

# NOUVELLES MÉTHODES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF EXPLOITANT LE RAYONNEMENT GAMMA DIFFUSÉ *NEW METHODS FOR NON DESTRUCTIVE EVALUATION USING SCATTERED GAMMA RAY*

RENARD F<sup>1</sup>., NGUYEN M.K<sup>1</sup>., SUSHCHENKO A<sup>1</sup>, DAVEAU C.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire Equipes Traitement des Images et du Signal  
CNRS UMR 8051/ENSEA/Université de Cergy-Pontoise,  
2 rue A. Chauvin, 95302 Cergy-Pontoise, France

<sup>2</sup>Laboratoire Algèbre-Géométrie-Modélisation  
CNRS UMR 8089/Université de Cergy-Pontoise

## **Résumé**

De nouvelles méthodes de contrôle non destructif (CND) par mesure du rayonnement gamma diffusé sont proposées. En rupture avec les méthodes traditionnelles, dans lesquelles le rayonnement diffusé est considéré comme du bruit et éliminé, le rayonnement diffusé est ici un agent actif dans la formation et dans la reconstruction d'images. Cette nouvelle imagerie est modélisée par une nouvelle transformation de Radon définie sur des arcs de cercle – une généralisation de la transformation de Radon standard définie sur des lignes ou des plans en tomographie conventionnelle.

Le CND basé sur cette nouvelle imagerie débouche sur plusieurs avantages: il se présente comme une alternative à la radiographie car le défaut sera caractérisé par sa densité d'électrons (sites de diffusion) au lieu de sa carte d'atténuation obtenue en radiographie. Il est d'autant plus intéressant qu'il existe des matériaux dont les coefficients d'atténuation varient au cours de leur vieillissement alors que leurs densités électroniques ne changent pas. D'autre part, lorsque les photons diffusés sont enregistrés à différentes énergies, un détecteur ponctuel suffit pour reconstruire le défaut en deux dimensions (2D) à partir d'une série d'images indexées par l'énergie ou par l'angle de diffusion. La configuration d'acquisition de données peut être moins contraignante que celle en tomographie conventionnelle.

## **Abstract**

*New methods of Non Destructive Evaluation (NDE) through the measurement of scattered gamma-ray are proposed. This is a break from traditional methods, which considers scattered radiation considers as noise and consequently discarded. Here, scattered gamma radiation plays the main role in image acquisition and reconstruction. This new kind of imaging is modeled by a new Radon transform – it is a generalization of the well-known standard Radon transform used in conventional tomography.*

*NDE using this new kind of imaging offers many advantages. It is clearly an alternative to radiography since defects are characterized by electron density (scattering sites) and not, as usually the case, by its attenuation map. Moreover, this characterization is more valuable because coefficients of attenuation of materials may change a lot through aging, as opposed to electron density, which remains unchanged. Furthermore, the scattered photons are acquired at different energy levels, which permits the use a point like detector to reconstruct defects in two dimensions (2D) from a series of images indexed by energy or scattering angles. Consequently, data acquisition can be less restrictive than in conventional tomography.*

## FORMATION D'IMAGES

Le rayonnement gamma émis par une source connue, et diffusé par un objet inconnu et par le milieu environnant est enregistré sur un détecteur. On reconstruira alors à partir de ces données la densité électronique de l'objet.

### Diffusion Compton

La diffusion Compton dans laquelle le flux de photons est dévié avec une probabilité de Klein-Nishina, est la clef de voûte de ce nouveau type de CND ([1] et [2]). La déviation est caractérisée par un angle de diffusion  $\theta$ , et par une énergie  $E$  du flux sortant de photons, qui est plus faible que l'énergie incidente. Ces deux paramètres sont reliés par la formule de

Compton :  $E = E_0 \frac{1}{1 + \frac{E_0}{511} (1 - \cos \theta)}$  avec  $\frac{E_0}{511}$  (keV). L'innovation de la méthode réside dans le transfert d'information géométrique en une information énergétique, captée par le détecteur.

