

HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

TOMOGRAPHIE AXIALE TRANSVERSE D'ABSORPTION X EN CONTROLES NON DESTRUCTIFS

J. BRUNOL*, L. GARNERO*, B. GIROUDIERE**

* Institut d'Optique, Université de Paris Sud, Bâtiment 503, 91405 ORSAY.

** E.T.C.A., 16 bis Avenue Prieur de la Côte d'Or, 94114 ARCUEIL.

RESUME

Différents aspects de l'application de la tomographie axiale transverse dans les Contrôles Non Destructifs industriels par rayons X et rayons gamma sont présentés. Nous montrons en particulier qu'un optimum de l'énergie du rayonnement à utiliser peut être trouvé. Cet optimum, qui dépend de l'objet lui-même, correspond à des processus d'interaction prépondérants qui peuvent être soit l'absorption photoélectrique, soit la diffusion Compton. Le choix de l'énergie a donc des conséquences importantes tant au niveau de l'acquisition qu'au niveau de l'interprétation. Certains problèmes statistiques de la reconstruction sont ensuite abordés, et un système d'étude, qui a été réalisé à l'E.T.C.A., est présenté.

SUMMARY

We have developed a transaxial tomographic method applied to Non Destructive Testing Radiography with X and gamma rays. We have shown that an energy optimum can be found. This optimum is object-depending and corresponds to a photoelectric absorption effect or to a Compton scattering attenuation, so that the energy choice influences both detection and diagnosis procedures. Then, statistical aspects of the reconstruction are analyzed and an acquisition and processing device, developed at E.T.C.A., is also presented.

**INTRODUCTION :**

Le contrôle non destructif est une discipline dans laquelle se sont développées depuis longtemps des méthodes variées. La radiographie en est l'un des éléments privilégiés. Cependant, elle souffre, comme la radiologie conventionnelle dans le domaine médical, de limitations inhérentes à l'imagerie de projection. Ainsi dans l'analyse des structures complexes, les superpositions réduisent considérablement le diagnostic du contrôle, et ces inconvénients ne peuvent pas toujours être levés par l'utilisation de vues multiples.

C'est pour cette raison que nous avons proposé l'introduction d'une méthode d'imagerie par reconstruction, basée sur les principes de la tomographie axiale transverse. Elle conduit à l'obtention de coupes de la distribution tridimensionnelle du coefficient d'absorption des rayons X ou γ et donc elle s'affranchit des limitations précédentes.

Au paragraphe I, nous rappellerons brièvement le principe de cette méthode à partir du "Central Slice Theorem".

Les caractères spécifiques du domaine des Contrôles Non Destructifs Industriels seront ensuite abordés (§ II). Nous insisterons essentiellement sur l'adéquation de l'énergie du rayonnement X ou γ à utiliser à la pièce étudiée et sur les rapports de la dynamique d'acquisition à la statistique de l'image reconstruite.

Dans le paragraphe suivant (§ III), nous analyserons les caractéristiques du système expérimental d'étude qui a été construit à l'ETCA, ainsi que les premiers résultats d'étude de linéarité et de dynamique significative à l'enregistrement.

En conclusion enfin, nous envisagerons les perspectives d'application d'un tel système, selon la nature du problème proposé.

I - PRINCIPE DE LA TOMOGRAPHIE AXIALE TRANSVERSE

Cette méthode, encore connue sous le nom de méthode par reconstruction à partir de projections, n'est pas spécifique du domaine X. Elle peut être introduite dès que la notion de projection peut être physiquement définie. C'est ainsi qu'elle a pu être appliquée en médecine nucléaire, pour l'obtention de la répartition tridimensionnelle (3-D) d'un radio-traceur préalablement injecté au patient, et aussi dans l'imagerie ultrasonore ou en RMN.

Différentes voies de présentation de cette méthode très générale sont possibles. Celle qui apparaît aujourd'hui la plus synthétique est basée sur le "Central Slice Theorem".

