

Identification de matériaux en radiographie X spectrale

JEAN RINKEL, GUILLAUME BELDJOURI, VERONIQUE REBUFFEL

CEA LETI MINATEC CAMPUS
17 rue des Martyrs , 38600 Grenoble Cedex, France

jean.rinkel@cea.fr

Résumé – En radiographie, le développement des capteurs spectrométriques de rayons X permet l'amélioration des performances d'identification de matériaux par rapport aux modalités d'imagerie bi-énergies. Nous présentons un algorithme original d'optimisation des bornes des gammes d'énergies à utiliser pour l'identification d'un matériau par rayonnement X à l'aide d'un tel capteur. Cet algorithme est basé sur l'utilisation de la borne de Cramer Rao sans connaissance explicite de la fonction de réponse du capteur aux différentes énergies d'irradiation. Les résultats expérimentaux montrent un accroissement des performances d'identification avec l'optimisation pour un faible nombre de gammes d'énergie et avec le nombre de gammes d'énergie de manière générale.

Abstract – Recently, a new modality for fast digital X-ray radiography based on spectrometric detectors has emerged. These detectors provide information allowing to identify materials for security and medical applications and improve the performance obtained with state of the art dual energy systems. We present an original algorithm to optimize the energy ranges to be used for material identification with such a detector. This method is based on an estimation of the Cramer Rao lower bound without prior knowledge on detector response. The experimental results demonstrate the practical interest of the optimization process for a low number of energies. In general, they show performance increase with the number of energy ranges.

1 Problématique

En radiographie par rayonnement X, la mesure des photons de différentes énergies ayant traversé un objet permet de remonter à la nature et à l'épaisseur de chaque matériau composant ce dernier. En particulier, dans la gamme d'énergies [20-150] keV, trois types d'interaction (par effet Rayleigh, Compton ou photoélectrique) sont possibles. A chaque effet correspond une section efficace d'interaction qui est fonction de l'énergie, de la densité et de la composition chimique du matériau ainsi que des forces d'interaction inter atomiques et inter moléculaires. Sachant que le nombre de paramètres est important, il est difficile d'anticiper par la simple intuition les performances d'un processus d'identification de matériau en fonction du nombre d'énergies utilisées simultanément. En pratique, on raisonne sur des gammes d'énergies dont la largeur minimale, d'environ 1 keV, est liée aux limitations technologiques de notre spectromètre. Les principales questions que nous nous posons sont alors les suivantes :

1) Comment identifier un matériau à partir d'une mesure bruitée à différentes énergies des photons transmis ?

2) Quelles sont les énergies ou gammes d'énergies à utiliser ?

3) Comment les performances de détection varient-elles lorsque le nombre d'énergies ou gammes d'énergies croît ?

Dans l'objectif d'apporter des réponses au moins partielles à ces différentes questions, nous allons présenter :

1) Un algorithme général d'identification basé sur un a priori gaussien du bruit sur les mesures

2) Un processus d'optimisation des gammes d'énergie basé sur la borne de Cramer Rao donnant la borne inférieure de la variance des estimateurs non biaisés des épaisseurs des différents matériaux imagés. Remarquons que dans le cadre d'un tel problème d'identification de matériau, la notion d'estimateur non biaisé des épaisseurs est essentielle. Relâcher cette contrainte de biais afin d'améliorer la variance des estimateurs serait une solution envisageable dans des applications d'imagerie dites qualitatives pour lesquelles le critère à optimiser est typiquement un critère de type signal sur bruit ou contraste sur bruit.

3) Des résultats expérimentaux présentant les variations des performances d'identification avec l'algorithme présenté en 1) et faisant appel à l'optimisation présentée en 2) en fonction du nombre de mesures.

2 Algorithme d'identification

Notons $\mu(E)$ le coefficient d'atténuation linéaire d'un matériau, dont l'épaisseur est notée ep , pour un rayonnement à l'énergie E et $N_0(E)$ le nombre de photons à l'énergie E incidents sur l'objet. Le nombre de photons transmis par l'objet à l'énergie E est d'après l'équation de Beer-Lambert :

$$N(E) = N_0(E) \times \exp(-\mu(E) \times ep) \quad (1)$$

La mesure discrète sur les différents canaux d'énergie du capteur spectrométrique peut se déduire de N en multipliant ce dernier par la matrice caractérisant la réponse du capteur aux différentes énergies d'irradiation :

$$M = R.N$$

En général, on représente une mesure par son atténuation définie, à partir de sa valeur normalisée par une mesure M_0 en l'absence d'objet atténuant, de la manière suivante :

$$\text{Att}(i) = -\ln\left(\frac{M(i)}{M_0(i)}\right) \quad (2)$$

En pratique, le bruit sur la mesure M peut être modélisé par une loi de Poisson. Ceci peut être démontré en considérant tout d'abord que la variable aléatoire représentant la mesure à une énergie $E(i)$ peut être modélisée par une loi binomiale. Cette mesure résulte en effet de la somme des variables aléatoires de Bernoulli décrivant les contributions des différentes énergies des photons incidents sur le détecteur à la mesure à l'énergie $E(i)$. Par ailleurs, ce processus binomial est conditionnel à des lois de Poisson, qui modélisent les variables représentant les nombres de photons incidents sur le détecteur aux différentes énergies pendant la période de mesure ou temps d'acquisition, fixé par l'expérimentateur.

