



HAL
open science

Reconstruction multiclasse pour l'imagerie TEP 3γ

Mehdi Latif, Jérôme Idier, Thomas Carlier, Simon Stute

► **To cite this version:**

Mehdi Latif, Jérôme Idier, Thomas Carlier, Simon Stute. Reconstruction multiclasse pour l'imagerie TEP 3γ . GRETSI'23, Aug 2023, Grenoble, France. hal-04191865

HAL Id: hal-04191865

<https://hal.science/hal-04191865v1>

Submitted on 30 Aug 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

La Tomographie par émission de positon (TEP)

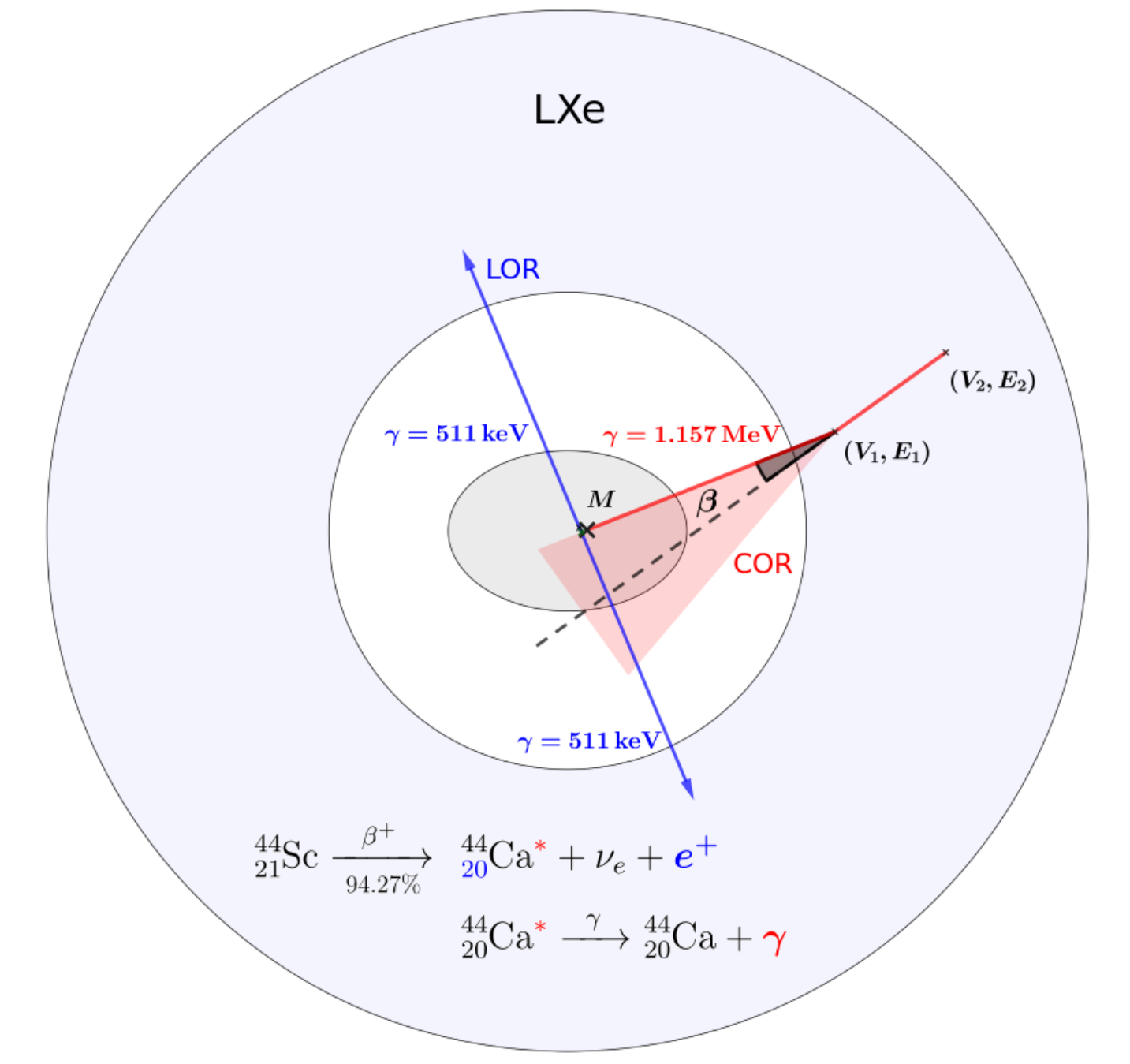
Méthode d'imagerie fonctionnelle basée sur l'annihilation positons/électrons : l'émission dos-à-dos de deux photons (γ) à 511 keV ;

