

# DÉTECTION CdZnTe POUR L'IMAGERIE X HAUTE ÉNERGIE

## CdZnTe DETECTOR FOR HIGH ENERGY X-RAY IMAGING

V. MOULIN – CEA-LETI / DTBS, CEA Grenoble  
17 rue des Martyrs – 38054 Grenoble Cedex 9  
vincent.moulin@cea.fr

J.-L. PETTIER – CEA-DEN / DTN, CEA Cadarache  
CEA Cadarache Cedex 13108 – ST PAUL LEZ DURANCE  
jean-luc.pettier@cea.fr

### Résumé

Les caractéristiques du semiconducteur CdZnTe en font un matériau de choix pour la réalisation de détecteurs pour les applications d'imagerie à rayons X dites "Hautes Energies" (plusieurs MeV).

Les tomographies réalisées à partir d'un pluridétecteur CdZnTe montrent la sensibilité offerte par ce matériau. La réalisation d'une barrette permettrait de disposer de performances équivalentes déclinées dans des géométries d'acquisitions classiques : radiographie par défilement, tomographie fan beam. Les outils de simulation permettent d'illustrer les capacités de tels systèmes. Le CdZnTe peut également être mis en œuvre sous forme de détecteur matriciel. Si le pouvoir d'arrêt est limité dans cette configuration, elle permet d'obtenir des résolutions spatiales submillimétriques. Mais un verrou technologique subsiste néanmoins pour la réalisation de détecteurs de grande surface. Le CdZnTe permet en outre de réaliser une mesure synchronisée sur chaque flash X de la source, d'où un potentiel important pour des applications de radiosopies sur process dynamique.

Cet article montre les possibilités du CdZnTe à partir d'exemples expérimentaux ou issus de la simulation.

### Abstract

*Thanks to its characteristics, CdZnTe semiconductor is a promising material for detector used in High Energy (HE, several MeV) X-ray imaging applications.*

*Tomographic images computed with CdZnTe multi-detector measurements show sensitivity of this material. A Linear Detector Array (LDA) would provide similar performances for conventional acquisition geometries: translational radiography, fan beam tomography. Simulation tools help us to illustrate the capabilities of these devices. CdZnTe can also be implemented as bi-dimensional detector. If stopping power is restricted in this case, we can reach a sub-millimetre spatial resolution. But a technologic bolt still exists for large area detector realization. With CdZnTe detector, measurement could be synchronised with X-Ray source pulses so that gives some strong capabilities for radiosopic applications on dynamic processes.*

*This article analyzes CdZnTe possibilities from experimental and simulated examples.*

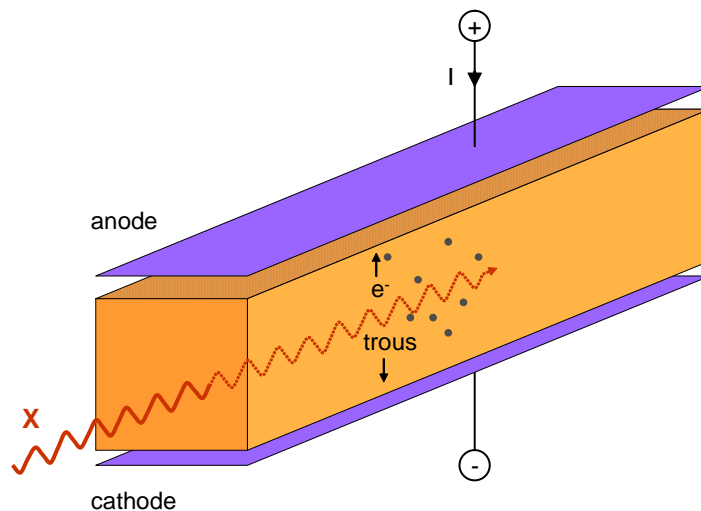
## LE CONTEXTE "HAUTE ÉNERGIE" (HE)

Les systèmes "Hautes Energie" (HE) – parfois appelés aussi "Très Haute Energie" (THE) – font appel à un rayonnement X de plusieurs MeV délivré par un accélérateur linéaire (LINAC). Ce rayonnement très pénétrant permet de traverser des objets particulièrement volumineux et denses. Le fort débit de dose de la source permet également de disposer d'un signal important, d'où des durées d'intégration généralement assez faibles. Il est en outre possible de réaliser dans certaines conditions des examens sur des objets irradiants.

