



HAL
open science

Upgrade de la detection pour la tomographie X a tres haute energie

M. Kistler, N. Estre, L. Berge, D. Tisseur, C. Roure, Jl. Pettier, E. Merle

► **To cite this version:**

M. Kistler, N. Estre, L. Berge, D. Tisseur, C. Roure, et al.. Upgrade de la detection pour la tomographie X a tres haute energie. Journees COFREND - 2017, May 2017, Strasbourg, France. hal-02417793

HAL Id: hal-02417793

<https://hal.science/hal-02417793>

Submitted on 18 Dec 2019

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.

UPGRADE DE LA DÉTECTION POUR LA TOMOGRAPHIE X À TRÈS HAUTE ÉNERGIE

M. Kistler¹, N. Estre¹, L. Berge¹, D. Tisseur¹, C. Roure¹, J.-L. Pettier¹, E. Merle²
¹ CEA, DEN, CAD, DTN, SMTA, LMN, 13108 Saint-Paul-lez-Durance, France
² CNRS, IN2P3, LPSC, 38026 Grenoble Cedex, France

Conférencier : M. Kistler, CEA

RÉSUMÉ

Dans le cadre de ses actions de R&D sur l'imagerie à haute énergie pour la caractérisation non destructive, le CEA étudie le développement d'un tomographe dans la cellule CINPHONIE du Centre de Cadarache. Ce tomographe est équipé d'un accélérateur linéaire d'énergie 9 MeV et d'un banc mécanique de capacité 2 t. L'upgrade de la partie « détection » est réalisée grâce à une étude poussée des performances de trois détecteurs, par une analyse QAD et des simulations Monte-Carlo : un flat panel, une série de capteurs en semi-conducteurs CdTe, et une barrette de scintillateur CdWO₄ segmenté (étudié pour deux résolutions différentes). Le petit modèle de CdWO₄ et les CdTe ont des performances similaires et permettent d'observer des objets de taille inférieure au millimètre à travers pratiquement 1 m de matériau de type béton, quand le grand modèle de CdWO₄ peut mesurer un signal sur une épaisseur allant jusqu'à 140 cm, sans toutefois pouvoir discerner des détails aussi fins. Le flat panel a lui une efficacité bien plus faible. Le choix du détecteur dépend alors de la caractéristique à privilégier : la résolution ou l'utilisation sur des grands volumes.

INTRODUCTION

Dans le cadre de ses actions de R&D sur l'imagerie à haute énergie pour la caractérisation non destructive, le CEA étudie le développement d'un tomographe dans la cellule CINPHONIE du Centre de Cadarache. Une évolution du système est envisagée et inclut l'installation d'un nouveau banc mécanique, d'une capacité de 5 t. L'évolution qui pourrait être envisagée sur la source X, pour être plus performante, est l'augmentation du flux jusqu'à des fortes doses, et des énergies allant jusqu'à 20 MeV couplée à une résolution spatiale submillimétrique.

Une telle évolution de la source X nécessiterait d'optimiser en parallèle le système de détection. Pour ce faire, trois différents types de détecteurs sont comparés : un premier de type flat panel, composé d'un écran de phosphore couplé à une matrice de photodiodes ; un second à base de capteurs en semi-conducteurs Tellure de Cadmium (CdTe) ; et un dernier composé d'une barrette de scintillateur transparent de Tungstate de Cadmium (CdWO₄) segmenté en aiguilles, étudié pour deux formats d'aiguilles.

Conjointement à la compréhension physique des processus de détection propres à chacun de ces détecteurs, l'interprétation des résultats de cette étude permet d'en déduire quelle solution est à privilégier pour une application en imagerie à haute énergie sur des objets massifs.

La comparaison des détecteurs s'effectue grâce à trois indicateurs : l'efficacité quantique de détection (DQE), la résolution spatiale et le rapport signal sur bruit (RSB). La DQE et la résolution spatiale permettent de comparer les performances intrinsèques des détecteurs.

