

# Caméras Compton : De la recherche fondamentale aux applications sociétales

CCPM, IJClab, IP2I-CREATIS, LPNHE, Subatech

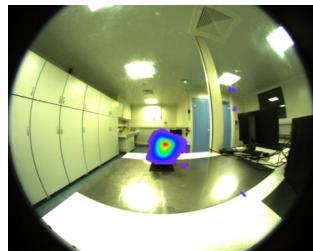


# IJCLab – Imagerie Compton pour l'astronomie gamma



- “Background”

- **ComptonCAM** – caméra gamma pour la localisation et la caractérisation des déchets radioactifs de démantèlement avec l'Andra et 2 partenaires industriels (Systel Electronique et THEORIS)
- **COMCUBE Ballon** – tests d'un prototype de télescope Compton sous ballon stratosphérique avec le CNES, au sein d'une collaboration de 7 laboratoires européens (projet H2020 AHEAD 2020 – 2024)



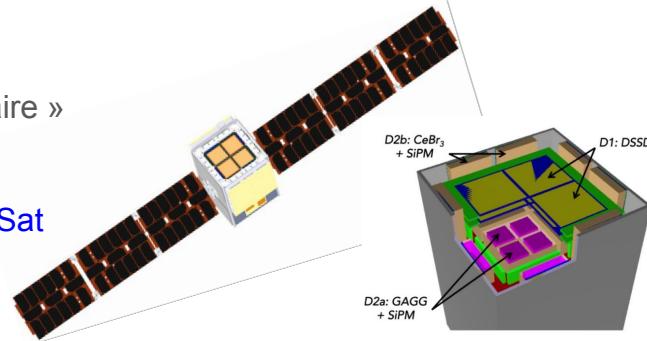
- Projet actuel

- **COMCUBE-S** – mission spatiale d'une constellation de télescopes Compton embarqués sur des microsatellites pour la polarimétrie des sursauts gamma et l'astronomie multi-messagers avec l'ESA, en partenariat avec l'Université College de Dublin, le CEA-Irfu et l'Université KTH de Stockholm
- @ IJCLab : 20 personnes (ETP ~ 10.0 par an) des 4 départements techniques du laboratoire et des pôles « Astroparticules » et « Nucléaire »

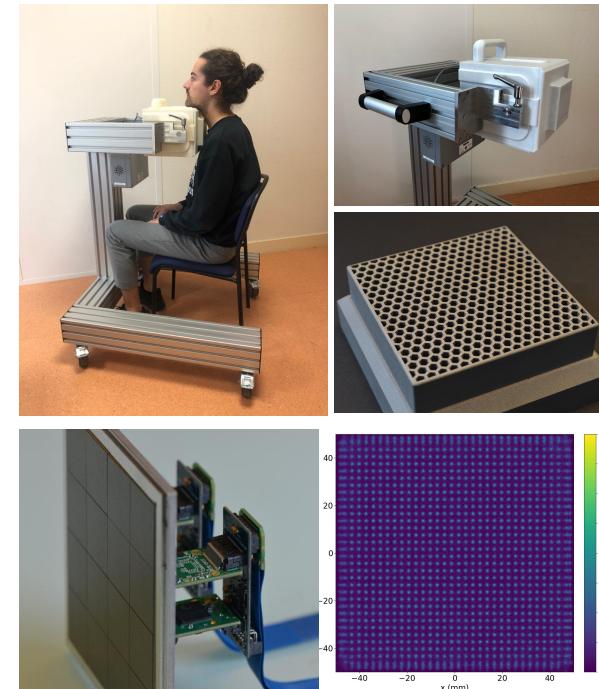


- “Motivations scientifiques”

- Développement d'un télescope/polarimètre Compton au format CubeSat
- Imagerie Compton et détection de sources automatisées pour la génération d'alertes et le suivi des sources multi-longueurs d'onde