D'après la définition de l'atténuation donnée par l'équation (2), la division par une constante $M_0(i)$ et la fonction logarithme font que le bruit résultant sur l'atténuation d'une mesure soumise à un bruit poissonien n'est plus poissonien. Notre approche est alors basée sur l'approximation d'un bruit résultant gaussien sur les atténuations aux différentes énergies.

Par ailleurs, l'hypothèse de mesures indépendantes deux à deux aux différentes énergies est faite. Physiquement, cette hypothèse peut être justifiée de la manière suivante : lorsqu'un photon X d'énergie donnée est absorbé par le détecteur, son énergie mesurée peut varier d'une expérience à une autre, cette variation étant liée à la qualité de la réponse du capteur et au bruit propre à ce dernier. Cependant, un photon X donné absorbé par le capteur ne sera mesuré qu'à une seule énergie. Ceci garantit donc l'indépendance statistique entre les mesures aux différentes énergies, même si la mesure du spectre à une énergie donnée peut être liée à des contributions de photons d'énergies différentes.

L'algorithme de détection est alors basé sur un apprentissage des caractéristiques des lois de distribution des atténuations pour chaque couple matériau et épaisseur que l'on souhaite détecter. Notons $\text{Att}_i(\text{Mat}, \text{Ep})$ et $\sigma_i(\text{Mat}, \text{Ep})$ les valeurs moyennes et écarts-types calibrés des mesures au canal i pour un matériau noté Mat et une épaisseur Ep . Sur une mesure d'un objet inconnu, la détection est réalisée en recherchant le maximum de vraisemblance sur l'ensemble des couples matériau-épaisseur [1-2] :

$$(\text{Mat}_{\text{estimé}}, \text{Ep}_{\text{estimé}}) = \arg \max_{(\text{Mat}, \text{Ep})} \left(V(\text{Mat}, \text{Ep}) \right)$$

Avec:

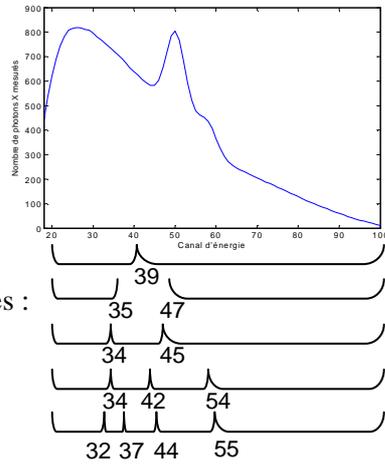
$$V(\text{Mat}, \text{Ep}) = \prod_{E_i} \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_i(\text{Mat}, \text{Ep})}} \times \exp\left(-\frac{(\text{Att}_i(\text{Mat}, \text{Ep}) - \text{Att}_i)^2}{2 \times \sigma_i(\text{Mat}, \text{Ep})^2}\right) \quad (3)$$

3 La borne de Cramer Rao appliquée à l'optimisation des gammes d'énergie

Considérons un objet qui peut être constitué de deux matériaux. L'objectif est de déterminer, à partir d'une acquisition bruitée, lequel des deux matériaux est présent par utilisation de l'algorithme précédemment décrit. Ceci revient à estimer avec le plus de précision possible les épaisseurs ep_1 et ep_2 des deux matériaux. La matrice d'information de Fischer exprime l'information présente dans les différents canaux d'énergie en fonction des deux paramètres ep_1 et ep_2 . Notons M_k la valeur de la mesure dans la gamme d'énergie k et NG le nombre de gammes d'énergie. Dans le cas de l'imagerie X qui nous concerne, la matrice de Fischer peut s'écrire de la manière suivante [3-5] :

$$\mathfrak{F} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{NG} \frac{1}{M_k} \left(\frac{\partial M_k}{\partial ep_1}\right)^2 & \sum_{k=1}^{NG} \frac{1}{M_k} \frac{\partial M_k}{\partial ep_1} \frac{\partial M_k}{\partial ep_2} \\ \sum_{k=1}^{NG} \frac{1}{M_k} \frac{\partial M_k}{\partial ep_1} \frac{\partial M_k}{\partial ep_2} & \sum_{k=1}^{NG} \frac{1}{M_k} \left(\frac{\partial M_k}{\partial ep_2}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

