

Ecole IN2P3 de microélectronique 2009



objectifs

- Connaissance et maîtrise par les stagiaires des techniques de conception Building Blocks et des dernières technologies microélectroniques
- Examen et connaissance approfondis des Building Blocks construits dans les laboratoires
- Consolidation du réseau des microélectroniciens IN2P3

Programme et modalités pédagogiques

- Besoins futurs de la physique
- Signaux issus des détecteurs
- Revue et prospective à l'IN2P3 et à l'IRFU
- Floor planning
- Post processing
- Microélectronique 3D
- Technologies 130 et 90 nm
- Serial Powering
- Tables rondes (valorisation, CMP, outils et formation)
- Présentation de Building Blocks par les laboratoires

<http://www.in2p3.fr/actions/formation/microelectronique09/microelc-09.htm>

Intervenants

Pascal Dargent (IN2P3)
Jean-Charles Vanel (LLR)
Dominique Thers (Subatech)
Christophe De La Taille (LAL)
Etienne Sicard (INSA Toulouse)
Manuel Fendler (CEA / LETI)
Denis Linglin (MIND)
Julien Fleury (LAL)
Jean-Claude Clemens (CPPM)
Kostas Kloukinas (CERN)
Kholdoun Torki (CMP)
Fabian Huegging (Université de Bonn)
Claude Colledani (IPHC)

Public

Ingénieurs microélectroniciens

Lieu

Centre Odalys (La Londe les Maures – 83)

Dates

Dimanche 11 octobre 2009 au soir au vendredi 16 au matin

Inscription

Direction de votre laboratoire

Date limite d'inscription

Mardi 1^{er} septembre 2009

Responsable scientifique : Christophe De La Taille – LAL Orsay
Responsable administratif : Fabien Pasleau - siège IN2P3 Paris
Tél. : 01 44 98 41 92 - Fax : 01 44 98 48 14 - e-mail : formation@in2p3.fr

Signaux et modélisation des détecteurs gazeux

Développement de détecteurs gazeux et liquides pour la recherche et l'imagerie médicale autour du cyclotron ARRONAX

Un grand merci à J. Donnard,
S. Duval et T. Oger ...


(UMR 6457 - Nantes)

12 Octobre 2009 - Dominique Thers

Plan

1. Généralités sur la médecine nucléaire et ARRONAX
2. Développement du MPGD PIM pour l'autoradiographie β
3. Développement d'un télescope Compton au xénon liquide pour l'imagerie 3γ .

1. La médecine nucléaire

➤ C'est une spécialité médicale qui utilise des médicaments radioactifs pour faire :

- des diagnostics par imagerie
- des traitements (radiothérapie vectorisée)

principalement en oncologie

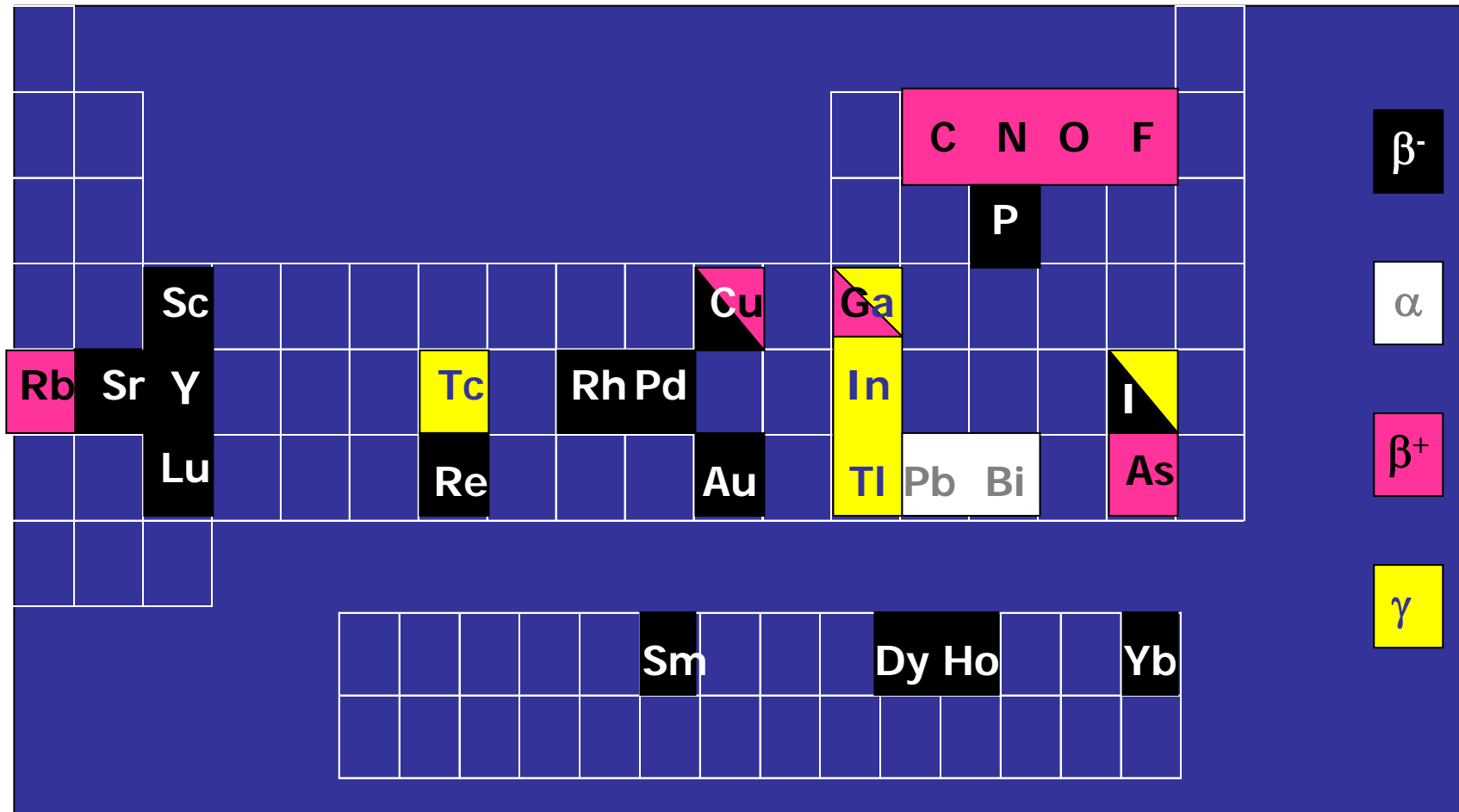
Exemple de scintigraphie
du squelette.

La molécule porteuse est un
complexe contenant du
phosphore.

L'atome radioactif est du
technetium 99m

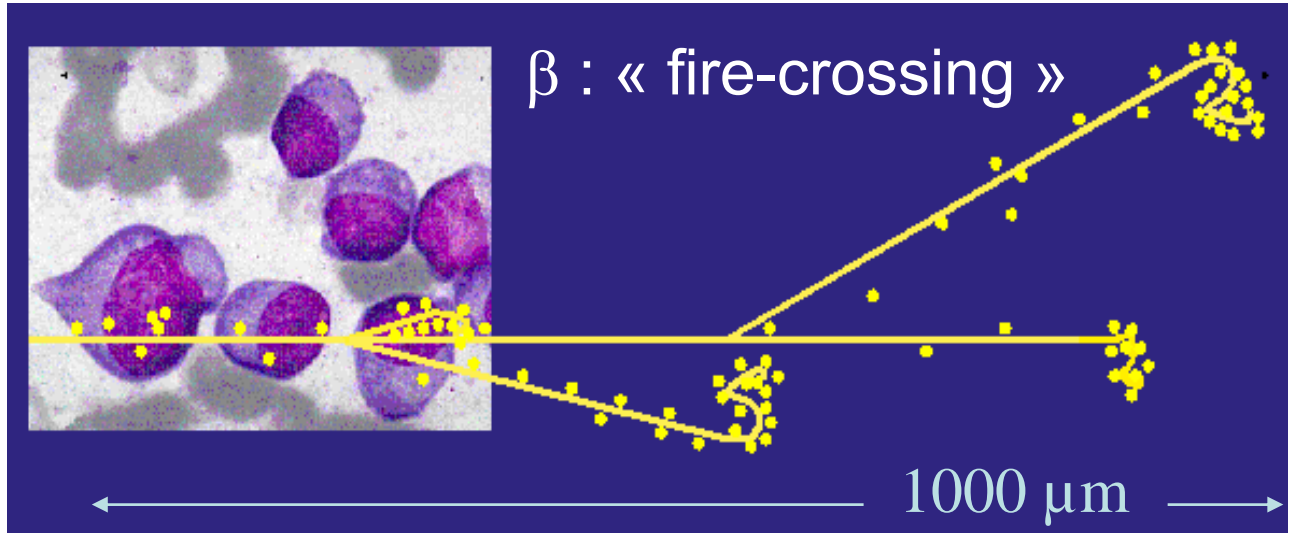


Les principaux radio-isotopes pour la médecine nucléaire

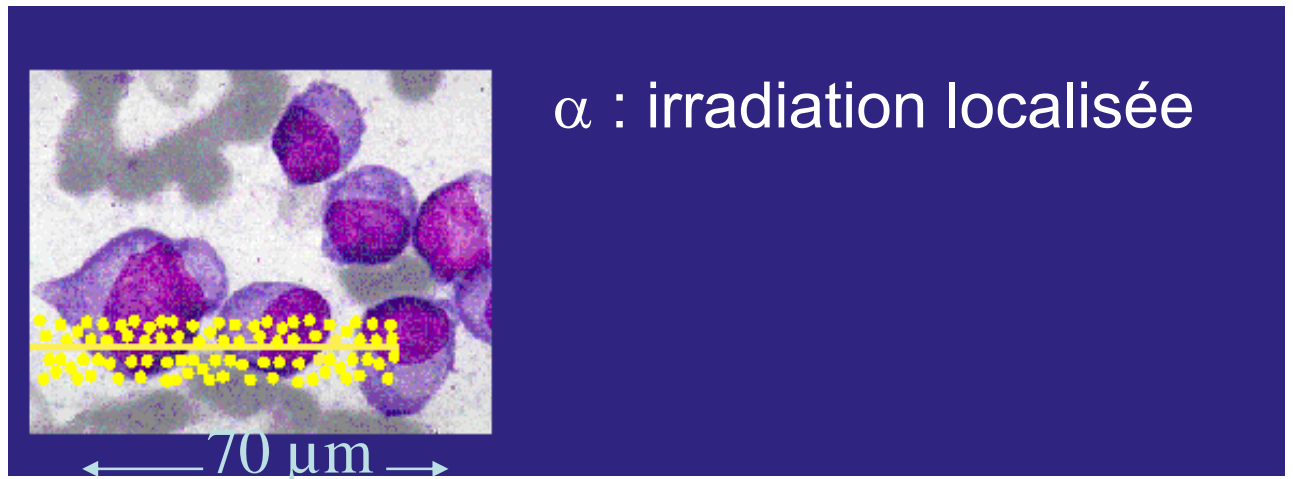
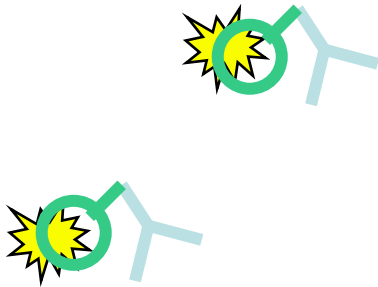


La radiothérapie vectorisée

^{131}I

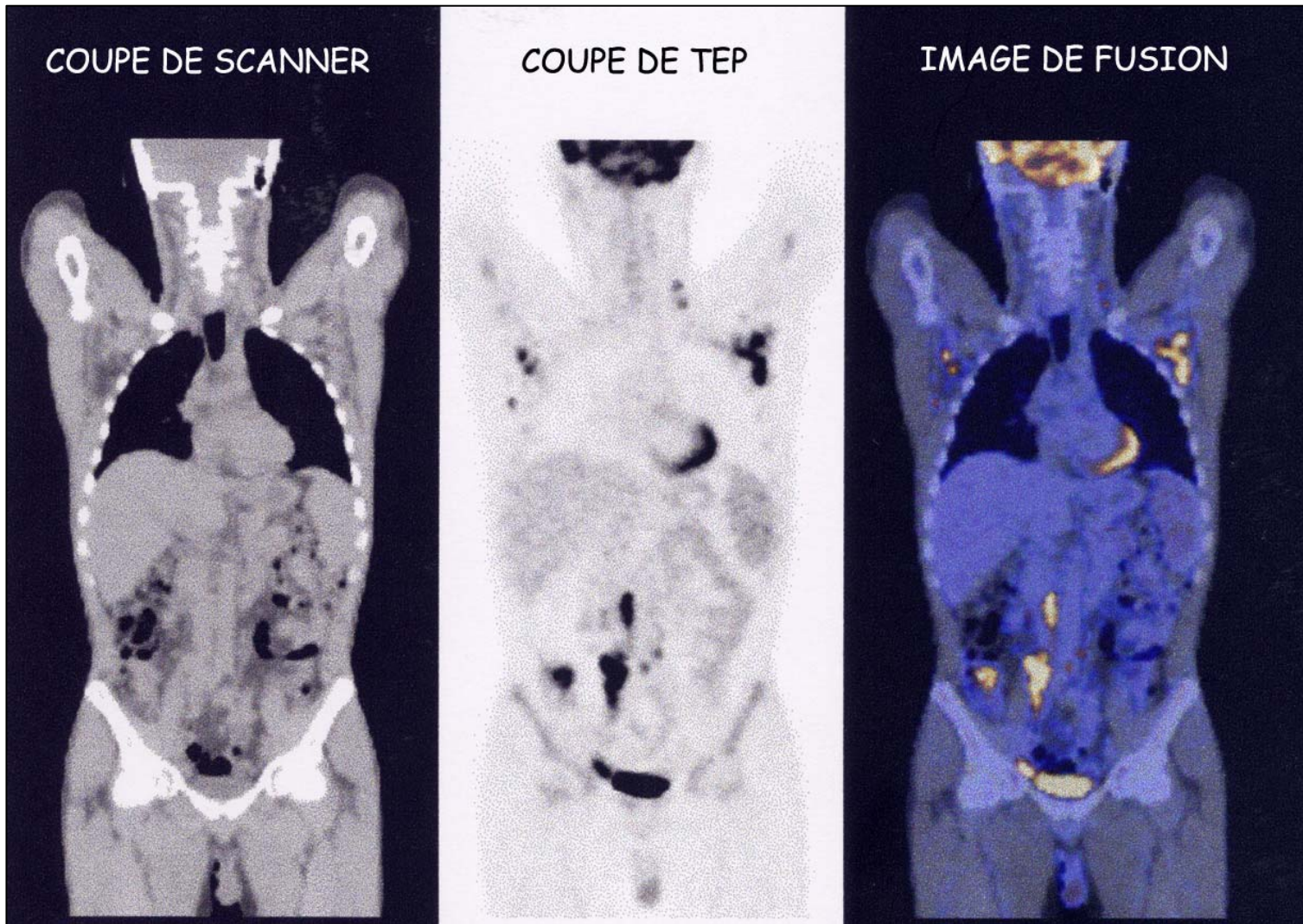


^{213}Bi



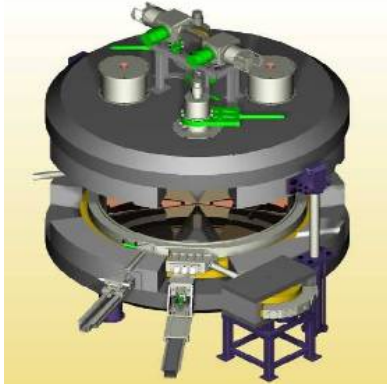
→ Recherches pour caractériser le « meilleur » traitement ...

L'imagerie fonctionnelle nucléaire



→ Quantifier l'activité fixée dans les organes, tissus, tumeurs ...

Production des radioéléments sur Arronax



Projectile	Energy MeV	Intensity μA
Proton	30 - 70	< 350
	35 - fixed	< 50
Deuteron	15 - 35	50
Alpha	70 - Fixed	< 35

Imagerie : radioéléments TEP complémentaires du ^{18}F
 ^{82}Sr / ^{82}Rb , ^{52}Fe

Dosimétrie : Isotope de radioéléments utilisés en thérapie
 ^{86}Y , ^{64}Cu , ^{124}I , $^{44\text{m}/44}\text{Sc}$

Radioimmunothérapie : alpha : ^{211}At , ^{225}Ac , ^{213}Bi
béta - : ^{67}Cu , ^{47}Sc

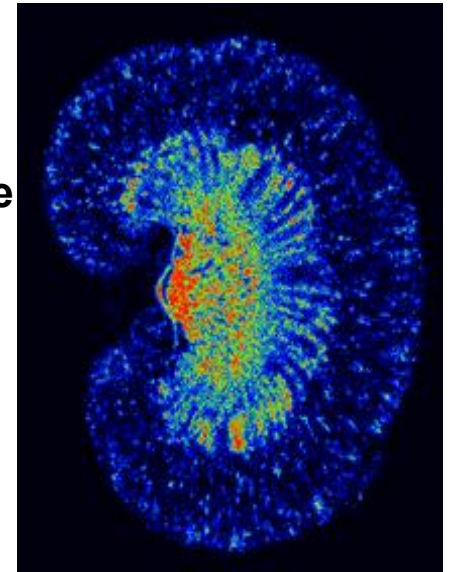
→ 2009 : réglage des faisceaux, 2010 : ça commence ...

2. L'autoradiographie β : une approche incontournable pour les biodistributions et les études précliniques

- Injection d'un radio-pharmaceutique marqué β
- Sacrifice de l'échantillon (souvent une souris ou un rat)
- Découpage en tranche fine à l'aide d'un microtome

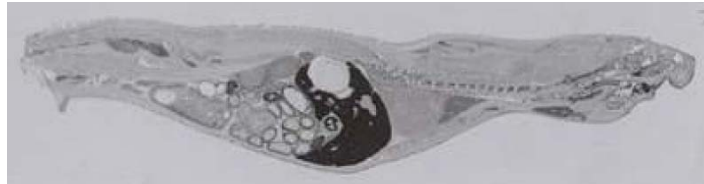


Autoradiographie



Les technos en imagerie β

Depuis
1965



Émulsion = plaque
photo

Depuis
1975



Écran
phosphore

Depuis
2000



PPAC-gaz

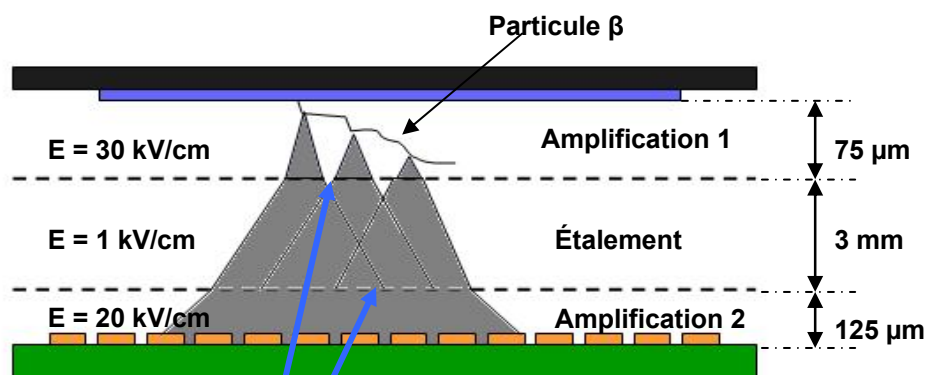
→ Imagerie de précision, bidimensionnelle pour les pharmaciens

Mesurer la fixation des nouveaux émetteurs β produits par Arronax ?

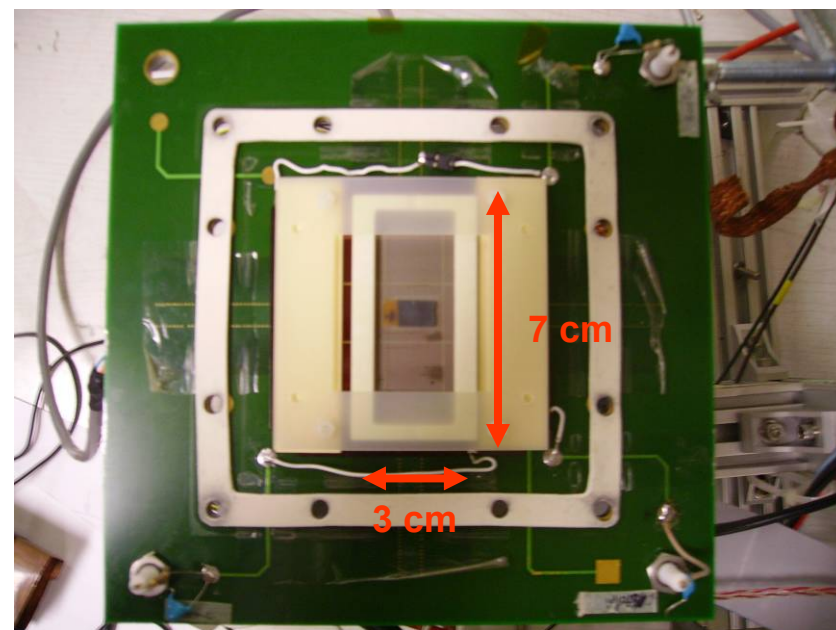
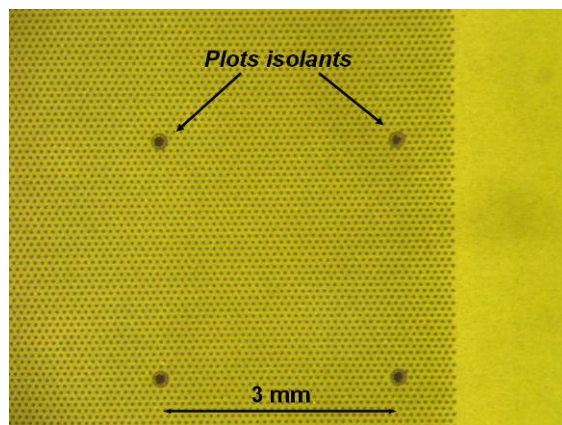
- Détection de faible, moyenne et haute énergies
- Grande sensibilité
 - Pas de fenêtre entre l'échantillon et l'instrument
 - Sensibilité à l'électron unique
- Très haute résolution possible
 - $< 100 \mu\text{m}$ 2D
- Grand champ de vue
 - Jusqu'à $40 \times 40 \text{ cm}^2$
- Image en mode comptage
 - Une désintégration = un point à l'image
 - Très bonne linéarité (du fond cosmique jusqu'à 500 coups/s/mm^2)
 - Image numérique « On line » et « plug and play »
 - « Sans temps mort » jusqu'à 25 kpositions/s sur le champs de vue
- Coût compétitif

→ Objets du développement du PIM- β -Imager

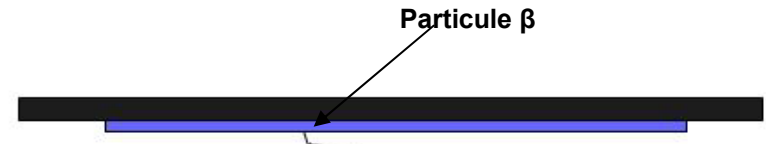
Etude et faisabilité à l'aide du prototype μ PIM



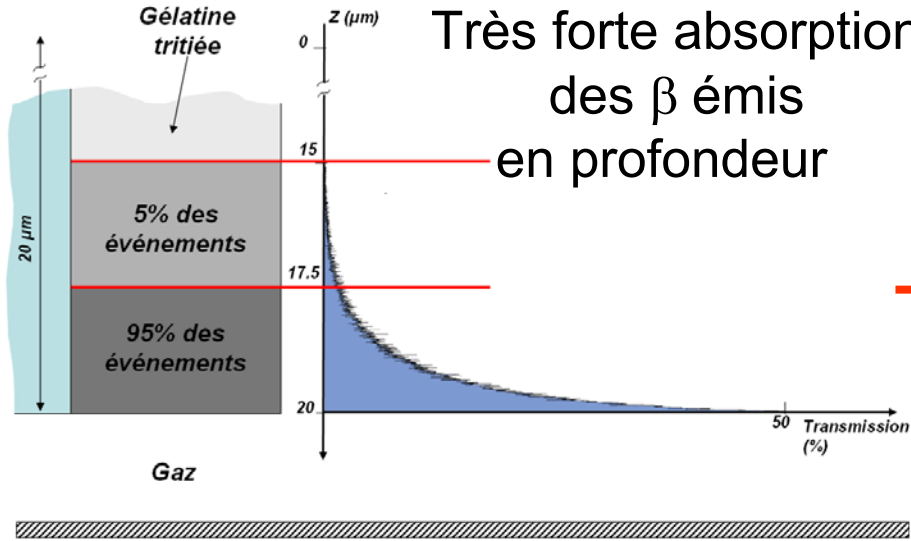
*Microgrilles – Micromegas
maille $\sim 50 \mu\text{m}$*



Comment ça marche ?



