

La calorimétrie

cours n^o3

La calorimétrie

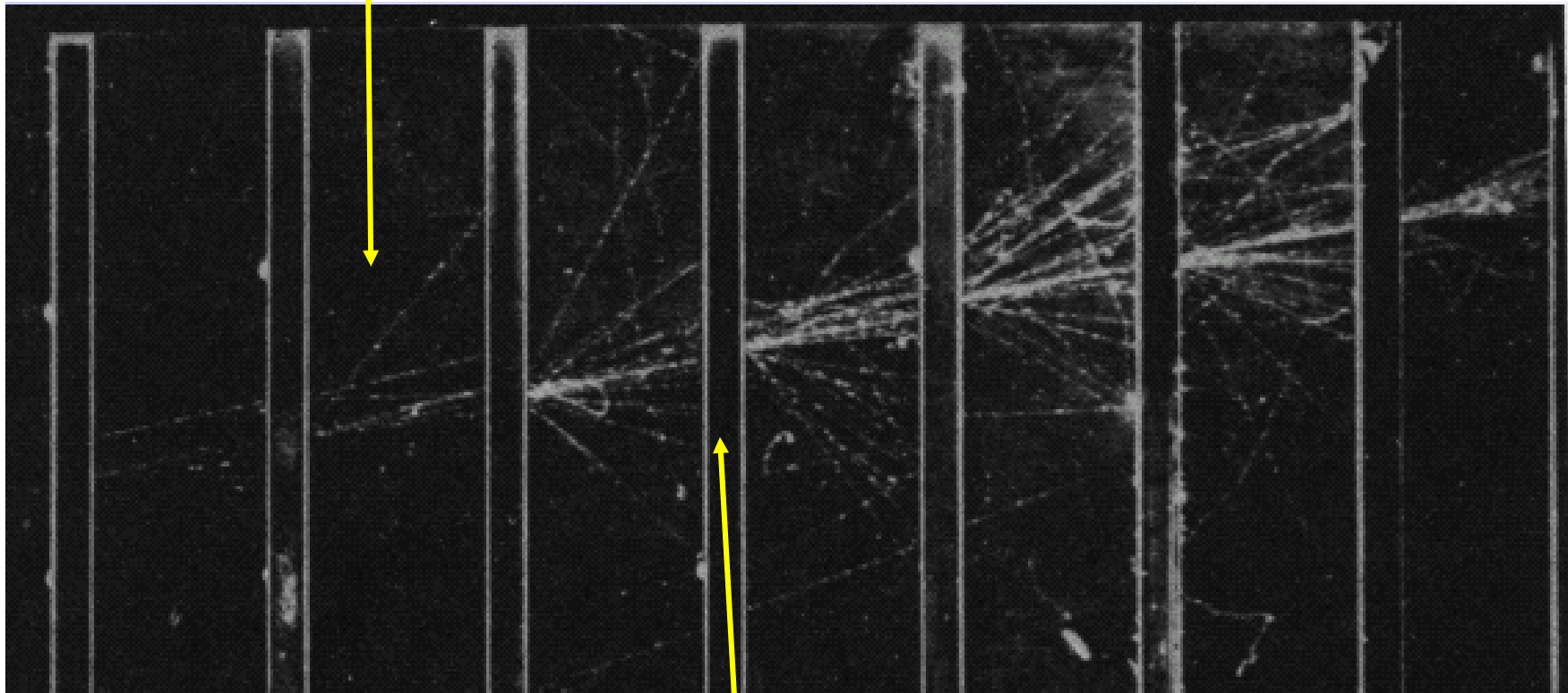
- ◇ Pourquoi un calorimètre?
- ◇ Les propriétés importantes des calorimètres
- ◇ Le développement des gerbes
 - ◇ gerbes électromagnétiques
 - ◇ Interlude: les muons
 - ◇ gerbes hadroniques
- ◇ Les paramètres essentiels
 - ◇ mesure de l'énergie: principe de base
 - ◇ résolution
 - ◇ linéarité
 - ◇ position
- ◇ Les techniques expérimentales
 - ◇ calorimètres homogènes
 - ◇ principe
 - ◇ exemples
 - ◇ calorimètres à échantillonnage
 - ◇ principe
 - ◇ exemples

Interactions avec
la matière

- ◇ Les calorimètres à l'IN2P3
- ◇ Les systèmes de lecture
- ◇ Le déclenchement

Les calorimètres à échantillonnage

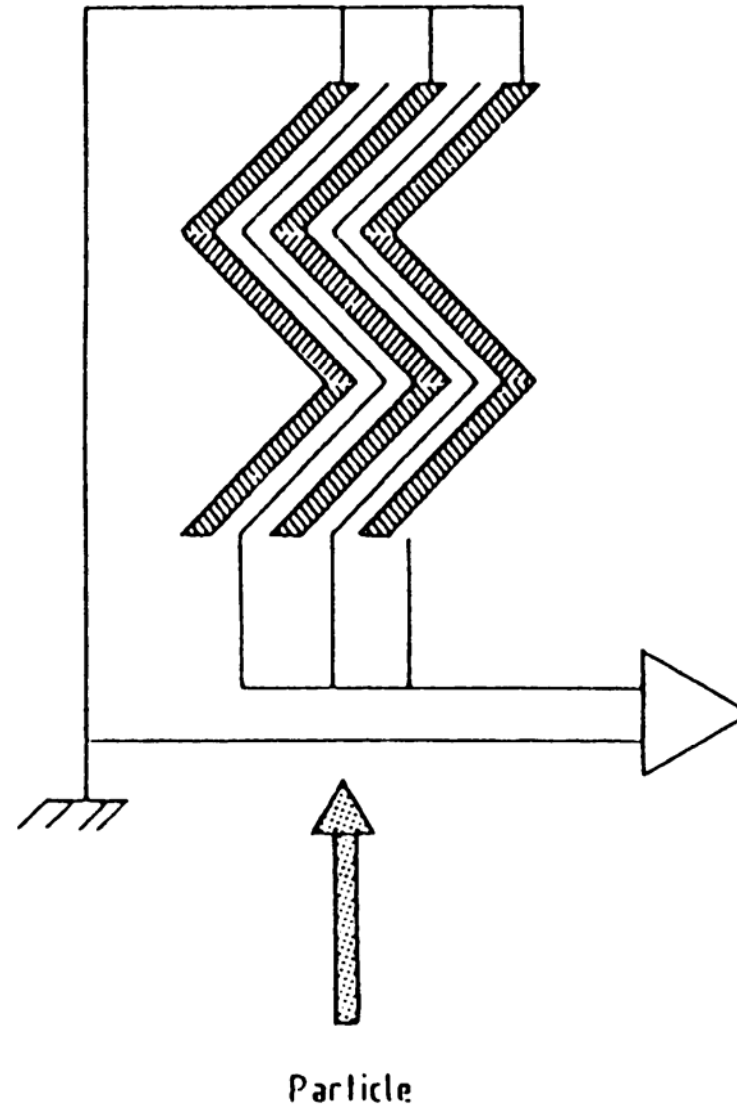
Milieu détecteur



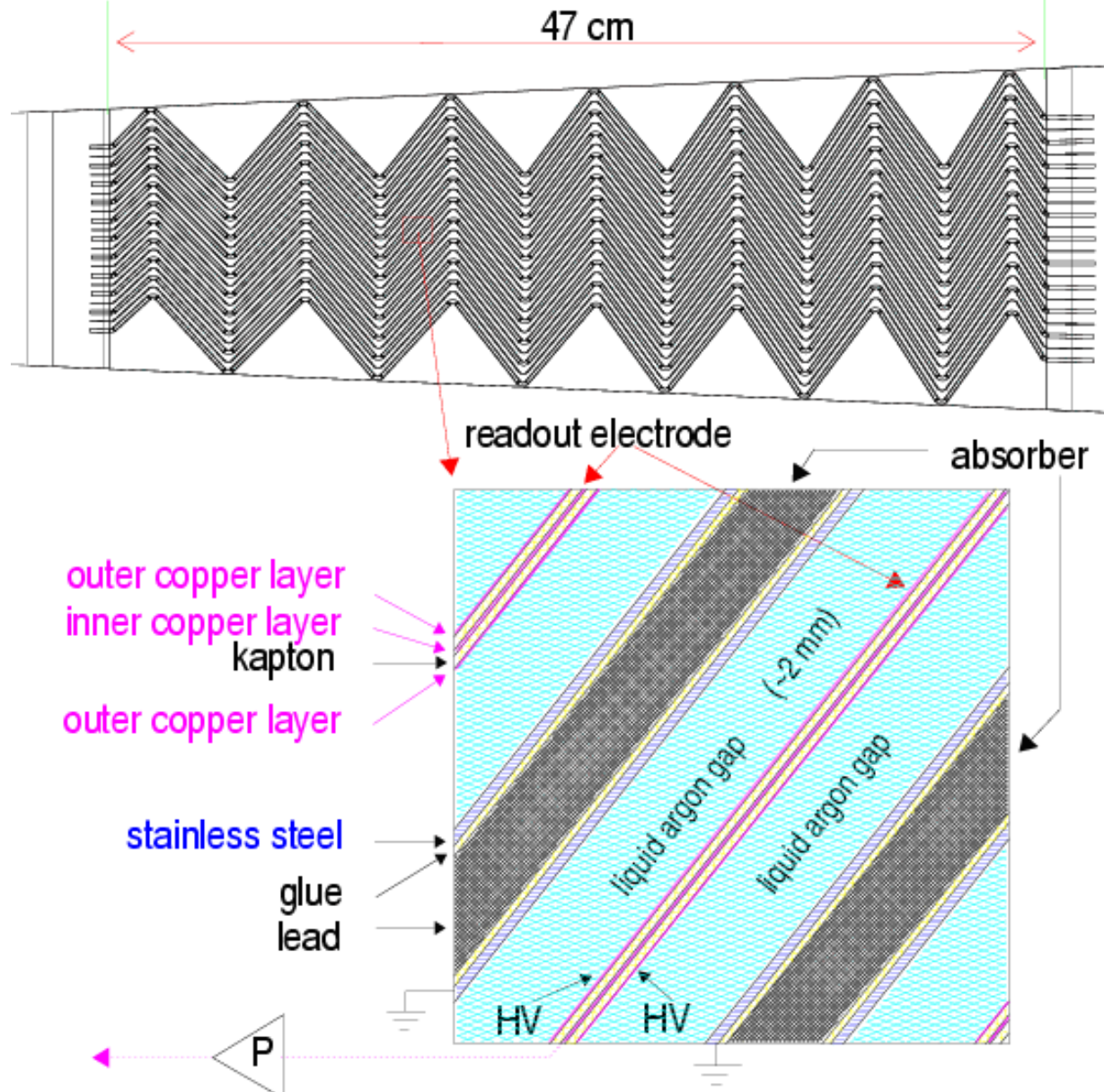
Milieu absorbeur

L'accordéon

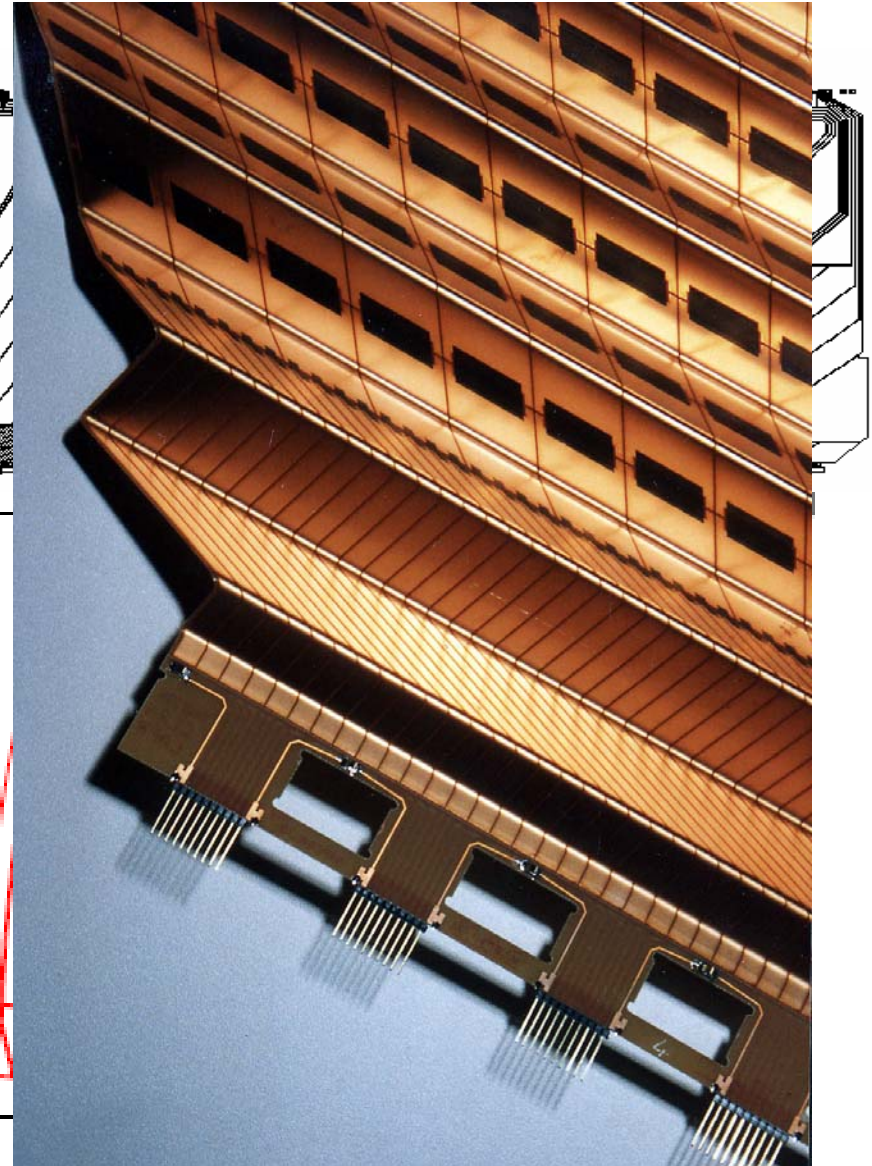
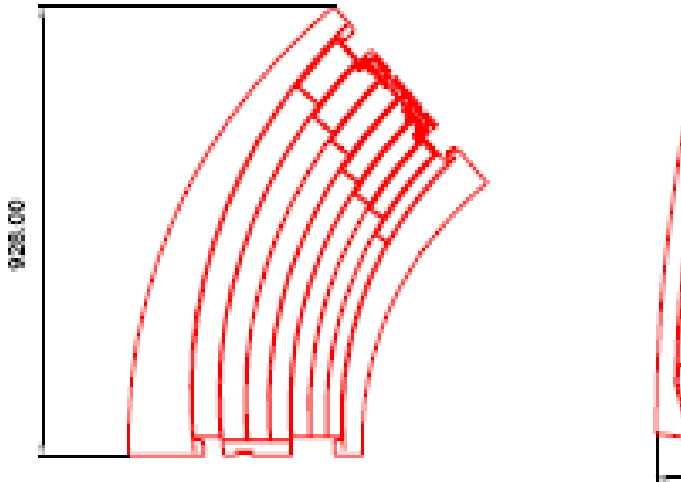
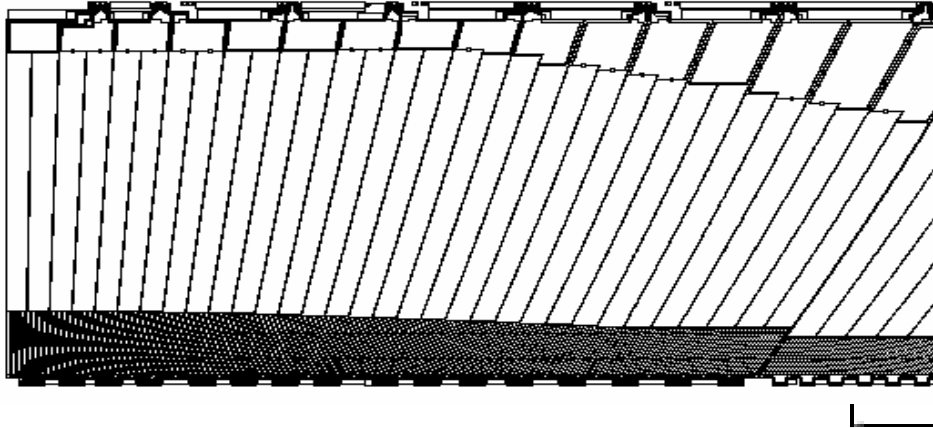
- ◆ Géométrie à accordéon:
rapide
- ◆ Les électrodes sont parallèles aux particules incidentes
 - ◆ lectures des signaux à l'avant et à l'arrière
 - ◆ pas de longues connexions
- ◆ Le découpage en profondeur est dessiné sur les électrodes
- ◆ **Pas d'espace sans détection**



