

# Caméras Compton : De la recherche fondamentale aux applications sociétales

CCPM, IJClab, IP2I-CREATIS, LPNHE, Subatech

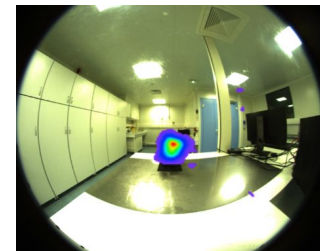


# IJCLab – Imagerie Compton pour l'astronomie gamma



## • “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)



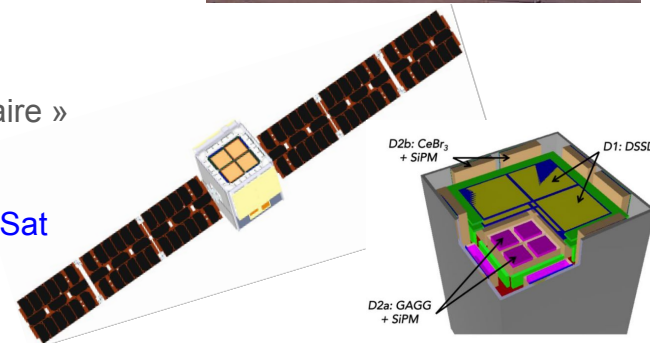
## • Projet actuel

- **COMCUBE-S** – mission spatiale d'une constellation de télescopes Compton embarqués sur des microsattelites 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”

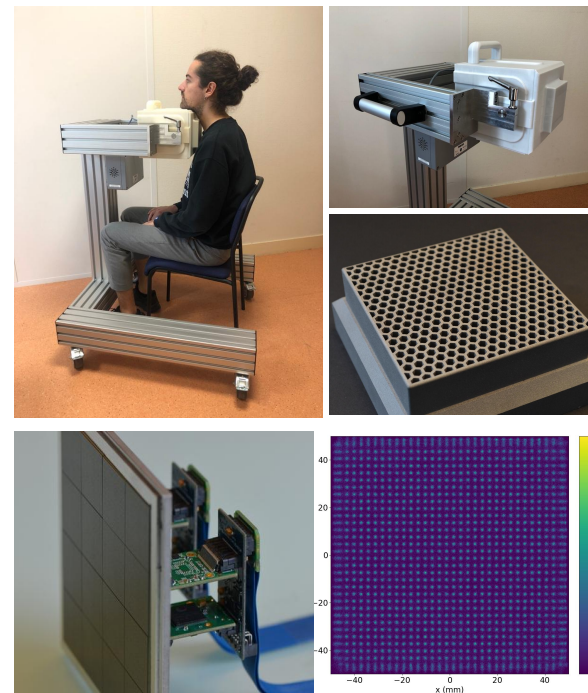
- Dosimétrie personnalisée pour optimiser l'efficacité du traitement en RIV

- **Projet actuel**

- **THIDOS : caméra ambulatoire haute-résolution pour le traitement à l'iode 131 des maladies thyroïdiennes** (LEDI-IRSN, Institut Claudius 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).