La DQE peut être calculée théoriquement grâce aux paramètres QAD (pour Quantum Accounting Diagram), issus de l'analyse du même nom. La résolution spatiale du détecteur, rapportée au plan de l'objet, donne la composante de la résolution spatiale du tomographe due à la partie détection. Couplée à celle de la source X, elle permet d'évaluer la résolution spatiale du système complet. Le rapport signal sur bruit, quant à lui, dépend de la DQE, mais également du flux X en entrée et de la durée d'acquisition ; le flux étant déterminé par la source X et l'objet à tomographier. La durée d'acquisition dépend en partie du type de détecteur utilisé, et de la technique associée (balayage horizontal ou objet fixe).

L'objectif est donc d'obtenir une résolution spatiale submillimétrique, tout en gardant un rapport signal sur bruit exploitable en sortie de détecteur, qui permette d'en sortir des images suffisamment contrastées et limitées en bruit.

DESCRIPTION DES DÉTECTEURS ET ANALYSE QAD

L'analyse QAD d'un détecteur repose sur le principe de découpage du système de détection en étapes fondamentales, au nombre de trois : étape de gain, étape de diffusion et étape d'addition de bruit [1]. Ce découpage précis et standardisé permet une comparaison et une analyse précises de plusieurs systèmes de détection, à chaque point du processus.

Concernant le flat panel et le scintillateur segmenté, les valeurs des paramètres ne sont pas toutes fournies par les fabricants. Certaines reposent donc sur des simulations ou des hypothèses jugées réalistes.

Détecteur Flat Panel

L'analyse QAD d'un détecteur de type flat panel se rapproche de celle d'un écran de phosphore couplé à une caméra [1]. Le modèle étudié, le XRD a-SI 1622 AP, du fabricant Perkin Elmer, possède une surface active carrée de 41 cm de côté [2]. La couche sensible de l'écran est composée de Gadox (oxysulfure de gadolinium, Gd_2O_2S , $\rho=7.2 \text{ g/cm}^3$) mélangé à un liant. Différentes couches inertes composent également l'écran afin de le rigidifier ou d'agir comme intensificateur (par exemple une couche de cuivre).

Bien que sa plage de détection couvre des photons d'énergie comprise entre 20 keV et 15 MeV, son efficacité d'interaction, ou pouvoir d'arrêt, est optimale pour des énergies inférieures à 1 MeV (Figure 4).



Figure 1 : Vue de face du détecteur flat panel Perkin Elmer XRD a-SI 1622 AP [3]

Dans le flat panel, les photons incidents sont convertis en lumière visible dans l'écran de Gadox. Celle-ci est alors captée par une matrice carrée de photodiodes de 4 millions de pixels de 0.2 mm de largeur. L'analyse QAD fait apparaître 9 étapes élémentaires dans le processus de détection (voir la référence [1] pour une description détaillée de chacune

d'elles). Ces étapes, ainsi que les valeurs des paramètres QAD associés, sont regroupées dans le tableau 1.

#	Description	Type d'étape	Symbole	Gain g_i	Excès de Poisson ε_{gt}
1	Interaction des rayons X	Gain binomial	g_1	3.27×10^{-3}	-3.27×10^{-3}
2	Conversion X / énergie déposée (MeV/ph-X)	Gain	g_2	0.137	-0.838
3	Dispersion de l'énergie dans l'écran	Diffusion	$T_3(\omega)$	1	-1
4	Conversion énergie / lumière visible (ph/MeV)	Gain poissonien	g_4	6.40×10^4	0
5	Diffusion de la lumière visible	Diffusion	$T_5(\omega)$	1	-1
6	Photons sortant de l'écran	Gain binomial	g_6	0.3	-0.3
7	Fill factor des photodiodes	Gain binomial	g_7	0.7	-0.7
8	Efficacité quantique des photodiodes	Gain binomial	g_8	0.50	-0.50
9	Bruits additifs des photodiodes	Bruit	σ_a^2/N_9	1	-1

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de l'analyse et des paramètres QAD du flat panel

Les valeurs des gains g_1 et g_2 ont été évaluées par simulation Monte-Carlo pour des photons incidents d'énergie comprise entre 1 et 20 MeV. Les valeurs retenues pour cette analyse correspondent à des photons incidents de 5 MeV, énergie moyenne représentative du faisceau X en entrée d'un détecteur de tomographe haute énergie.