L'accordéon

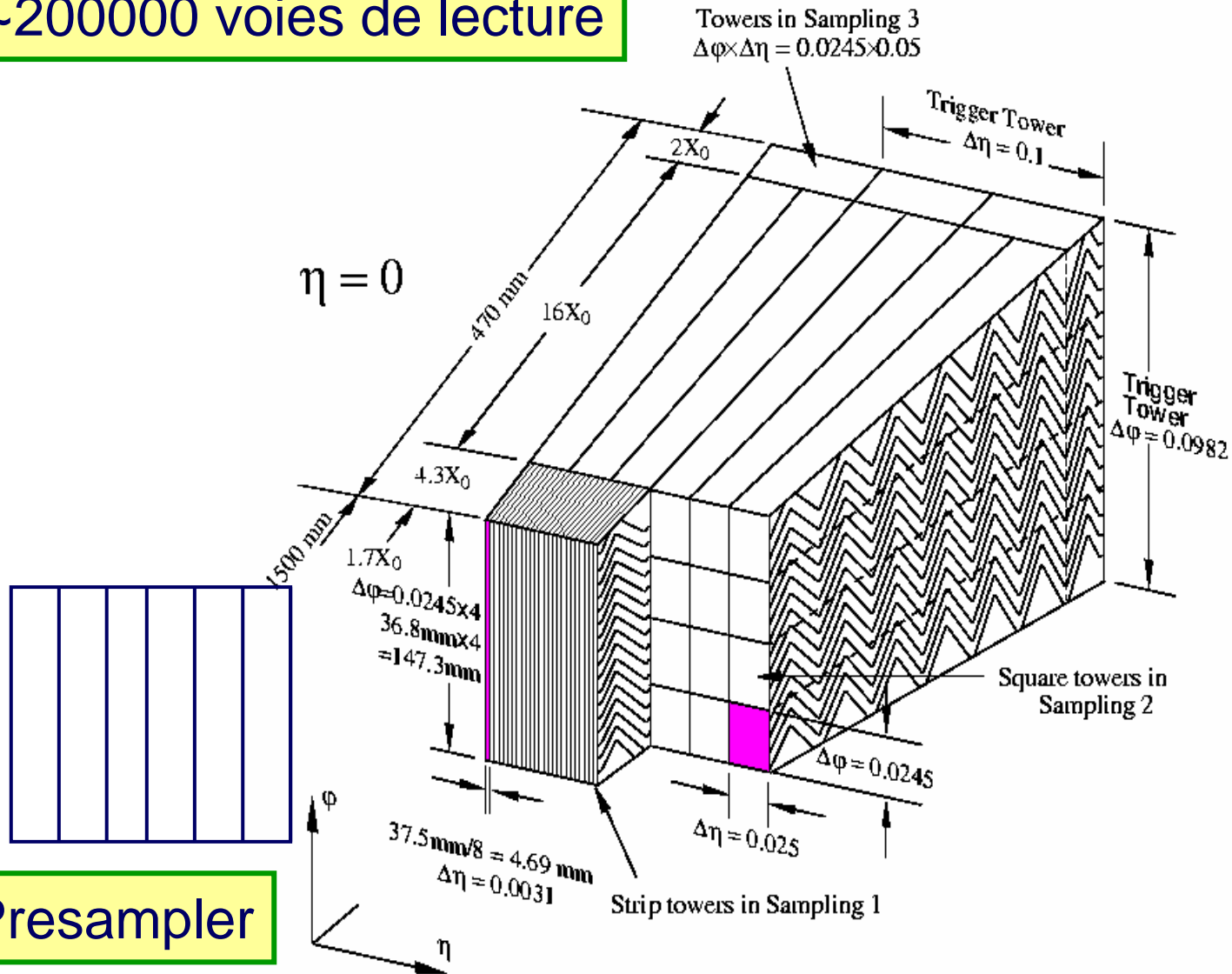


La segmentation



La segmentation

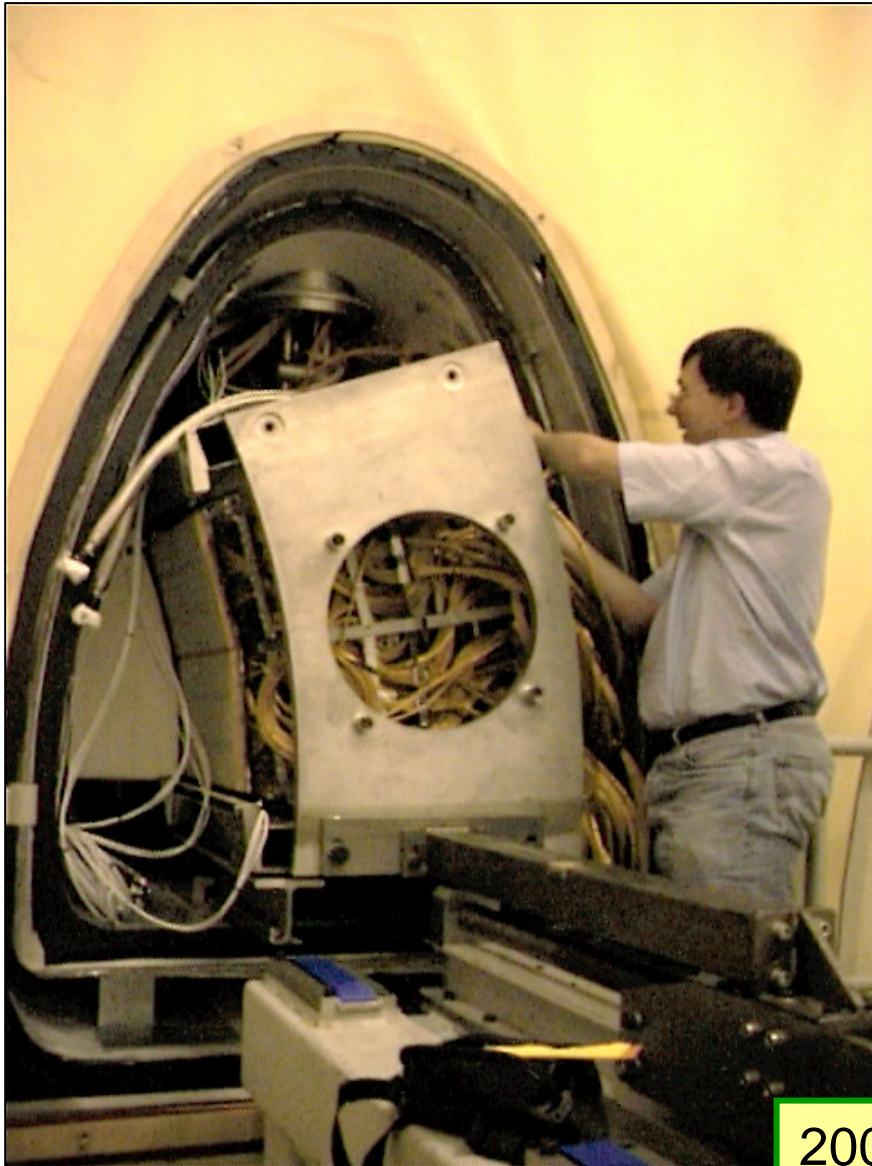
~200000 voies de lecture



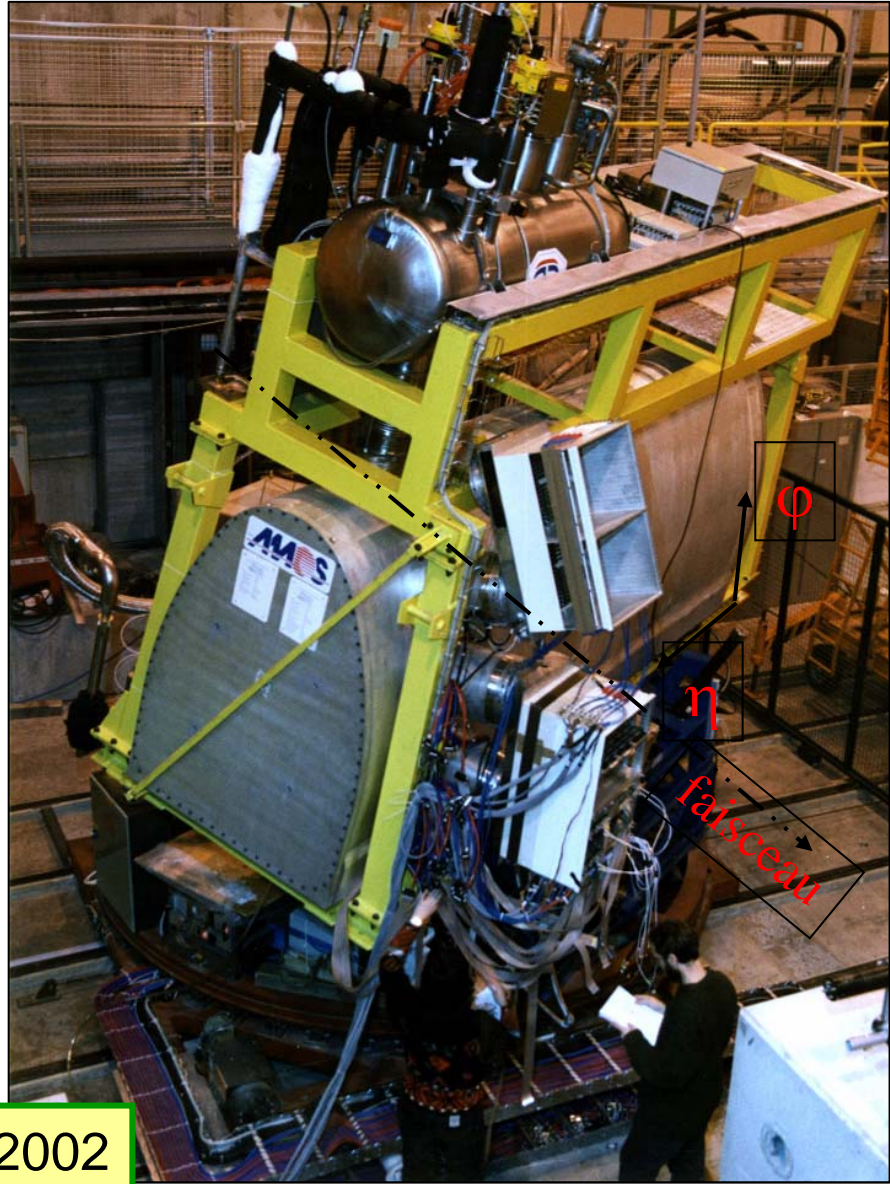
Presampler



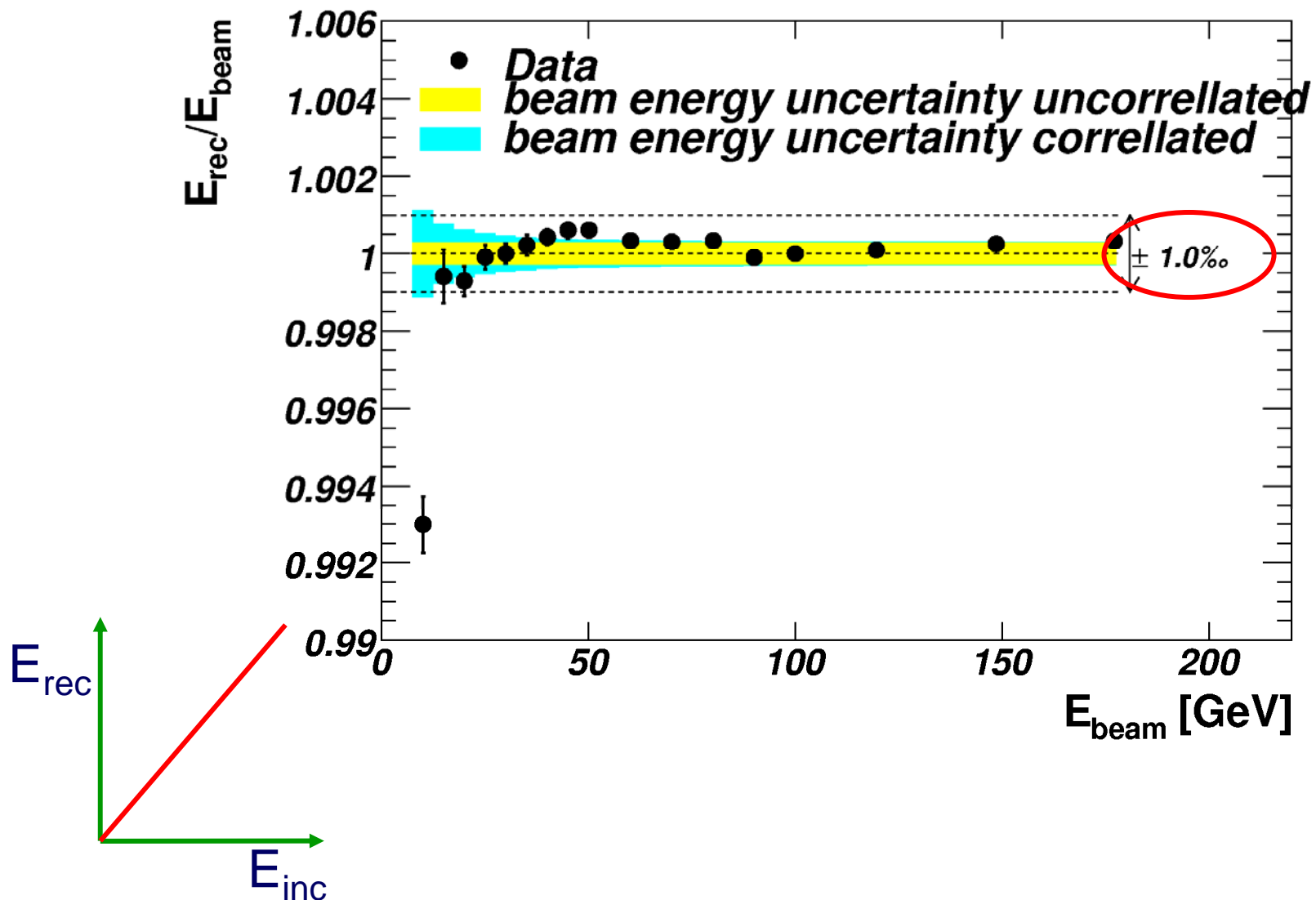
Tests en faisceaux avant et pdt la production



2001-2002



Les performances de l'accordéon: linéarité



Les performances de l'accordéon: **uniformité**

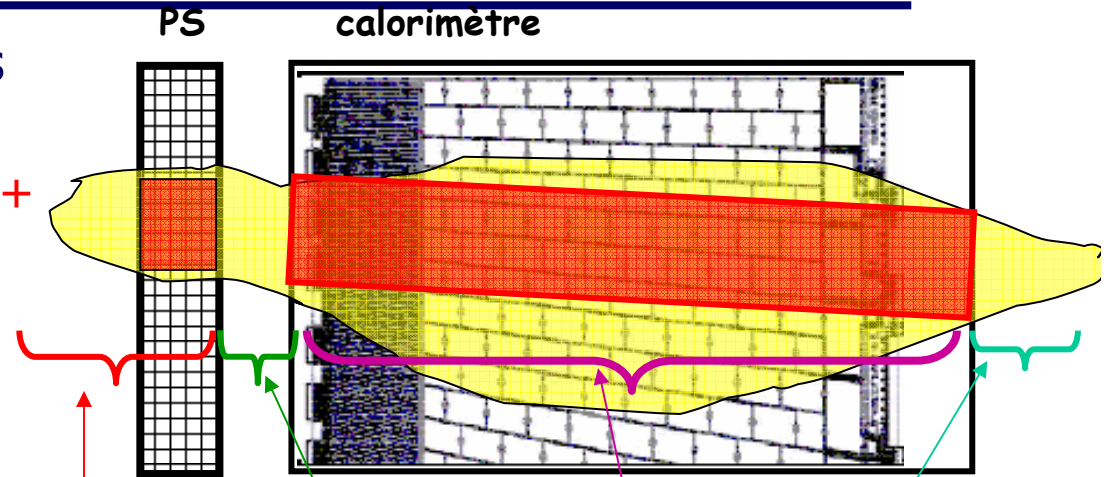


Middle η index

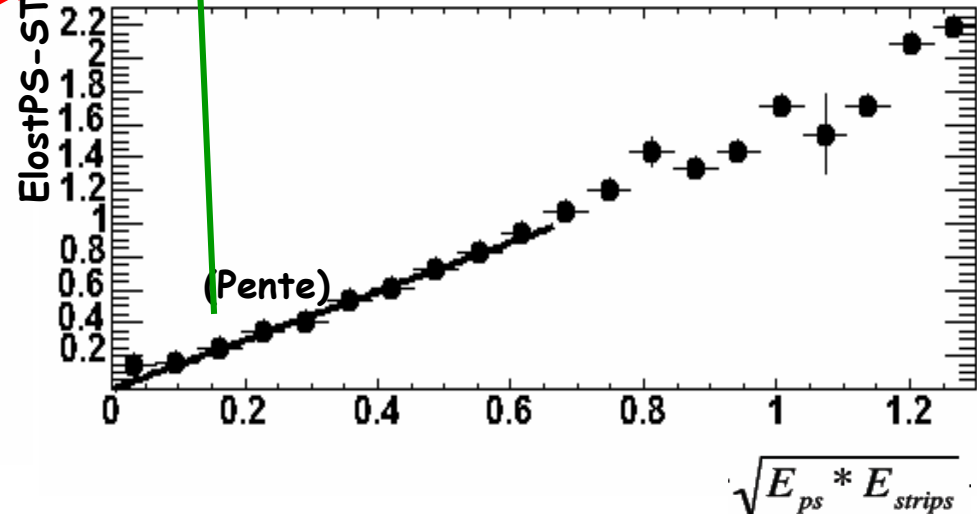
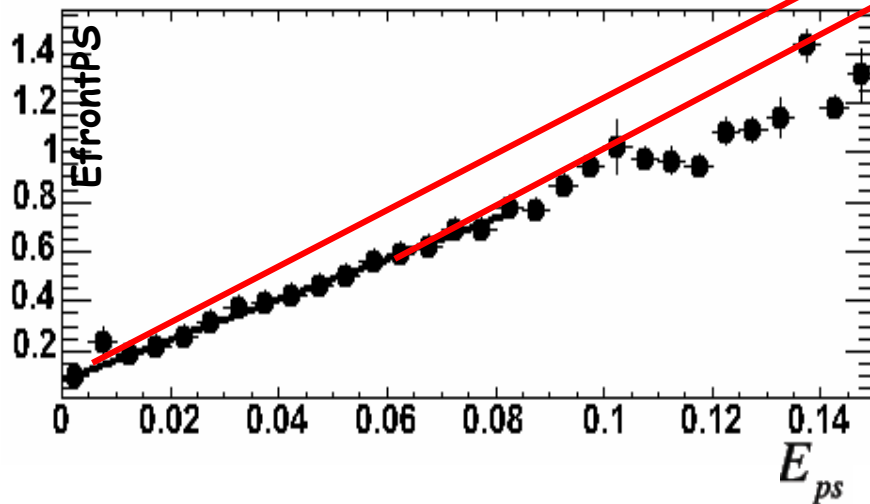
Middle η max

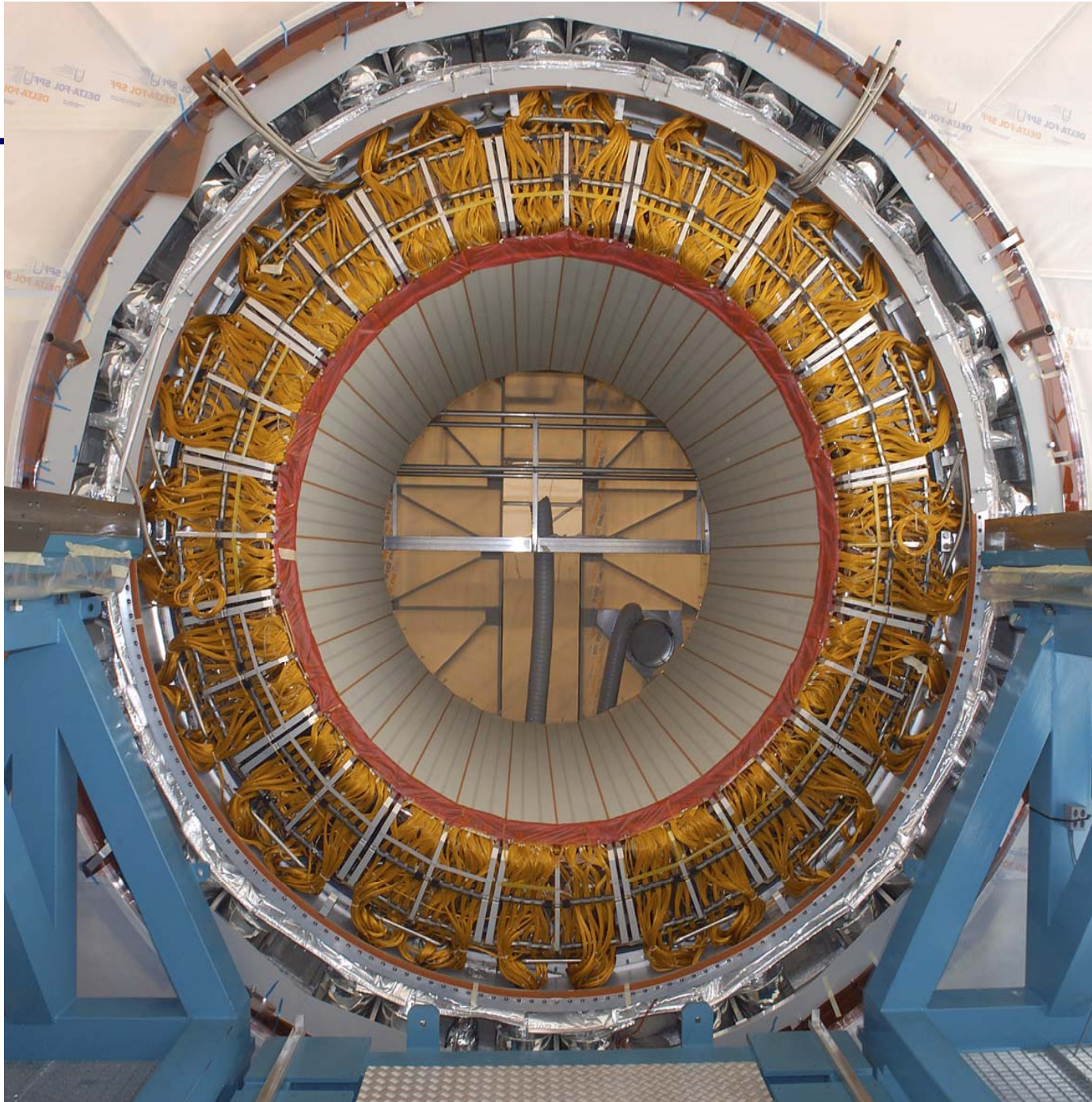
Calibration des clusters (gerbes reconstruites)

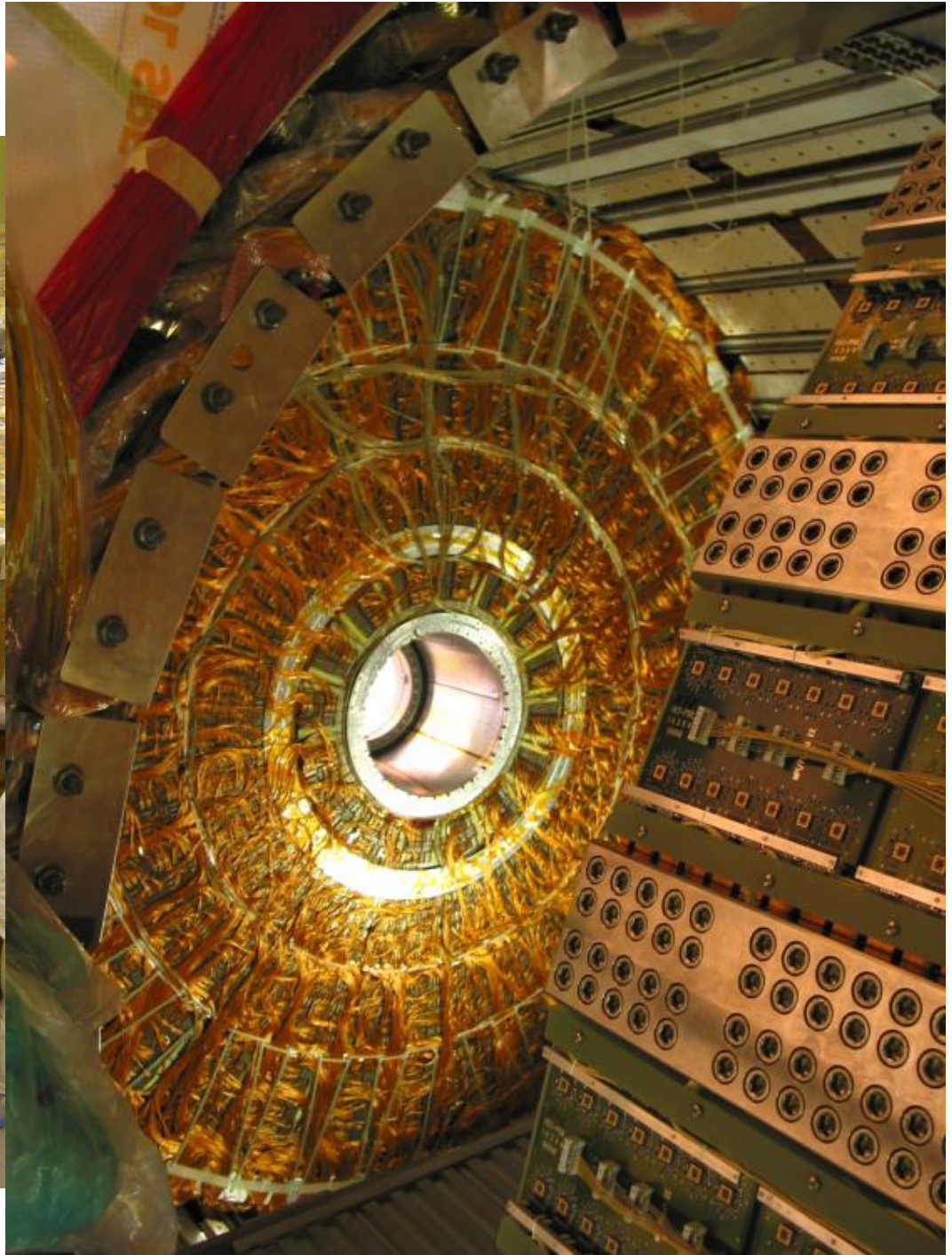
- ◆ E_{rec} : corriger E_{acc} pour les pertes
 - ◆ dans la matière avant le détecteur (détecteur central + cryostat)
 - ◆ entre le presamplere et l'accordéon
 - ◆ sur les côtés de la gerbe reconstruite $E_{outcluster}$
 - ◆ à l'arrière de l'accordéon E_{leak}

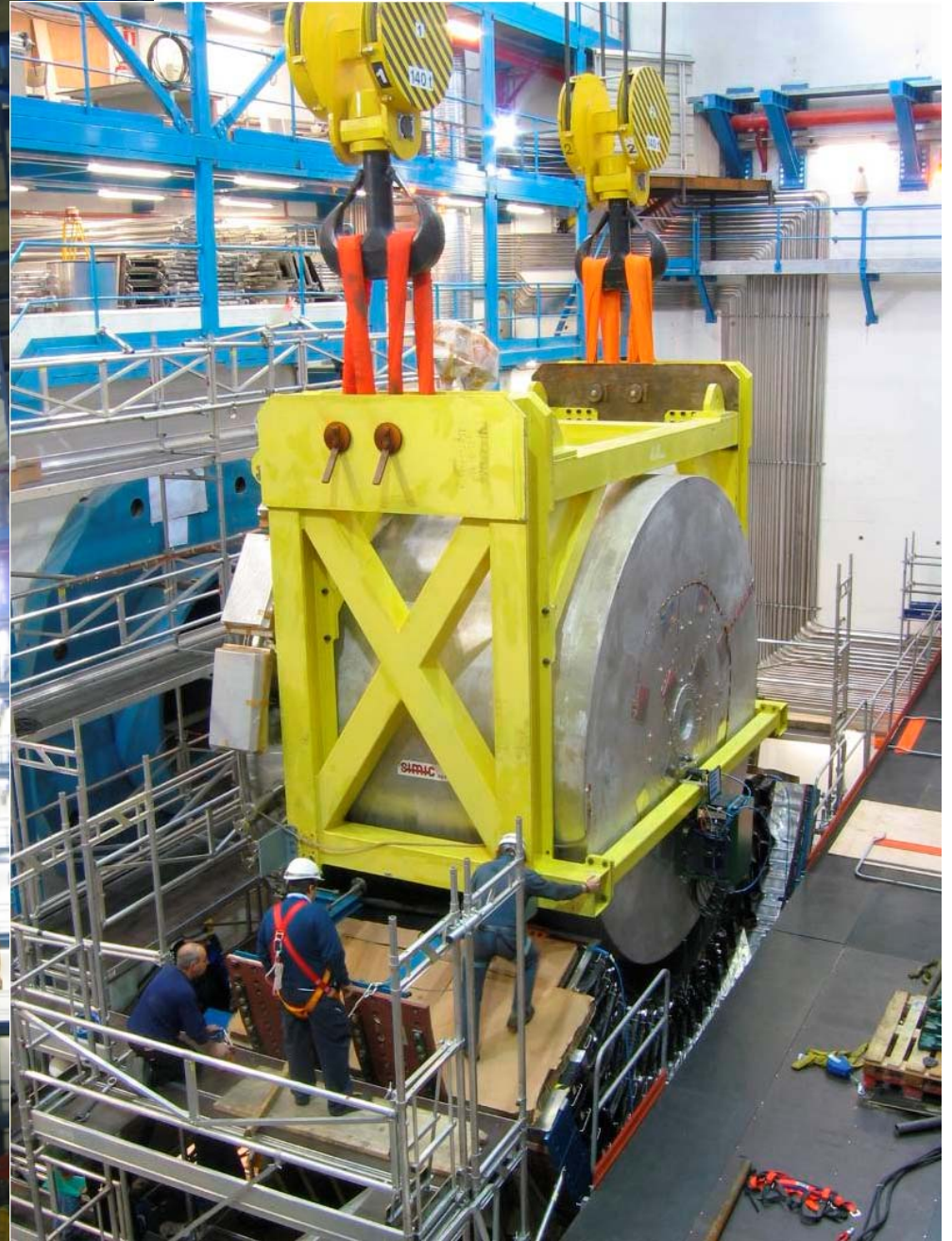


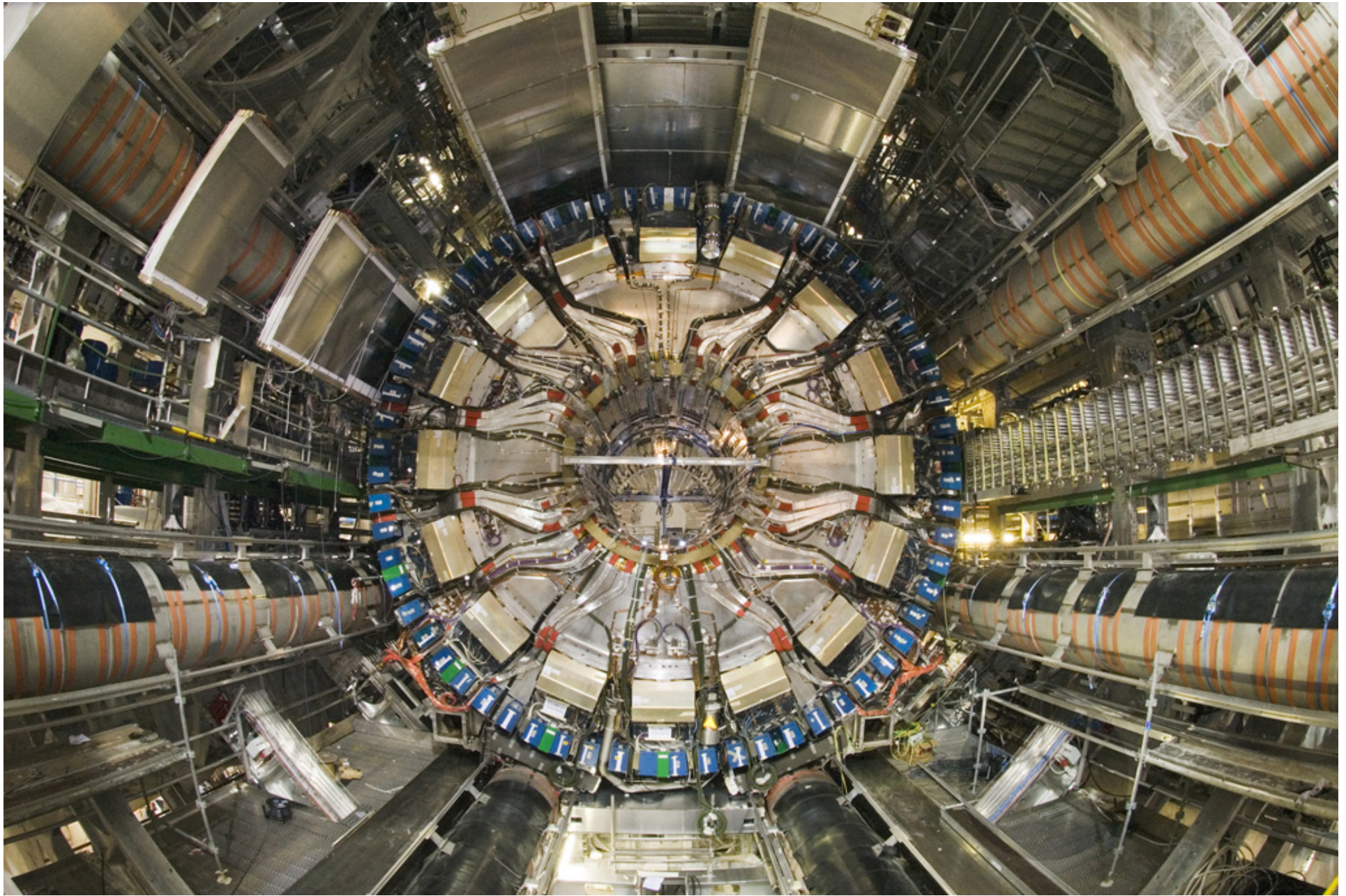
$$E_{rec} = E_{outcluster} + a + bE_{ps} + c\sqrt{E_{ps} * E_{strips}} + E_{acc} + E_{leak}$$

