

## Étude et correction des distorsions d'efficacité géométrique du collimateur « Pin-Hole » à la gammacamera

PAR

Jean-Claude DEPRESSEUX \*

*Université de Liège, Institut de Médecine,  
Département de Clinique et de Séméiologie médicale  
(Section de Médecine nucléaire). Dir. Prof. A. Nizet  
et Service de Neurochirurgie, Dir. Prof. Bonnal (Belgique)*

### RÉSUMÉ

Contrairement aux autres dispositifs de scintigraphie, la « pin-hole camera » de ANGIER présente des profils d'isoefficacité géométrique qui ne sont parallèles, ni entre eux, ni au plan de détection.

L'étude théorique montre que, à chaque point du cristal ou de l'image, correspond une distorsion d'efficacité géométrique donnée. Celle-ci, de beaucoup plus importante que les distorsions de détection, est égale au produit de deux distorsions principales :

1. la distorsion par pénombre, dépendant de l'énergie des photons incidents, du diamètre de l'ouverture et de la nature de ses berges ;
2. la distorsion sinusoidale, indépendante de ces variables.

Une méthode de correction est proposée où les facteurs de correction sont appliqués à l'image scintigraphique ou aux courbes dynamiques par l'intermédiaire d'une mémoire à 4096 canaux ; après traitement, les profils d'isoefficacité de comptage sont parallèles entre eux.

La comparaison quantitative des contenus statiques ou dynamiques de régions non-homologues de l'image est ainsi rendu possible.

### SUMMARY

*The pin-hole gammacamera, contrarily to other scanning devices, gives collimator efficiency curves that are not parallel. The theoretical approach demonstrates a definite coefficient of geometrical efficiency distortion for each point of the crystal or of the displayed image.*

\* Aspirant au Fonds National Belge de la Recherche scientifique.

The geometrical distortion is of predominant importance as compared to the detection inhomogeneity due to the image converter; it is equal to the product of two main factors:

1. the penetration distortion, a function of the detection spectrometry, of the pin-hole aperture and of the nature of the absorbing material;
2. the sinusoidal distortion.

The necessity to correct the geometrical distortion is emphasized, and a method of correction is presented, using a multichannel memory and a matrix of correction factors.

Les détecteurs stationnaires du type de la gammacaméra à scintillations (ANGER, 1958 ; ANGER et ROSENTHAL, 1959) permettent à l'heure actuelle l'étude conjuguée de la distribution spatiale des traceurs radio-actifs et celle de leur dynamique globale ou régionale.

Des programmes de calcul et l'analyse multiparamétrique de l'information fournie par la gammacaméra sont utilisés pour corriger les inhomogénéités de réponse du signal électronique à un quantum incident, selon les coordonnées X et Y.

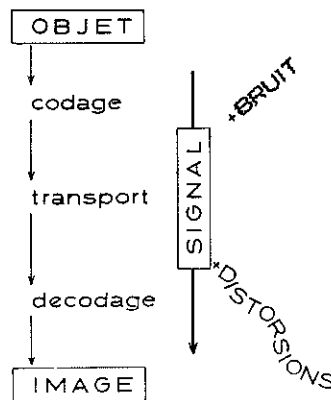


FIG. 1. — Le signal, lors de son codage et de son transport subit des dégradations (bruit) et des distorsions.

Nous présentons ici le principe d'une nouvelle application possible de tels dispositifs pour la correction des distorsions géométriques de l'image : ils permettent en particulier de corriger l'importante *perte d'efficacité géométrique du détecteur qui survient en fonction de l'angle incident lors de l'usage d'une collimation par « pin-hole »*.

Tout codage et tout transport de signaux s'accompagnent non seulement d'une diminution du rapport signal-bruit, mais aussi de distorsions de l'infor-

mation. Celles-ci peuvent parfois être *corrigées* lors du décodage ou lors d'un traitement ultérieur (Figure 1).

L'application de ces principes à la scintigraphie quantitative par gammacaméra permet d'en améliorer les performances. Le tableau I rappelle en effet quelles sont les principales distorsions subies par l'image captée par une « pin-hole gammacaméra ». Celles-ci sont d'une part dues à la géométrie de détection (projection sténopéique) et sont d'autre part inhérentes au détecteur proprement dit et aux dispositifs de multiplication du signal.

Si ces déformations peuvent ne pas gêner l'interprétation morphologique des images, elles sont par contre une importante source d'erreur lorsque l'information est traitée quantitativement (ANGER, 1967).