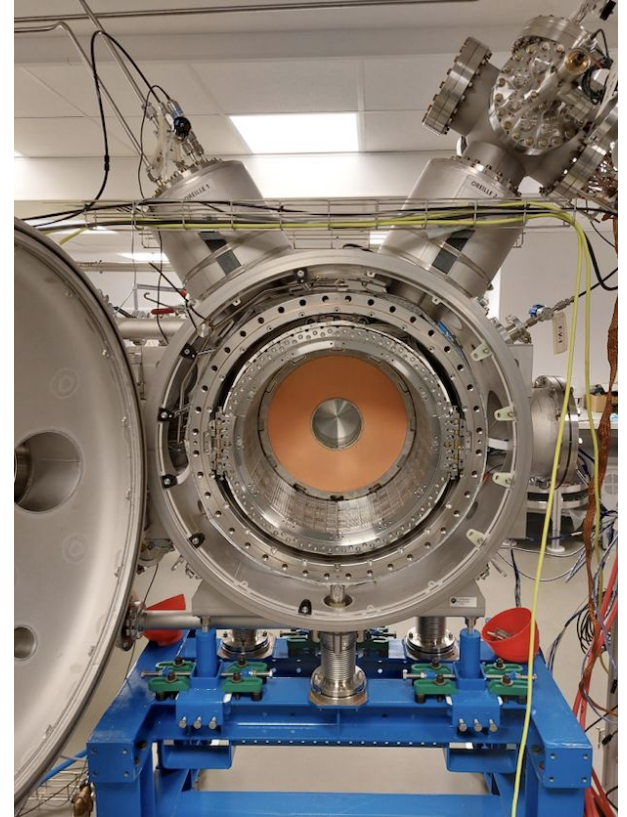
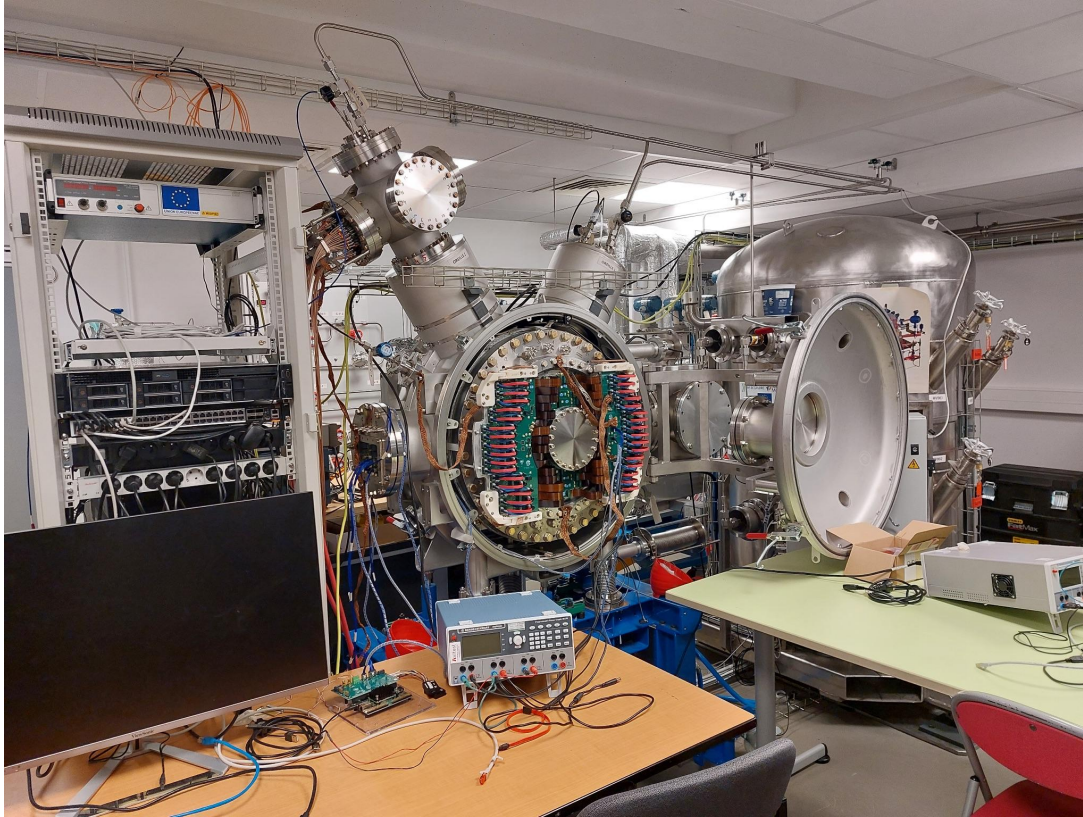


Plan Cancer (AAP Physicancer, INSERM, 2019-2023)