Les courbes d'efficacité d'interaction et d'énergie déposée moyenne pour tous les détecteurs sont regroupées en figures 4 et 5. De même, l'excès de Poisson nécessitant de connaître l'écart-type de la distribution de l'énergie déposée, cette dernière a également été évaluée par simulations numériques.

Détecteur à base de semi-conducteurs CdTe

Un détecteur basé sur une série de 25 capteurs CdTe, séparés par des collimateurs en plomb et suivis d'une chaîne d'acquisition électronique, est également à l'étude. Ce dispositif a été conçu au CEA-Leti dans les années 1990 et présente toujours des performances intrinsèques remarquables [4],[5].



Figure 2 : Vues du détecteur à semi-conducteurs CdTe et des collimateurs [4]

Chaque capteur consiste en une fine lamelle de semi-conducteur CdTe, de section $0.8 \times 5 \text{ mm}^2$, dont l'épaisseur de 25 mm et la densité élevée ($\rho=5.8 \text{ g/cm}^3$) permettent de capter au minimum 40% des photons incidents (Figure 4). Ces derniers déposent alors une certaine quantité d'énergie lors de l'interaction, conduisant à la production de paires électrons/trous. La tension créée en sortie du circuit intégrateur est proportionnelle au nombre de charges collectées. L'analyse QAD est dans ce cas composée de 6 étapes, résumées dans le tableau 2.

#	Description	Type d'étape	Symbole	Gain g_i	Excès de Poisson ε_{gi}
1	Interaction des rayons X	Gain binomial	g_1	0.399	-0.399
2	Conversion X / énergie déposée (MeV/ph-X)	Gain	g_2	1.72	-0.446
3	Dispersion de l'énergie dans le capteur	Diffusion	$T_3(\omega)$	1	-1
4	Conversion en paires e-/e+ (paires/MeV)	Gain	g_4	2.31×10^5	-0.85
5	Collection des électrons	Gain binomial	g_5	0.78	-0.78
6	Bruit additif de l'électronique	Bruit	σ_a^2/N_6	1	-1

Tableau 2 : Tableau récapitulatif de l'analyse et des paramètres QAD des CdTe

Les capteurs étant non jointifs et en faible nombre, l'acquisition complète d'une coupe tomographique nécessite une translation de l'objet, en complément à sa rotation. Cela impose une synchronisation précise de l'acquisition avec le déplacement de l'objet et la fréquence de tir de la source X. Il en résulte alors un temps d'acquisition par coupe tomographique de l'ordre de 30 min.

Scintillateur transparent segmenté CdWO₄

La société X-Scan Imaging propose une série de caméras X linéaires. Ces détecteurs sont composés de scintillateur CdWO₄ segmenté en fines aiguilles, couplées par fibre optique à une matrice linéaire de photodiodes hors champ. Les deux modèles étudiés, XIH8804-66 et XIH8808-66, diffèrent par la dimension de leurs aiguilles, de section respective 0.4x0.6 mm² et 0.8x1.2 mm². La longueur de détection active idéale, permettant de mesurer en demi-champ des objets de 140 cm de diamètre sans devoir translater l'objet, est d'environ 1.7 m, avec respectivement 4224 et 2112 pixels.



Figure 3 : Détecteur à scintillateur segmenté CdWO₄ [6]

Le processus de détection allie des capteurs en matériau de haute densité ($\rho=7.9 \text{ g/cm}^3$), et donc à fort pouvoir d'arrêt, à des petits pixels jointifs. L'analyse QAD est ici constituée de 7 étapes :

#	Description	Type d'étape	Symbole	Gain g_i	Excès de Poisson ε_{gi}
1	Interaction des rayons X	Gain binomial	g_1	0.436	-0.436
2	Conversion X / énergie déposée (MeV/ph-X)	Gain	g_2	0.85 / 1.55	-0.71 / -0.61
3	Dispersion de l'énergie dans l'aiguille	Diffusion	$T_3(\omega)$	1	-1
4	Conversion en lumière visible (ph/MeV)	Gain	g_4	1.50×10^4	0
5	Efficacité de la fibre optique	Gain binomial	g_5	0.31	-0.31
6	Efficacité quantique des photodiodes	Gain binomial	g_6	0.48	-0.48
7	Bruit additif de l'électronique	Bruit	σ_a^2/N_7	1	-1

