

(dis)cours #3 sur la detection en physique des particules, nucléaires et astro-particules

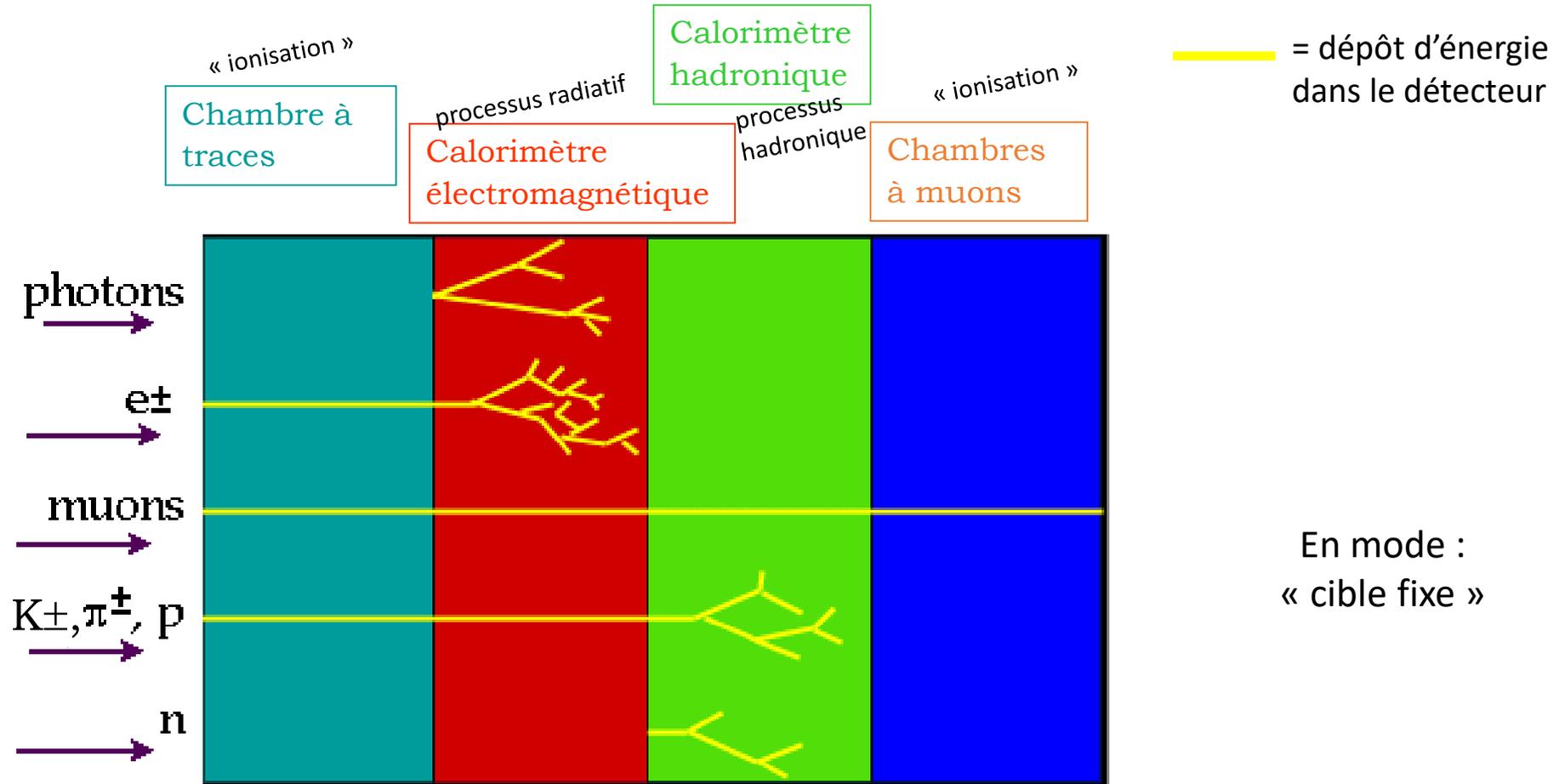
Philippe Schune
IRFU – DPhP
CEA - Saclay et université Paris-Saclay
philippe.schune@cea.fr



Plan :

- 1) Interactions fondamentales
- 2) Détecteurs élémentaires et multi-détecteurs (*pas tous*)
- 3) Comment les tester, les calibrer (*aussi voir 4*)
- 4) (un) exemple d'un détecteur et d'une chaîne de lecture

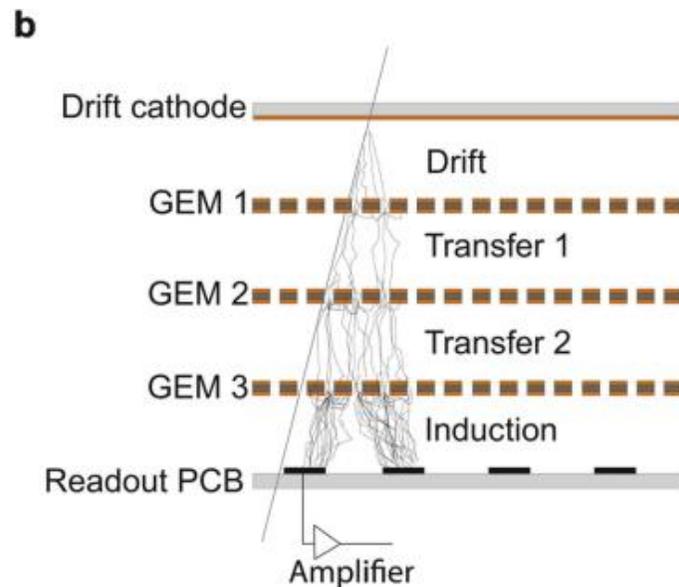
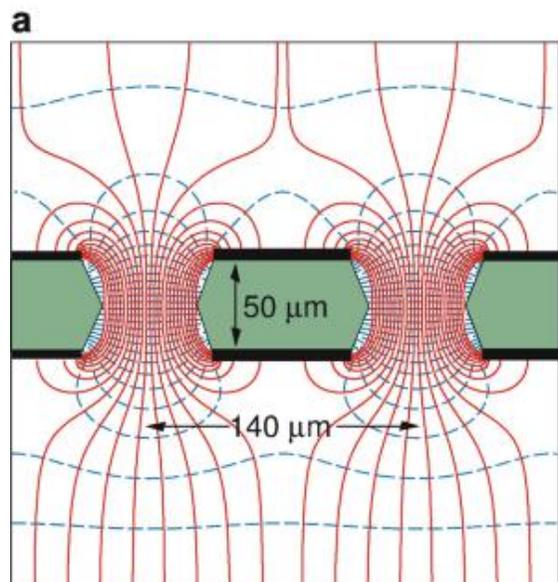
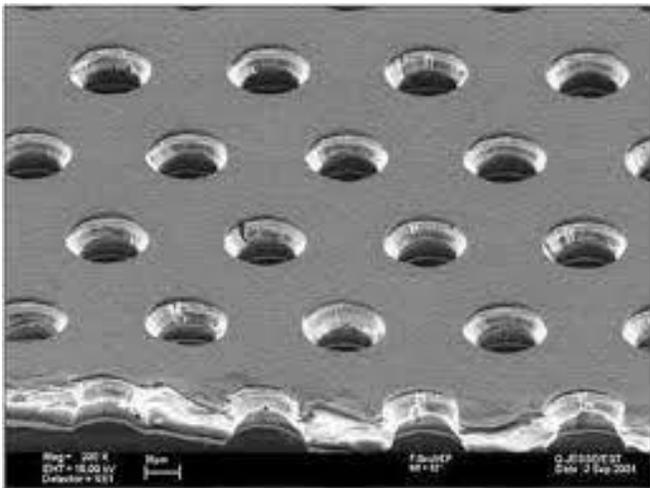
Réponses simplifiées d'un appareillage aux particules interagissant dans celui-ci (1)



En plus de détecter ces particules il faut parfois différencier les couples : $K/\pi/p$, π/e , $e/\gamma+\pi$, π^0/γ

E des particules $\gtrsim 1$ GeV

GEM (Sauli et al., 1996)



Problèmes :

Le gain est limité et un seul étage ne permet pas une amplification du signal
 Si gain augmente => claquage

Géométrie du dépôt de cuivre autour des trous critiques

Plusieurs couches nécessaires, chacune avec un gain réduit.

Aussi **retour d'ions dans le volume de dérive** (vers la cathode)

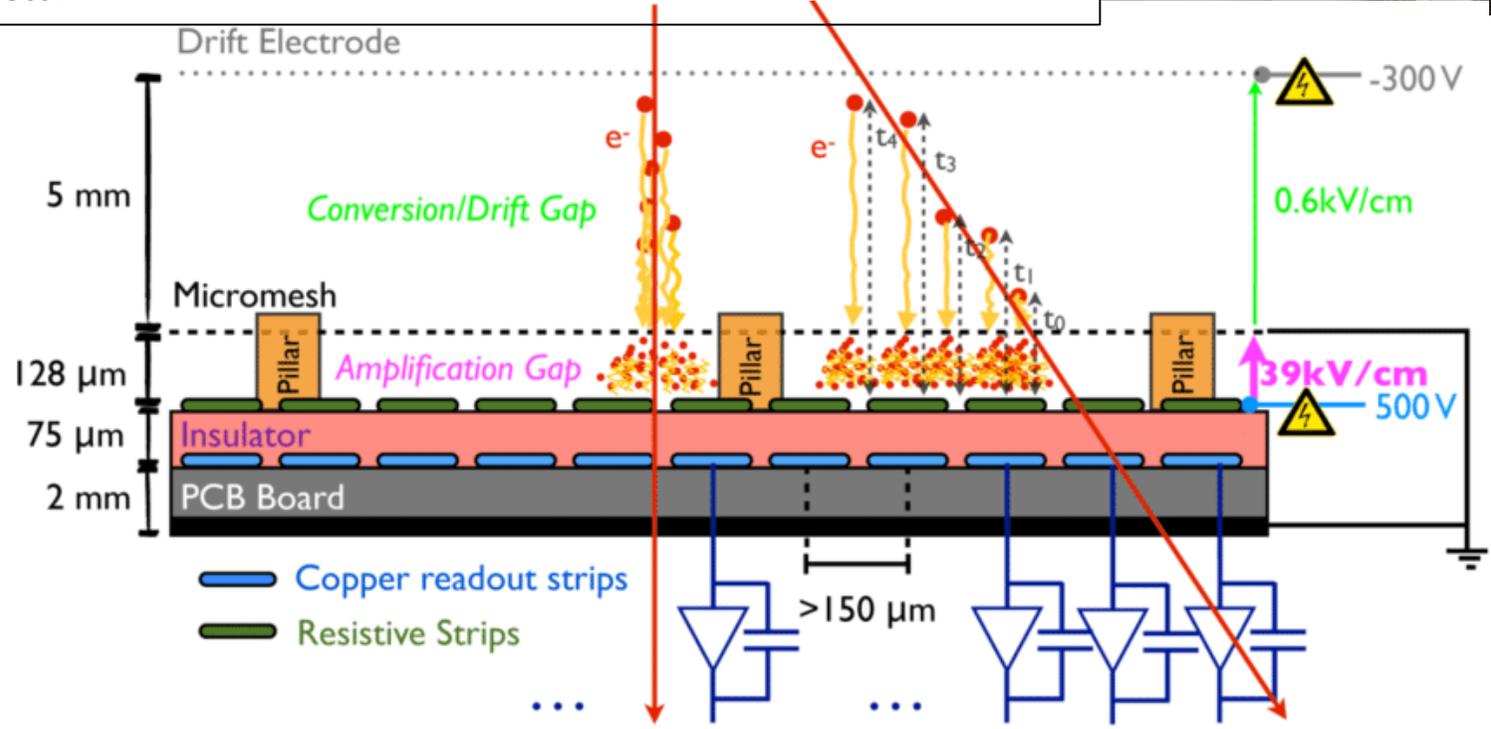
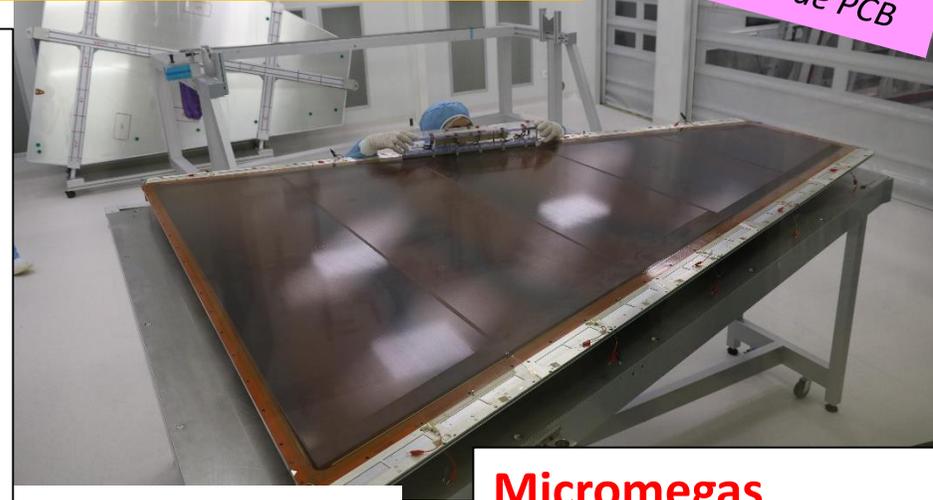
Montage en salle blanche à cause de la poussière

MPGD

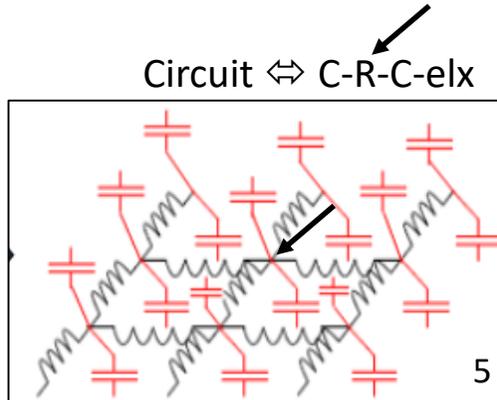
Depuis ~1996 → aujourd'hui : révolution dans les détecteurs gazeux
Séparation de la zone de dérive de la zone d'amplification !

Process indust. de fabrication de PCB

- Très bonne tenue aux hauts flux (~30 kHz/cm²) – HL-LHC
 - Gain jusqu'à quelque x10⁴
 - Coût de fabrication raisonnable (techniques industrielles)
 - Assemblage en salle blanche
 - **Couche résistive** : étalement charge + quench si claquage (?)
 - Pistes/pads de lecture jusqu'à <200 microns
 - Intégration mécanique « rigoureuse » nécessaire
 - **Peu de retour d'ions** (~1%)
- etc.