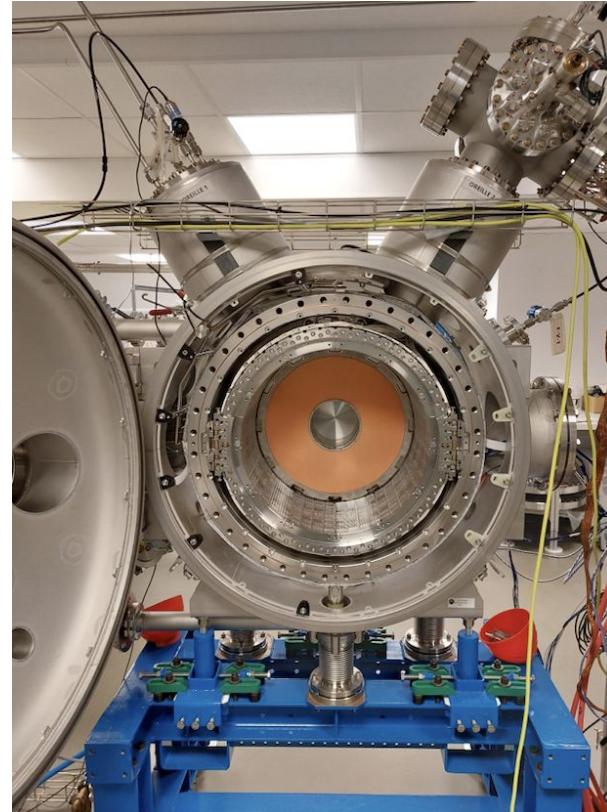
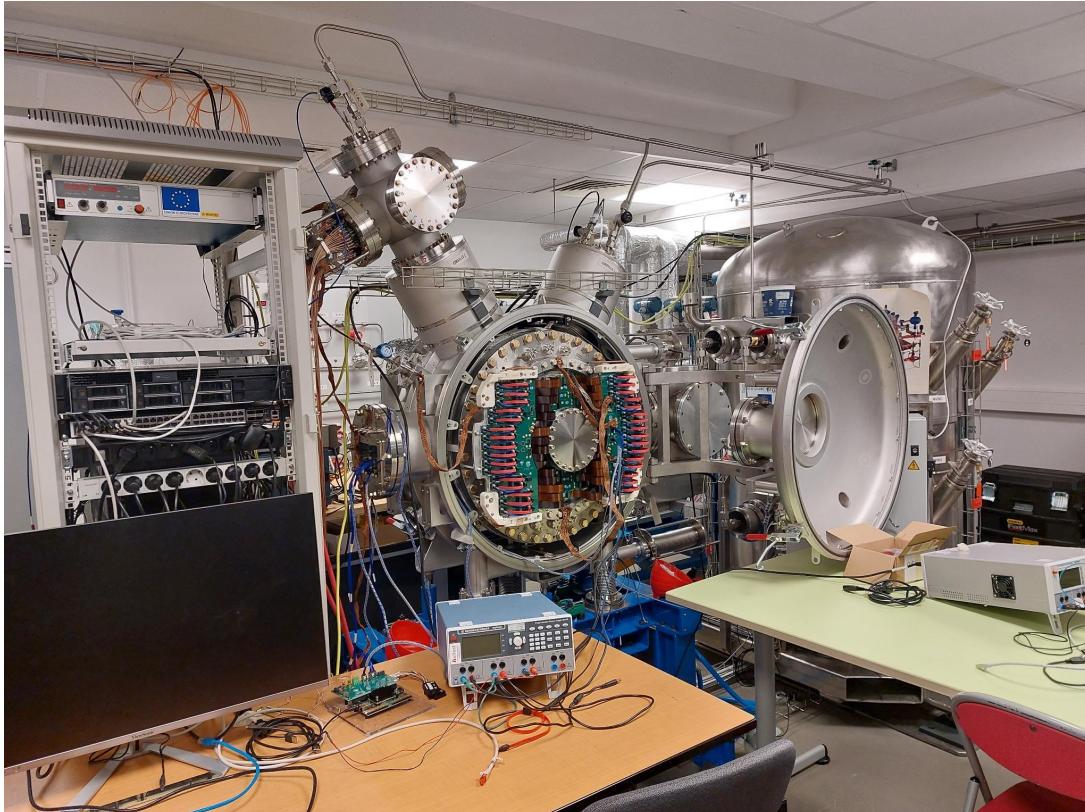
- **“Background”**
  - Dosimétrie personnalisée pour optimiser l'efficacité du traitement en RIV
- **Projet actuel**
  - THIDOS : caméra ambulatoire haute-résolution pour le traitement à l'iode 131 des maladies thyroïdiennes (LEDI-IRSN, Institut Claudio Régaud). En cours d'évaluation clinique. Adaptation de la caméra ambulatoire pour la planification thérapeutique des maladies thyroïdiennes à l'iode 123 (Institut Cochin).
- **“Motivations scientifiques” (cf. projet Praline)**
  - Ouvrir l'utilisation des gamma-caméras standards à d'autres applications en RIV ( $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{90}\text{Y}$  ; 200-400 keV)
  - Développement d'une caméra Compton dédiée au contrôle dosimétrique pour des gammas  $> 400$  keV (thérapie alpha;  $^{149}\text{Tb}$ ,  $^{213}\text{Bi}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{211}\text{At}$ ) et l'imagerie 3-gamma ( $^{44,43}\text{Sc}$ ).  
Discussion SNUH, YCC-HITC (Corée).