1. Auto absorption dans la source



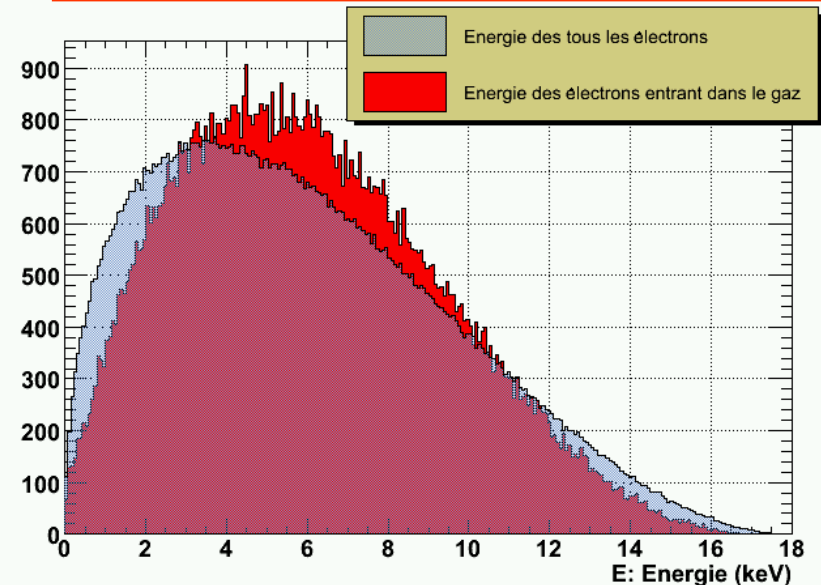
Très forte absorption des β émis en profondeur

Imagerie de surface (auto-absorption $\sim 98\%$)

Très forte hypothèse d'homogénéité en épaisseur pour remonter à la quantification

Compensation dE/dx et absorption

Très faible perturbation du spectre en énergie



Comment ça marche ?

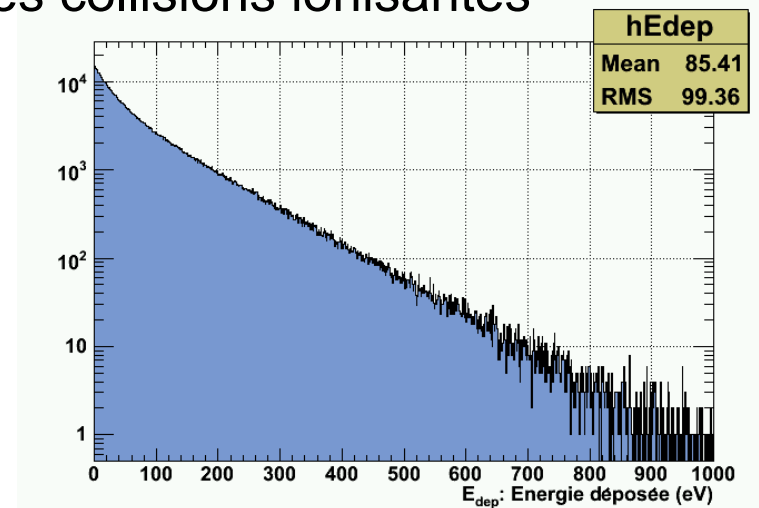
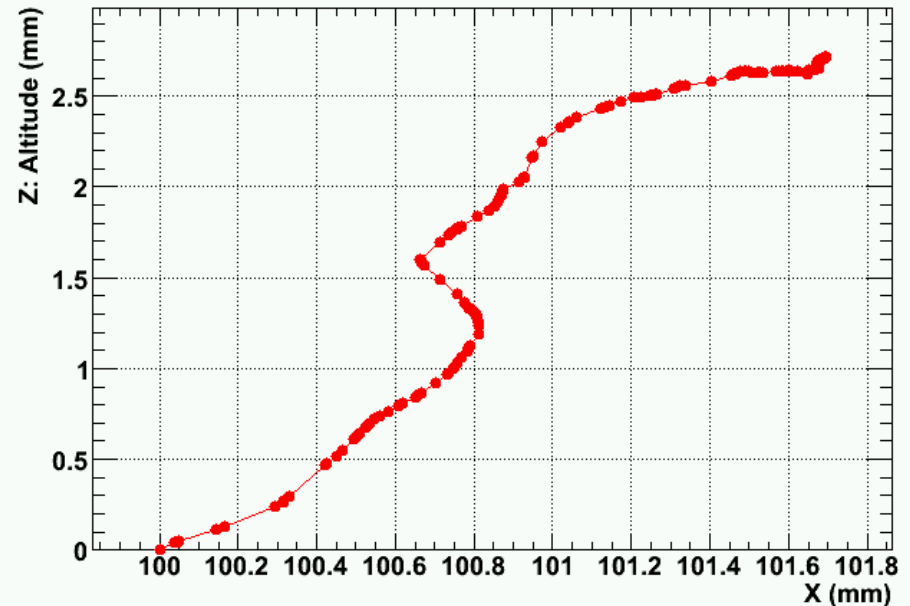
2. Création d'amas de paires e-/i dans le gaz

Simulation avec CASINO (Sherbrook) :

- paramétrisation de la section efficace de Mott
- recul de l'électron primaire négligé
- création d'amas d'électrons lors des collisions ionisantes

$$N_{e-/i} = E_{\text{dep}} / W_{\text{gaz}}$$

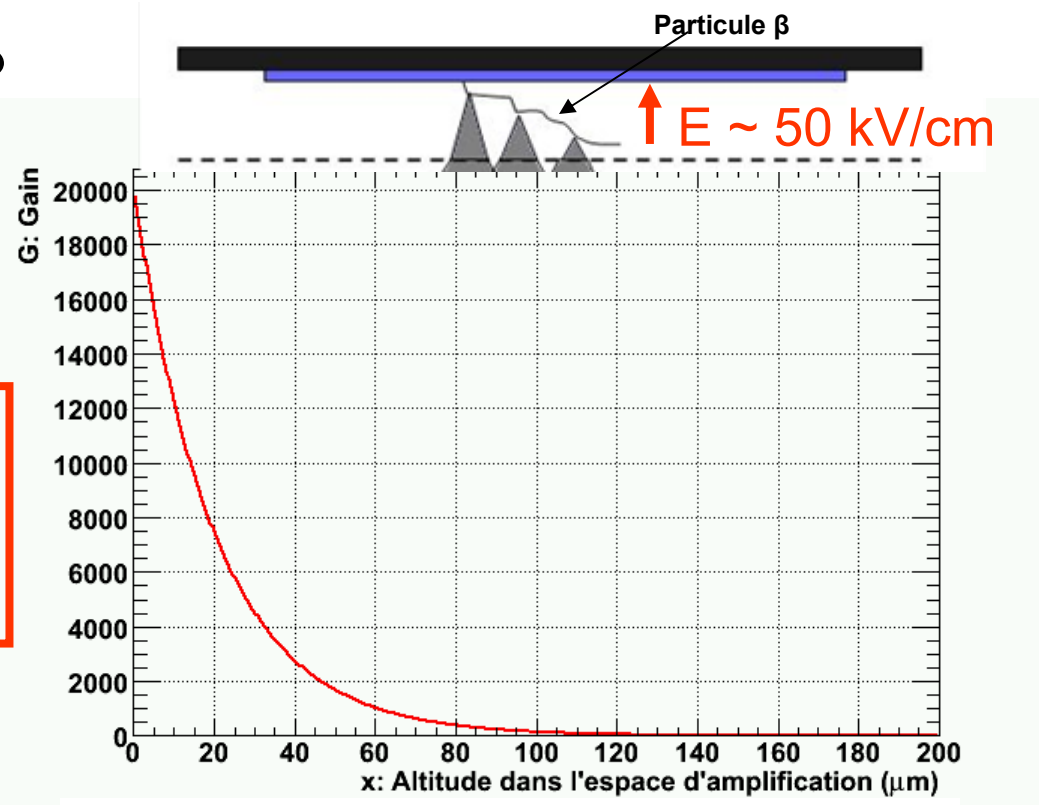
(Ne + 10%CO₂ : W gaz = 36 eV)



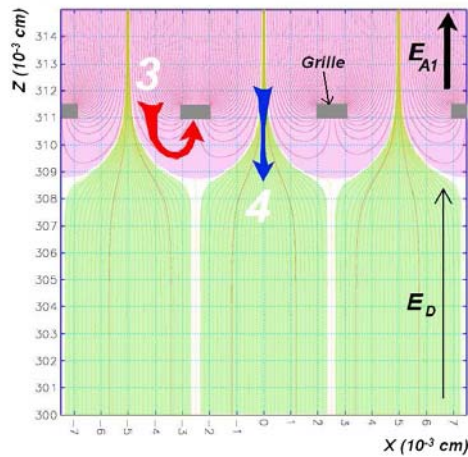
Comment ça marche ?

3. Multiplication des e^- au contact de la source

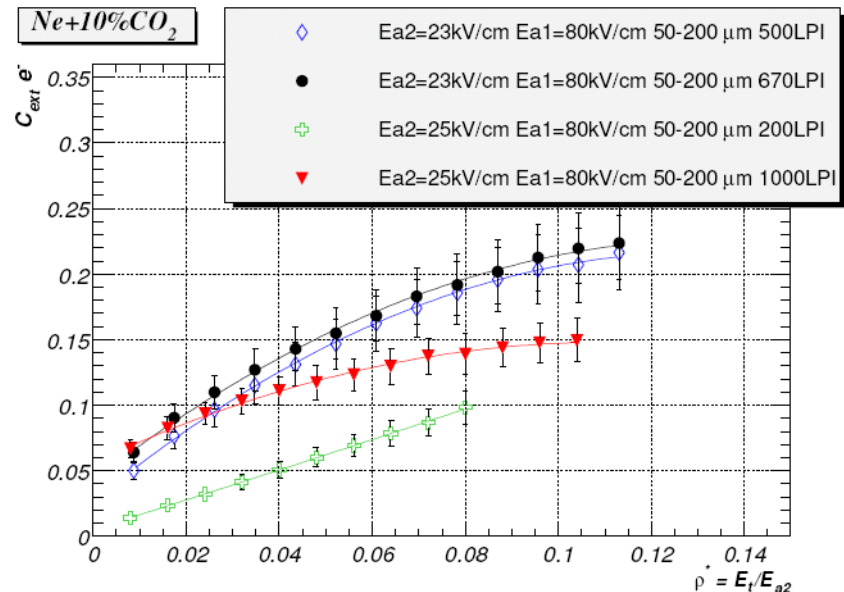
Plus les primaires sont créés loin de la source, moins ils sont amplifiés



4. Traversée de la première micro-grille : extraction



(b)

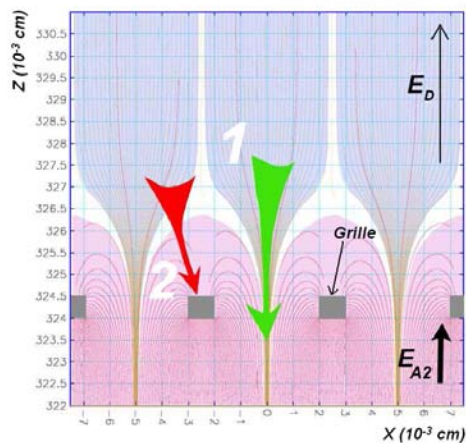


Comment ça marche ?

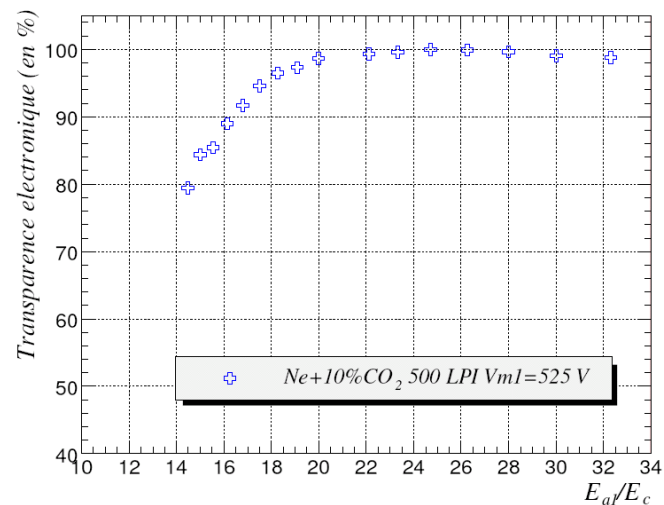
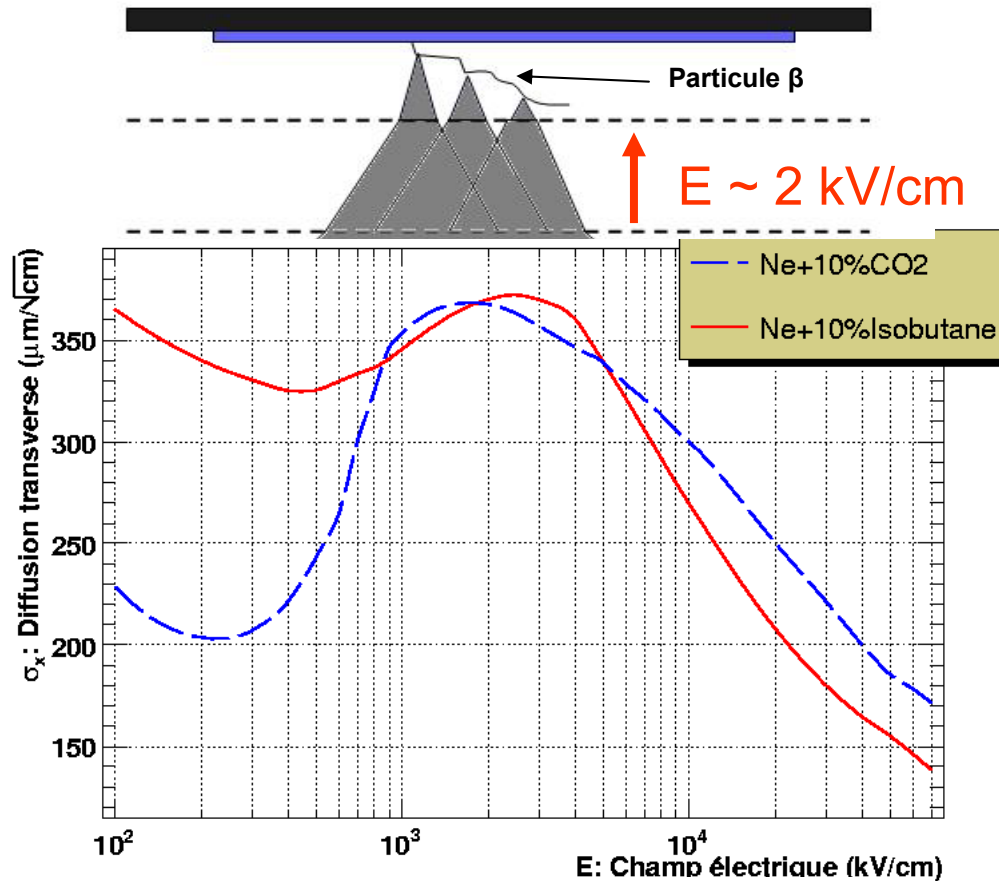
4. Diffusion dans l'espace de transfert

Simulation avec Garfield (CERN)

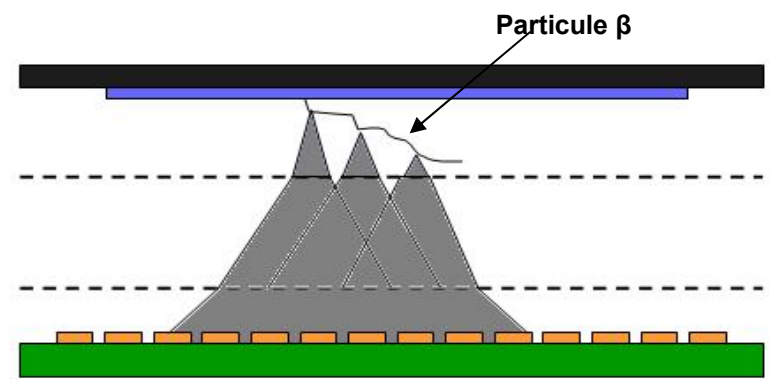
5. Traversée de la seconde micro-grille (Micromegas)



(a)



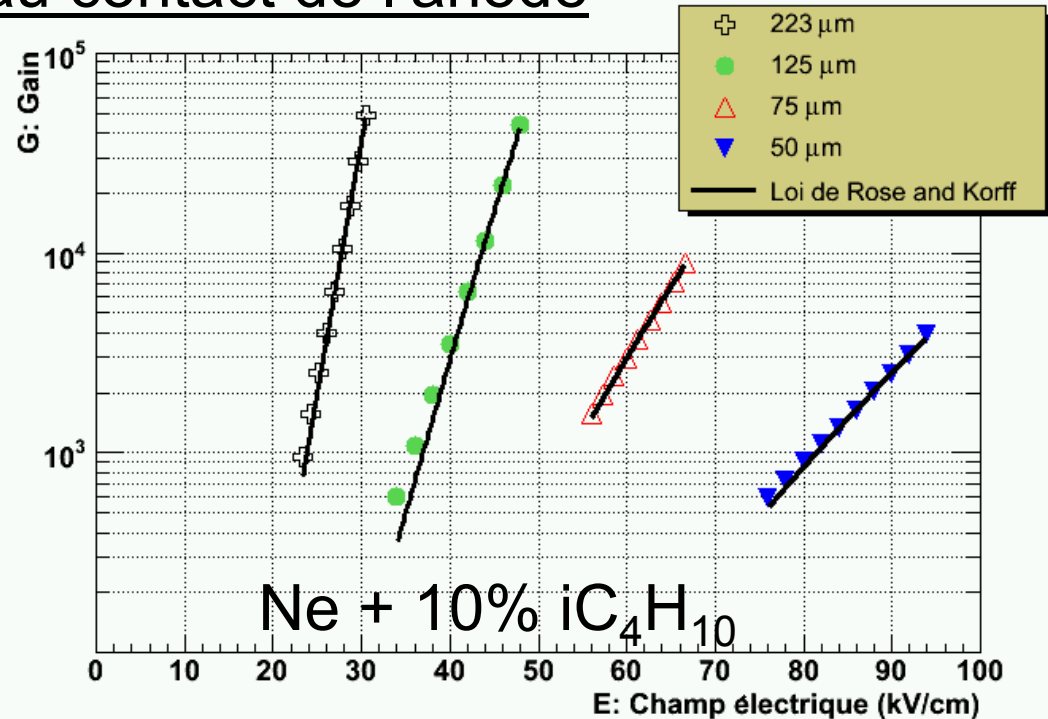
Comment ça marche ?



6. Seconde amplification au contact de l'anode

Ajustement des données avec loi de Rose et Korff étendue :

$$G = e^{APxe^{-BP/E}}$$



→ Modèle et données compatibles pour les épaisseurs investiguées

Comment ça marche ?

7. Induction du signal sur

l'anode

RAMO (1939)

Currents Induced
by Electron Motion

$$i_a = e \cdot v \cdot E_v$$

Théorème de Ramo

Dans un système à n électrodes, la charge q_a induite sur l'électrode a par une charge ponctuelle q en mouvement

est donnée par :

$$q_a = -q \cdot \varphi'_a(\mathbf{r})$$

et sa variation (dq_a/dt) ou courant induit i_a par :

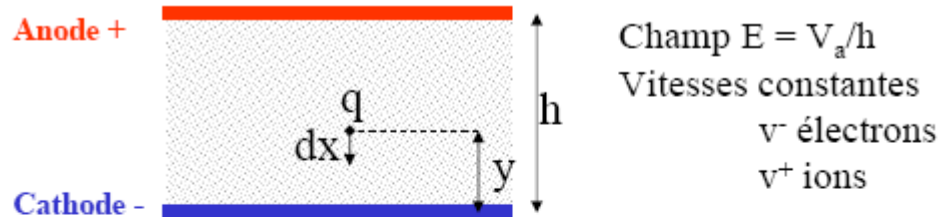
$$i_a = q \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{E}'_a(\mathbf{r})$$

où \mathbf{v} est la vitesse instantanée de q

$\varphi'_a(\mathbf{r})$ et $\mathbf{E}'_a(\mathbf{r})$ sont les potentiels et les champs électriques qui existeraient avec la charge q en \mathbf{r} , l'électrode a mise à un potentiel 1 et toutes les autres électrodes à un potentiel nul.

(Les caractères **en gras** sont des vecteurs).

Pour une chambre d'ionisation



Variation de charge (dQ) pour un déplacement dx :

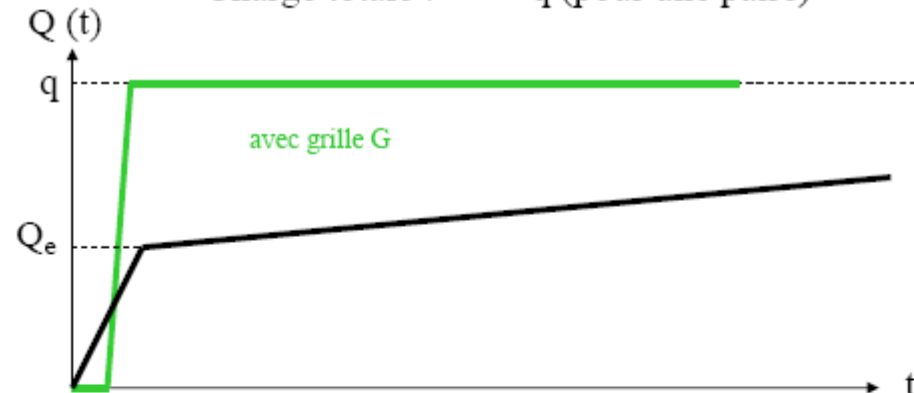
$$i = dQ/dt = q \cdot v \cdot E_{(pour Va=1)} = q \cdot (dx/dt) \cdot (1/h)$$

$$\text{et } dQ = q \cdot (1/h) \cdot dx$$

Charge due aux ions : $Q_i = q \cdot y/h$

Charge due aux électrons : $Q_e = q \cdot (h-y)/h$

Charge totale : q (pour une paire)



Avec la grille, le signal en A est créé par le déplacement des électrons entre G et A

Comment ça marche ?

8. Observation du courant induit sur l'anode

Seul le déplacement des charges dans l'étage Micromegas contribue

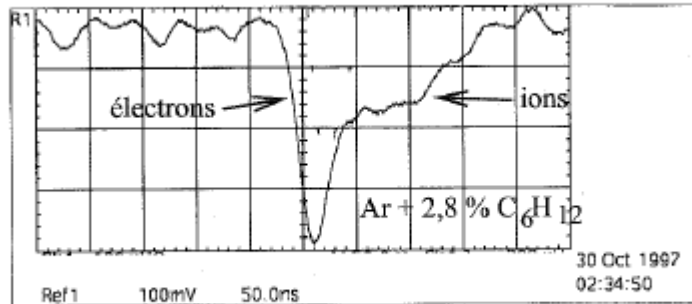


Fig. 4.10 - Signal après mise en forme par le MQS104; gaz: Ar+2.8% C₆H₁₂.

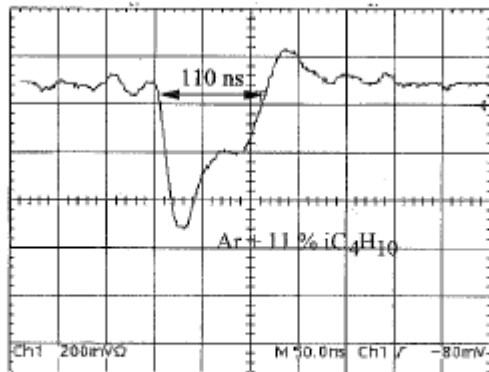


Fig. 4.13 - Signal après mise en forme par le MQS104 avec le mélange Ar+11% iC₄H₁₀. Prototypé C2, Gain= 2×10⁴.

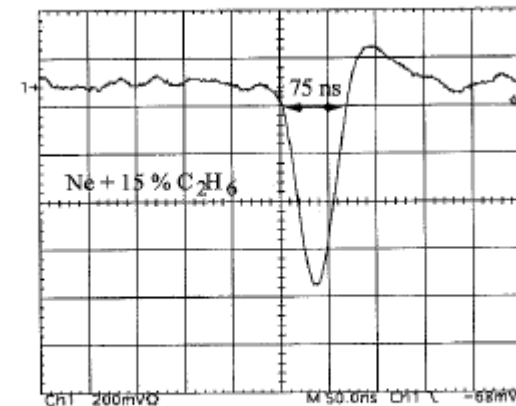
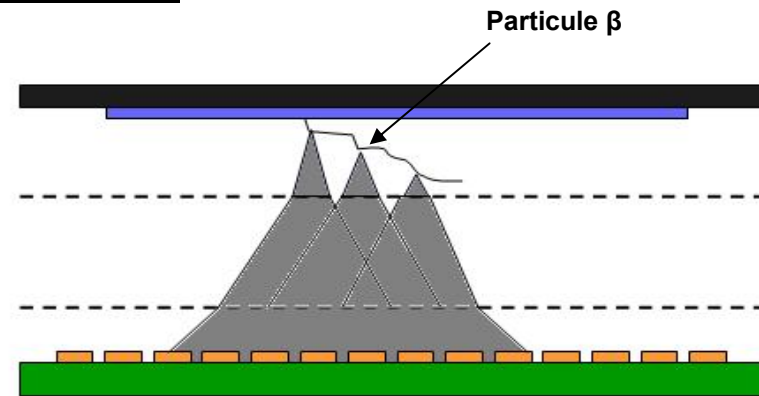


Fig. 4.16 - Signal après mise en forme par le MQS104; mélange Ne+15% C₂H₆.