Micromegas
(brevets 1996 et 2005 - rMM)
I.Giomataris et al. (IRFU) + G.Charpak



Détecteurs au Silicium : deux (r)évolutions prometteuses

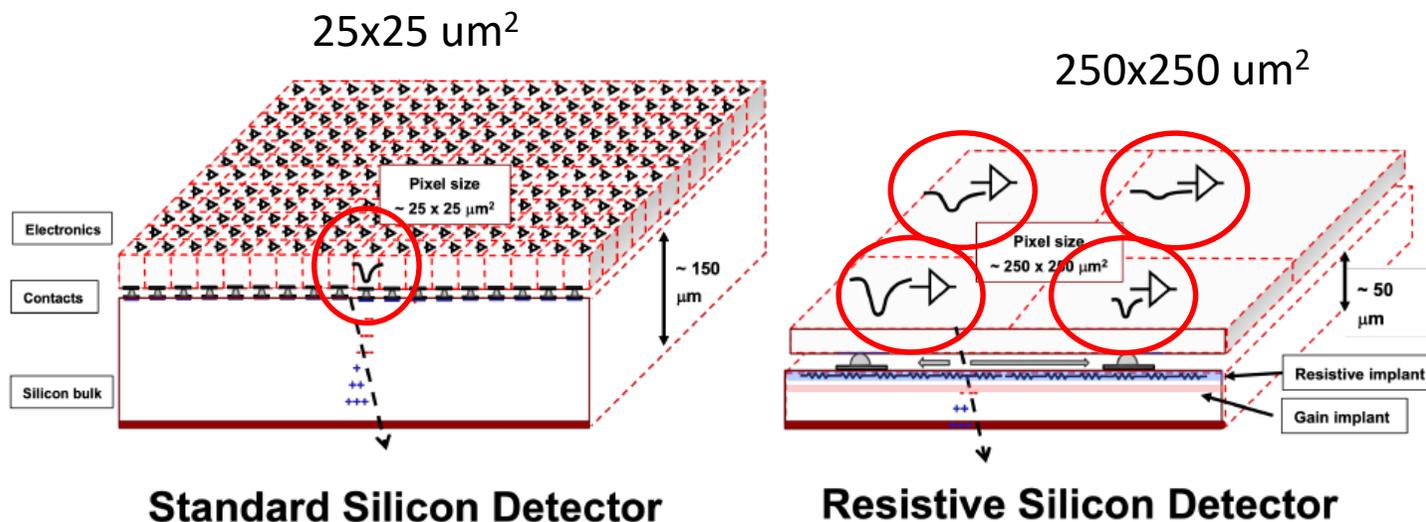


Fig. 5. Sketch of a present (left) and RSD-based (right) silicon detector. The two detector designs yield the same spatial precision. However, to cover an area of $600 \times 600 \mu\text{m}^2$ the standard detector uses about 575 pixels while the RSD uses 4 pixels.

Signal ON/FF

versus

barycentre

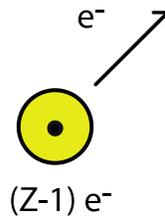
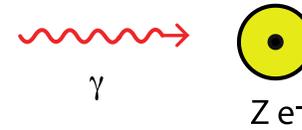
“New results obtained with sensors belonging to the second (FBK) production of RSD demonstrate how a combined resolution of 30 ps and 30 μm can be obtained with pixels as large as 1x1 mm².”

Simulation du signal !

Fin de la session #2...

Détections des photons visibles (proche)

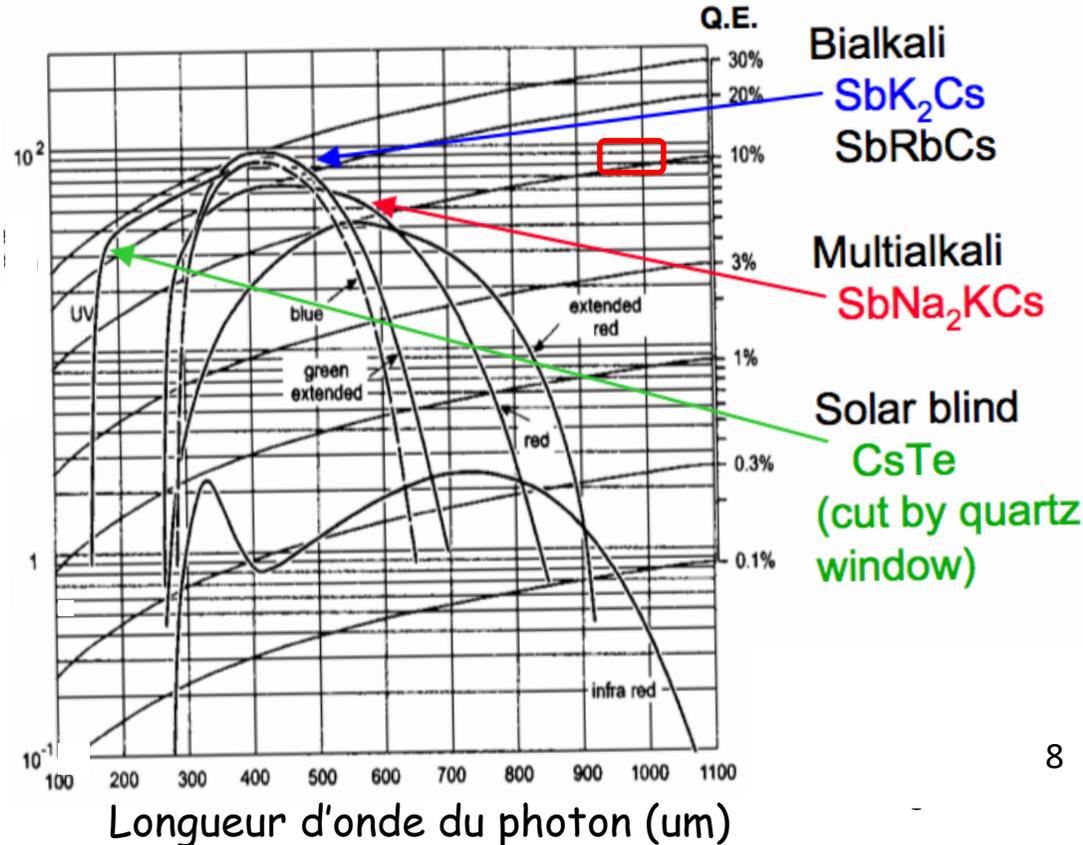
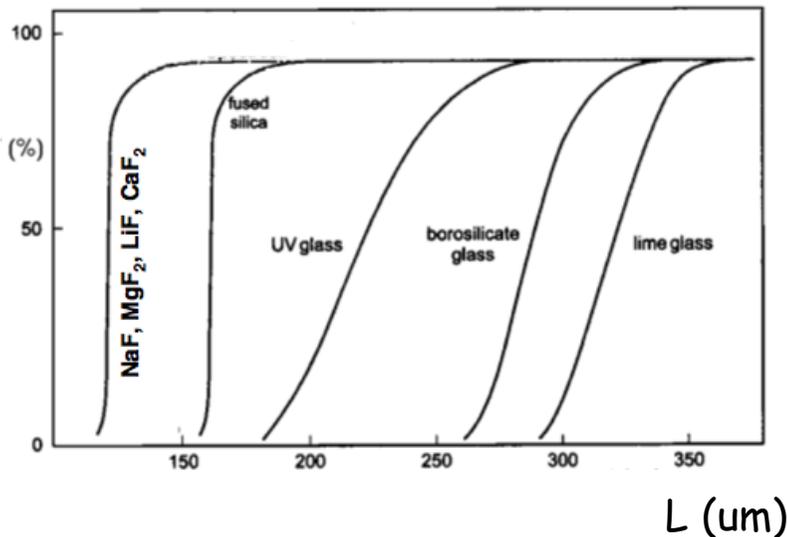
Nucleus (Z, A)



- On utilise l'effet photoélectrique
- On privilégie les matériaux à forte efficacité quantique (Q.E.) :

$$Q.E. = \frac{N_{Photoelectrons}}{N_{Photons}}$$

Facteur de transmission de certains verres



Hydrogène 1 H 1,007975
Lithium 3 Li 6,9395
Sodium 11 Na 22,98976928
Potassium 19 K 39,0983 (1)
Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)
Césium 55 Cs 132,905452
Françium 87 Fr [223]

Détections des photons visibles (proche)

Tube photomultiplicateur

- **PMT** \equiv **P**hoto **M**ultiplier **T**ube

- **Photoémission** sur la photocathode (couche mince d'un métal alcalin)
- **Emission secondaire** sur les autres dynodes (souvent en cube) portées à des potentiels croissants
 - 2 à 5 e^- par e^- incident

- **Gain élevé**

- Valeurs typiques : 10 dynodes de gain
 - \Rightarrow gain total = $4^{10} \approx 10^6$ et même parfois 10^7
 - **Détection d'un photon unique (efficacité $\approx 10\%$) !**

- **Inconvénients : encombrant et sensibilité au champ magnétique**

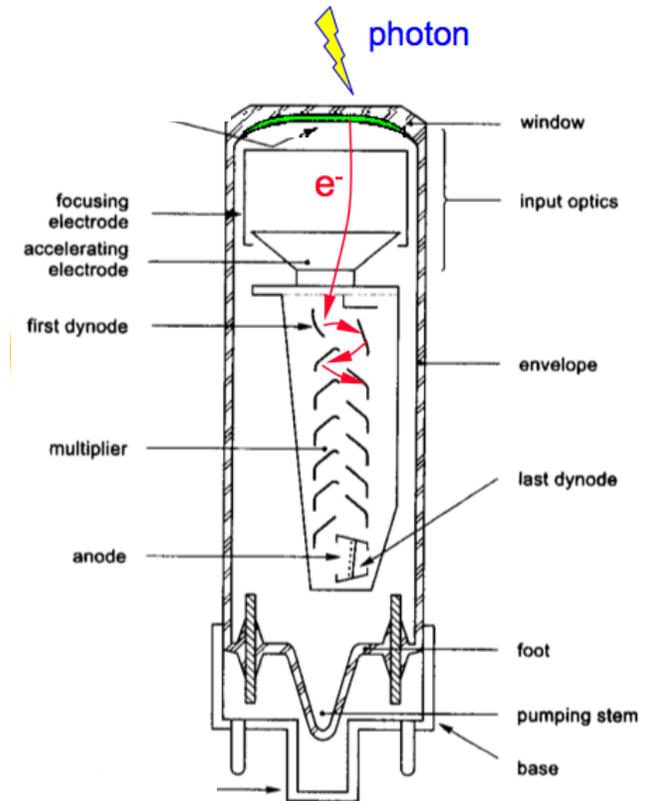
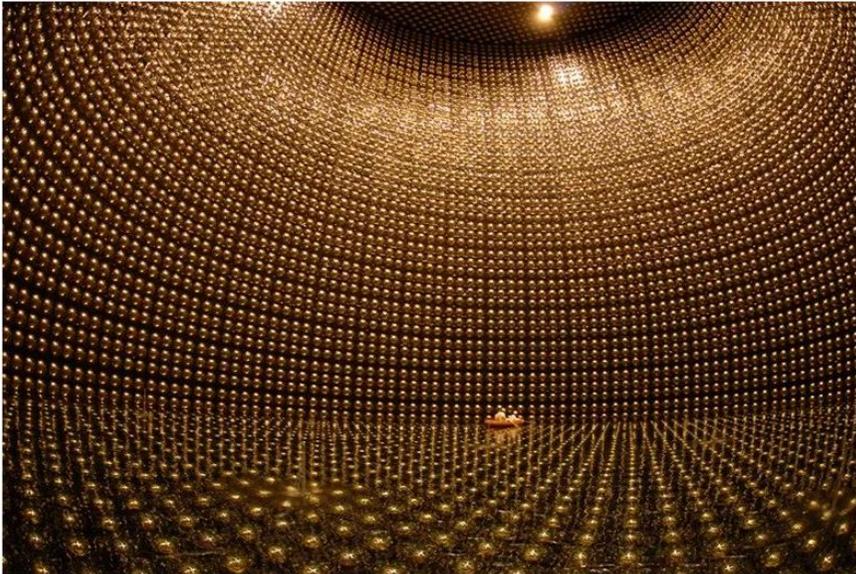


Schéma de principe d'un PMT à 13 dynodes

Détections des photons visibles (proche)

La forme et la taille des tubes dépendent des applications



Jusqu'à >11000 dans SK (Japon)

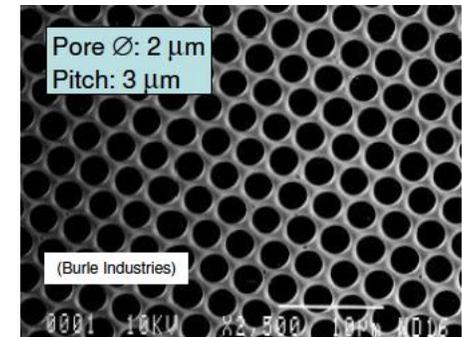
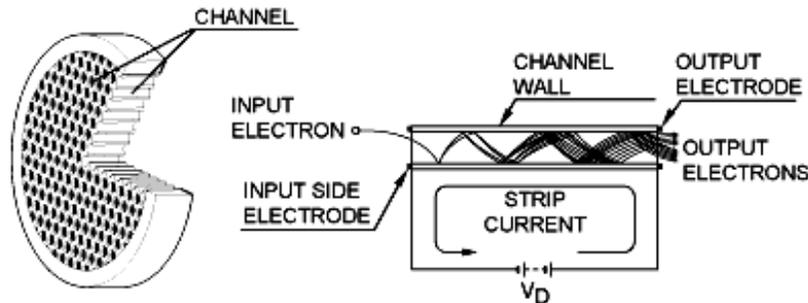
Pour détecter la lumière (Cerenkov)

« Ceinture » de courant pour compenser champ magnétique terrestre

Détections des photons visibles (proche)

Galettes de microcanaux

- **MCP** \equiv **M**icro **C**hannel **P**late : Alternative au PM pour détecter le photoélectron
 - Diamètre des canaux $\approx 2\text{-}10\ \mu\text{m}$
 - **0,5 mm d'épaisseur**
 - Gain de quelques 10^3 par MCP
 - Gain de **10^7** en associant 2 MCP en série
 - Dispersion du temps de transit : **50 ps**
 - Peu sensible à un champ magnétique



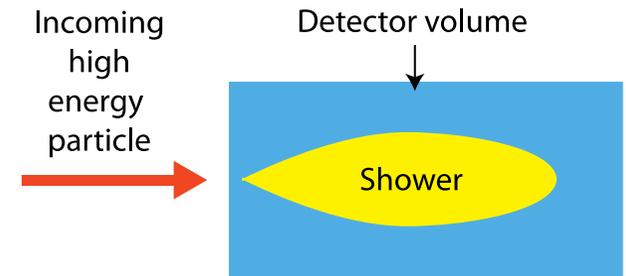
- Applications : vision nocturne, détection d'une charge unique

Calorimétrie

Mesure de l'énergie totale d'une particule

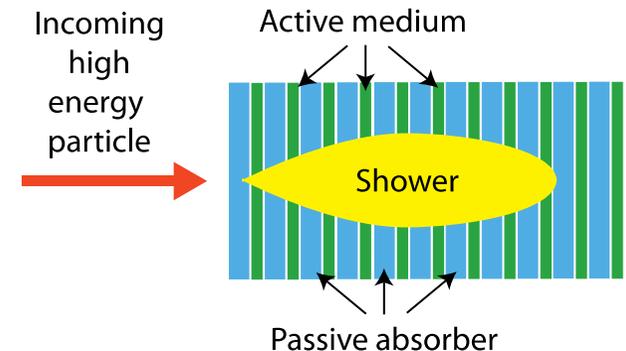
- Les **calorimètres homogènes** pour lesquels l'absorbeur est également le milieu de détection

- Bonne résolution en énergie
- Résolution spatiale moyenne
- Pas de segmentation en profondeur
- Uniquement calorimétrie EM (cher...)



