

La calorimétrie suite...

Techniques de base & avancées

Vincent Boudry
LLR, École polytechnique



***École du détecteur à la mesure
Bénodet, juin 2018***

Plan

Introduction

- Les interactions des particules dans la matière
 - Interactions hadronique, réponse en temps, ...
 - Oh les belles gerbes !
- Principe de la mesure en calorimétrie
 - Calorimétrie électro-magnétique & hadronique
 - Mesures de la performance

Techniques de base de détection

- Optique : Scintillateurs & Čerenkov
- Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
- Détecteurs Gazeux

En pratique :

- Quelques exemples
- Effets annexes, et considérations «pour ingénieurs»

Techniques avancées, la pratique et le futur...

- Quelques ruses...
- Le futur de la calorimétrie : dual readout vs. particle flow.
 - ILC & CMS-HGCAL

Mercredi

Vendredi

Quelques exemples de détecteurs (techniques)

Quelques exemples de grands calorimètres

Machines basse E: CLEO, BaBar cristal CsI, ~ pas de HCAL

LEP OPAL lead glass, Fe-w.ch. L3 BGO
ALEPH, DELPHI → Pb/Fe-wire chambers sandwich

SLC SLD Pb/Fe-ℓAr

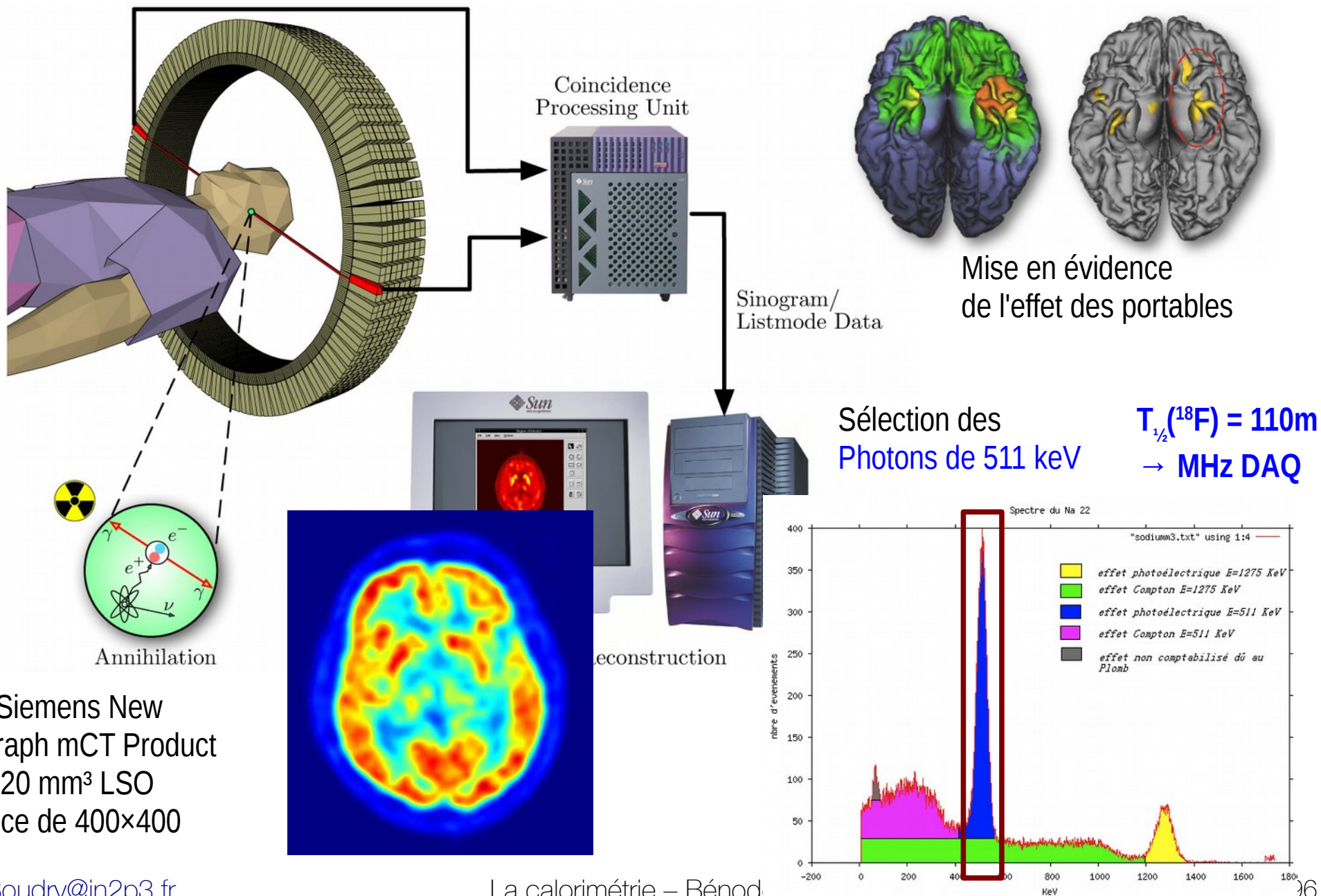
HERA H1 Pb/Fe-ℓAr ZEUS U-scint.

TeVatron D0 U-ℓAr CDF Pb/Fe-scint.

LHC CMS PbWO₄, Brass-scintillator
ATLAS Pb-ℓAr, Fe-scintillator

Cristaux

Tomographie par émission de positrons = des calos industriels...



Ex : Siemens New Biograph mCT Product
 4x4x20 mm³ LSO
 Matrice de 400x400

Crystal Ball

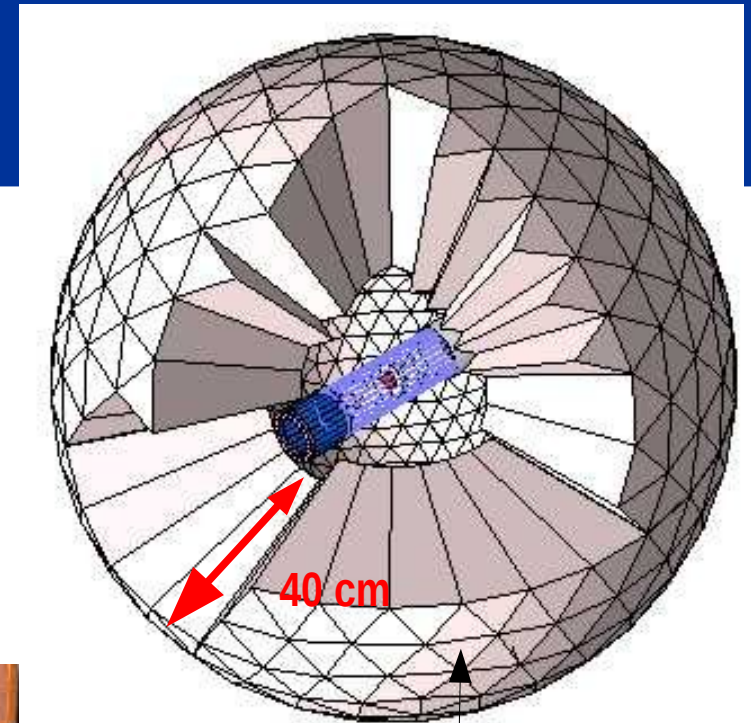
672 Cristaux de NaI(Tl) + PM

- Couverture 93% 4π stéradians

$\sim 16 X_0 \rightarrow$ Photons moyenne E_n

Détecteurs nomade

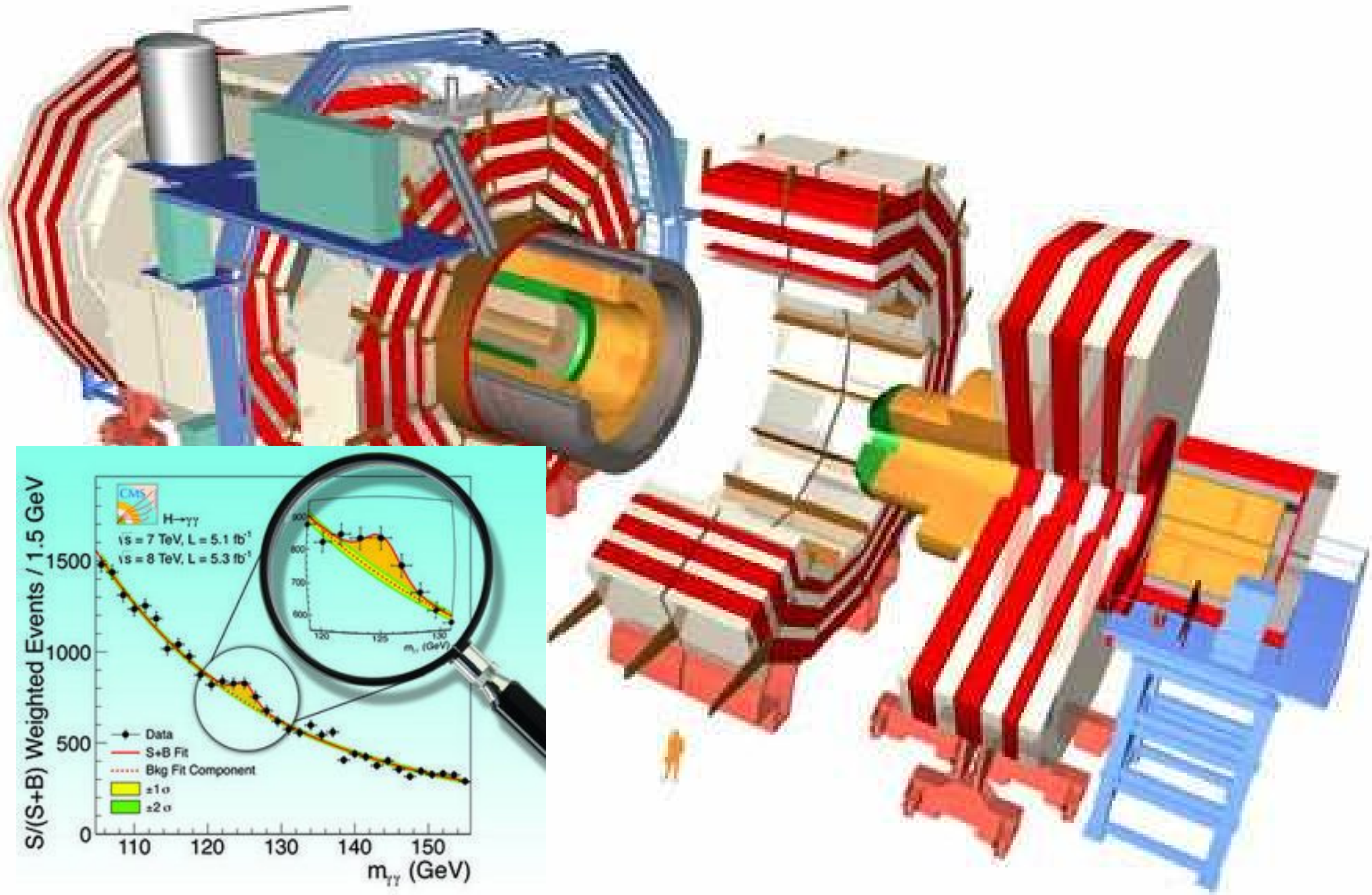
- SLAC puis DESY, puis Mayence.



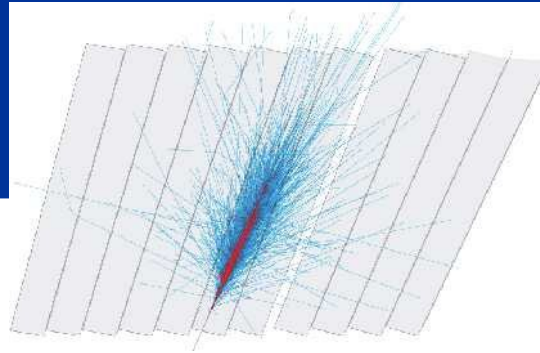
Cristaux pyramide tronquées



Tubes photomultiplicateurs



CMS ECAL



PbWO₄

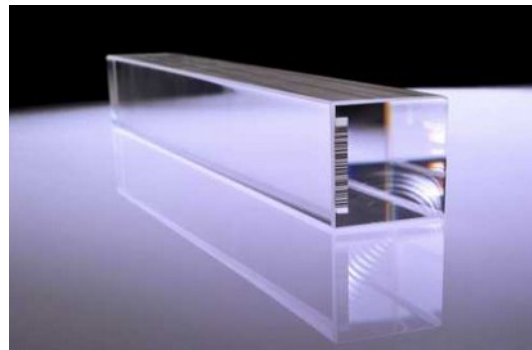
- $X_0 = 0,89$ cm (Pb : 0,56 cm)
- $R_M = 2,2$ cm

Plus :

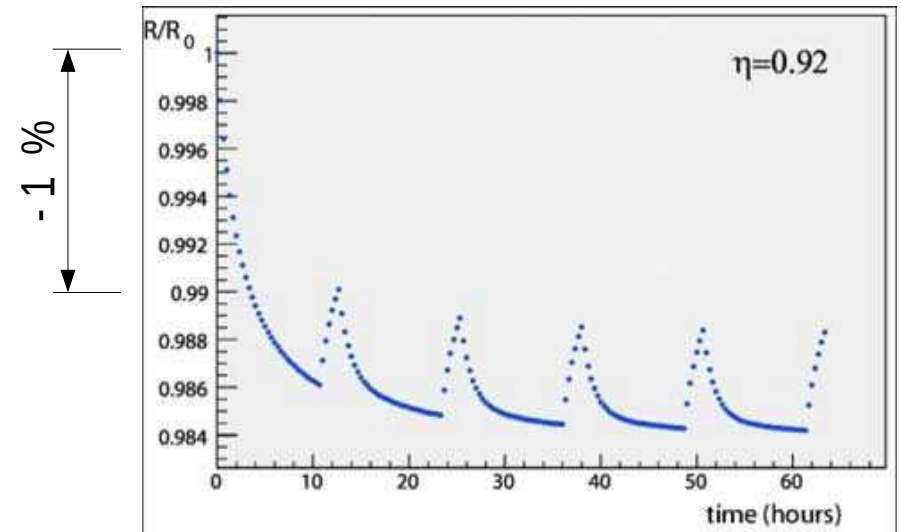
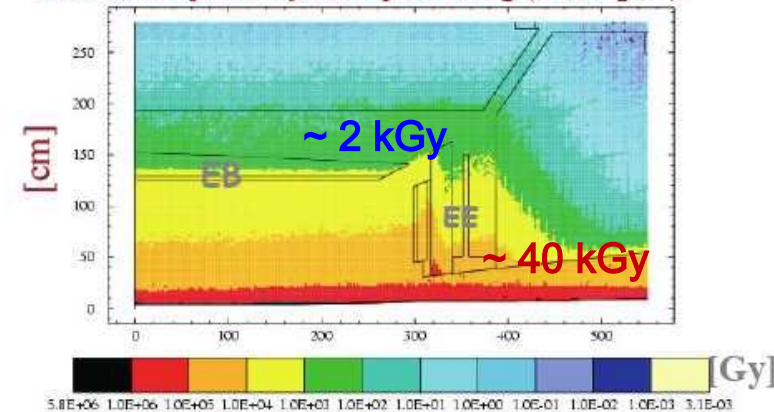
- Excellente résolution en E
- Calorimètre compact (longueur du cristal 23cm pour 26 X_0)
- Gerbe très compacte
- Rapidité (80% de la lumière ≤ 15 ns)
- Résistance aux radiations (105Gy)