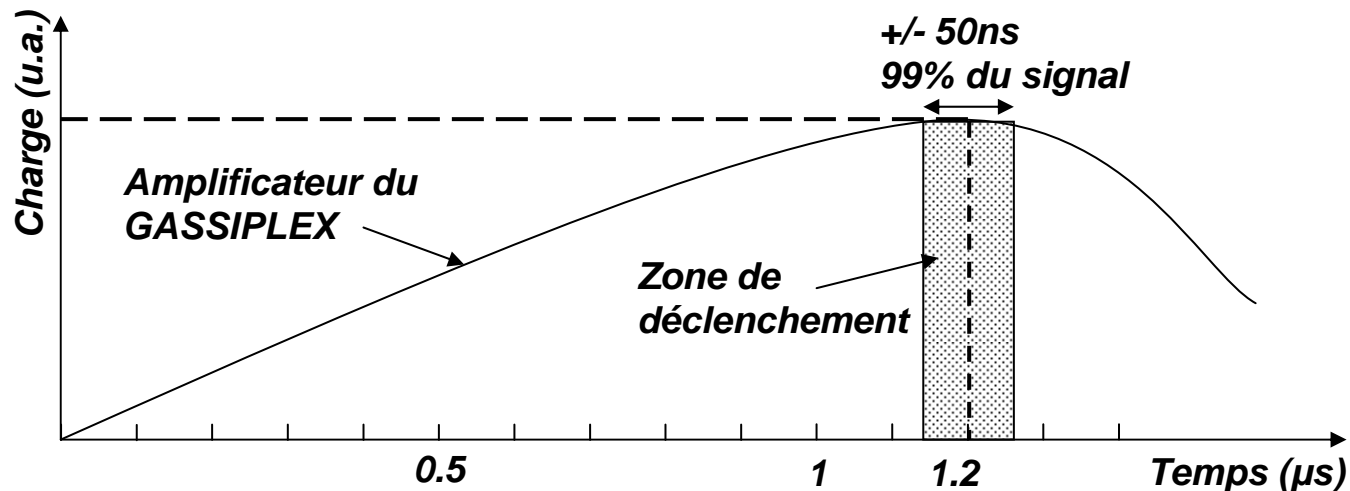
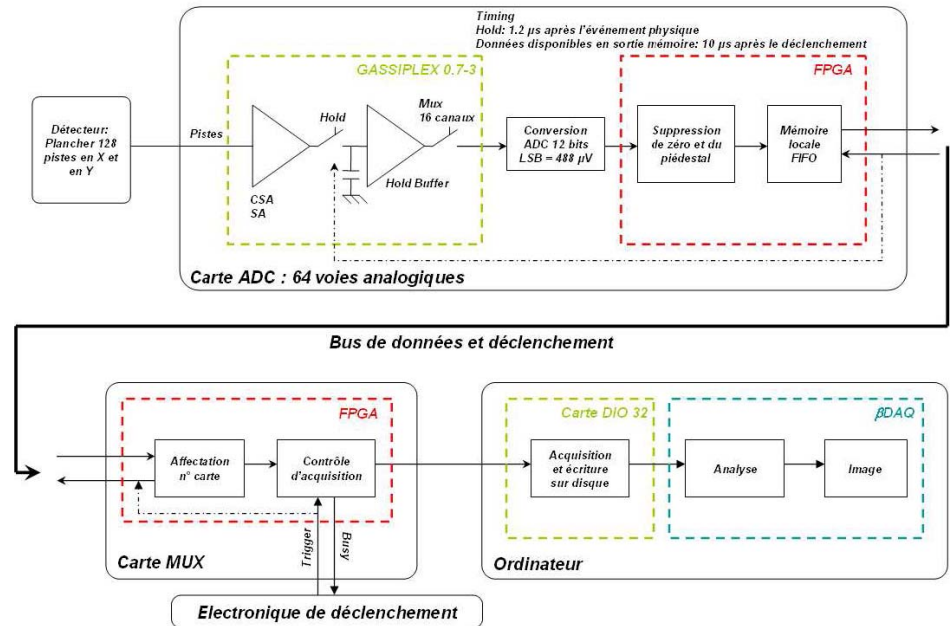
Adaptation de l'électronique : voir Thèse Développement du détecteur gazeux Micromegas pour l'expérience COMPASS.

Comment ça marche ?

9. FE et traitement des données

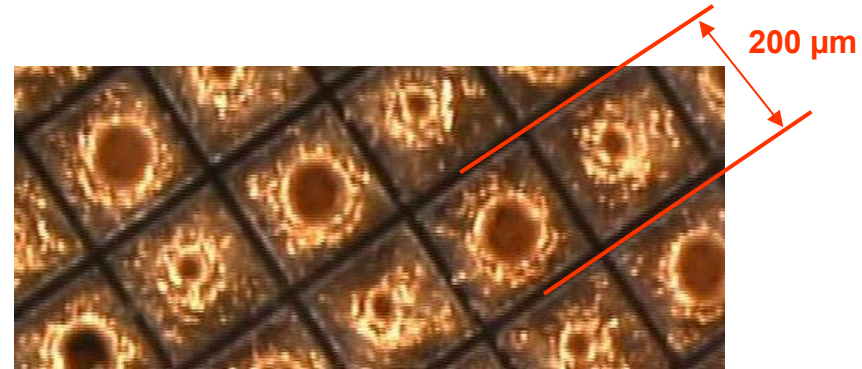
Paramètres	Valeurs
Temps de montée	$1.2 \pm 0.1 \mu s$
Bruit à 0 pF	$530 e^- rms$
Bruit dû à la capacité externe	$11.2 e^- / pF$
Dynamique positive	560 fC (0 à 2V)
Dynamique négative	300 fC (0 à -1.1V)
Gain	3.6 mV/fC
Dispersion de la linéarité	$\pm 2 fC$
Retour à la ligne de base	$\pm 5\%$ après $5 \mu s$
Fréquence de lecture	10 MHz
Consommation	8 mW/voie à 10 MHz
Coefficient de température	$0.05 mV/^{\circ}C$

Prix 16 voies : 1,5 €

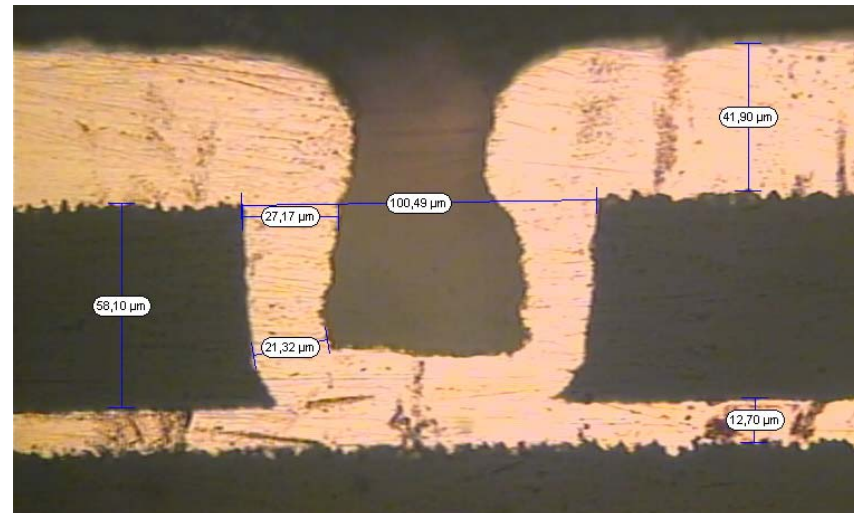
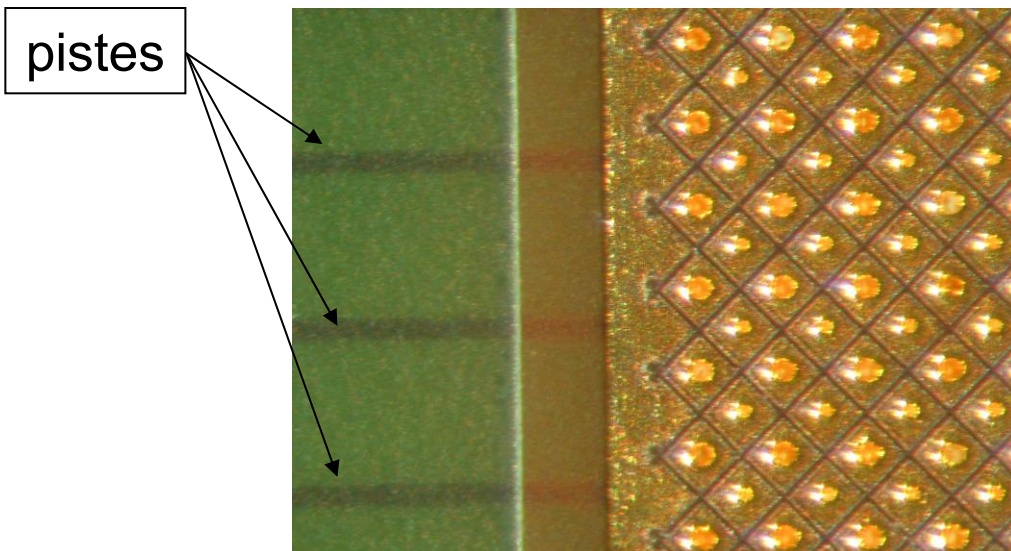


Les premières images avec une anode segmentée

- Très haute résolution
 - Petits pixels
 - Gravure laser
- 2D avec pistes croisées
 - 36400 pixels
 - 256 pistes

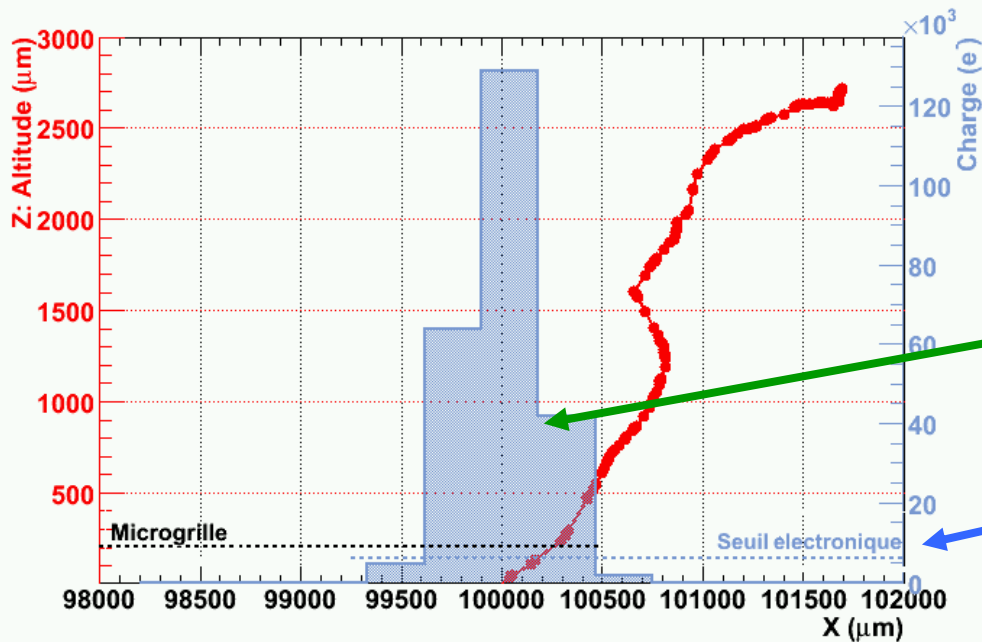
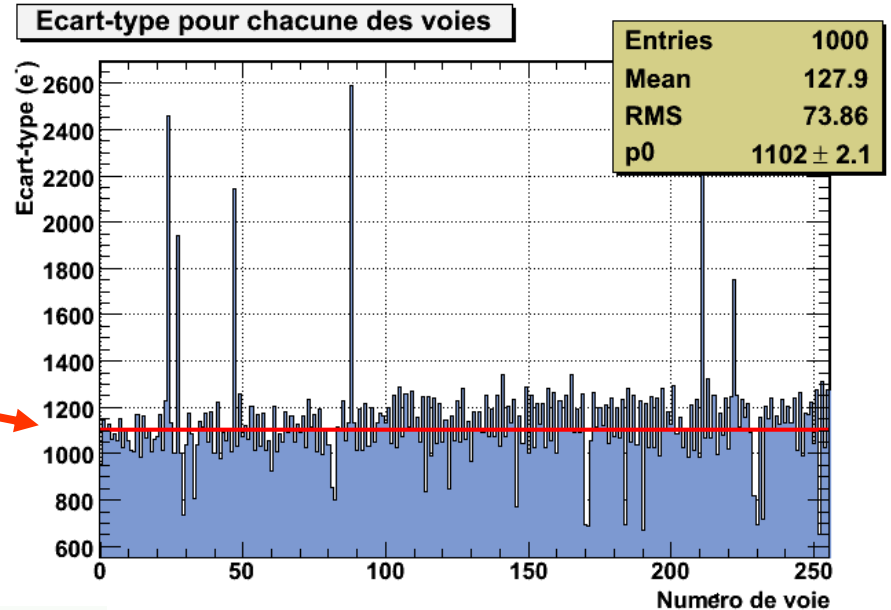


μvias de 1 à 3 (x500)



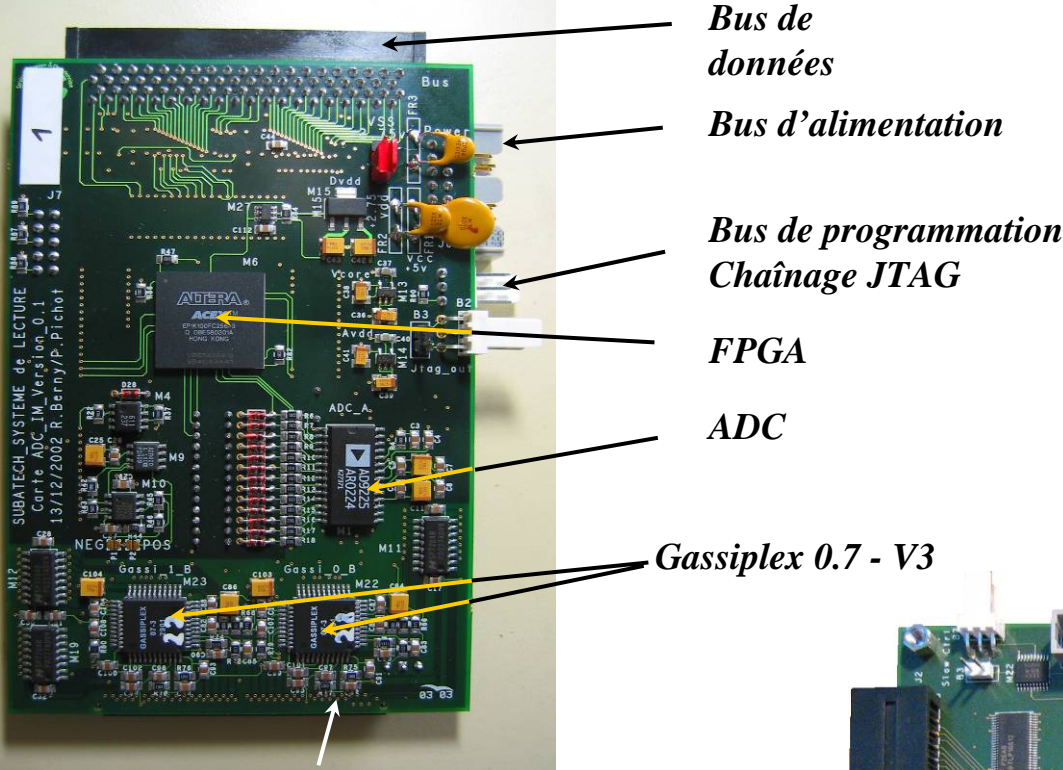
Le signal est-il exploitable ?

Référence : bruit sur les voies de lecture



Mesure de la position avec **signal** au dessus du **seuil**

Acquisition des données



Carte Acquisition
2 x 10 cartes ADC

Prix : 1000 €

Connexion au détecteur

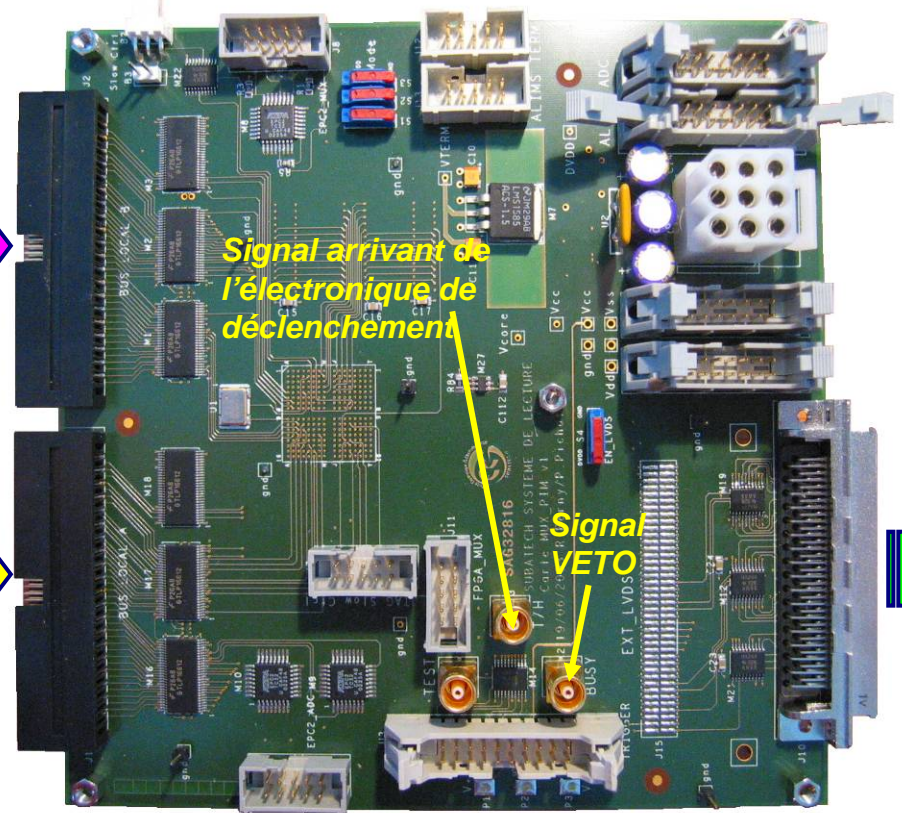
Carte ADC 64 voies

Prix : 250 €

25 000 positions/s
(10% d'occupation)

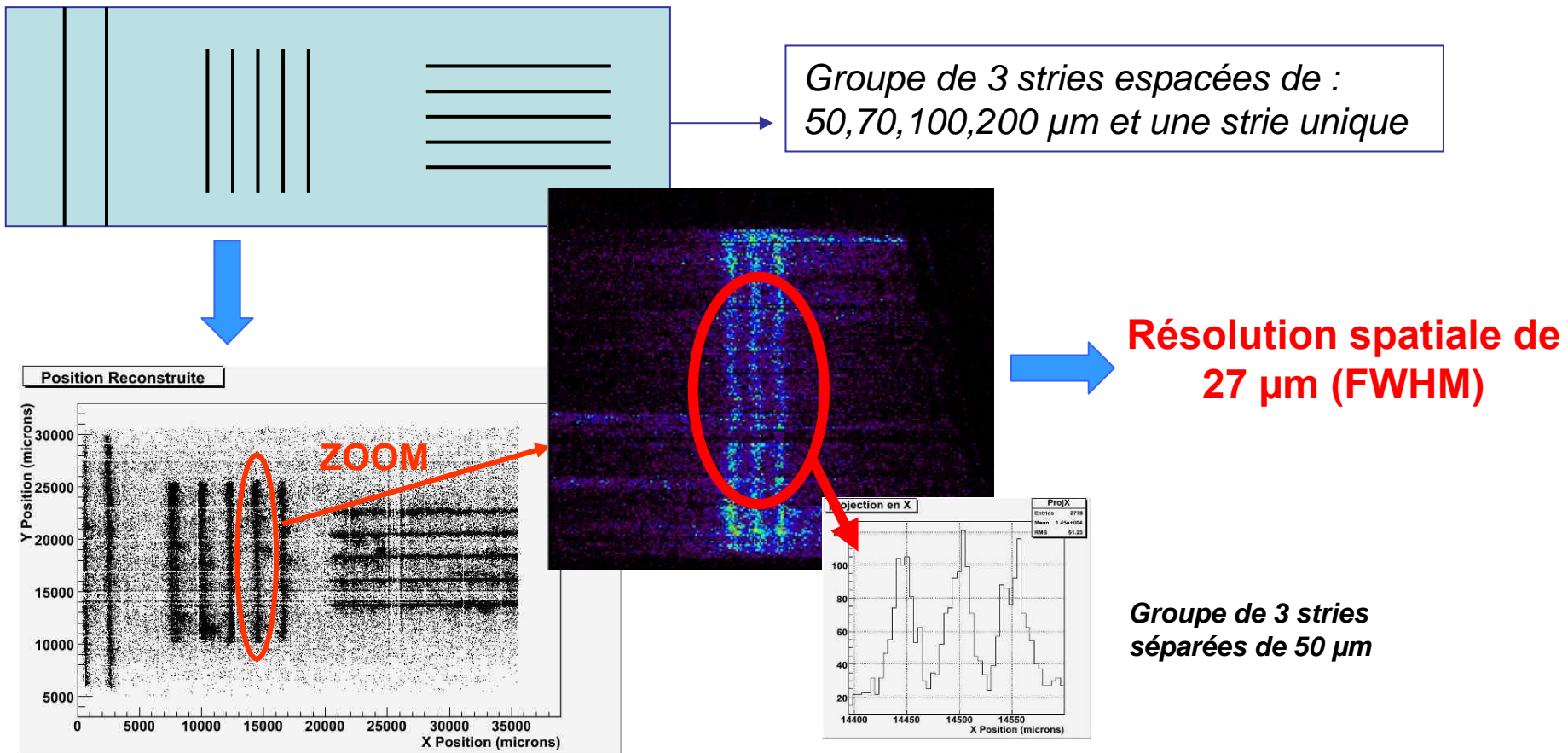
Bus de données 1

Bus de données 2



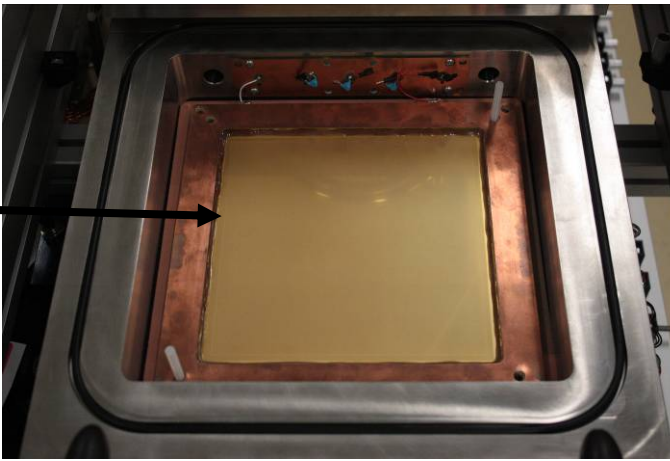
L'imagerie β haute résolution

Echantillons test: Lame de microscope gravée au laser et remplie de gel tritié.

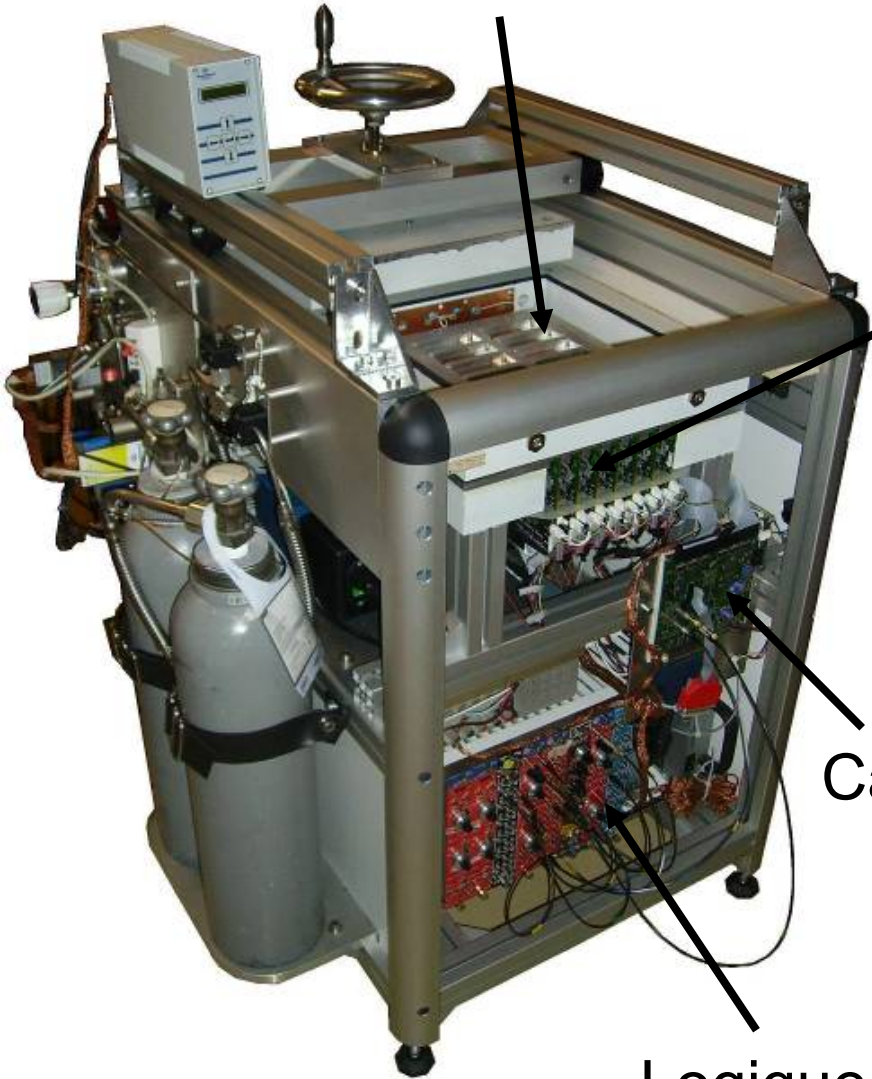


Techno « scalable » ...