### Nouvelle méthode de C.N.D. utilisant la transformation de Radon sur des arcs de cercles (détecteur ponctuel pour un objet 2D)

Considérons une source calibrée de rayonnement gamma S. Plaçons un détecteur ponctuel à une distance  $2P$  au point D de telle sorte que le milieu O du segment SD soit l'origine d'un système de coordonnées polaires et que la droite SD fasse un angle  $\phi$  avec une direction fixe, voir Fig. 1.

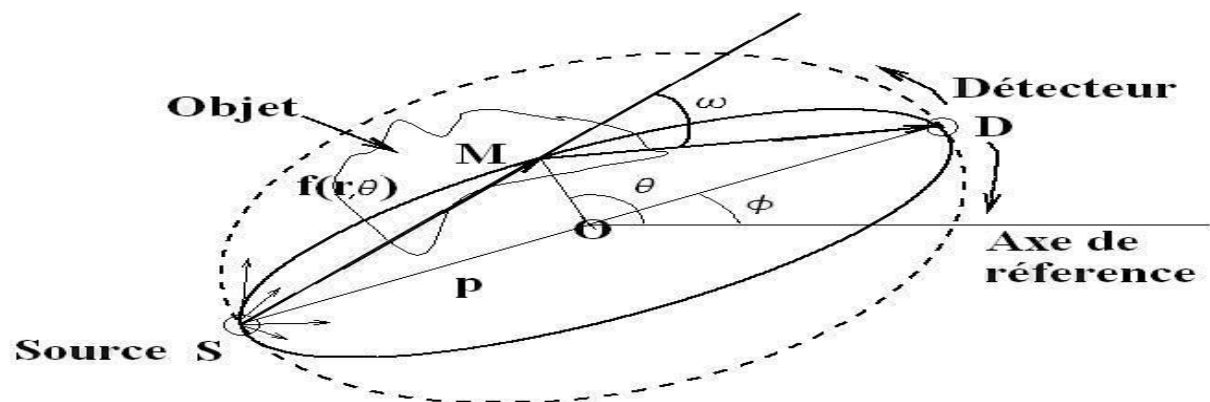


Fig. 1: Dispositif d'acquisition des données sur un objet 2D

Étudions maintenant le flux de photons émis par la source S d'énergie  $E_0$ , subissant une diffusion Compton en M, et détectés par D à une énergie  $E$  avec  $E < E_0$ . Le point M a pour coordonnées polaires  $r, \theta$ .

Supposons que la source émet isotropiquement  $I$  photons, non atténués pendant leurs parcours. La densité de flux incident de photons en M sera:  $\frac{I}{2\pi dM}$ . La fraction de photons

diffusés vers le détecteur s'écrit selon l'équation:  $\frac{I}{2\pi} \frac{1}{dM} \int_M dV_M \cos \theta \cos \theta_D$ , avec

$f(\mathbf{M})$  la densité électronique,  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  la section efficace différentielle, et  $dD$  qui est un terme prenant en compte la probabilité de déviation du photon sous un angle  $\theta$ .

On voit maintenant que pour un angle de diffusion  $\theta$  fixé, les sites de diffusion  $M$  se situent sur deux arcs de cercles paramétrés par  $\phi$ . On obtient alors une densité de flux diffusé  $F(\theta, \phi)$ .

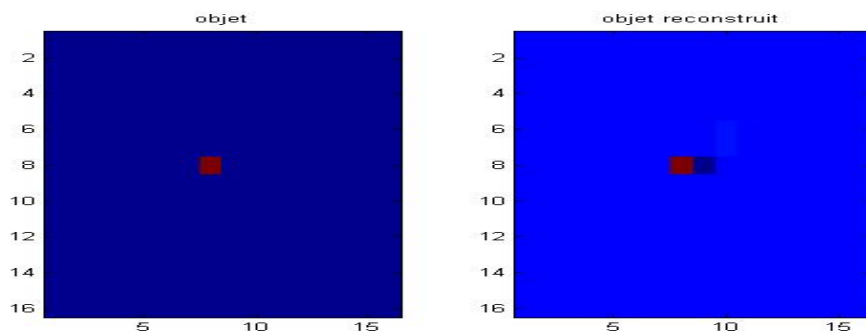
En faisant varier  $\theta$  et  $\phi$  pour acquérir un ensemble complet de données, on obtient alors l'équation:

$$F(\theta, \phi) = \frac{I}{2} r_e P(\theta) \int_{\text{arc}} \frac{1}{SM} \frac{1}{MD} f(\mathbf{r}, \theta, \phi) d\mathbf{r} = \frac{1}{SM} \frac{1}{MD} f(\mathbf{r}, \theta, \phi)$$