Moins :

- Faible rendement : 150 γ /MeV
- Sensibilité à la t° (-1,9% / $^\circ\text{C}$) & radiations

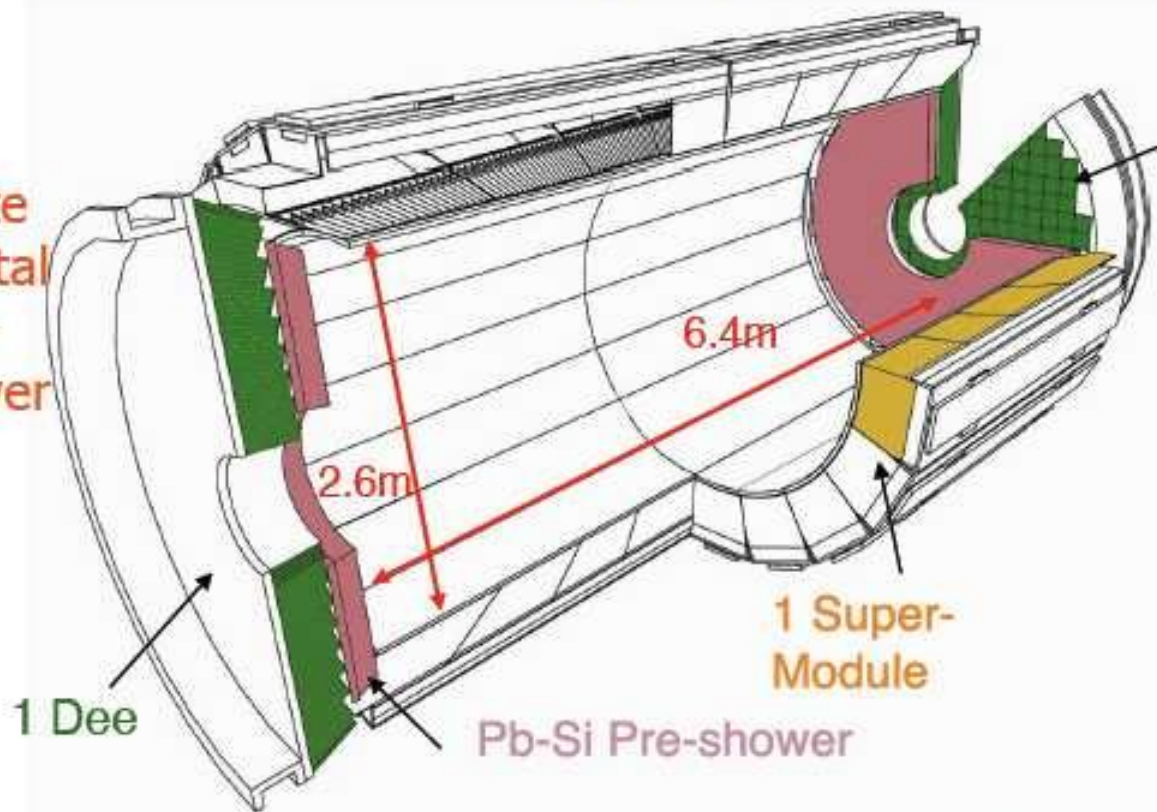


Total dose after 10 years of running ($5 \times 10^5 \text{ pb}^{-1}$)



CMS ECAL (EM) design

Homogenous
Lead Tungstate
(PbWO_4) Crystal
Calorimeter +
Pb-Si Preshower



1 Endcap
Super-Crystal

Crystals are
projective and
positioned
pointing slightly
off the IP to
avoid cracks.



Barrel (EB):

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

Endcap (EE):

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

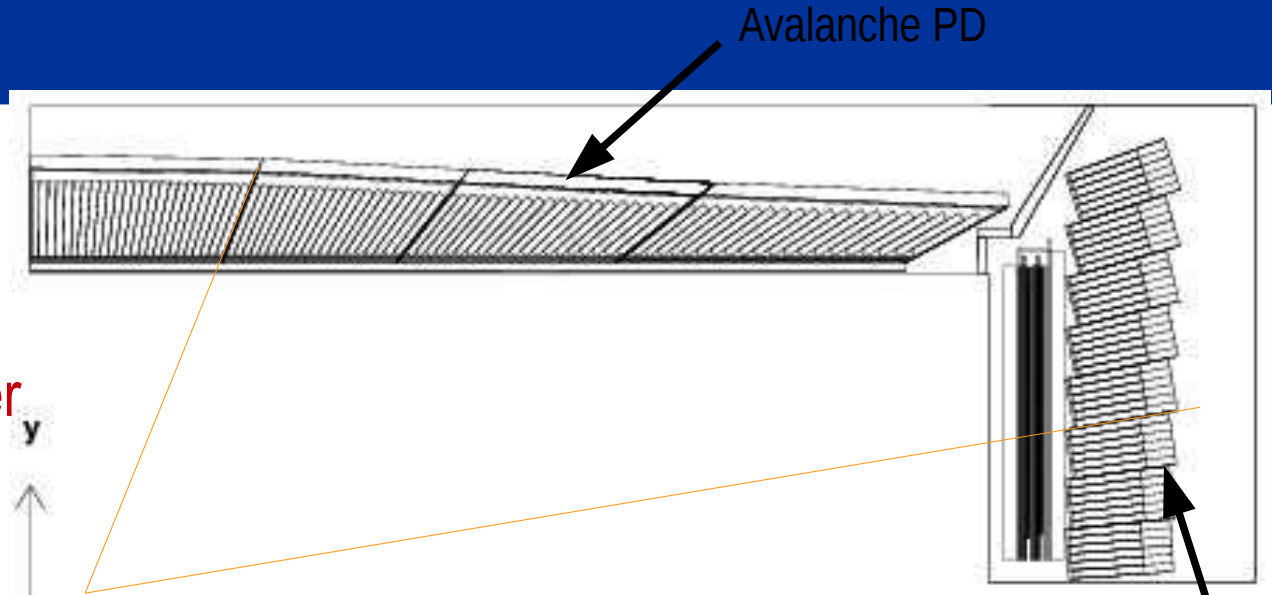
Preshower (ES):

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

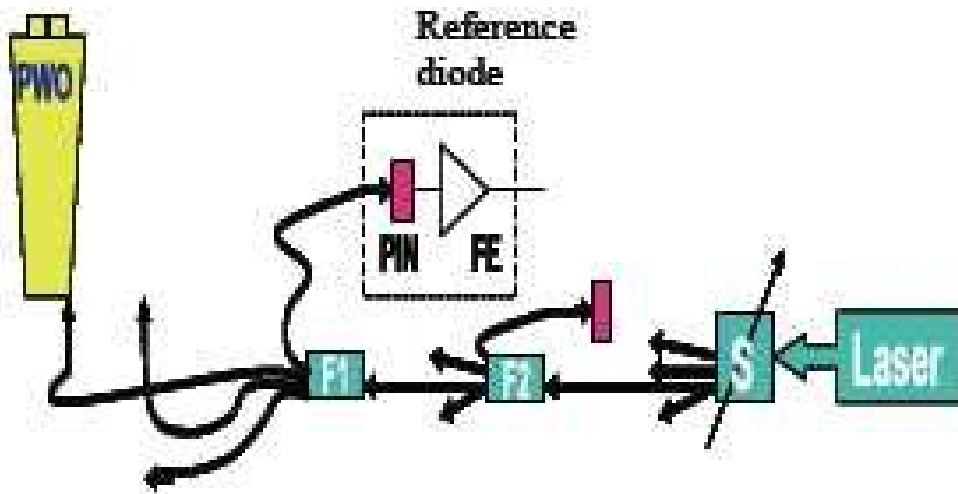
CMS ECAL

2x2 cm²

- 80% des e- dans 1 cristal
- groupe de 3x3 pour le trigger
- Presque pointant



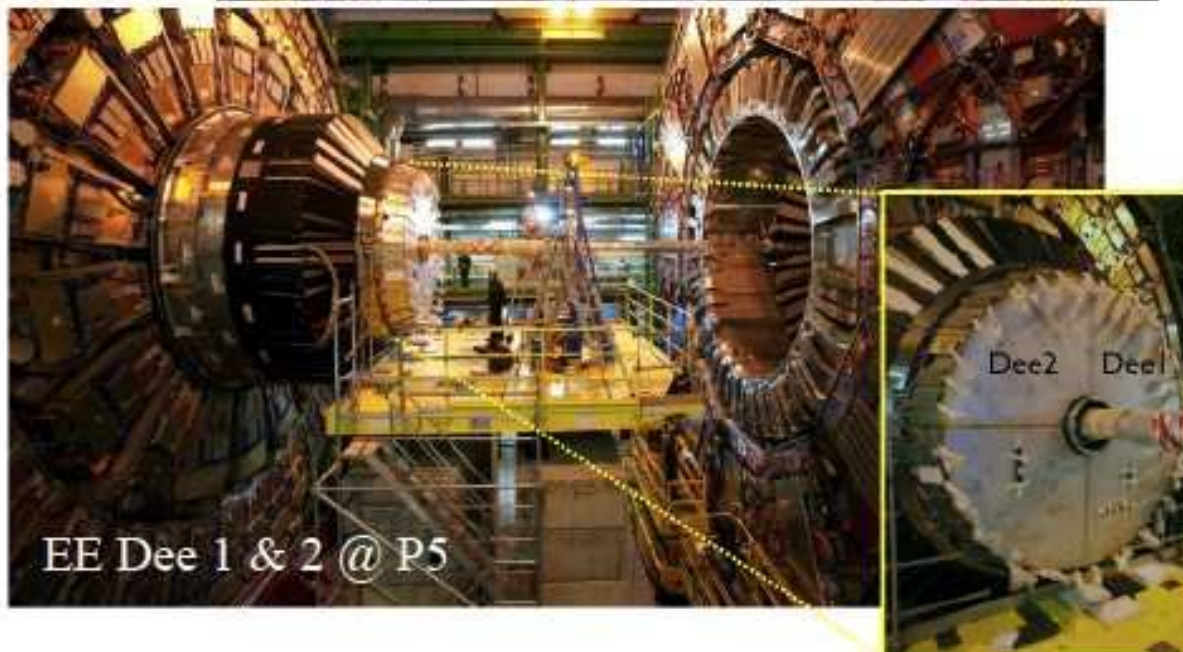
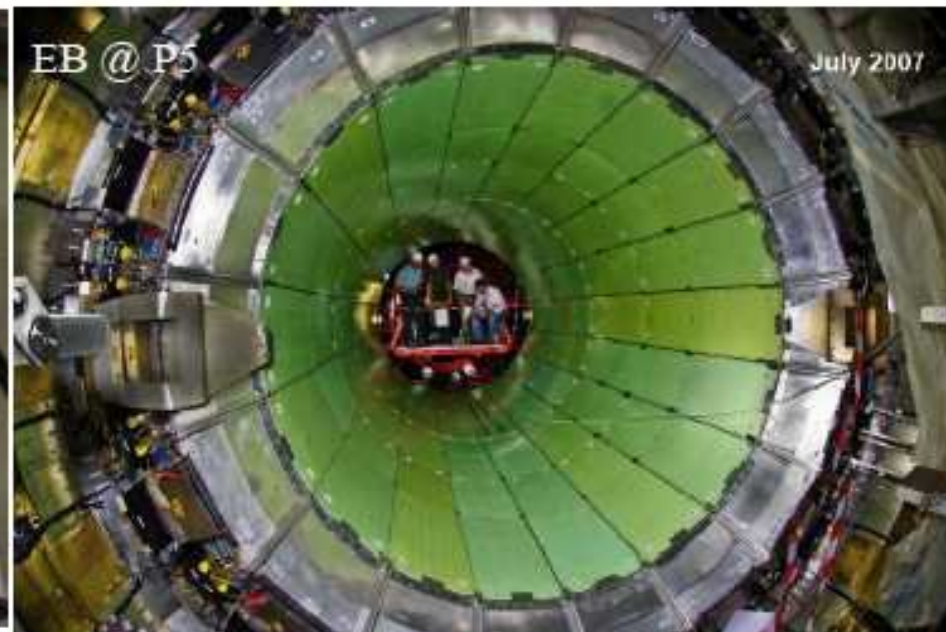
vacuum phototriodes (VPT)
(RadHard)