Un exemple typique du domaine d'application de ces techniques HE est l'examen des colis de déchets nucléaires [1, 2] : de grandes dimensions (plus d'un mètre de diamètre), constitués de matériaux denses (béton, colis compactés, d'où une densité moyenne comprise habituellement entre 1,5 et 2). Qui plus est, ces colis sont potentiellement irradiants. Mais beaucoup d'autres applications sont possibles, en particulier dès que l'atténuation des objets devient trop élevée pour les techniques à rayons X classiques de 400 ou 450 kV.

## LA DÉTECTION CdZnTe

Le CdZnTe est un matériau semi-conducteur dans lequel l'interaction rayonnement / matière génère des paires électrons – trous. La polarisation du matériau par deux électrodes permet de collecter ces charges (cf. figure 1), autrement dit de disposer d'un courant électrique proportionnel à l'intensité du rayonnement X incident. Nous sommes donc dans un cas de conversion directe  $X \rightarrow$  courant électrique, alors que la plupart des systèmes utilisent un matériau scintillant et sont construits sur le principe  $X \rightarrow$  lumière visible  $\rightarrow$  courant électrique.

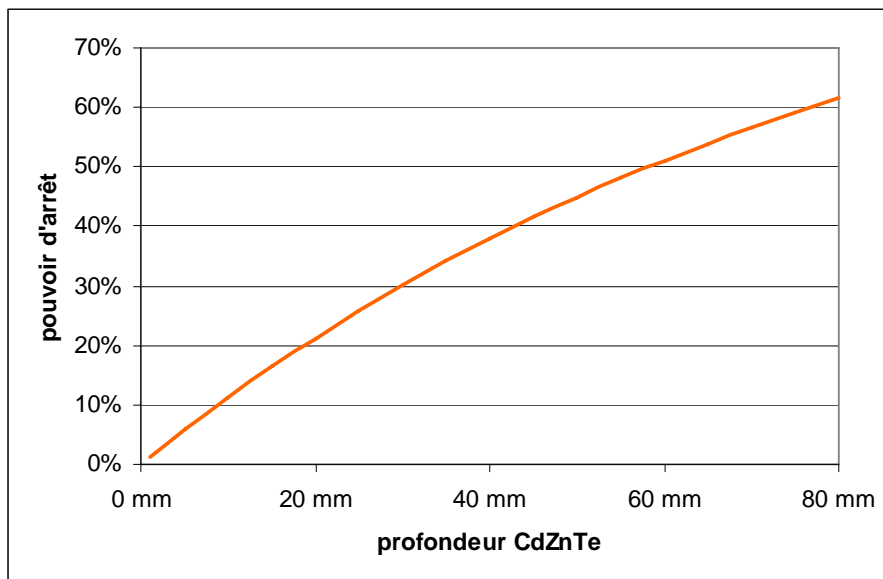


**Figure 1** : principe du détecteur semi-conducteur CdZnTe

Si le rayonnement est très pénétrant pour l'objet examiné, il l'est également pour le détecteur employé. Le "pouvoir d'arrêt" du détecteur (proportion de l'énergie absorbée dans le détecteur par rapport à l'énergie totale du rayonnement incident) diminue sensiblement avec l'énergie et ce paramètre doit donc être privilégié dans le cas des applications HE. L'utilisation d'un matériau dense permet donc d'augmenter le pouvoir d'arrêt. Dans le cas du CdZnTe, cette densité est de  $5,9 \text{ g/cm}^3$ .

Différentes géométries de mise en œuvre du CdZnTe sont envisageables ... et à adapter à chaque problématique. Mais comme le montre la figure 1, il est possible de réaliser des volumes de détection présentant une petite surface d'entrée (surface qui définit la résolution

spatiale du système) et une grande profondeur, d'où un pouvoir d'arrêt important. La figure 2 montre l'évolution du pouvoir d'arrêt en fonction de la profondeur du CdTe (calcul théorique à partir du coefficient d'absorption en énergie du CdZnTe [3]).



**Figure 2 :** Pouvoir d'arrêt à 3 MeV en fonction de la profondeur de CdZnTe

Ces caractéristiques (fort pouvoir d'arrêt + conversion directe) donnent une très bonne sensibilité du détecteur, capable de réagir à un photon HE unique. Autrement dit, la limitation du système correspond au rapport signal sur bruit photonique, imposé directement par les lois de l'émission et de l'interaction photonique ; le bruit électronique – sous réserve bien sûr d'une électronique adaptée – devient négligeable.