Projections physiquement définies et Central Slice theorem

Nous considérons dans cette partie une distribution $E(x,y,z)$ quelconque, nous réservant de particulariser le domaine X dans une deuxième phase. Nous dirons que l'opération de projection est physiquement définie (au regard de la distribution E) si, quelle que soit la droite Δ de l'espace, la quantité :

$$I_{\Delta} = \int_{\Delta} E(x,y,z) d\ell \quad (1)$$

a un sens et est accessible à la mesure physique.

Lorsque cette propriété est vérifiée, le "Central Slice Theorem" peut être appliqué et, à partir de mesures uniquement externes à la distribution E , il est possible de calculer $E(x,y,z)$ en chaque point intérieur au volume considéré.

Nous allons présenter l'aspect mathématique de cette reconstruction de manière restreinte en considérant que l'objet de notre étude, à savoir la distribution $E(x,y,z)$, est analysé coupe par coupe (une coupe est définie par z constant = z_0) (Fig.1).

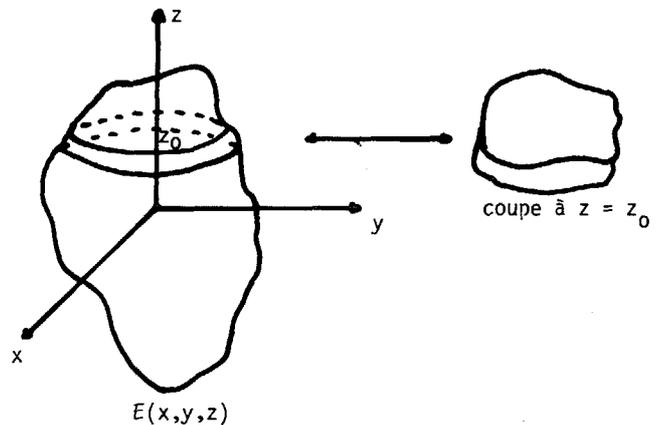


Figure 1. : Analyse d'une distribution 3-D par coupes

La restriction dont nous avons parlé précédemment et qui est d'ailleurs adaptée à l'analyse tomographique X s'exprime de la manière suivante : "Reconstruire ou recalculer la valeur de $E(x,y,z_0)$ pour tout point (x,y) à partir de projections selon des directions contenues dans le plan $z_0 = \text{constante}$ (Fig. 2).

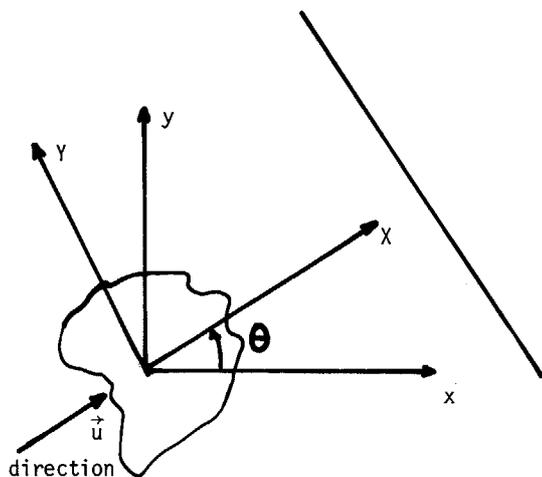


Figure 2. : Analyse d'une coupe particulière

La projection, ou fonction unidimensionnelle (1-D), de la distribution 2-D $E(x,y,z_0)$ selon la direction \vec{u} peut être écrite avec les notations de la figure 2 :

$$p_{\vec{u}}(Y) = \int_{X=-\infty}^{X=+\infty} E(x,y,z_0) dX \quad (2)$$

Soit, si l'on prend la transformée de Fourier 1-D de cette fonction :

$$\tilde{p}_{\vec{u}}(\rho) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\vec{u}}(Y) e^{-2\pi i \rho Y} dY \quad (3)$$

et en tenant compte de (2) :

$$\tilde{p}_{\vec{u}}(\rho) = \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x,y,z_0) e^{-2\pi i \rho Y} dx dy \quad (4)$$