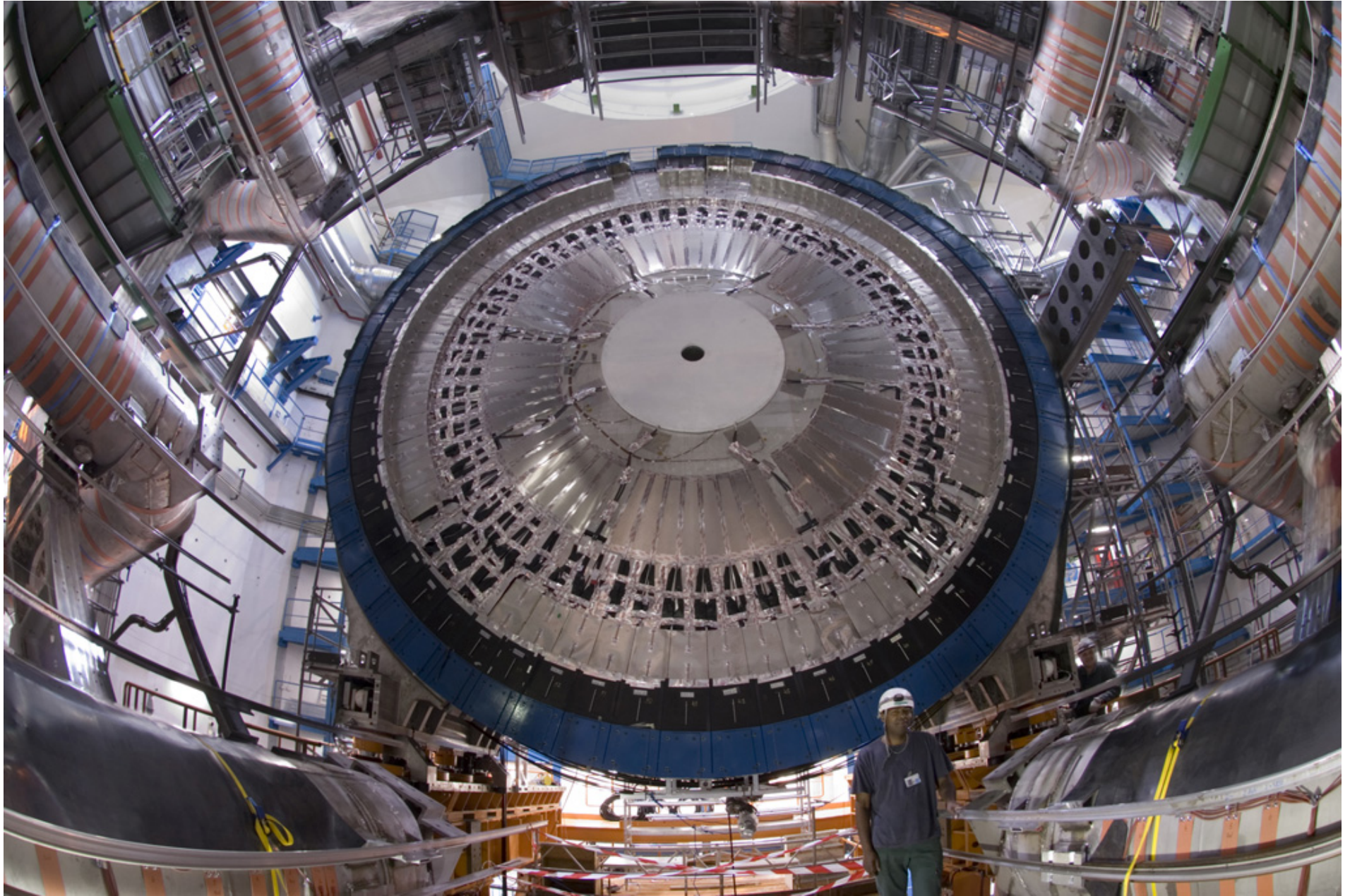


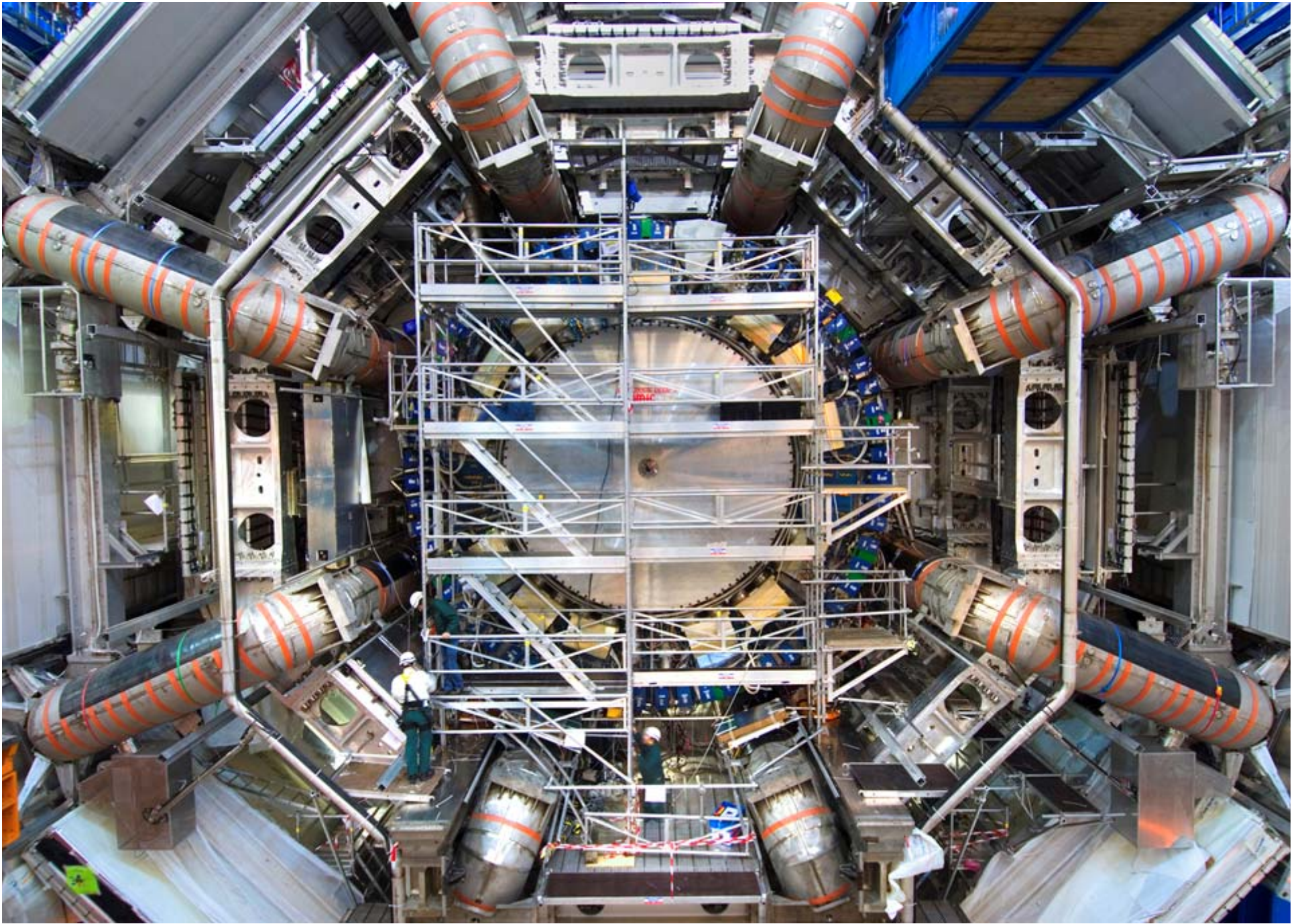












Les calorimètres hadroniques

Généralités/Rappels

- ◆ Les interactions hadroniques sont plus erratiques que les interactions électromagnétiques
 - ◆ les gerbes fluctuent plus
 - ◆ les gerbes sont plus larges
 - ◆ les gerbes sont plus profondes
- ◆ Les calorimètres hadroniques vont donc être
 - ◆ plus grossiers
 - ◆ avec une segmentation moins découpée
 - ◆ plus épais (longueur d'interaction λ)
- ◆ Le calorimètre hadronique est toujours après le calorimètre électromagnétique (qui représente $\sim 1\lambda_{\text{int}}$)

Performances

- ◆ La résolution en énergie est moins bonne que pour les calorimètres électromagnétiques

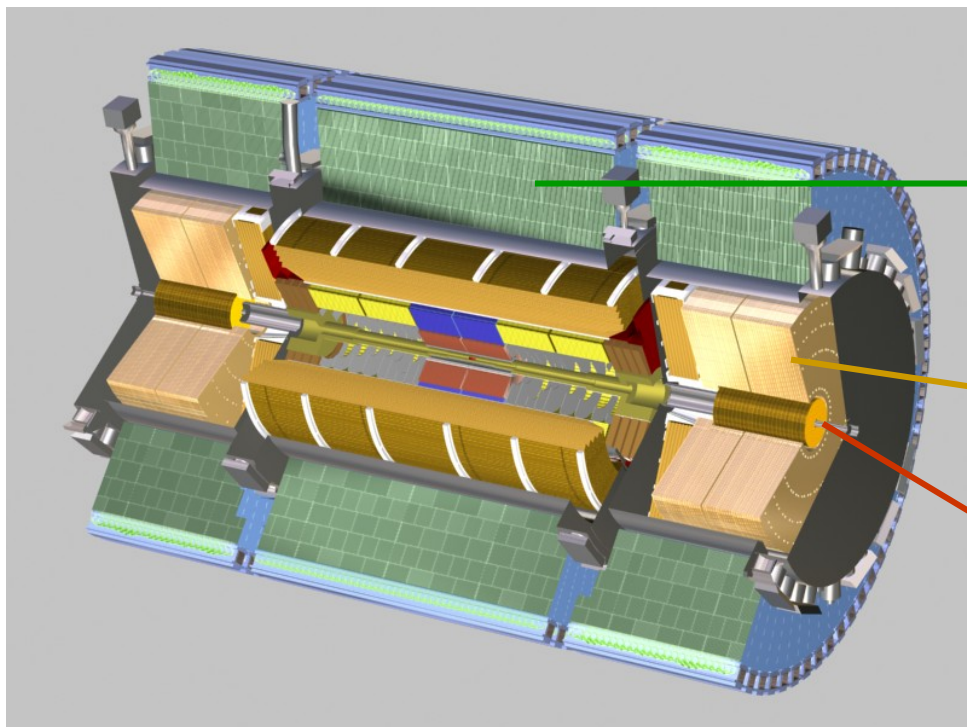
$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{50-100 \%}{\sqrt{E}} \oplus 3-5\% \text{ (E en GeV)}$$

- ◆ Le Fer est le matériaux le plus utilisé ($\lambda_{\text{int}} \propto A^{1/3}$)
- ◆ Le milieu détecteur est souvent du scintillateur

Les calorimètres hadroniques: la compensation

- ◆ La gerbe hadronique débute souvent dans le calorimètre électromagnétique toujours devant le hadronique
 - ◆ Le milieu n'est donc pas uniforme le long de la gerbe
- ◆ Les processus hadroniques produisent de l'énergie invisible
- ◆ Le signal collecté dépend des processus et est tjrs inférieur à celui d'un électron de même énergie incidente: $e/h (>1)$
- ◆ La composante électromagnétique des gerbes hadroniques varie beaucoup: f_{em}
- ◆ Dans les années 1980-2000 beaucoup d'attention a porté sur la conception de calorimètres compensant
 - ◆ calorimètres compensant ($e/h \sim 1$)
 - ◆ mesure f_{em} événement par événement

Les calorimètres hadroniques de ATLAS



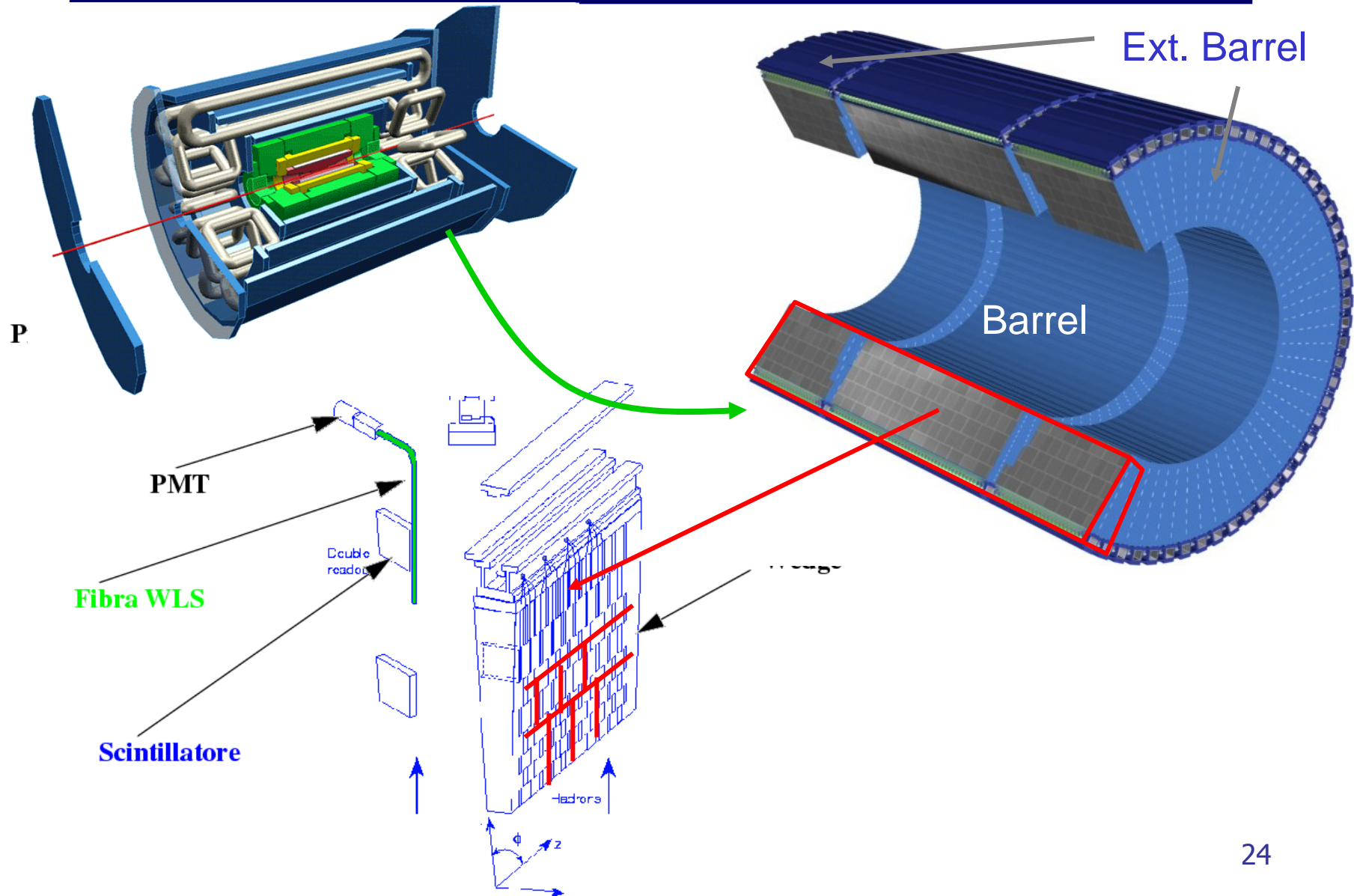
Calorimètre à Tuiles $|\eta| < 1.7$
Fe / Scintillateurr
3 compartiments en profondeur

LAr/Cu $1.7 < |\eta| < 3.2$
4 compartiments en profondeur

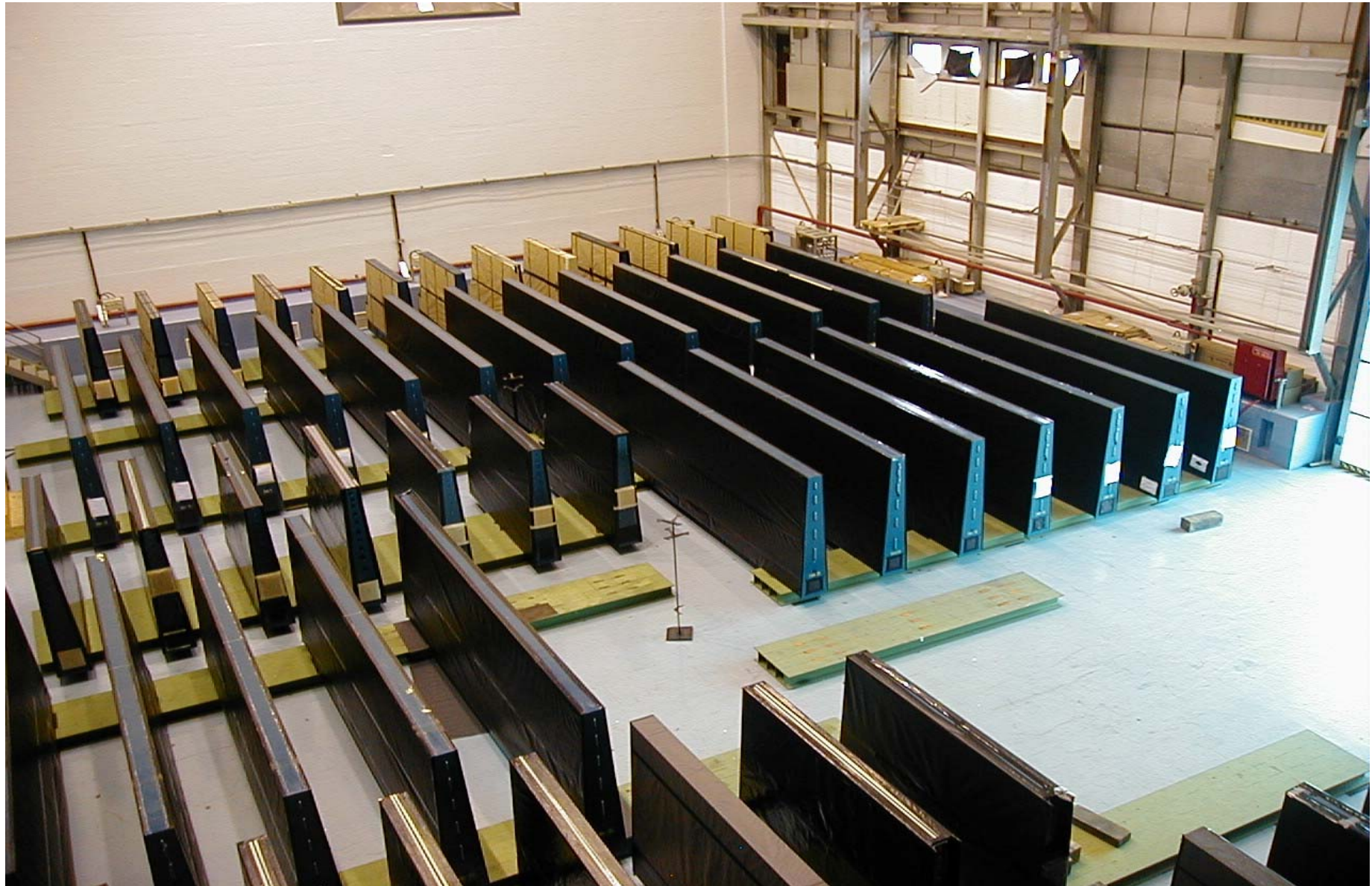
A l'avant: à la fois em et had
LAr/Cu or W $3.2 < |\eta| < 4.9$
3 compartiments en profondeur

Profondeur totale: $\sim 8 - 10 \lambda$
Differentes techniques pour résister aux radiations à l'avant

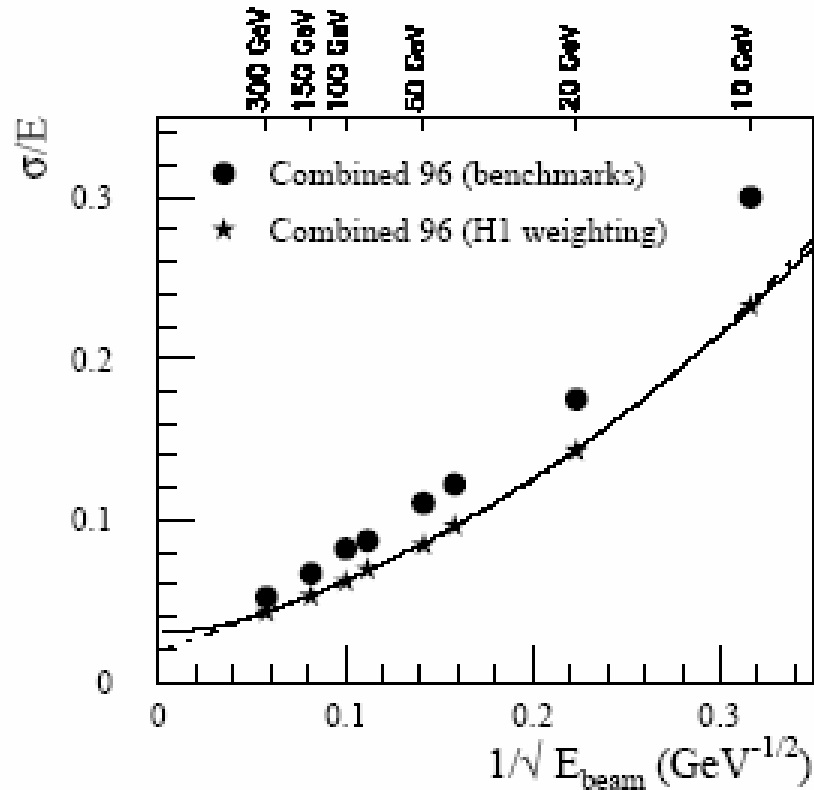
La calorimètre hadronique à tuiles



Les modules des tuiles

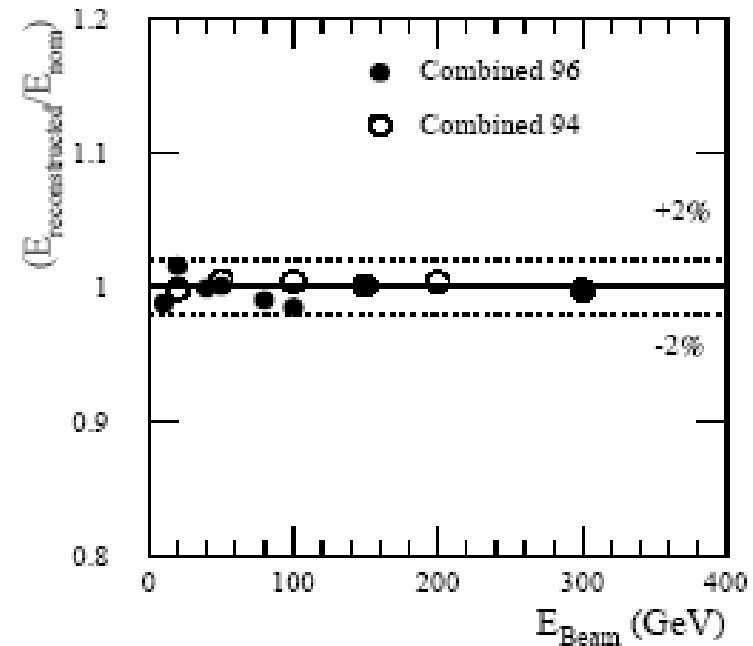


Calorimètre à tuiles: performances



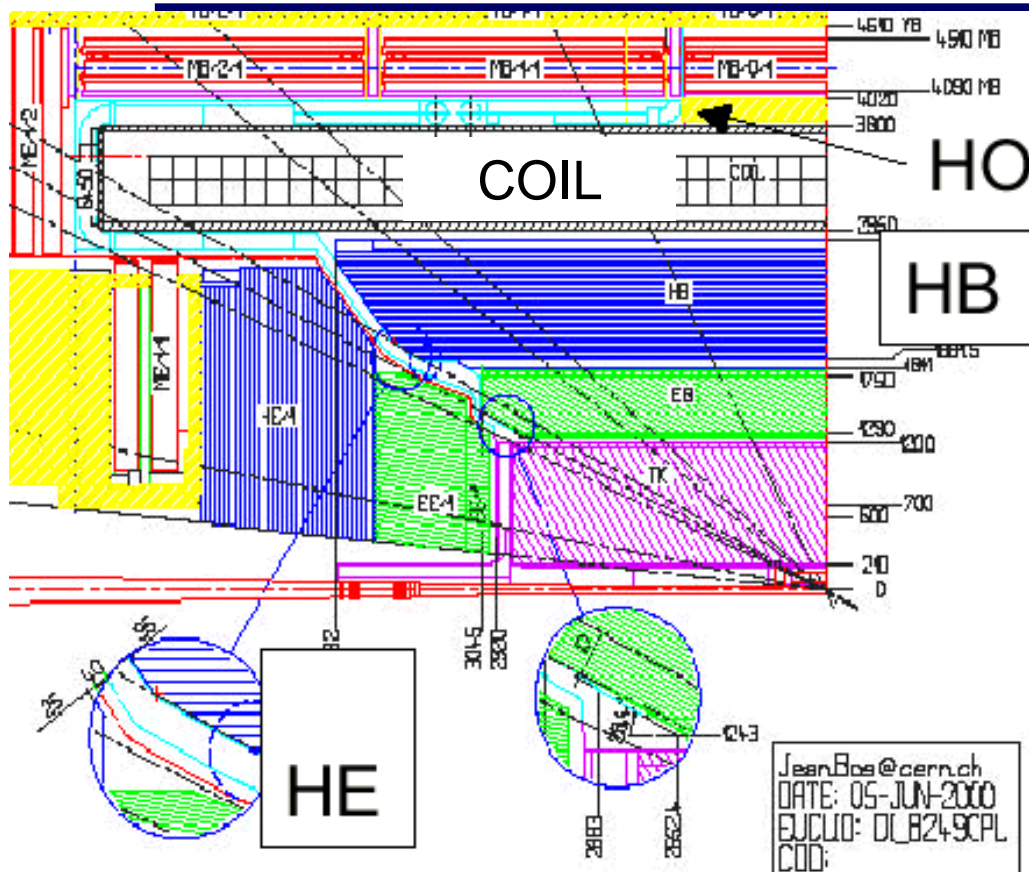
Linearité < 2%

ATLAS ~CMS



$$\frac{\sigma}{E} = \left(\frac{41.9\%}{\sqrt{E}} + 1.8\% \right) \oplus \frac{1.8}{E}$$