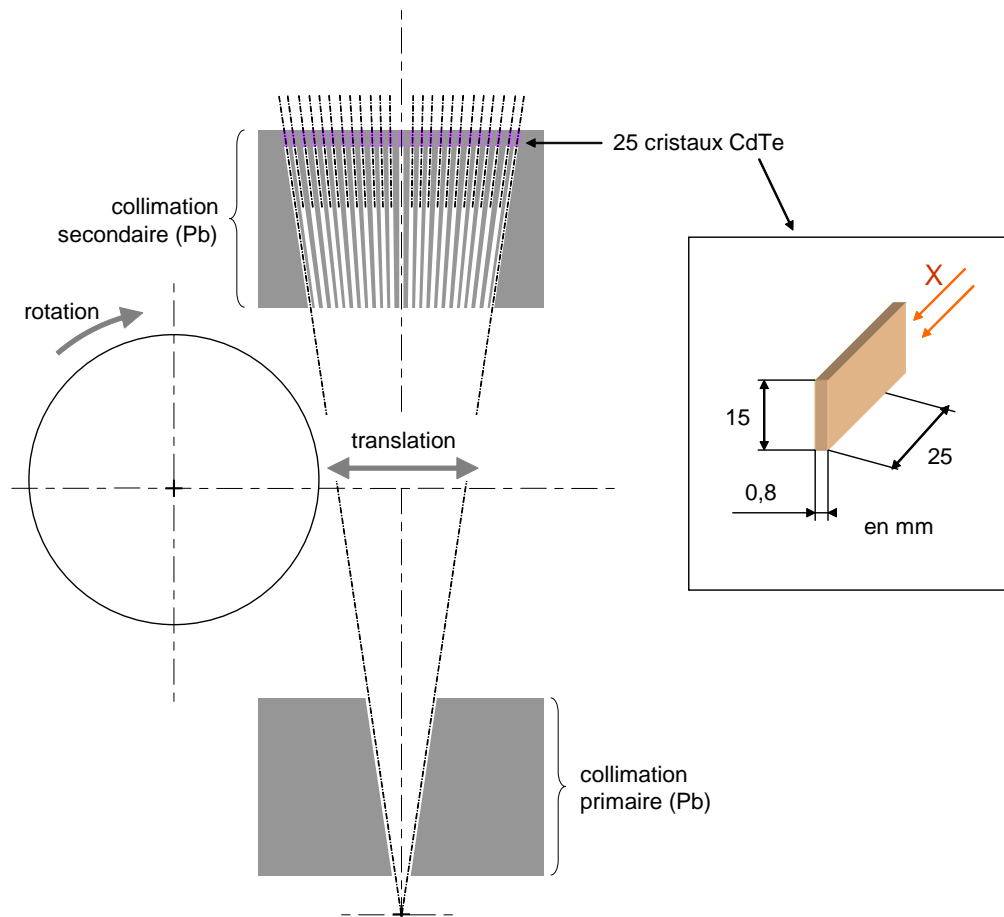
Les propriétés du matériau CdTe permettent également de couvrir une grande dynamique de mesure, de l'ordre de 5 à 7 décades. Une telle dynamique ne peut pas être supportée par une électronique traditionnelle, et un système à double gain d'amplification doit généralement être mis en œuvre pour exploiter pleinement la dynamique offerte.

Les propriétés dynamiques du CdTe et sa sensibilité permettent de synchroniser l'électronique d'acquisition sur le tir de l'accélérateur. La mesure ne concerne qu'un seul flash X, d'une durée de 5  $\mu$ s environ. Cette caractéristique est très intéressante dans le cas d'imagerie dynamique sur un process en mouvement, ou encore en cas d'examen par défilement (radiographie ou tomographie) : la brièveté du flash X permet d'obtenir une image figée, sans flou de mouvement. Les électroniques réalisées fonctionnent généralement selon un mode de double intégration : la première a lieu juste avant le tir et mesure le niveau du courant résiduel ; la seconde est synchrone avec le tir. La première intégration est ensuite soustraite à la seconde.

## **TOMOGAPHE PAR TRANSLATION - ROTATION**

Le CEA/LETI a développé un système de détection tomographique en géométrie translation – rotation [4]. Cette ancienne géométrie d'acquisition conserve son intérêt dans le cas de la haute énergie car elle permet de réaliser des acquisitions sur des objets de diamètre important, plus large que l'angle d'émission d'un LINAC. Le faible angle d'émission X d'un LINAC constitue en effet le facteur limitatif pour les géométries fan beam et cone beam sur des objets volumineux.