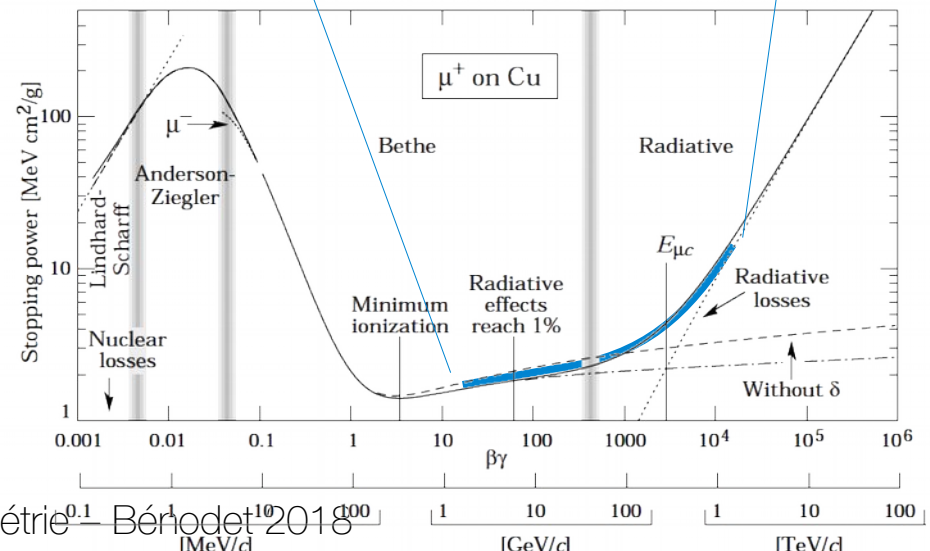
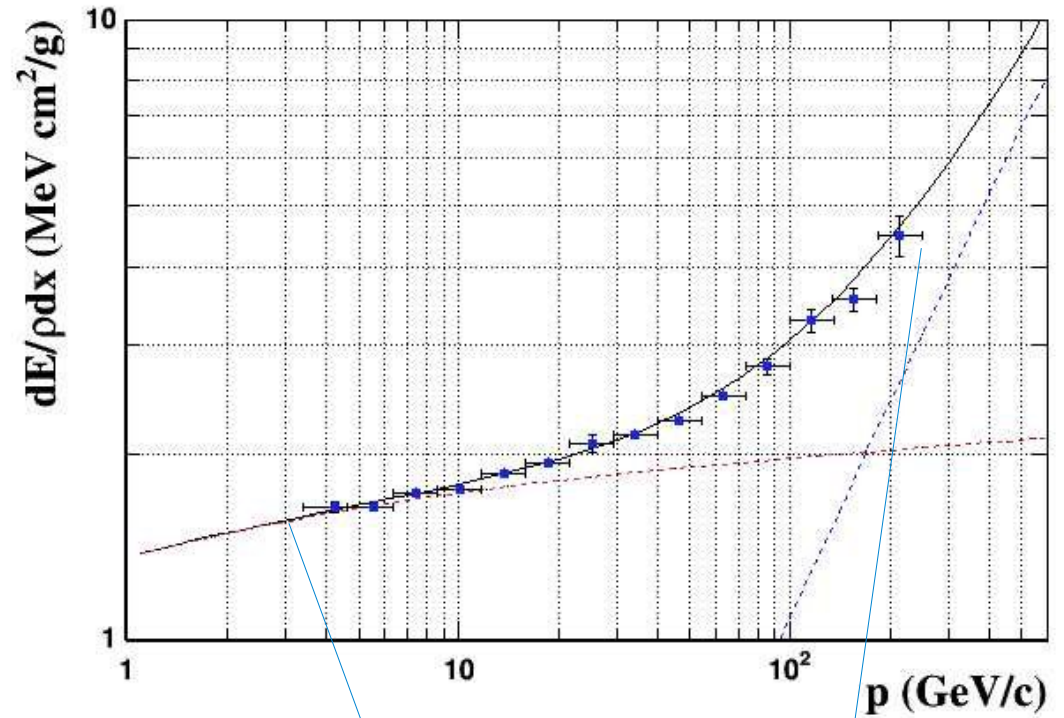
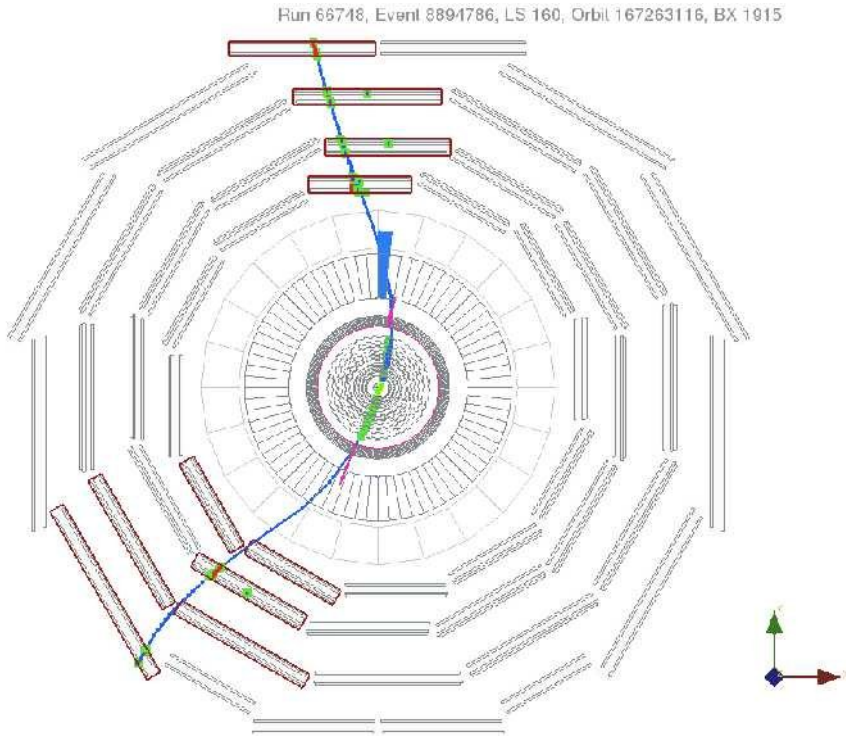
Super Module en Fibres de Carbone



CMS ECAL construction



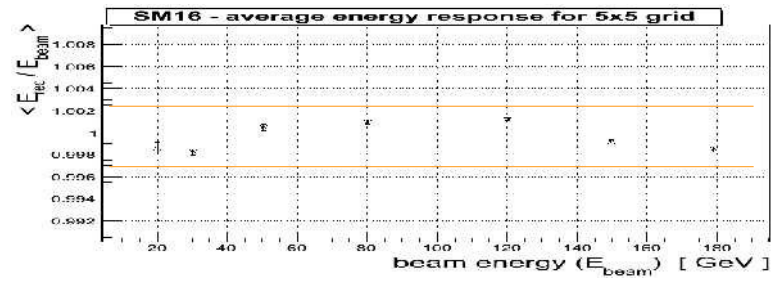
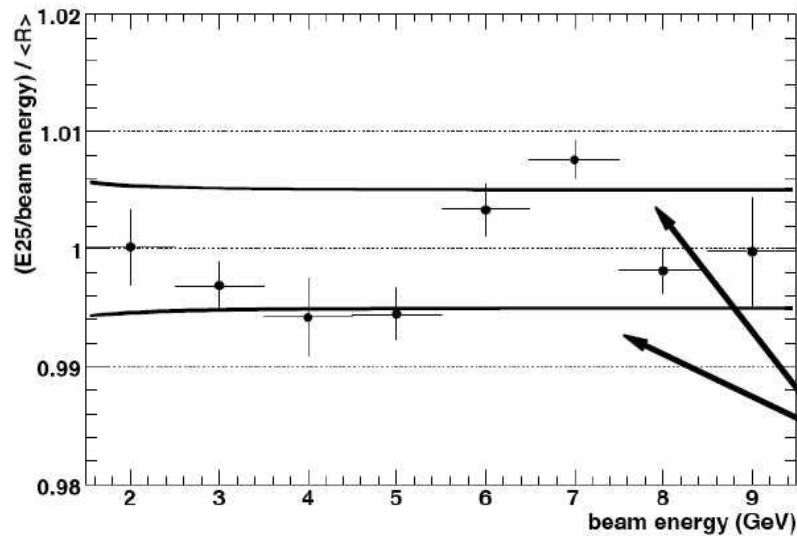
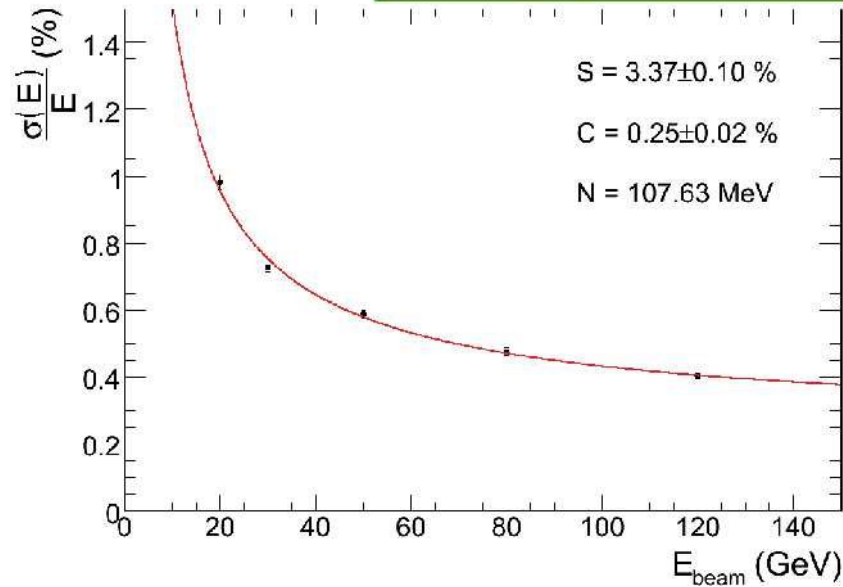
Intercalibration tracker ↔ ECAL



Performances ECAL (tests en faisceau)

CMS (PbWO₄)

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.03}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.005$$



0.2 %

Fermi/Glast

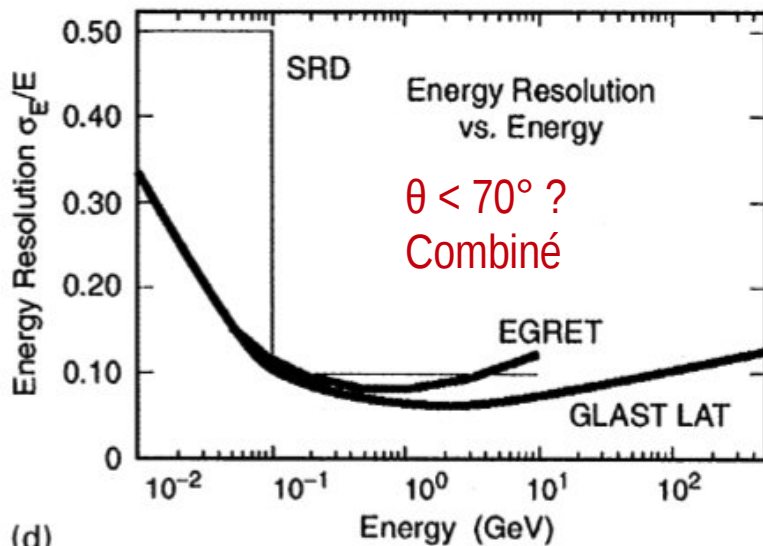
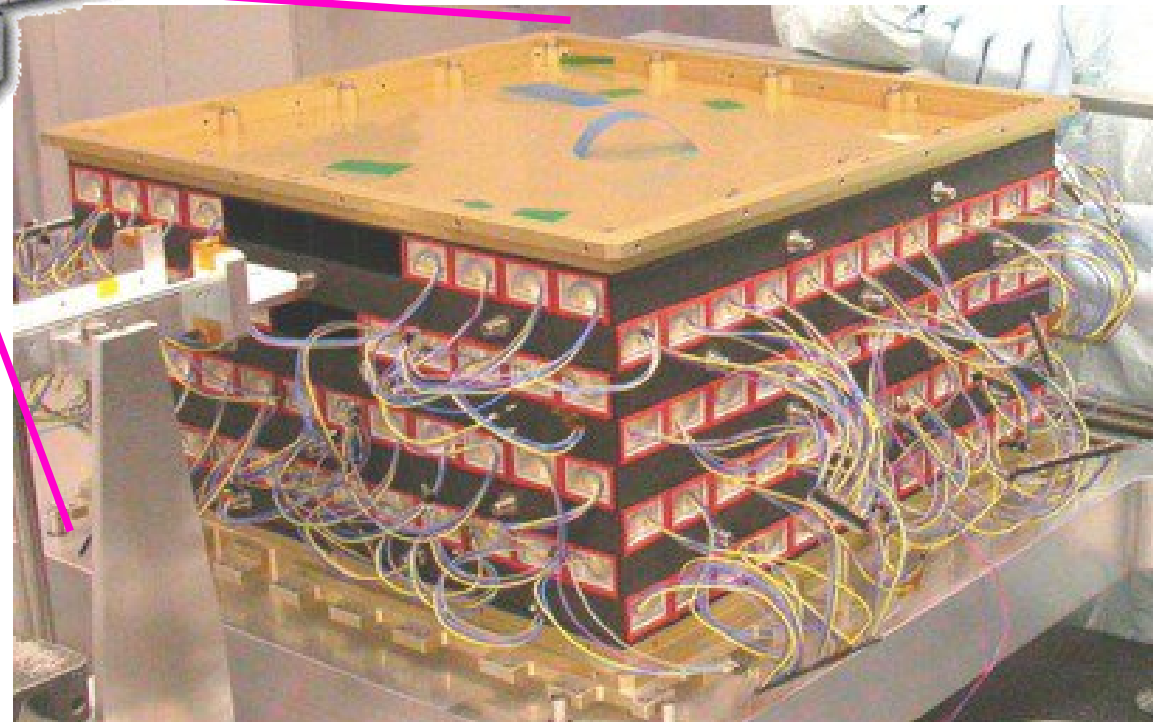
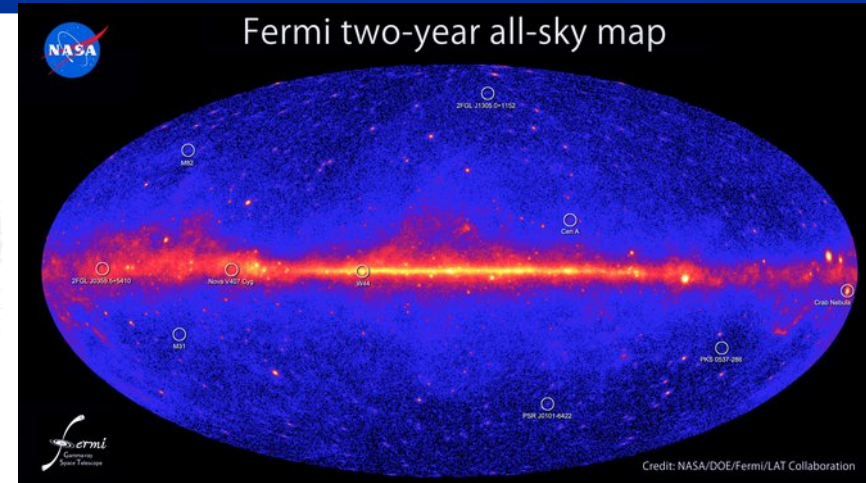
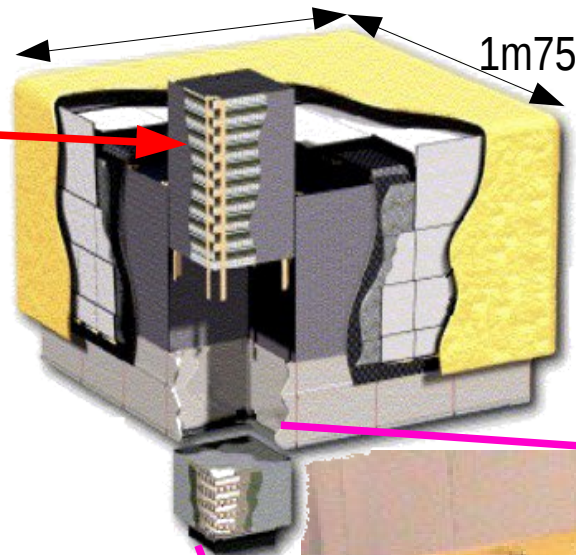
Satellite observation γ de HE