Calorimètre hadronique de CMS



Partie centrale: $|\eta| < 1.7$
Cuivre/scintillateur + WLS

2 + 1 (HO) compartiments
profondeur

$5.9 + 3.9 \lambda$ ($|\eta| = 0$)

Partie bouchon $1.3 < |\eta| < 3$
Cuivre/scintillateur + WLS

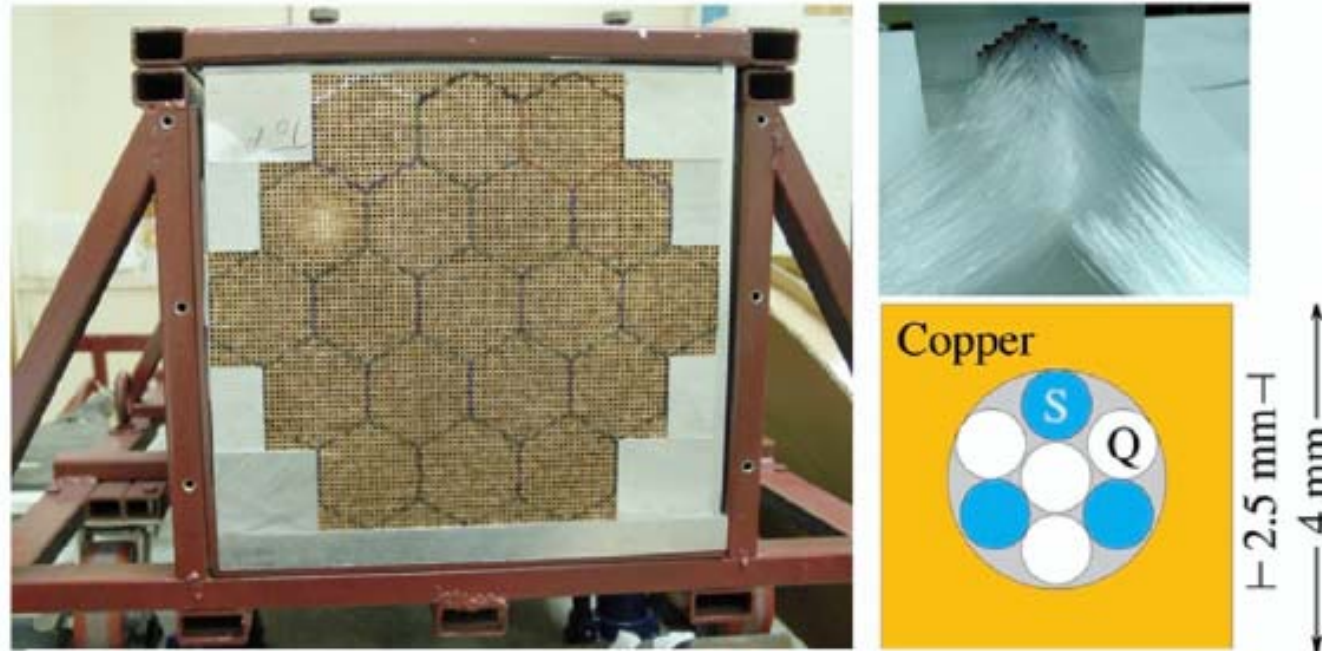
2/3 Longitudinal sections

Avant $2.85 < |\eta| < 5.19$
Fer/fibres de quartz (radiations)

Cuivre: matériau non magnétique

Nouvelle idée: mesurer f_{em} pour chaque événement

DREAM: Structure



• Some characteristics of the DREAM detector

- ◆ Le quartz n'est sensible qu'à la fraction électromagnétique de la gerbe ($e/h \sim 5$ pour CMS)
- ◆ Le scintillateur (ou l'argon liquide) sont sensibles à l'énergie visible

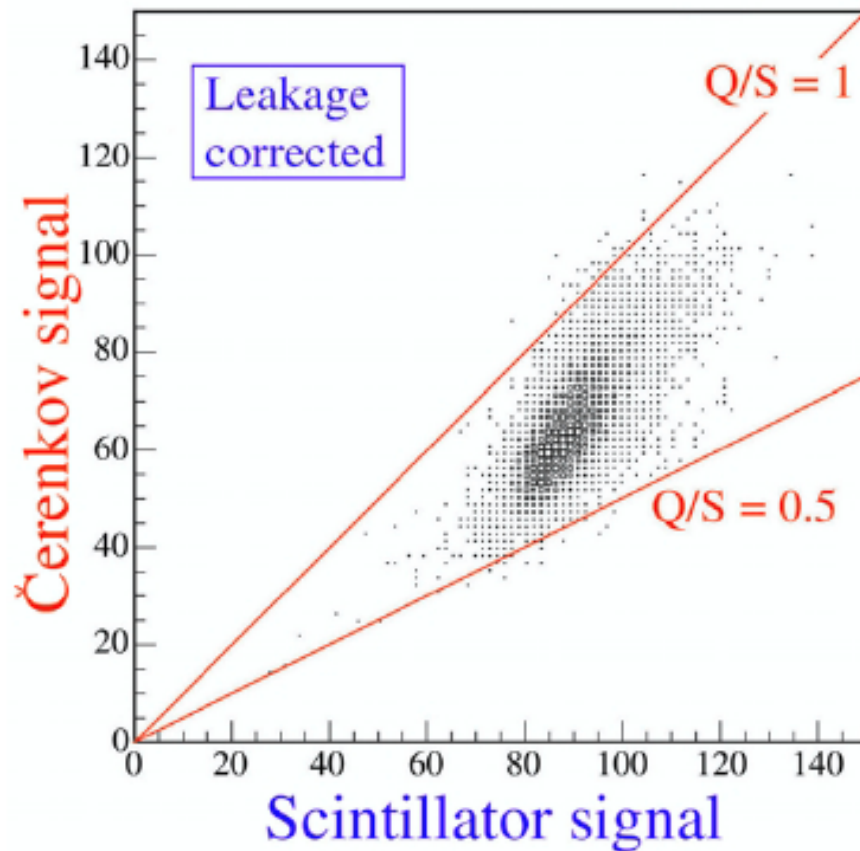
- Hexagonal **towers** (19), each read out by 2 PMTs

DREAM readout



Mesure de la corrélation (Č vs scintillateur)

DREAM: The (energy-independent) Q/S method

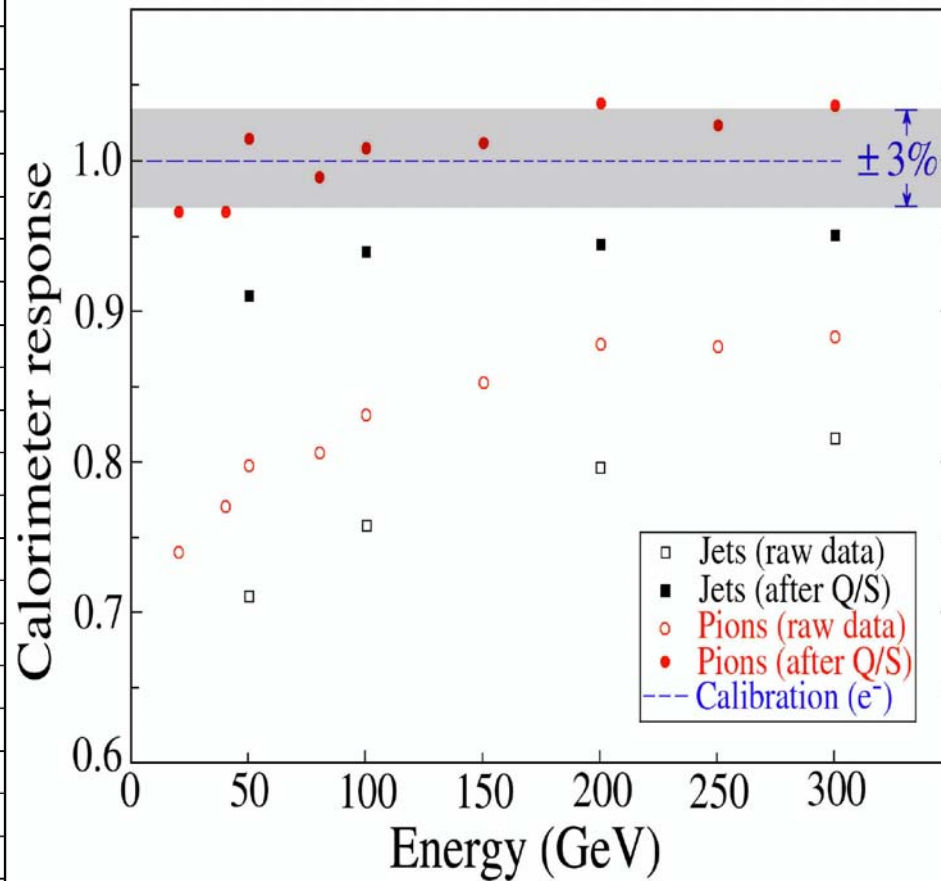
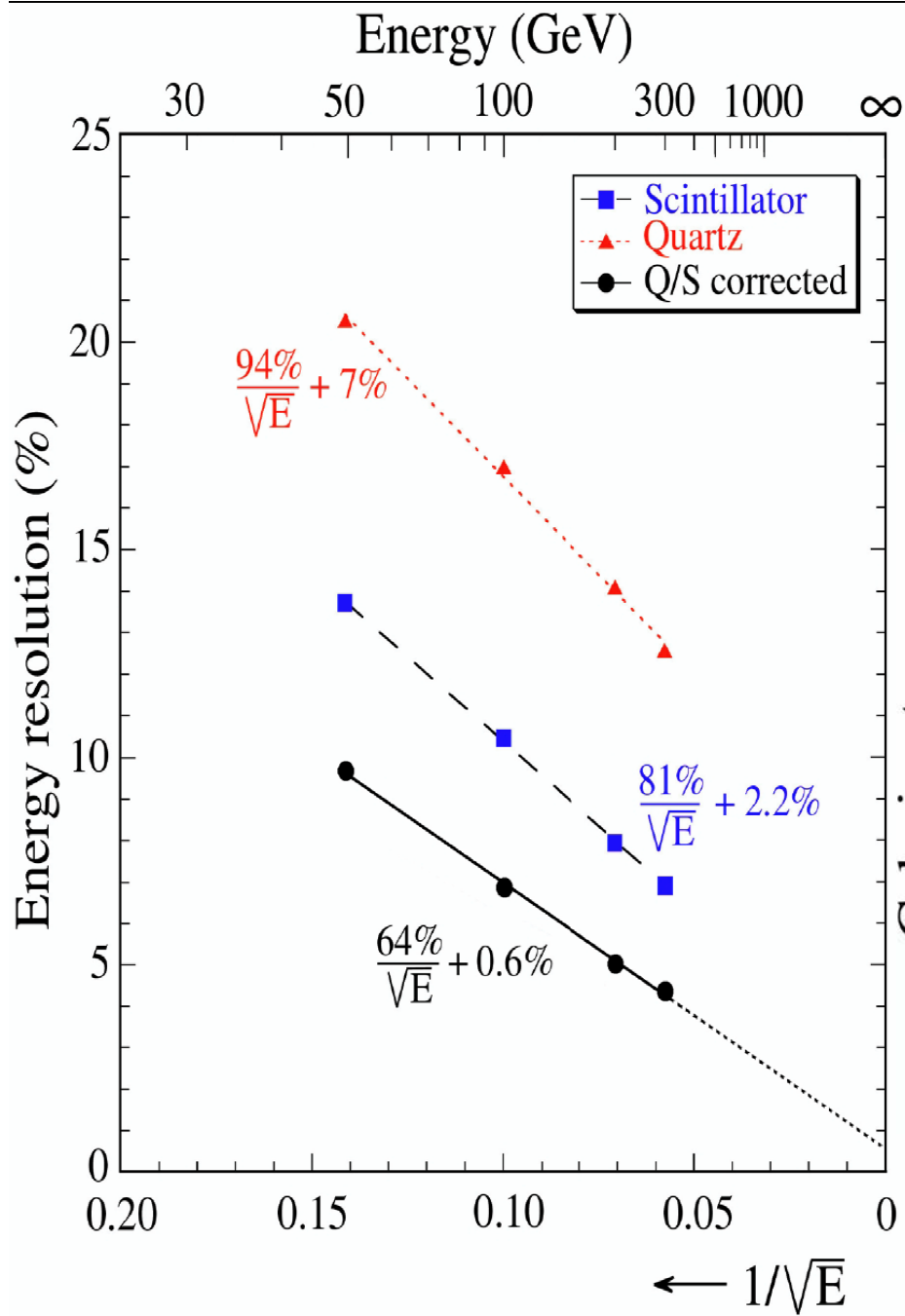


$$S = E \left[f_{\text{em}} + \frac{1}{(e/h)_S} (1 - f_{\text{em}}) \right]$$

$$Q = E \left[f_{\text{em}} + \frac{1}{(e/h)_Q} (1 - f_{\text{em}}) \right]$$

$$e/h = 1.3 \text{ (S)}, \quad 5 \text{ (Q)}$$

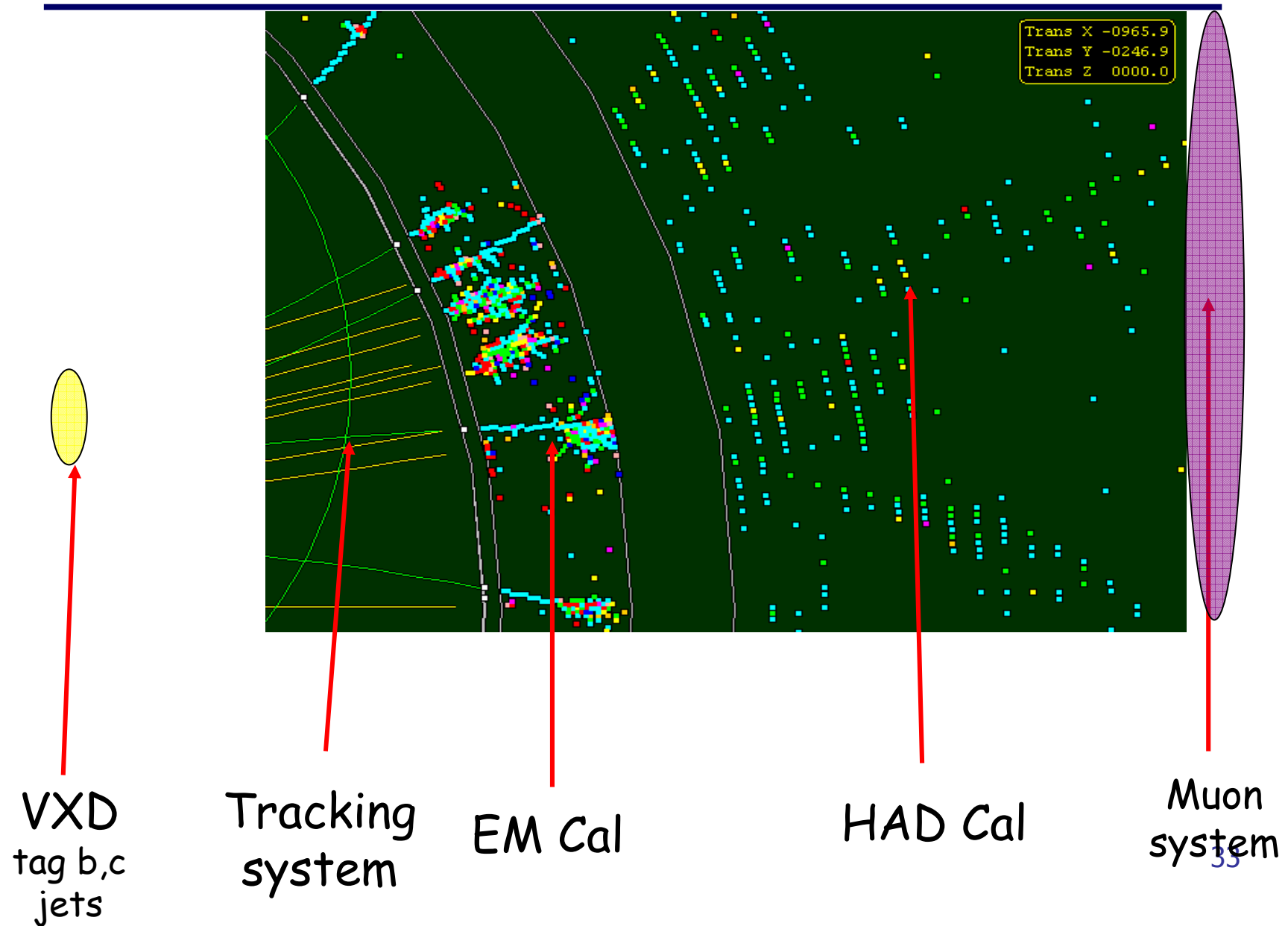
$$\frac{Q}{S} = \frac{f_{\text{em}} + 0.20 (1 - f_{\text{em}})}{f_{\text{em}} + 0.77 (1 - f_{\text{em}})}$$



Les calorimètres pour ILC

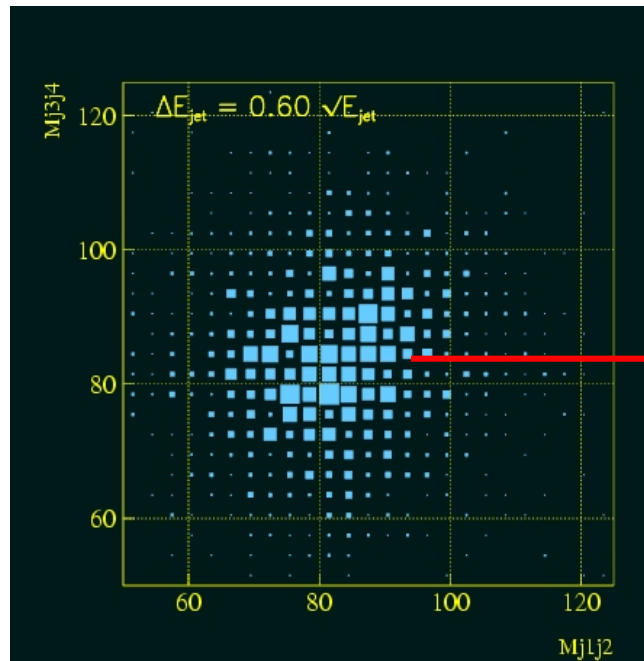
(International Linear Collider)

Les calorimètres pour les collisionneurs linéaires

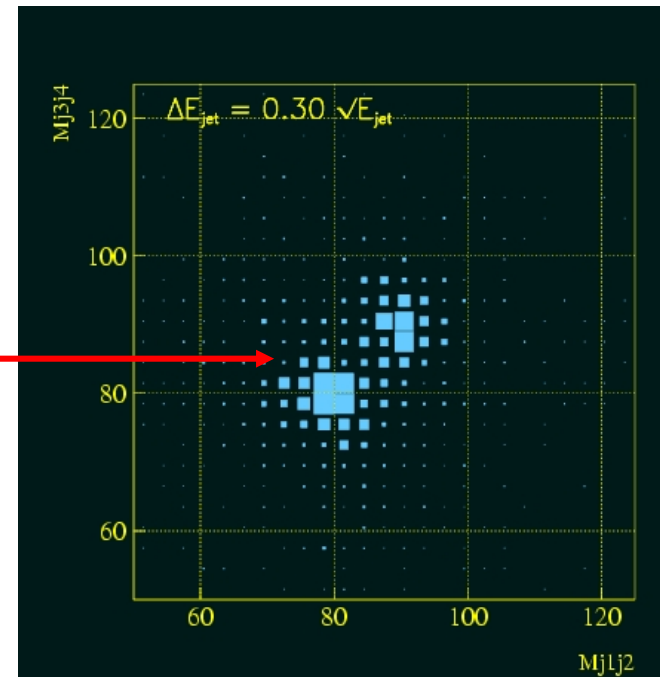


Les calorimètres pour les collisionneurs linéaires

Séparation des evts WW ou ZZ → excellente résolution pour les jets



60%/√E



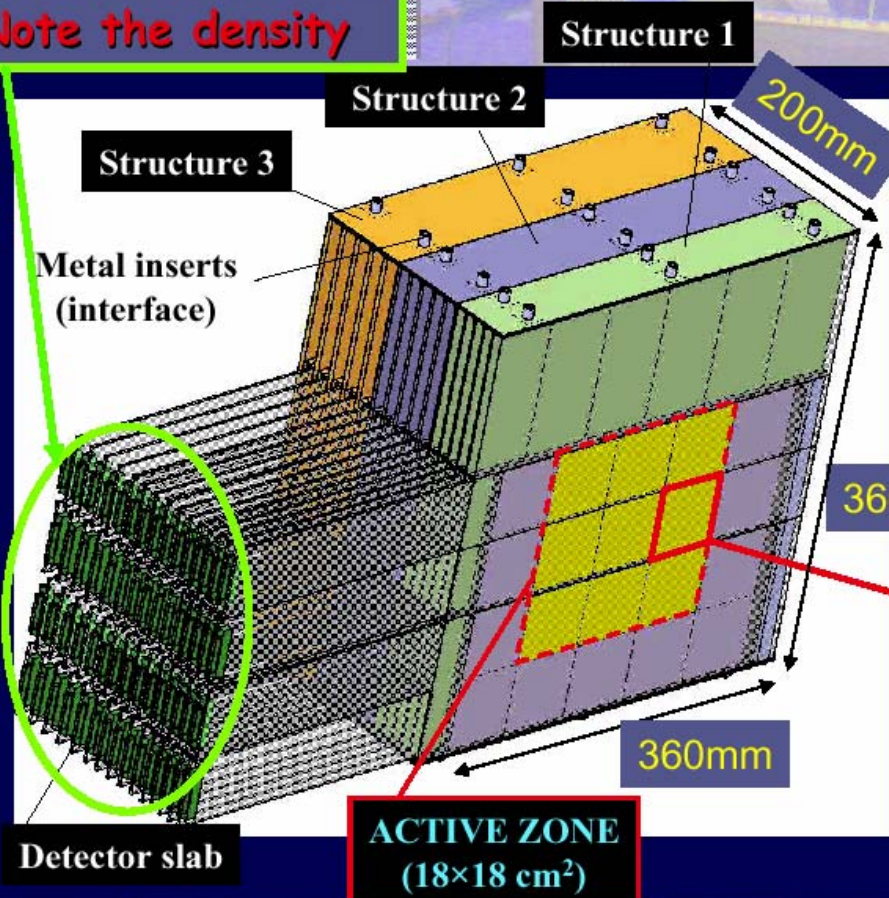
30%/√E

Target region for jet
energy resolution 34

Sandwich Tungstene/Silicium

The ECAL prototype

Note the density



CALICE ECAL



LAL, LLR, LPC, PICM



Imperial College, UCL, Cambridge, Birmingham, Manchester, RAL



ITEP, IHEP, MSU



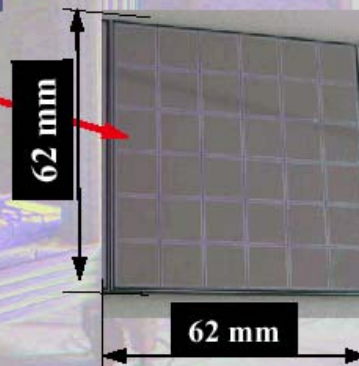
Prague (IOP-ASCR)



SNU, KNU

- ◆ 3 structures W-CFi (1,2,3 x1.4mm)
 - ◆ 15 « detector slabs »
 - ◆ Dimension 200x360x360 mm
- ➔