Plan Cancer (AAP Physicancer, INSERM, 2019-2023)

- “Background”
  - Imagerie Compton avec LXe-XEMIS
- Projet actuel
  - Projet local : XEMIS2 démarre cette année au CHU de Nantes
  - @Nantes (SUBATECH) :
    - N. Beaupère, JL. Beney, T. Bossis, S. Diglio, A. Hervo, O. Lemaire, P. Leray, J. Masbou, E. Morteau, P. Pichot, Y. Ramsi, C. Renard, JS. Stutzmann, D. Thers
    - Construction, installation et exploitation de la caméra
- “Motivations scientifiques”
  - Optimiser l'imagerie Compton avec du LXe en identifiant les forces et faiblesses de XEMIS pour différentes applications (imagerie conventionnelle, RIV, contrôle d'objets denses, contrôle de l'environnement, détection de sources, physique fondamentale, etc...)
- Partenaires
  - Services d'électroniques de l'IP2I et du LPC, Latim-CHU Brest, LS2N, Dpt Optique IMT Atlantique, Equipe calcul embarquée du Lab-Sticc à Lorient, Air-Liquide Advanced Technology and Business, INSERM CR2INA, Service Médecine Nucléaire CHU Nantes, GIP cyclotron Arronax, Dpt Sciences des Données IMT Atlantique, IMT Nord-Europe