- $20 \text{ MeV} < E_\gamma < 300 \text{ GeV}$

LAT = Large Area Telescope

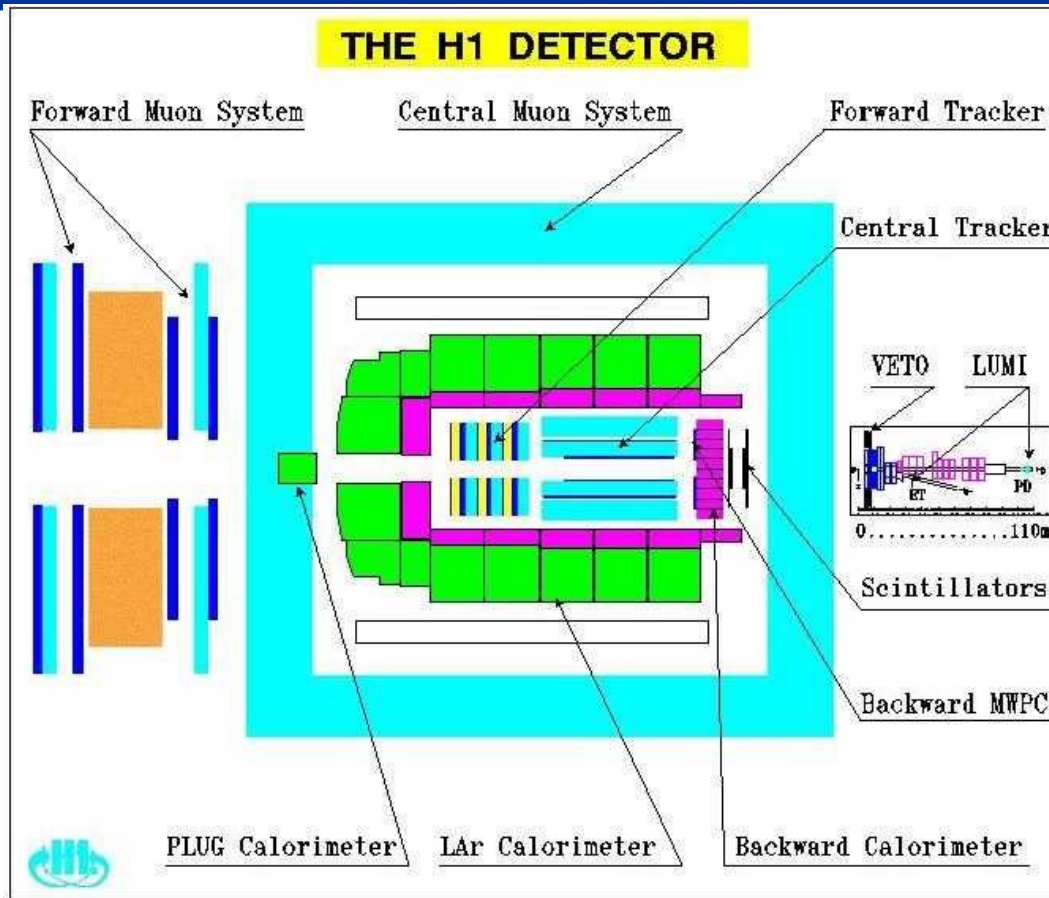
ECAL

- 8 couches de CsI
 - $8,5 X_0 \rightarrow$ fuites
 - Orientation alterné
- Lecture double : APD
 - reconstruction pos.
 - correction atténuation ($\sim 65\%$)



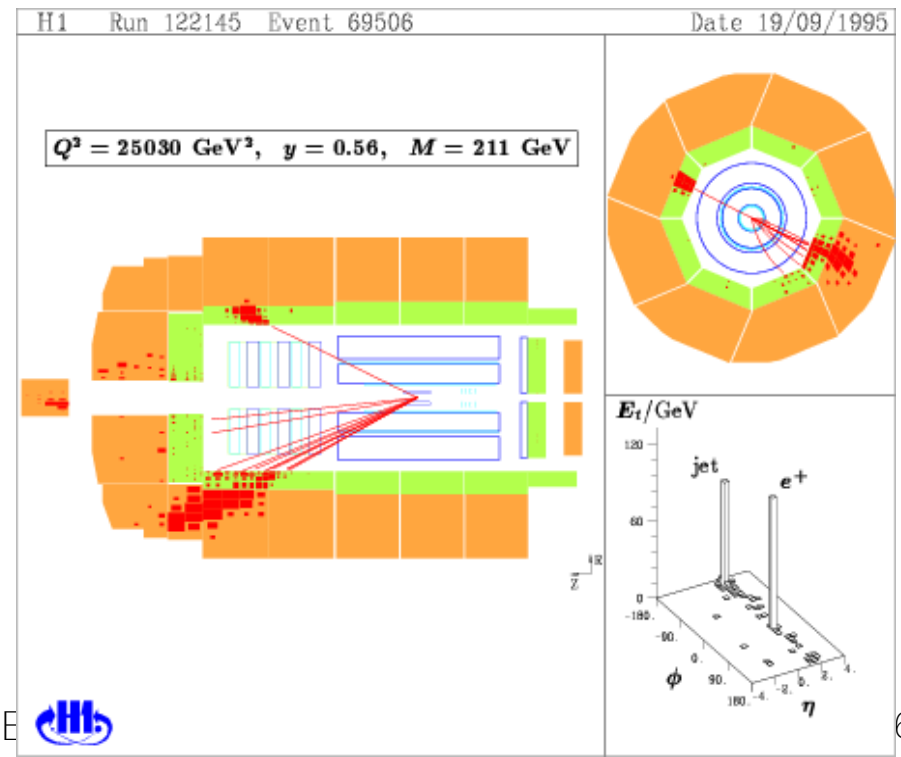
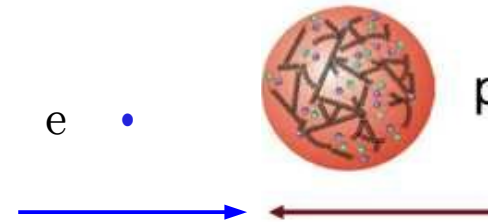
Gas nobles liquéfiés

H1 un détecteur de HERA (asymétrique)

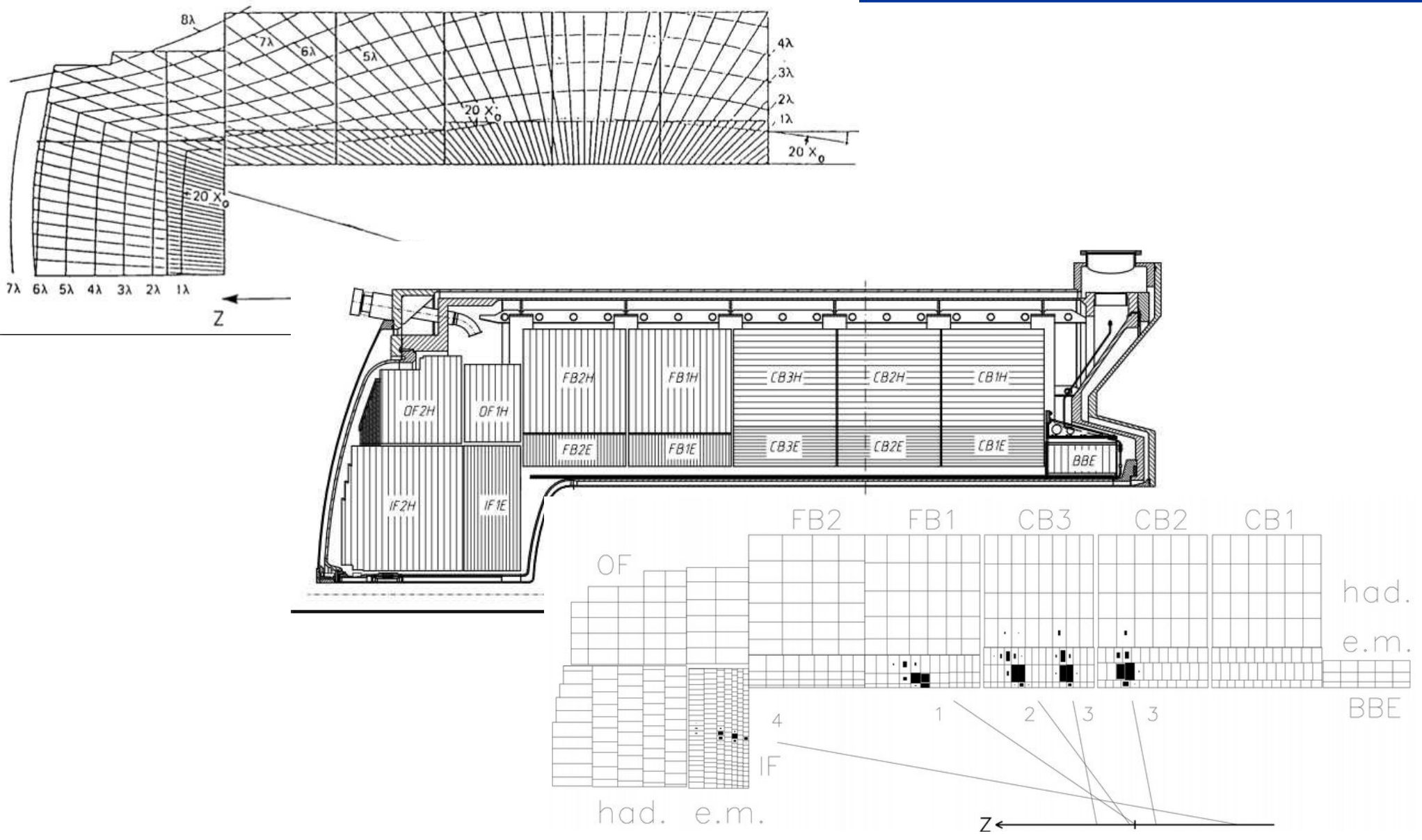


Collisions à HERA
(DESY, Hambourg)

e^{\pm} p
30 → ← 900 GeV



Calorimètre ℓ Ar de H1



NA48

Expérience cible fixe (CERN)