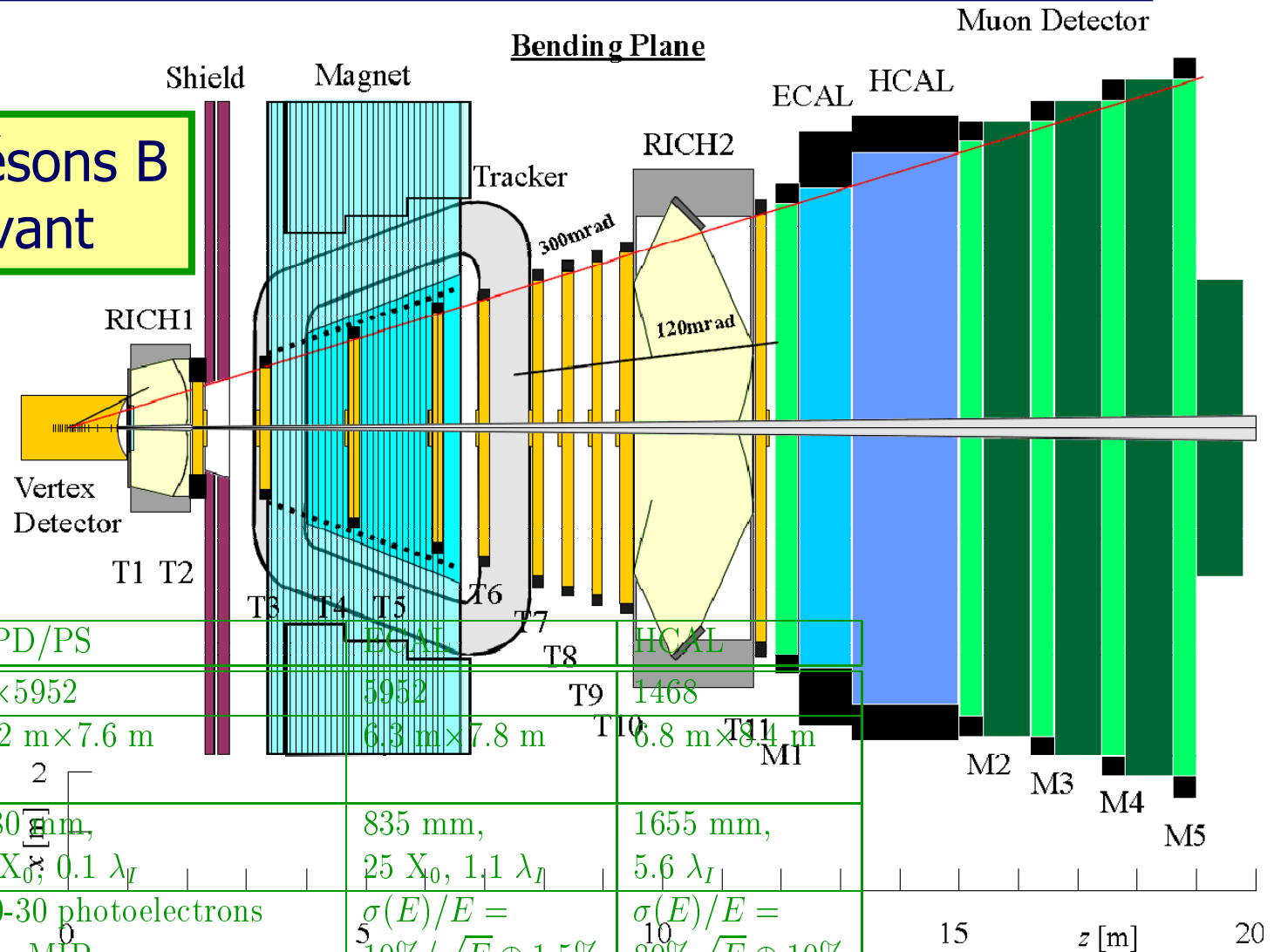
Silicon wafers with
6x6 pads (10x10 mm²)



Quelques calorimètres à l'IN2P3

LHCb

Etude des mésons B produits à l'avant



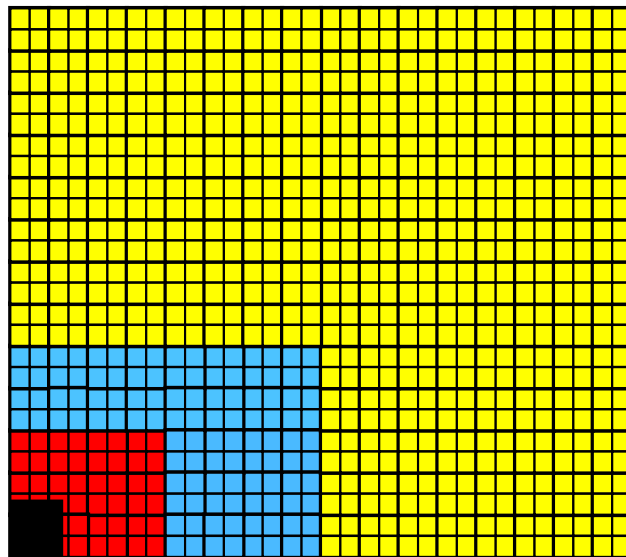
sub-detector	SPD/PS	ECAL	HCAL
number of channels	2×5952	5952	1468
overall lateral dimension in x,y	$6.2 \text{ m} \times 7.6 \text{ m}$	$6.3 \text{ m} \times 7.8 \text{ m}$	$6.8 \text{ m} \times 9.1 \text{ m}$
depth in z	180 mm , $2 X_0$, $0.1 \lambda_I$	835 mm , $25 X_0$, $1.1 \lambda_I$	1655 mm , $5.6 \lambda_I$
basic requirements	20-30 photoelectrons per MIP	$\sigma(E)/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$	$\sigma(E)/E = 80\%/\sqrt{E} \oplus 10\%$
dynamic range	0-100 MIPs 10 bits (PS), 1 bit (SPD)	0-10 GeV E_T 12 bits	0-10 GeV E_T 12 bits

Overview and evolution since the TP

Lateral segmentation:

(showing 1/4 of the detectors front face)

ECAL (SPD/PS)



Outer section :

121.2 mm cells

2688 channels

Middle section :

60.6 mm cells

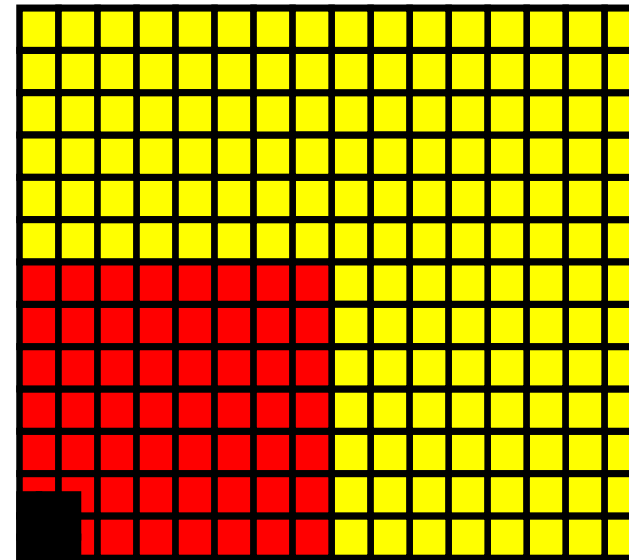
1792 channels

Inner section :

40.4 mm cells

1472 channels

HCAL



Outer section :

262.6 mm cells

608 channels

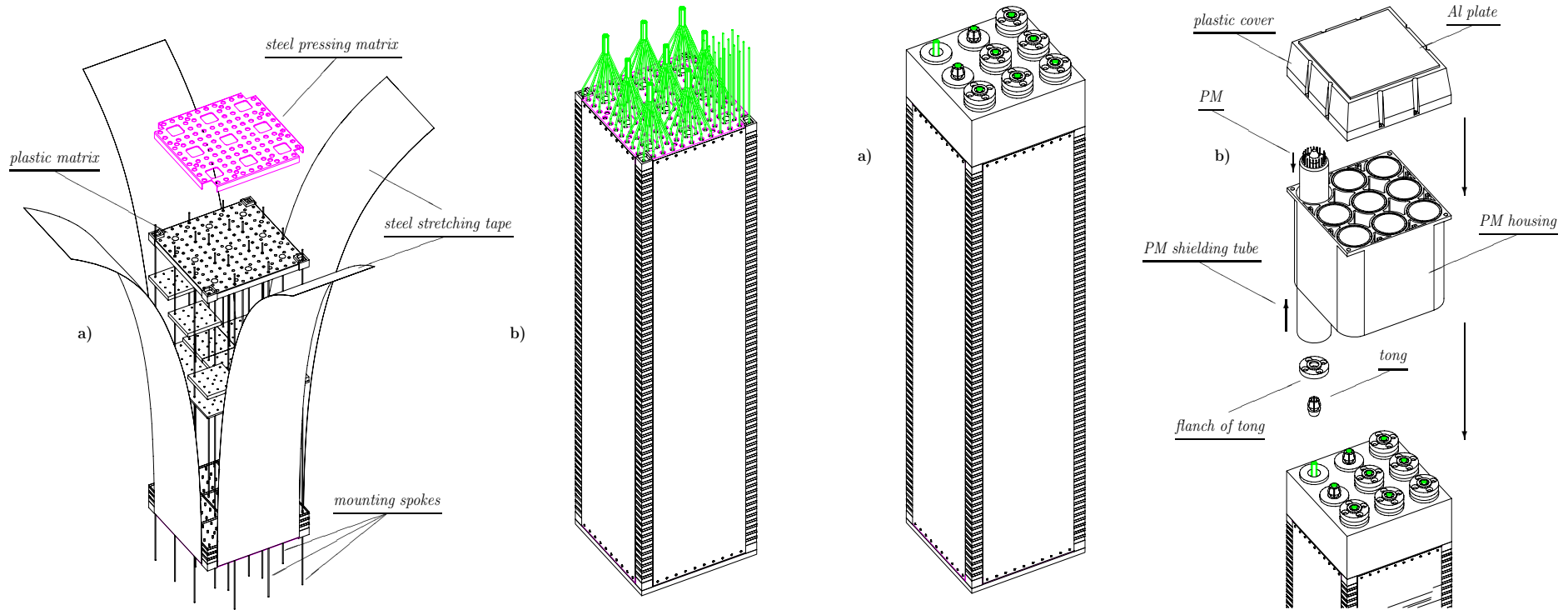
Inner section :

131.3 mm cells

860 channels

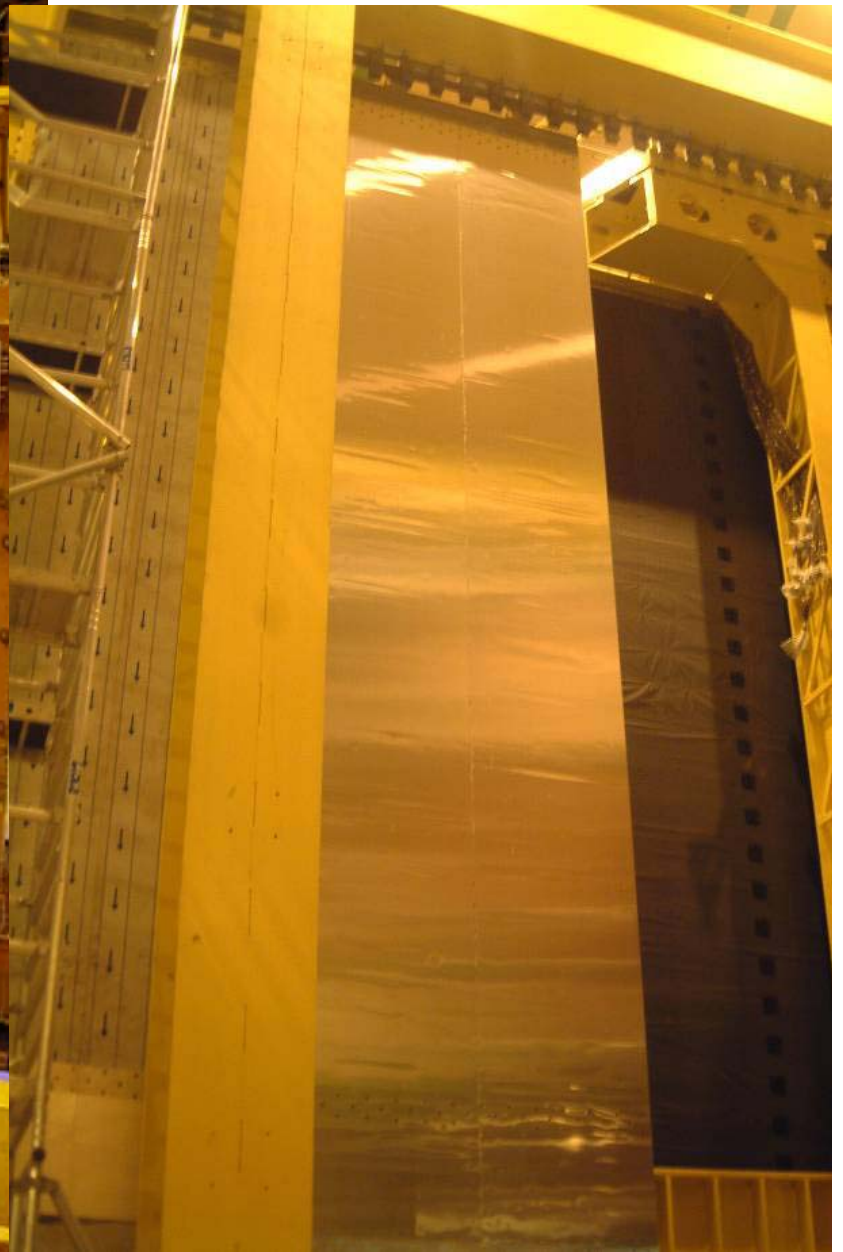
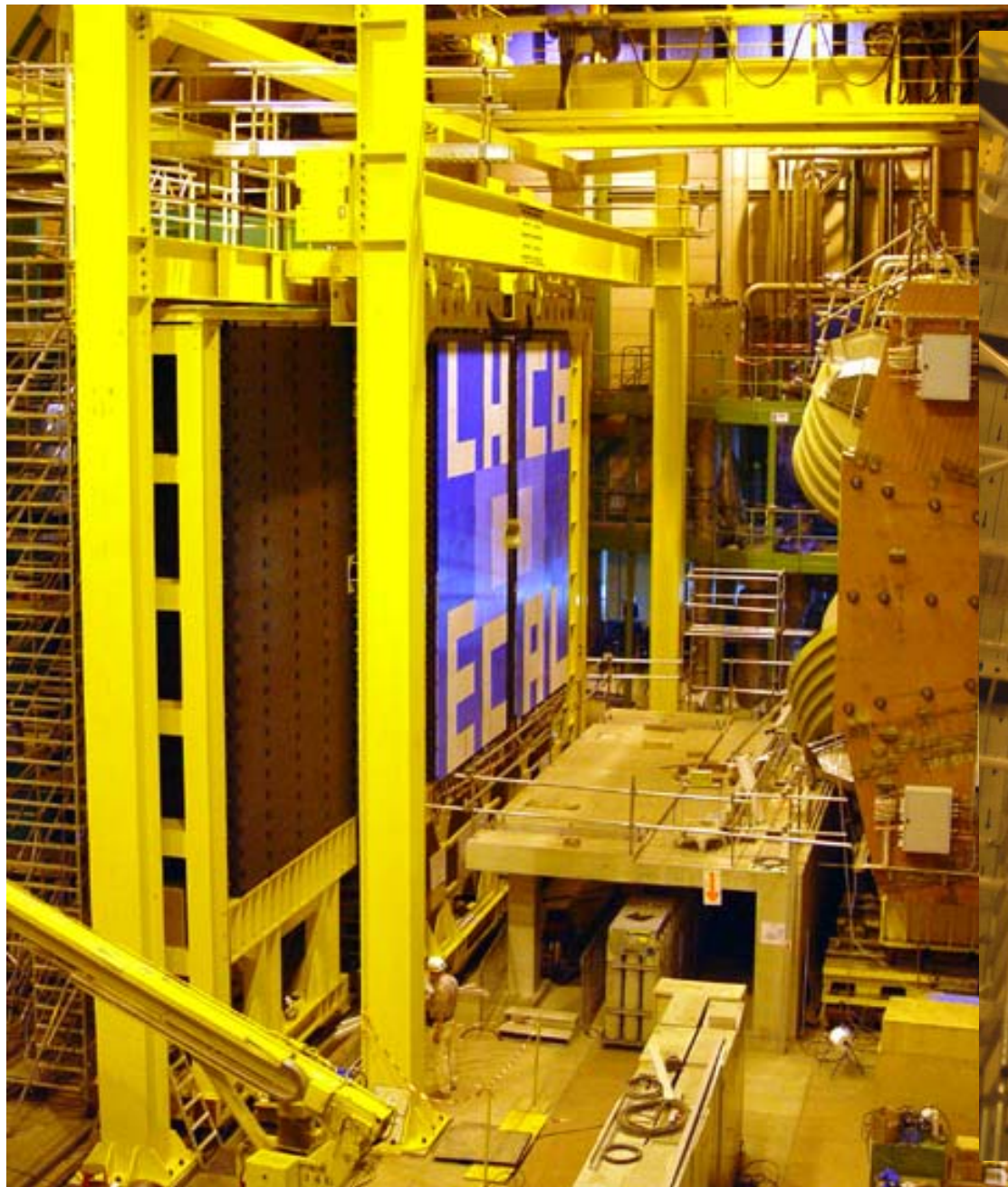
Electromagnetic Calorimeter

Engineering design and assembly of modules:

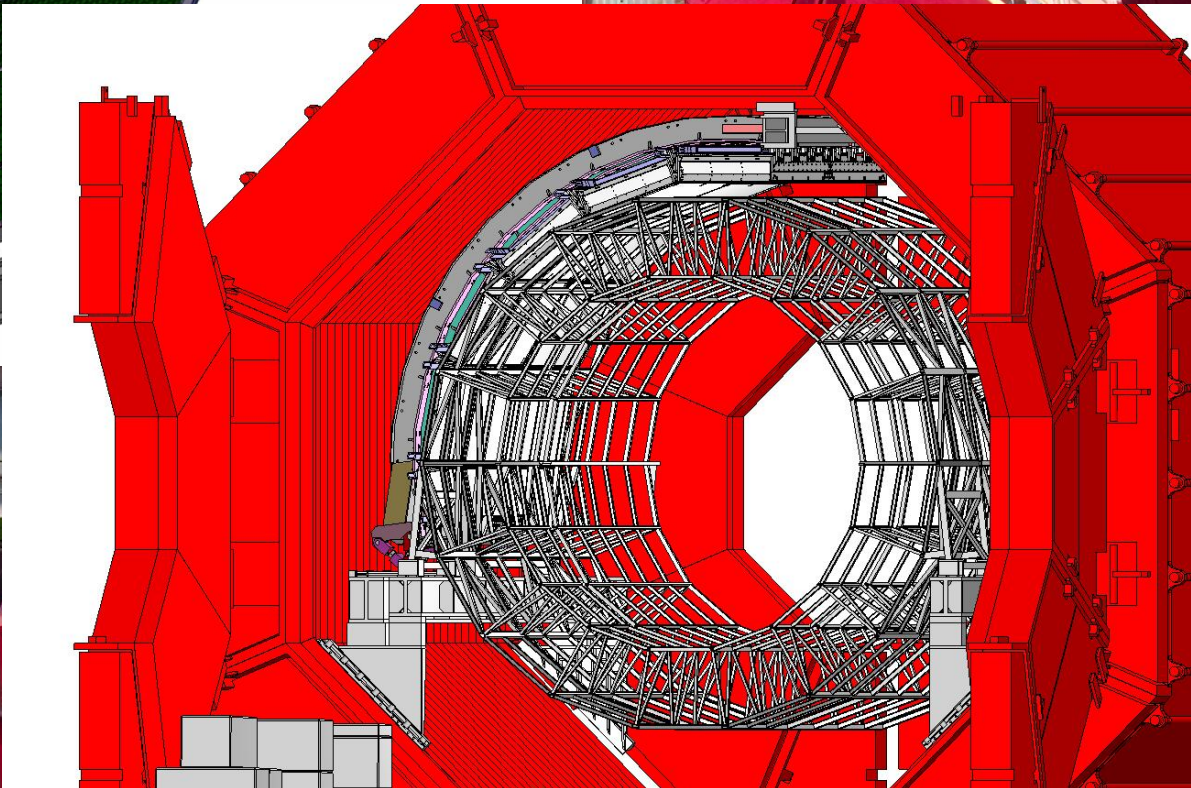


Weight of one module ~28 kg

Assembly of scintillator, lead, fibres and the readout part for inner section modules



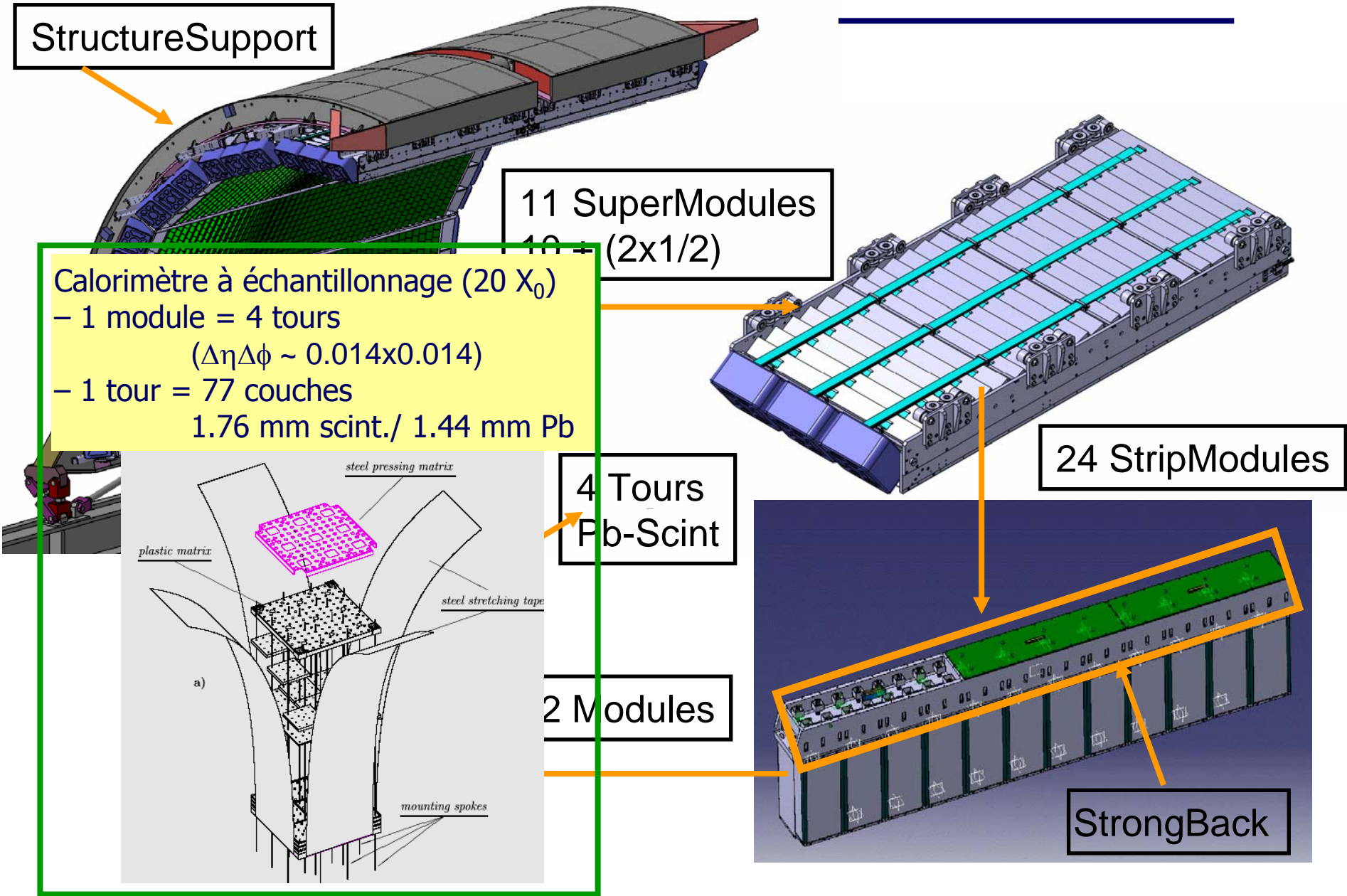
Calorimètre à échantillonnage Pb-Scintillateur
 $|\eta| < 0.7, \Delta\phi = 110^\circ$



EMCAL pour ALICE



EMCal – Éléments



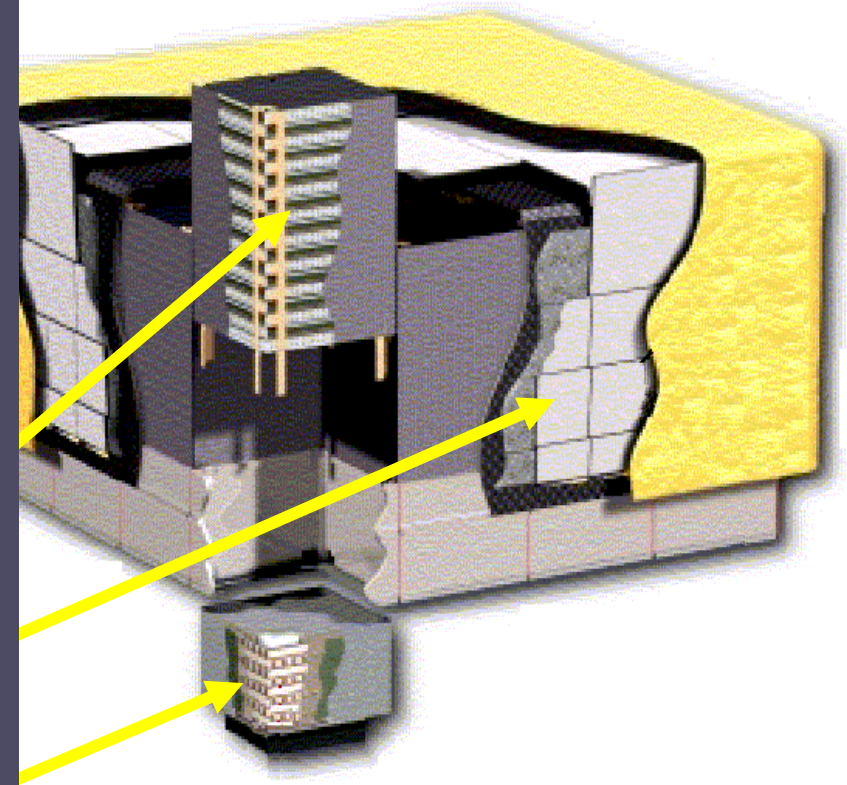
Les rayons gamma (γ) sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible mais dont l'énergie est des milliards de fois plus élevée. Ces rayons sont absorbés dans l'atmosphère et indétectables depuis le sol!

GLAST les observera depuis l'espace dès 2007.

Par rapport à ses prédécesseurs, GLAST possède une sensibilité 30 à 100 meilleure, pour détecter des sources plus faibles et éloignées. Un champ de vue très large compense une orbite basse et l'occultation régulière des sources par la terre.