Zone active : 18 x 18 cm²

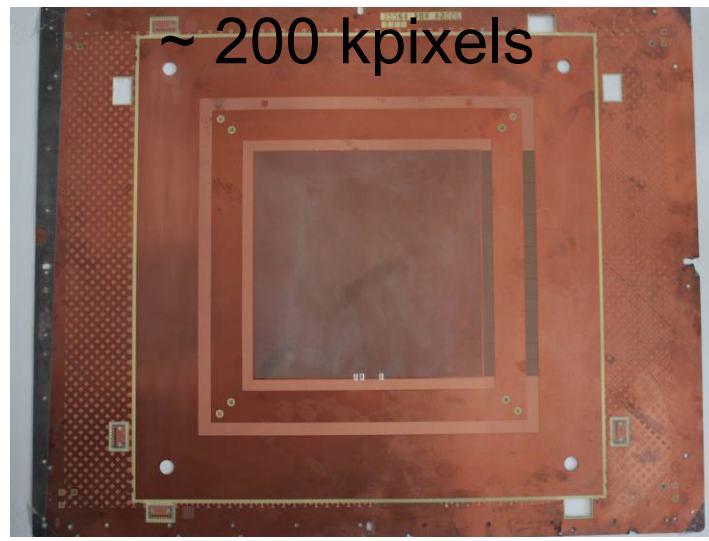


Cartes FE, 896 voies



Cartes MUX

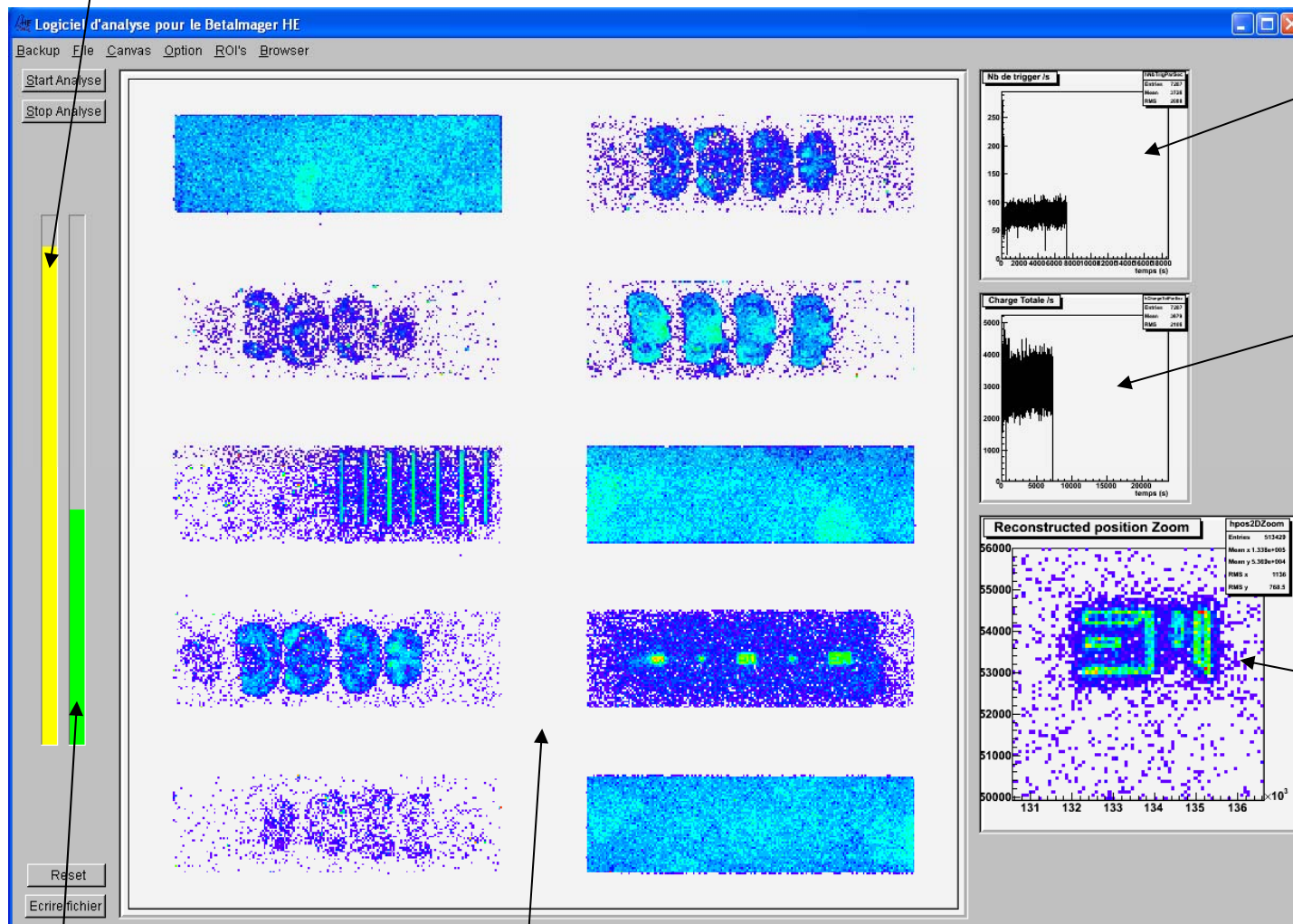
Logique trigger



~ 200 kpixels

Contrôle en ligne de l'image

Contrôle retard de lecture



Contrôle du taux d'événement

Contrôle de la charge

Zoom (pixels à l'image de 40 μm)

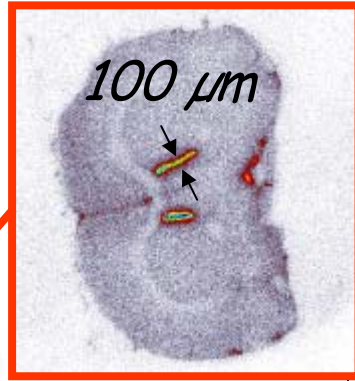
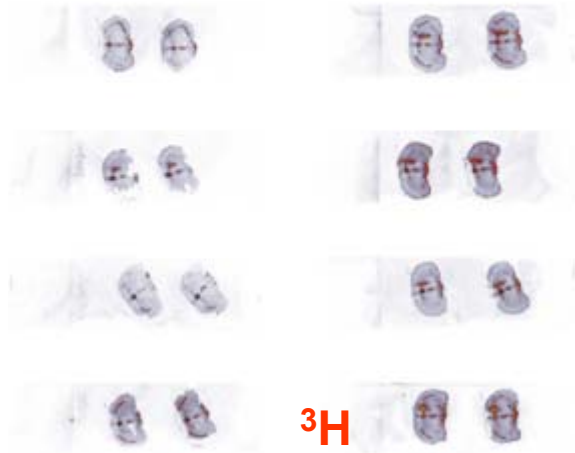
Contrôle taux d'écriture

Image plein champ de vue (pixels à l'image de 400 μm)

Temps de pause typique : 1 jour

Des images prometteuses

Zone sans échantillon
(0.05 cpm/mm²)

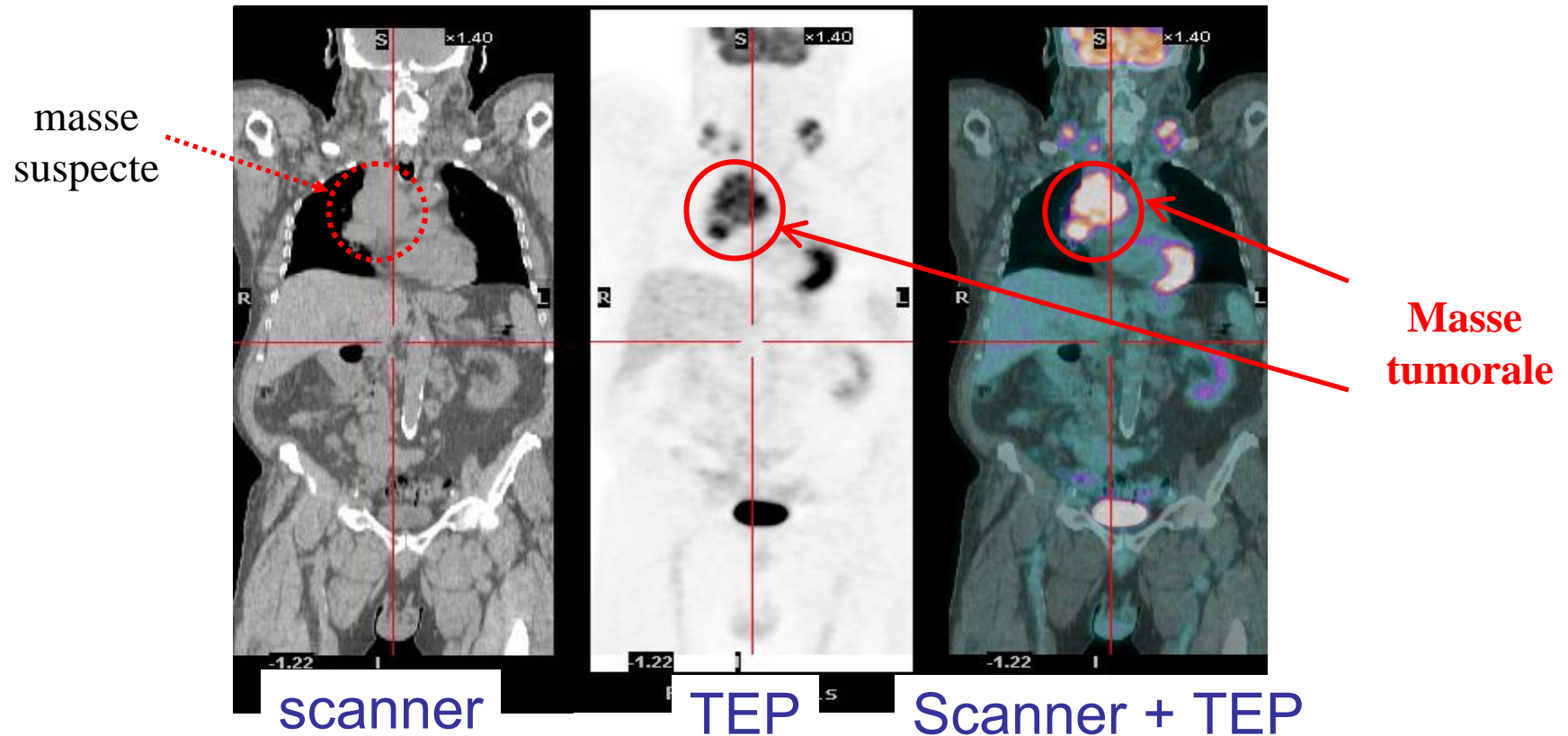


Suivi du développement en collaboration avec l'Inserm et Arronax

En cours de valorisation par les tutelles de Subatech

1.L'imagerie de quantification γ « in-vivo »

Plus de 90 % des examens TEP: **cancérologie**



**combien de sites de fixations dans la masse tumorale ?
quel est le volume de la masse tumorale ?**

La quantification en TEP

Le point de vue médical:

Etat du patient

Choix de stratégie thérapeutique

Suivi thérapeutique

Données d'entrée pour le calcul de la dosimétrie

La TEP est semi-quantitative

Problèmes liés à la quantification absolue:

Atténuation des photons

Diffusion Compton

Résolution spatiale du tomographe

Evénements fortuits

Reconstruction tomographique

Mouvement du patient

Durée de la mesure

Important d'améliorer la quantification

Les principes d'un examen clinique TEP

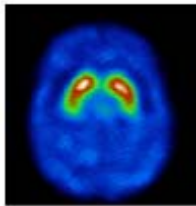
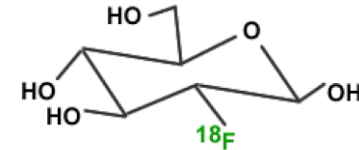
Identifier traceur caractéristique de ce que l'on souhaite imager. Ex: glucose



Fabrication de l'émetteur radioactif
ex: ^{18}F

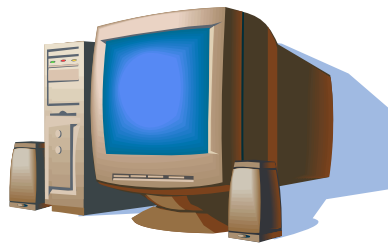
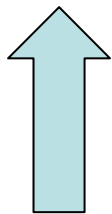


Synthèse du radiotraceur (émetteur + traceur)
Ex: ^{18}F FDG

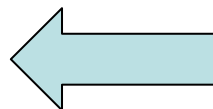


Diagnostic

image

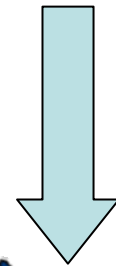
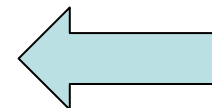


Traitement données
reconstruction image



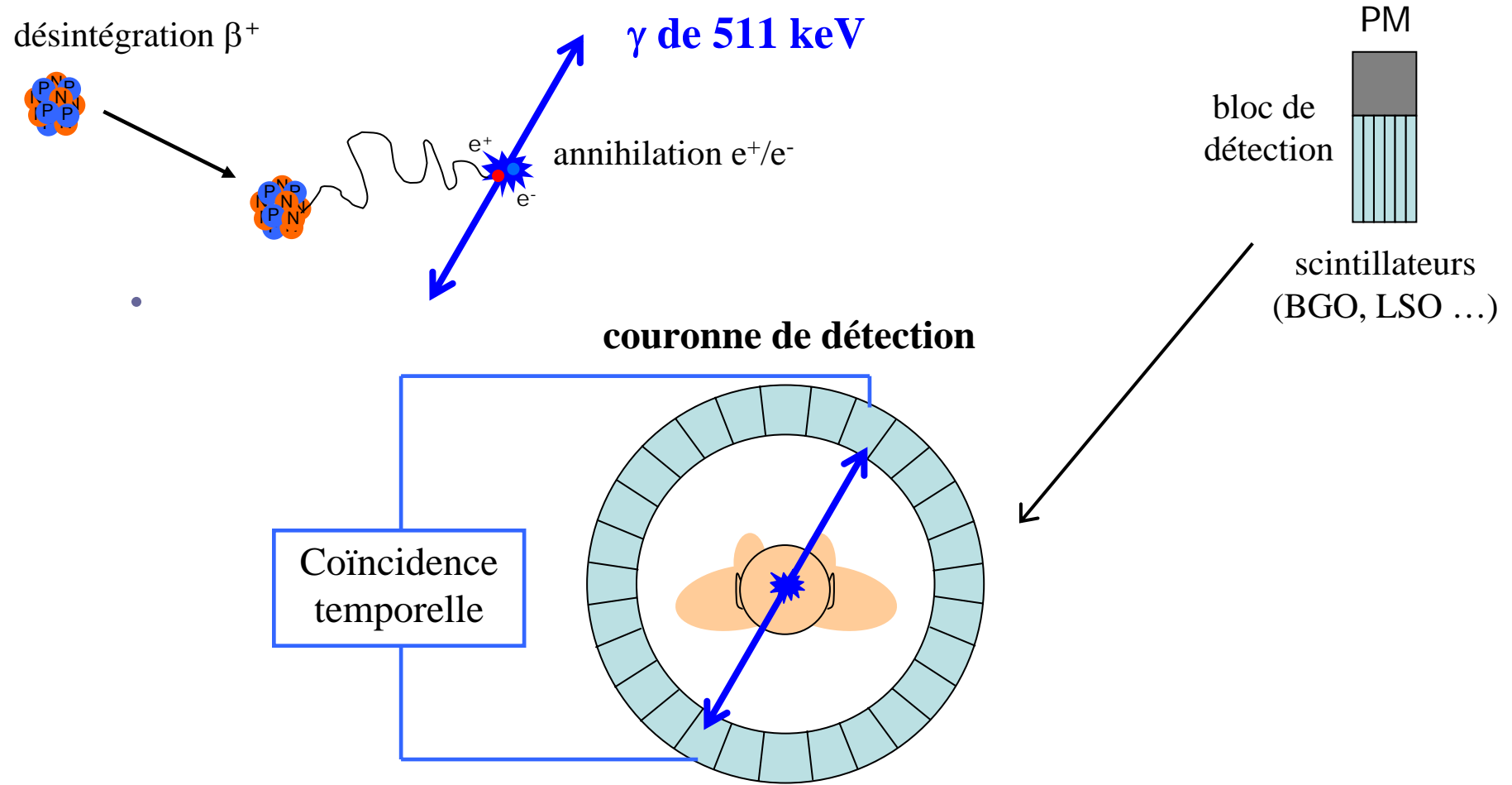
Détection et acquisition données
activité $\sim 3\text{MBq/kg}$



Délai:
1 heure



Injection du radiotraceur
dose $\sim 8\text{mSv}$

Principe de l'imagerie TEP



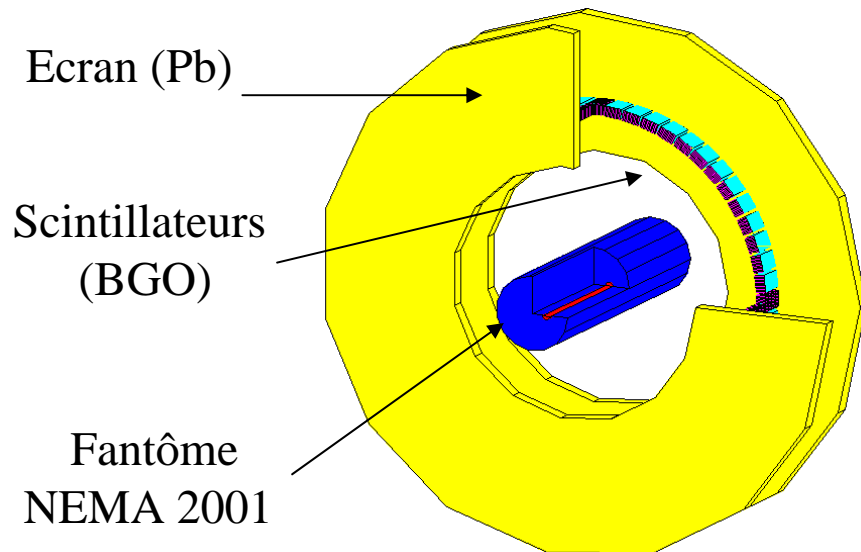
LOR:
Line Of Response  **algorithme de reconstruction tomographique**  **image**

Simulation d'une caméra TEP

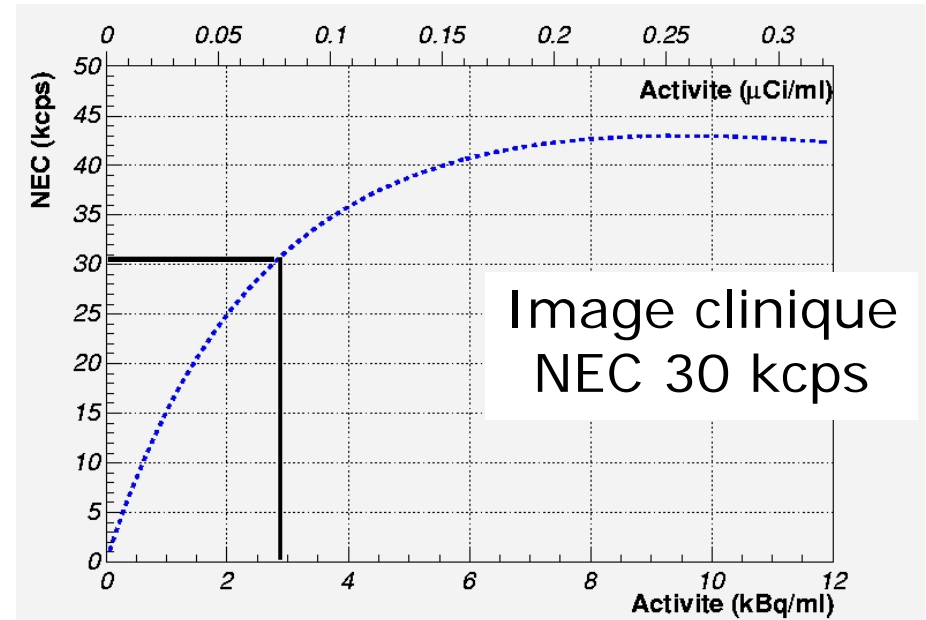
Outils: **AliRoot**

GEANT3.21 Monte Carlo (passage à **GEANT4** sans difficultés via **VMC**)

ROOT Framework, <http://root.cern.ch>



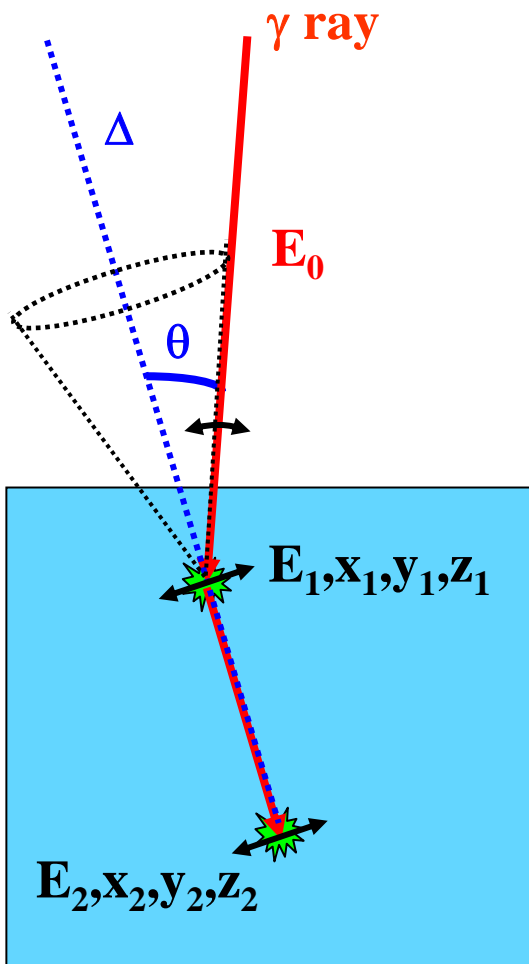
caméra TEP commerciale
D = 90 cm, L = 15.2 cm



code local validé

Un outil de référence aujourd'hui :
Plateforme de simulation GATE

3. L'imagerie Compton ?



Hypothèse : on connaît l'énergie du γ incident

E_0 = Incident γ energy

On mesure avec le télescope Compton :

E_1 = Energy lost by the scattered electron at the first hit

x_1, y_1, z_1 = First Interaction Location

x_2, y_2, z_2 = Second Interaction Location

On en déduit l'angle de diffusion Compton :

E_0 and $E_1 \Rightarrow$ scatter angle θ from Compton kinematics

$$\cos\theta = 1 - mc^2 \frac{E_1}{E_0(E_0 - E_1)}$$

x_1, y_1, z_1 and $x_2, y_2, z_2 \Rightarrow$ cone axis Δ



**Reconstructed
 γ direction:**

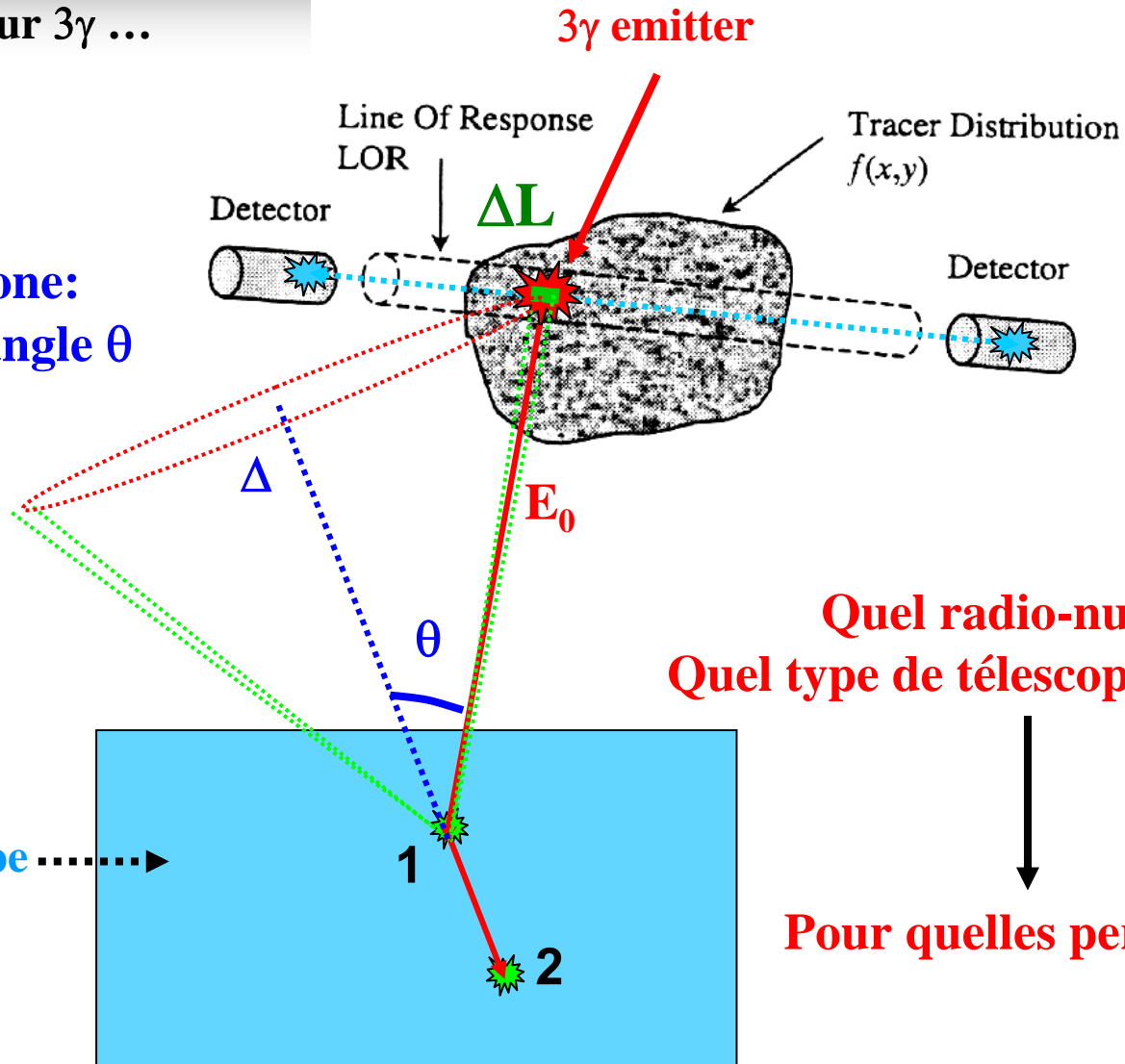
résolution spatiale \Rightarrow axe Δ du cône

résolution en énergie \Rightarrow angle Compton θ

L'imagerie à 3 γ

Avec un télescope Compton
et un émetteur 3γ ...