Tableau 3 : Tableau récapitulatif de l'analyse et des paramètres QAD des CdWO₄

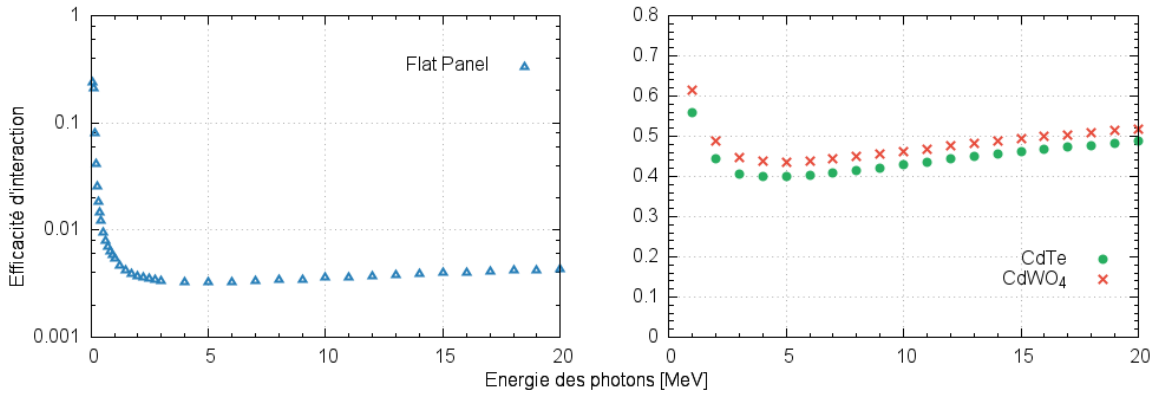


Figure 4 : Efficacité d'interaction g_1 pour chaque détecteur en fonction de l'énergie incidente des photons

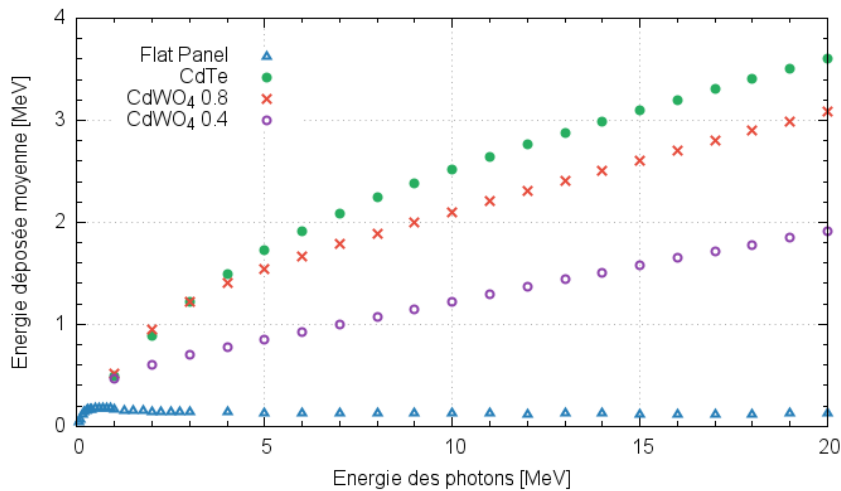


Figure 5 : Energie déposée moyenne g_2 pour chaque détecteur en fonction de l'énergie incidente des photons

On note sur les figures 4 et 5 l'intérêt d'utiliser un détecteur linéaire, que ce soit à partir d'éléments séparés (CdTe) ou de pixels jointifs (CdWO₄) : les probabilités d'interaction sont supérieures à 40% et chaque X dépose une énergie de quelques MeV. À l'inverse, le Flat Panel, qui a une couche sensible mince, offre une efficacité d'interaction beaucoup plus faible (moins de 1 %) et un dépôt d'énergie de l'ordre de 100 keV/photon seulement.