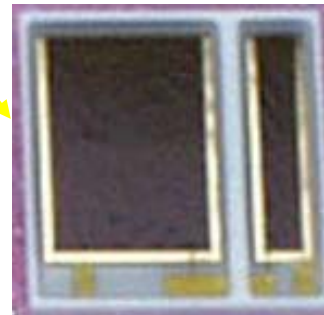
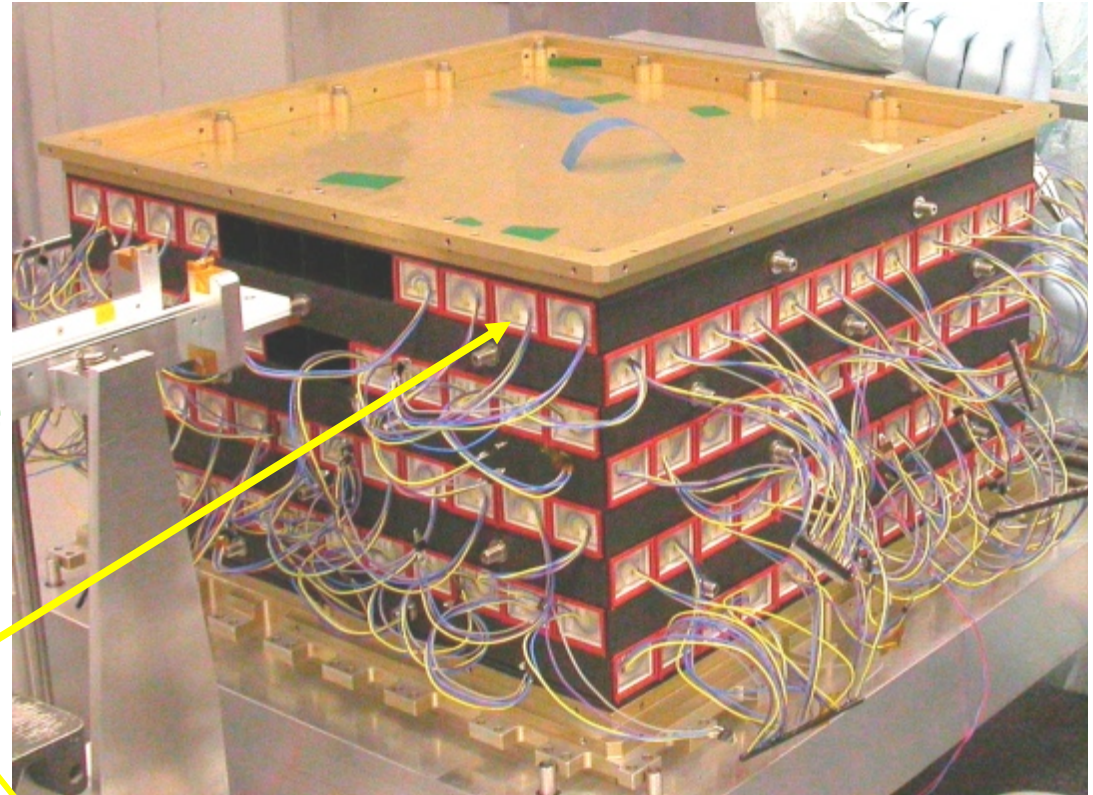
Les résolutions angulaire et en énergie sont améliorées pour une imagerie plus fine.

al de GLAST: elescope



GLAST: Module de Calorimètre

- ◆ 8 couches de cristaux de 12 CsI(Tl)
 - ◆ Crystal dimensions:
26.7 mm x 19.9 mm x 326 mm
 - ◆ Empilement Hodoscope:
alternance de couches
orthogonales
 - ◆ Aténuation de la lumière le long
du cristal (~ 0.65) pour faire une
mesure de position
 - ◆ Epaisseur totale de $8.5 X_0$
- ◆ Dual PIN photodiode à chaque extrémité
 - ◆ Asymétrie droite/gauche
- ◆ Electronique est installée à chaque
extrémité du cristal



Alpha Magnétique Spectrometer



AMS est conçu pour étudier les rayons cosmiques de haute énergie.

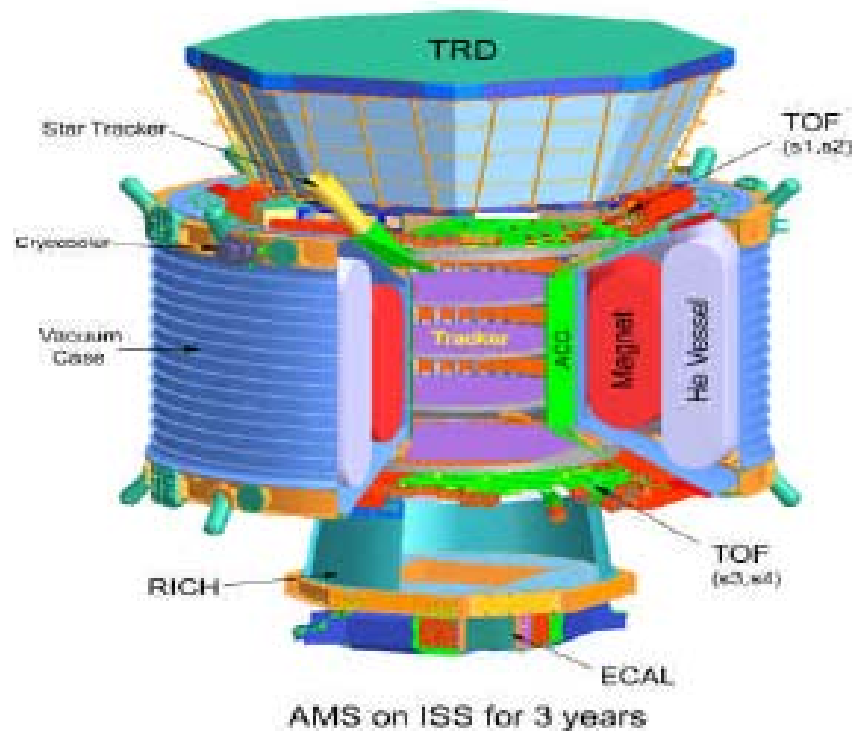
AMS s'intéresse en particulier à la recherche d'anti-matière (anti-He)

AMS peut aussi mesurer les photons de haute énergie grâce au calorimètre.

Photo-montage

AMS doit partir sur la station spatiale internationale avec la navette spatiale en 2009?

AMS



Transition Radiation Detector

Foam + drift tubes (Xe/CO₂)

Time of Flight (trigger)

Scintillators, fine mesh PMT's

$\sigma_t \sim 120$ ps

Superconducting magnet (0.86 T·m²)

Tracker (8 layers, 6m²)

6 double-sided silicon strips

$\sigma_x = 10$ μ m in bending plane

RICH

Radiator (Aerogel+NaF)

PMT's (16 pixels)

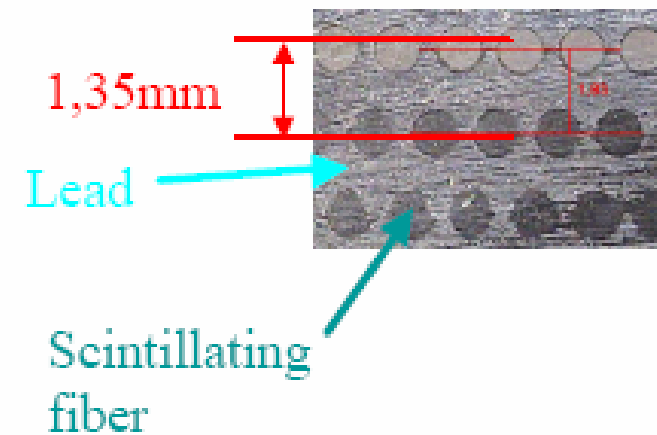
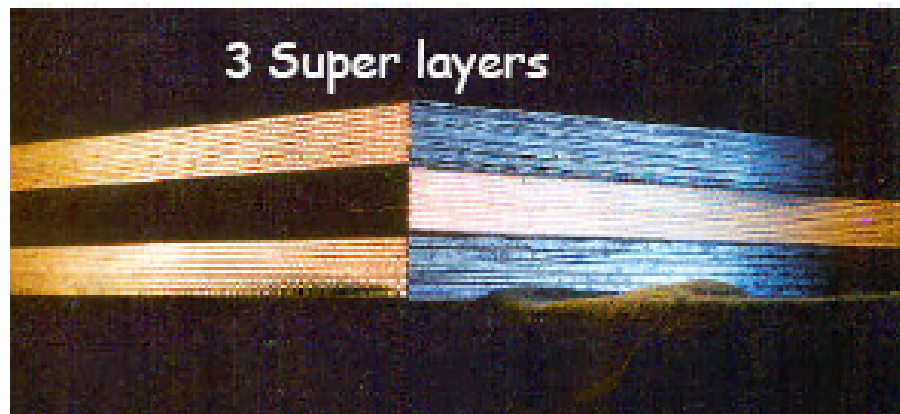
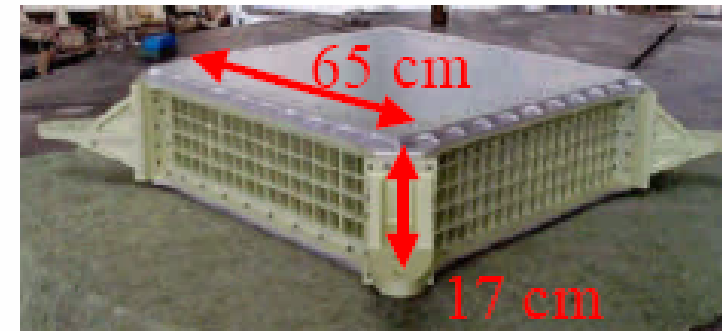
3D-sampling ECAL

Lead+Scintillating-fibers

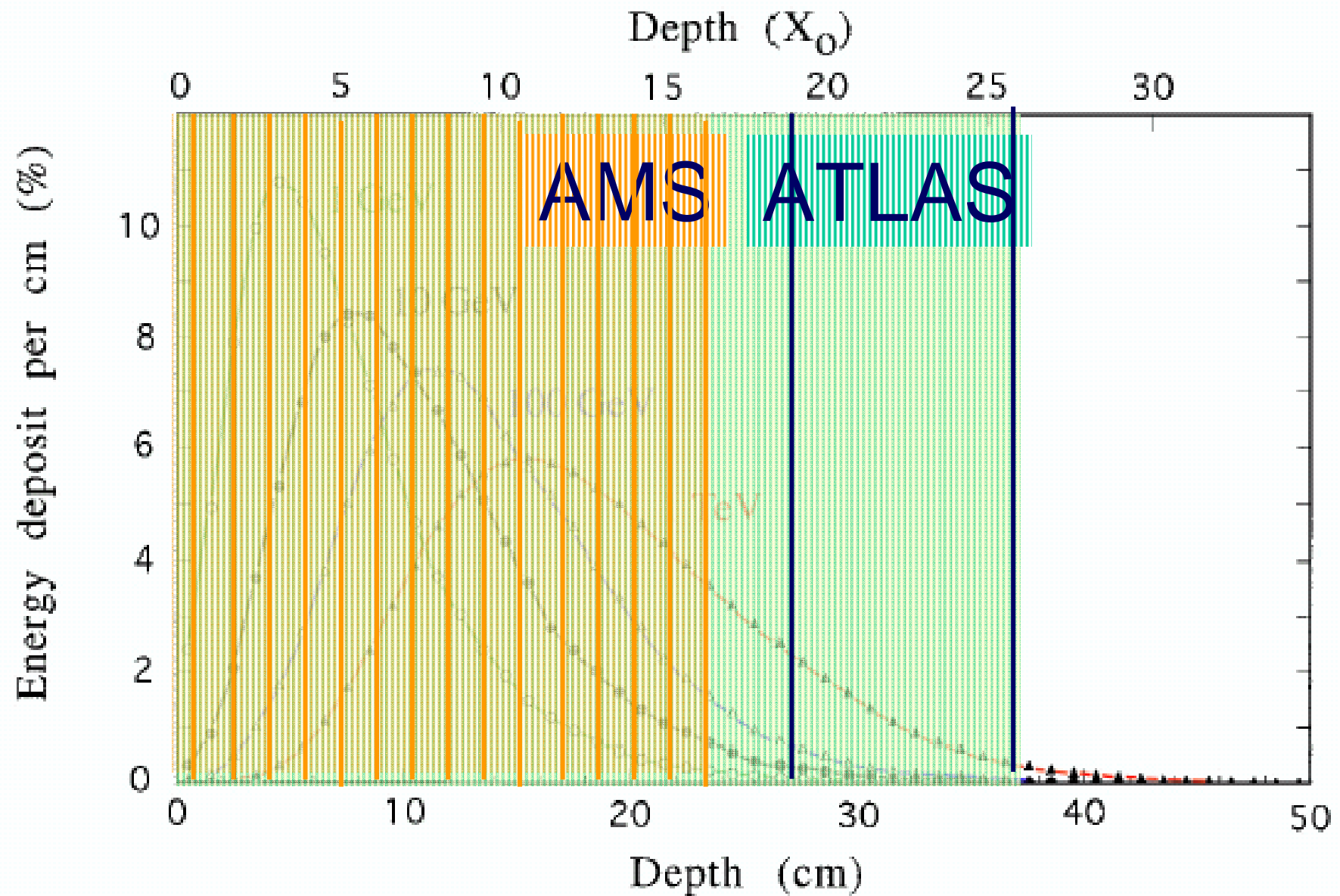
PMT's (4 pixels)

ECAL Structure

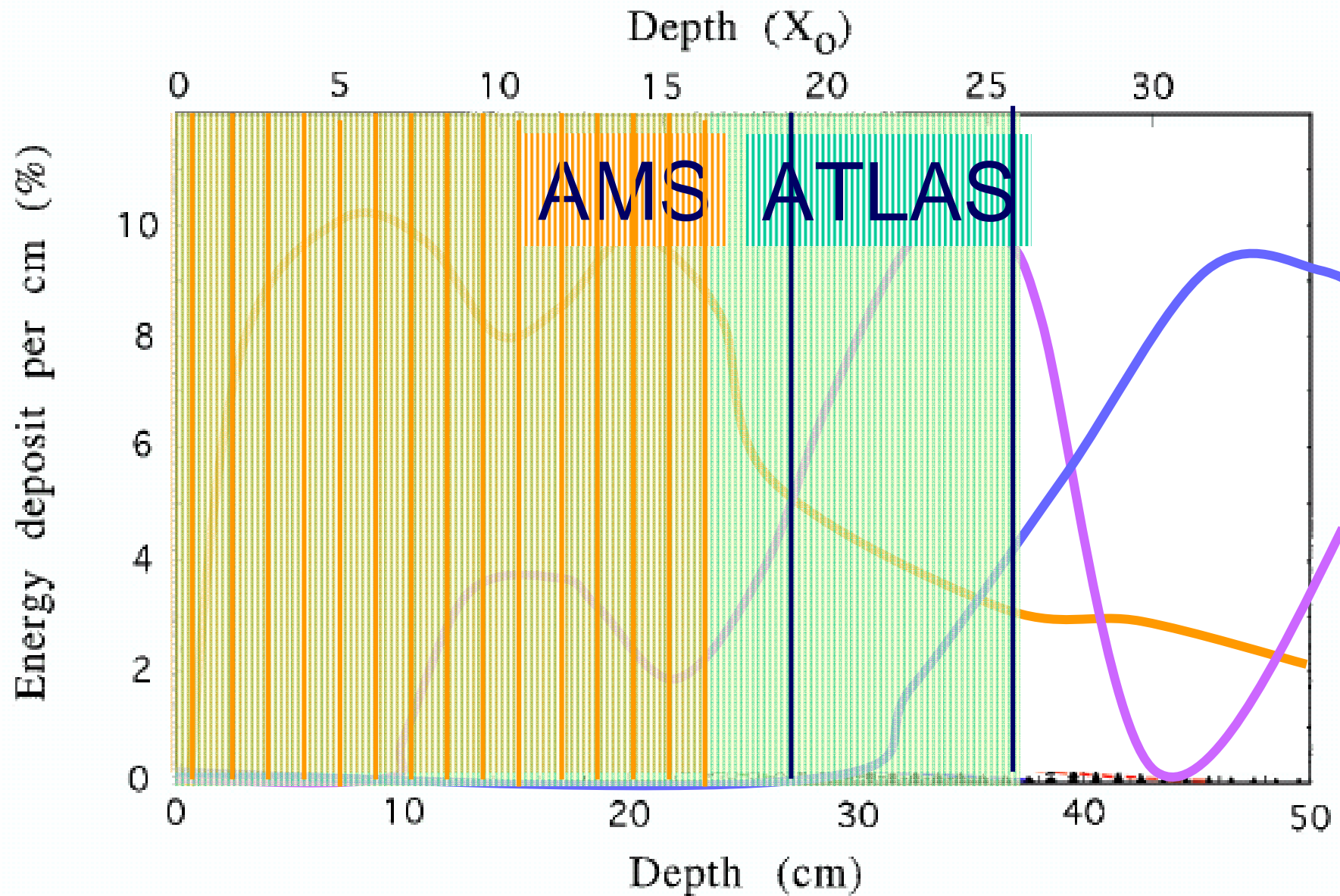
- ❑ 9 super layers ($16X_0$) alternatively oriented along X and Y axis
- ❑ 1 Super layer:
11 grooved Pb foils (1mm thick) interleaved with 10 layers of scintillating fibers ($\varnothing=1\text{mm}$) glued by an epoxy resin



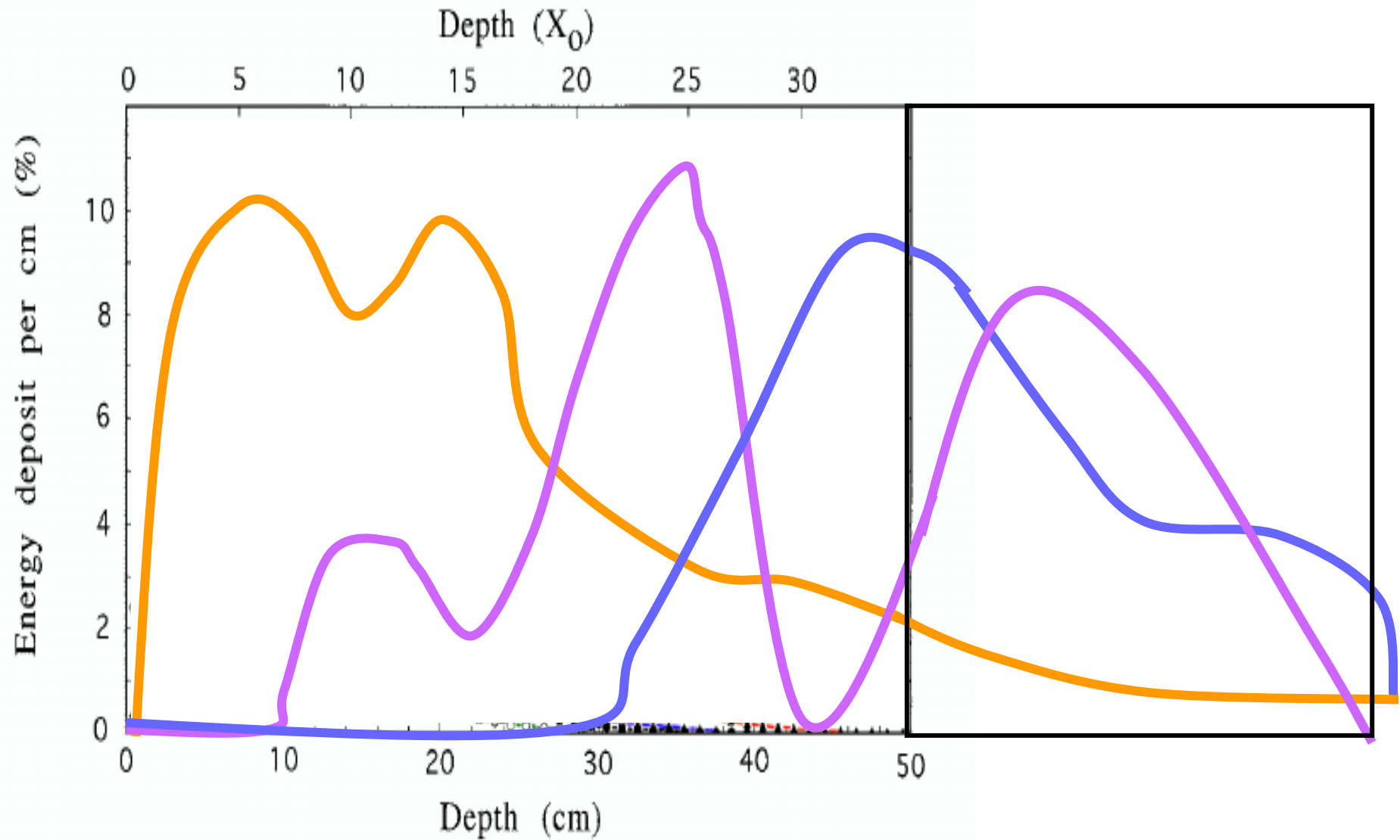
Gerbes Electromagnétiques/Calorimètres EM



Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM



Gerbes Hadroniques/Calorimètres EM+HAD



Systemes de lecture

Les systèmes de lecture

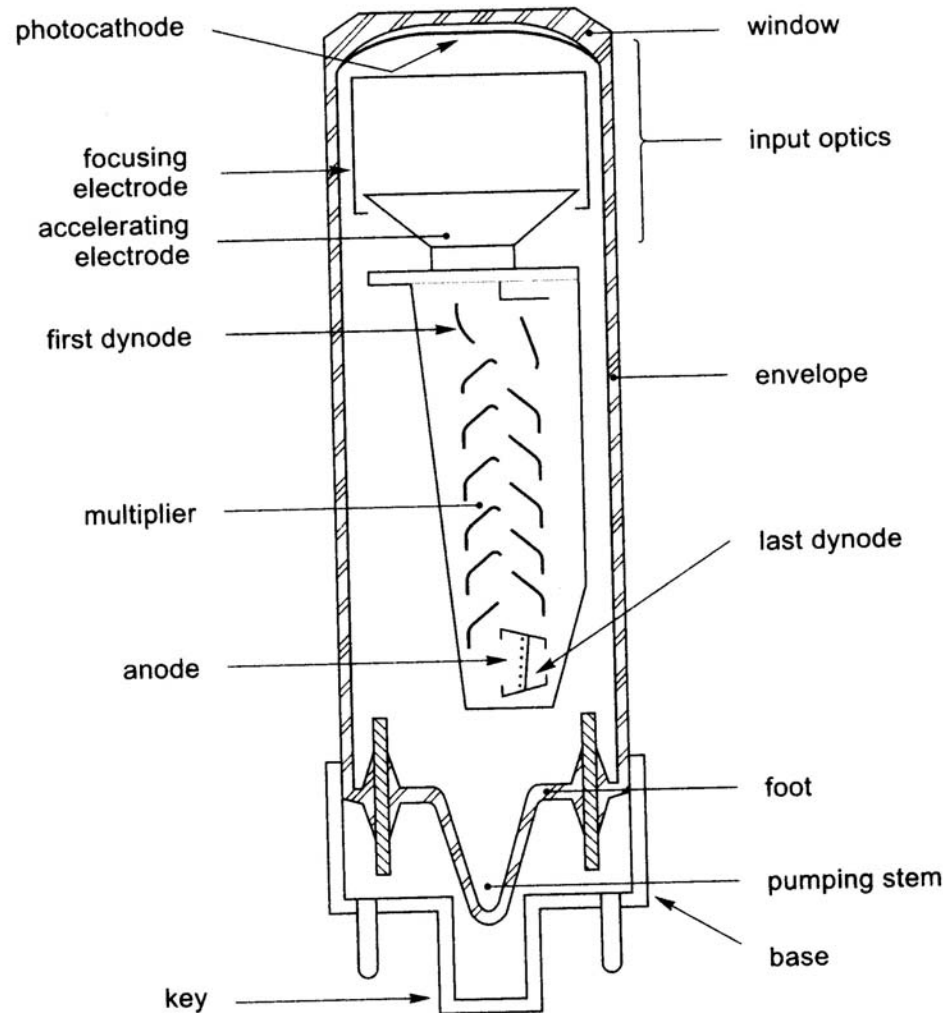
- ◆ Pour collecter le signal:
 - ◆ collection de la lumière
 - ◆ collection des charges

- ◆ Il faut des détecteurs
 - ◆ de lumière
 - ◆ de courant

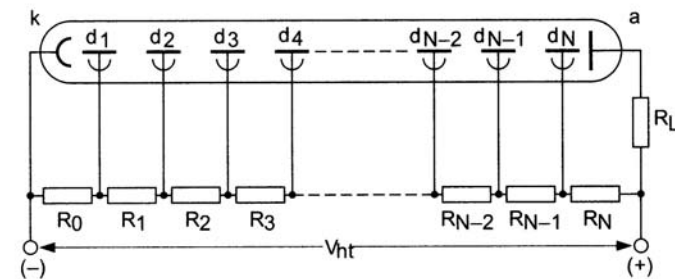
- ◆ On utilise
 - ◆ photoMultiplicateurs
 - ◆ photodiode à avalanche
 - ◆ preamplificateurs