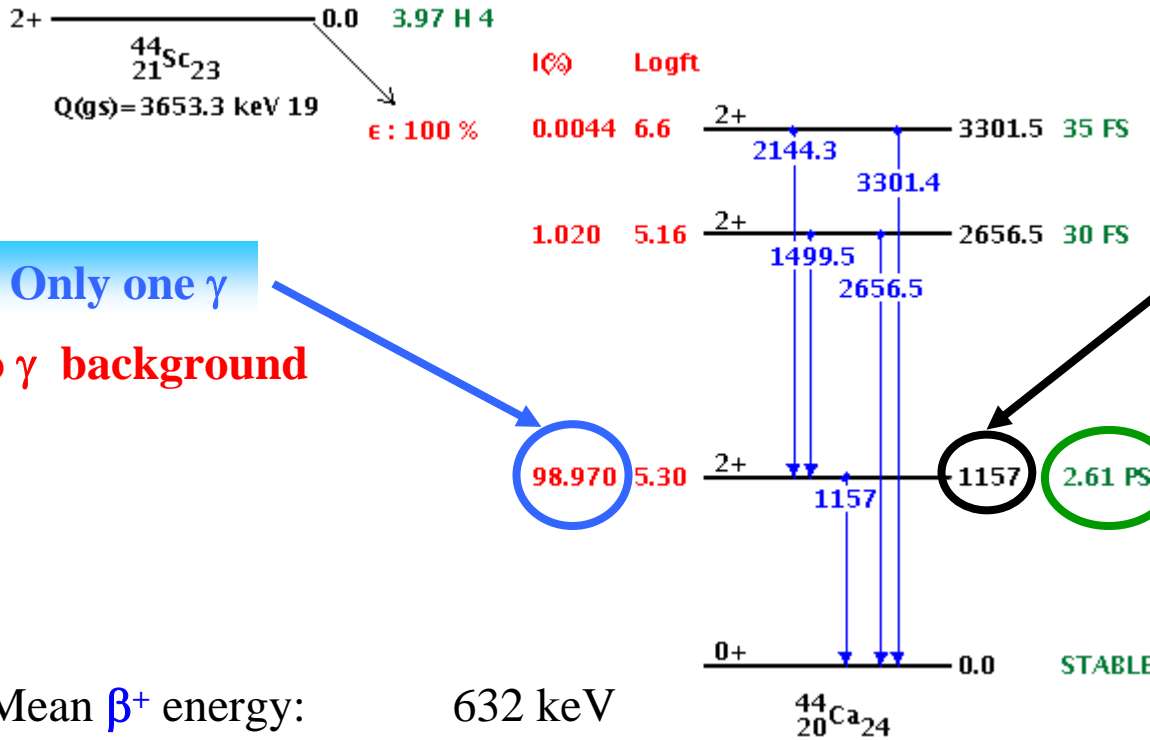
Reconstructed cone:
axis Δ , opening angle θ



Quel radio-nucléide
Quel type de télescope Compton ?

Pour quelles performances ?

L'émetteur 3 γ : le ^{44}Sc



Only one γ

No γ background

$E_\gamma \sim 1 \text{ MeV}$

Good for the Compton telescope

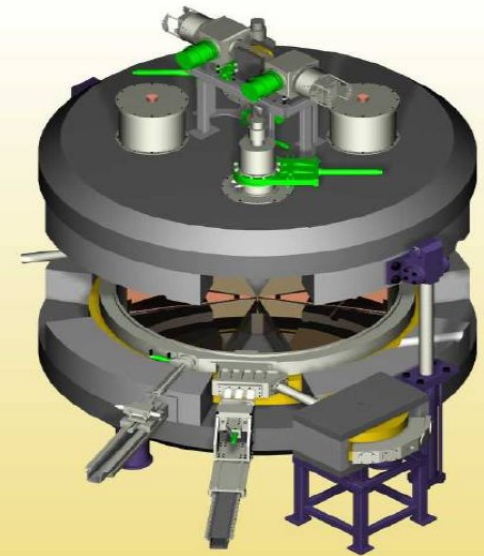
Ultra fast emission

Very precise time coincidence

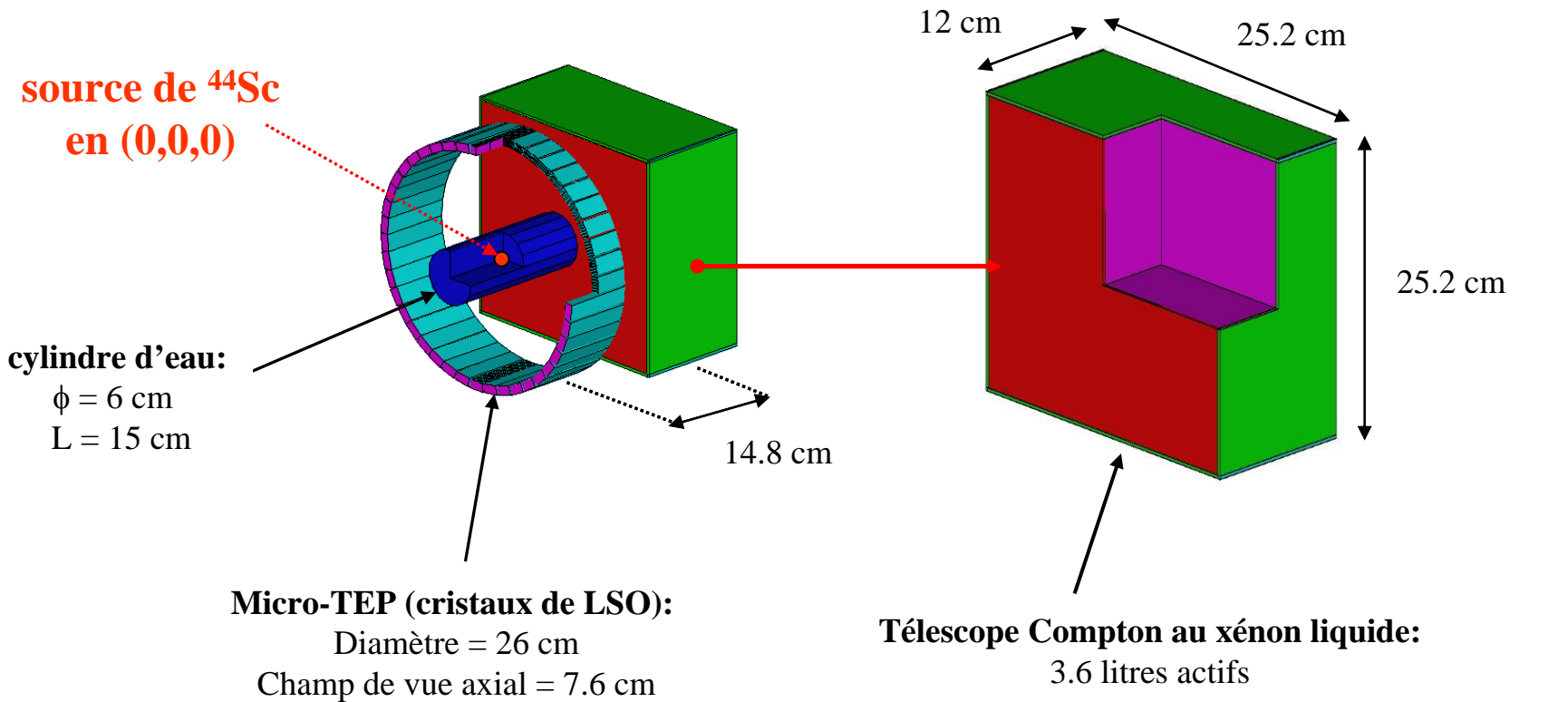
Mean β^+ energy: 632 keV

Maximum β^+ energy: 1474 keV

Recherche en cours pour fabriquer sur ARRONAX du ^{44}Sc



Dans le cas du petit animal



**mesure de la LOR avec la camera
micro-PET**

**mesure du 3^{eme} gamma avec le
télescope Compton au xénon liquide**

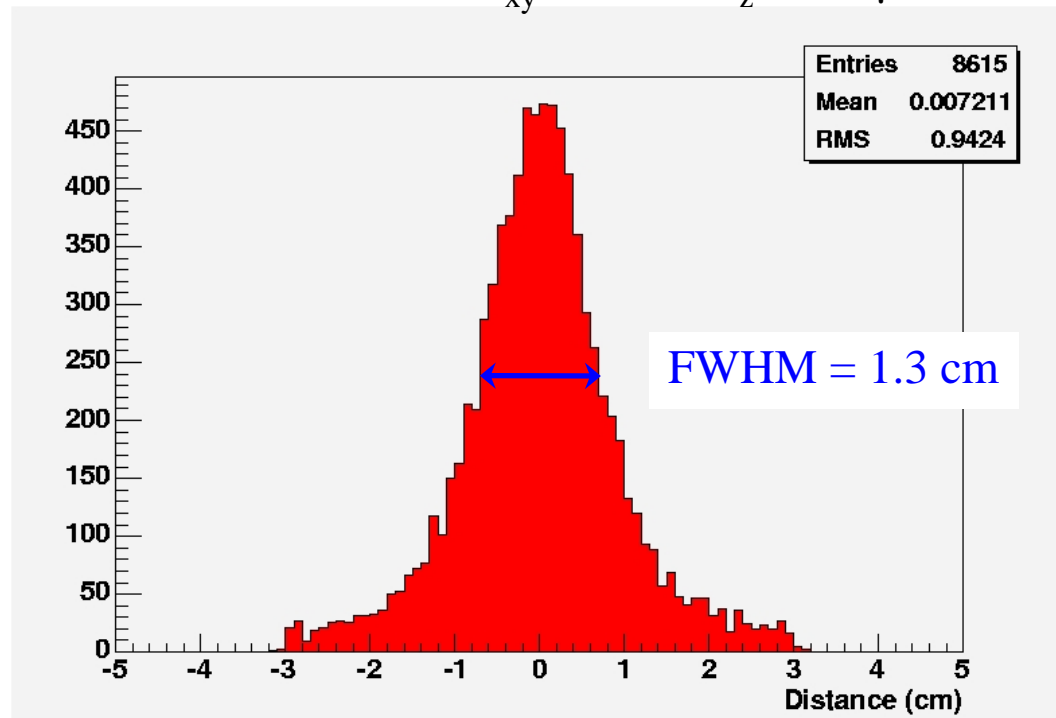
Cas réaliste

Considère : parcours du positron associé au ^{44}Sc , émission isotrope

Micro-TEP avec $\sigma_{xyz} = 1 \text{ mm}$,

Télescope Compton : $\sigma_E = 5.9 \% @ 1 \text{ MeV}$ (FWHM), bruit électronique: 200 e⁻,

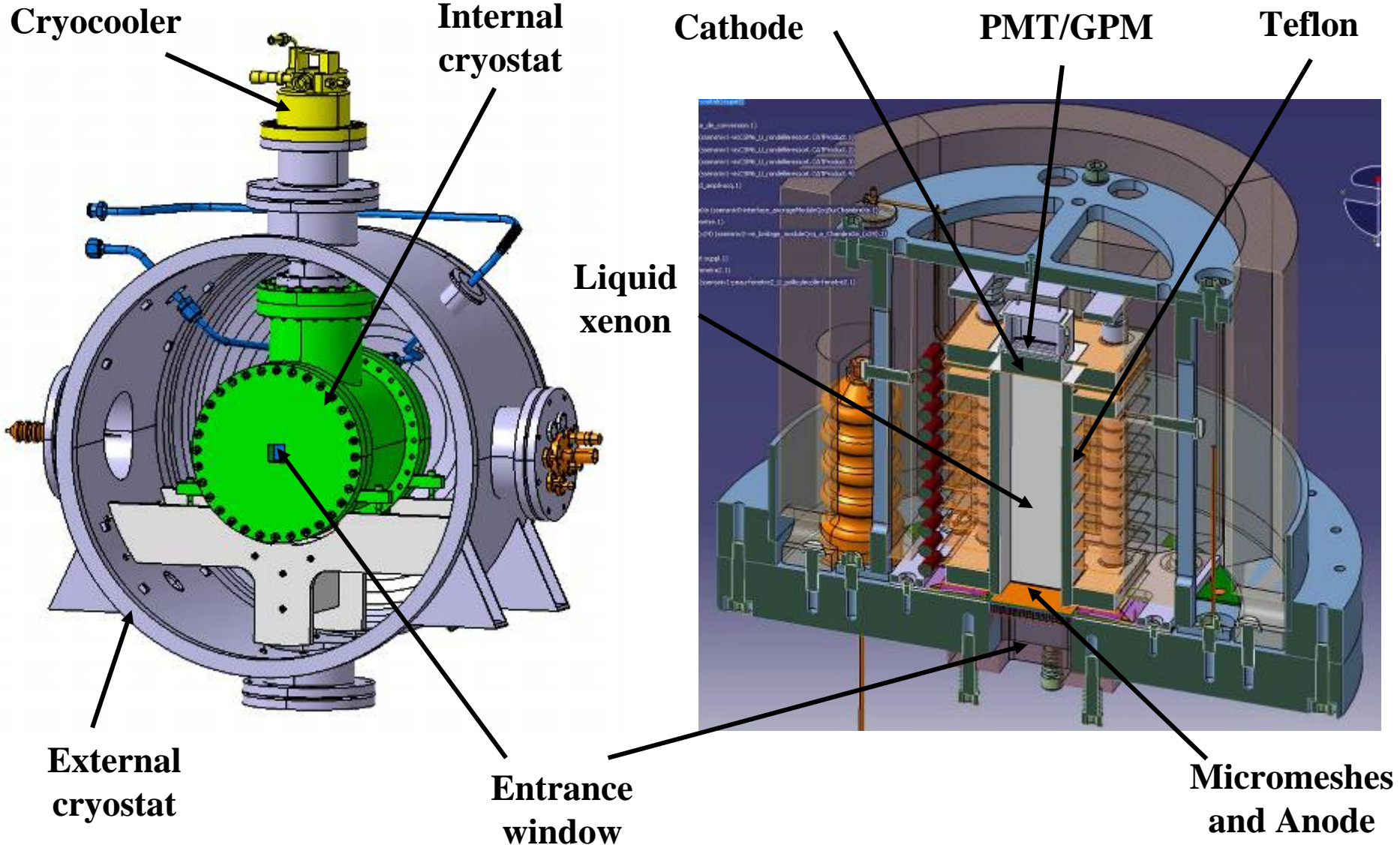
$\sigma_{xy} = 1 \text{ mm}$ $\sigma_z = 100 \mu\text{m}$



Résolution de 1.3 cm le long de la LOR

→ Point de départ de l'étude de faisabilité : 2006

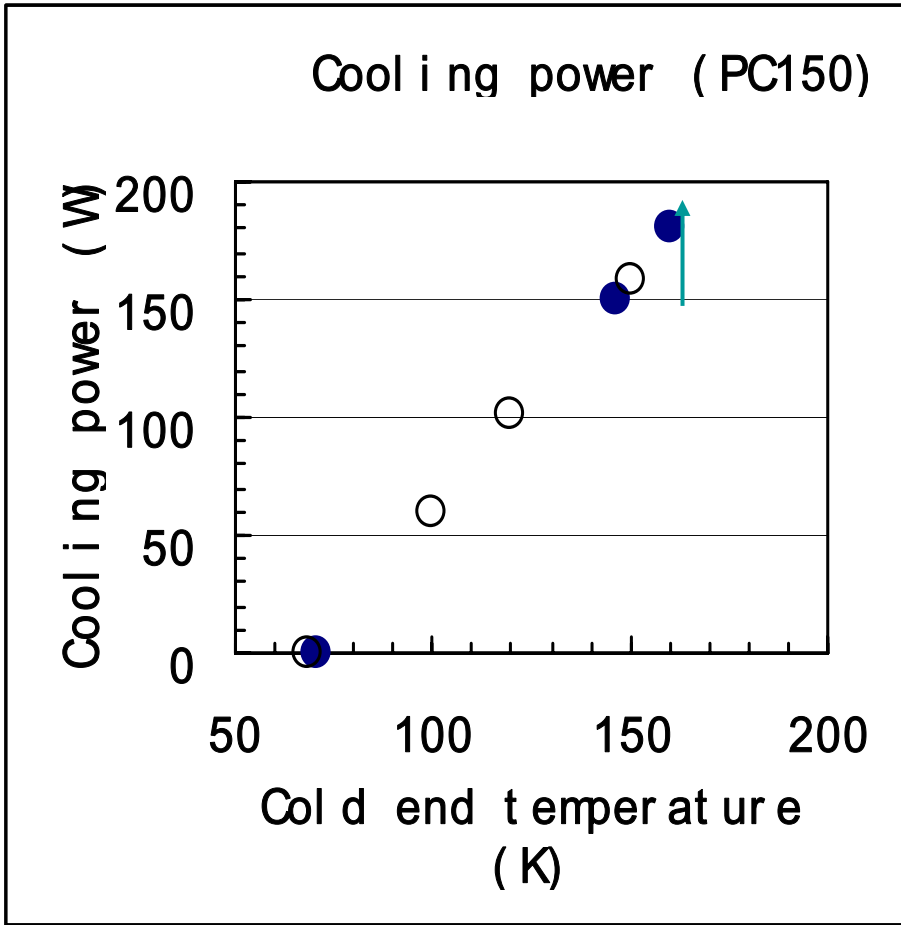
Développement d'un télescope Compton comprenant du xénon liquide, une chambre Micromegas et un Photodétecteur gazeux



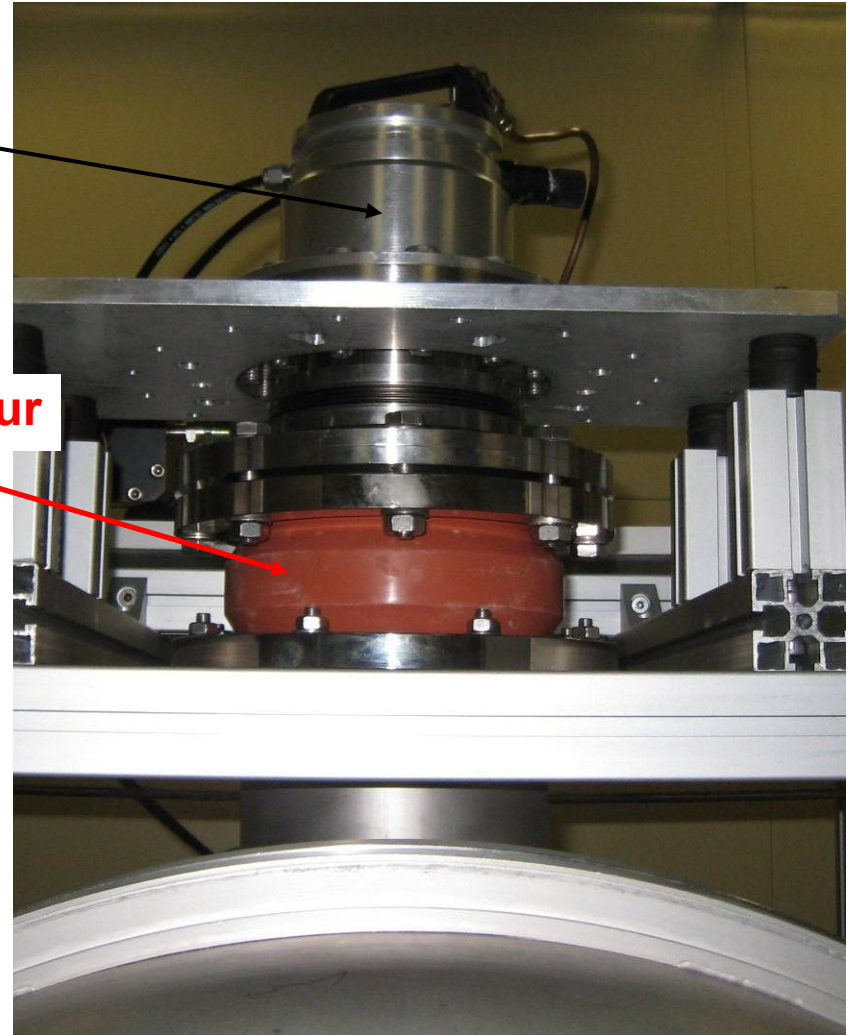
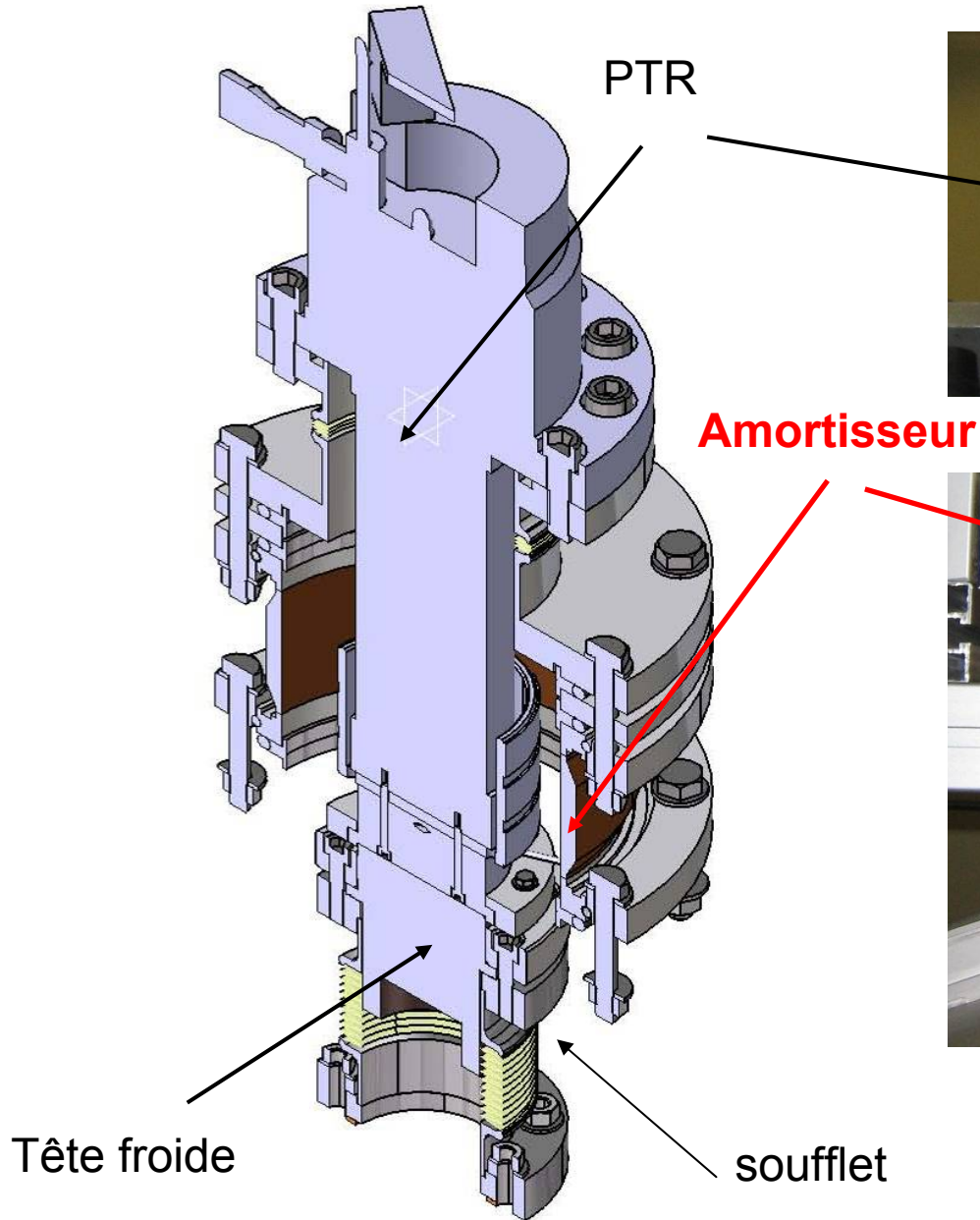
KEK-developed High-Power Pulse tube Cryocooler