Une étude de la performance du collimateur sténopéique se révèle donc nécessaire, avec mise au point de méthodes de correction adéquates.

### ÉTUDE THÉORIQUE DES DISTORSIONS D'EFFICACITÉ GÉOMÉTRIQUE

Contrairement à ceux des autres dispositifs de scintigraphie, que ce soit la scintigraphie rectilinéaire ou le détecteur stationnaire avec grille collimatrice, les profils d'isoefficacité géométrique d'une caméra avec « pin-hole » ne sont parallèles, ni entre eux, ni au plan principal de l'organe.

Cette distorsion d'efficacité géométrique est le produit de deux facteurs, d'une part de la *distorsion sinusoidale*, bien connue, et d'autre part de la *distorsion par pénombre*, décrite ci-dessous.

TABLEAU I

**Les principales distorsions de l'image captée par une caméra à scintillations avec collimation sténopéique**

1. *DISTORSIONS DE DIMENSION* ( $x, y$ ).
  - a) Géométrie.
    - Distorsion de forme (projection sténopéique).
    - « pin-cushion-distortion » (MALLARD et al., 1963).
  - b) Détection et imagerie.
    - Réduction de taille.
  
2. *DISTORSIONS DE COMPTAGE* ( $z$ ).
  - a) Géométrie.
    - Distorsion sinusoidale.
    - Distorsion par pénombre.

## b) Détection et imagerie.

- Distorsion d'efficacité de détection photoélectrique (MALLARD et al., 1963 ; CRADDUCK et al., 1965).
- « Coma distortion » (KUHL, 1968).
- Inhomogénéité du champ des photomultiplicateurs.

A. — *Distorsion sinusoidale.*

Si, dans un premier pas du raisonnement, l'ouverture sténopéique est supposée parfaite (si son diamètre efficace est indépendant de l'incidence du rayonnement détecté), on peut admettre qu'une source punctiforme, quelle que soit sa position dans l'espace, projette sur la face antérieure du cristal une image circulaire. L'efficacité géométrique ponctuelle du détecteur,  $\epsilon_g$ , est proportionnelle à l'angle solide au sommet du cône de détection.

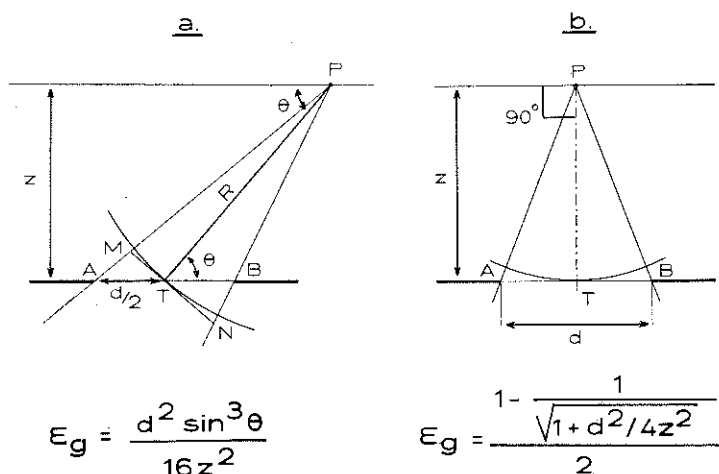


FIG. 2. — Calcul de l'efficacité géométrique de détection d'une source punctiforme P à travers l'ouverture d'un sténopé AB :

- a) pour une incidence oblique.  
 b) pour une incidence perpendiculaire.

Si la source se déplace selon un axe parallèle au plan frontal du cristal (figure 2 a), le cône de détection est oblique à base circulaire et intercepte sur la sphère de centre P une calotte dont le contour n'est pas une figure plane. Le calcul de l'aire de cette surface sphérique fait intervenir des intégrales multiples, mais si l'on assimile cette aire à celle de l'ellipse d'intersection entre la surface latérale du cône considéré et le plan tangent à la sphère au point T, une formule approximative a été publiée (MALLARD et MYERS, 1963) donnant, en fonction de l'angle incident  $\theta$ , l'efficacité géométrique

de détection des points d'un plan parallèle au plan diaphragmatique de l'ouverture et éloigné de celui-ci d'une distance  $z$ .

$$\varepsilon g \simeq \frac{d_e^2 \sin^3 \theta}{16z^2} \quad (1)$$

où  $d_e$  est le diamètre efficace, supposé constant par rapport à  $\theta$ , de l'ouverture du collimateur.