- Détection en coïncidence des γ à 511 keV : localisation de l'annihilation le long d'une ligne de réponse (LOR) ;
- ⇒ Reconstruction tomographique : obtenir une image de la distribution radioactive à partir d'une collection de coïncidences.
- Amélioration de la localisation : mesure du Temps de Vol Δt (TOF) et estimation de la distance / centre de la LOR $\sim \mathcal{N}(\frac{c\Delta t}{2}, \sigma^2)$

La TEP 3-photons (3γ)

Utilisation de radionucléides émettant quasi simultanément un positon et un troisième γ

- Imagerie Compton : l'origine du troisième γ localisée sur la surface d'un cône de réponse (COR) ;
- ⇒ Détection d'un événement 3γ : l'origine de la désintégration est proche de l'intersection LOR/COR.
- Exemples de prototypes précliniques : XEMIS2 [1], WGI [2]



Classes de détection en imagerie TEP 3γ

En une seule acquisition, il est possible d'obtenir :

- Une classe d'événements complets : détections de $3\gamma \rightsquigarrow$ Intersection LOR/COR ;
- Des classes d'événements partiels : détections de 1γ ou $2\gamma \rightsquigarrow$ LOR ou CORs ;
- ⇒ Reconstruction multiclassée en TEP 3γ :
 - Séparée sur chaque classe et combinaison pondérée des images [3] ;
 - Conversion des détections 3γ en données TOF-TEP [4].

Notre objectif

Proposer un cadre général théorique pour la reconstruction conjointe [5] d'une image unique à partir d'événements multiclassés et l'appliquer à XEMIS2.

Inférence et reconstruction multiclassée

Formulation

$\lambda := (\lambda_j)_{j \in [1, J]}$ une distribution de l'activité radioactive moyenne (nombres d'émissions) ;
 $\mathbf{y} := \{\mathbf{y}_n\}_{n \in [1, N]}$ les données collectées i.e. coordonnées d'interaction, dépôts d'énergie ;
 $K \in \mathbb{N}^*$ les classes disjointes d'événements physiquement indépendants.

Résoudre le problème de reconstruction tomographique :

$$\hat{\lambda}^{\text{ML}} = \underset{\lambda \in \mathbb{R}_+^J}{\text{argmax}} \ln \mathcal{L}(\lambda | \mathbf{y})$$

⇒ Algorithme itératif Maximum likelihood expectation maximization (MLEM) [6].

Hypothèses

1. Chaque événement observé \mathbf{y}_n peut être attribué à une seule classe $k \in [1, K]$;
2. Chaque classe k est caractérisée par une densité de probabilité d'obtenir \mathbf{y}^k depuis λ ;

$$\mathbf{y} := \bigcup_{k=1}^K \{\mathbf{y}_n^k\}_{n \in [1, N^k]}, \mathbf{y}_n^k \in \mathbb{R}^{d^k} \text{ et } \mathbf{y}_n^k \sim p^k(\mathbf{y}^k | \lambda) \forall k \in [1, K]$$

