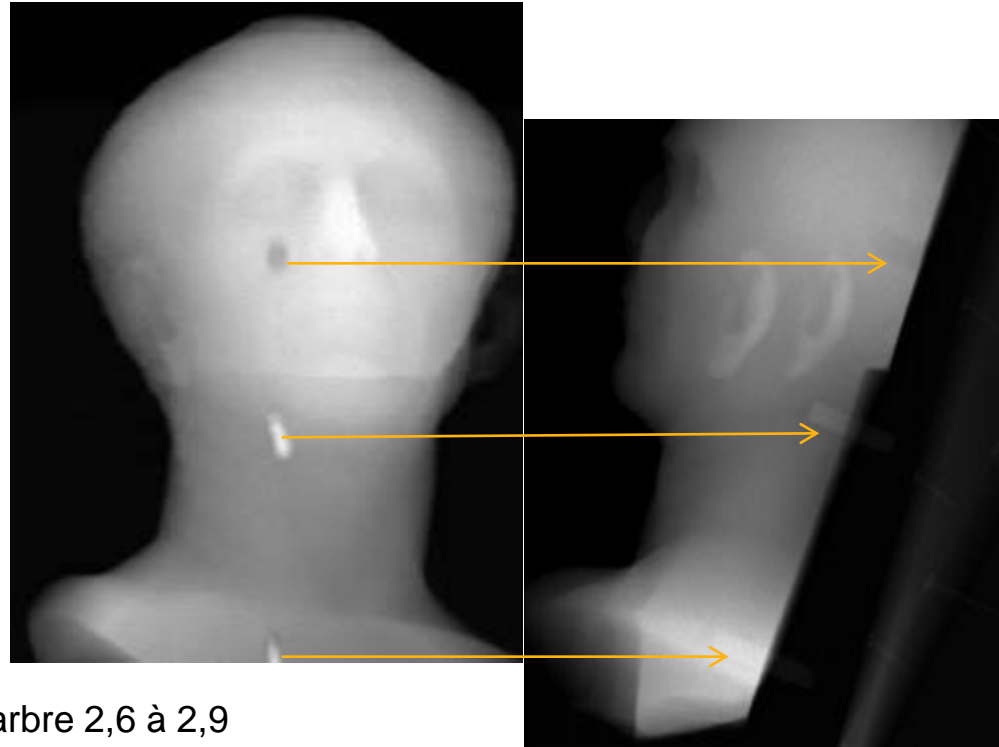
énergie atomique • énergies alternatives

En juillet 2008 : examen non destructif du buste de César retrouvé dans le Rhône afin d'estimer la profondeur des inserts métalliques et une éventuelle fissuration du marbre à l'aplomb des inserts métalliques de jonction ...



Musée de l'Arles Antique

Buste taille réelle, densité du marbre 2,6 à 2,9



En vous remerciant de votre attention