Cette simplification du calcul des sections coniques entraîne une erreur qui peut être appréciée ; elle est maximum pour  $\theta = 90^\circ$  (fig. 2 b). Or, pour cette incidence perpendiculaire, le calcul de  $\varepsilon g$  se fait aisément avec précision, car le cône de détection est droit et intercepte sur la sphère décrite ci-dessus (fig. 2 a) une calotte sphérique dont l'aire est facilement calculable :

$$\varepsilon g = \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + d_e^2/4z^2}}}{2}$$

Or, pour  $\theta = 90^\circ$ , la formule approximative (1) devient

$$\varepsilon g \simeq \frac{d^2}{16z^2}$$

L'erreur relative maximum commise par l'application de la formule 1 peut être ainsi calculée et quelques valeurs en sont données dans le tableau II. Elle est négligeable pour les valeurs de  $d_e$  et de  $z$  utilisées en pratique.

Cette formule classique, contenant trois variables, peut être généralisée. En effet, l'efficacité géométrique  $\varepsilon g$  exprimée en fonction d'une valeur fixée arbitrairement, par exemple, sur la médiatrice du cristal, dans le plan frontal du collimateur pin-hole, est indépendante du diamètre de l'ouverture :

$$\varepsilon g(\theta, z) = \varepsilon g(\theta = 90^\circ, z_0) \frac{z_0^2}{z^2} \sin^3 \theta$$

où  $z_0$  est la distance du plan de référence au centre de cette ouverture. La figure 2 montre les profils d'efficacité géométrique pour diverses distances focales ; valables pour tout diamètre  $d_e$ , ils accusent une importante perte de comptage dans les incidences obliques.

Une plus grande généralisation est encore possible en exprimant les profils d'efficacité par rapport à leur valeur maximum sur l'axe médiateur, dans le même plan :

$$\varepsilon g(\theta, z) = \varepsilon g(\theta = 90^\circ, z) \sin^3 \theta$$

Tous les profils d'efficacité géométrique de tous les collimateurs sténopéiques sont ainsi exprimés par une seule courbe, ils sont symétriques autour de l'axe médiateur du sténopé et ne dépendent ni du diamètre de l'ouverture, supposé constant, ni de la distance focale, ni de la spectrométrie de détection ; la seule variable est l'angle incident  $\theta$ .

Or, pour une hauteur donnée du cône collimateur, fixée pour chaque gammacamera, l'angle  $\theta$  détermine entièrement la valeur de la distance au centre du cristal du point incident central de sources punctiformes. Inversement, à chaque point du cristal, ou de l'image, quel que soit le diamètre de l'ouverture utilisée, correspond une distorsion d'efficacité géométrique pro-

TABLEAU II

Valeurs maximum de l'erreur par excès commise dans le calcul de l'efficacité géométrique du collimateur « pin-hole » par la formule 1

$f$  = distance du point-objet au front de la douille sténopéique.  
 $d$  = diamètre de l'ouverture sténopéique.

CALCUL DE L'EFFICACITE GEOMETRIQUE DU COLLIMATEUR "PIN - HOLE"

$d = 1/2$ "		$\theta = 90^\circ$	$d = 1/4$ "	
$f$ (mm)	erreur relative par excès (%)		$f$ (mm)	erreur relative par excès (%)
0	6,80		0	1,63
20	1,75		20	0,44
40	0,80		40	0,20
60	0,46		60	0,11
80	0,29		80	0,07
100	0,21		100	0,05
$d = 1/8$ "			$d = 1/16$ "	
0	0,41		0	0,1
20	0,11		20	0,03
40	0,05		40	0,02
60	0,03		60	—
80	0,02		80	—
100			100	—

portionnelle, par rapport à l'efficacité centrale, au cube du sinus de l'angle  $\theta$  incident. A chaque point de l'image s'applique donc un *facteur de correction géométrique sinusoidal* donné.