- “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

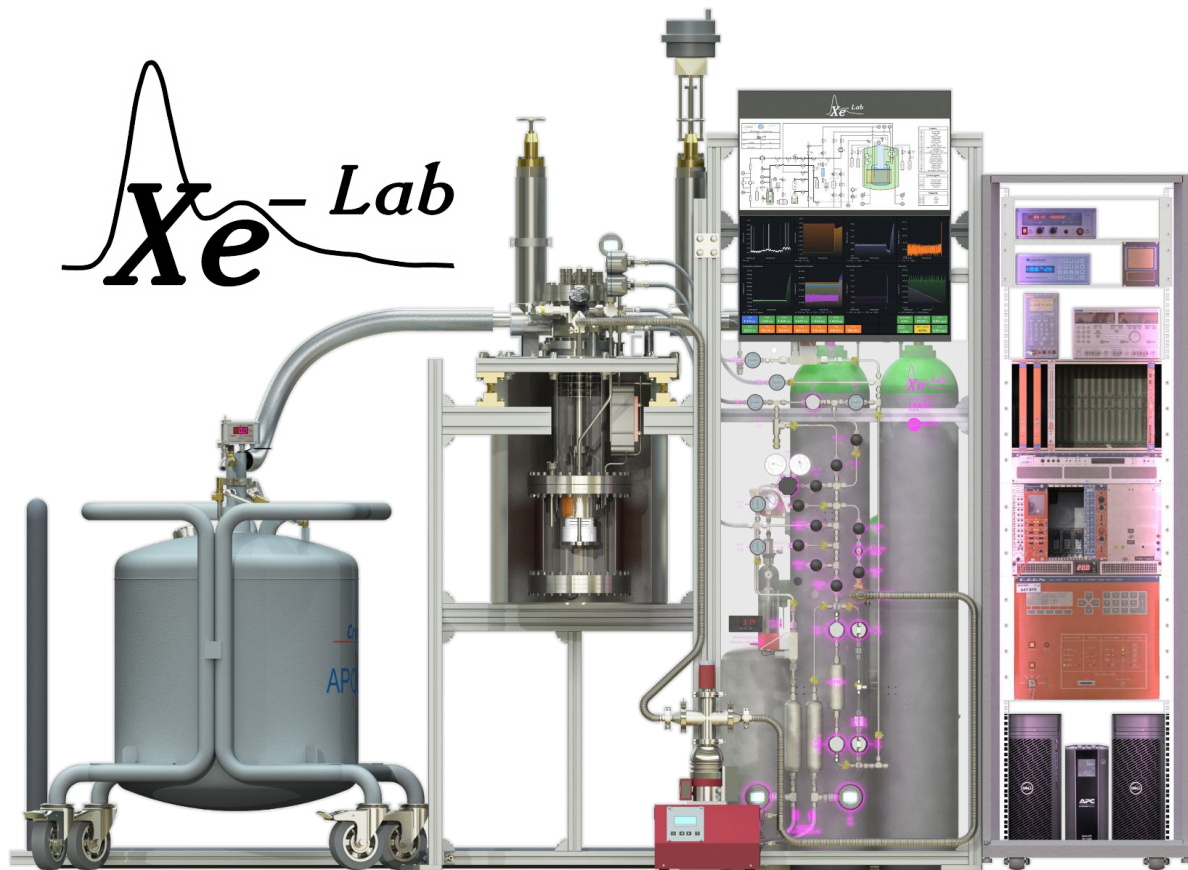


# LPNHE - Xelab



- “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

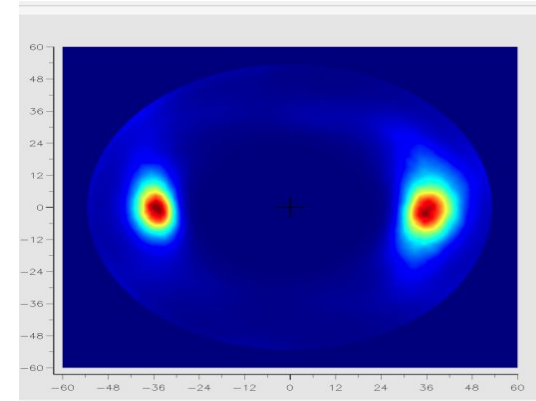
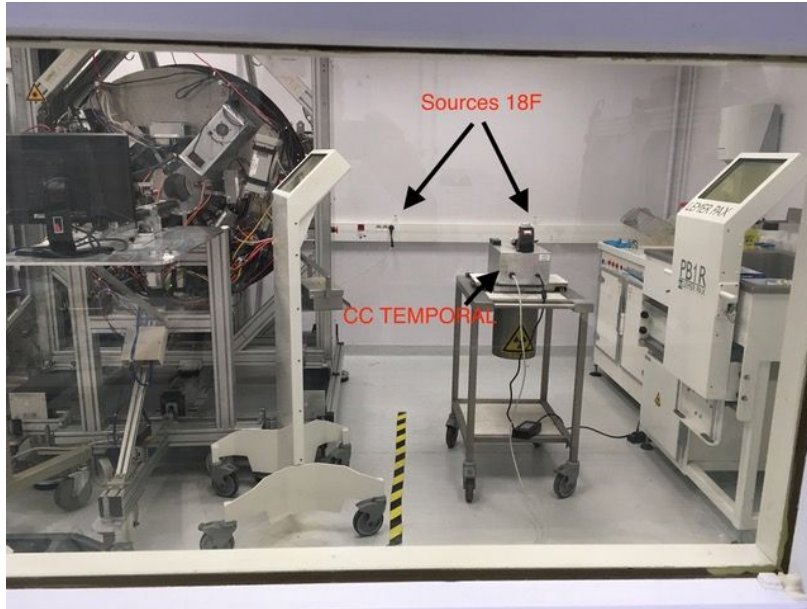