RÉSULTATS

Résolution spatiale et MTF

Les étapes de diffusion du signal sont matérialisées par l'effet de l'étalement du signal sur le nombre moyen de quanta. Cet effet est directement caractérisé par le carré de la norme de la MTF (Modulation Transfert Function) [1]. Afin d'évaluer la MTF, on calcule d'abord la LSF (Line Spread Function) qui est la distribution d'étalement du signal (à une dimension). Dans cette étude, la LSF est évaluée par simulation Monte-Carlo. La MTF est alors obtenue par Transformée de Fourier de la LSF et peut être incluse dans les calculs QAD.

La MTF permet également d'obtenir la limite de résolution que nous définissons comme la fréquence spatiale à laquelle la MTF vaut 10%. Au-delà de cette fréquence, on considère que le signal ne sera pas résolu.

Les LSF et MTF obtenues pour les trois détecteurs sont présentées en figure 6.

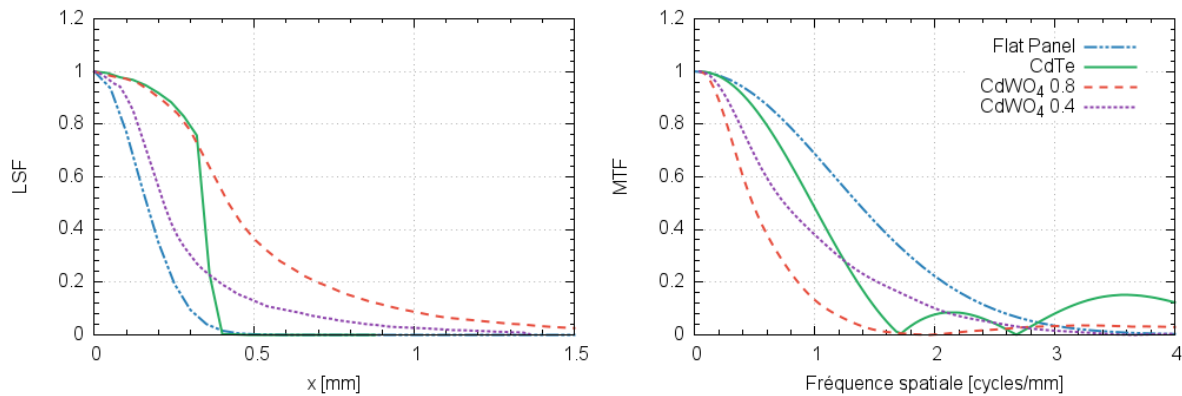


Figure 6 : LSF et MTF des différents détecteurs

Comme attendu, la LSF du flat panel est la plus fine et produit donc la meilleure MTF avec une limite de résolution de l'ordre de 2.5 cycles/mm. La LSF des détecteurs CdTe est plus large mais chute rapidement grâce à la collimation en plomb : on obtient presque une fonction créneau correspondant à la largeur d'un pixel. Les CdWO₄ présentent des distributions plus complexes avec une partie centrale fine et une partie périphérique plus large. Bien qu'ayant des LSF de forme différente, les CdTe et CdWO₄ à petits pixels produisent des MTF relativement comparables.

Finalement, les limites de résolution des détecteurs (à 10% de contraste) sont ramenées dans le plan objet du tomographe via le facteur de grandissement radiographique, qui vaut 1.6. Ces valeurs sont regroupées dans le tableau 4.

	Flat Panel	CdWO ₄ 0.4	CdTe	CdWO ₄ 0.8
LR intrinsèque	2.5 mm ⁻¹	2 mm ⁻¹	1.5 mm ⁻¹	1 mm ⁻¹
LR plan objet	4 mm ⁻¹	3.2 mm ⁻¹	2.4 mm ⁻¹	1.6 mm ⁻¹

Tableau 4 : Limites de résolution des détecteurs (dans le plan détecteur puis dans le plan objet du tomographe)