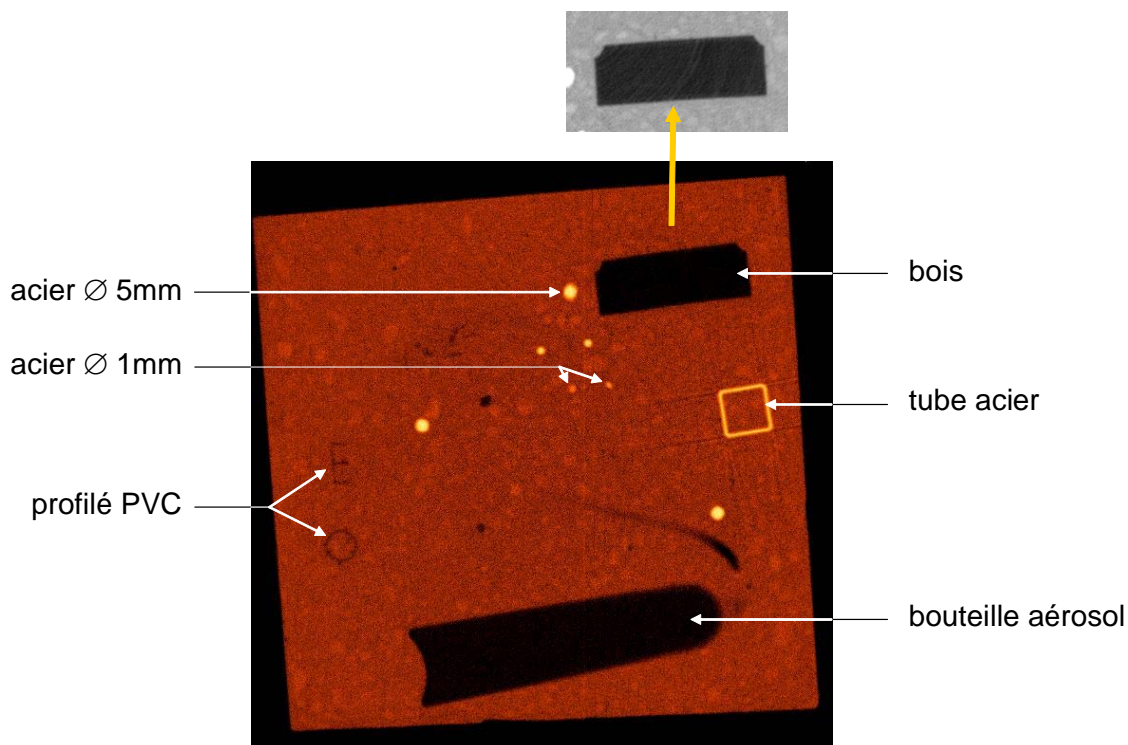
Ce tomographe, illustré figure 3, est composé de 25 détecteurs CdZnTe collimatés individuellement. Cette collimation limite la diaphonie entre les voies de mesures et réduit également l'influence de l'émission  $\gamma$  dans le cas d'un objet irradiant. Elle permet de fixer également l'épaisseur du plan de coupe : de 1 mm à 15 mm.



**Figure 3 :** Tomographe pluri-détecteur CdZnTe – géométrie d'acquisition par translation - rotation

Les acquisitions sont réalisées habituellement avec 1125 projections régulièrement réparties sur  $360^\circ$ , mais il est possible d'augmenter ce nombre à 2250, voire 3375 lorsque les besoins en résolution et sensibilité le demandent. Le nombre de points de mesure par projection est paramétrable : il est défini en fonction de la taille de l'objet, de la résolution spatiale recherchée et du nombre de projections acquises. La source est un LINAC 8 MeV (2 à 3 MeV d'énergie moyenne) délivrant une dose maximale de 0,3 Gy/s.

La figure 4 présente un exemple de tomographie réalisé à l'aide de ce système sur un bloc de béton de 48 cm de diagonale. Cette image permet d'illustrer la sensibilité du détecteur : nous pouvons en effet observer les grains du gravier qui a été utilisé pour la fabrication du béton, tandis que dans une inclusion en bois, il est possible de discerner l'orientation des cernes de celui-ci.



**Figure 4 :** Tomographie d'un bloc de béton contenant diverses inclusions diagonale ~ 480 mm ; densité moyenne 1,8 g/cm<sup>3</sup> (1125 projections de 1610 points de mesure)

## BARRETTE HAUTE ÉNERGIE

L'étape suivante est aujourd'hui la réalisation d'une barrette CdZnTe adaptée à la haute énergie. A ce jour, seuls des prototypes de quelques pixels ont été réalisés et validés expérimentalement [5, 6]. Nous illustrons donc les possibilités offertes par ce type de détection par des résultats de simulation.