Le changement de variable $(X,Y) \rightarrow (x,y)$ nous permet de réécrire cette expression (4) sous la forme :

$$\begin{aligned} X &= x \cos \theta + y \sin \theta & \theta &= (0x, \vec{u}) \\ Y &= -x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned}$$

$$\tilde{p}_{\vec{u}}(\rho) = \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x,y,z_0) e^{-2\pi i (\alpha x + \beta y)} dx dy$$

avec $\alpha = \rho \cos(\theta + \pi/2)$
 $\beta = \rho \sin(\theta + \pi/2)$

soit en appelant $\tilde{E}(\alpha, \beta, z_0)$ la transformée de Fourier 2-D de $E(x,y,z_0)$ il vient enfin :

$$\tilde{p}_{\vec{u}}(\rho) = \tilde{E}(\rho \cos(\theta + \pi/2), \rho \sin(\theta + \pi/2), z_0) \quad (5)$$

Cette expression fondamentale constitue le Central Slice Theorem. Elle peut être exprimée comme suit : "La transformée de Fourier 1-D de la projection 1-D acquise à l'angle \vec{u} , n'est autre que la fonction obtenue en coupant $\tilde{E}(\alpha, \beta, z_0)$ par la radiale à l'angle $(\theta + \pi/2)$ ".

Nous voyons donc que le multiplexage spatial réalisé par l'opération de projection est décomposable sur une base complète simple (les fréquences spatiales) de $E(x,y,z_0)$.

Le schéma suivant résume cette relation : (projection 1-D) \leftrightarrow (transformée de Fourier 2-D de l'objet).

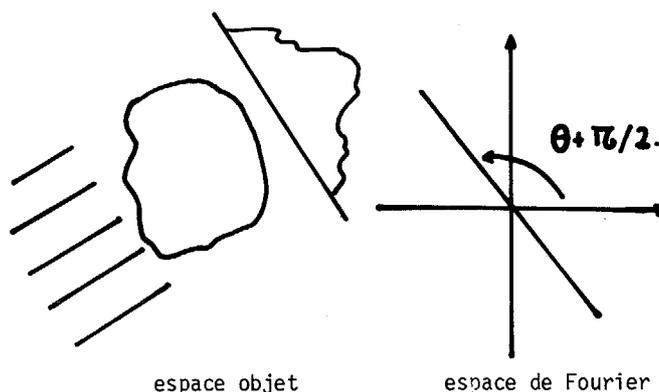


Figure 3 : Synthèse de fréquences spatiales de E à partir d'une projection.

Dès lors, il est possible de synthétiser l'ensemble des fréquences spatiales de l'objet à partir de l'ensemble des projections. Cette opération, connue sous le nom de "Synthèse de Fourier", conduit donc à la transformée de Fourier 2-D de la distribution recherchée et donc, par transformée de Fourier inverse, à la distribution elle-même.

Application à la radiographie

Dans la recherche d'une distribution tridimensionnelle $\mu(x,y,z)$ d'absorption X ou γ analysée par coupes, les conditions précédemment définies sont vérifiées. En effet, en un point quelconque du détecteur, le flux de photons collectés s'exprime sous la forme :

$$N(X) = N_0 e^{-\int_{\Delta} \mu(x,y,z_0) dl}$$

Ceci peut être simplement réexprimé en termes de projection sous la forme :

$$I_{\Delta} = -\log \frac{N(X)}{N_0} = \int_{\Delta} \mu(x,y,z_0) dl$$

Les problèmes, qui vont particulariser l'application de la tomographie axiale transverse aux contrôles non destructifs (CND) par rayons X ou γ , se situent donc essentiellement au niveau de l'acquisition.

Par opposition au domaine médical, dans lequel les absorptions moyennes et les dimensions moyennes des objets varient peu, en CND la plage d'étude est extrêmement vaste, ce qui conduit, comme nous allons le



voir, à des problèmes physiques très différents.