Quand  $\theta$  est fixé, on obtient différents  $F(\theta, \phi)$  en faisant des acquisitions à différentes énergies sans déplacer le détecteur. A partir de ces mesures du rayonnement diffusé  $F(\theta, \phi)$  sous différents angles de diffusion  $\theta$ , on essaie de trouver le défaut caractérisé par la densité d'électron  $f(\mathbf{r}, \phi)$ .

La reconstruction se fait par une inversion numérique via une décomposition en valeurs singulières de la matrice de l'opérateur (1).

On se propose comme exemple d'acquérir des données sur un défaut 2D, et de reconstruire son image (voir Fig.2). On observe une bonne qualité de reconstruction (bonnes détection, identification, dimension et bon positionnement du défaut reconstruit par rapport



au défaut original).

Fig.2: Objet initial (à gauche) et image reconstruite (à droite)

### Nouvelle méthode de C.N.D. avec un détecteur plan pour un objet 3D

On place tout d'abord la source à côté de l'objet, et le détecteur collimaté au-dessus (voir Fig.3). Si la source était située en-dessous, on aurait juste un pinceau de photons sur l'objet. On suppose dans le calcul que les rayonnements traversant le milieu ne sont pas atténués.

Étudions ici aussi le chemin suivi par les photons émis par la source  $S$ , diffusés en  $M$  sous un angle  $\theta$ , arrivant sur le détecteur au point  $D(x,y)$  avec une énergie  $E$ . La densité de flux

de photons arrivant en  $M$  est  $\frac{I}{4\pi SM^2}$  pour une source isotrope d'intensité  $I$ . La fraction

$$\text{de photons détectée en } D(x,y) \text{ est } g(x,y) = \frac{I r_e^2}{4\pi SM^2} n_e(M) \frac{1}{MD^2} P(\theta).$$

Il est alors facile de reconstruire la densité électronique de l'objet connaissant les mesures  $g(x,y)$  par l'équation suivante:

$$n_e \square M \equiv \frac{4 \square SM \uparrow g \square x, y, \square \square SM \uparrow MD \uparrow}{Ir_e^2 P \square \square \square}$$

A titre d'illustration, on se propose d'imager un tuyau formant un angle droit et contenant un petit défaut (Fig.4 à gauche). Dans l'objet reconstruit, ce petit défaut est bien positionné et identifié (Fig.4 à droite). Les erreurs obtenues lors de la reconstruction sont justes dues à des problèmes numériques.