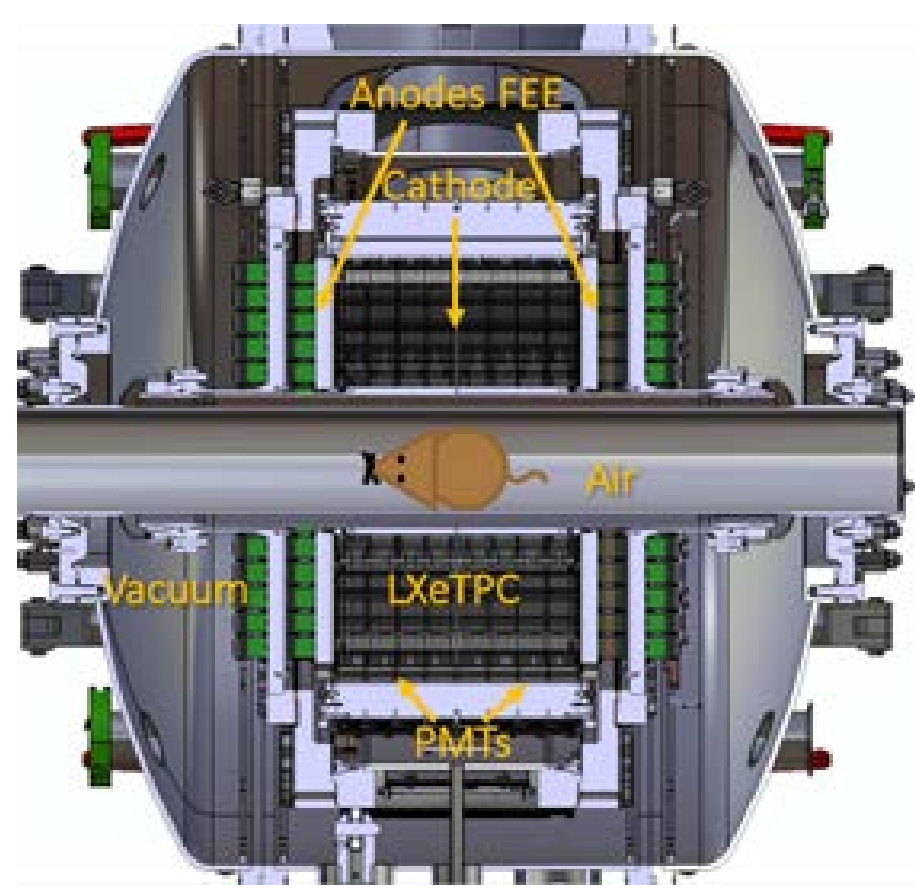
Expression de la log-vraisemblance

Si $p^k(\mathbf{y}^k | \lambda) \sim \mathcal{P}(\sum_j \lambda_j s_j^k)$ alors la fonction de log-vraisemblance multiclassée est la somme des log-vraisemblances sur chaque classe :

$$l(\lambda | \mathbf{y}) = \sum_{k=1}^K l^k(\lambda | \mathbf{y}^k) \text{ avec } l^k(\lambda | \mathbf{y}^k) = \sum_{n=1}^{N^k} \ln \left(\sum_{j=1}^J A_j^k(\mathbf{y}_n^k) \lambda_j \right) - N^k \ln \left(\sum_{j=1}^J \lambda_j s_j^k \right)$$

Application à la caméra XEMIS2

Le prototype préclinique XEMIS2 [1]



Une caméra cylindrique corps entier dédiée à l'imagerie 3γ à faible activité utilisant le xénon liquide (LXe) comme unique milieu de détection continu.

Dimensions :

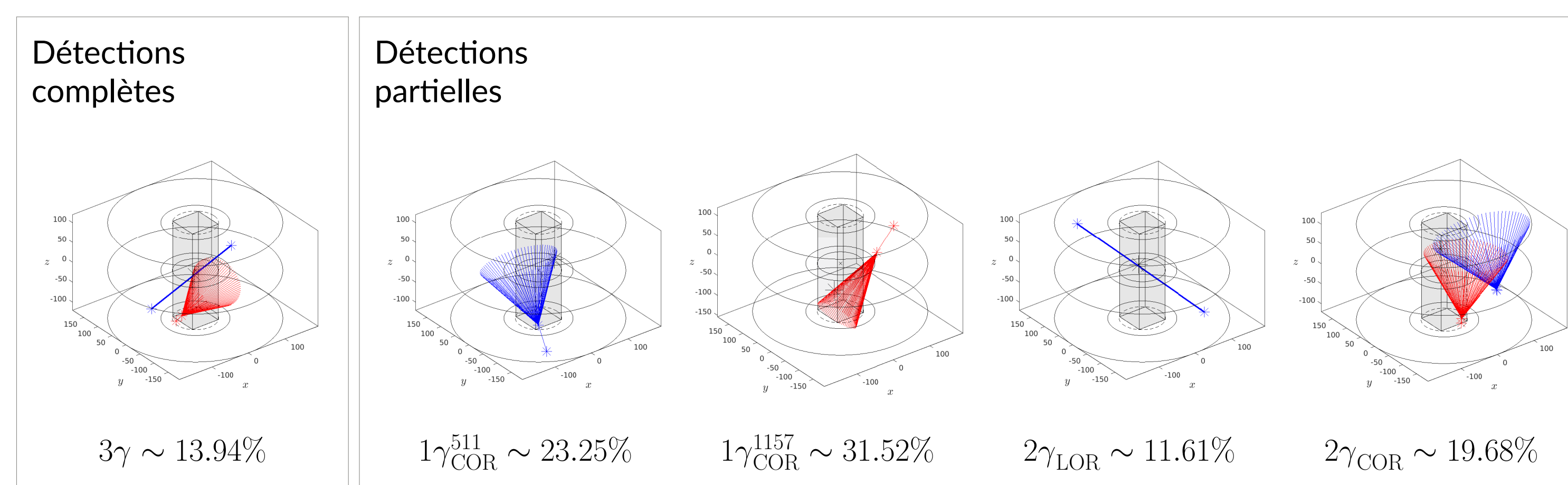
Zone de détection : $L=240$ mm, $R^{\text{in}}=70$ mm, $R^{\text{out}}=190$ mm ;

Champ de vue (FOV) : $L=240$ mm, $R^{\text{fov}}=50$ mm.