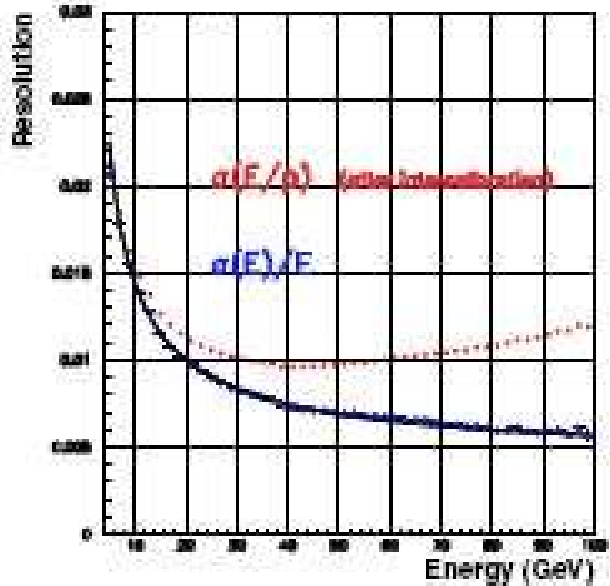
– Physique du K

ℓKr @ 120°K

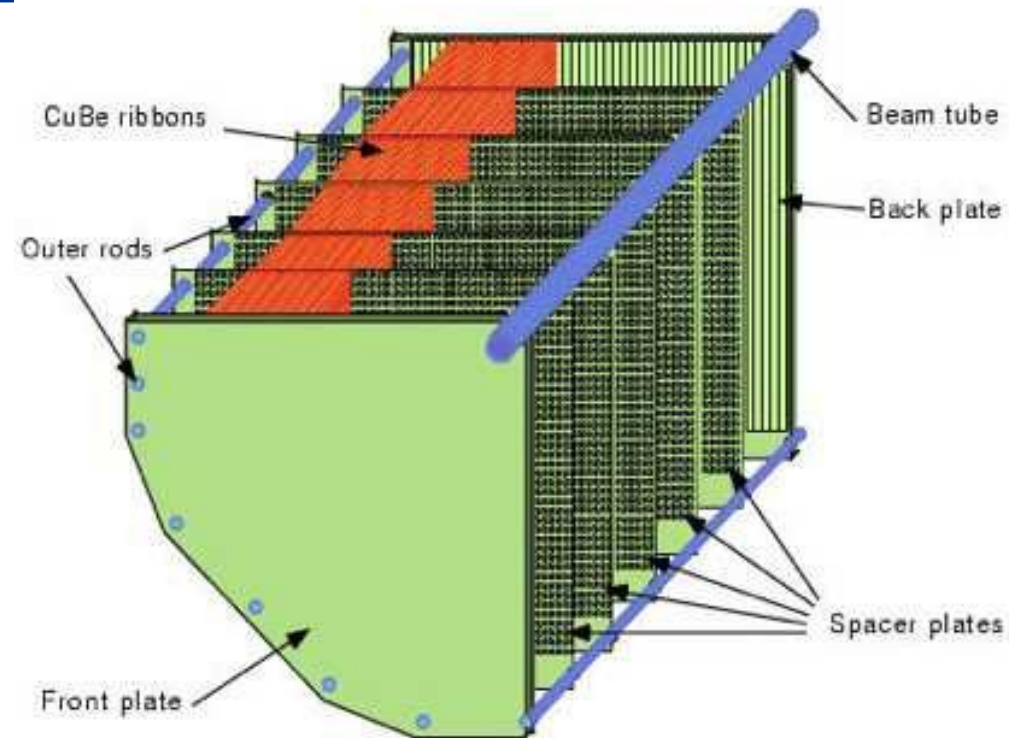
Electrodes en accordéon

$\sigma(t) \sim 220$ ps

– temps de vol. $\delta \leq 0.3$ ns



LKr CALORIMETER ELECTRODE STRUCTURE

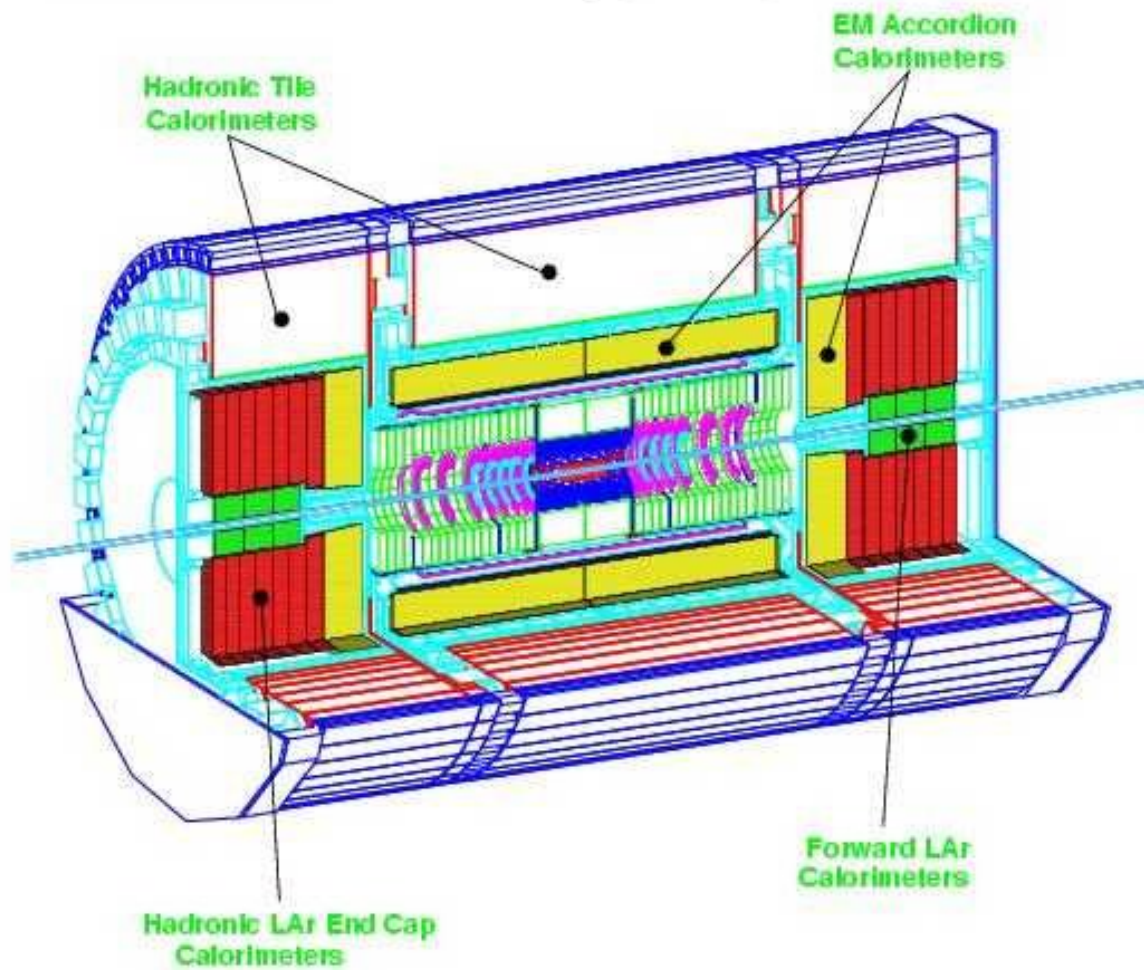


$$\sigma_x \approx \sigma_y \approx 1 \text{ mm}$$

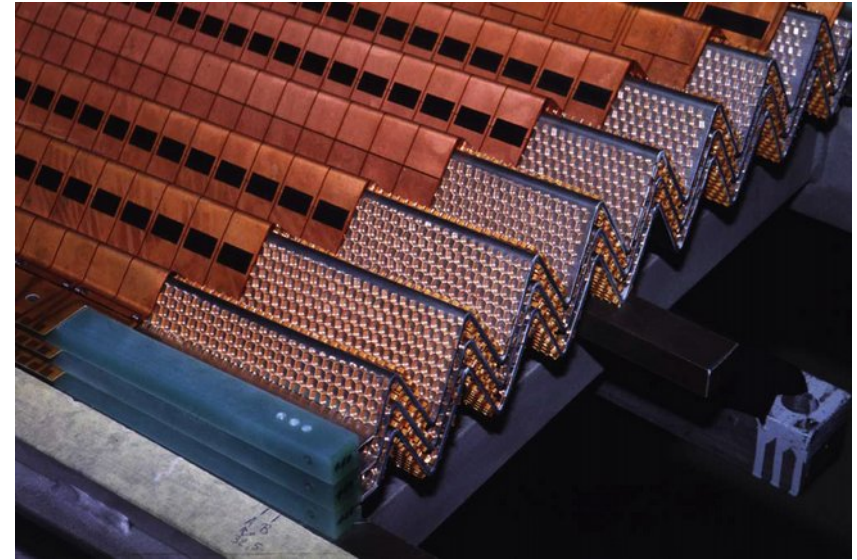
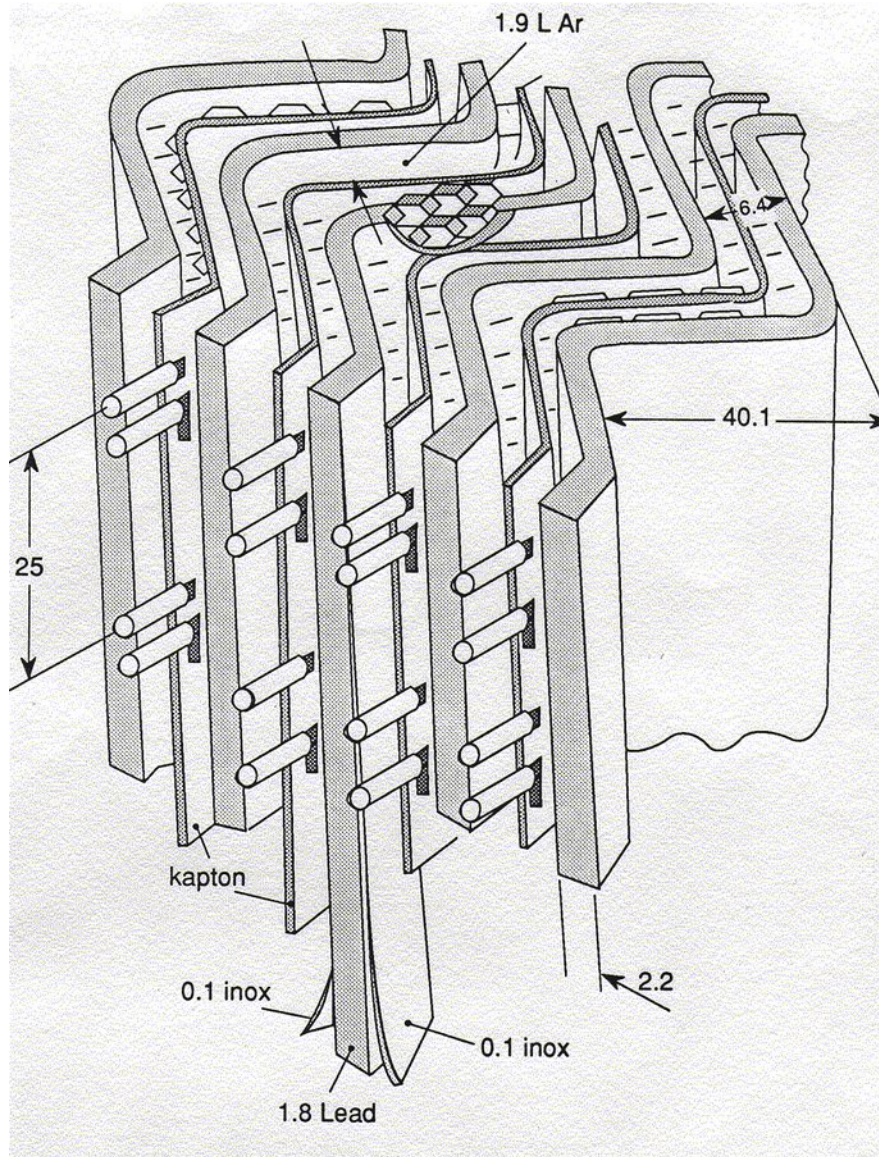
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(3.2 \pm 0.2)\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{(0.09 \pm 0.01)}{E} \oplus (0.42 \pm 0.05)\%$$

ECAL d'ATLAS

ATLAS Calorimetry (Geant)



Atlas ECAL : ℓ Ar



Pbm : Temps de dérive long dans ℓ Ar

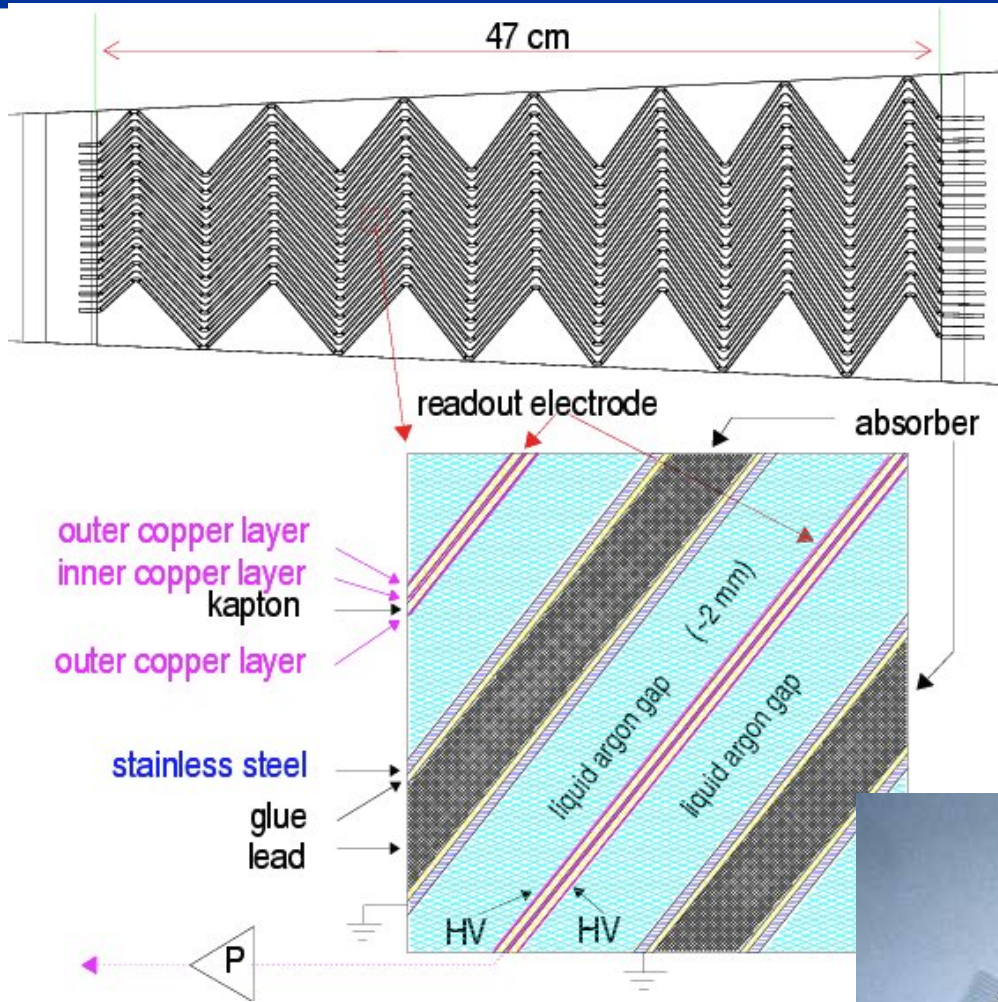
Idée : faire de petits espaces de dérive