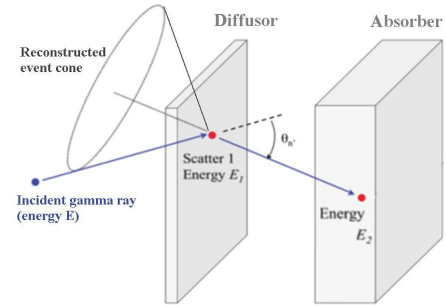
$Xe$ -Lab





## 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 Mehadjji's PhD thesis (amU, 2021)



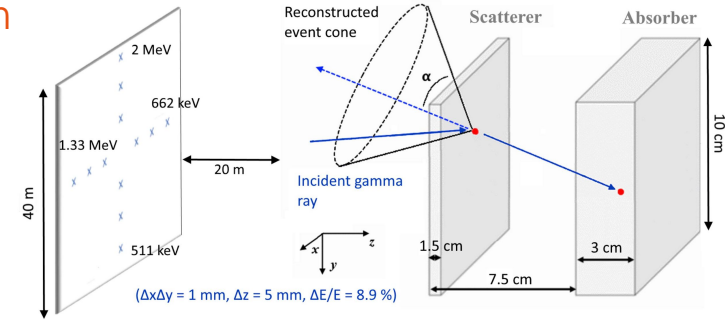
Source 1 : -30 cm — source 0 : 30 cm  
Source-camera distance\_ : 60 cm