Résolution énergétique : 9% FWHM à 511 keV

Classes d'événements

En fonction de l'énergie des photons détectés, $K = 5$ classes d'événements sont possibles :



Détections obtenues avec POLLUX où $\gamma = 511$ keV et $\gamma = 1.1157$ MeV

Fantôme cylindrique ($R=45$ mm) avec 4 sphères chaudes ($r=4:1$), 2 sphères froides ($r=1:10$) à $z = \pm 15$ mm ;
 Simulations $M = 10^7$ émissions 3γ .

$A_j^k(\mathbf{y}_n^k)$: la matrice du système de la classe k exprimée comme une fonction continue ;
 s_j^k : la sensibilité du voxel j pour la classe k sur le domaine de détection continue Ω^k :

$$s_j^k = \int_{v \in \Omega^k} A_j^k(v) dv \quad \forall j \in [1, J], k \in [1, K]$$

Matrice d'information de Fisher

Si $p^k(\mathbf{y}^k | \lambda)$ satisfait aux conditions de régularité, l'expression FIM proposée pour l'imagerie TEP [7] peut être généralisée :

$$\mathbf{I}(\lambda) = \sum_k \mathbf{I}^k(\lambda) \text{ avec } [\mathbf{I}^k(\lambda)]_{i,j} = -N^k \mathbb{E}_{\mathbf{y}^k | \lambda} \left(\frac{\partial^2 \ln p^k(\mathbf{y}^k | \lambda)}{\partial \lambda_i \partial \lambda_j} \right)$$

Les contributions de chaque classe $\mathbf{I}^k(\lambda)$ peuvent être quantifiées séparément.

Algorithme List-Mode MLEM

Une extension du LM-MLEM [7, 8] permettant de tenir compte simultanément des K classes conduit à l'équation de mise à jour suivante :

$$\hat{\lambda}_j^{(t+1)} = \hat{\lambda}_j^{(t)} \times \frac{1}{\sum_k s_j^k} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N^k} \frac{A_j^k(\mathbf{y}_n^k)}{\sum_{j'} A_{j'}^k(\mathbf{y}_n^k) \hat{\lambda}_{j'}^{(t)} + \epsilon_n^k} \quad \forall j \in [1, J]$$

Propriétés :