### Le détecteur "barrette"

La géométrie "barrette" permet de disposer d'une grande profondeur d'interaction, donc d'un pouvoir d'arrêt élevé. Constituée par une juxtaposition de modules élémentaires, la longueur du détecteur n'est pas limitée par la technologie de réalisation mais par l'angle d'émission de la source. La géométrie barrette permet également de placer une fente de collimation devant le détecteur, ce qui limite l'influence du diffusé et de l'émission  $\gamma$  dans le cas d'un objet irradiant.

Cette barrette permet de réaliser des acquisitions classiques : radiographie par défilement, ou tomographie en géométrie fan beam sur des objets denses mais de faible diamètre (cas de l'exemple présenté dans la suite). Notons que la géométrie fan beam peut être adaptée à des objets nettement plus volumineux afin de compenser le faible angle d'émission d'un accélérateur. Ceci permet un gain significatif sur la durée d'acquisition par rapport à la géométrie translation - rotation.

## Simulation d'une barrette en géométrie fan beam

Le logiciel de simulation MODHERATO<sup>(1)</sup> [7] a été utilisé pour simuler une coupe tomographique d'un étui métallique étanche afin de dénombrer le nombre d'aiguilles combustible contenu sans ouverture de l'étui. Cet examen non destructif s'applique à un objet dont le débit de dose est de plusieurs dizaines de Gy.h<sup>-1</sup> à 20 cm de l'étui.

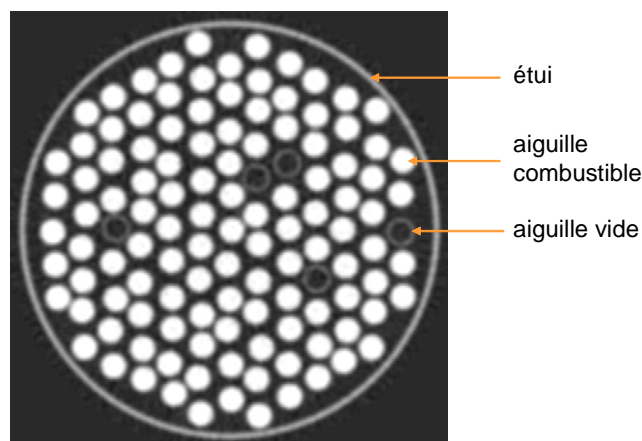
La source X choisie est un LINAC 6 MeV qui permet de disposer d'une énergie moyenne de spectre X autour de 2 MeV et obtenir ainsi une dynamique d'atténuation de l'ordre de deux décades (atténuation maximale du faisceau correspondant à 12 aiguilles superposées sur un diamètre de l'étui). La source a été modélisée à partir d'un code Monte-Carlo pour ce qui est de la conversion électrons-photons sur une cible de freinage en tungstène de 1,8 mm d'épaisseur.

Le détecteur modélisé est constitué de 256 éléments CdZnTe de 0,5 × 0,5 mm<sup>2</sup> de surface pour une profondeur de 10 mm. Cette barrette à pixels circulaires jointifs est munie d'un collimateur avec une fente de 0,5 mm de hauteur et de 130 mm de largeur. Cette collimation a pour fonction de réduire considérablement l'impact de l'émission gamma propre à l'étui fortement radioactif et également d'éliminer les rayonnements diffusés.

L'étui est en acier de 1,5 mm d'épaisseur et de 103 mm de diamètre externe. Le fantôme représentatif est constitué de 121 aiguilles dont 5 sont vides de combustible à l'aplomb de la coupe de 0,5 mm d'épaisseur. Certaines aiguilles peuvent être en contact entre elles ou avec la paroi de l'étui. La distance entre le foyer et l'objet est de 1800 mm et entre le foyer et le détecteur de 2095 mm. Rappelons que les étuis sont manipulés dans une cellule blindée de haute activité. Une réservation dans l'épaisseur du mur en béton permet le passage du collimateur de mise en forme du faisceau entre la source X et l'étui à examiner en cellule.

## Résultat de simulation de tomographie

Le sinogramme plan est constitué de 425 projections de 256 rayons calculés sur un spectre photonique compris entre 0,5 et 6 MeV. La reconstruction (figure 5) est une RPF (Rétro-Projection Filtrée) sur 512 x 512 pixels.