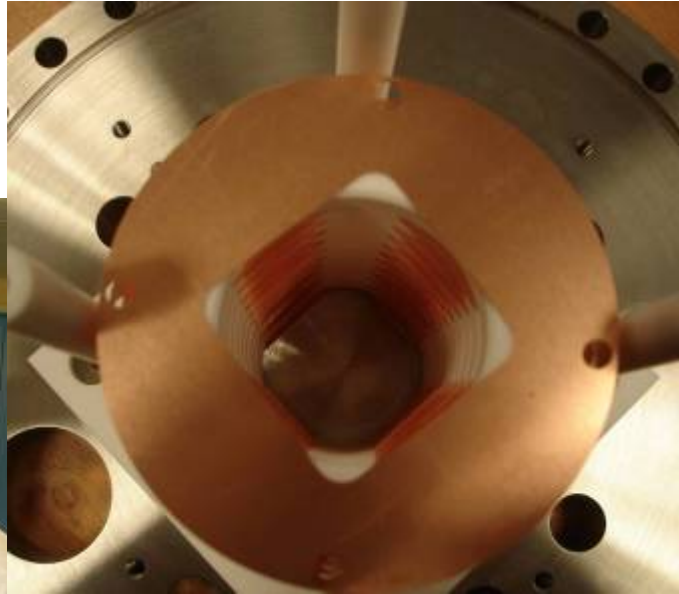
-Cooling power up to ~200W @165K



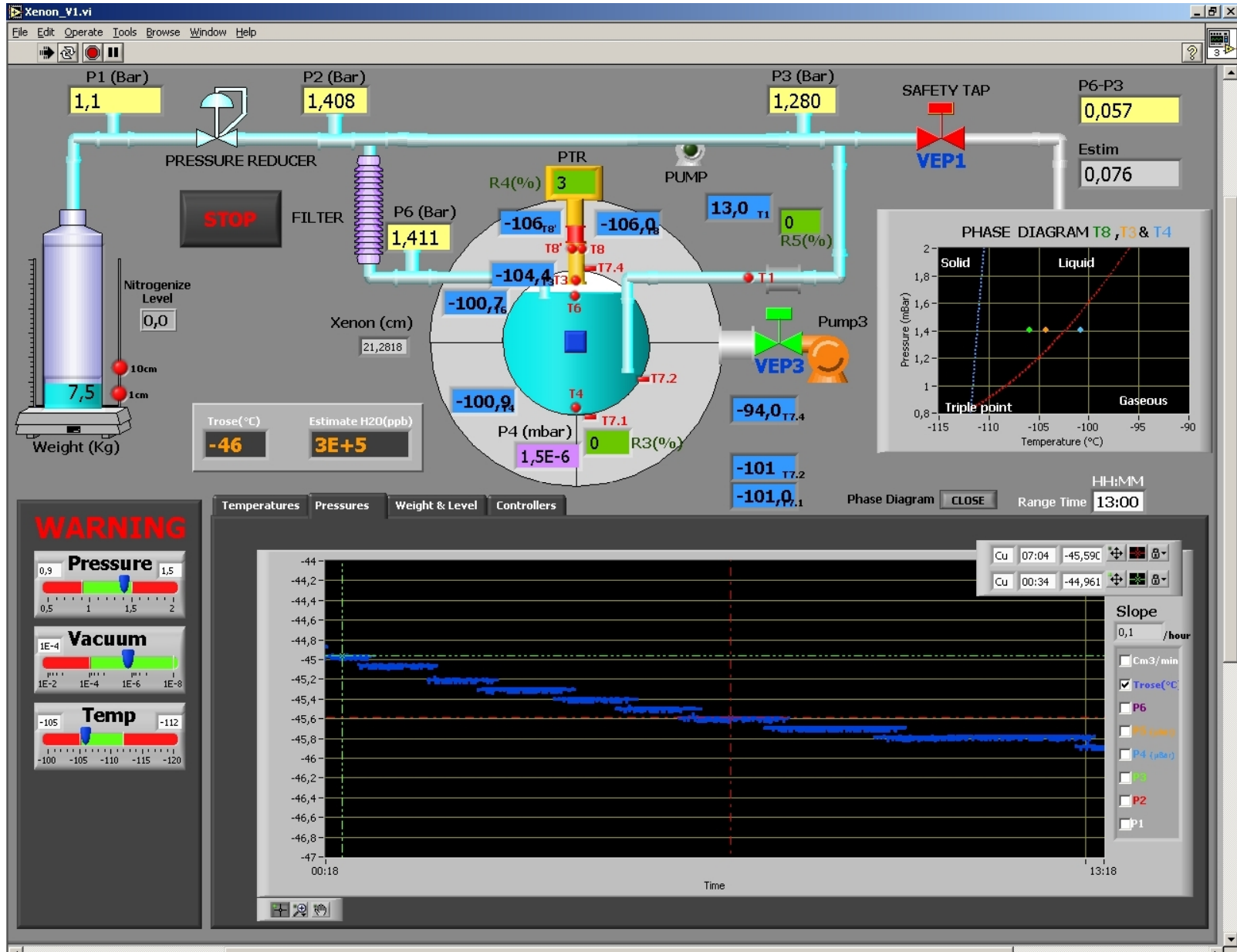
Mise en place du PTR



Nettoyage et assemblage de la zone active en salle propre



Contrôle de la cryogénie



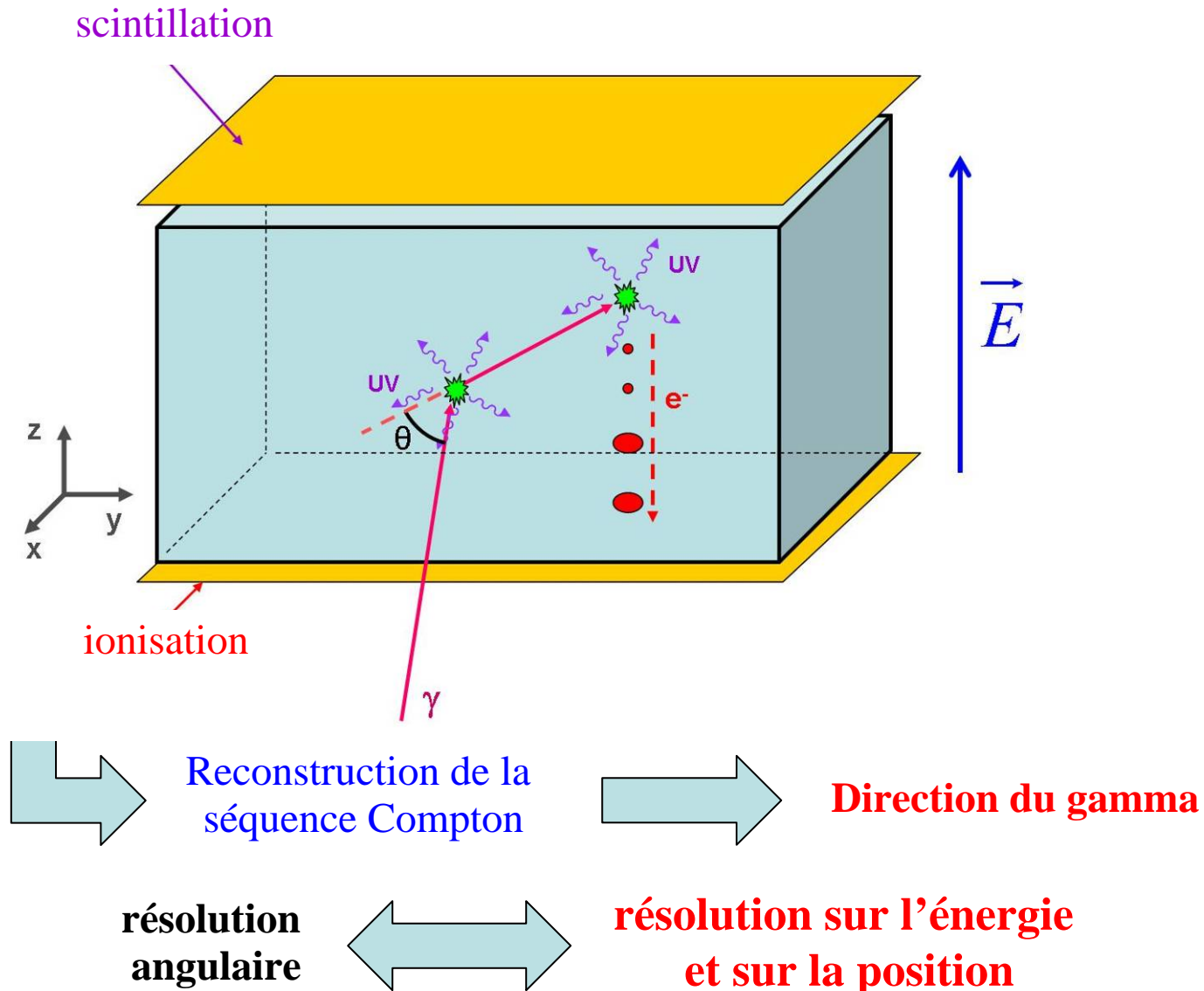
17:03 21 March 2007
Successful 'First Xenon Liquefaction'
at Nantes!



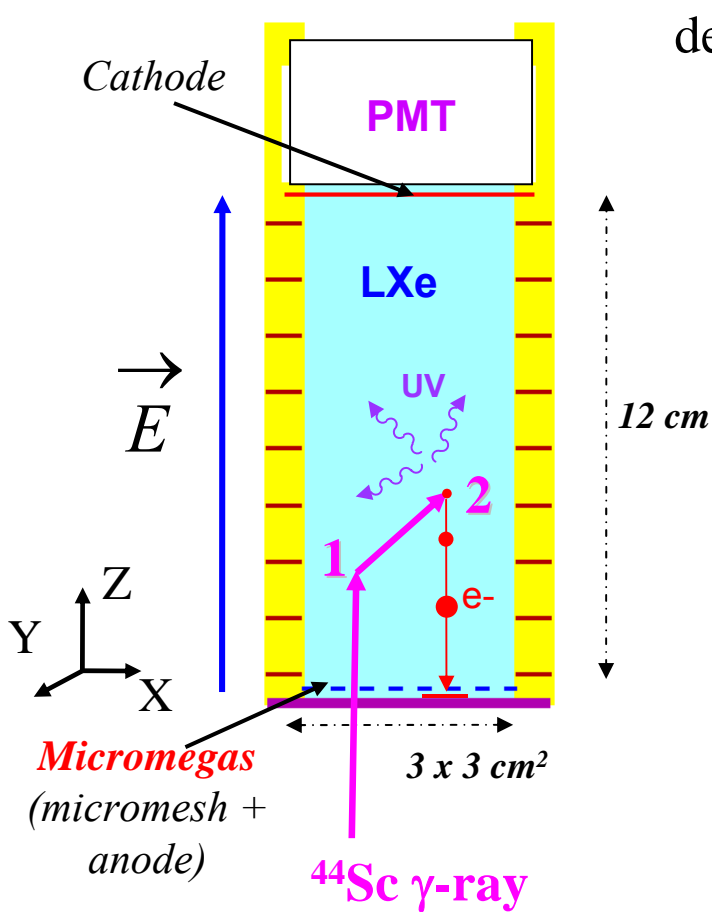
Great Contributions by:

- Eric Morteau (Electronics)*
- Patrick Le Ray (Mechanics)*
- Cyril Grignon (PhD student)*
- Noel Servagent (Xenon Cryogenics)*
- Jean-Pierre Cussonneau
(Simulation)*
- Dominique Thers (Team Leader)
(Nantes)*
- Tom Haruyama (Xenon Cryogenics)
(KEK)*

Un télescope Compton avec du gaz rare liquide, comment ça marche ?



Et dans notre cas, comment ça marche ?



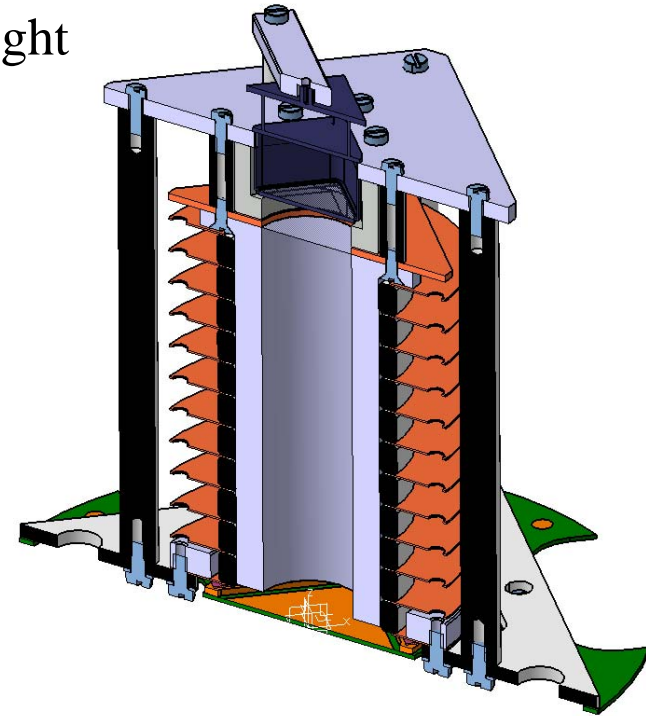
detection of scintillation light
 \Rightarrow trigger time t_0

collection of e/i
 $\Rightarrow t_1, E, x, y$



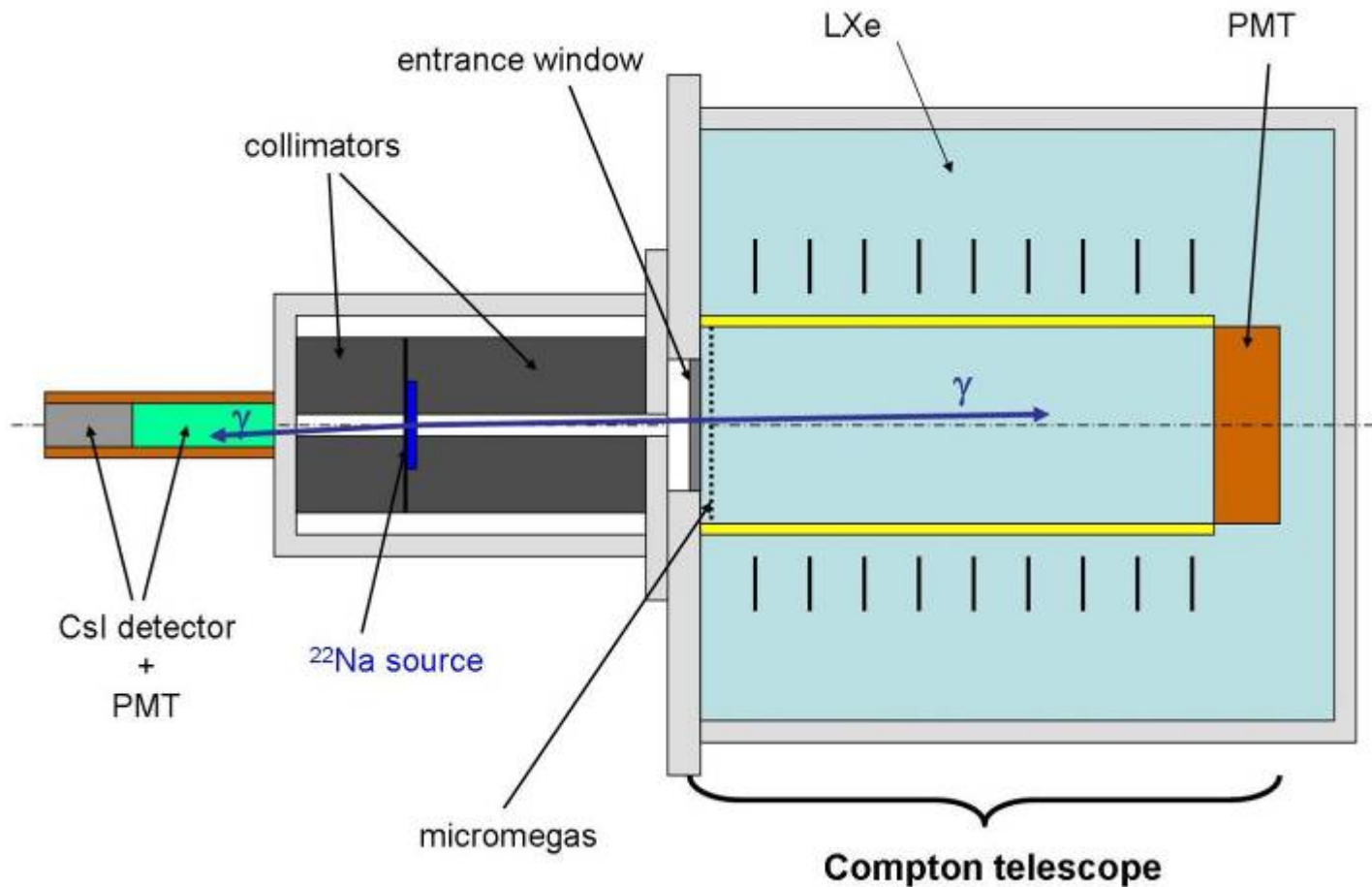
TPC :

$$Z = (t_0 - t_1) \times V_{\text{drift}}$$



Dispositif expérimental

Tests with ^{22}Na source (β^+ and 3^{rd} γ @ 1,257 MeV)



Les signaux

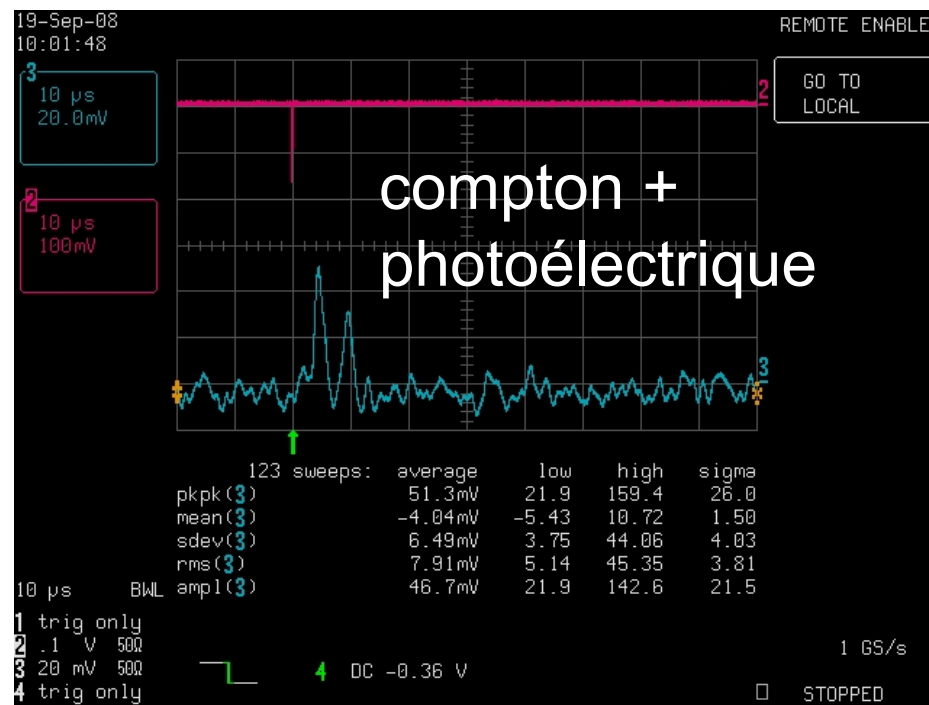
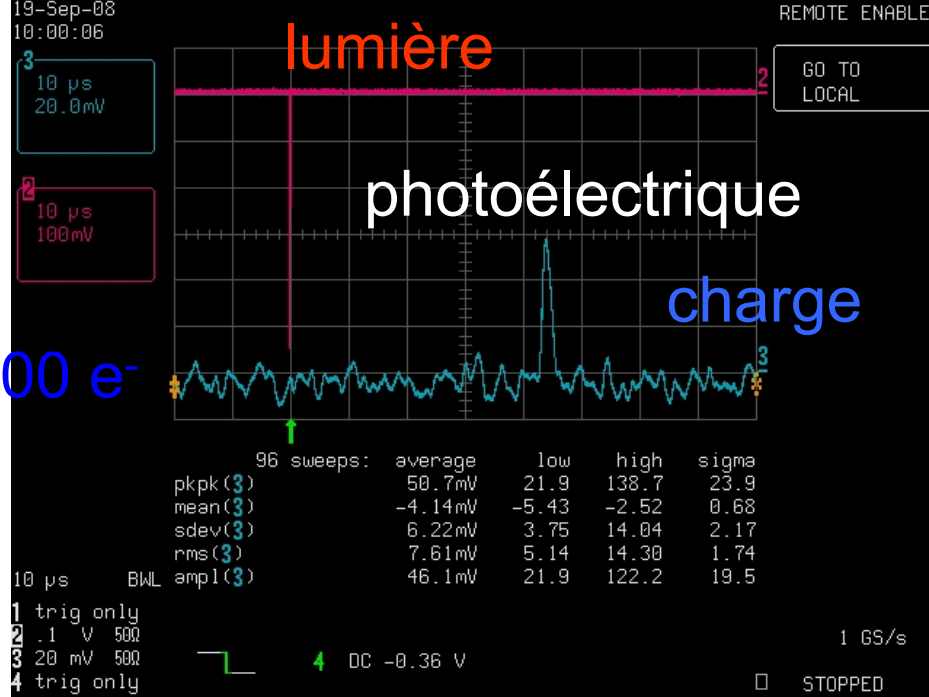
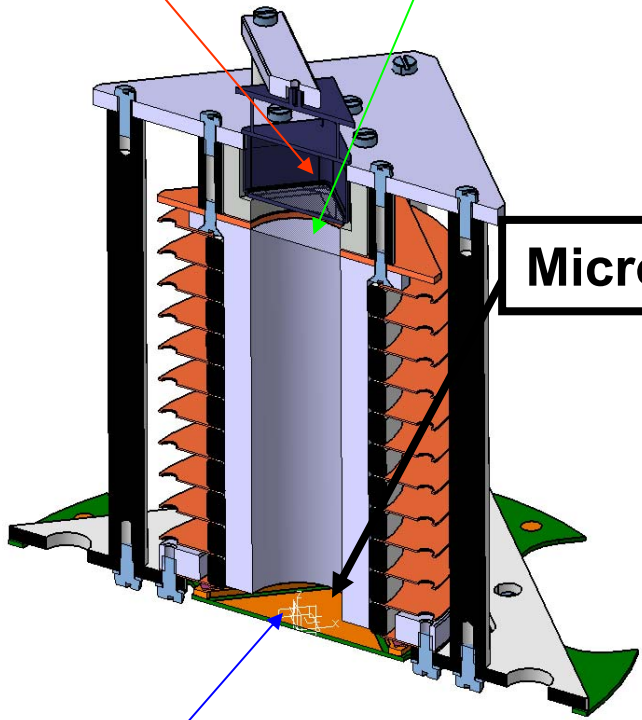
Cathode : -12000 V