## 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



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

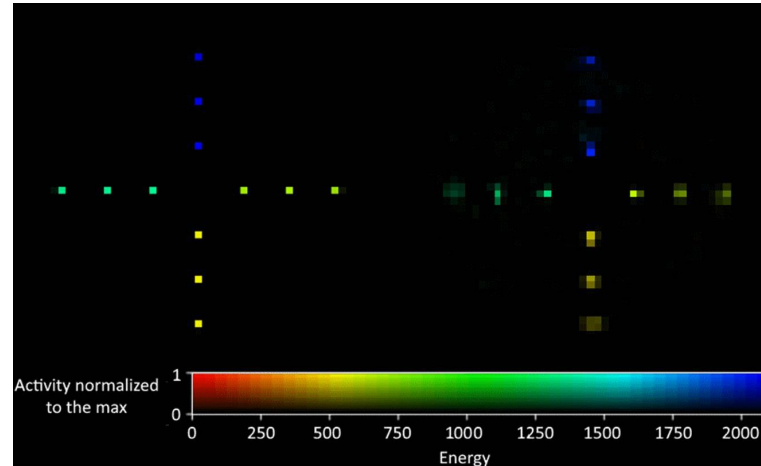
### PE-LM-MLEM image reconstruction

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

- $f_l$ : 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)

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

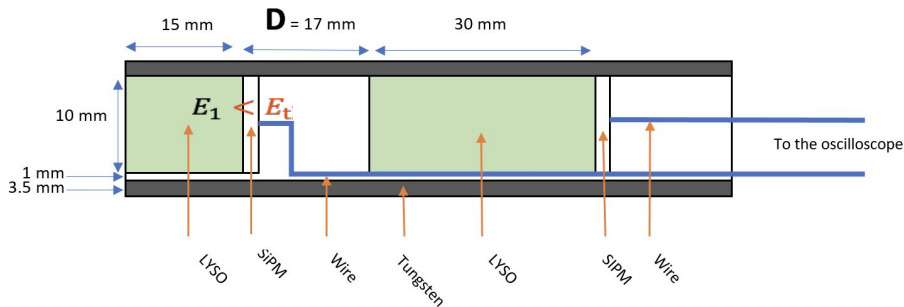
- $p(A_j|l)$ : probability that the detected event number  $j$  generated in bin  $l$  leads to the measurement  $A_j$
- $\frac{d\sigma_c}{d\Omega}$ : Klein-Nishina differential cross section
- $p(\Delta\alpha_l, \Delta E_l)$ : probability that pixel  $l$  belongs to the measured Compton cone of angle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



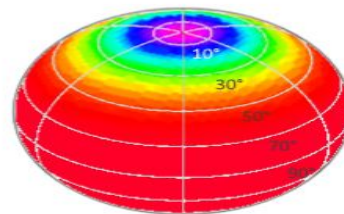
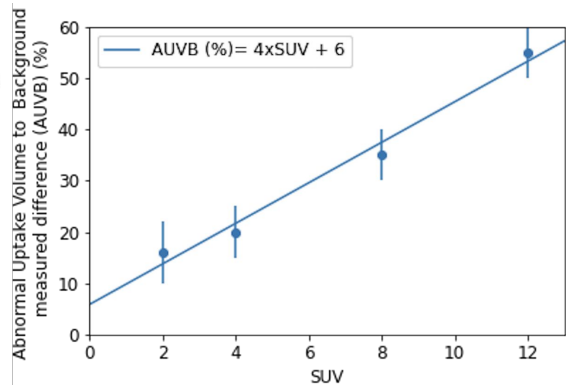
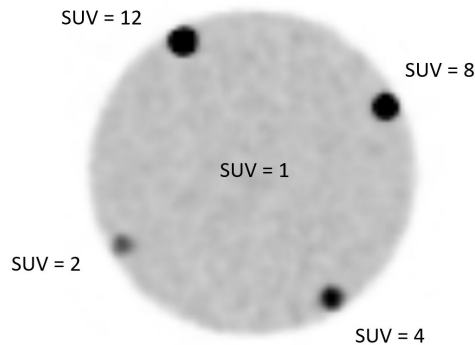
# CCP: Compton Collimated Probe

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

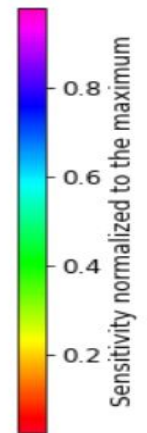
B. Mehadji, et al. JINST 19 (2024) T08002  
PCT/EP2024/075264  
CNRS Déclic 2023-2024



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



Compton Probe



- “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/platformes 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**