– Ar «lourd» $\rightarrow f_{\text{échant.}}$ OK

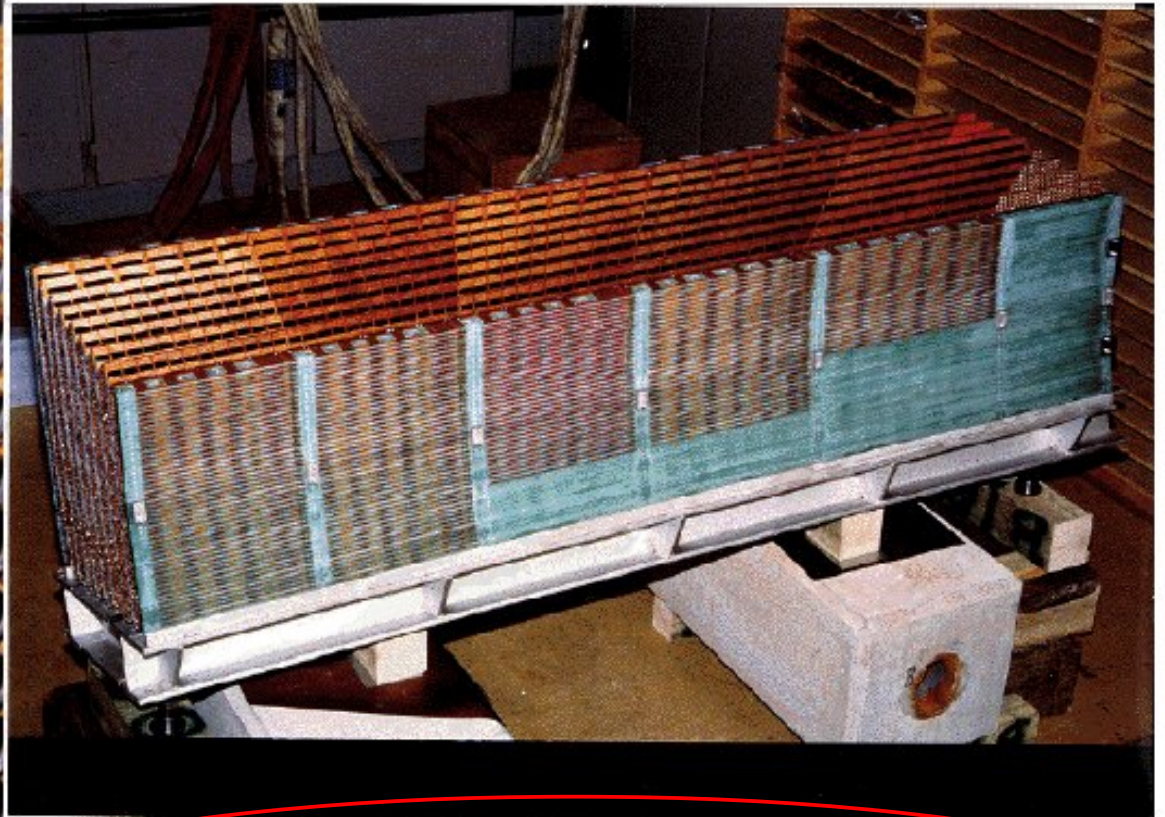
– \rightarrow signal 40 ns

\leftrightarrow 25 ns inter-paquet nom. de LHC

Atlas ECAL

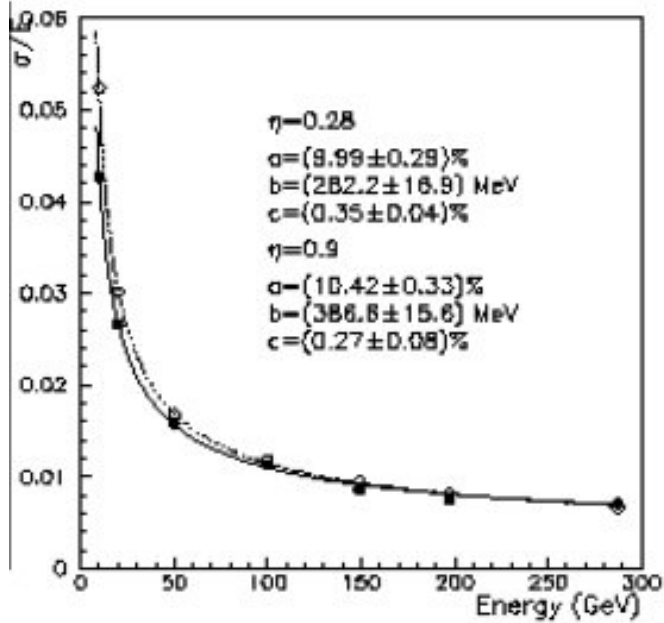


Accordion barrel



2 π detector with no cracks or gaps, no cables inside the detector

Atlas ECAL : performances



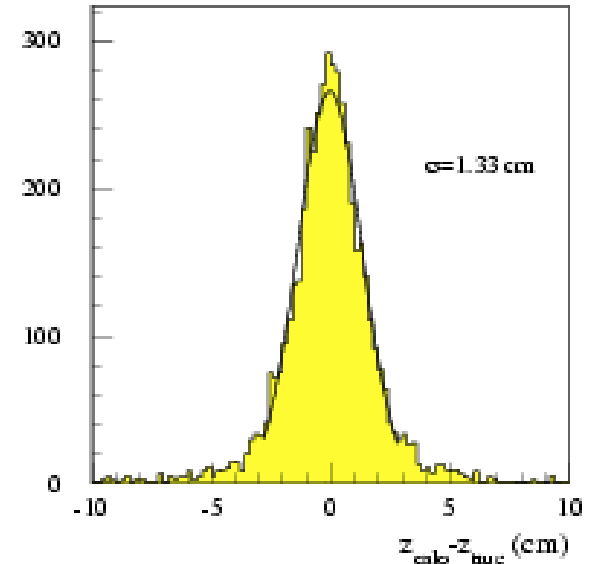
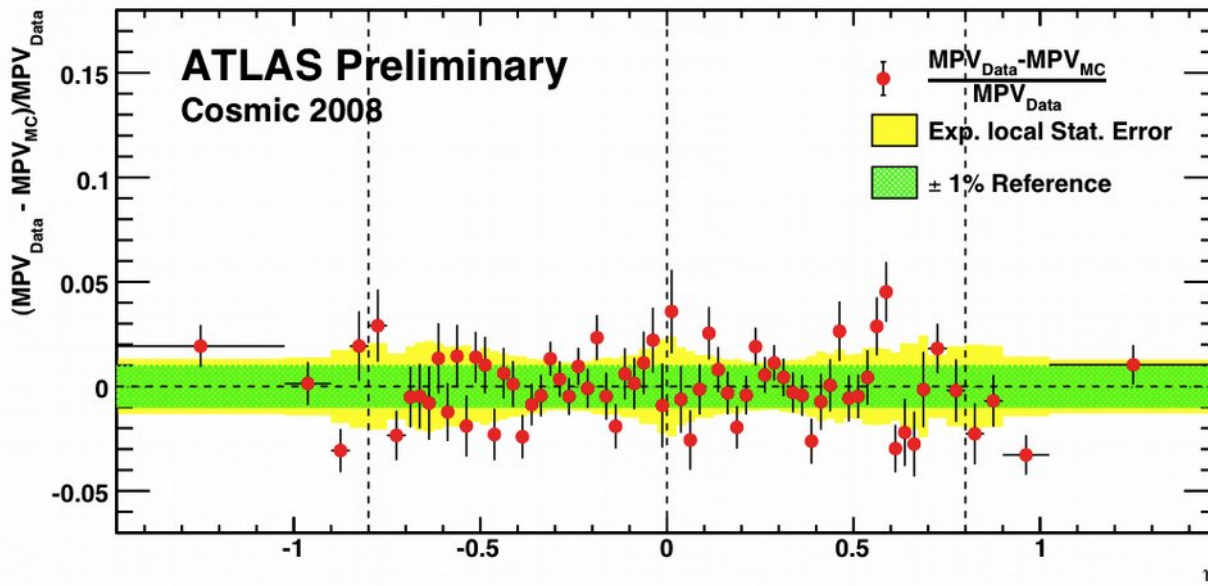
ATLAS (LARG)

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.1}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.007$$

Signal : $H \rightarrow \gamma\gamma$
 Bruit : $pp \rightarrow X + \pi^0$
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

3 long segmentations :
 → Reconstruction de l'angle :
 $\sigma(\theta) = 50 \text{ mrad} / \sqrt{E}$

intercalibration

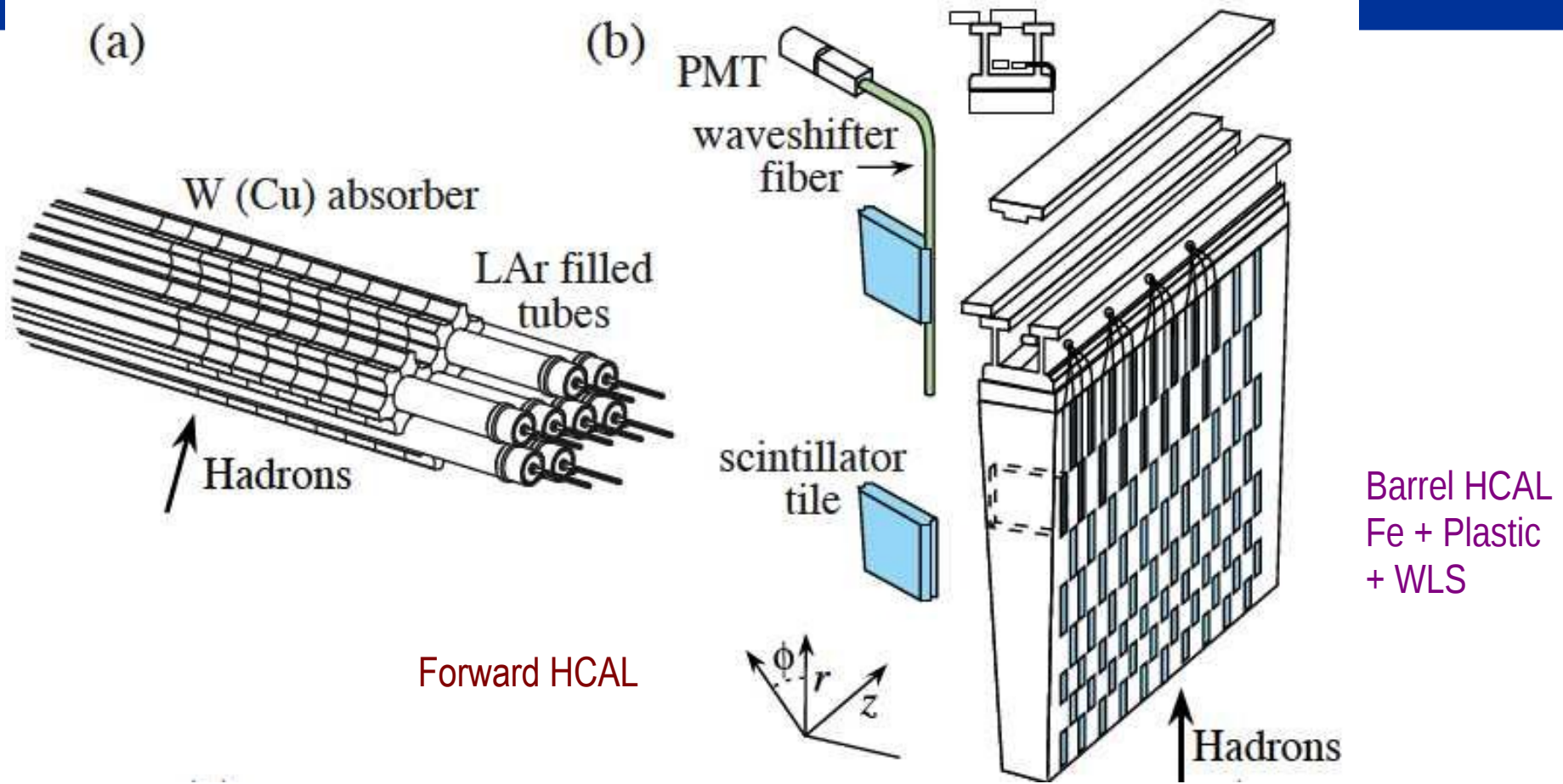


Quelques performances de ECAL

Technology (Experiment)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16-18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO ₄ (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20-30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20-30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

HCAL CMS & Atlas

ATLAS HCAL



En test en faisceau de π : $52.9\%/\sqrt{E} \oplus 5.7\%$

HCAL : CMS & Atlas

	ATLAS	CMS
Technology		
Barrel / Ext. Barrel	14 mm iron / 3 mm scint.	50 mm brass / 4 mm scint.
End-caps	25 mm (front) - 50 mm (back) copper / 8.5 mm LAr	80 mm brass / 4 mm scint.
Forward	Copper (front) - Tungsten (back) 0.25 - 0.50 mm LAr	4.4 mm steel / 0.6 mm quartz
# Channels		
Barrel / Ext. Barrel	9852	2592
End-caps	5632	2592
Forward	3524	1728
Granularity ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		
Barrel / Ext. Barrel	0.1 x 0.1 to 0.2 x 0.1	0.087 x 0.087
End-caps	0.1 x 0.1 to 0.2 x 0.2	0.087 x 0.087 to 0.35 x 0.028
Forward	0.2 x 0.2	0.175 x 0.175
# Longitudinal Samplings		
Barrel / Ext. Barrel	Three	One
End-caps	Four	Two
Forward	Three	Two
Absorption lengths		
Barrel / Ext. Barrel	9.7 - 13.0	5.8 - 10.3 10 - 14 (with Coil / HO)
End-caps	9.7 - 12.5	9.0 - 10.0
Forward	9.5 - 10.5	9.8

TB single π : $52.9\%/\sqrt{E} \oplus 5.7\%$

Single π ECAL+HCAL : $110\%/\sqrt{E} \oplus 7.3\%$
 $84.7\% / \sqrt{E} \oplus 7.4\%$ corrected for ECAL/HCAL non lin.