L'originalité de notre approche se situe à deux niveaux : d'une part il faut adapter l'utilisation de Cramer Rao pour optimiser un processus d'identification de matériau. Ceci est réalisé en calculant les dérivées au voisinage du couple d'épaisseur ($ep_1 = ep_{\text{ref}}, ep_2 = 0$), ep_{ref} étant l'épaisseur du matériau à identifier à laquelle on optimise nos gammes d'énergie. D'autre part, la dérivée est calculée numériquement en faisant tendre les pas en épaisseur ε_1 et ε_2 vers 0. Cette dernière étape permettrait de réaliser l'optimisation à partir de mesures expérimentales sans connaissances *a priori* de la matrice de réponse R du capteur. Dans cette première étude, l'optimisation est basée sur des simulations incluant la modélisation d'une réponse de capteur R . Pour un nombre de gammes fixé, toutes les possibilités de seuils des gammes sont testées avec un pas de 1 keV. Les bornes inférieures du bruit sur les estimateurs de ep_1 et ep_2 dans la configuration ($ep_1 = ep_{\text{ref}}, ep_2 = 0$) sont déterminées à l'aide du théorème de Cramer Rao [3-5]. Les valeurs de seuils donnant les valeurs les plus faibles de la somme $\sigma(ep_1)^2 + \sigma(ep_2)^2$ sont représentées sur la figure suivante pour quelques configurations typiques.



2 gammes jointives :

2 gammes non jointives :

3 gammes jointives :

4 gammes jointives :

5 gammes jointives :

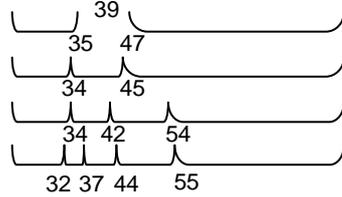


Figure 1 : optimisation des gammes d'énergie par la méthode de Cramer Rao pour 10 mm de POM (Polyoxyméthylène) et 0 cm de PVDF (Polyfluorure de vinyldène)

4 Résultats expérimentaux

Le modèle précédent a été appliqué à l'aide d'un capteur spectrométrique [1,6] pour distinguer le Polyoxyméthylène, ou POM, à une épaisseur de 10 mm, du Polyfluorure de vinyldène, ou PVDF. Il est exprimé dans la figure suivante en termes de taux de fausses identifications calculé à partir d'un test d'identification sur un échantillon de 1200 acquisitions.

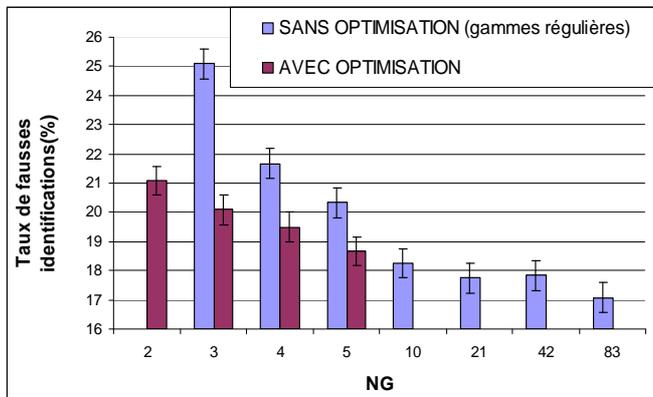


Figure 2 : résultats expérimentaux avec incertitude à $\pm \sigma$. Sans optimisation, les gammes d'énergie sont régulièrement espacées sur le spectre, l'optimisation étant réalisée pour $2 \leq NG \leq 5$

5 Conclusions

Notre étude montre d'une part la pertinence de l'utilisation de la borne de Cramer Rao pour l'optimisation des gammes d'énergies en radiographie multi énergies et, d'autre part, l'intérêt à considérer un nombre maximal de gammes d'énergies (jusqu'à une par keV dans notre étude) pour optimiser les performances d'identification.

6 Bibliographie

- [1] - J. Rinkel, G. Beldjoudi, G. Gonon, A. Brambilla, V. Rebuffel, C. Boudou, P. Ouvrier-Bufferet, L. Verger, Experimental Evaluation of Material Identification Methods with CdTe X-Rays Spectrometric Detector, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, (2010)
- [2] - G. Beldjoudi, J. Rinkel, V. Rebuffel, V. Kaftandjian, Multidimensional Data Processing Methods for Material Discrimination using an Ideal X-Ray Spectrometric Photon Counting Detector, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, (2010).
- [3] - E. Roessl, R. Proksa, Optimal energy threshold arrangement in photon-counting spectral x-ray imaging, Nuclear Science Symposium Conference Record, 2006. IEEE, 2006
- [4] - A.S. Wang, N.J. Pelc, Optimal energy thresholds and weights for separating materials using photon counting X-ray detectors with energy discriminating capabilities, Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, 7258, (2009).
- [5] - E. Roessl, C. Herrmann, Cramer-Rao lower bound of basis image noise in multiple-energy x-ray imaging, Physics in Medicine and Biology, 54, (2009).
- [6] - A. Brambilla, C. Boudou, P. Ouvrier-Bufferet, F. Mougel, G. Gonon, J. Rinkel, L. Verger, Spectrometric Performances of CdTe and CdZnTe Semiconductor Detector Arrays at High X-ray Flux, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, (2009).