**Figure 5 :** Tomographie barrette obtenue par simulation d'un étui de crayons combustible

La tomographie permet un comptage fiable du nombre d'aiguilles même si la coupe n'intercepte pas de combustible : pour les cinq aiguilles vides, la gaine est détectée. Deux à

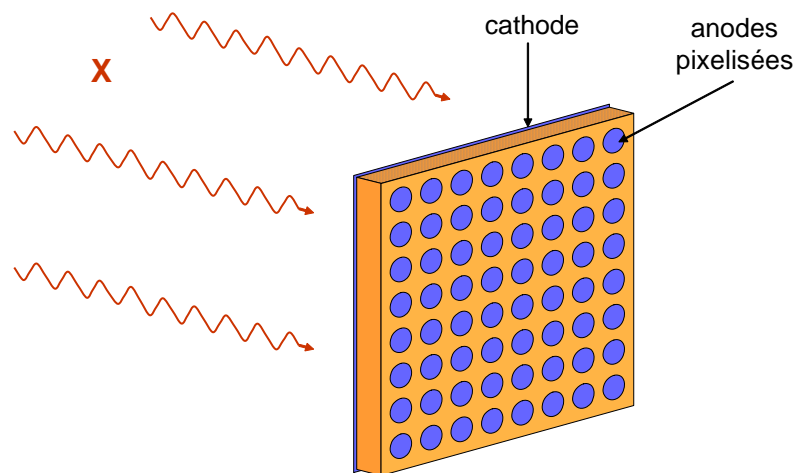
---

<sup>1</sup> Modelization in High Energy X-ray field for Radiography and Tomography

trois coupes espacées de quelques millimètres doivent permettre de conforter le dénombrement sans aucune ambiguïté. Non seulement cet examen non destructif évite l'ouverture des étuis en cellule blindée de haute activité mais elle permet de gagner un temps considérable pour le traitement de plus de 300 étuis de combustible irradié, à raison de 6 étuis par jour.

## DÉTECTEUR MATRICIEL 2D

Le CdZnTe peut être également utilisé pour réaliser des détecteurs bidimensionnels. Comme l'indique la figure 6, les électrodes sont alors placées non plus parallèlement mais orthogonalement à l'axe du faisceau X. La collecte des charges s'effectuant alors selon le même axe que celui du rayonnement, ce qui limite les possibilités de pouvoir d'arrêt par rapport à la configuration barrette.



**Figure 6 :** Détecteur CdTe 2D pixelisé

La pixelisation du détecteur est obtenue par les électrodes réalisées sur une des faces du semi-conducteur. Différents procédés d'hybridation permettent de connecter ces électrodes à un circuit, voire directement sur un ASIC qui réalise les premiers traitements (exemple en figure 7). Des modules élémentaires peuvent alors être aboutés pour réaliser un détecteur de grande surface. Cependant, pour des pixels de petites dimensions, la zone morte entre deux modules devient significative. Des études sont en cours actuellement pour réduire cette zone morte.