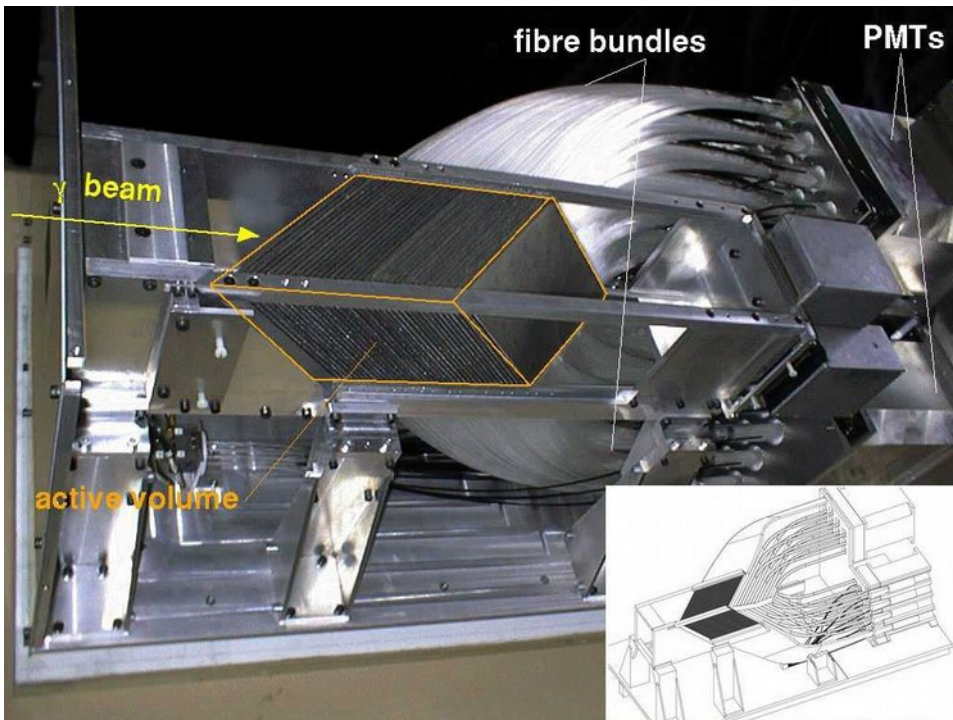
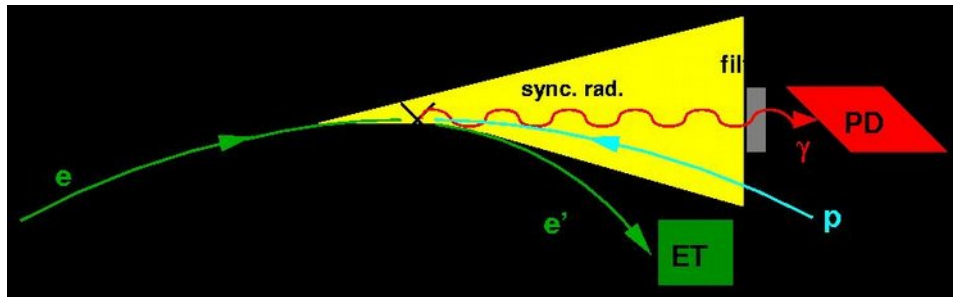
MET fits

ATLAS using super cluster $\rightarrow 37\%/\sqrt{\Sigma E}$

CMS using Part. Flow $\rightarrow 45\% / \sqrt{\Sigma E}$

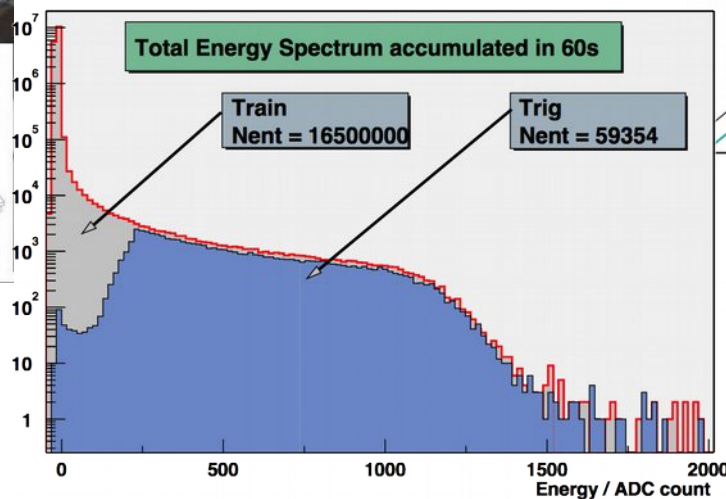
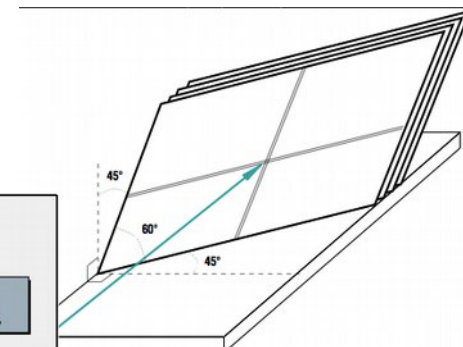
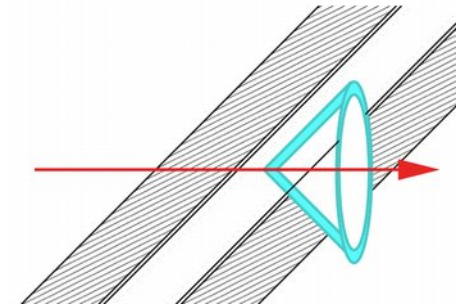
Des calorimètres Čerenkov

Luminomètre de H1

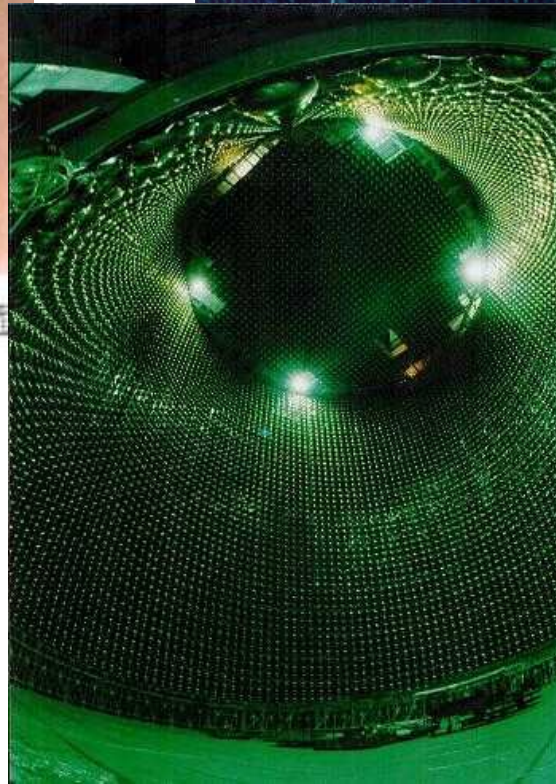
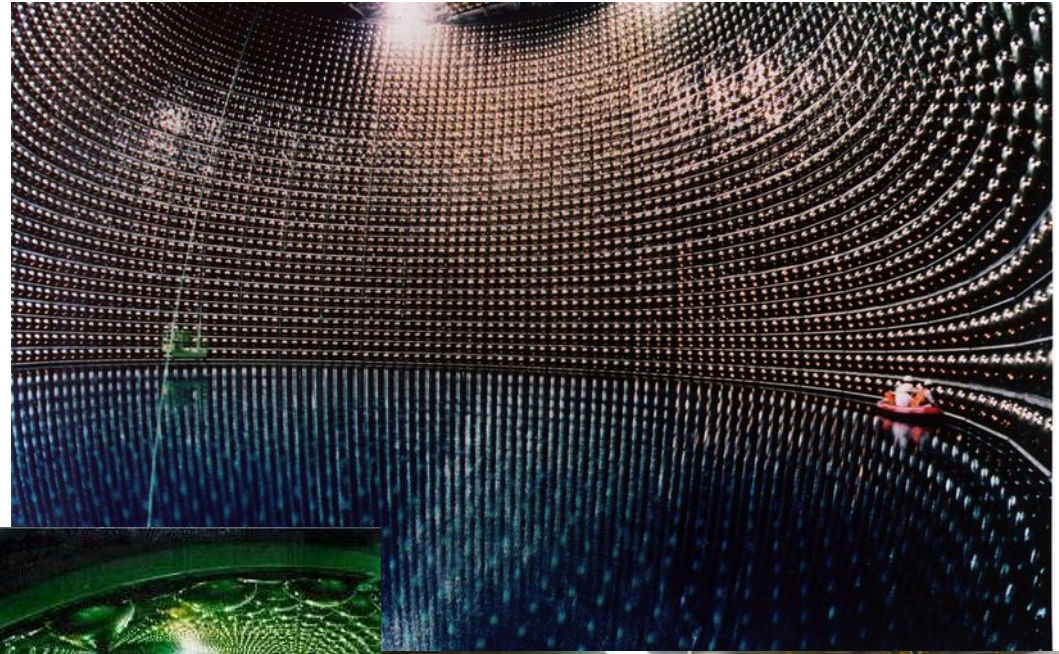
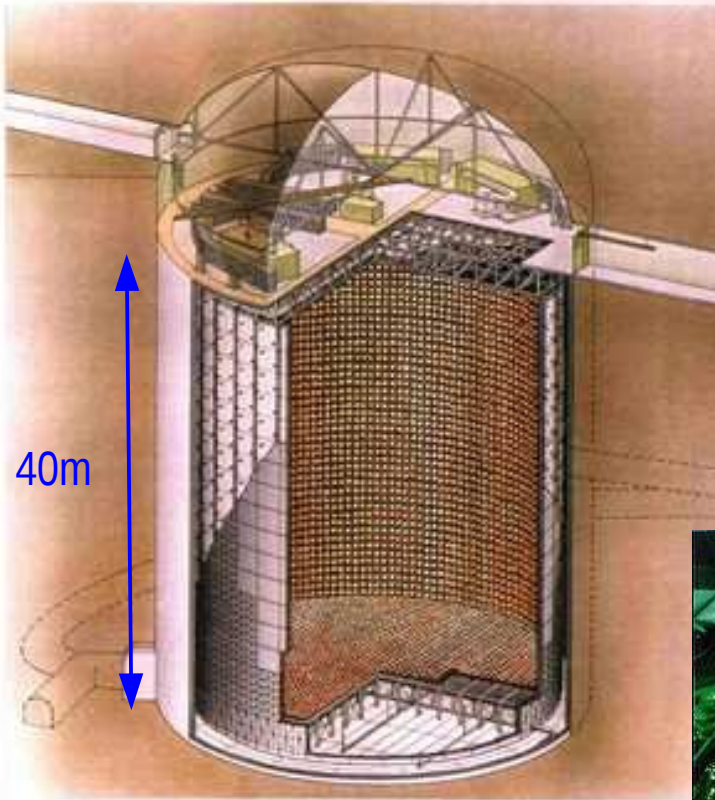


Hodoscope à γ

- Angle fixé
- Fibre de Quartz
- Sensibilité
 - Cœur de gerbe
 - + 1 partie du halo
- 12 voies en x et y
@ 40 MHz

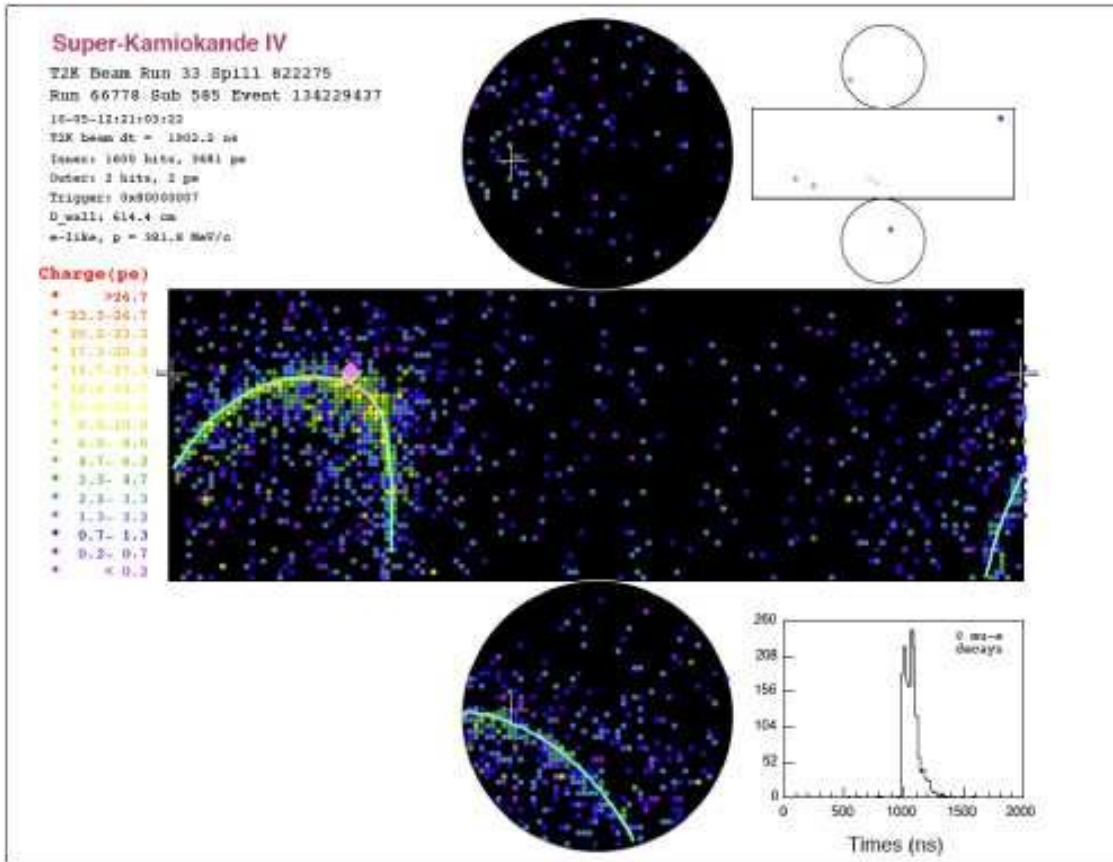


neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



50 kt eau pure
12000 PMTs
(remplacés 1 fois)

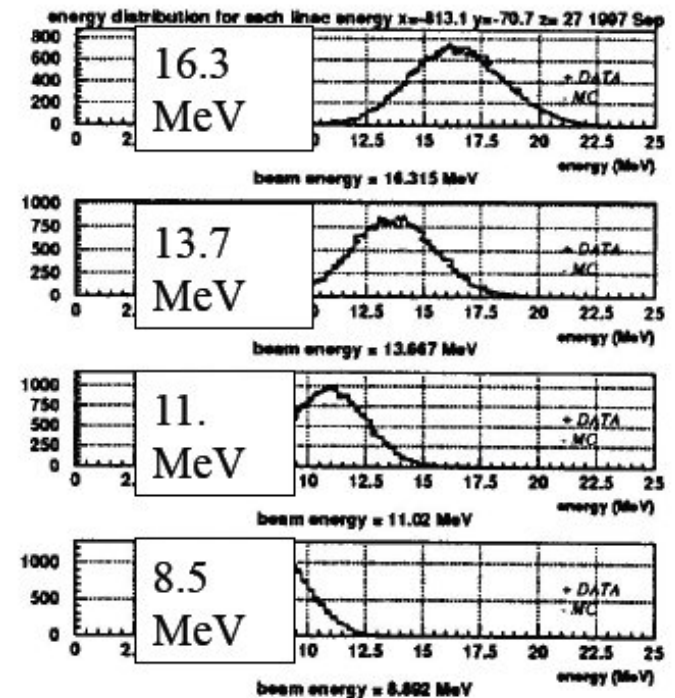
neutrinos : Super Kamiokande 1 détecteur purement Čerenkov