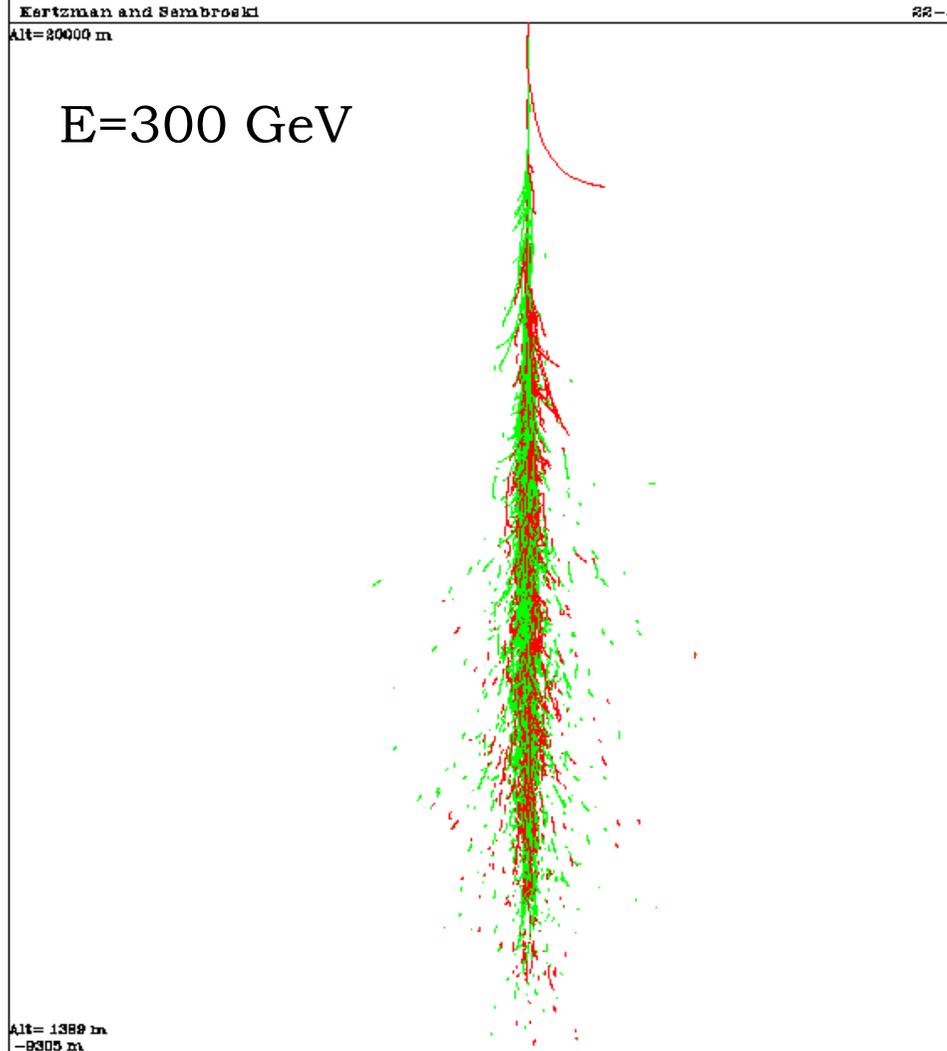
- Les **calorimètres à échantillonnage** (« **sampling calorimeters** ») pour lesquels l'absorbeur est différent du milieu de détection

- Résolution en énergie moyenne
- Bonne résolution spatiale
- Segmentation en profondeur possible
- Calorimétrie EM et hadronique

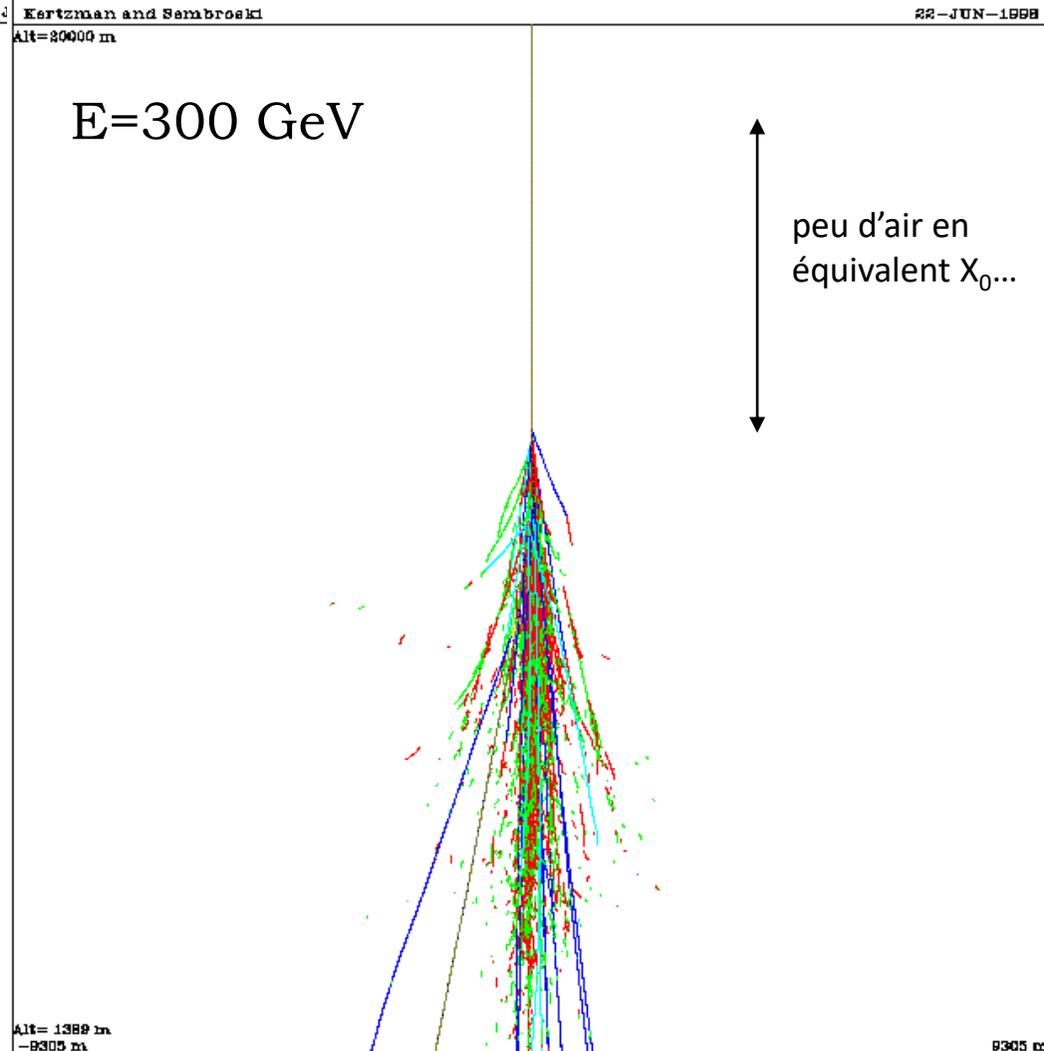


Gerbe EM versus gerbe Had. dans l'air

gerbe électromagnétique



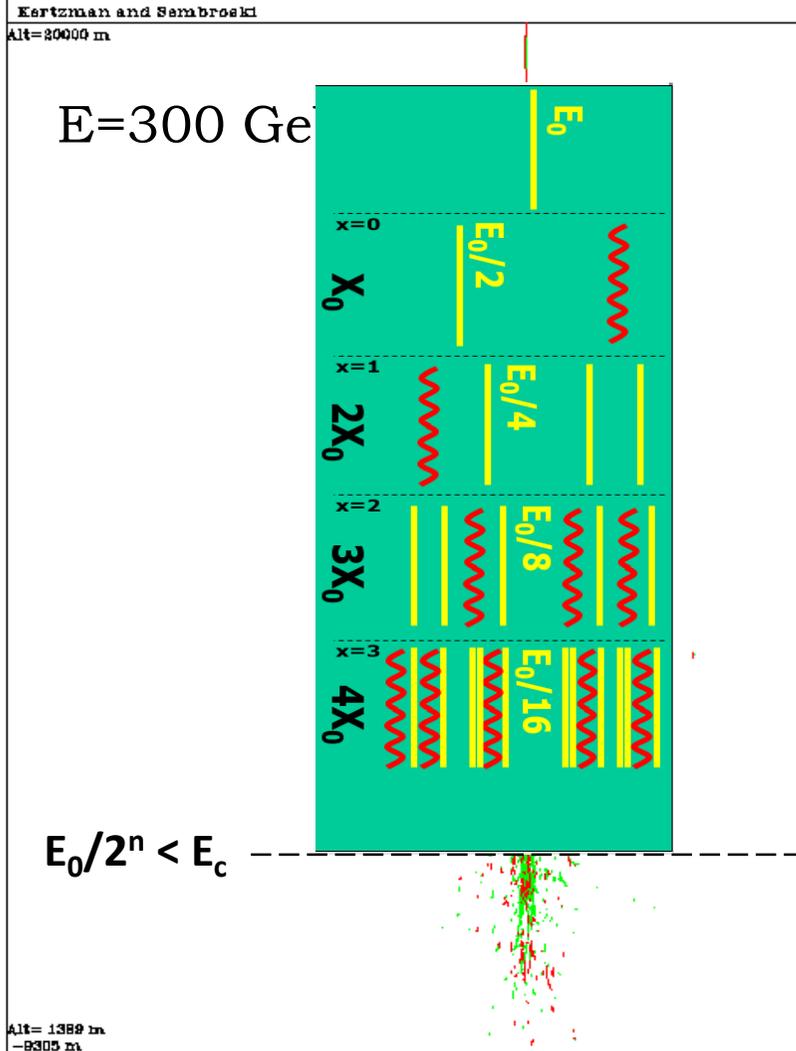
gerbe hadronique



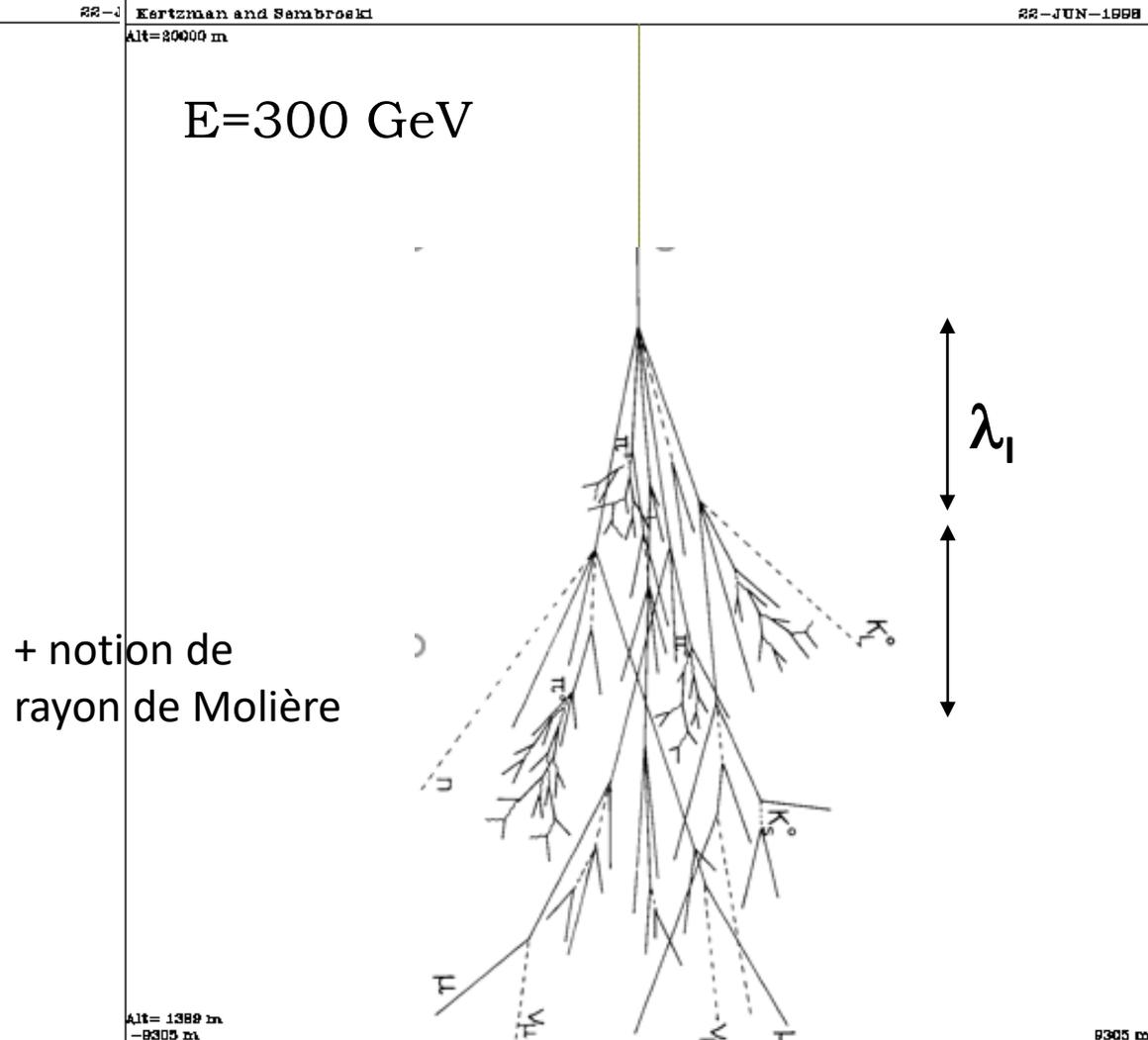
air au niveau de la mer $\sim 23.X_0$

Gerbe EM versus gerbe Had. dans l'air

gerbe électromagnétique



gerbe hadronique

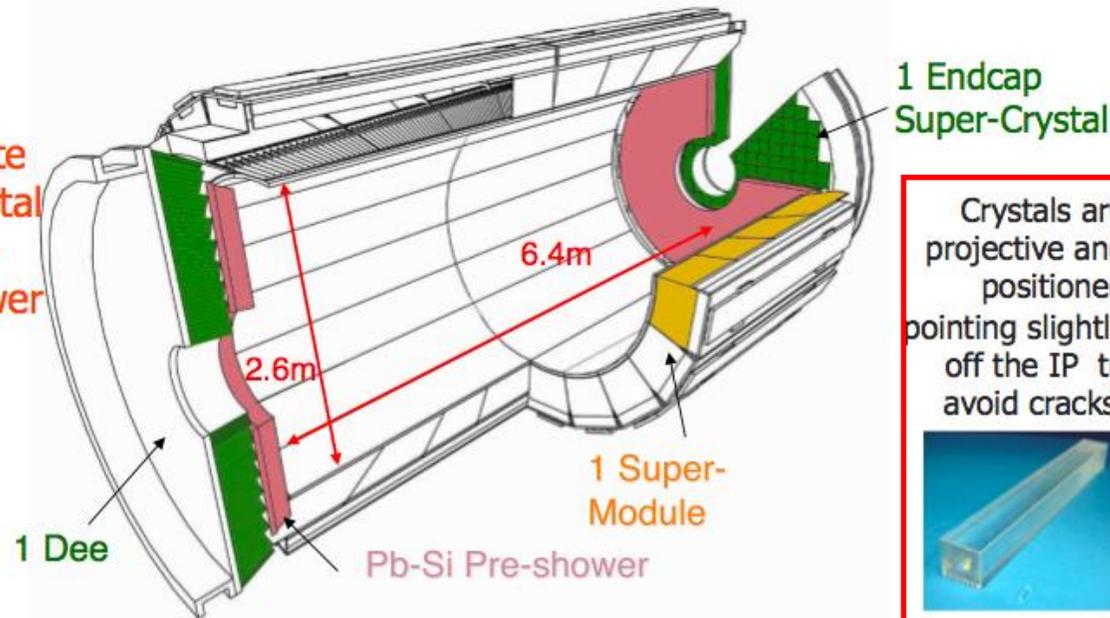


air au niveau de la mer $\sim 23.X_0$

Calorimétrie

Calorimètre électromagnétique de CMS

Homogenous Lead Tungstate (PbWO₄) Crystal Calorimeter + Pb-Si Preshower



Nécessite un contrôle de la température à 0,1° C

Barrel (EB):

- 61200 crystals
- 36 Supermodules (SM), each 1700 crystals
- $|\eta| < 1.48$

Endcap (EE):