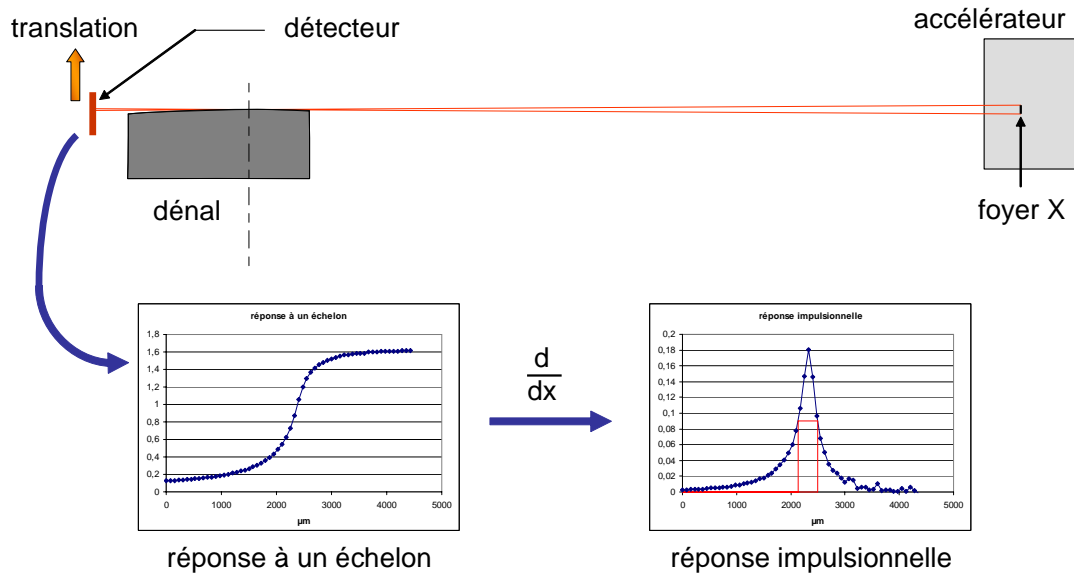


**Figure 7 :** Détecteur CdTe hybridé sur ASIC

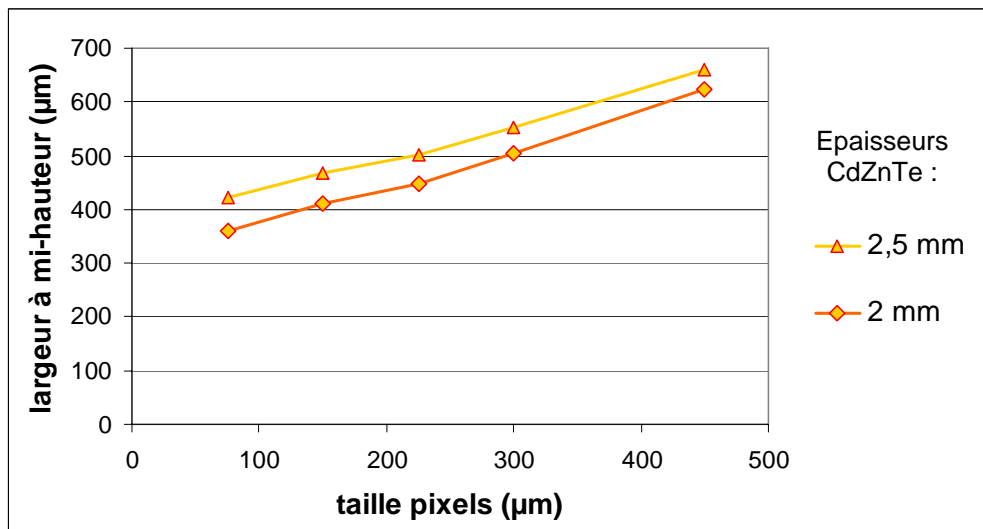
Si les détecteurs matriciels sont limités en pouvoir d'arrêt, l'utilisation d'un matériau de faible épaisseur (de l'ordre du millimètre) permet d'offrir une bonne résolution spatiale [8]. Des prototypes ont été construits pour des applications du CEA/DAM en radiographie éclair. Les campagnes expérimentales se sont déroulées sur l'installation ELSA à une énergie crête de 16 MeV. Elles ont permis de mesurer la réponse à un échelon de détecteurs matriciels de différentes épaisseurs (cf. figure 8). Cette réponse est dérivée pour disposer de la réponse



impulsionnelle dont la largeur à mi-hauteur fournit une information représentative de la résolution spatiale du détecteur.



**Figure 8 :** Mesure expérimentale de la réponse à un échelon à l'aide d'un bloc atténuant



**Figure 9 :** Largeur à mi-hauteur de la réponse impulsionnelle en fonction de l'épaisseur de CdTe et de la taille des pixels

Les détecteurs utilisés ont une épaisseur de 2 ou 2,5 mm. Ils présentent une matrice de 200 × 200 pixels au pas de 75 μm, les différentes tailles de pixel étant obtenues par regroupement de plusieurs électrodes (blocs de 2×2, 3×3, 4×4 et 6×6). Les résultats indiqués figure 9 montrent des largeurs à mi-hauteur qui varient de 380 à 660 μm.

Ce type de détecteur permet donc d'associer un champ 2D, un pouvoir d'arrêt intéressant (le CdZnTe reste un matériau dense par rapport à d'autres milieux de détection) et la possibilité d'une utilisation dynamique [9], les mesures étant synchronisée sur les tirs du LINAC.



## CONCLUSIONS

Les exemples présentés précédemment permettent d'illustrer les qualités et les possibilités des détecteurs CdZnTe dans le cadre d'applications Haute Energie.

Le prototype de tomographe à pluri-détecteur CdZnTe permet d'illustrer expérimentalement la sensibilité offerte par ce type de détecteur. Une barrette CdZnTe adaptée à la haute énergie – dont la réalisation n'est limitée aujourd'hui par aucun verrou technologique – permettrait de disposer d'un détecteur performant adapté aux géométries habituelles d'acquisition (radiographie par défilement, tomographie fan beam) et qui plus est extrêmement compact.