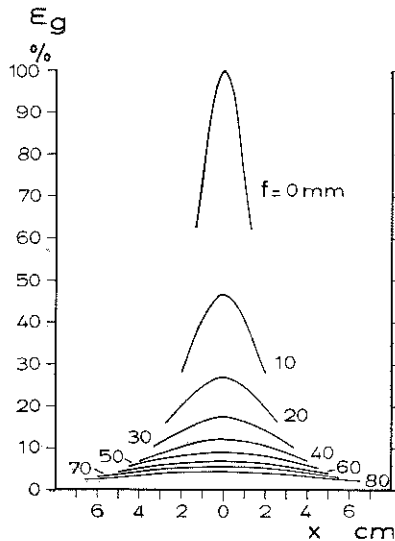


FIG. 3. — Profils d'efficacité géométrique  $e_g$  des collimateurs sténopéiques, en fonction de la distance focale  $f$  du plan détecté au plan diaphragmatique de l'ouverture et de la distance  $x$  à son axe médiateur.

### B. — Distorsion d'efficacité par pénombre.

Un second facteur, important, de distorsion d'efficacité géométrique doit être souligné : il s'agit de la diminution, avec l'angle incident, du diamètre efficace de l'ouverture punctiforme, cette distorsion intervenant de manière d'autant plus importante que l'efficacité de détection géométrique est proportionnelle au carré de ce diamètre (formule III).

Il est bien connu que ce diamètre efficace est supérieur au diamètre réel puisque la forme même des berges du collimateur permet une certaine pénétration des photons gamma (MALLARD et MYERS, 1963).

Cette pénétration entraîne une perte de résolution du collimateur, mais surtout, modifie l'efficacité géométrique de celui-ci.

C'est lorsque les radiations incidentes sont perpendiculaires à l'ouverture que la pénétration est maximale ; elle est isotrope autour de son centre et l'on peut calculer le diamètre efficace permettant de construire l'angle solide de détection. Cette valeur est donnée dans la littérature (ANGER,

1967). Celle-ci est fonction de l'énergie incidente, de la nature de l'alliage, du diamètre et de l'angle d'ouverture du collimateur.

Cependant, lorsque l'angle incident diminue jusqu'à sa valeur minimum, en général  $70^\circ$ , on note une diminution notable et anisotrope de la valeur du diamètre efficace, jusqu'à une valeur voisine de celle du diamètre réel et il y correspond une diminution notable de l'efficacité géométrique qui s'ajoute à celle due à la distorsion sinusoïdale. Cette distorsion est donc anisotrope autour de l'axe de symétrie du collimateur et ses profils, contrairement à ceux de la distorsion sinusoïdale, dépendent de la substance du collimateur, de l'énergie incidente, de la spectrométrie de détection et du diamètre réel de l'ouverture punctiforme.

Dans le cas de la détection du pic d'absorption totale du rayonnement gamma du  $^{99m}\text{Tc}$ , pour une ouverture de 1/8 pouce de diamètre et avec un collimateur au tungstène, on peut prévoir que la perte d'efficacité géométrique due à cette distorsion est, pour une incidence de  $70^\circ$ , de l'ordre de 10 % de la valeur centrale. Cette perte relative est d'autant plus importante que l'énergie des photons incidents est élevée.

Ici encore, pour une hauteur donnée du cône collimateur, la distorsion est entièrement déterminée par l'angle incident  $\theta$ ; pour un collimateur et une spectrométrie donnés, à chaque point du cristal et de l'image, correspond un *facteur de correction de pénombre* fixe, ne dépendant pas de la distance à laquelle l'objet radio-actif est détecté.

Compte tenu de ces deux facteurs de distorsion, l'efficacité géométrique du collimateur « pin-hole » peut être exprimée d'une manière très générale en fonction de la seule variable  $\theta$  :

$$\varepsilon_g(\theta, z) = \varepsilon_g(\theta = 90^\circ, z) \sin^3 \theta \frac{d_e^2(\theta)}{d_e^2(90^\circ)}$$

Les deux coefficients de distorsion géométrique sont définis en fonction de l'angle incident ; ils pourraient l'être en fonction de la distance au centre du point-image  $x$ , puisque pour une hauteur  $h$  du cône de collimation, on peut écrire

$$x = \frac{h}{\text{tg } \theta}$$

## ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES MÉTHODES DE CORRECTION

L'étude est réalisée sur une gammacamera Nuclear Enterprises, avec cristal de NaI de  $12'' \times 1/2''$ , couplée à un ensemble de cinéscintigraphie numérique Intertechnique, comprenant notamment une mémoire d'acquisition et de traitement de 4096 canaux, avec visualisation permanente sur oscilloscope et possibilité d'affichage de leur contenu selon un mode statique ou dynamique.