- 14648 crystals
- 4 Dees, SuperCrystals of 5x5 xtals
- $1.48 < |\eta| < 3.0$

Preshower (ES):

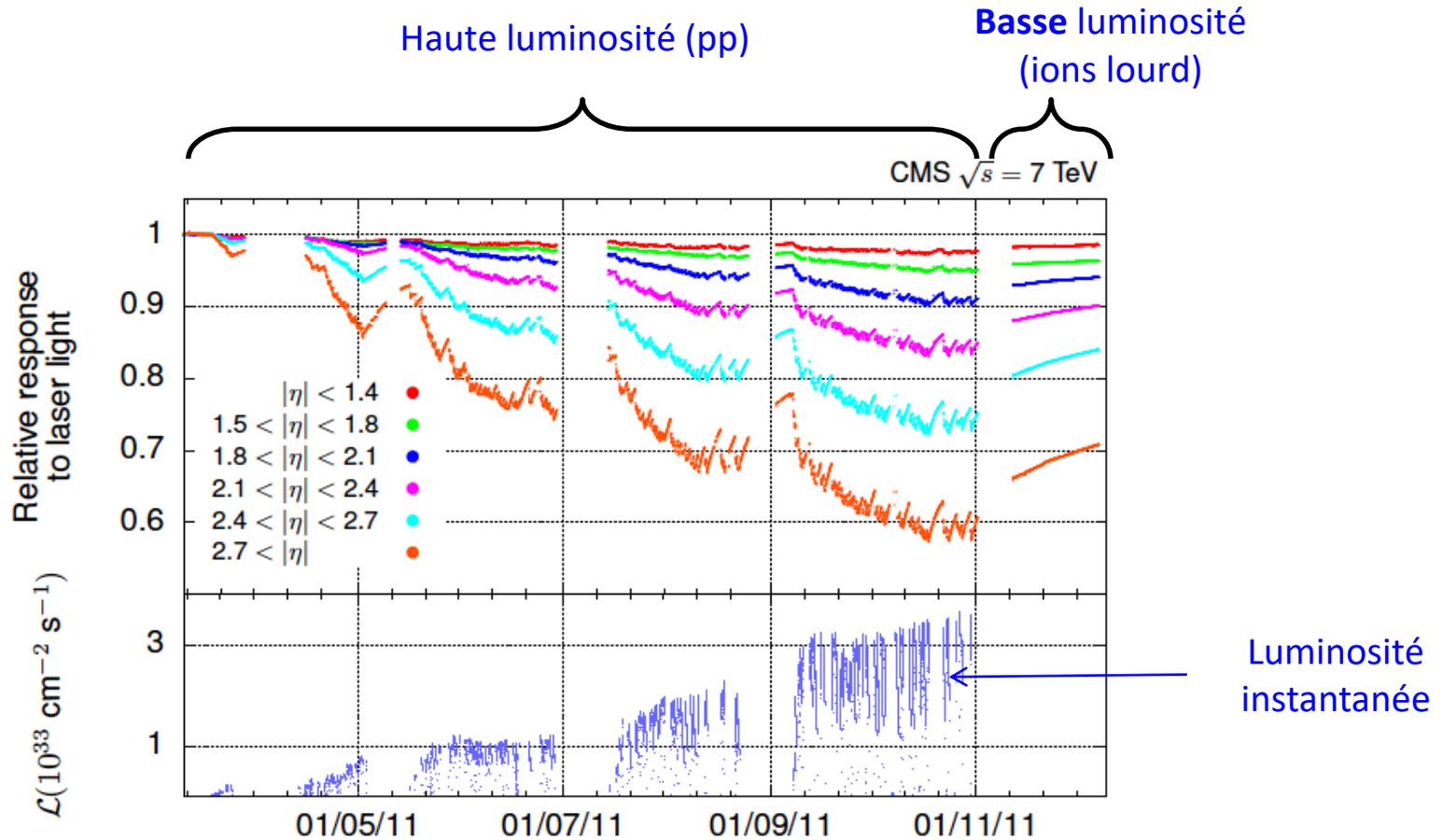
- Pb-Si
- 4 Dees
- 4300 Si strips
- $1.65 < |\eta| < 2.6$

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{3,37\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,25\% \oplus \frac{0,108}{E_{[GeV]}}$$

- (i) Fluctuations
- (ii) Dead material et échelle gain
- (iii) Bruit, pile-up

Calorimétrie

Vieillessement venant des irradiations (fonctionnement LHC)

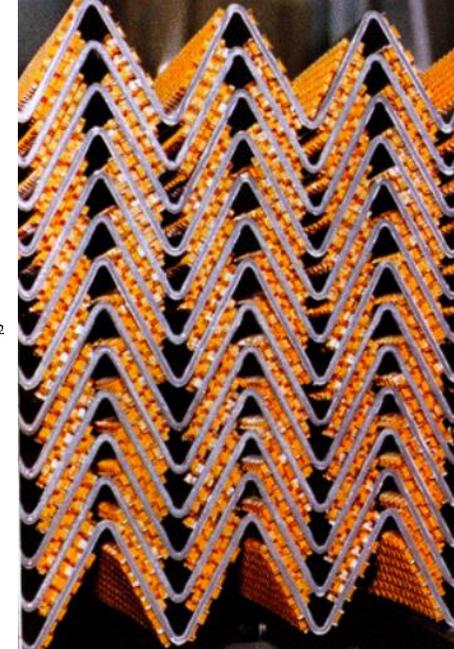
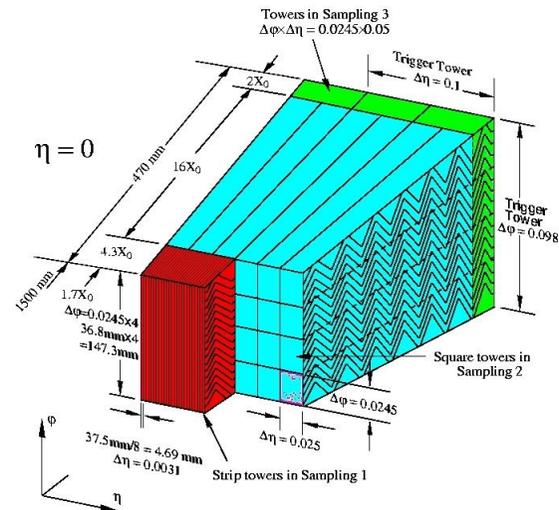
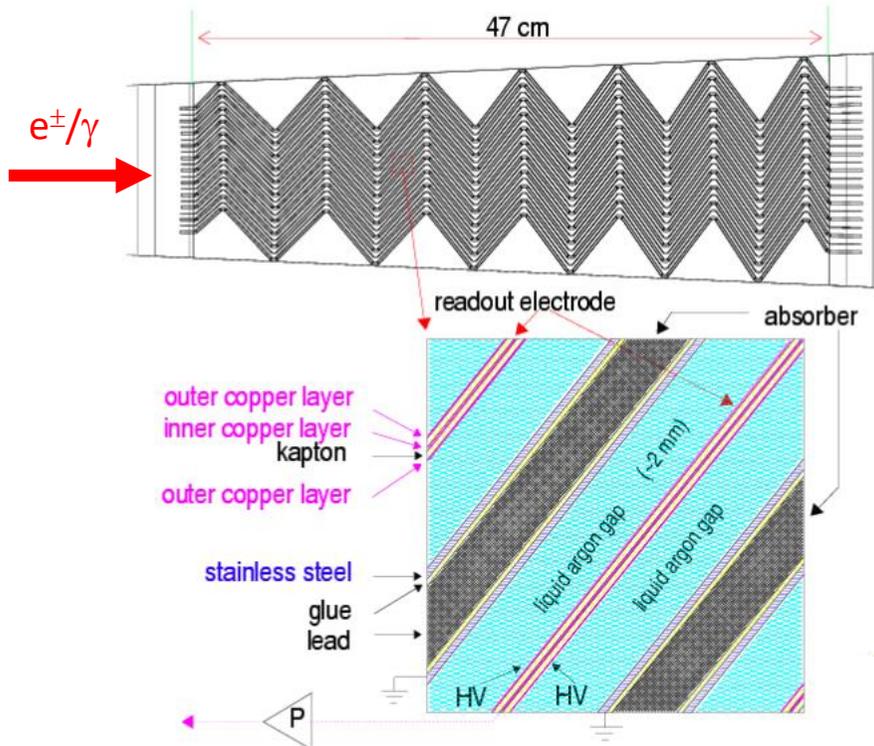


Réponse du calorimètre EM de CMS en 2011, normalisée au début de l'année

Calorimétrie

Calorimètre électromagnétique d'ATLAS

(inventé à l' **IN2P3**, D.Fournier et al.)



Résolution en énergie

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{9,4\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,1\% \oplus \frac{0,3}{E_{[GeV]}}$$

- LAr (90 K)
- Absorbeurs en Pb (1-2 mm)
- 1 GeV \Rightarrow 5 10^6 e⁻ dans LAr
- Géométrie en accordéon
- Insensible aux radiations
- Permet aussi de participer au **trigger**

- (i) Fluctuations
- (ii) Dead material et échelle gain
- (iii) Bruit, pile-up

Importance des épaisseurs de plomb

Calorimétrie

Calorimètres hadroniques

CMS



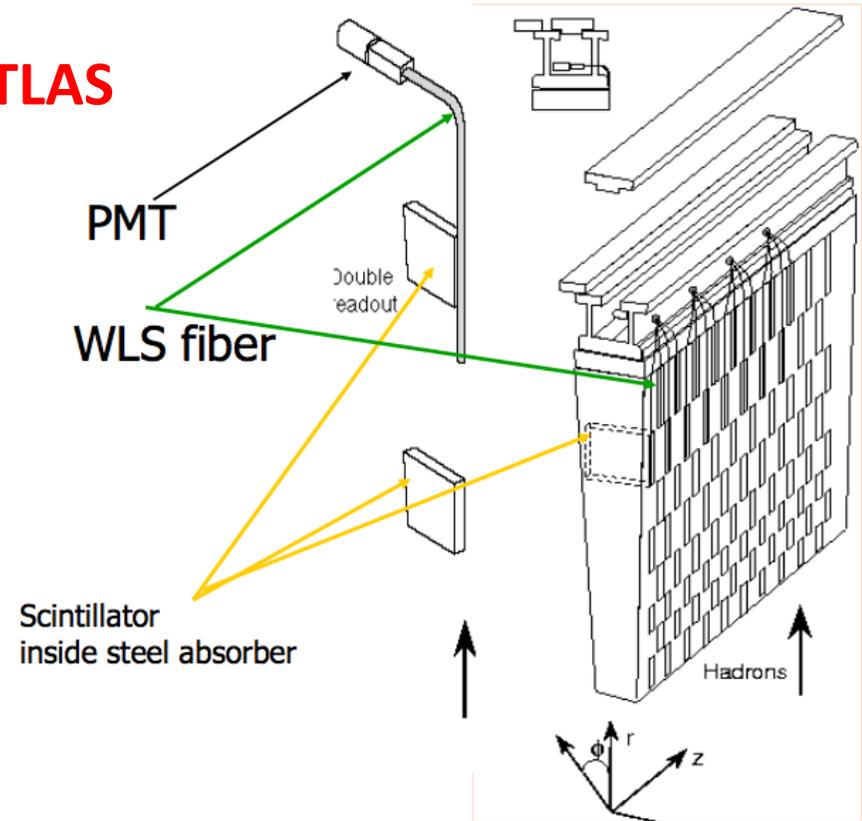
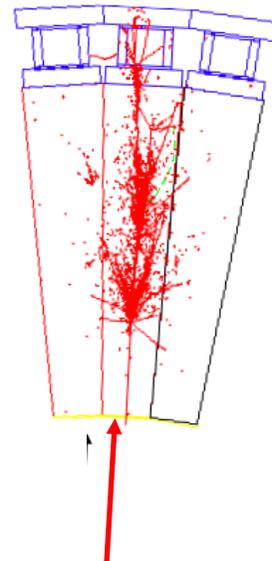
Absorbeurs en cuivre (1500 t) + scintillateurs

Résolution en énergie :

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 5\%$$

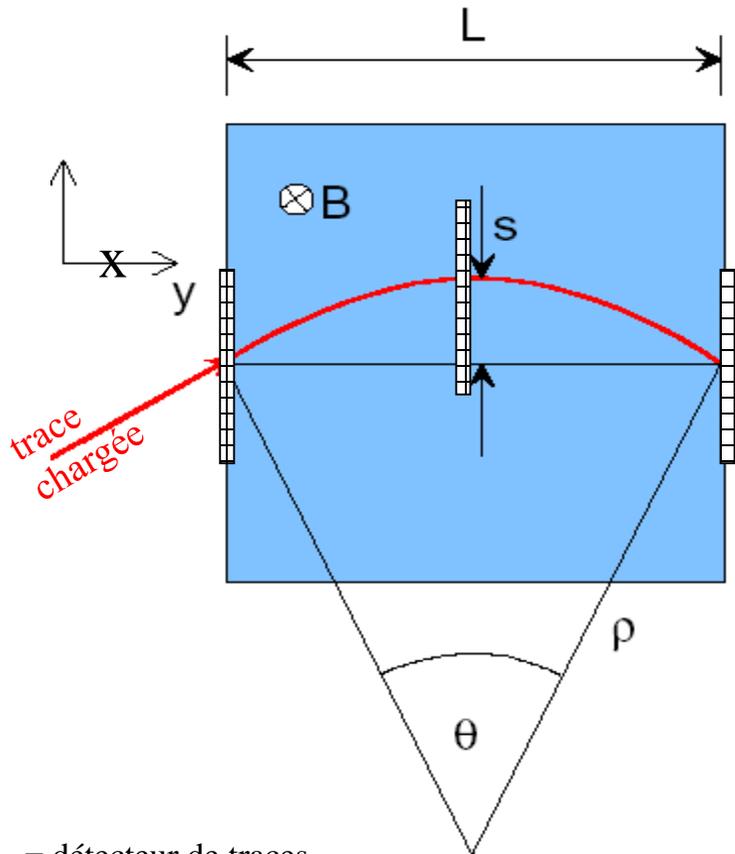
- (i) Fluctuations
- (ii) Dead material et échelle gain

ATLAS



Absorbeurs acier + plaques scintillantes

Particule chargée dans un champ magnétique



trace
chargée

= détecteur de traces
(ex. : TPC, ch. à dérives)

$$p_T = qB\rho$$

$$p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3B\rho \text{ (T} \cdot \text{m)}$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \theta/2 \approx \theta/2 \rightarrow \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$\Delta p_T = p_T \sin \theta \approx 0.3L \cdot B$$

$$s = \rho(1 - \cos \theta/2) \approx \rho \frac{\theta^2}{8} \approx \frac{0.3 L^2 B}{8 p_T}$$

La résolution est dégradée par :

- diffusion multiple (matière au milieu)
- par le désalignement des différents détecteurs entre eux