QAD

Les paramètres QAD étant tous évalués, les diagrammes peuvent alors être tracés (Figure 7). Ils représentent pour chaque détecteur l'évolution du nombre de quanta $P_i(\omega)$ en fonction des étapes i franchies, pour différentes fréquences spatiales :

$$P_i(\omega) = \prod_{j=1}^i \overline{g_j} |T_j(\omega)|^2$$

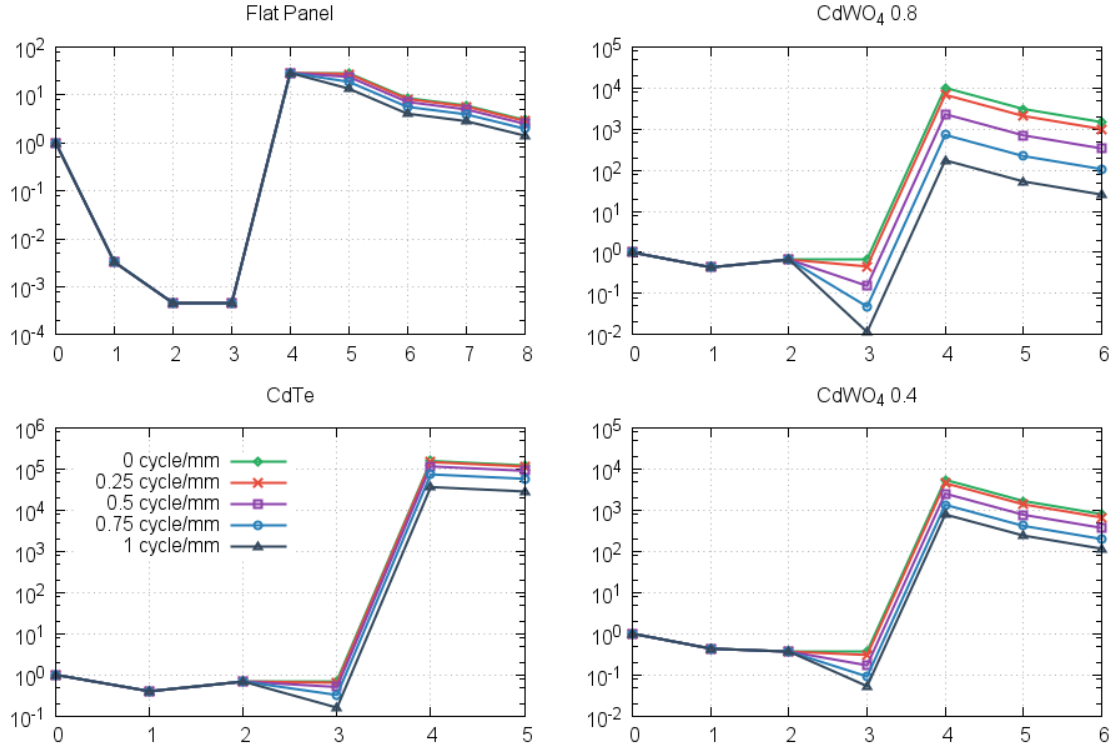


Figure 7 : QAD des différents détecteurs

Le diagramme du flat panel fait bien apparaître la perte importante de signal aux deux premières étapes, que même le grand facteur de conversion de l'énergie en lumière visible de l'étape 4 ne pourra compenser. La séparation plus importante des courbes pour le grand CdWO₄ laisse prévoir une plus importante sensibilité de sa DQE à la fréquence spatiale.

DQE

Les formules de la DQE pour chaque détecteur sont obtenues par simplification et adaptation de l'équation théorique [7].

Flat Panel :

$$DQE(\omega) = \frac{g_1 g_2 |T_3(\omega)|^2}{1 + (g_2 + \epsilon_{g_2}) |T_3(\omega)|^2 + \frac{1 + \sigma_a^2 / \overline{N}_9}{g_4 g_6 g_7 g_8 |T_5(\omega)|^2}}$$

CdTe :

$$DQE(\omega) = \frac{g_1 g_2 |T_3(\omega)|^2}{1 + (g_2 + \epsilon_{g_2}) |T_3(\omega)|^2 + \frac{\epsilon_{g_4}}{g_4} + \frac{1 + \sigma_a^2 / \overline{N}_6}{g_4 g_5}}$$

CdWO₄ :

$$DQE(\omega) = \frac{g_1 g_2 |T_3(\omega)|^2}{1 + (g_2 + \epsilon_{g_2}) |T_3(\omega)|^2 + \frac{1 + \sigma_a^2 / \overline{N}_7}{g_4 g_5 g_6}}$$

Les quatre courbes sont regroupées sur la figure 8.