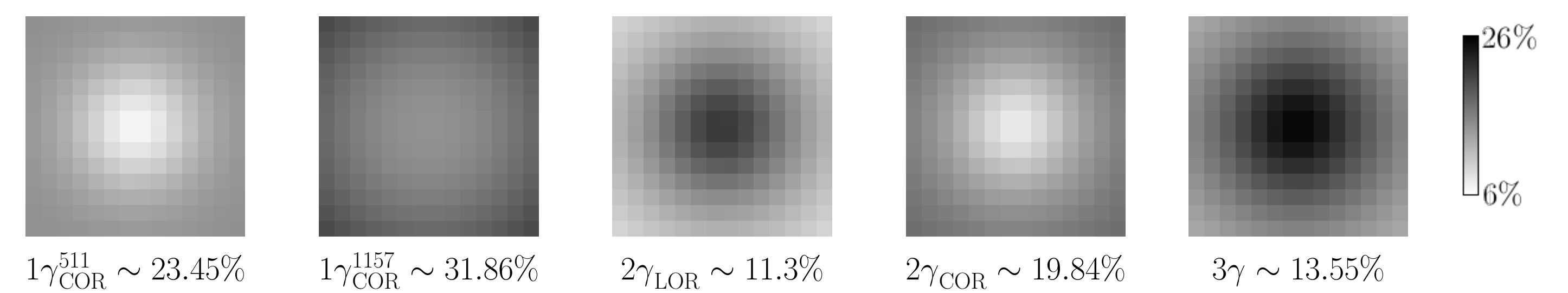
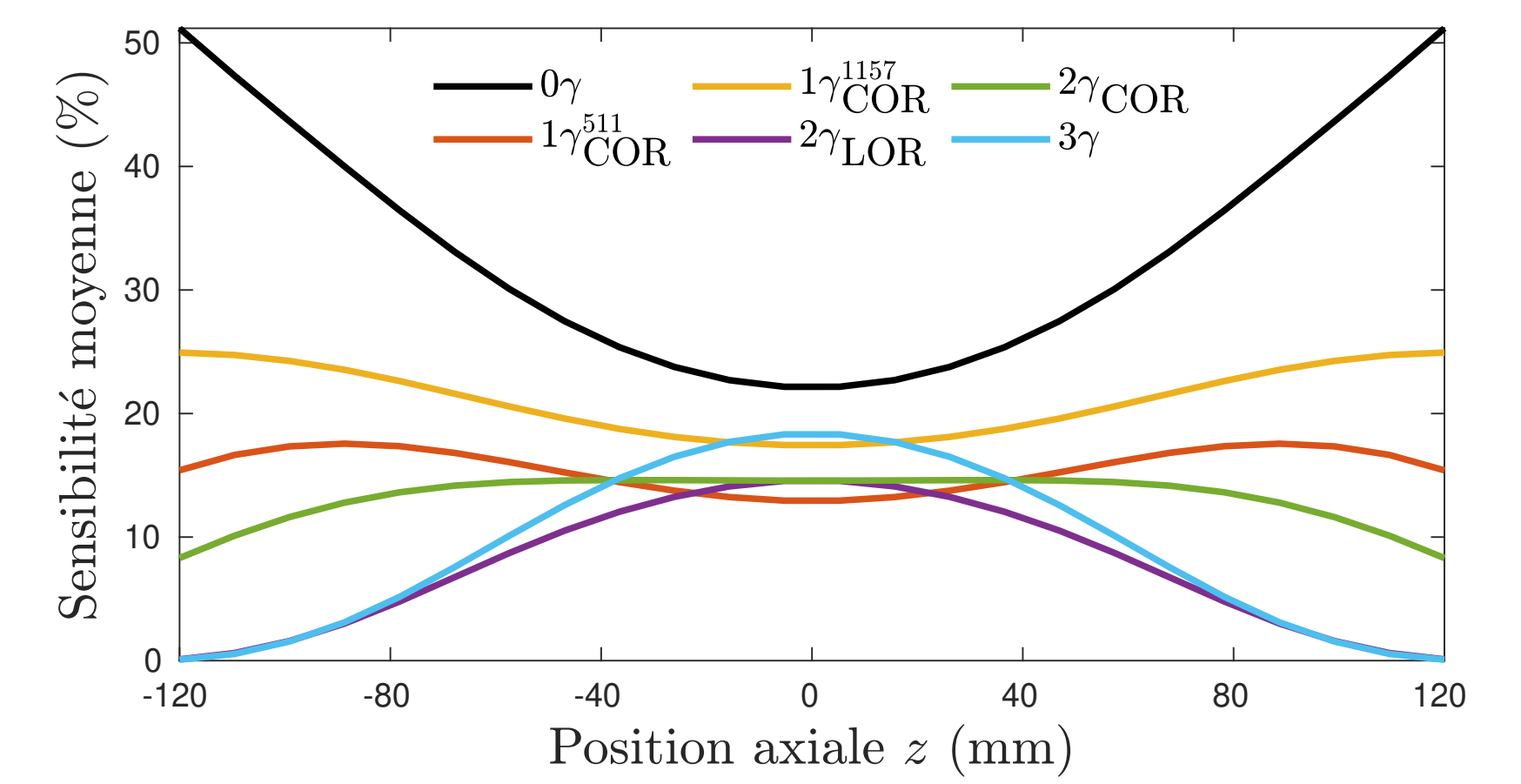
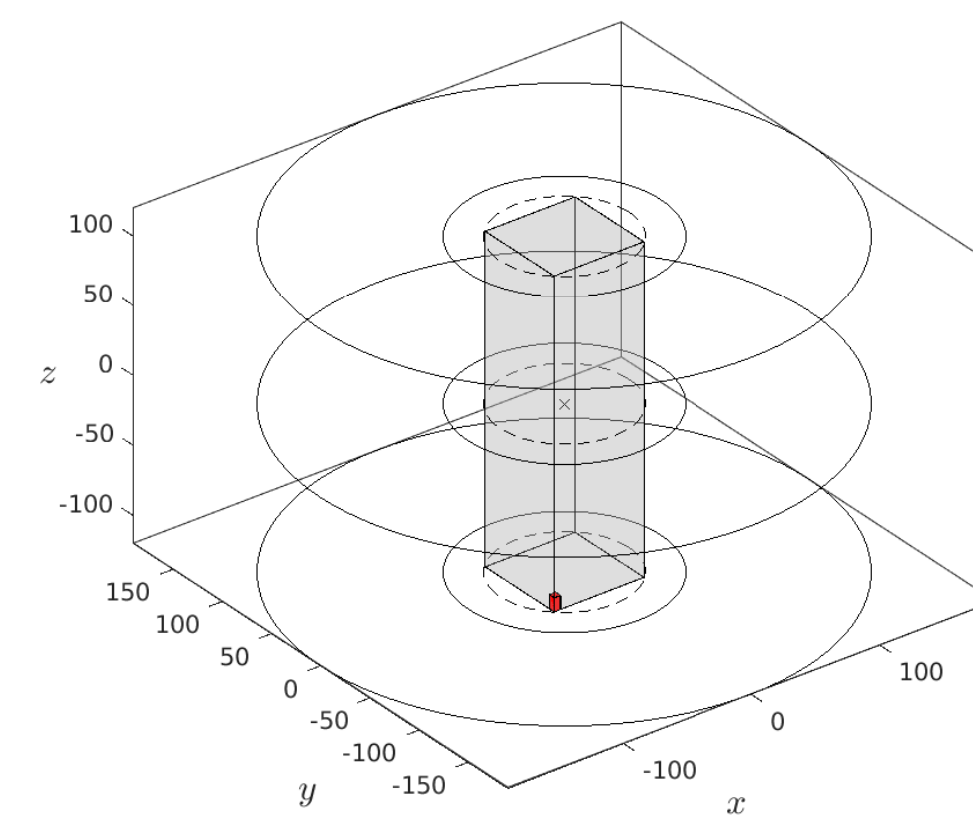
- Les densités $\hat{\lambda}$ sont non négatives dès lors que $\hat{\lambda}^{(0)}$ est positive ;
- Convergence itérative vers un estimateur $\hat{\lambda}^{\text{ML}}$;
- Extension possible à la minimisation d'un critère pénalisé.