PMT, $G \sim 1.10^6$

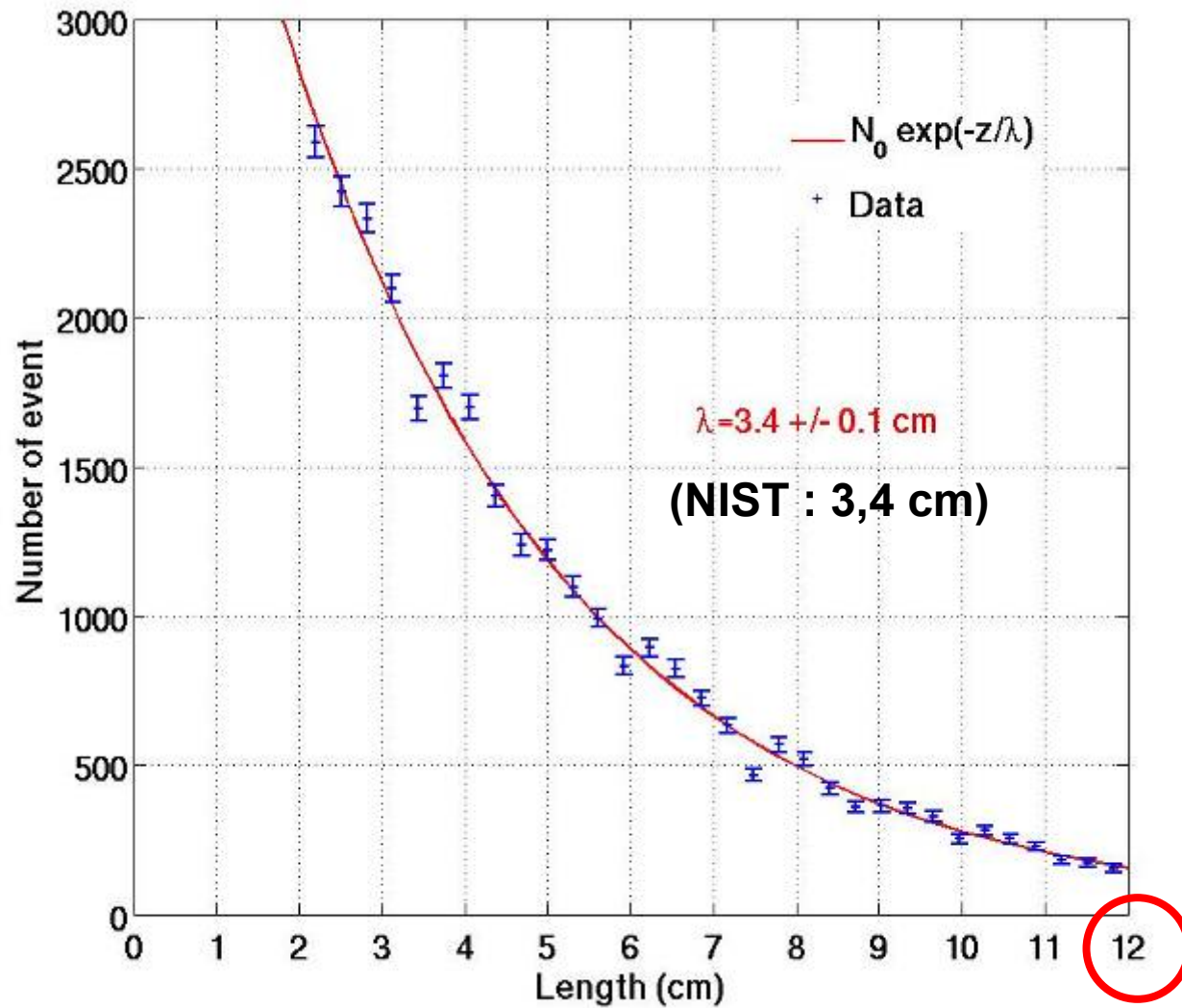
Bruit : 2500 e⁻

Micromesh 0V

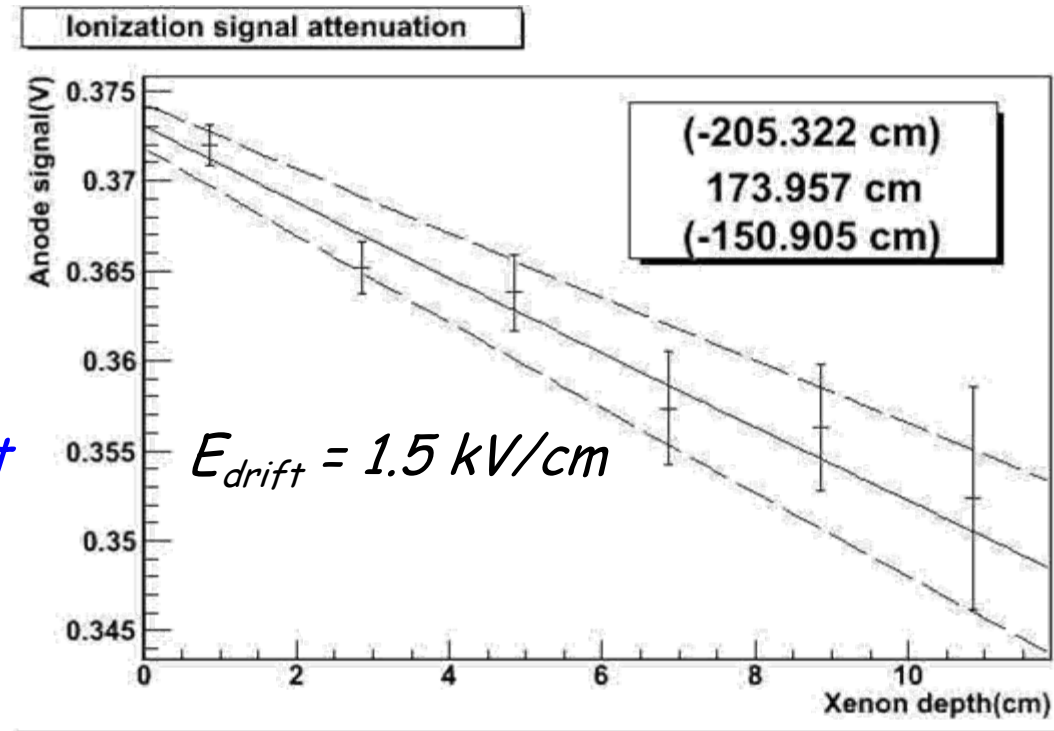
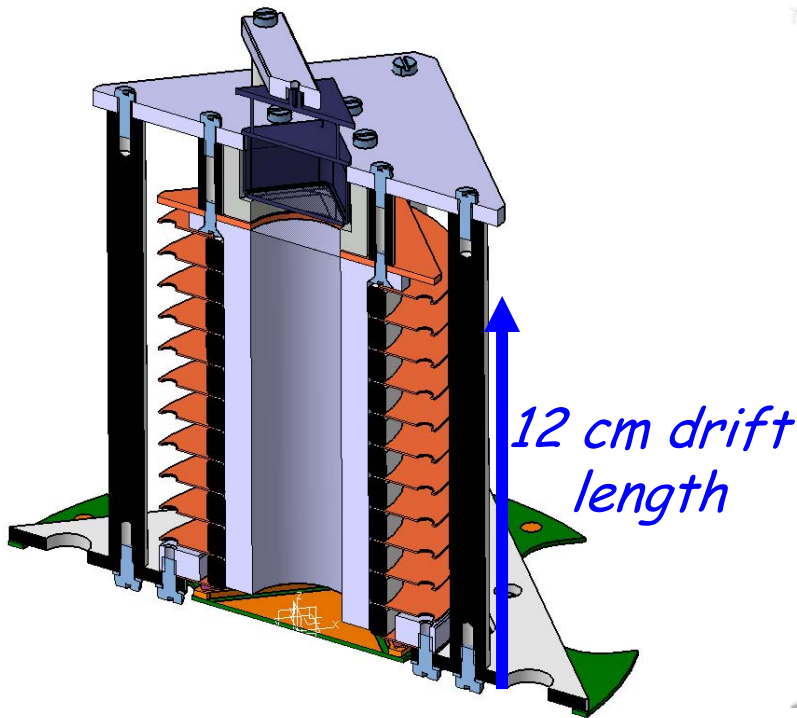
Anode : +300 V



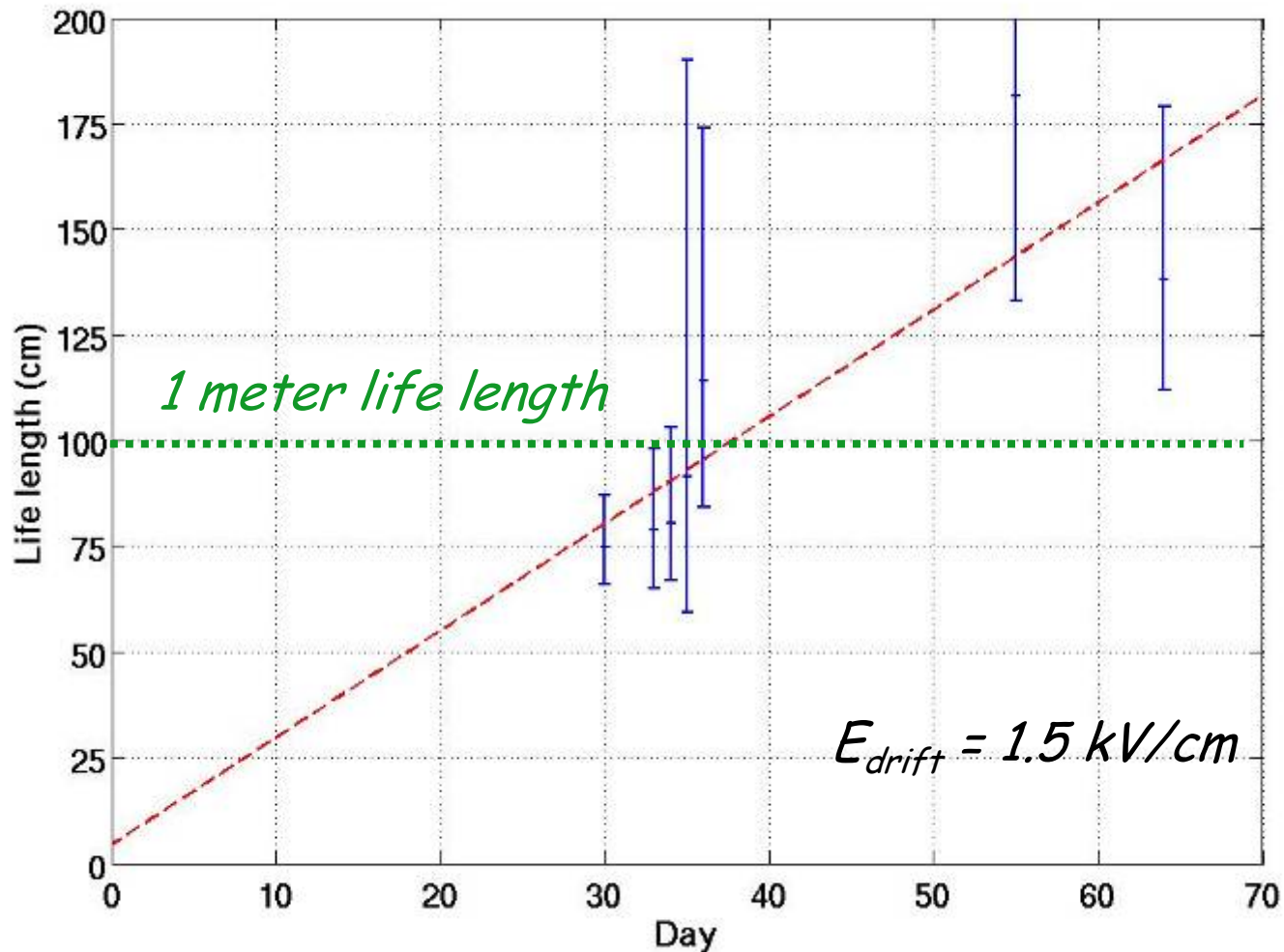
511 keV γ absorption in LXe



Electrons absorption by impurities in liquid xenon

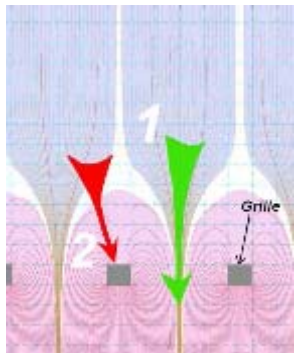
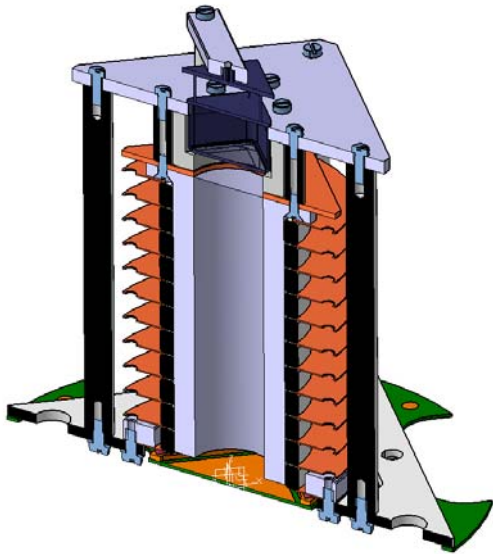


Getter impact on electrons life

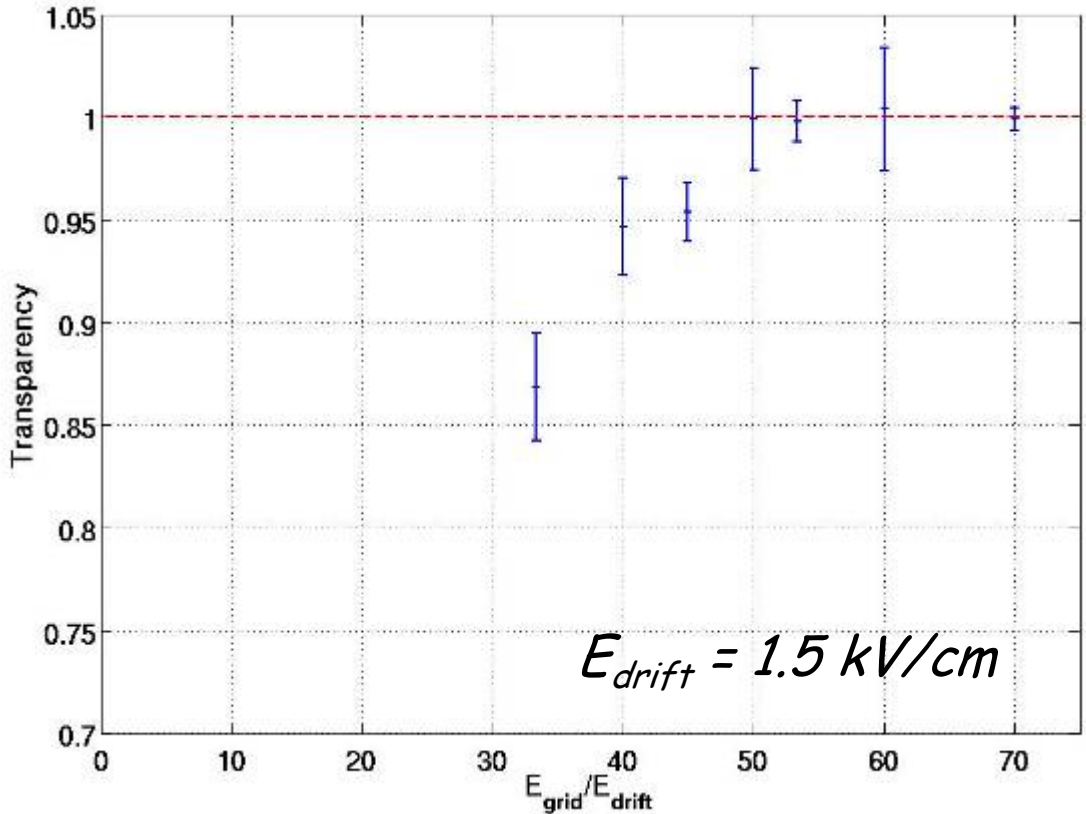


⇒ High purity xenon achieved after 1 month of circulation ...

Ionization electrons collection by Micromegas



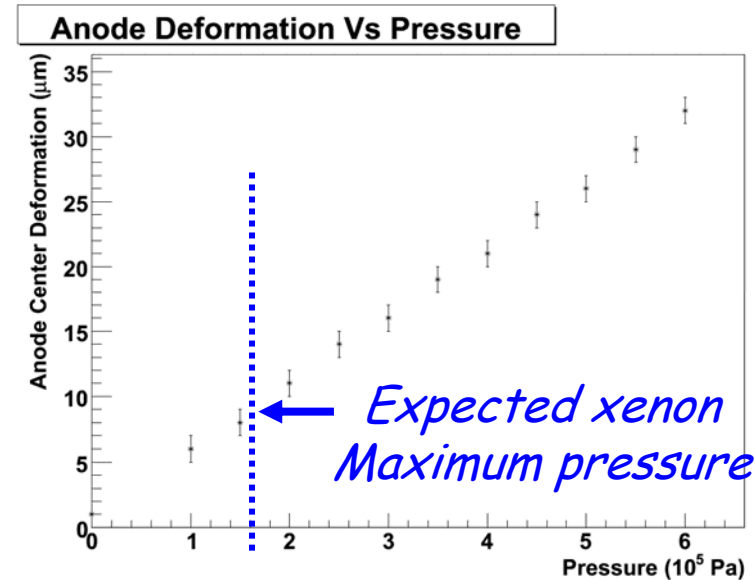
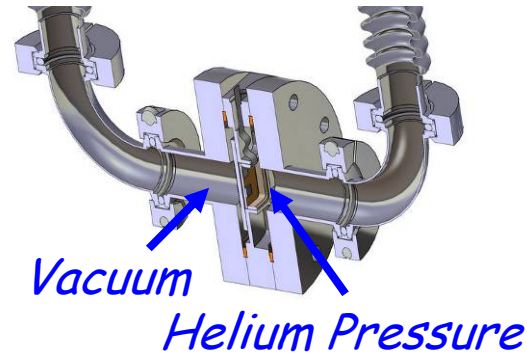
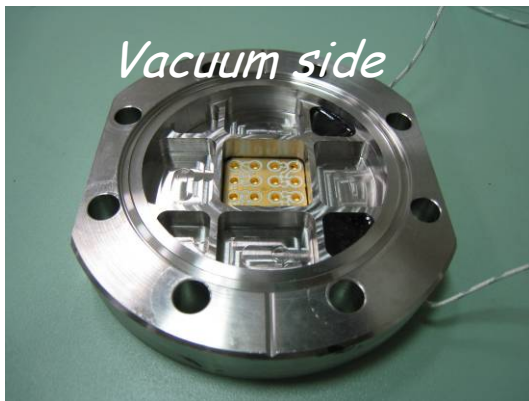
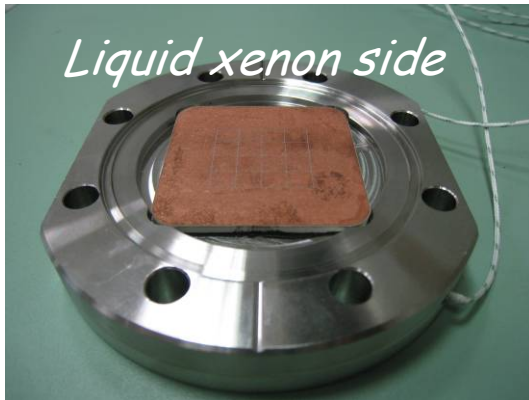
E_{drift}
 E_{grid}



⇒ Full collection of electrons with Micromegas for field ratio > 50

⇒ 2009 : Beginning of the R&D with FE and photodection

Tests mécaniques (P,T) d'une anode segmentée (vacuum-liquid xenon windows)

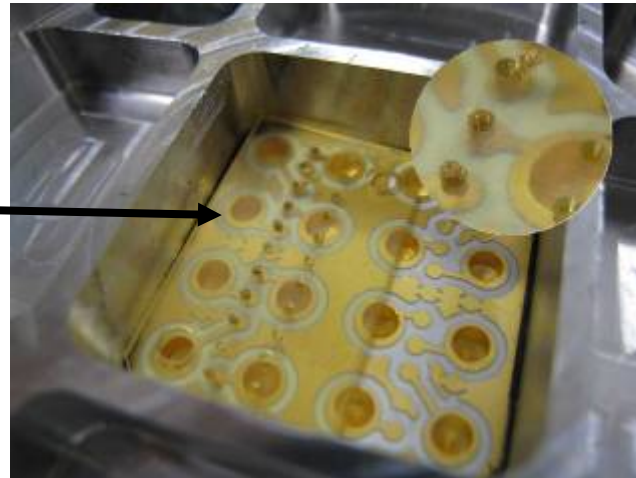
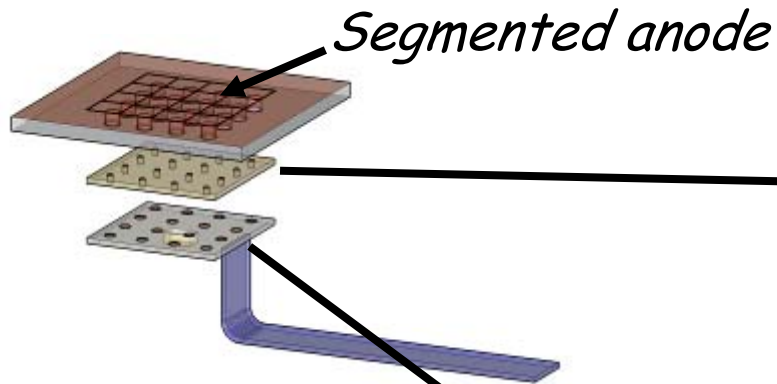


Promising Results :

- $< 10 \mu\text{m}$ deformation in experimental conditions
- No failure up to at least 4 bars at -145°C

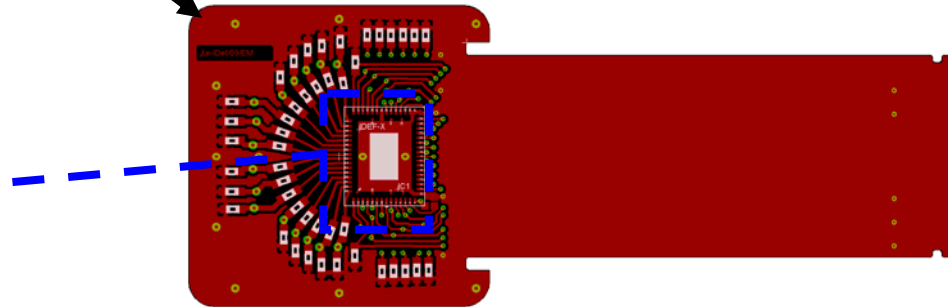
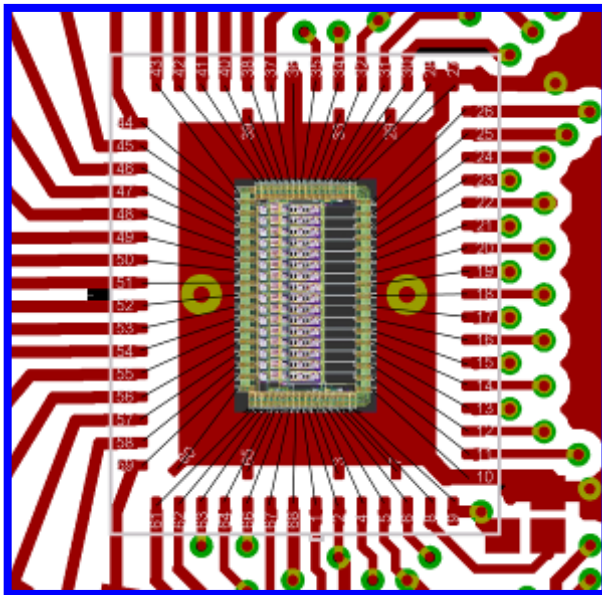
**Validation of segmented anode ceramics and connector technology
⇒ soon on the prototype**

Quelle électronique FE pour l'anode segmentée ?



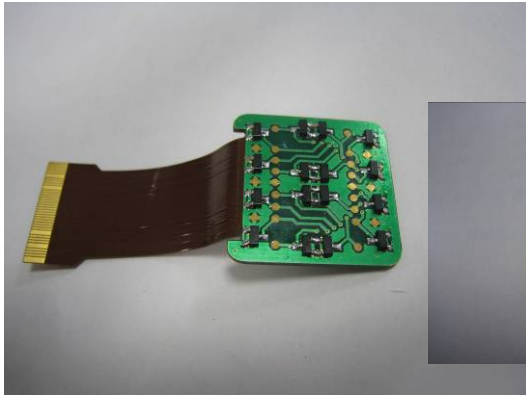
IDEF-X Asics

Flat - connectors

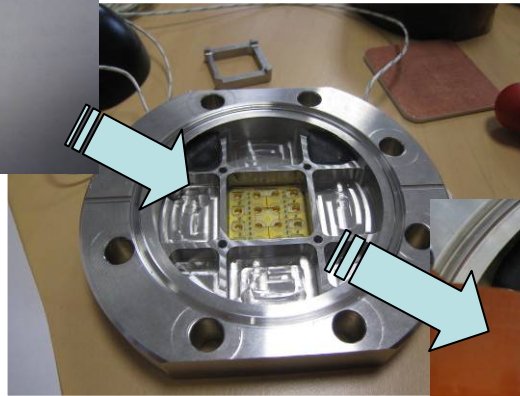
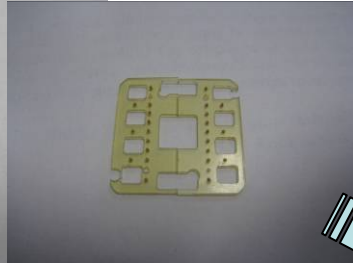


IDEF-X : ASIC développé pour CdTe
par le service de micro-électronique de l'IrFU

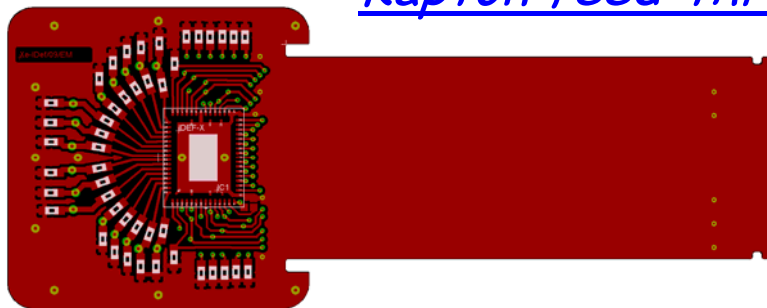
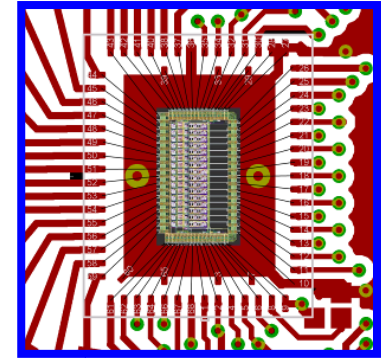
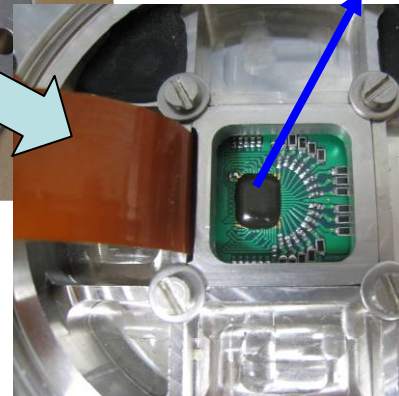
FE Electronics, les premières mesures de bruit à température ambiante



Flat - connectors



Kapton feed-through



At room temperature,
Noise : $125 e^- + 4.46 e^-/\text{pF}$

Noise $\sim 200\text{-}300 e^-$ targeted
on anode with liquid xenon

Perspectives de l'imagerie à 3γ

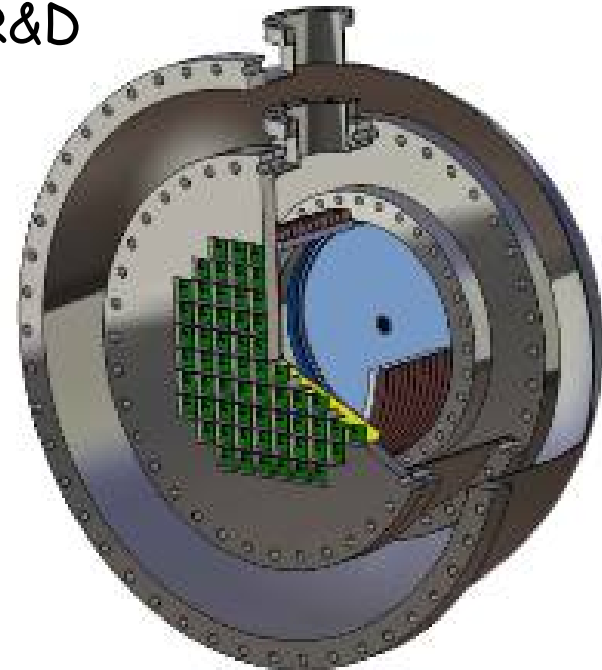
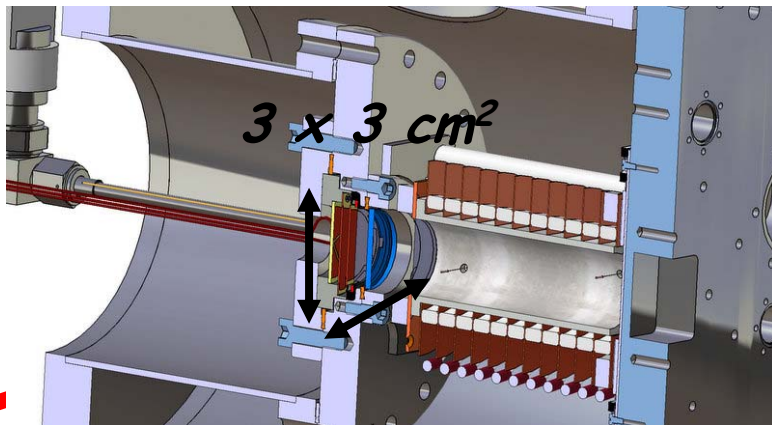
2007-2008 : First steps with liquid xenon technology

→ Promising for the future

2009-2010 :
Cryogenics R&D
Low noise front-end electronics R&D
Photo detection with GPM R&D

→ R&D foresee until 2010 ...