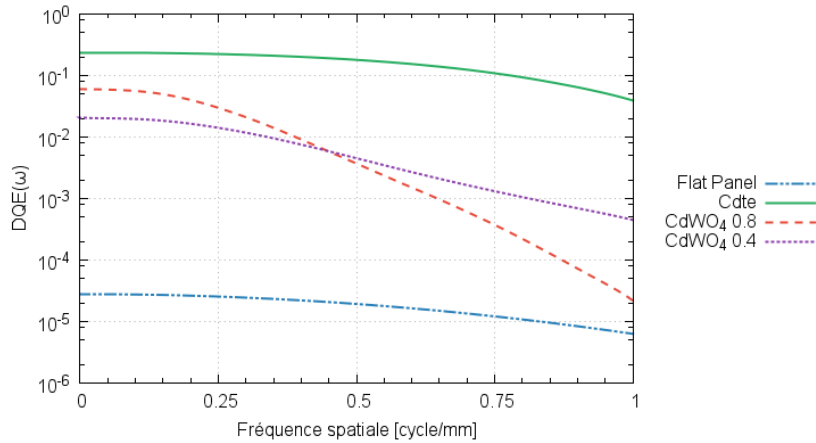


Figure 8 : DQE intrinsèques des différents détecteurs.

Les CdTe possèdent la meilleure DQE intrinsèque sur toute la gamme fréquentielle. Celle des CdWO₄ est plus dépendante de la fréquence et se dégrade donc plus rapidement. La DQE du flat panel est assez stable, mais inférieure de quatre décades par rapport à celle des CdTe.

DISCUSSION

Intrinsèquement, les capteurs CdTe sont les plus efficaces, avec une DQE relativement stable entre 0 et 1 cycle/mm, lorsque celles des CdWO₄ chutent au-delà de 0.5 cycle/mm, la diffusion énergétique $T_3(\omega)$ dans les aiguilles dégradant le signal. Le flat panel, de par la fine épaisseur de son écran, a une efficacité d'interaction g_1 faible, ce qui pénalise le reste du processus et aboutit à une DQE inférieure de plusieurs décades.

En revanche, pour l'acquisition d'une coupe tomographique sur un temps de mesure identique, il convient de comparer les RSB en sortie des détecteurs. Celui-ci dépend non seulement de la DQE, mais également du RSB en entrée de détecteur :

$$RSB_{sortie} = \sqrt{DQE} \times RSB_{entrée}$$

Le RSB en entrée dépend du flux surfacique de photons, de la section des capteurs, et de la durée d'acquisition du signal par capteur. Ces deux dernières valeurs diffèrent entre chaque détecteur, et peuvent venir contrebalancer une DQE faible, pour finalement délivrer en sortie de détecteur un RSB exploitable. La figure 9 indique pour chaque détecteur le RSB en sortie en fonction de l'équivalent en épaisseur de béton traversée par un flux nominal de 10^6 X/mm²/pulse, pour des fréquences spatiales de 0.5 et 1 cycle/mm.

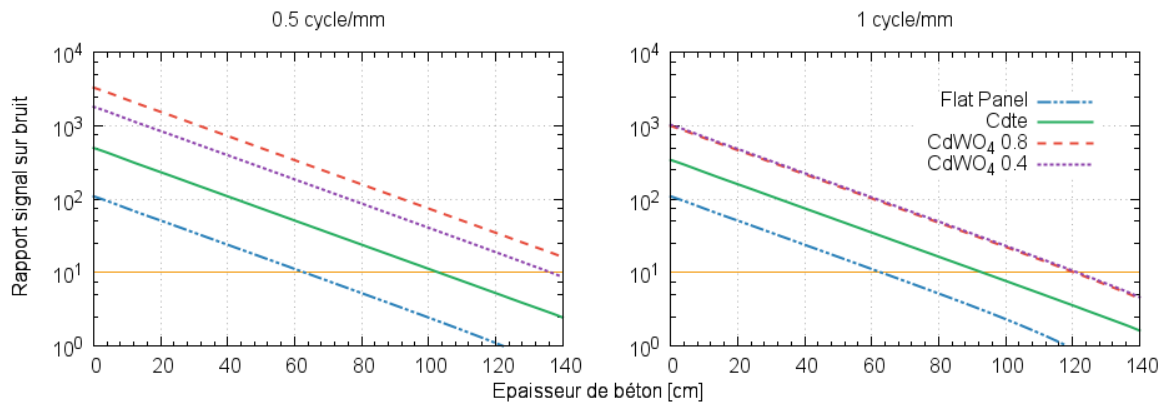


Figure 9 : Rapport signal sur bruit en sortie de détecteurs en fonction de l'épaisseur de béton traversé (à 0.5 et 1 cycle/mm)