Approximation de la sensibilité s^k

Discrétisation du FOV : $14 \times 14 \times 24$ voxels de $5 \times 5 \times 10$ mm³ ;

Simulations : $M = 3 \times 10^6$ émissions 3γ générées uniformément pour chaque voxel.

Résultats : $\approx 66\%$ des émissions entraînent la détection d'au moins un γ :



Perspectives

Les premières reconstructions multiclassées seront bientôt disponibles avec CASToR [9].

Bibliographie

- [1] L. Gallego Manzano et al. "XEMIS2: A liquid xenon detector for small animal medical imaging". In: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 912 (2018), p. 329-332.
- [2] H. Tashima et al. "3D Compton image reconstruction method for whole gamma imaging". In: Phys. Med. Biol. 65.22 (2020), p. 225038.
- [3] H. Tashima et al. "Development of a hybrid image reconstruction algorithm combining PET and Compton events for whole gamma imaging". In: 2020 IEEE NSS/MIC. Boston, MA, USA, 2020, p. 1-2.
- [4] D. Giovagnoli et al. "A pseudo-TOF image reconstruction approach for three-gamma small animal imaging". In: IEEE Trans. Radiat. Plasma Med. Sci. 5.6 (2021), p. 826-834.
- [5] J. Roser et al. "Joint image reconstruction algorithm in Compton cameras". In: Phys. Med. Biol. 67.15 (2022), p. 155009.
- [6] Y. Vardi et al. "A statistical model for positron emission tomography". In: J. Amer. Statist. Assoc. 80.389 (1985), p. 8-20.
- [7] L. Parra et al. "List-mode likelihood: EM algorithm and image quality estimation demonstrated on 2-D PET". In: IEEE Trans. Med. Imag. 17.2 (1998), p. 228-235.
- [8] S.J. Wilderman et al. "List-mode maximum likelihood reconstruction of Compton scatter camera images in nuclear medicine". In: 1998 IEEE NSS/MIC. 1998, p. 1716-1720.
- [9] T. Merlin et al. "CASToR: a generic data organization and processing code framework for multi-modal and multi-dimensional tomographic reconstruction". In: Phys. Med. Biol. 63.18 (2018), p. 185005.