Le traitement de l'information mise en mémoire est réalisé par un calculateur numérique rapide MULTI-8, avec programme, notamment pour la correction d'inhomogénéité du champ de la caméra (MORRISON et al., 1971). Ce programme permet de calculer et de mettre en mémoire une matrice de facteurs de correction égaux, pour chaque point de la mémoire d'acquisition, au rapport entre la valeur individuelle du contenu de chaque canal et la moyenne arithmétique des contenus de tous les canaux. Appliqués en multiplicateurs à l'image ayant servi à leur calcul, ces facteurs permettent d'*homogénéiser* celle-ci.

Un fantôme « homogène » classique, calibré en épaisseur, est rempli d'une solution du même isotope, puis détecté avec la même spectrométrie que pour les scintigraphies à corriger, avec la grille collimatrice ou le collimateur sténopéique.

L'image obtenue, dont les inhomogénéités sont d'origine statistique, électronique et géométrique, permet de calculer une matrice de facteurs de correction selon le mode décrit ci-dessus.

L'efficacité de détection de la caméra à scintillations est mesurée au moyen d'une source de  $^{99m}\text{Tc}$  d'environ 0,5 mm de diamètre, posée sur film paraffiné, déplacée sous la caméra selon des plans parallèles et détectée avec une discrimination d'amplitude de 30 % de la valeur du pic photo-électrique.

Les profils d'efficacité globale du détecteur collimaté sont ainsi déterminés. Si on les normalise par rapport à leur valeur centrale et les exprime en fonction de l'angle  $\theta$ , ils se superposent d'une manière satisfaisante, quelle que soit la valeur de  $z$  et celle du diamètre de l'ouverture, avec une énergie de photons gamma et une spectrométrie de détection données.

Divers modes de correction d'un tel profil d'efficacité globale ont été comparés (fig. 4).

A. — La division des valeurs brutes par le cube de l'angle incident corrige en partie la distorsion, mais il persiste une chute centrifuge d'efficacité atteignant environ 92 % de la valeur centrale. Celle-ci résulte de facteurs de géométrie et de détection :

a) l'inhomogénéité de réponse du détecteur entraîne, sur les zones de projection de la source utilisée, des erreurs pouvant atteindre 5 % ;

b) l'augmentation apparente d'épaisseur du cristal dans les incidences obliques n'entraîne, dans le cas d'une énergie gamma de 140 KeV, aucune augmentation notable d'une efficacité de détection photo-électrique déjà proche du maximum ;

c) la distorsion par pénombre due à la diminution avec l'angle incident du diamètre efficace de l'iris du pin-hole n'est pas corrigée. Elle entraîne, dans ce cas, on l'a vu, une perte périphérique d'efficacité pouvant atteindre 10 % de la valeur centrale.

B. — Les valeurs d'efficacité globale ont également été corrigées au moyen

de la matrice de facteurs d'homogénéisation de l'image d'un fantôme homogène capté au sténopé (Figure 4, Nxph). Dans ce cas, le fantôme de 20 mm d'épaisseur, rempli d'une solution de  $^{99m}\text{Tc}$ -pertechnétate est scintigraphié à diverses distances du « pin-hole », avec une spectrométrie identique à celle de la détection de la source punctiforme. Les facteurs de correction d'inhomogénéité en sont mis en mémoire et permettent de corriger les taux de comptage des sources punctiformes. La figure 4 montre le profil des comptage corrigé par un fantôme à 8 cm du front du « pin-hole ».

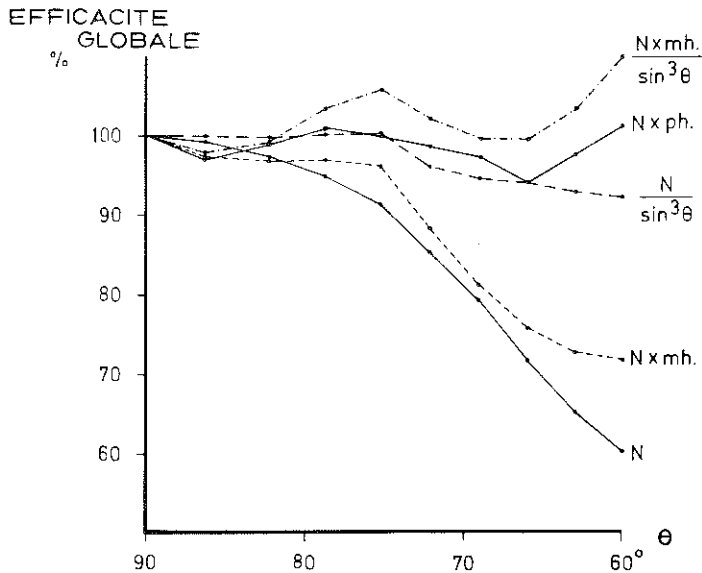


FIG. 4. — ( $N$ ) : Profil d'efficacité globale de détection de la gammacamera avec « pin-hole » de 1/8" en fonction de l'angle incident