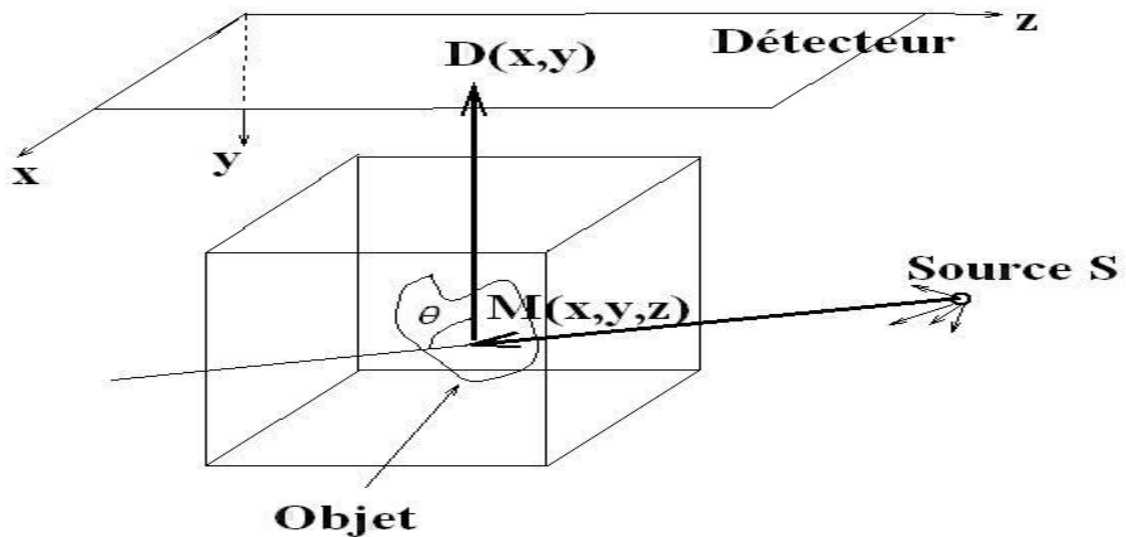


Fig.3: Dispositif d'acquisition des données sur un objet 3D

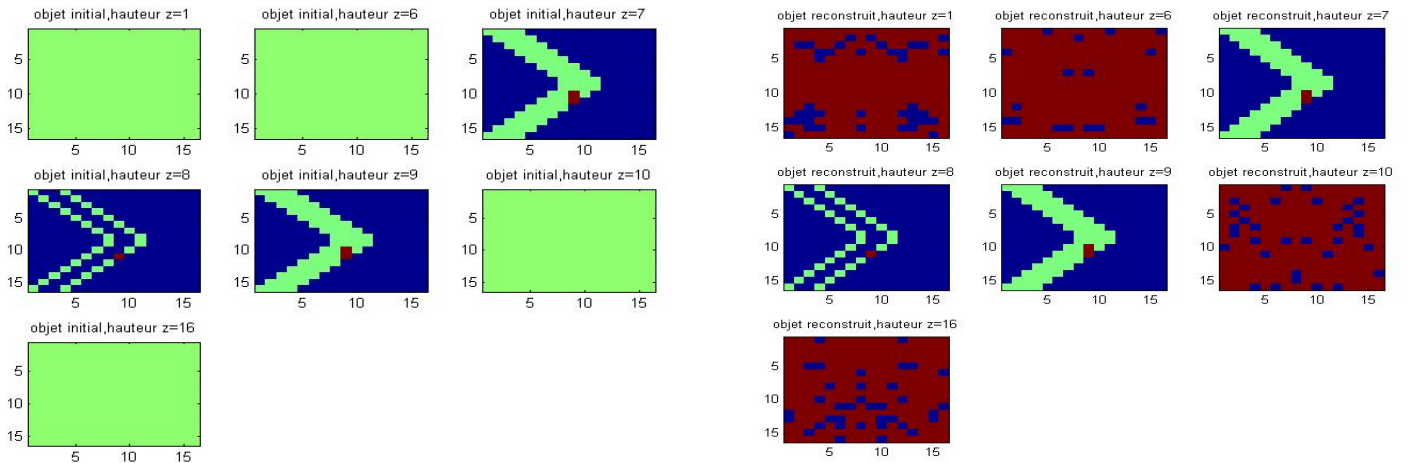


Fig.4: Objet initial 3D (à gauche) et objet reconstruit (à droite) vus plan par plan

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces premiers résultats encourageants montrent la faisabilité d'exploiter le rayonnement diffusé pour le CND.

La détection du rayonnement diffusé sous différents angles de diffusion peut s'effectuer par un détecteur multi-énergie mais fonctionnant en position fixe. Ceci présente un avantage technique appréciable pour les applications dans lesquelles le déplacement du détecteur

autour du défaut est extrêmement limité, voire même impossible (inspection des pièces d'une centrale nucléaire,...).

### **Références**

- [1] M. K. Nguyen, T. T. Truong, J. Blanc-Talon and L. Pigois, «New defect detection method using scattered radiation», Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Quality Control by Artificial Vision (QCAV), Nagoya, Japan, May 2005.
- [2] M. K. Nguyen and T. T. Truong, «On an Integral Transform and its Inverse in Nuclear Imaging», Journal of Inverse Problems, vol. 18, no.1, pp. 265-277, 2002.