# XEMIS2@CHU de Nantes

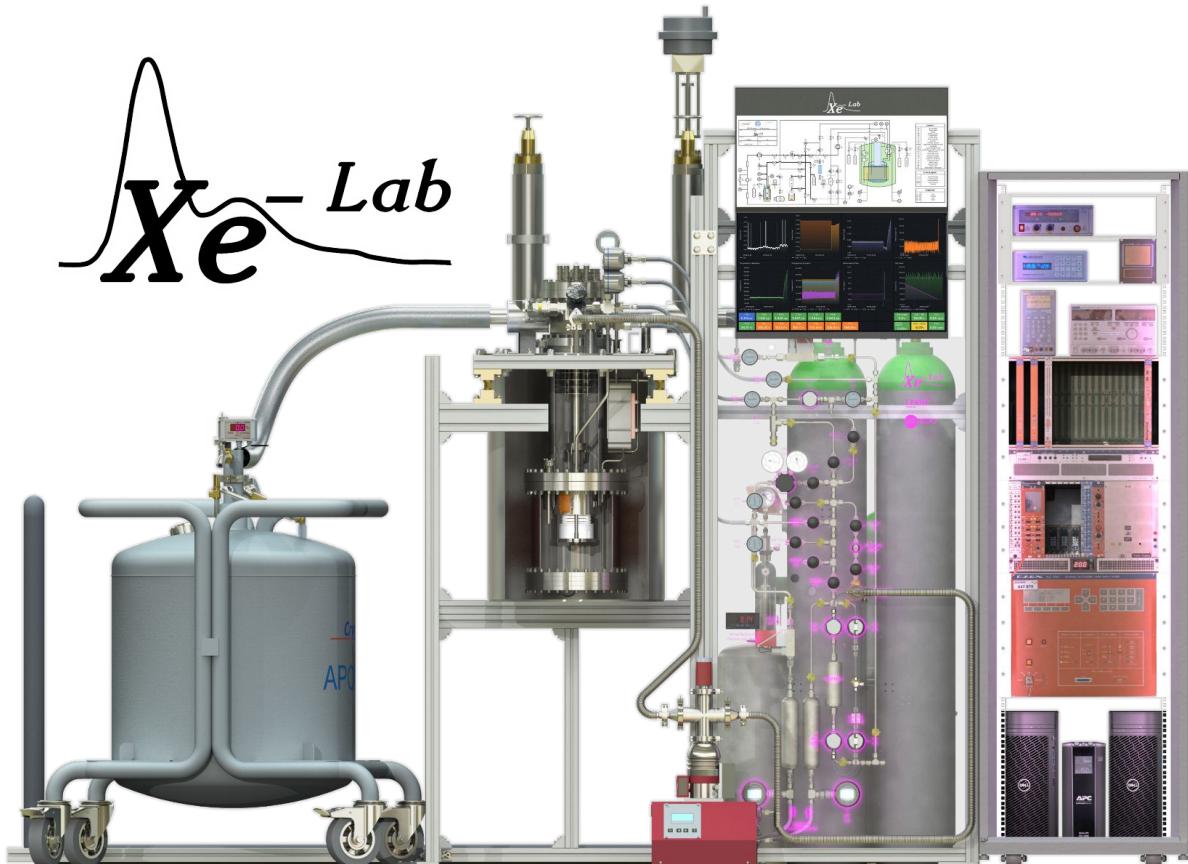


# LPNHE - Xelab



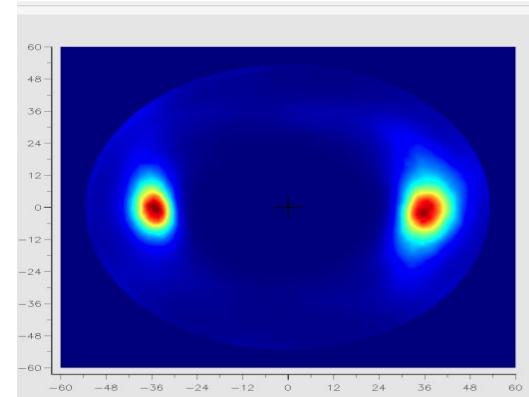
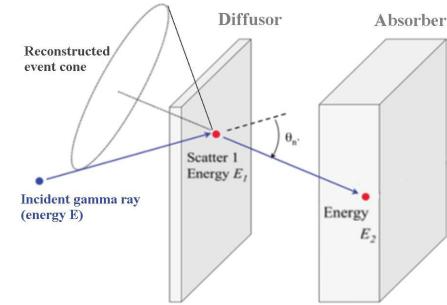
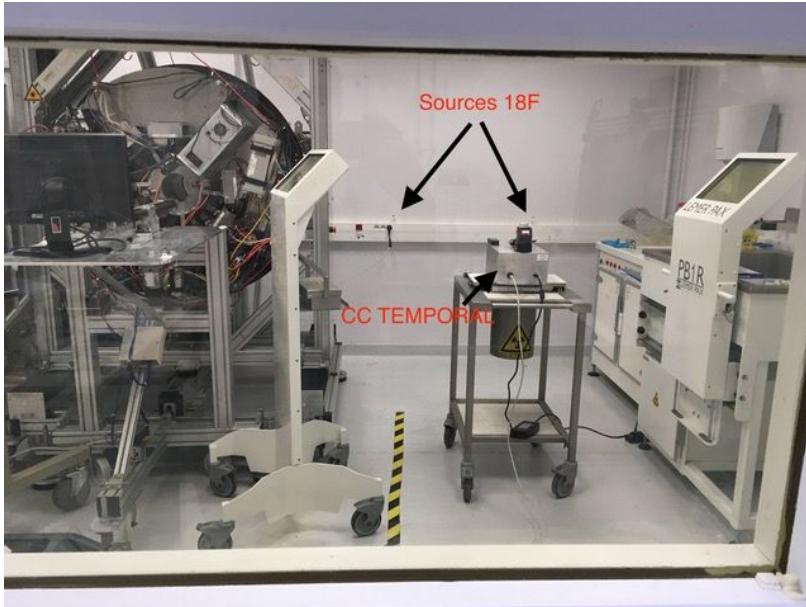
- “Background”
  - Premier site en France à travailler avec une TPC xénon double phase pour la détection directe de la matière noire
- Projet actuel
  - Projet R&T IN2P3 - XeLab : Développement d'une nouvelle électrode flottante pour XLZD (démarré en 2022)
  - @Paris (XENON - LPNHE) : L. SCOTTO LAVINA, Y. XING, B. ANDRIEU
- “Motivations scientifiques”
  - Nouvelles perspectives pour Caméra Compton avec du xénon à double phase.
  - Étudier les effets Compton à très faible énergie (CY & LY)
  - Investiguer la séparation des “double hits” pour diverses applications

$Xe^-$ -Lab



## Characterization of the Temporal Compton camera using monolithic $\text{CeBr}_3$ crystals coupled to digital SiPM arrays

- Angular resolution (ARM):  $(21.3 \pm 0.4)^\circ$
- Intrinsic efficiency:  $\sim 8\%$  (measured),  $11.2\%$  (simulated)
- Brahim Mehadji's PhD thesis (amu, 2021)