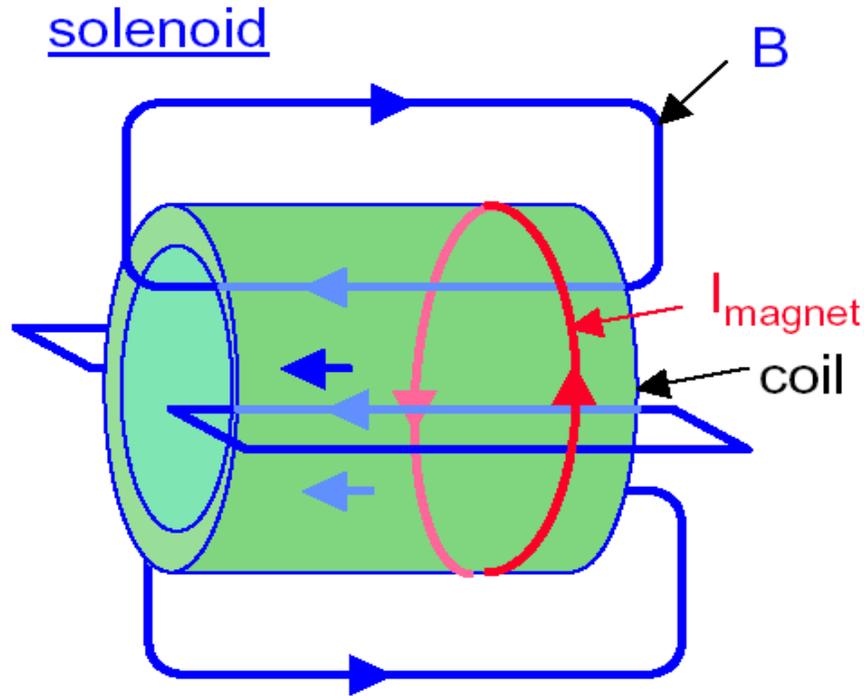
ATLAS :

L = 5 à 7 m, et pour **muon les + énergétiques** $s \sim 500 \text{ um}$

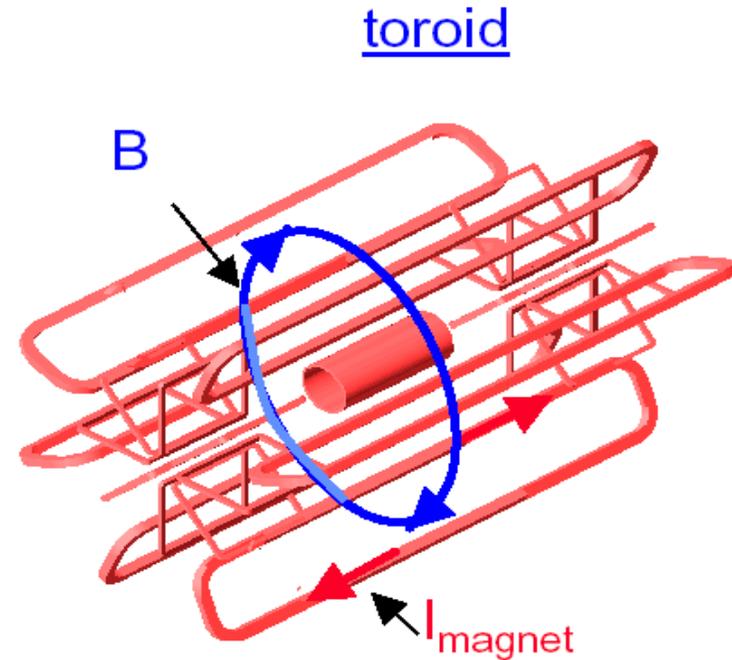
Mesure à 13% => précision de la mesure < 65 um

Positionnement < 40 um

Configurations possible de champ magnétique

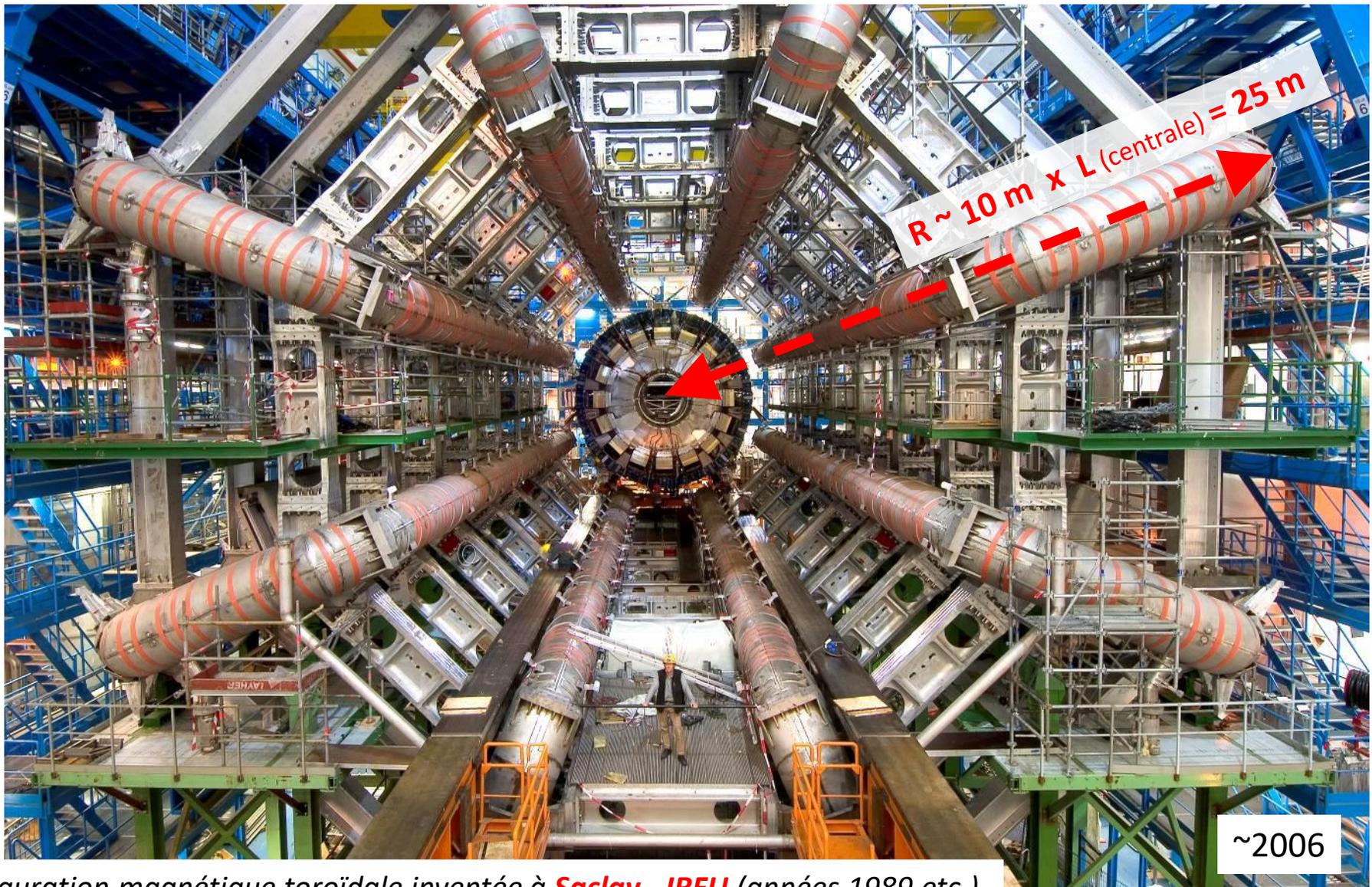


- + Vertex information usefull
- + Large homogenous field inside coil
- weak opposite field in return yoke
- Size limited (cost)
- rel. high material budget



- + independant muon system (redondancy)
- + Rel. large fields over large volume
- + Rel. low material budget
- non-uniform field
- complex structure
- Vertex non-usable

Magnetic fields : supraconducting magnets of ATLAS

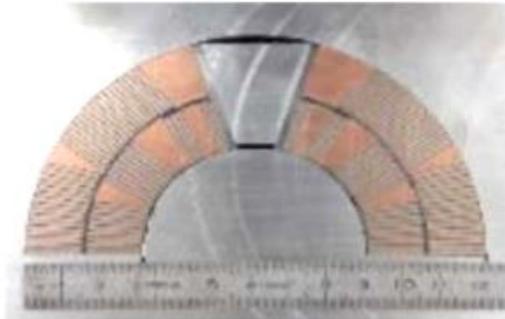


Configuration magnétique toroïdale inventée à **Saclay - IRFU** (années 1989 etc.)

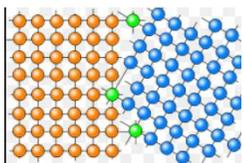
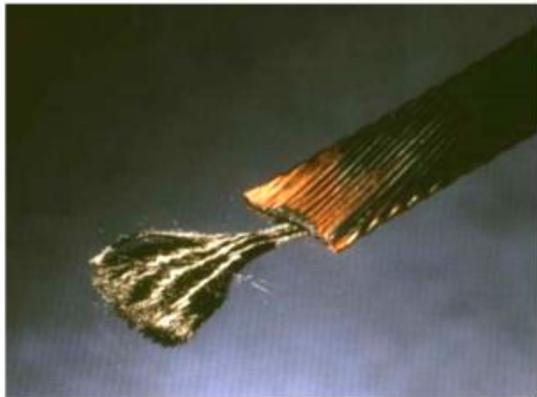
~6 km de supraconducteur par bobines ($I = 20500\text{ A}$)

M.Virchaux, C.Guyot, F.Perrier

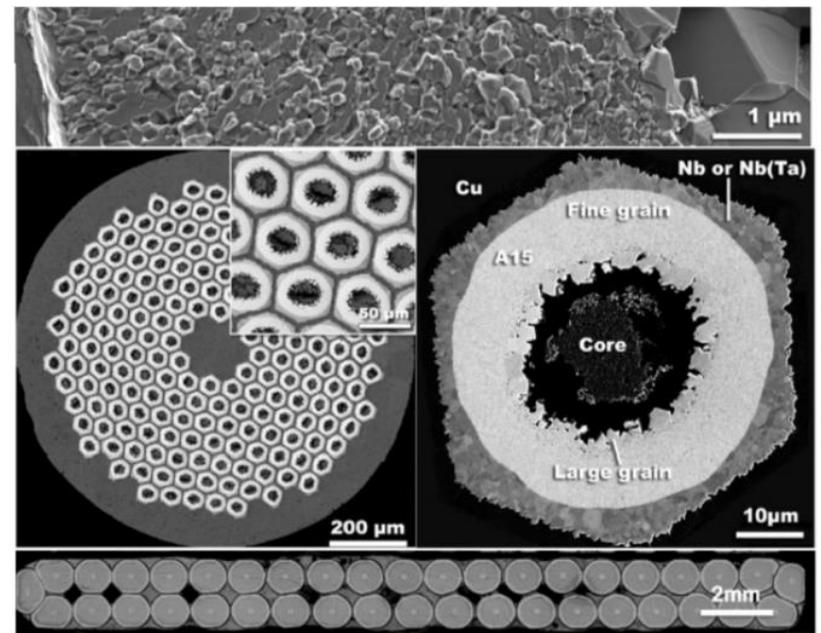
Zoom sur un aimant de l'accélérateur LHC



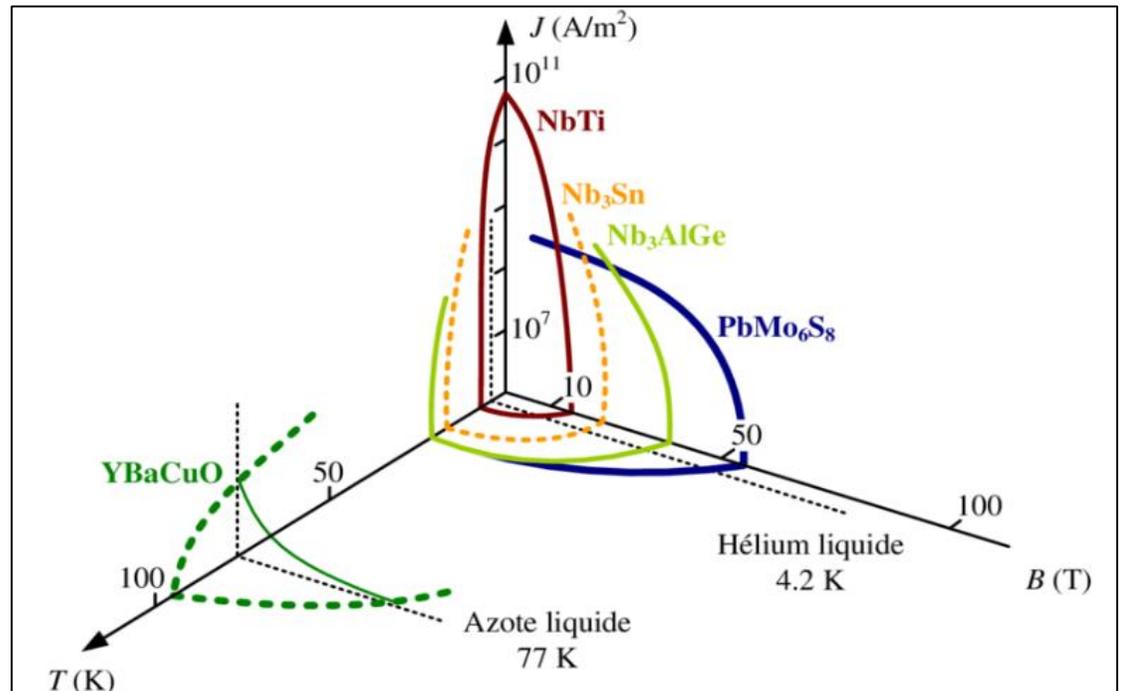
	Tevatron	HERA	RHIC	LHC
Dipole field	4.4 T	5.3 T	3.5 T	8.3 T
Number of strands	23	24	30	28-36
Cable current	4 kA	5.5 kA	5 kA	11.8 kA



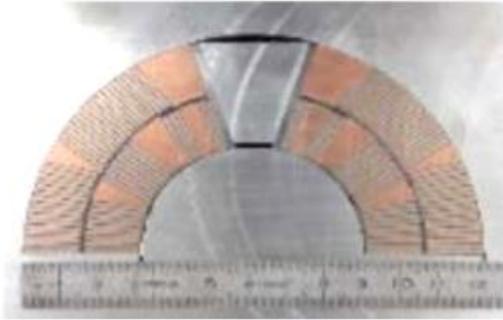
Critical current limited by density of cable defects (grain boundary / joint de grain)



Conditions limites pour avoir la supraconduction

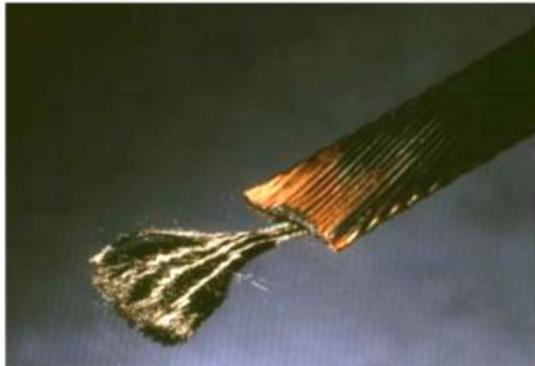


Zoom sur un aimant de l'accélérateur LHC

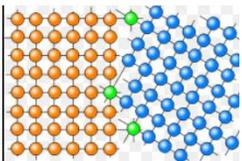


O

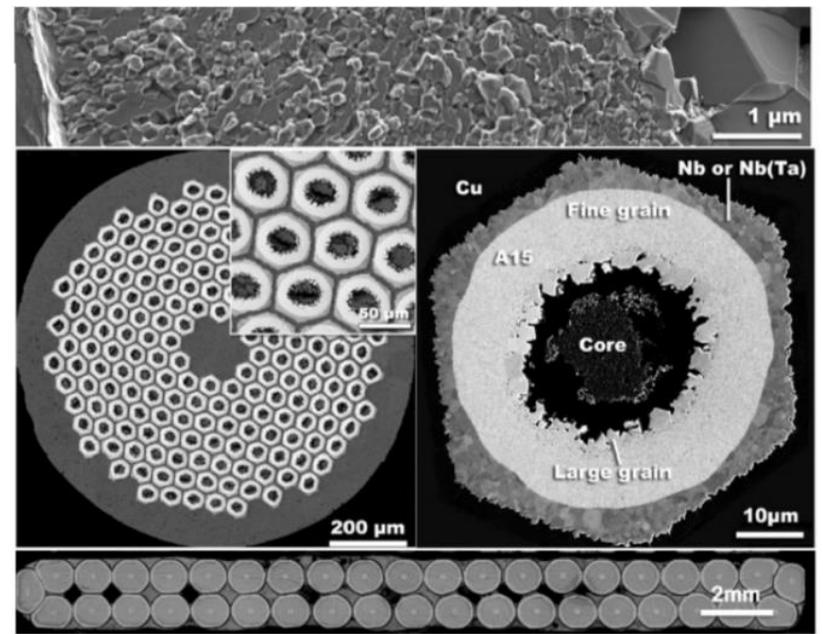
	Tevatron	HERA	RHIC	LHC
Dipole field	4.4 T	5.3 T	3.5 T	8.3 T
Number of strands	23	24	30	28-36
Cable current	4 kA	5.5 kA	5 kA	11.8 kA