On fixe arbitrairement la limite d'exploitation d'une image pour un RSB minimal de 10. Avec les CdTe, il est possible dans cette configuration de discerner des détails de l'ordre du millimètre (0.5 cycle/mm) dans un bloc de béton épais de 100 cm, et des détails submillimétriques à travers 90 cm de béton (1 cycle/mm). Pour les CdWO₄, la résolution millimétrique est atteinte pour une épaisseur de béton de l'ordre de 140 cm, avec de meilleures performances pour le grand modèle d'aiguilles. Les deux modèles possèdent une résolution à 500 μm à travers 120 cm. Le flat panel, quant à lui, offre des RSB plus faibles, avec une limite de signal exploitable pour une épaisseur de 60 cm. Tout comme les CdTe, ses performances sont stables sur cette gamme de fréquences.

Notons finalement que les limites de résolution évoquées sont des premiers ordres de grandeur car les limites réelles dépendront en premier lieu des contrastes offerts par les objets inspectés à ce niveau de détail. La prise en compte de ces niveaux de contrastes sort du cadre de cette étude et devra être caractérisée ultérieurement et vérifiée expérimentalement.

CONCLUSION

Cette étude de différents détecteurs envisagés pour de la tomographie à haute énergie fait ressortir des performances notables, tant en terme de résolution spatiale que de capacité de pénétration. L'étude du flat panel, qui est un type de détecteur performant et dont l'utilisation est répandue dans plusieurs domaines, donne un élément de comparaison permettant d'accentuer le caractère remarquable des performances des détecteurs CdTe et CdWO₄, à ces hautes énergies.

Il apparaît que les capteurs CdTe ont la meilleure performance intrinsèque, avec une DQE relativement stable, ce qui donne en sortie un RSB peu dépendant de la fréquence spatiale, et donc de la résolution spatiale. Les CdWO₄, à durée de mesure égale, ont un meilleur RSB en entrée, ce qui équilibre leur plus faible DQE et aboutit à un RSB en sortie plus élevé. De par la dimension des pixels, le petit modèle de CdWO₄ possède la meilleure résolution spatiale, le grand modèle et les CdTe ayant une résolution moindre. En parallèle, un avantage pratique des CdWO₄ concerne la largeur importante du détecteur, qui permet de se dispenser du déplacement transverse de l'objet.

En revanche, concilier une résolution submillimétrique et une capacité de pénétration de 140 cm de béton paraît être difficilement atteignable.

Cette étude par analyse QAD doit désormais être complétée par une vérification expérimentale afin de comparer *in situ* les performances des détecteurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bissonnette, J.-P. et al., A quantum accounting and detective quantum efficiency analysis for video-based portal imaging, Medical Physics, VOL. 24, 1997, pp. 815-826.
- [2] Perkin Elmer, XRD 1622 AO, AP, Flat Panel X-ray Detectors, Product Note, 2013.
- [3] <http://www.perkinelmer.com/imaging-components/detectors/xrd-a-si/1622-ao-ap.html>, consulté le 07/04/2017.
- [4] Estre, N. et al., High-energy X-ray imaging applied to nondestructive characterization of large nuclear waste drums, IEEE Transactions on Nuclear science, VOL. 62, 2015, pp. 3104-3109.
- [5] Glasser, F. et al., Application of cadmium telluride detectors to high energy computed tomography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, VOL. A322, 1992, pp. 619-622.
- [6] <https://x-scanimaging.com/cammods/xi8800/>, consulté le 07/04/2017.
- [7] Cunningham, I. A. et al., A spatial-frequency dependent quantum accounting diagram and detective quantum efficiency model of signal and noise propagation in cascading imaging systems, Medical Physics, VOL. 21, 1994, pp. 417-427