Source 1 : -30 cm — source 0 : 30 cm  
Source-camera distance\_ : 60 cm

## Development of Compton image reconstruction algorithm

- Poly-Energetic List-Mode MLEM (PE-LM-MLEM) algorithm
- B. Mehadji et al. Conf. Rec. IEEE NSS/MIC'2019

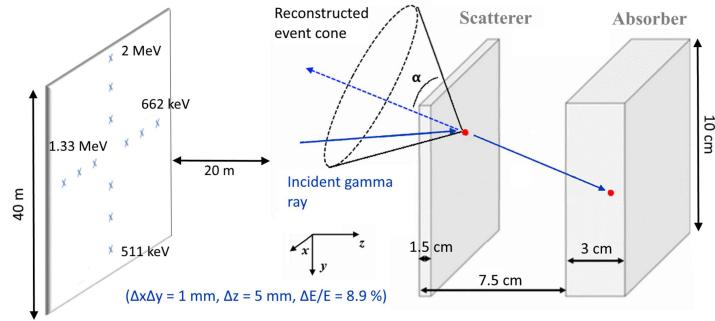
### PE-LM-MLEM image reconstruction

$$\hat{f}_l^{(t+1)} = \frac{\hat{f}_l^{(t)}}{S_l} \sum_{j=1}^N \frac{p(A_j|l)}{\sum_{i=1}^M p(A_j|i) \hat{f}_i^{(t)}}$$

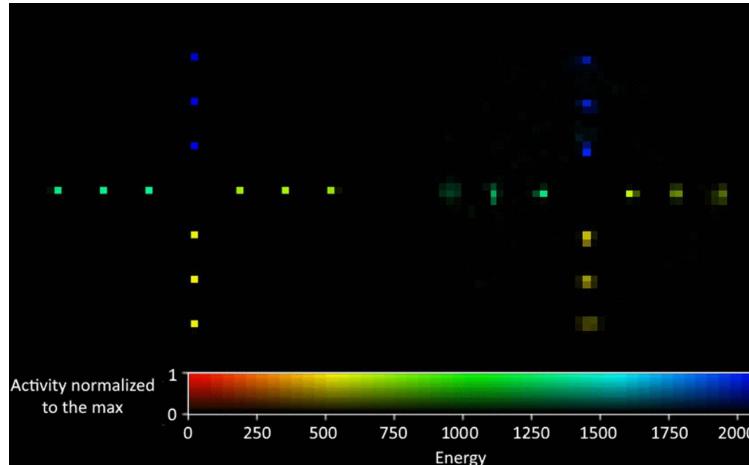
- $f_l$ : expected number of gamma rays coming from pixel  $l$
- $l$ : index of space position and energy
- $j$ : event number
- $S_l$ : sensitivity of the CC for pixel  $l$  (computed by Monte Carlo)

$$p(A_j|l) \approx \frac{d\sigma_c}{d\Omega} \times \text{Solid Angle} \times p(\Delta\alpha_l, \Delta E_l)$$

- $p(A_j|l)$ : probability that the detected event number  $j$  generated in bin  $l$  leads to the measurement  $A_j$
- $\frac{d\sigma_c}{d\Omega}$ : Klein-Nishina differential cross section
- $p(\Delta\alpha_l, \Delta E_l)$ : probability that pixel  $l$  belongs to the measured Compton cone of angle  $\alpha_j$  and measured event energy  $E_j$ , where  $\Delta\alpha_l$  and  $\Delta E_l$ , the angular and energy distance between pixel  $l$  and  $(\alpha_j, E_j)$ , follow the normal laws  $\mathcal{N}(\alpha_j, \text{Var}(\alpha_j))$  and  $\mathcal{N}(E_j, \text{Var}(E_j))$