Profils corrigés :

- x ph : par les facteurs de correction d'un fantôme homogène capté au « pin-hole ».
- x mh : par les facteurs de correction d'un fantôme homogène capté avec grille collimatrice.

Les inhomogénéités électroniques sont dans ce cas prises en compte. La distorsion géométrique sinusoïdale, la distorsion par pénombre sont corrigées.

Cette méthode est plus satisfaisante sur le plan de la statistique de comptage. En effet, les facteurs de correction n'intervenant pas exclusivement en multiplicateurs, mais également en diviseurs, l'erreur statistique absolue moyenne est moindre que dans le cas de la multiplication par  $1/\sin^3 \theta$ .

C. — La correction par les facteurs d'homogénéisation de l'image d'un fantôme homogène capté avec grille collimatrice, suivie de l'application du facteur géométrique n'est pas satisfaisante. (Figure 4,  $\frac{N \times mh}{\sin^3 \theta}$ )

## CONCLUSIONS

Dans la scintigraphie par la « pin-hole gammacaméra », il existe une importante distorsion des profils d'efficacité géométrique due à la diminution de l'angle solide de détection en fonction de l'angle incident.

Cette efficacité, dans un plan parallèle au cristal, dépend uniquement, par rapport à sa valeur centrale, de l'angle incident  $\theta$  et est égale au produit du cube du sinus de cet angle (distorsion sinusoïdale), et d'un facteur prenant en compte la diminution concomitante de diamètre effectif de l'ouverture du « pin-hole » (distorsion par pénombre).

Les profils d'isoefficacité géométrique ne permettent pas, dans ce cas, une détection correcte du volume-objet et l'étude expérimentale démontre que les distorsions de géométrie sont beaucoup plus importantes que les inhomogénéités de détection.

Parmi les méthodes de correction proposées, c'est celle utilisant la matrice de facteurs d'homogénéisations de l'image d'un fantôme homogène scintigraphié au « pin-hole » qui paraît la plus satisfaisante. Au cours de cette scintigraphie préalable, étant donné l'importance quantitative des facteurs géométriques démontrés ci-dessus, il convient d'assurer un strict parallélisme entre le fantôme et le front du cristal avec une distance focale le plus grande possible.

Cette étude expérimentale démontre l'absolue nécessité de corriger les distorsions géométriques dans toute analyse quantitative à la caméra avec « pin-hole ». Ceci s'applique également aux examens morphologiques car, *si on en néglige les aspects quantitatifs, la Morphologie ne restera que l'imparfaite science des apparences.*

## BIBLIOGRAPHIE

- ANGER, H. O. — Scintillation camera. *Rev. Sci. Instr.*, 1958, **29**: 27.
- ANGER, H. O. and ROSENTHAL, D. J. — Scintillation camera and positron camera. *Proc. Seminar. Med. Radioisotope scanning*, Vienna, IAEA, 1959, 59-75.
- ANGER, H. O. — Radioisotope cameras. dans : *Instrumentation in nuclear Medicine*, Edited by HINE, New York, 1967, 485-552.
- CRADDOCK, T. D. and FEDORUK, S. O. — An experimental determination of the overall spatial resolution of a scintillation camera. *Phys. Med. Biol.*, 1965, **10**: 67-76.
- KUHL, D. E. — Physical principles of radionuclide scanning. dans : *Principles of nuclear Medicine*, Edited by WAGNER, Philadelphia, 1968, 184-220.
- MALLARD, J. R. and MYERS, M. J. — The performance of a gamma for the visualisation of radioactive isotopes *in vivo*. *Phys. Med. Biol.*, 1963, **8**: 165-182.
- MORRISON, L. M., BRUNO, F. P. et MAUDERLI, W. — Sources of gamma image inequalities. *J. nucl. Med.*, 1971, **12**: 785-791.