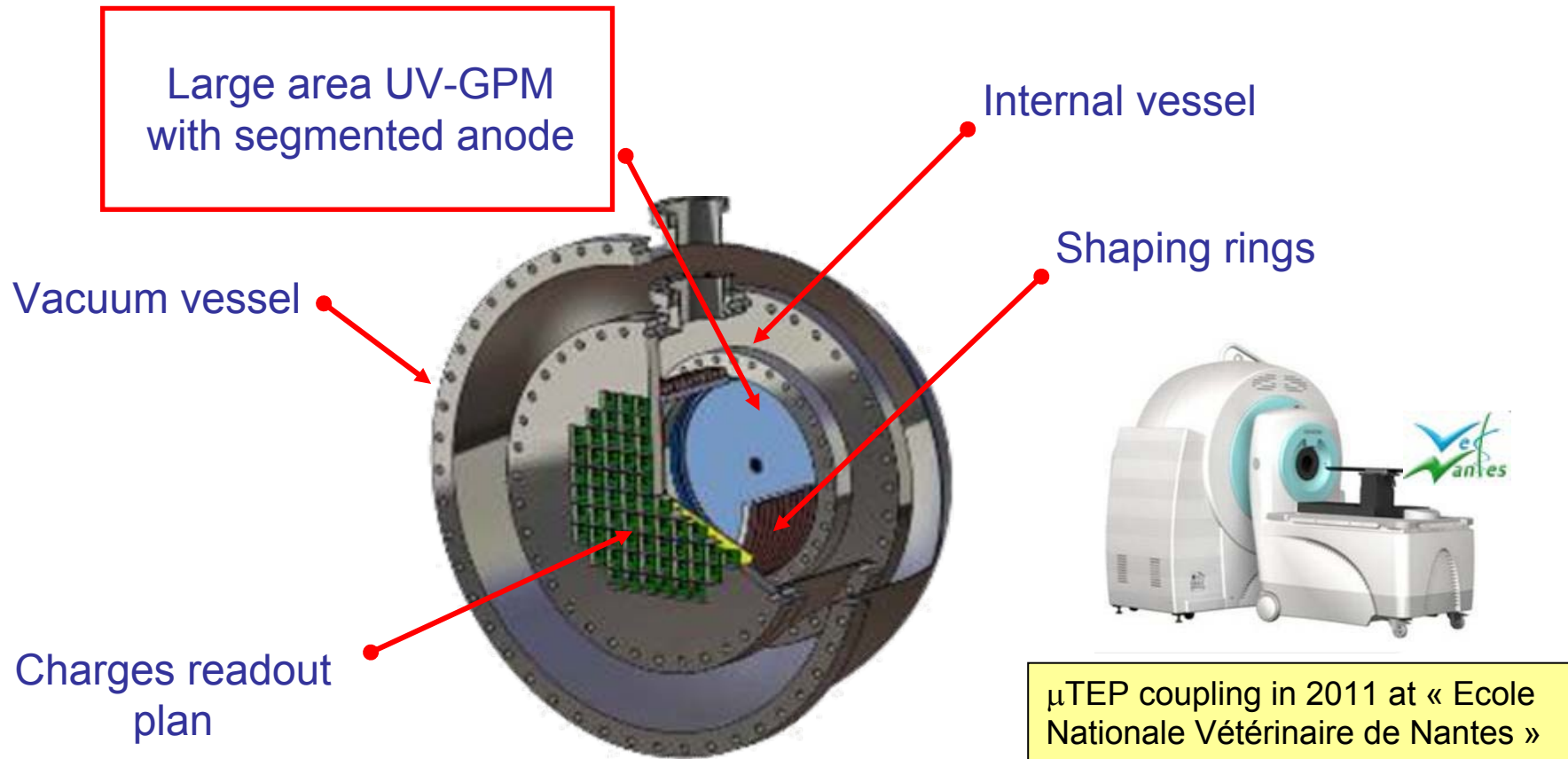
XEMIS1 Compton
Telescope Prototype



XEMIS2 Compton Telescope
for small animal imaging

→ Ready for end of 2011 ...

XEMIS 2 : le prototype pour l'imagerie préclinique sur des petits animaux



Cylindrical LXe TPC ($\varnothing = 30$ cm)

Why a large cryogenic UV-GPM for a liquid xenon Compton telescope

PM QE is better than QE of GPM but ...

MgF₂ is more **transparent to VUV light** than SiO₂

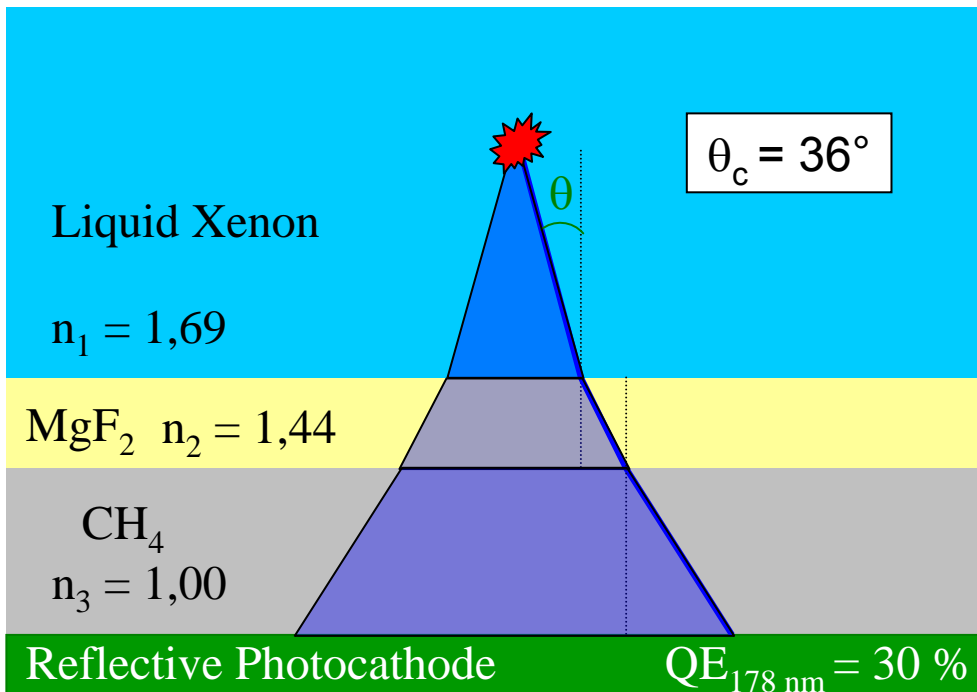
Results of simulations :

- **No dead area** : homogeneity (because same pressure !)
- **Less position dependant**

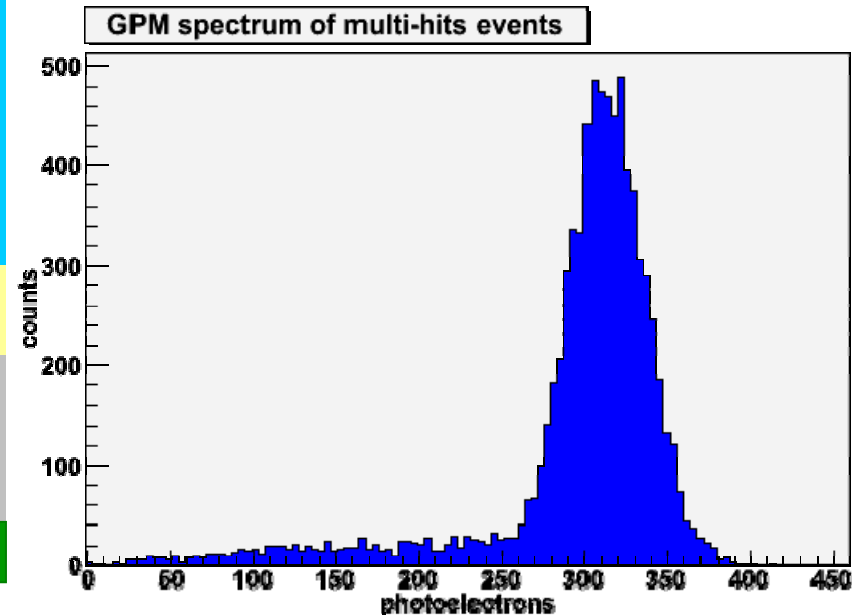
Inputs :

• QE = 30%

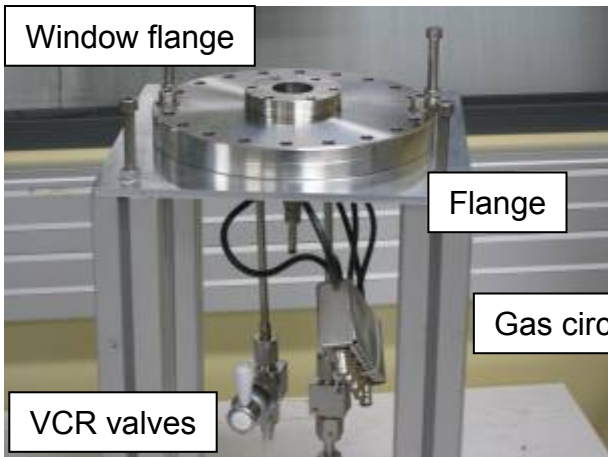
□ $\lambda_{\text{MgF}_2} = 4,0 \text{ cm}$



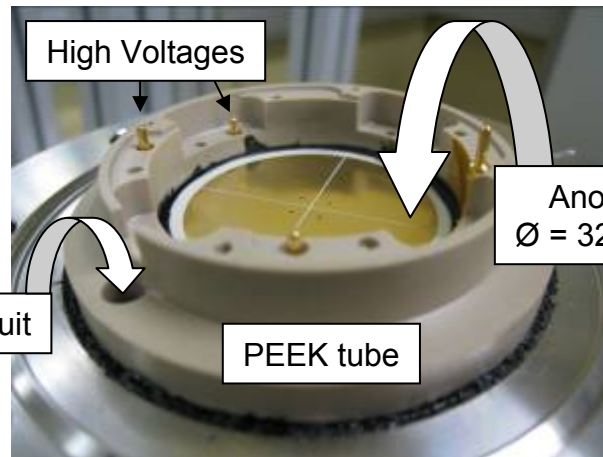
Simulation of 10000 γ -rays of 1,157 MeV



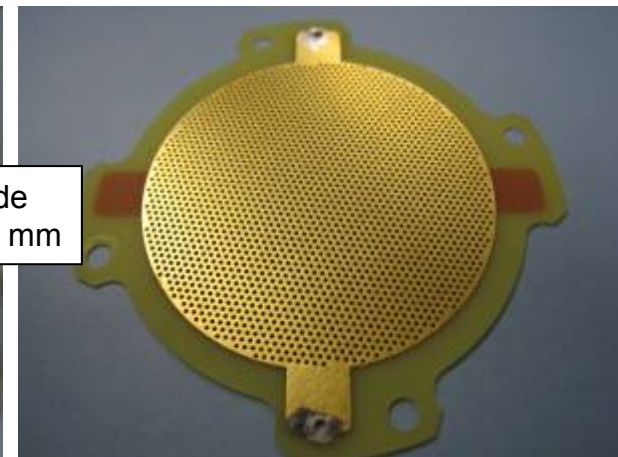
Gaseous photomultiplier prototype



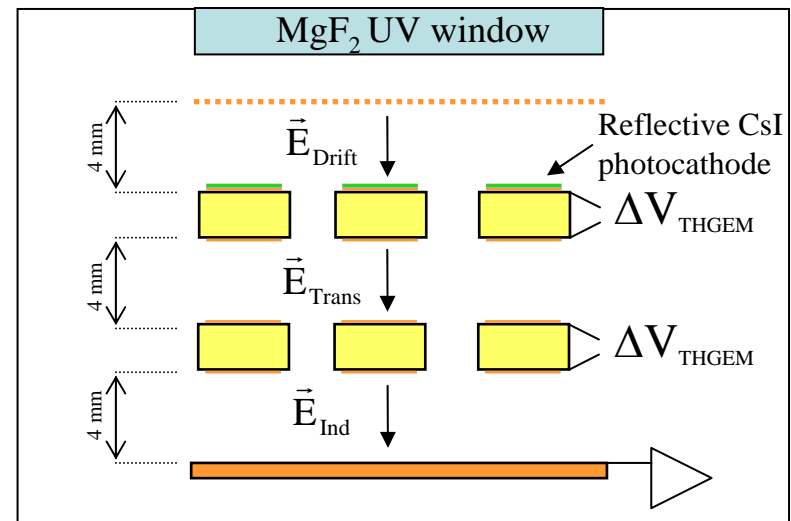
GPM global view



Inside the GPM



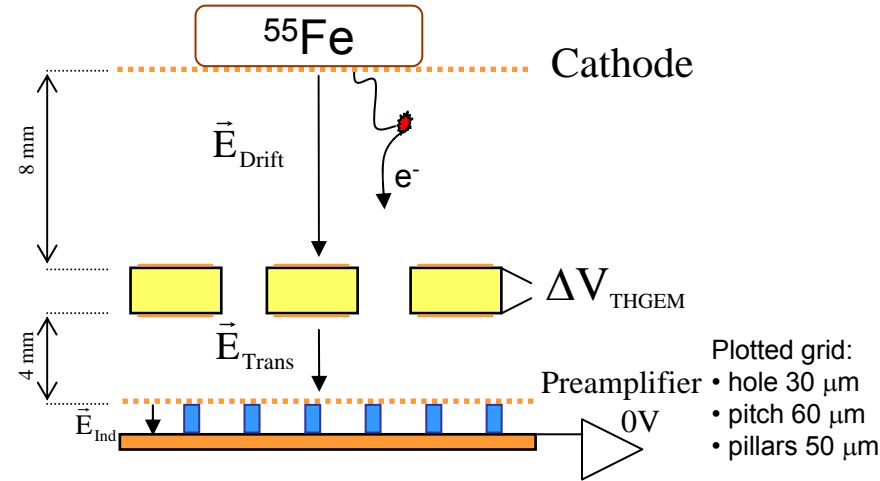
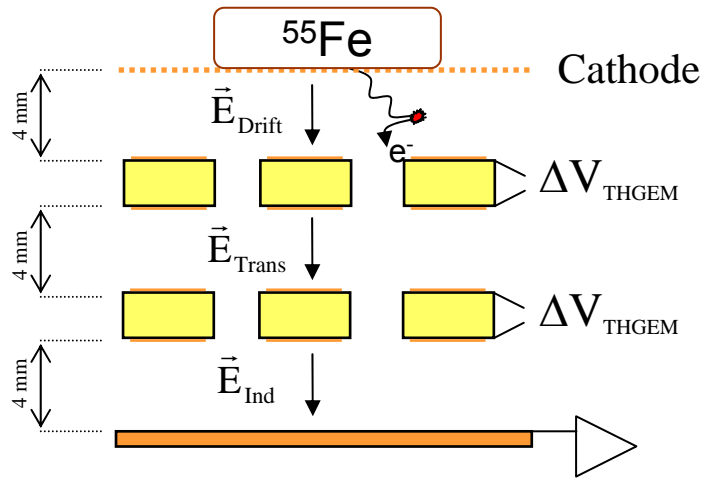
THGEM : thickness = $400 \mu\text{m}$
 hole $\varnothing = 300 \mu\text{m}$
 hole spacing = $700 \mu\text{m}$
 rim size = $50 \mu\text{m}$



Schematic drawing of the GPM set-up

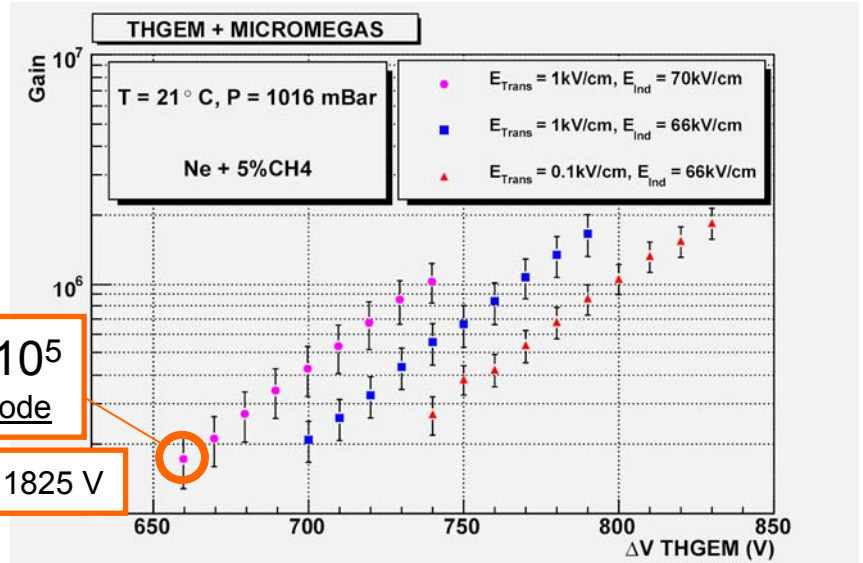
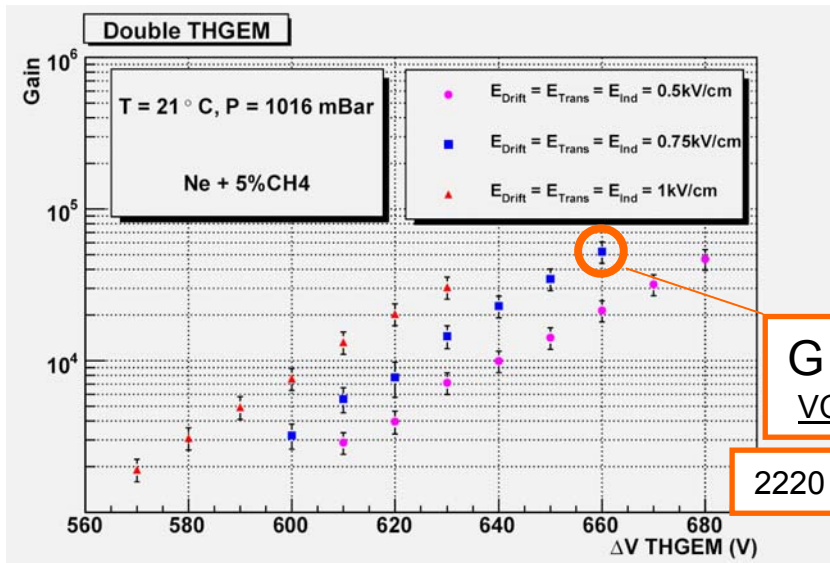
First experimental R&D tests

Ne, 5%CH₄ @ normal P and T



Plotted grid:
 • hole 30 μm
 • pitch 60 μm
 • pillars 50 μm

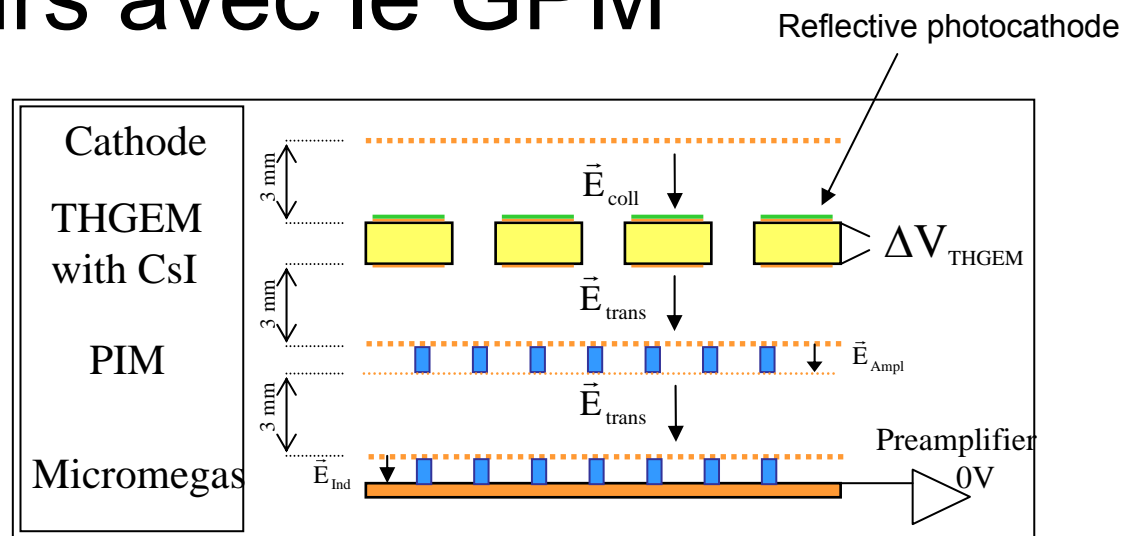
Gain curves obtained with ⁵⁵Fe soft X-rays source



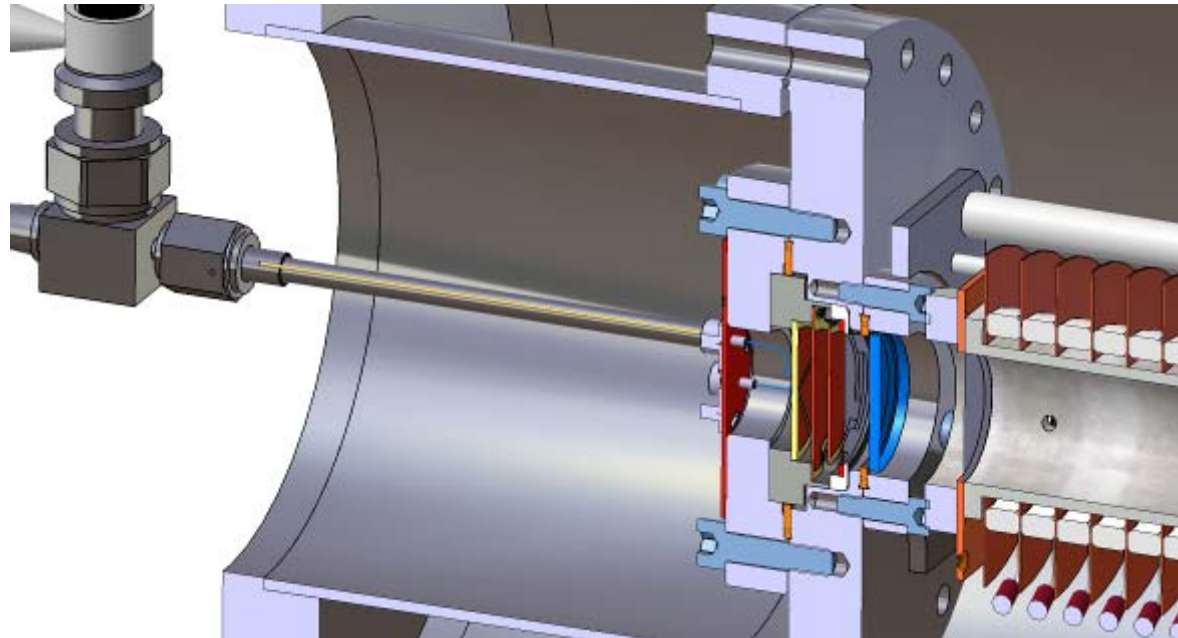
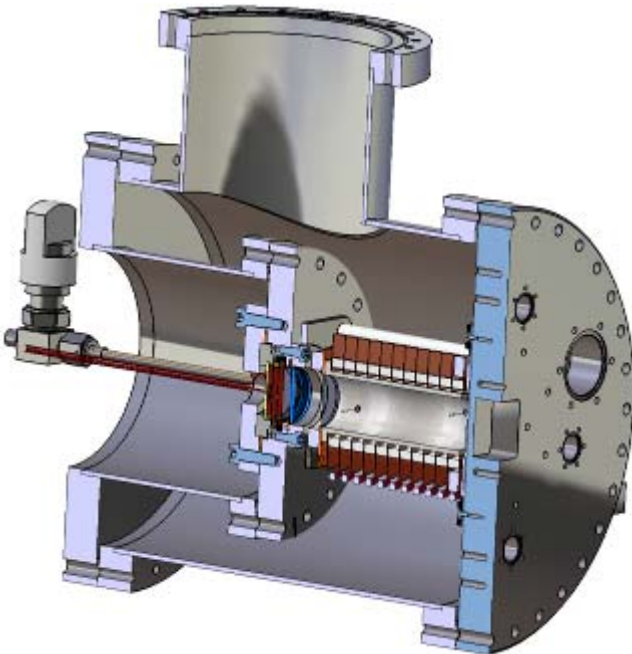
Les tests en cours avec le GPM

En ce moment :

- Photocathode deposition at WIS
- Characterization at CNTP



Début 2010 à Nantes :



Conclusions

Les détecteurs gazeux (MPGD) et liquides (gaz nobles liquéfiés) sont des solutions robustes et économiques pour couvrir de grand champ de vue. Ils sont de par la nature du milieu de détection propices à l'obtention d'informations souvent « cachées » avec les détecteurs solides.

- De nouvelles méthodes d'imagerie ?
- De nouveaux concepts de détection ?