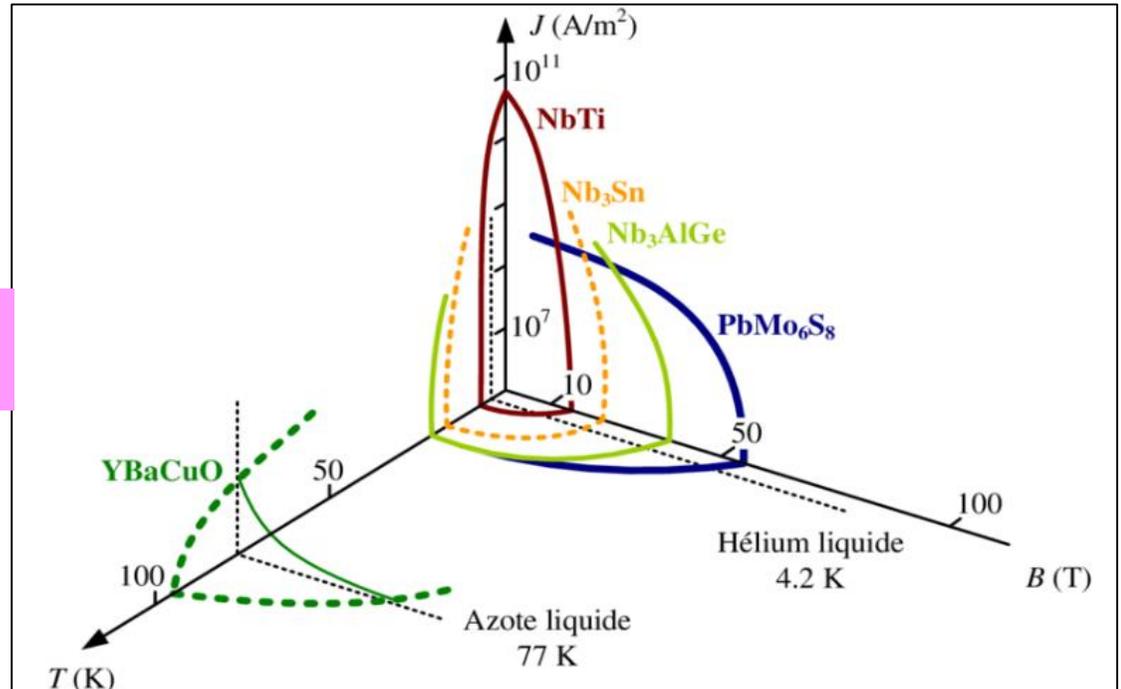
Un aimant supra a une phase « d'apprentissage » avant de pouvoir atteindre son courant limite



Critical current limited by density of cable defects (grain boundary / joint de grain)



Conditions limites pour avoir la supraconduction



Fin de la dernière session

La course aux picosecondes

$c : \sim 3 \text{ ns / m}$
 3 ps / mm

Plusieurs conditions :

- (Référence/horloge externe précise)
- elx multi-voies avec cette précision/synchronisation
- Phénomène physique contrôlé en temps
- Contrôle du câblage/routage, etc. (ou resynchronisation in-situ)
- Contrainte sur la géométrie, ex. planéité

Détecteurs 4D, 5D

On vise \sim **($\sim 30 \text{ ps}$)** et mieux plus tard...

La course aux picosecondes

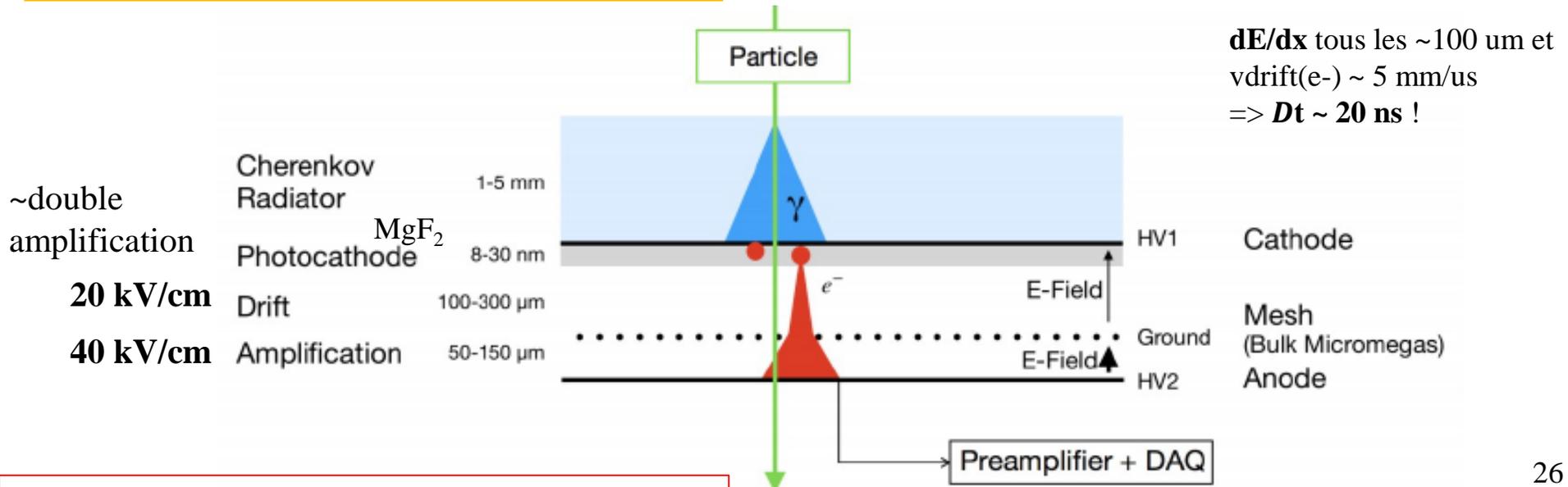
$c : \sim 3 \text{ ns} / \text{m}$
 $3 \text{ ps} / \text{mm}$

Détecteurs 4D, 5D

Plusieurs conditions :

- (Référence/horloge externe précise)
- elx multi-voies avec cette précision/synchronisation
- Phénomène physique contrôlé en temps
- Contrôle du câblage/routage, etc. (ou resynchronisation in-situ)
- Contrainte sur la géométrie, ex. planéité

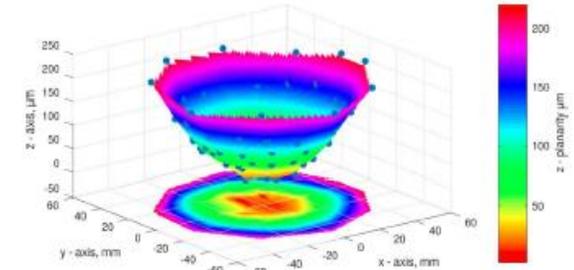
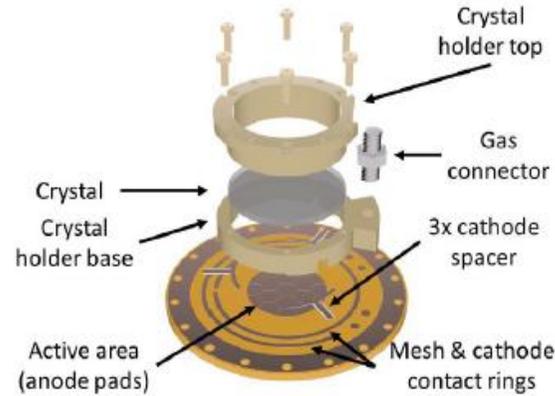
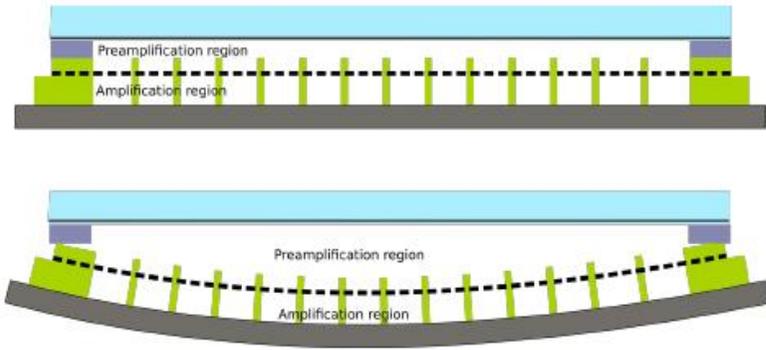
Détecteur Micromegas PicoSec ($\sim 30 \text{ ps}$)



10 mm diam. detector achieved $\sigma \approx 12.5 \text{ ps}$

La course aux picosecondes

10 μm \Leftrightarrow 70 ps



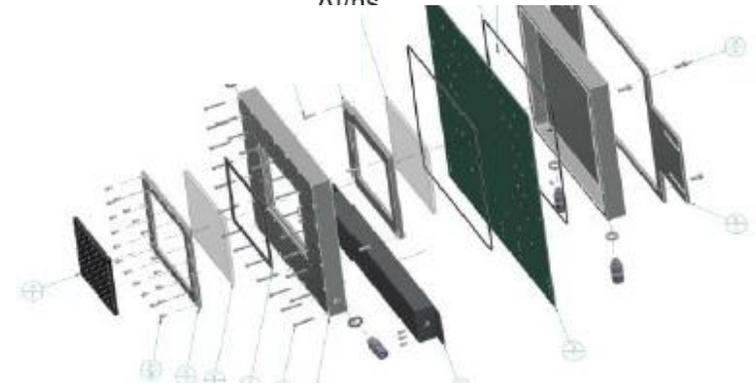
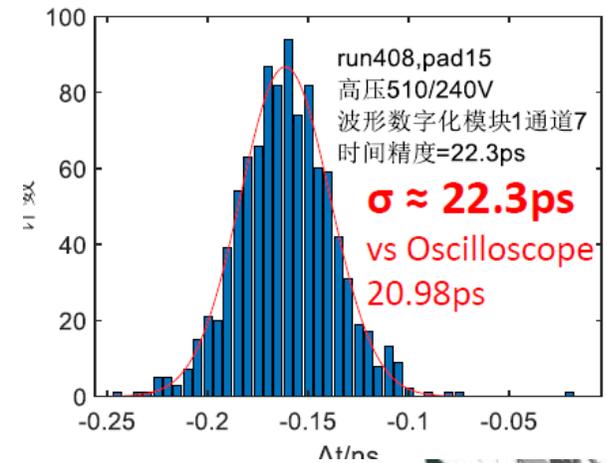
A prendre en compte :

- Tension de la mesh
- Contrainte serrage -> déformation
- Découplage mécanique de la photocathode du reste du détecteur
- Max $\sim 10\% X_0$

Pour prototype de $10 \times 10 \text{ cm}^2 \Rightarrow$ résolution de $< 30 \text{ ps}$ sur **pad central** (photocathode CSi ou DLC)

Encore du travail... passage à $20 \times 20 \text{ cm}^2$, avec 4 photocathodes de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ séparées.

(dépôt ANR commune, portée par Th.Papaevandelou, IRFU, avec IJCLab, CENBG, LIST)





Plan :

- 1) Interactions fondamentales
- 2) Détecteurs élémentaires et multi-détecteurs (*pas tous*)
- 3) Comment les tester, les calibrer (*aussi voir 4*)
- 4) (un) exemple d'un détecteur et d'une chaîne de lecture

Calibrer/étalonner son détecteur

Aspects géométriques :

- Mesures 3D (l'objet ou sa position)
- Comparaison avec un étalon méca. calibré (aussi avec opto-mécanique)
- Retournement, mouvement de la pièce (mesures de déformation)

Signal (en sortie) du détecteur, ie **avec elx** : (aussi calibration de sous-éléments)

- Faisceaux de tests (CERN, PSI, etc.)
- Sources radioactives : dépôts d'énergie connus
 ^{60}Co (phot. MeV), ^{55}Fe (X qq keV), Cf (alpha qq MeV), etc.
- Rayons cosmiques (avec tracker externe pour trigger)
- Laser (ex. UV pour dét. gazeux)
- Calibration de l'électronique :
 - injection de pulses connus
 - run de pedestaux (**elx connectée sur détecteur** + trigger aléatoire)
- Injection de signaux synchrones sur plusieurs voies
- Flat field pour caméra de télescope (mesure de flux)

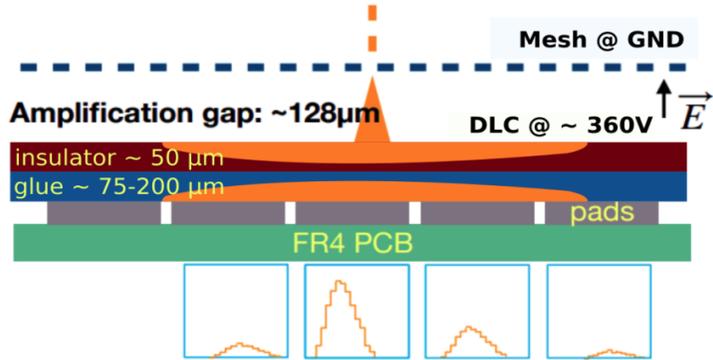
Simulation du détecteur, compréhension des signaux :

- (GEANT++), Garfield, etc.
- CADENCE, COMSOL/Maxwell, (LT)Spice, etc.