II - PROBLEMES SPECIFIQUES DE LA TOMOGRAPHIE AXIALE PAR RAYONS X OU Y APPLIQUEE AUX CND

Ces problèmes sont essentiellement de trois types

- choix de l'énergie du rayonnement,
- influence de la diffusion Compton dans l'analyse des objets de grandes dimensions,
- dynamique d'acquisition et statistique de l'image reconstruite.

Ce dernier problème est d'ailleurs général, quel que soit le domaine d'application qui a été particularisé.

Choix de l'énergie du rayonnement X ou Y - Influence de la diffusion Compton

Une analyse qualitative simple du problème montre qu'il existe un optimum de ce paramètre. En effet, pour un objet donné :

- Une énergie faible du rayonnement conduit à une forte absorption de l'objet (effet photoélectrique). Il en résulte des données fortement bruitées qui réduisent la dynamique significative à l'enregistrement et donc à la reconstruction.
- Une forte énergie, par opposition, conduit à des données statistiquement satisfaisantes, mais qui portent, du fait de la faible absorption de l'objet, une information (provenant de l'objet) peu importante. Là encore, la reconstruction, pour une raison différente, est peu performante.

Une analyse quantitative du problème conduit à montrer qu'en première approximation au moins cet optimum correspond au maximum de la fonction {1}.

$$f(\mu, L) = \mu L e^{-\mu L/2}$$

expression dans laquelle μ représente l'absorption moyenne de l'objet, et L sa dimension linéaire moyenne.

Cette fonction passe par un maximum pour $\mu L = 2$. Il s'ensuit donc que, pour un objet de dimension moyenne L , l'énergie du rayonnement à utiliser doit être telle que le coefficient moyen d'absorption soit : $\mu(E) = 2/L$.

En pratique, il vient {2} :

- lorsque les objets sont de faibles dimensions, l'énergie se situe dans le domaine photoélectrique ; ce domaine est particulièrement intéressant, car la variation du coefficient d'absorption en fonction de la nature du matériau est importante ; on peut donc espérer, lorsque les objets sont de dimensions réduites, caractériser au moins qualitativement leur composition ;
- par opposition, pour des objets métalliques de grandes dimensions, l'optimum se situe largement dans le domaine Compton ; de plus, il convient d'indiquer

qu'il est beaucoup moins critique que dans le domaine photoélectrique. Le problème est alors celui de la diffusion Compton, qui devient un phénomène parasite extrêmement important : l'objet se comporte comme une véritable source secondaire de photons d'énergie plus faible. Le phénomène est d'ailleurs d'autant plus gênant que l'efficacité quantique de ces photons, au niveau des détecteurs, est souvent beaucoup plus importante que celle des photons primaires eux-mêmes. Il conviendra dès lors de collimater fortement (à la détection) et, lorsque cela est possible, de réaliser une spectrométrie d'énergie.

Dynamique d'acquisition et statistique de l'image reconstruite

Dans cette partie, nous ne nous intéresserons qu'aux fluctuations poissonniennes du flux X détecté. Nous supposerons en particulier que les bruits propres de détection et les erreurs de troncature, à la digitalisation, sont négligeables par rapport aux fluctuations fondamentales précédentes.

Dans cette hypothèse, on peut montrer {2} en première approximation que le rapport signal sur bruit en chaque point de l'image reconstruite peut s'écrire :

$$S/B = \mu L e^{-\mu L/2} \frac{\sqrt{N_0}}{n^{3/4}} \quad (6)$$

expression dans laquelle N_0 représente le nombre total de photons émis par la source, et n le nombre total de cellules de résolution dans la coupe reconstruite.

Cette relation appelle la remarque importante suivante :

Dans une méthode d'imagerie directe (irradiation de la coupe unique, détachée du volume, par un flux X perpendiculaire à la direction de la coupe), pour des caractéristiques identiques d'irradiation, le rapport signal sur bruit (S/B) aurait pour valeur :

$$(S/B)' \neq (N_0/n)^{1/2}$$

Nous voyons donc que, outre le facteur dépendant de l'énergie dont nous avons parlé précédemment, la tomographie axiale introduit une réduction du rapport signal sur bruit de $n^{1/4}$ par rapport à une méthode d'imagerie directe de la coupe unique.