Photomultiplier tubes

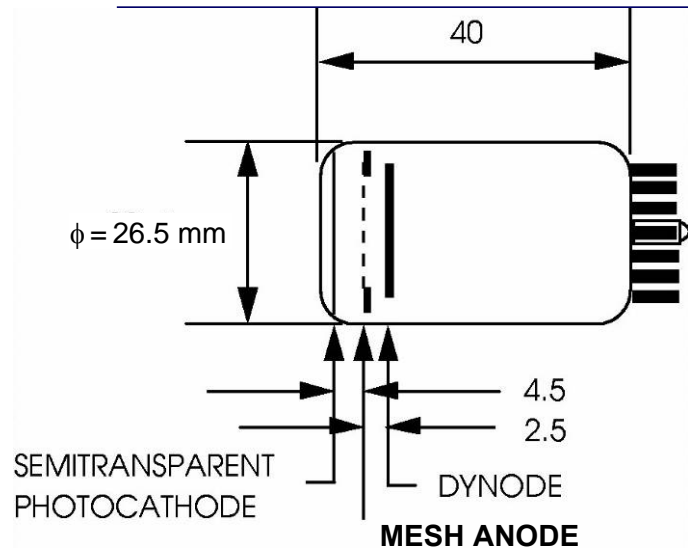
Light signal transformed to electrical signal



- ◇ Vacuum device
- ◇ Emission of photoelectrons from a photocathode
- ◇ Acceleration and multiplication at dynodes
- ◇ Gain $G = \prod g_i$ ($10^4 - 10^8$)
- ◇ Sensitive to magnetic fields



Vacuum Phototriodes (VPTs)



Single stage photomultiplier tube with fine metal grid anode

Can be arranged to be largely insensitive to \sim axial magnetic fields

- ***In CMS ECAL:***
- B-field orientation favourable
- Gain 8 -10 at $B = 4$ T
- Radiation hard (UV glass window)
- Active area of ~ 280 mm²
- Q.E. $\sim 20\%$ at 420 nm



Avalanche Photodiodes (APDs)

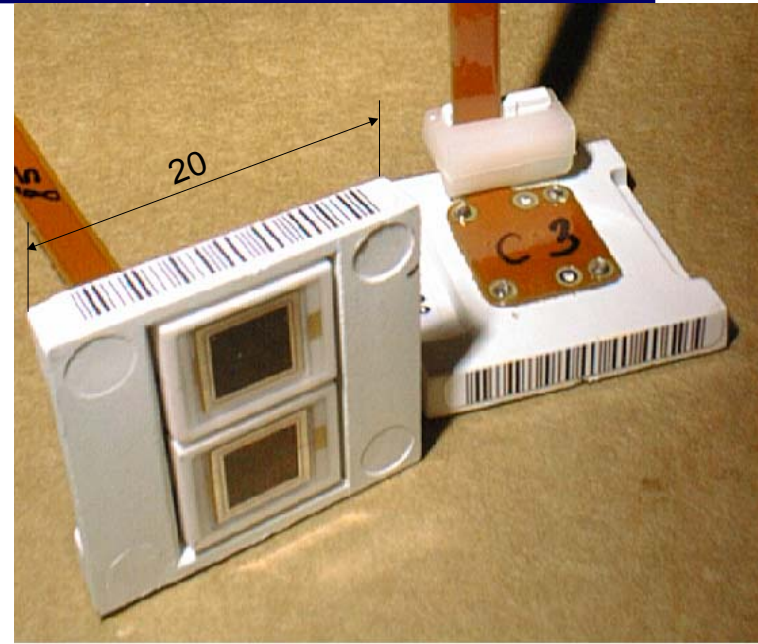
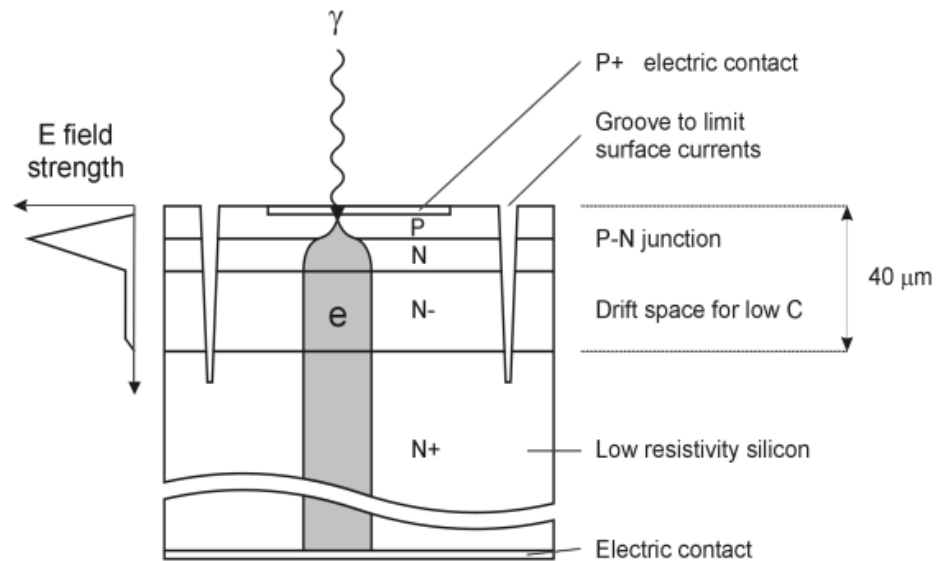
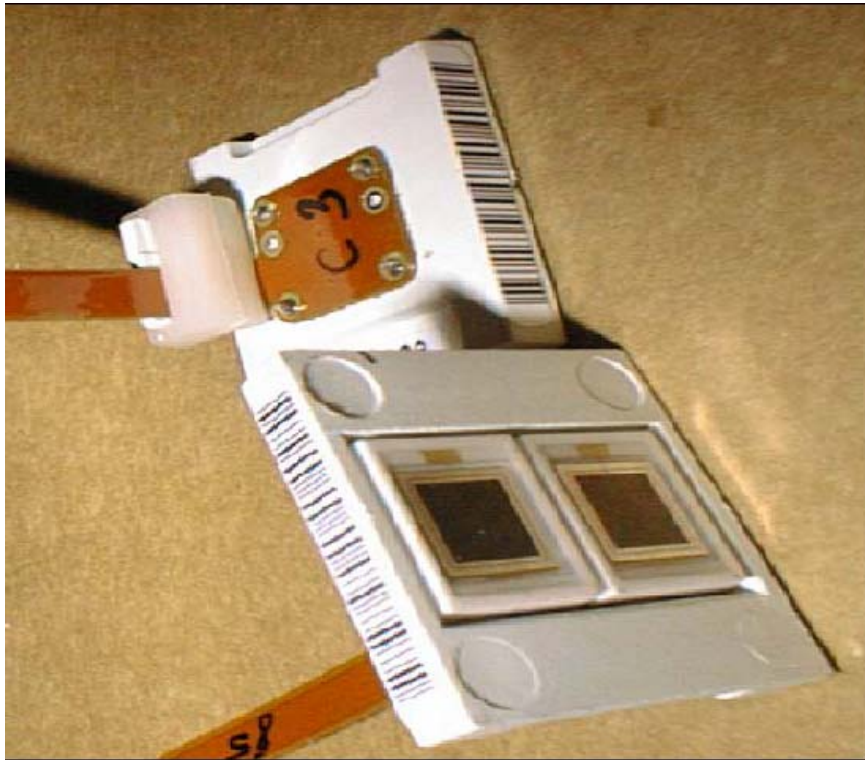


Photo-electrons from THIN $6\ \mu\text{m}$ p-layer induce avalanche at p-n junction

Electrons from ionising particles traversing the bulk NOT amplified
(insensitive to shower leakage)

2 APDs (each $5 \times 5\ \text{mm}$) mounted in capsule for gluing to crystal

APD & VPTs de CMS



**Barrel:
Avalanche Photodiodes (APDs)**

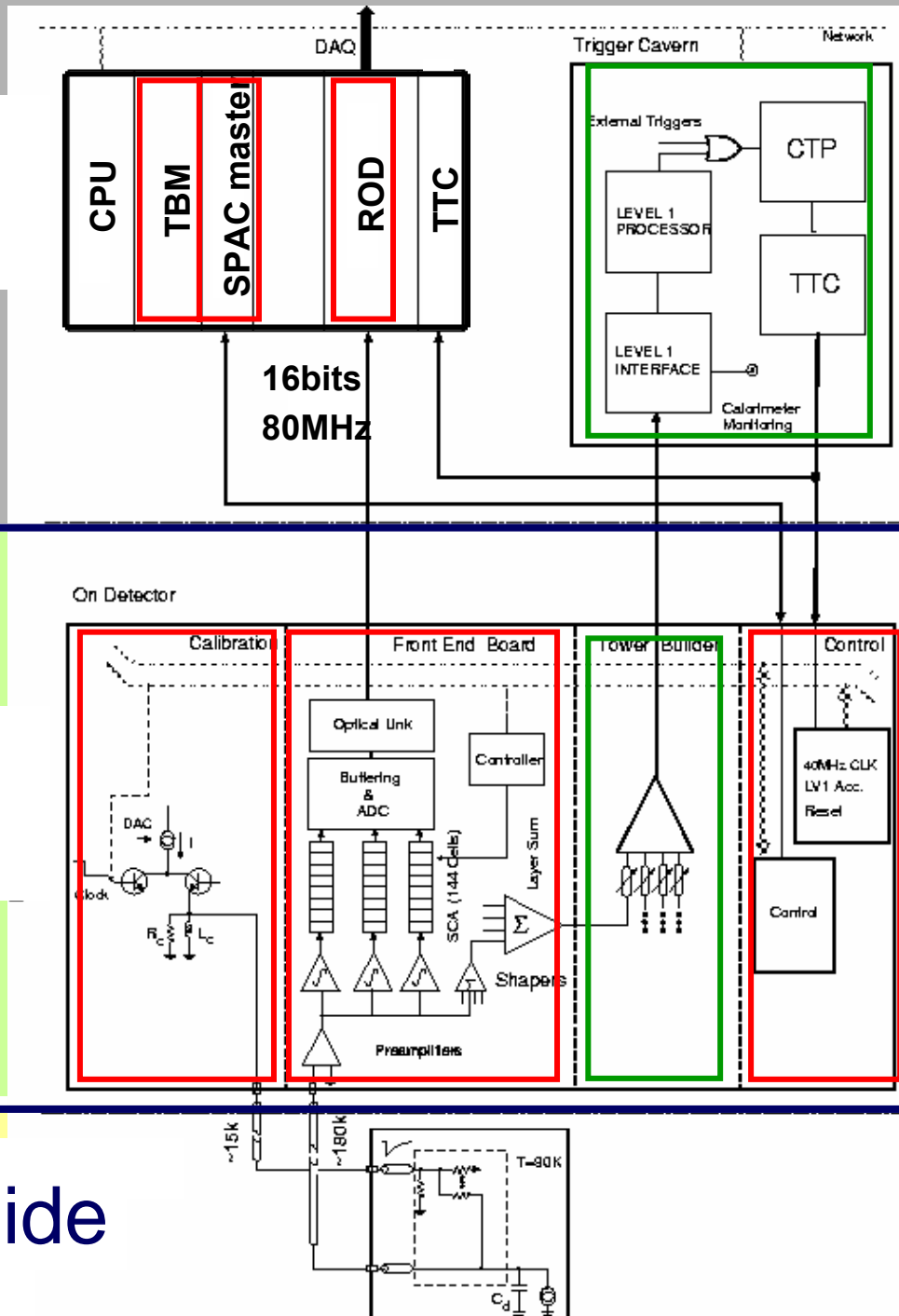


**Endcap:
Vacuum PhotoTriodes (VPTs)**

Salle de comptage

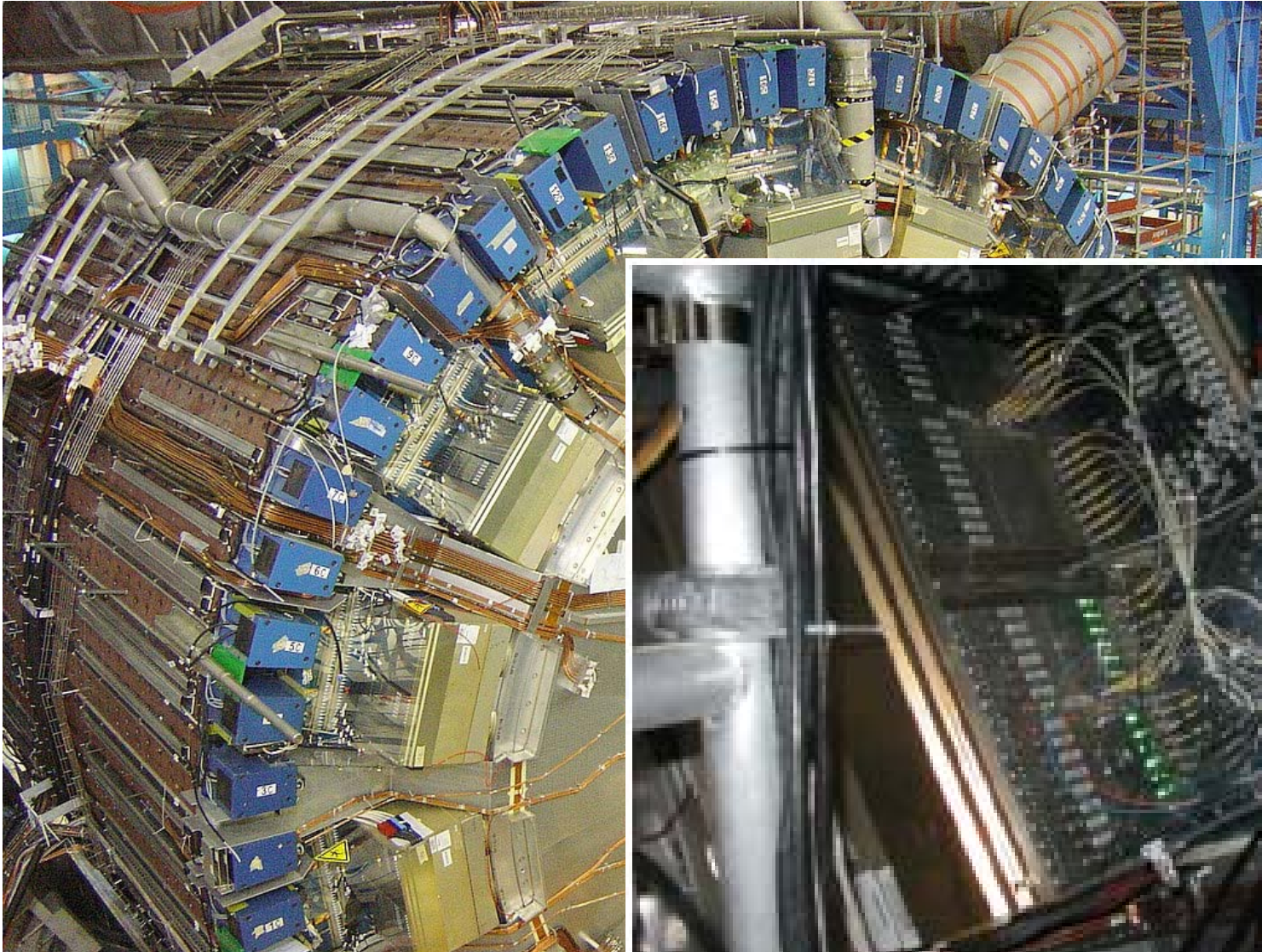
sur le cryostat

Argon liquide

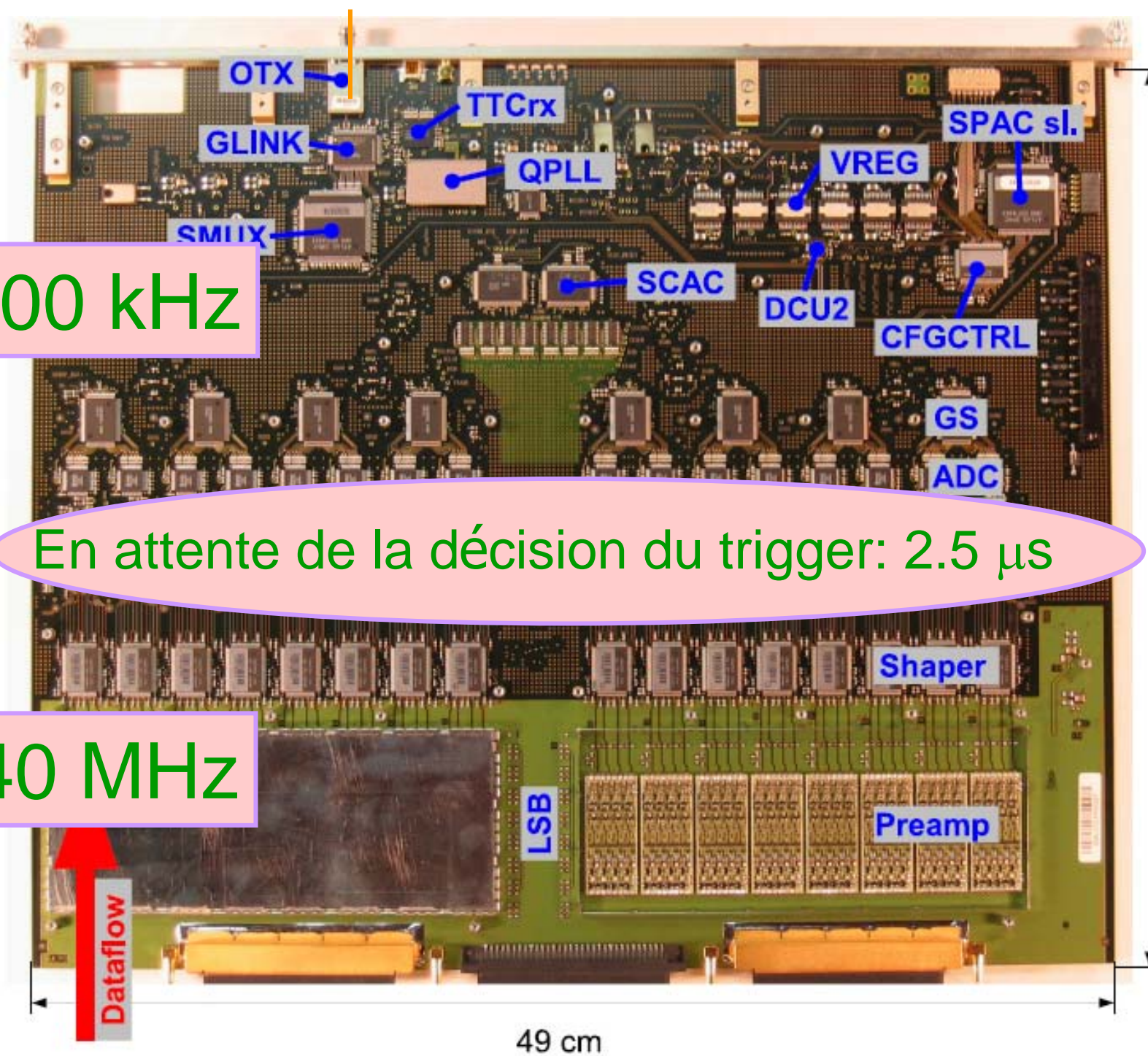


Chaîne de lecture de l'accordéon

Electronique ON DETECTOR



Carte FrontEnd pour le calorimètre EM d'ATLAS
ON DETECTOR



100 kHz

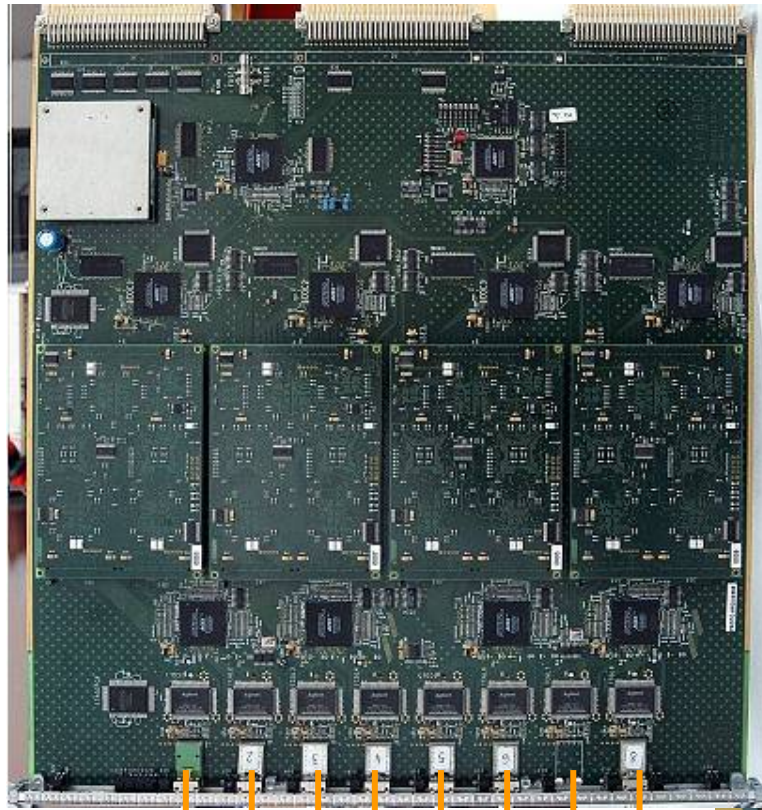
En attente de la décision du trigger: 2.5 μ s