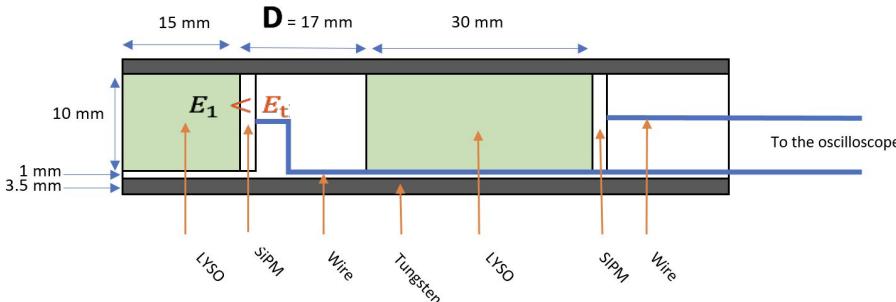


B. Mehadji et al. Conf. Rec. IEEE NSS/MIC'2019

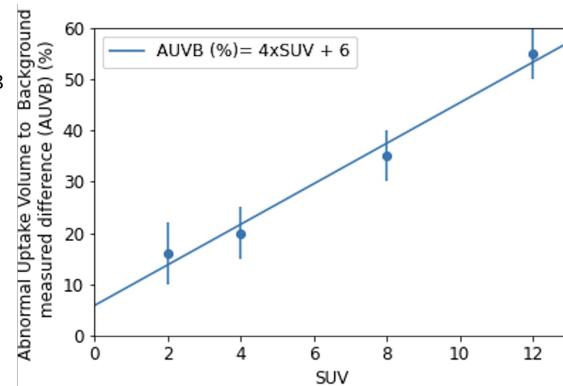
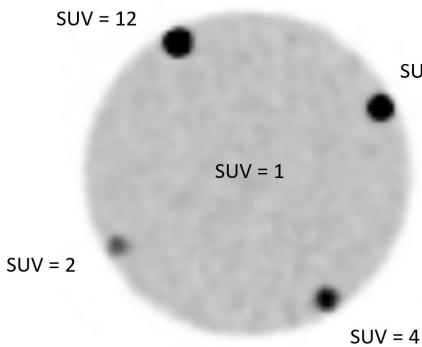


# CCP: Compton Collimated Probe

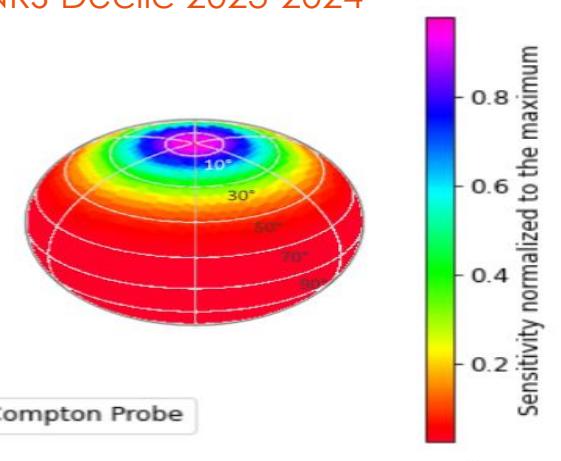
Development of surgical radio-guidance using a small Compton-angles collimation probe



$$\theta_{\max} = \arccos \left( 1 - \frac{E_{\text{th}}}{E} \frac{m_e c^2}{E - E_{\text{th}}} \right)$$



B. Mehadji, et al. JINST 19 (2024) T08002  
PCT/EP2024/075264  
CNRS Déclic 2023-2024



- “Background”
  - Caméra Compton (CC) pour le contrôle de l’hadronthérapie avec le MP CLaRyS (IP2I-CPPM-LPSC-CREATIS)
  - Développement d’un module GATE de CC (CCmod) + logiciel de reconstruction de l’image open-source (CoReSi)
- Projet actuel
  - Projet européen (HORIZON-EURATOM) AIDER : Développement d’une CC pour les radiothérapies internes vectorisées (2025-2029)
  - @Lyon (CREATIS-IP2I) :
    - D. Sarrut, J. M. Létang, A. Etxebeste, V. Maxim (CREATIS), E. Testa (IP2I)
    - Optimisation de la caméra par simulations MC + reconstruction de l’image (1 post-doc+ 1 doc)
- “Motivations scientifiques”
  - Évaluer et optimiser par simulation MC et reconstruction de l’image les performances de CC pour différentes applications (radiothérapies vectorisées, BNCT, diagnostiques, etc.)

# Conclusion

- **4 labos IN2P3 + CREATIS** impliqués dans de l'imagerie Compton
  - **Fondamentale** : "Astronomie gamma", détection de matière noire
  - **Applications** : Détection de déchets radioactifs de démantèlement, imagerie théranostique pour les radiothérapies internes vectorisées...
- **Réseau de partage d'expérience** (instrumentation, simus et reconstruction)
  - **Tests** sur les différents prototypes disponibles/plateformes d'imagerie
  - **Partages de données** expérimentales
  - **Etudes préliminaires** par simulations Monte Carlo et reconstruction d'image
- Vers une **éventuelle réponse à un appel à projet**