Ainsi, pour obtenir une résolution et des qualités statistiques d'images comparables aux radiographies conventionnelles, et sous la condition que les détecteurs aient la même efficacité quantique, les flux X ou Y ou les temps d'irradiation devront être plus importants. En pratique, nous n'aurons pas besoin d'augmenter fortement les doses d'irradiation, du fait de l'accroissement de sensibilité de détection de défauts à partir de coupes (par rapport aux images intégrées que constituent les projections).

III - CARACTERISTIQUES DU SYSTEME EXPERIMENTAL D'ETUDE

Un premier système {1} permettant l'obtention d'images tomographiques en CND a déjà été réalisé en 1979 à l'E.T.C.A. Il a permis de montrer l'intérêt des examens 3-D radiographiques.

Le deuxième système, dont nous terminons actuellement la mise en oeuvre, a une vocation double beaucoup plus large :

- a) il permet de confronter les calculs théoriques de statistique à l'expérience, et donc de contrôler les procédures d'acquisition et de reconstruction ;
- b) par ailleurs, il permet d'opérer dans une large gamme d'énergie - quelques dizaines de keV à quelques MeV. Cette définition est intéressante à deux titres :

- elle permet d'étudier, selon le domaine d'énergie, l'influence de la diffusion Compton (qui ne peut être appréhendée que difficilement au plan théorique du fait des diffusions multiples) ou, dans le domaine photoélectrique, la composition d'une structure (ou tout au moins sa caractérisation qualitative) ;
- par ailleurs, pour toute application industrielle particulière définie, ce système d'étude doit permettre de contrôler les différentes caractéristiques nécessaires à l'élaboration d'un système performant spécialisé.

Une vue générale de ce système est représentée sur la figure suivante.

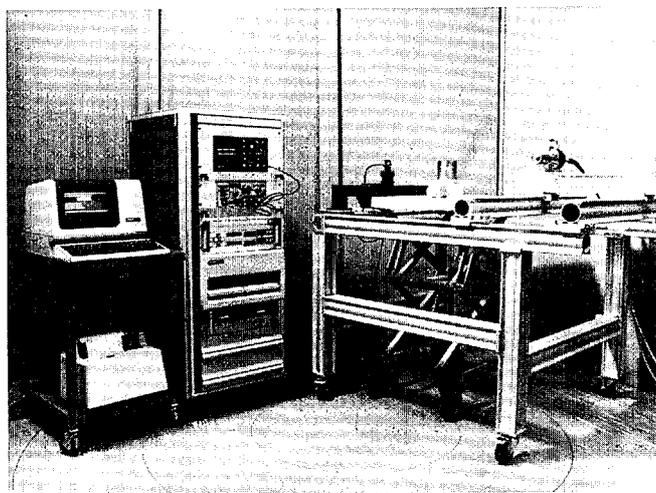


Figure 4 : Vue générale du système d'acquisition et de traitement pour la tomographie axiale transverse.

Notre but n'étant pas, dans cette phase, de privilégier la rapidité de l'acquisition et du traite-

ment, mais l'étude des problèmes fondamentaux posés par ce nouveau domaine d'application. Notre système comprend :

- un banc permettant d'intégrer une irradiation X (tube haute ou basse tension) ou gamma (iridium 192 ou cobalt 60 par exemple)
- une platine permettant la rotation de l'objet (par incrément de $0,1^\circ$)
- une platine supportant le détecteur qui lui-même est interchangeable et adapté, tant en ce qui concerne les problèmes de résolution que d'efficacité quantitative, à l'énergie utilisée.
- un ensemble de numérisation et de traitement de l'information.

Une vue plus détaillée de la partie acquisition du système est représentée sur la figure suivante, elle inclut la source d'irradiation $\gamma(^{192}\text{Ir})$.