Les modèles de simulation [10, 11, 12] – dont un exemple sur des étuis de crayons de combustible nucléaire est présenté – ont été confrontés aux résultats expérimentaux obtenus avec les systèmes existants et sont donc à même de prévoir de façon tout à fait réaliste les performances d'un système HE pour tout type d'application envisagé.

Des potentialités de détecteur 2D sont envisageables à plus long terme, avec une résolution spatiale inférieure au millimètre. Dans ce cas, un compromis doit être établi entre la résolution spatiale et le pouvoir d'arrêt du détecteur, ce dernier paramètre étant de toute façon limité par rapport à une géométrie barrette.

Quelle que soit la géométrie du détecteur (barrette ou 2D), les fenêtres d'intégration sont synchronisées avec les flashes X de l'accélérateur ; et la sensibilité du CdTe permet de disposer d'un signal suffisant pour produire une image à partir d'un flash unique. Ceci permet de réaliser un suivi radioscopique d'un process dynamique au rythme de 300 images/s, fréquence habituelle des LINAC. Cette vitesse peut être augmentée en adaptant le LINAC (pas de limitation du côté détecteur).

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les équipes d'ELSA (CEA/DAM – Département de Physique Théorique et Appliquée) pour leur disponibilité et leur soutien technique lors des expérimentations sur leur accélérateur de 16 MeV.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] "Une imagerie très haute énergie pour la gestion des déchets radioactifs", Revue Contrôle – Essais – Mesures, pp 22 à 26, Dossier tomographie, Avril 2004
- [2] V. Moulin, V. Rebuffel, M. Antonakios, R. Sauze, J.P.Gorius, X-ray modalities for nuclear waste drums inspection , 16th WCNDT, Montreal, September 2004
- [3] E. Storm, H. Israel, Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to 100, Academic Press Inc, 1970.
- [4] Glasser F., Girard J.L., Lamarque P., Mesures de densité en tomographie X à haute énergie avec un accélérateur de 8 MeV. Density measurements with 8 MeV high energy computed tomography, 6th European Conference on Non Destructive Testing (ECNDT-94) ; 24/10/1994 - 28/10/1994 ; Nice ; France
- [5] F. Glasser, V Gerbe, P. Ouvrier-Buffet, M. Accensi, J.L. Girard, M. Renaud, J.L. GerstenMayer, CdZnTe hight-energy radiography detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A458 (2001) 544-550.

- [6] F. Glasser, P. Villard, J.P. Rostaing, M. Accensi, N. Baffert, J.L. Girard, Large dynamic range 64 channel ASIC for CZT or CdTe detectors, 4th International Workshop on radiation Imaging Detectors, Amsterdam, September 2002.
- [7] J.L. Pettier, D. Eck, R. Thierry, "High energy X-ray imaging on large or dense objects: definition and performance studies of devices by simulation", 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Emerging Technologies in NDT, Thessaloniki Greece, May 2003
- [8] Glasser F., Gerbe V., Accensi M., Ouvrier-buffet P., Girard J.L., Sanchez G., Garcin M., Atoyán C., Rapin J.F., Resolution spatiale de détecteurs de radiologie à base de CdTe et de CZT. Spatial resolution of CdTe and CZT digital radiography detectors, 12th International Conference on Crystal Growth (ICCG-98) and 10th International Conference on Vapor Growth and Epitaxy (ICVGE-98) 26/07/1998 - 31/07/1998 Jerusalem Israël
- [9] Gerstenmayer J., Bonnin O., Gerbe V., Glasser F. ; Peyret O., New CdTe quantum sensor, with improved spatial resolution, for fast X-ray and gamma-ray imaging, 1998, Materials Research Society Symposia Proceedings 487
- [10] R. Guillemaud, J. Tabary, P. Hugonnard, F. Mathy, A. Koenig, A. Glière, Sindbad : a multi-purpose and scalable X-ray simulation tool for NDE and medical imaging, PSIP 2003, Grenoble, France, 2003
- [11] J. Tabary, A. Glière, Coupling photon Monte Carlo simulation and CAD software. Application to X-ray non destructive evaluation, in Proc. Monte Carlo 2000, PP 461-466, Lisbon, Portugal, Oct. 23-26, 2000
- [12] J. Tabary, A. Glière, R. Guillemaud, P. Hugonnard, F. Mathy, Combination of high resolution analytically computed uncollided flux images with low resolution Monte Carlo computed scattered flux images, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, No. 1, pp 212-217, Feb. 2004