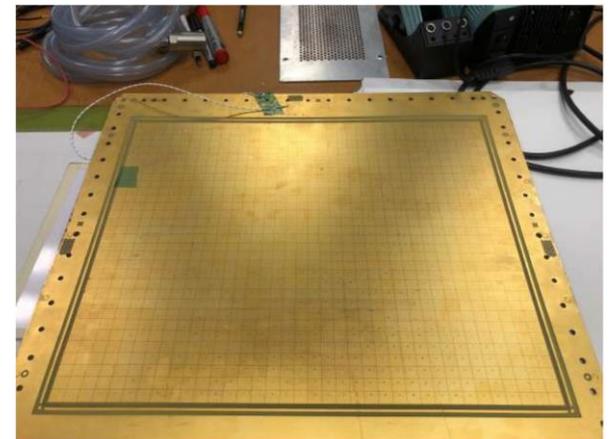
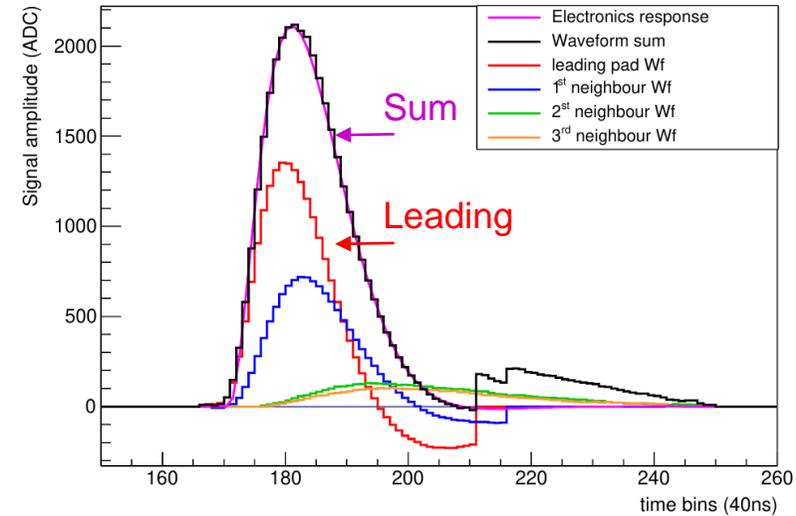
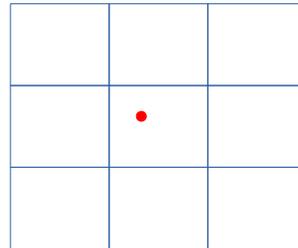
*Aussi : contrôle qualité, qualité du gaz, stabilité HV, temp.,
carte de champ E et/ou B (tracker), etc.*

Micromegas résistif à lecture par pad

Installé dans deux TPC au Japon (T2K)

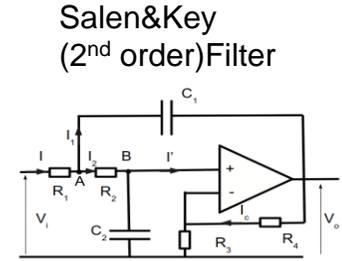
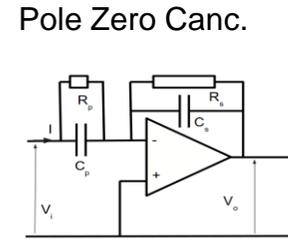
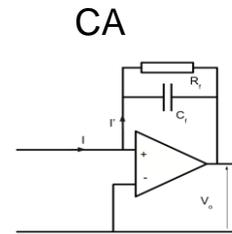
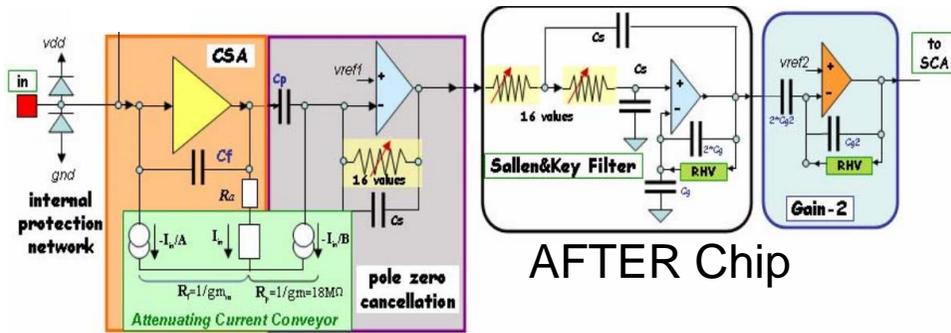


Charge deposited punctually on a pad (X ray)



36 x 32 metallic pads
 Pad size $\sim 10 \times 11\text{ mm}^2$ x8 x4

Pascal Baron et al.



AFTER Chip

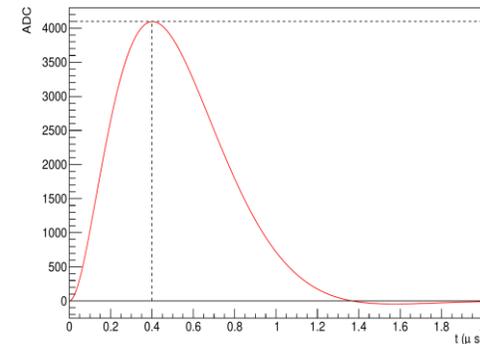
Laplace transform
⇒ pulse response

JF Laporte

$$ADC^{Dirac}(t) = \frac{4096}{120fC} \frac{f(t; w_s, Q)}{f_{max}} \quad \text{where}$$

$$f(t; w_s, Q) = e^{-w_s t} + e^{-\frac{w_s t}{2Q}} \left[\sqrt{\frac{2Q-1}{2Q+1}} \sin\left(\frac{w_s t}{2} \sqrt{4 - \frac{1}{Q^2}}\right) - \cos\left(\frac{w_s t}{2} \sqrt{4 - \frac{1}{Q^2}}\right) \right]$$

Parametrization of the electronics response with 2 parameters
 $w_s \sim 1/\text{Peaking time}$ and Q quality factor

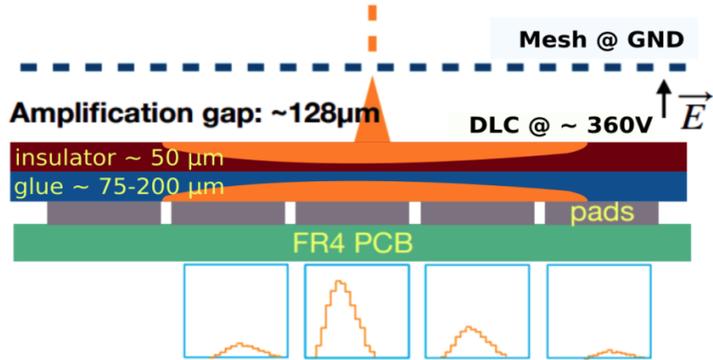


The plan: apply everywhere the “simple” model
Telegraph Equation ⊗ Dirac pulse parametrization

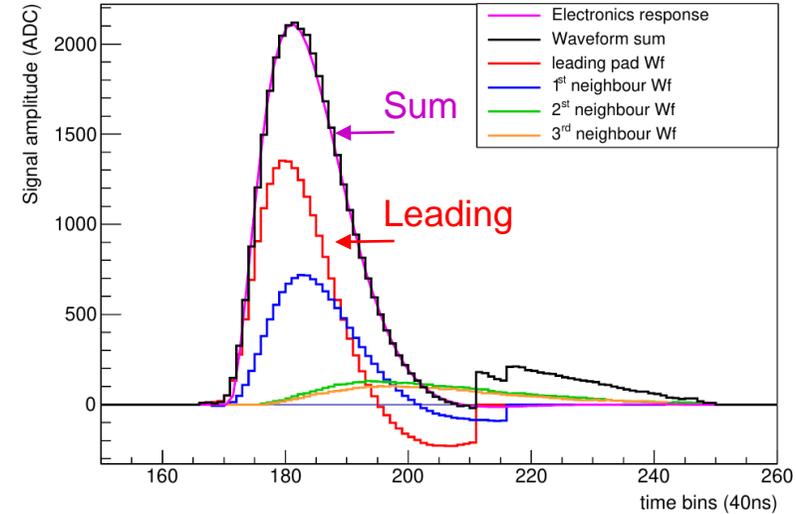
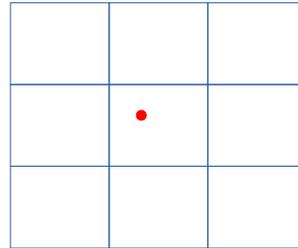
(avant calcul simulation via LTSpice du circuit)

Micromegas résistif à lecture par pad

Installé dans deux TPC au Japon (T2K)

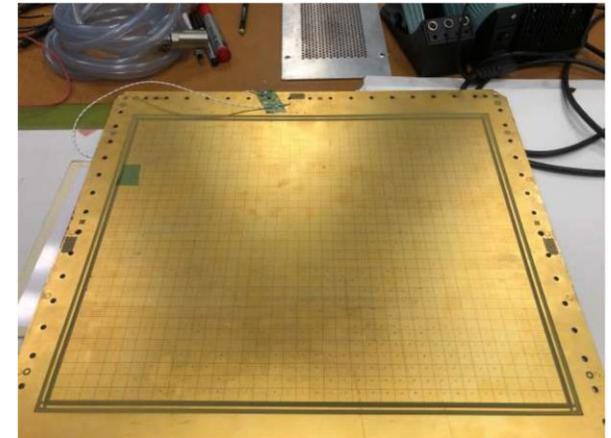
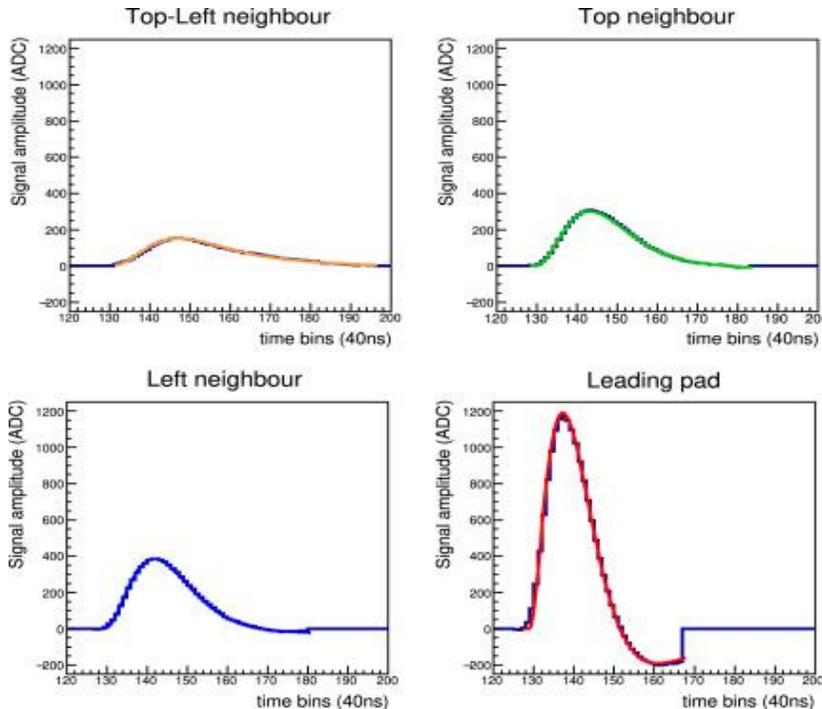


Charge deposited punctually on a pad (X ray)



On fit très bien le signal 😊

(avec source de ^{55}Fe)

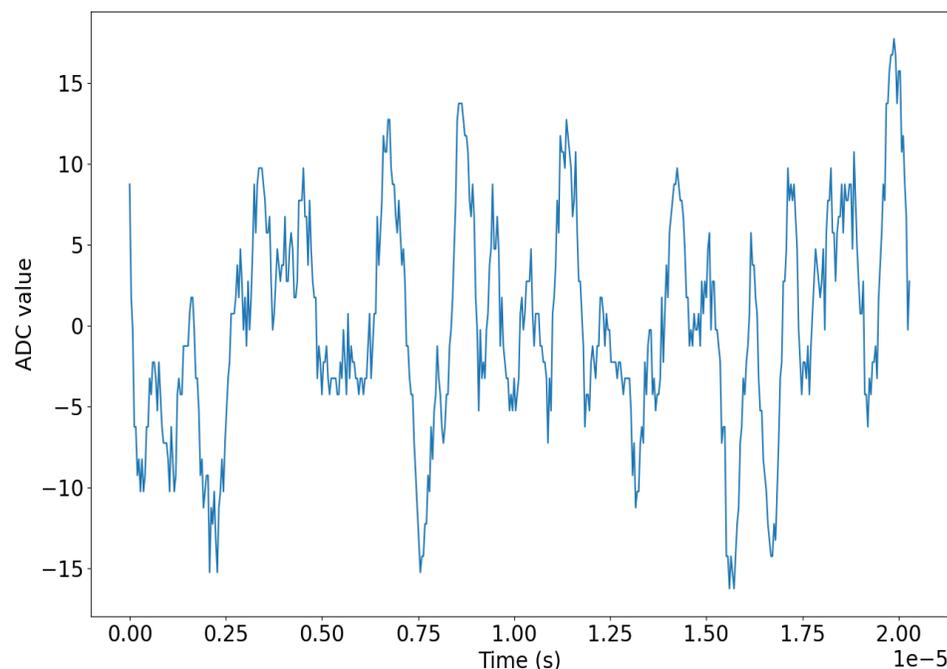


36 x 32 metallic pads
Pad size ~10x11 mm² x8 x4

Maintenant que la réponse de l'électronique est correctement fittée, on va essayer d'estimer/comprendre le bruit/pedestal de l'électronique

Soubickchane Ramatchandirin + Raphaël Fourquet (M1 interns)

One record
 $T_p = 412 \text{ ns}$
 $F_s = 25 \text{ MHz}$



Fluctuations over many time bins

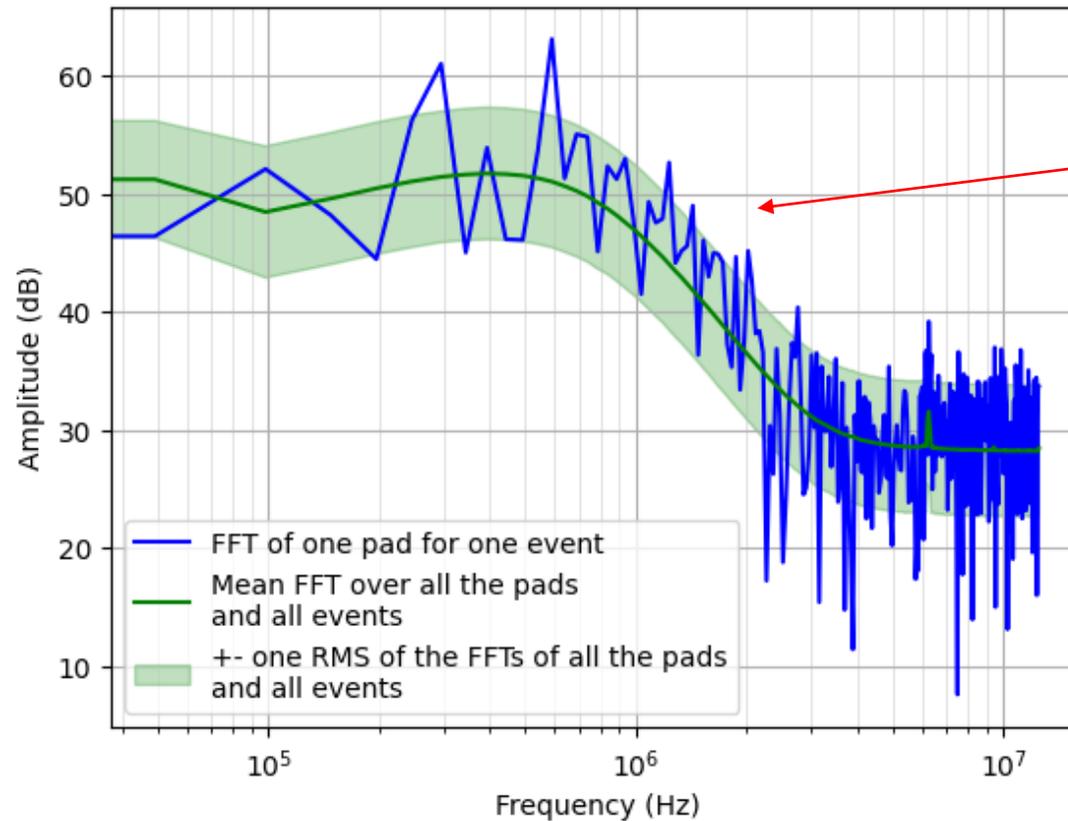
⇒ The frequencies of the bulk of Noise are much lower than 25 MHz (1/time bin = 40ns)

⇒ Low frequency noise,
ie some correlation from time bin to time bin...