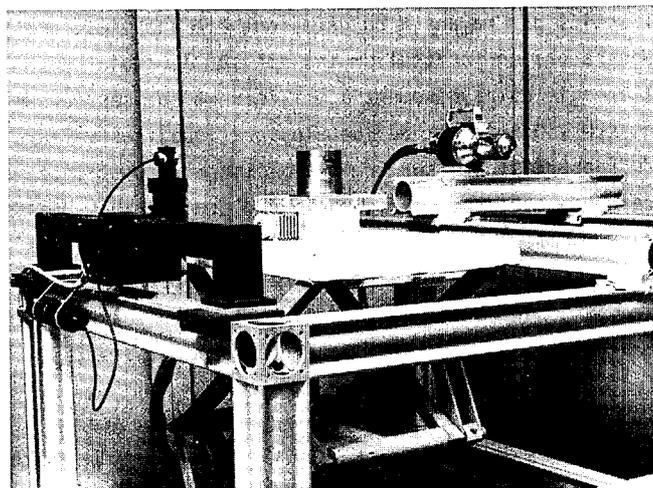


Figure 5. : Irradiation et acquisition des données

Les premiers essais que nous avons réalisés ont eu pour objet de contrôler la linéarité (indispensable si l'on s'oriente, ce qui est notre cas, vers des mesures quantitatives) de la chaîne d'acquisition et de détection et d'analyser les problèmes statistiques à la détection.

Ainsi par exemple dans le cas de l'utilisation d'iridium 192 qui correspond aux caractéristiques suivantes :

^{192}Ir	isotope :	192
	demi-vie :	75j
	gamma émis :	0.31, 0.47, 0.60
	abondance par désintégration:	1.47, 0.67, 0.27



Nous avons pu montrer l'importance du flux Compton réémis par l'objet et qui vient perturber les mesures de manière considérable en l'absence de collimation géométrique ou de discrimination énergétique.

Il nous a par ailleurs été possible de montrer que les acquisitions n'étaient affectées que par les fluctuations de Poisson du flux collecté.

Ainsi dans ce type d'acquisition séquentielle, pour laquelle le nombre total de photons émis par la source au cours de l'étude d'une coupe est 5×10^8 , l'expression (6) nous conduit à un rapport signal sur bruit $(S/B)^2 \approx 400$ pour $n = 128 \times 128$ cellules de résolution, par exemple. Ces nombres sont significatifs de ce qu'on l'on peut obtenir de manière réaliste dans des acquisitions effectives.

CONCLUSION

Certains problèmes posés par l'application de la tomographie axiale transverse aux Contrôles Non Destructifs par rayons X ou gamma ont été analysés. Nous avons en particulier insisté sur le choix de l'énergie du rayonnement à utiliser et sur ses conséquences. D'un point de vue plus pratique, les valeurs du rapport signal sur bruit de l'image reconstruite calculées dans des configurations d'acquisitions réalistes, montrent, que l'apport de cette méthode dans le domaine des CND doit être équivalent à celui des scanners X dans le domaine médical, et ce d'autant plus que la dose d'irradiation n'est en général pas le facteur limitatif.

Par ailleurs, les tests industriels se différencient des examens médicaux par l'existence de nombreuses informations a priori sur les objets d'étude. C'est ainsi que de nouvelles méthodes de traitement prenant en compte ces connaissances initiales peuvent être envisagées. De plus dans de nombreux cas, comme par exemple l'étude de mécanismes, seule l'analyse précise d'une partie de l'objet est nécessaire ; des méthodes de "localisation du rayonnement" développées par L. GARNERO à l'Institut d'Optique pourront alors être appliquées avec profit.

REFERENCES

- {1} J. BRUNOL - "Aspects de la tomographie axiale transverse dans le domaine des contrôles non destructifs", Publication ETCA 8 OR 117, octobre 1980.
- {2} L. GARNERO - "Problèmes statistiques et localisation en imagerie tridimensionnelle", Thèse 3ème cycle, Orsay, Mars 1981.