40 MHz

49 cm

Le système BackEnd pour les calorimètres EM+HAD de ATLAS

OFF-DETECTOR

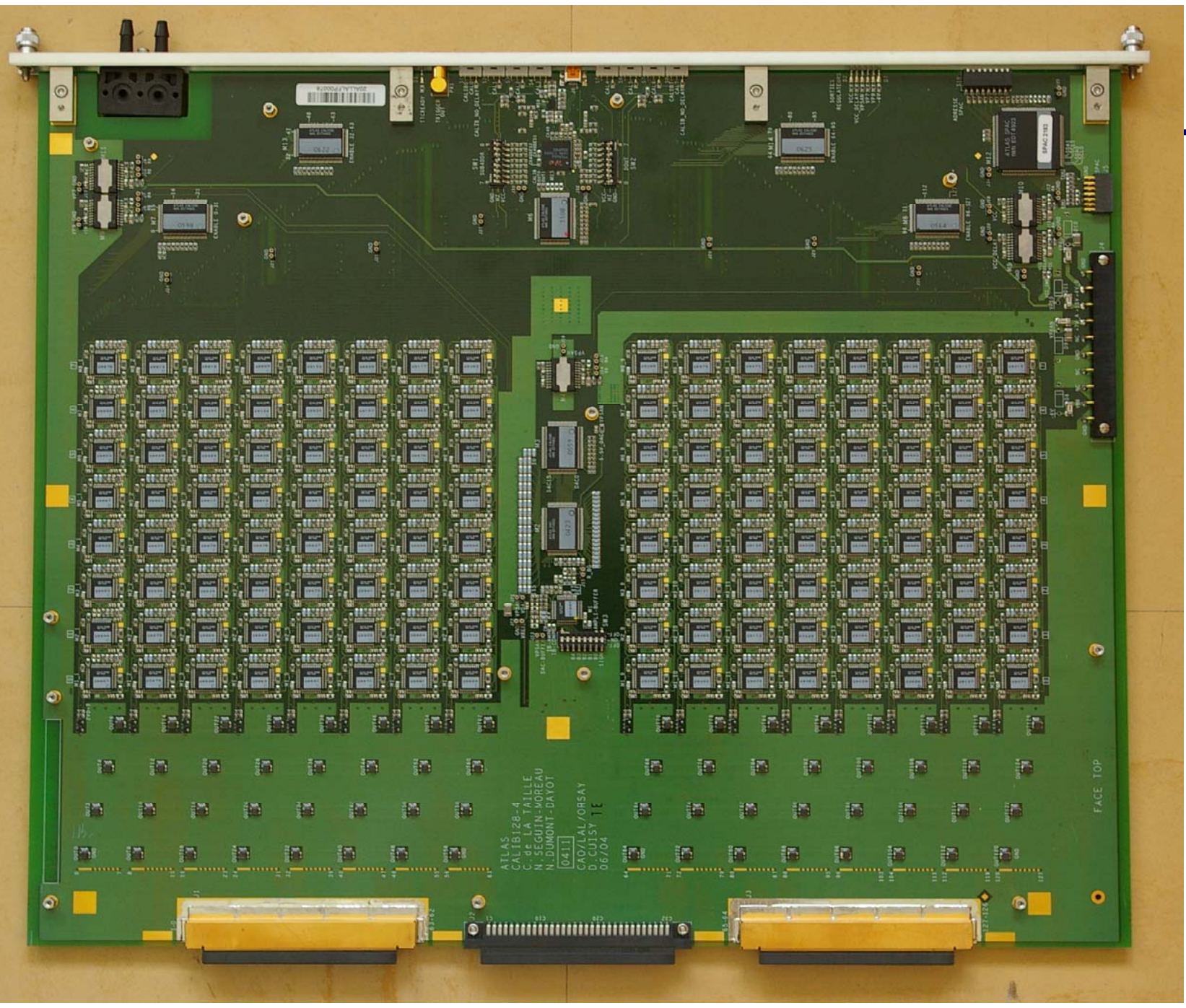


8 lignes venant de 8 FEBs

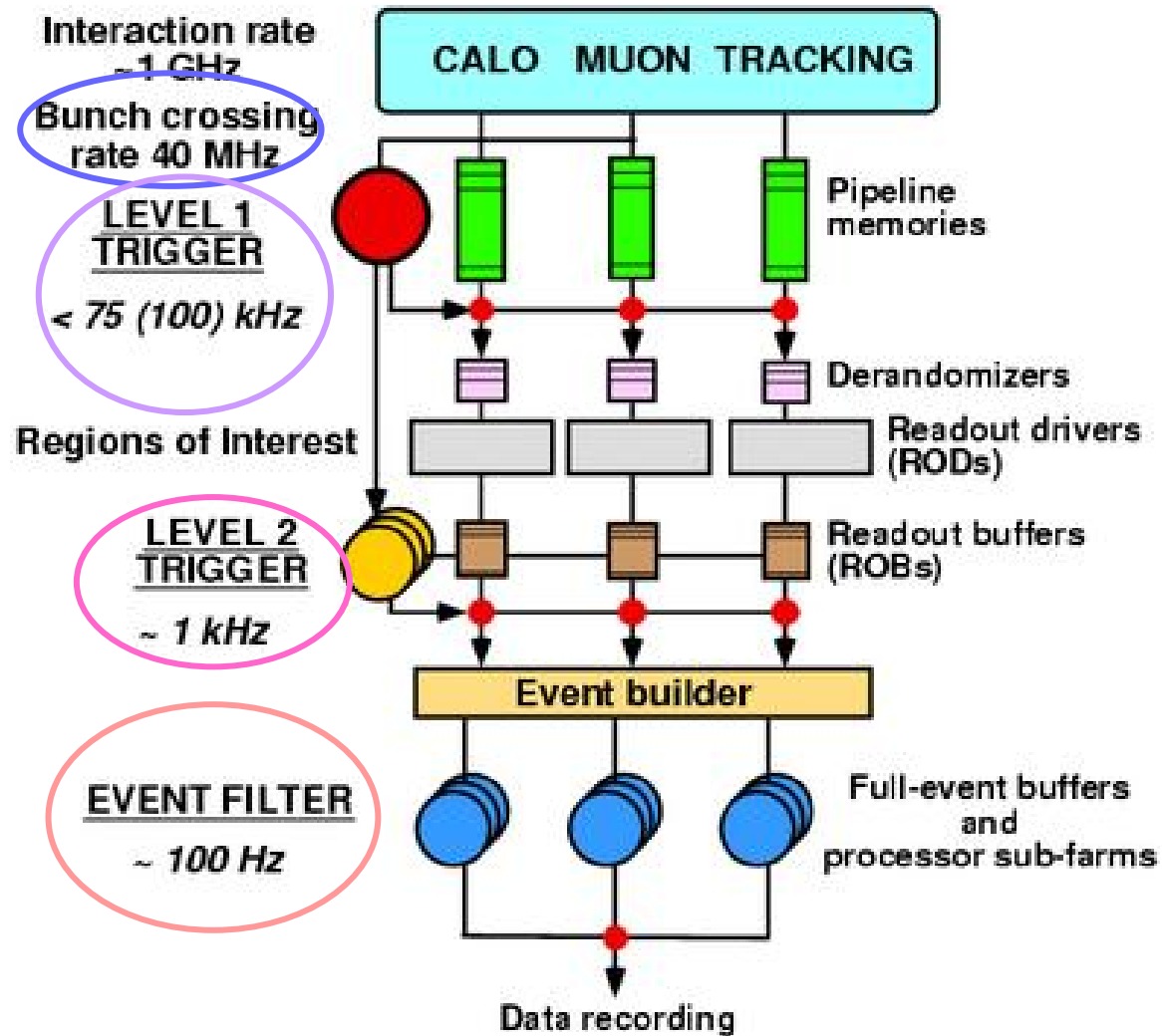


Fibres optiques

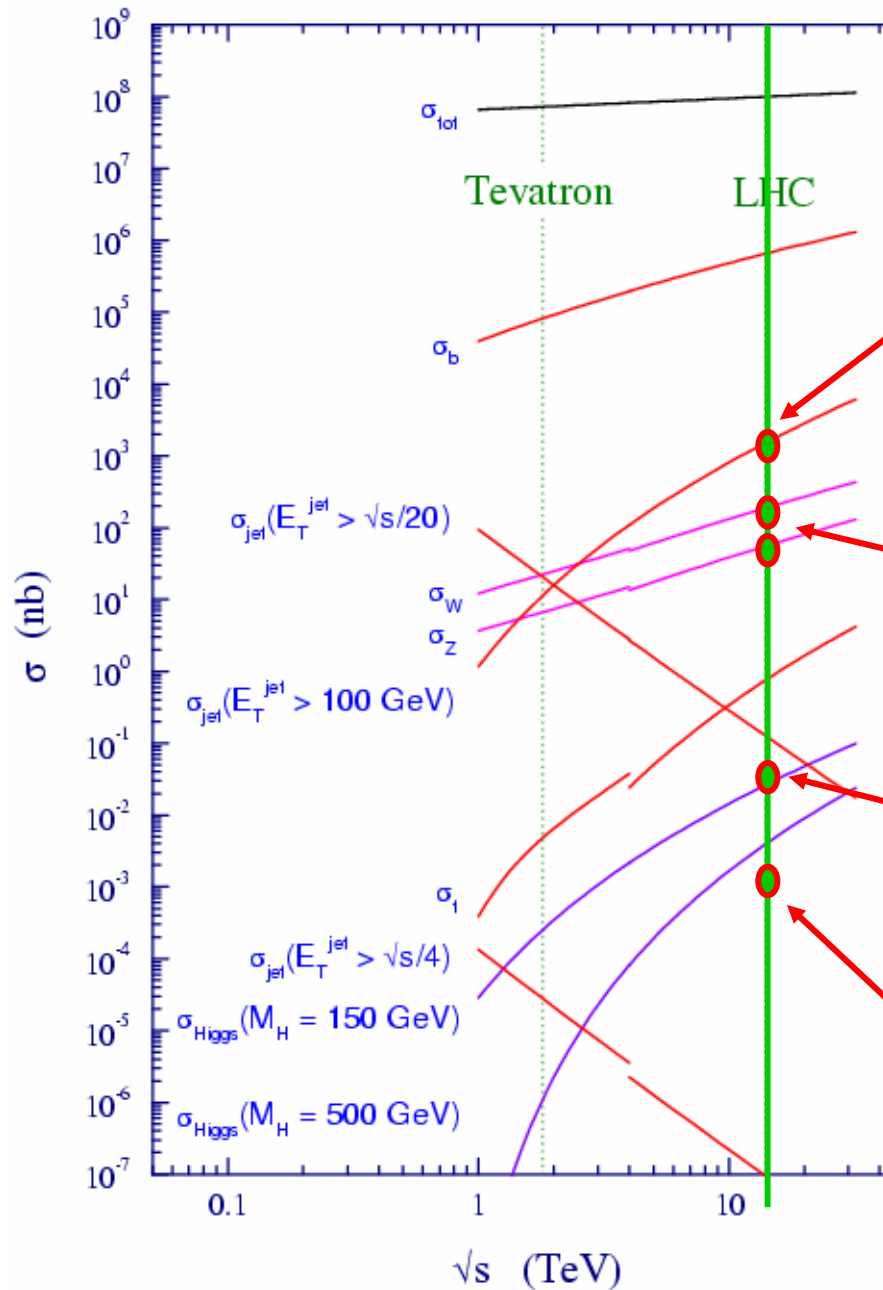
Carte Calibration pour le calorimètre LARG d'ATLAS ON DETECTOR



Déclenchement/Trigger



Le déclenchement/trigger



◆ Luminosity

◆ high frequency collisions: 40MHz:

◆ high speed electronics

◆ high data rate

◆ high density proton bunches

◆ pileup

◆ highly segmented detector

◆ Hermiticity

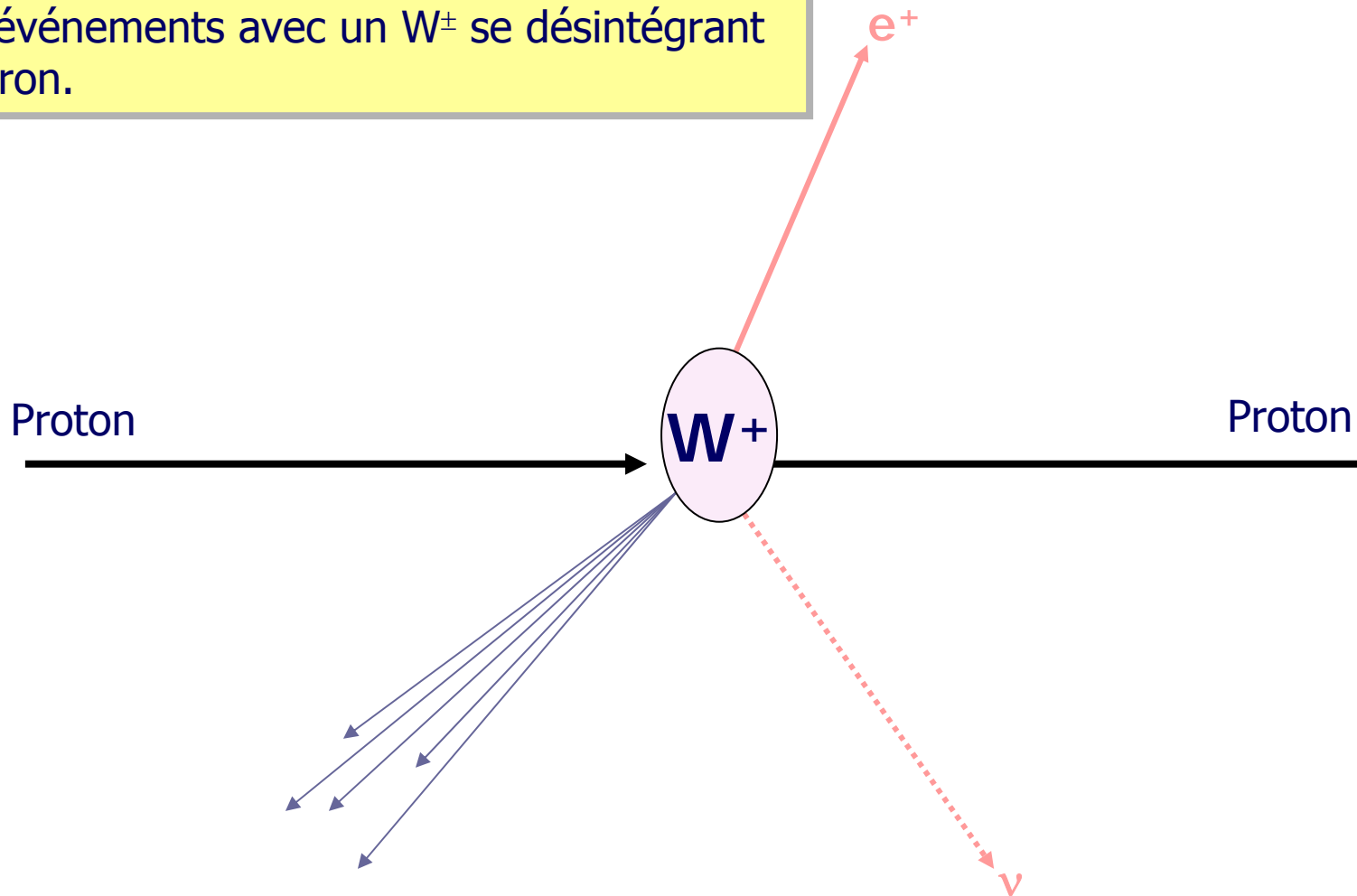
◆ Trigger

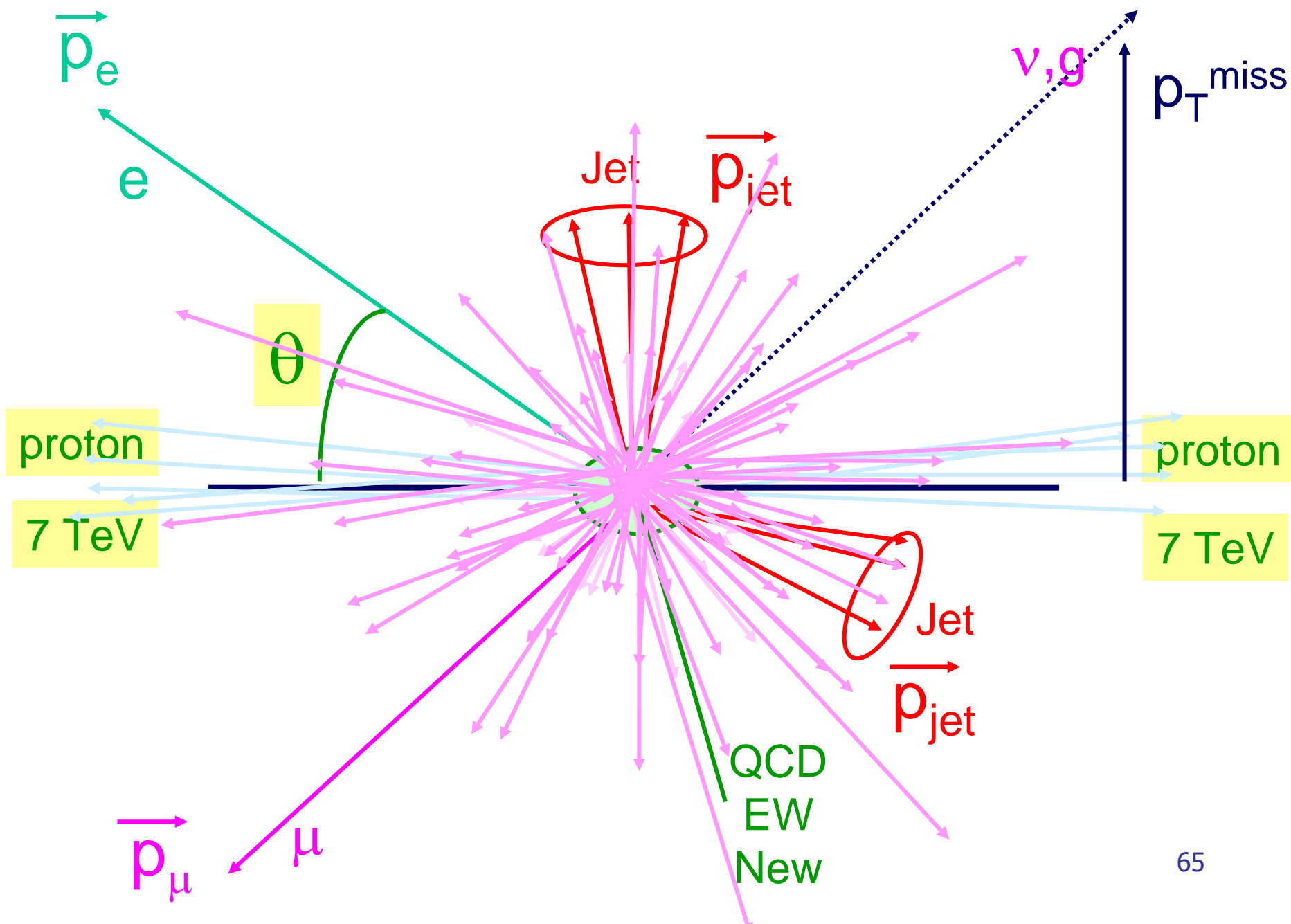
◆ selective

◆ open to new physics

Chercher un ami cher dans le monde entier

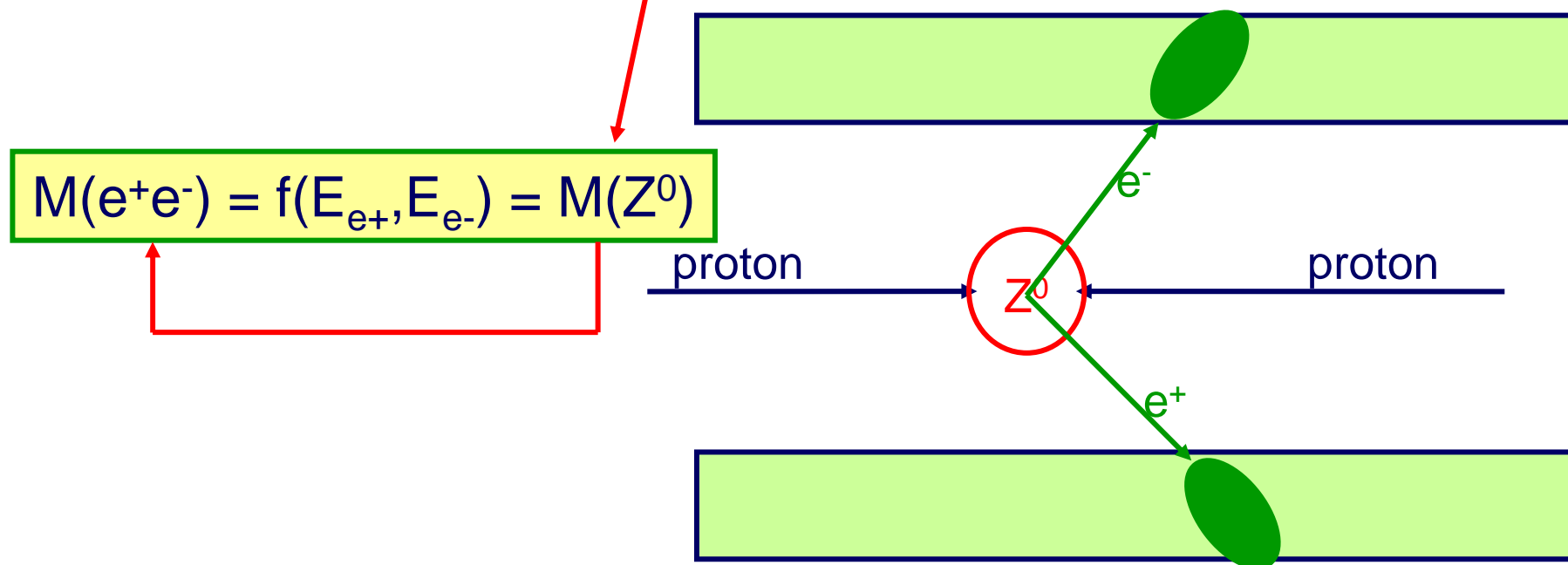
20 000 événements avec un W^\pm se désintégrant en électron.





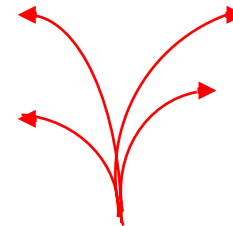
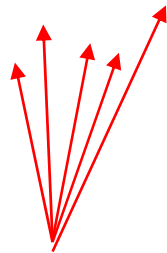
Calibration avec les données

- ◆ $M(Z^0) = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}/c^2$ (précision de $2\text{MeV}/c^2$)
- ◆ ATLAS et CMS vont utiliser cette particule pour ajuster l'échelle d'énergie absolue



Avec un champ magnétique

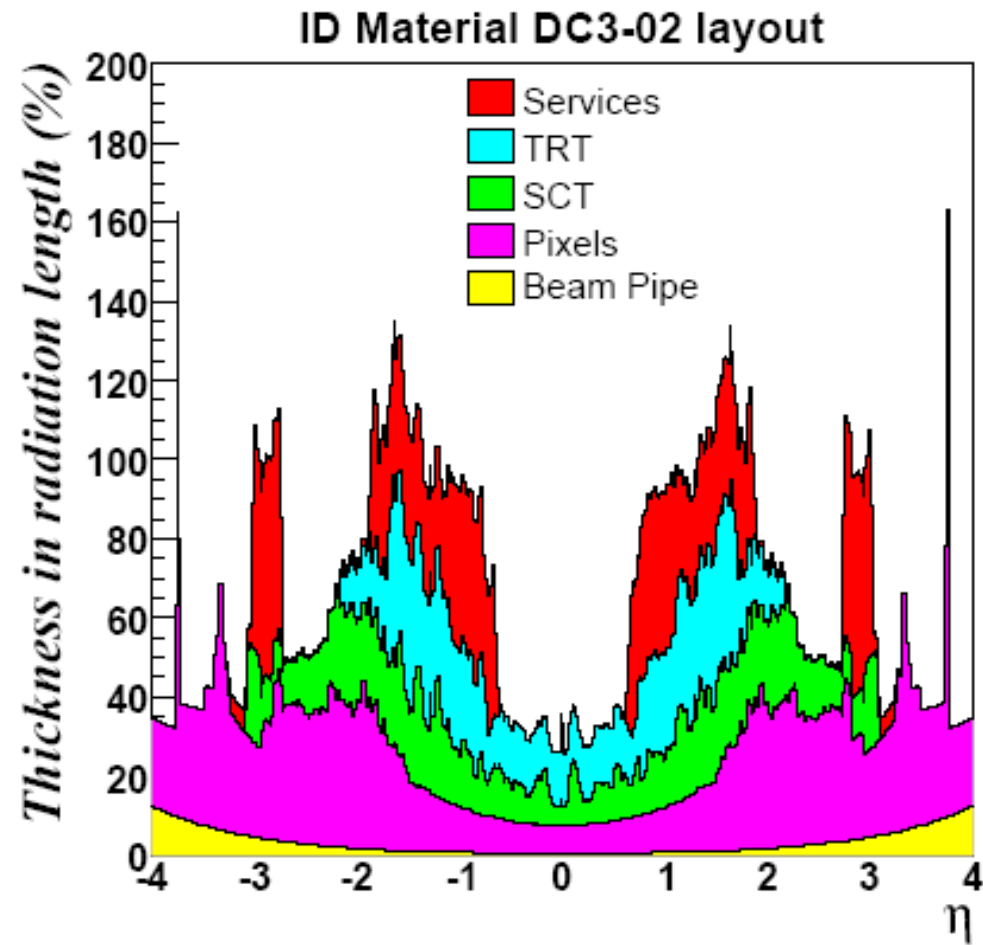
- ◆ Les calorimètres sont toujours après le détecteur de traces
- ◆ Pour ATLAS l'aimant est devant le calorimètre
- ◆ Pour CMS, l'aimant est entre les calorimètres électromagnétique et hadronique
- ◆ La gerbe s'ouvre dans le champs magnétique
 - ◆ complique la reconstruction



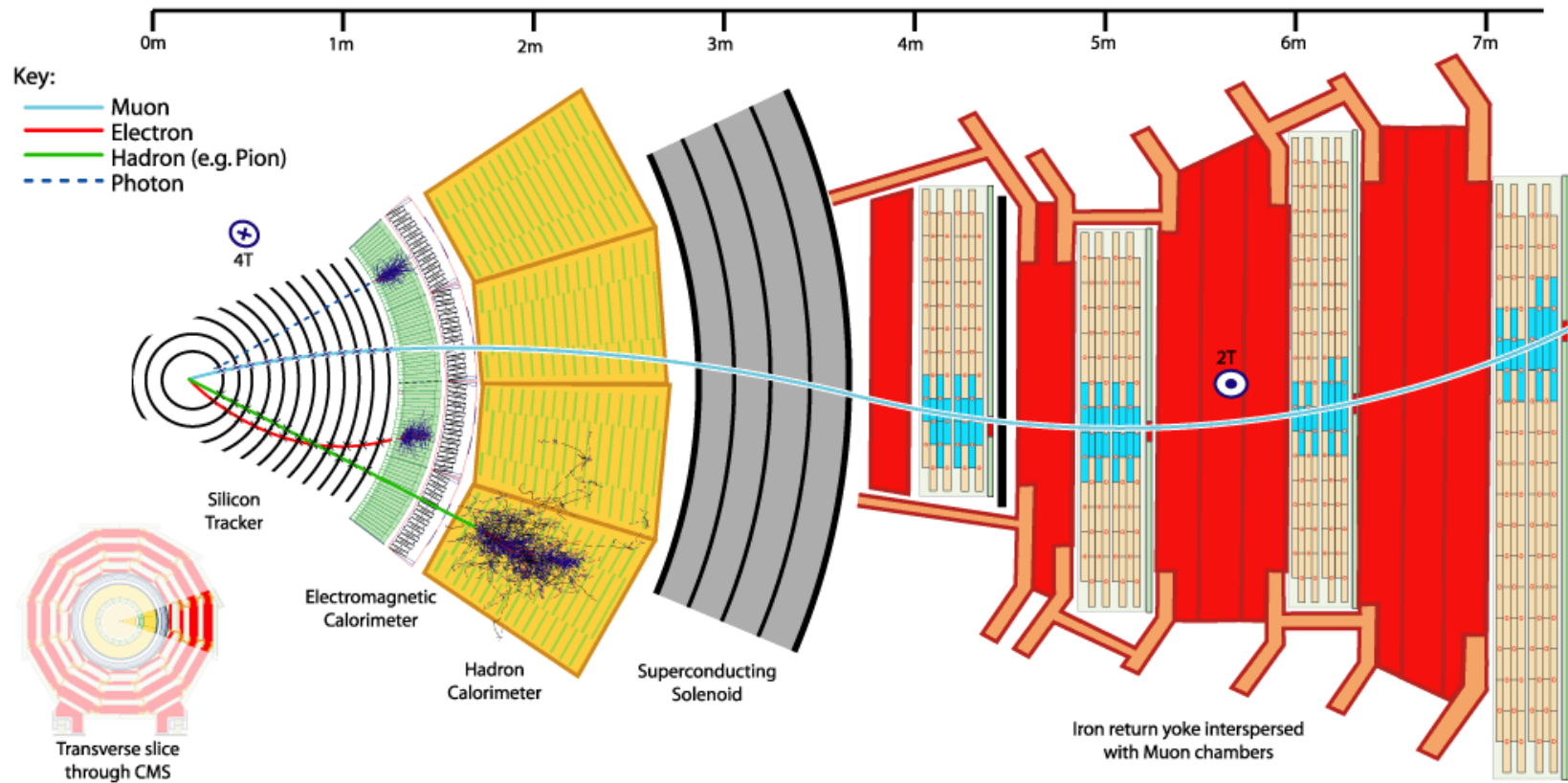
Résumé

- ◆ Les calorimètres jouent un rôle essentiel dans la plupart des expériences de physique des particules
- ◆ Ils permettent de mesurer l'énergie des particules électromagnétiques mieux que les particules hadroniques
- ◆ Il existe de nombreux types de calorimètres, adaptés à chaque expériences
- ◆ Les exigences de physique demandent de plus en plus de raffinement (segmentatio → gd nbre de voies, radiations, fréquence,.....)

Matière en amont du calorimètre



Structure générale d'un détecteur



Chaîne de lecture de l'accordéon