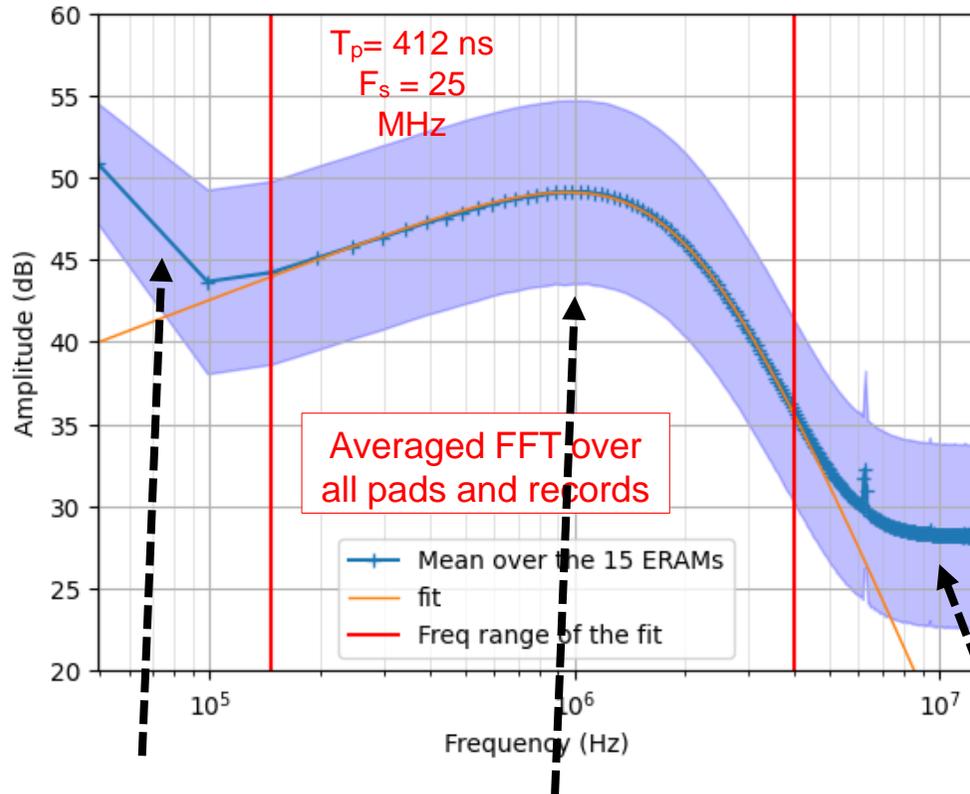
Done 10 times for all pads of the **16 Erams now in Japan** (bottom TPC),
for 4 sampling frequencies and 2 peaking times
(~1000 pads / ERAM)

Fast Fourier Transform of the baseline record: one record compared to averaged FFT over all pads and records

$T_p = 412$ ns
 $F_s = 25$ MHz

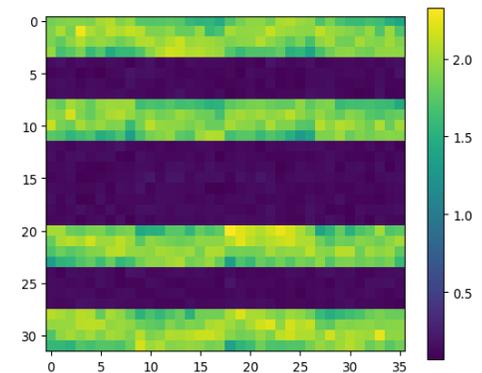
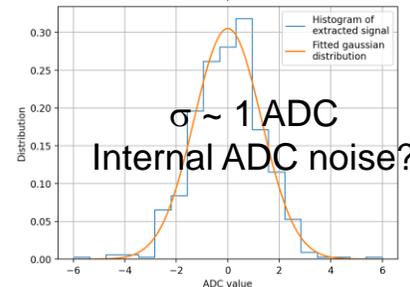
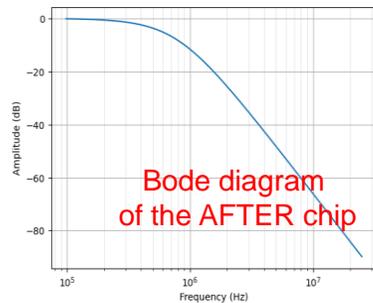
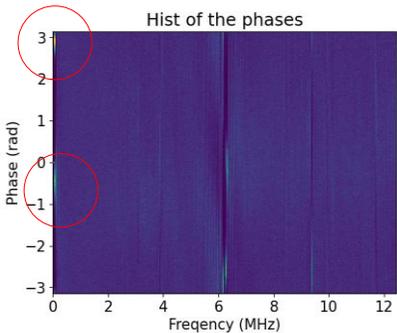


Dominated by frequencies lower than 1 MHz

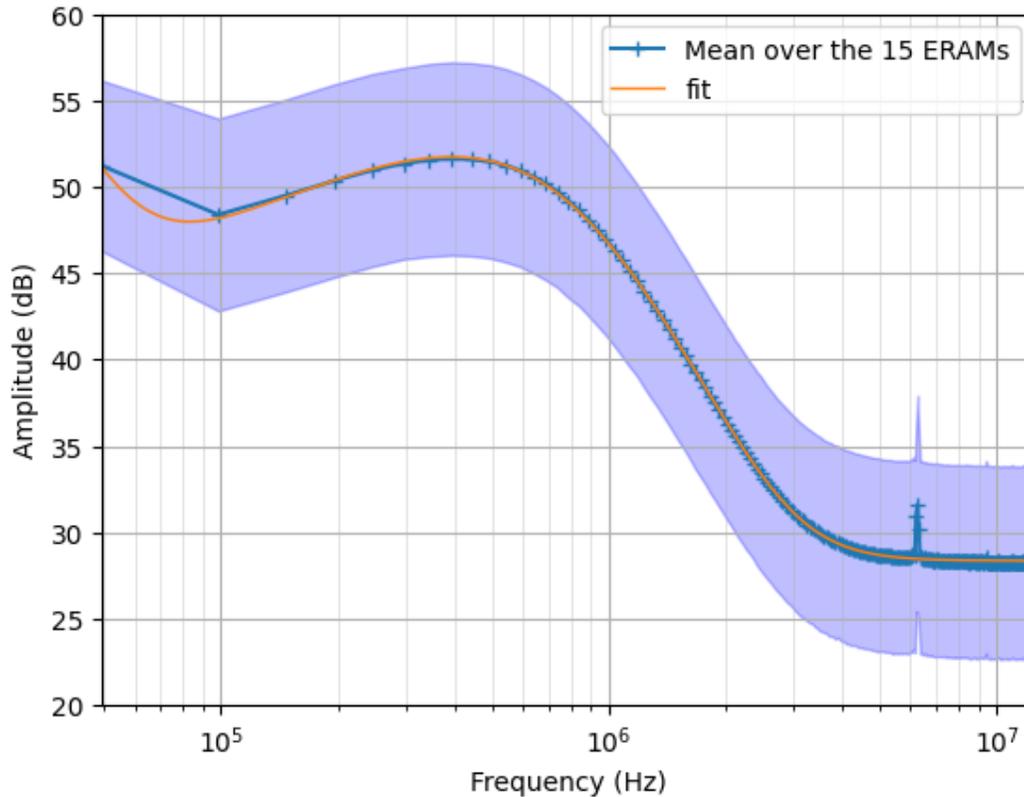


The bulk of the spectrum is understood as the effect of the AFTER chip convoluted with some random current

AFTER chip cuts off frequencies above $\sim 1 \text{ MHz}$



At low f , two populations of pads (2×36), due to pad **bonding** on the ASIC



The spectrum can be fitted quite decently with a “simple” analytical function

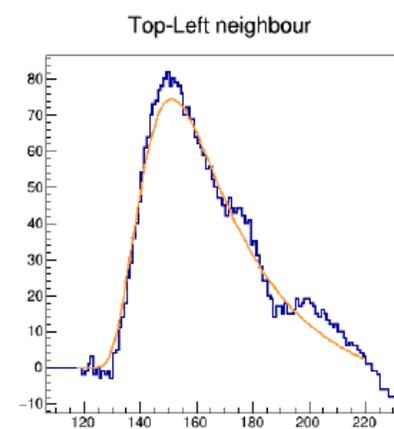
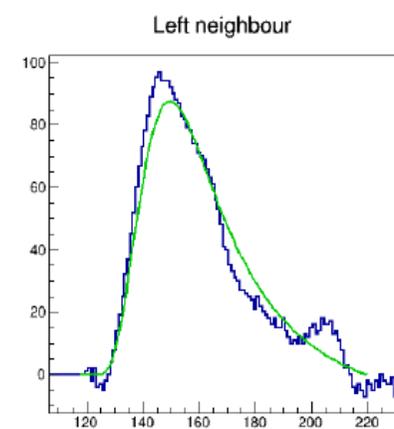
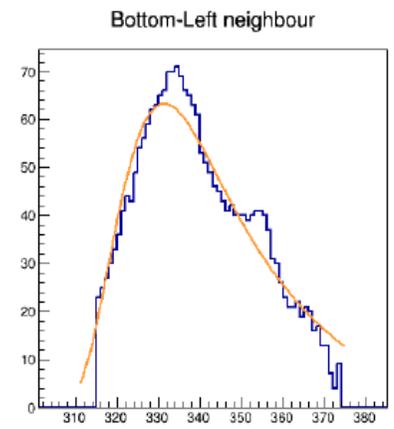
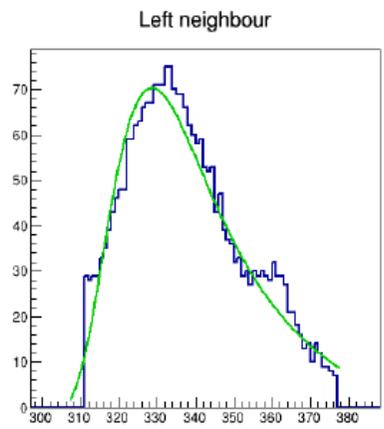
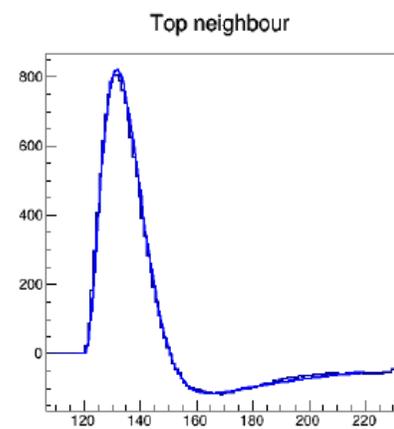
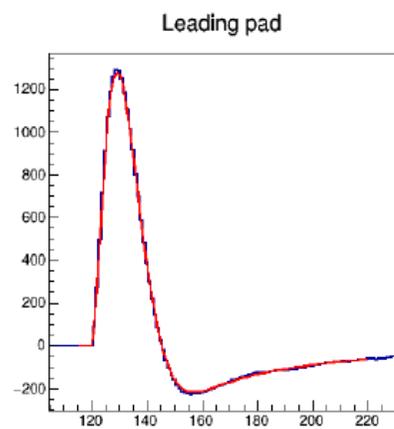
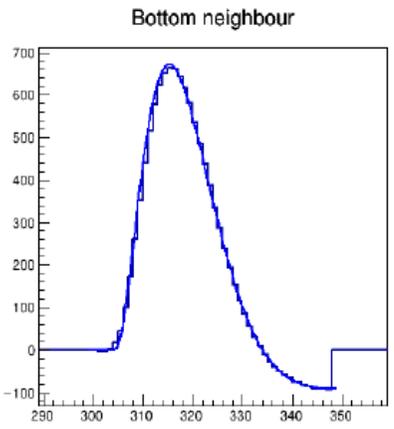
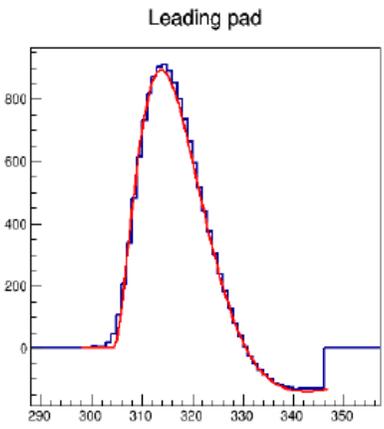
$$\sqrt{\left[\frac{A_0}{f^2}\right]^2 + \left[A_1 \sqrt{f} \cdot H_{after}(f)\right]^2 + A_2^2}$$

Applicable pour la simulation MC

UNDERSTANDING THE NOISE: MAKING NOISE

X-ray data waveforms

Simulated noisy waveforms



Aussi travail (en cours) sur COMSOL pour essayer d'aller + loin : comprendre les effets de diaphonie ?

Preliminary ; Plots from Shivam JOSHI

Calibrer/étalonner son détecteur

Aspects géométriques :

- Mesures 3D (l'objet ou sa position)
- Comparaison avec un étalon méca. calibré (aussi avec opto-mécanique)
- Retournement, mouvement de la pièce (mesures de déformation)

Signal (en sortie) du détecteur, ie **avec elx** : (aussi calibration de sous-éléments)

- Faisceaux de tests (CERN, PSI, etc.)
- Sources radioactives : dépôts d'énergie connus
 ^{60}Co (phot. MeV), ^{55}Fe (X qq keV), Cf (alpha qq MeV), etc.
- Rayons cosmiques (avec tracker externe pour trigger)
- Laser (ex. UV pour dét. gazeux)
- Calibration de l'électronique :
 - injection de pulses connus
 - run de pedestaux (**elx connectée sur détecteur** + trigger aléatoire)
- Injection de signaux synchrones sur plusieurs voies
- Flat field pour caméra de télescope (mesure de flux)

Simulation du détecteur, compréhension des signaux :

- (GEANT++), Garfield, etc.
- CADENCE, COMSOL/Maxwell, (LT)Spice, etc.

*Aussi : contrôle qualité, qualité du gaz, stabilité HV, temp.,
carte de champ E et/ou B (tracker), etc.*

Travail en **commun**
ingénieur.es /
chercheur.ses
pour ces 3 aspects !

Conclusions (1)

Même si certains phénomènes physique décrivant l'interaction particules-matière sont connues depuis ~100 ans la discipline est en évolution permanente.

Beaucoup de choses à suivre dans les domaines des :

- détecteurs gazeux Micro Pattern Gaseous Detector (**MPGD**) – **résistif**
- détecteurs solides avec aussi l'arrivée du **résistif associé à du gain**, etc.
- détecteurs **4D, 5D, pico-secondes**
- matériaux : imprimantes 3D, nouveaux matériaux (nouveaux détecteurs ?)
- supra (recherche sur les supra High- T_c)
- arrivée de la photonique
- simulation fine de votre détecteur + son électronique (**signal=f(t)** , *pico-sec et capa !*)

Difficile de suivre toutes ces évolutions seul, même à l'échelle d'un labo/institut !

- Réseau détecteur IN2P3 – IRFU : réseau dét. Gazeux (coord. Gabriel Charles - IJCLab)
- DRD du CERN

Importance de la formation / workshop / écoles

Conclusions (2)

Au-delà de nos objectifs scientifiques et techniques collectifs, qu'elle est/sera notre contribution personnelle à la physique fondamentale dans les domaines subatomiques et astro-particules ?

Pour cela, de mes expériences passées (idéalement) il est intéressant/important de :

- s'intéresser au travail « autour » de soi (dans le groupe et au-delà) : qui va utiliser mon soft et comment, mon détecteur, ma carte d'électronique, etc. et comment optimiser cette utilisation, comment calibrer « mon » détecteur, ma carte, mesurer (métrologie) ma détecteur/pièce ? => en parler ensemble
- quelle est la chaîne complète de la particule au signal de « mon » détecteur jusqu'au fichier enregistré ? => **y travailler ensemble** (*ingé. + tech. + phys.*)
- le tout dans le cadre de collaboration avec ses (nombreuses) contraintes...

Autres diapositives...