**1 événement d'apparition
d'électron**

$\sigma(E)/E = 2.5\%$ (for 1GeV)
to 16% (for 10MeV)
Energy threshold : 5 MeV

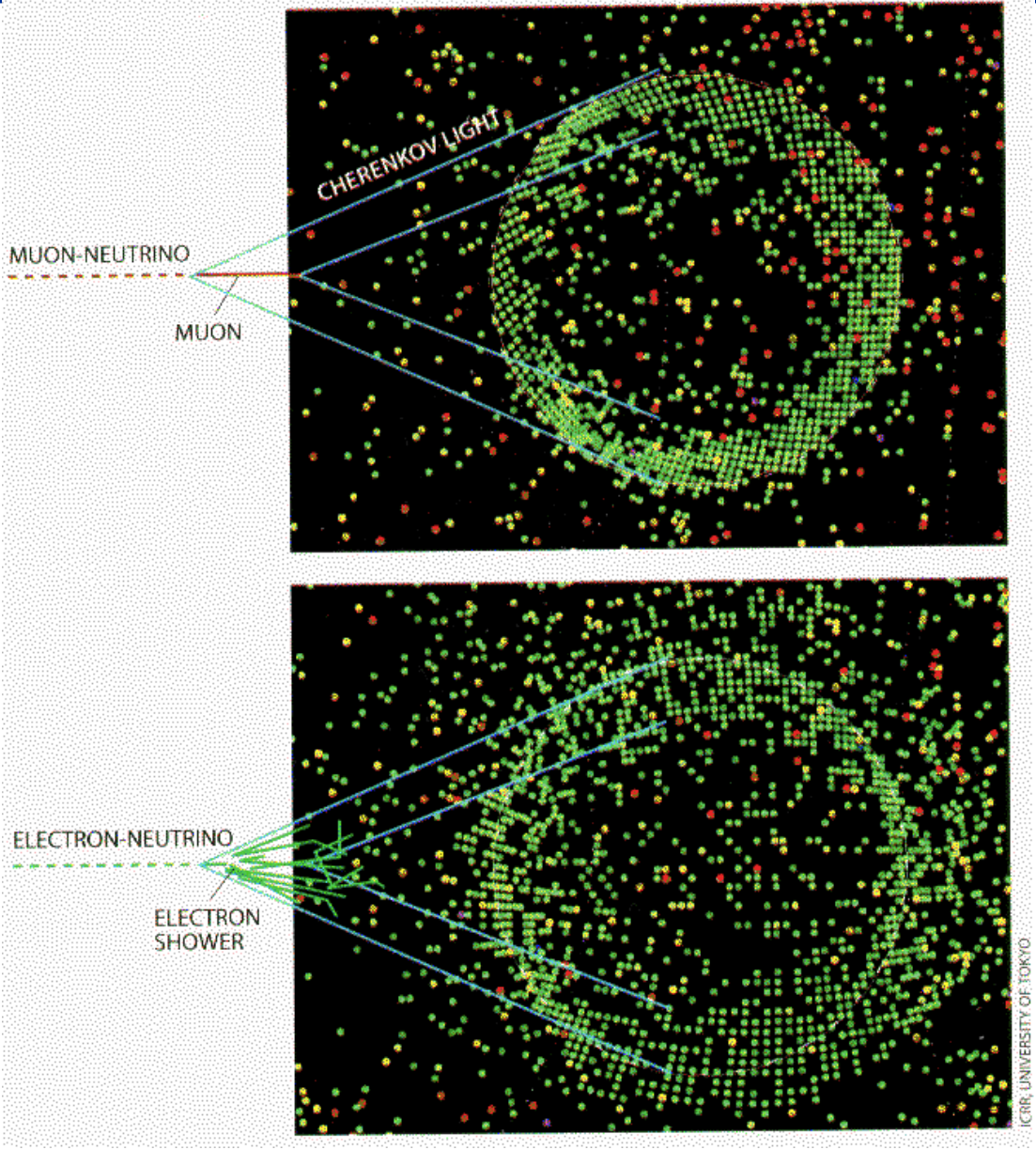
Uniformity and stability of response vs
position and time to $\pm 0.5\%$
to avoid distortions in measured spectrum.



LINAC: injects electrons of 7 different
energies at 6 different positions

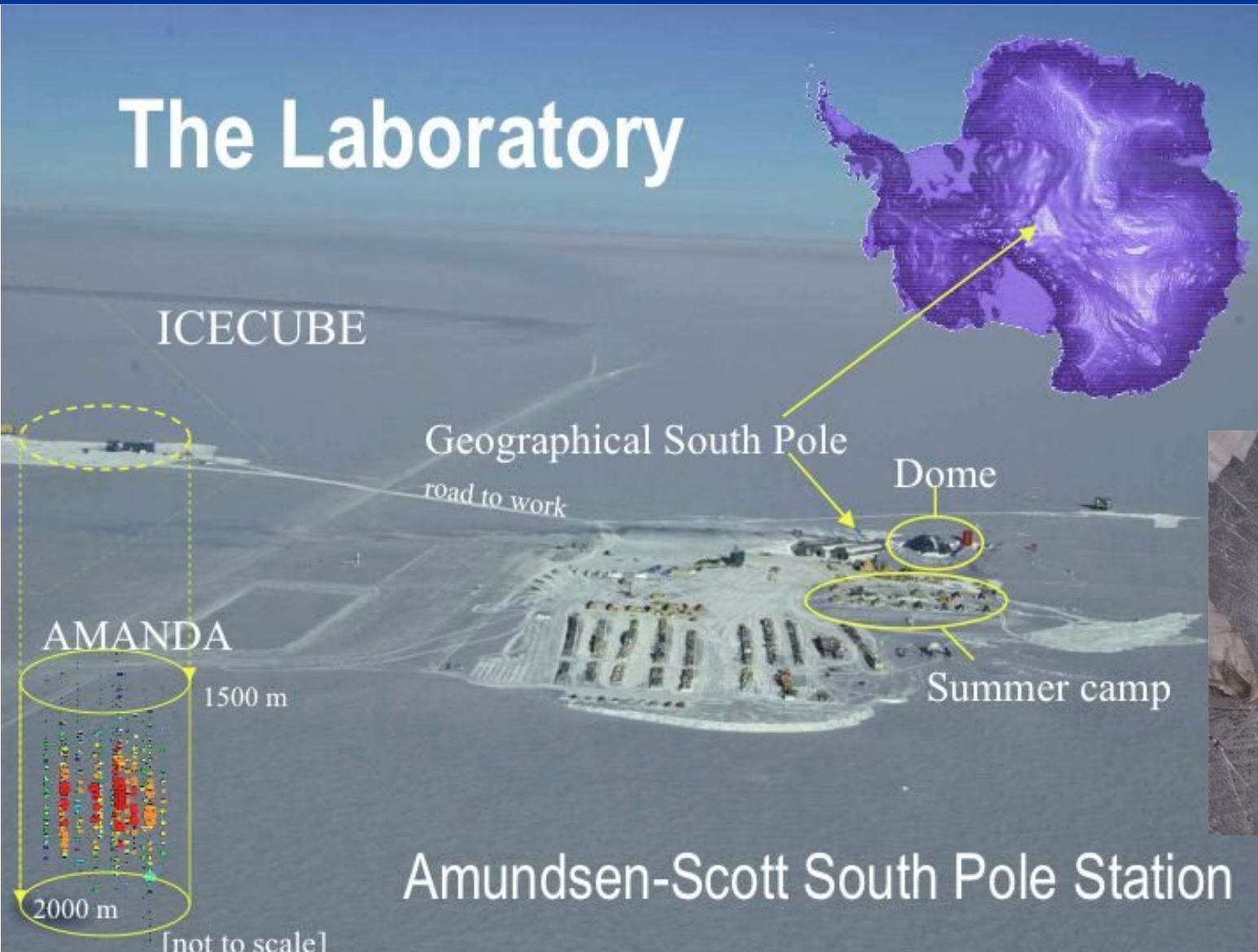
Super-K

Identification de particules

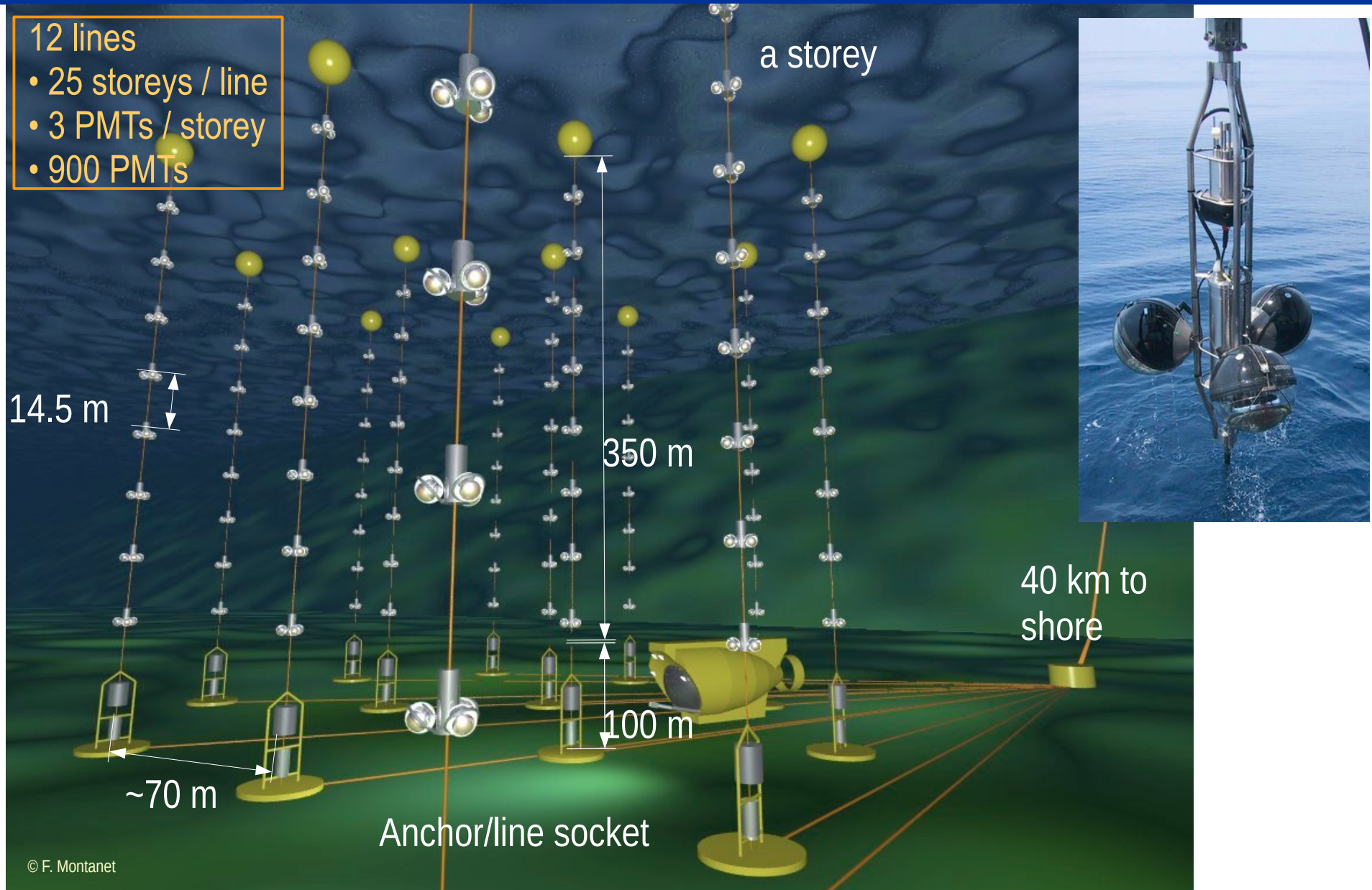


Détection des ν 's : IceCube

The Laboratory



Détection des ν 's : Antares



Bonus...

Après — avant construction

Quelques effets «annexes»

Texas tower

- Réponse disproportionnée à des neutrons
 - neutron \sim MeV dans le senseur, localisé
 - collision élastique n-p
 - \rightarrow signal \sim GeV
- Vu dans les détecteurs gazeux (\supset Hydrogène)
- Vu dans les APD de CMS (pbm de triggers)

Rupture de gain

- Electronique multi-gain
- \triangle intercalibration \rightarrow apparition de pics !



**potentielle
découverte d'une
«nouvelle» physique !**

Quelques considérations pour les ingénieurs (mais pas uniquement!)

La mécanique :

«le calorimètre volant» (en simu)

- Zone mortes
- déformations / précision

L'électronique

- La consommation (power pulsing)
- La dissipation thermique
- les CEM, mise à la masse

La fiabilité sur 10–20 ans

- Usure...
- Accessibilité

Les services

- passage des services
- l'intégration

L'acquisition

- Flux de données
- Redondance

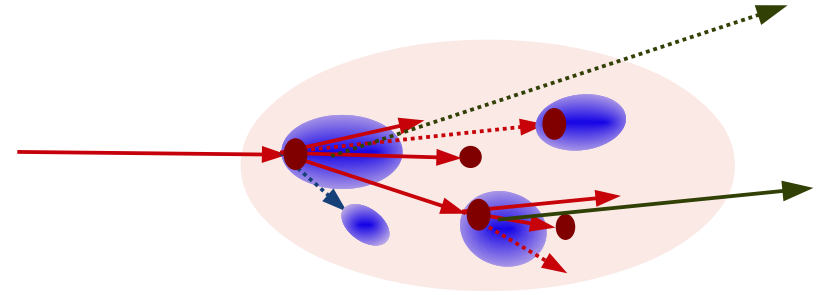
L'intégration

- Coûts
- Risques :
 - la dépendance à 1 fournisseur
 - obsolescence du matériel : déjà «vieux» à l'installation

Techniques d'amélioration de la mesure des gerbes hadroniques

Bilan énergétique d'une gerbe hadronique :

$$E = E_{EM} + E_{tr} + E_n + E_{nucl.} + E_{fuites}$$



$$E_{EM} = \pi^0 \sim 30\% - 60\% \text{ à } 10 - 200 \text{ GeV}$$

(f_{EM} ou F_0)

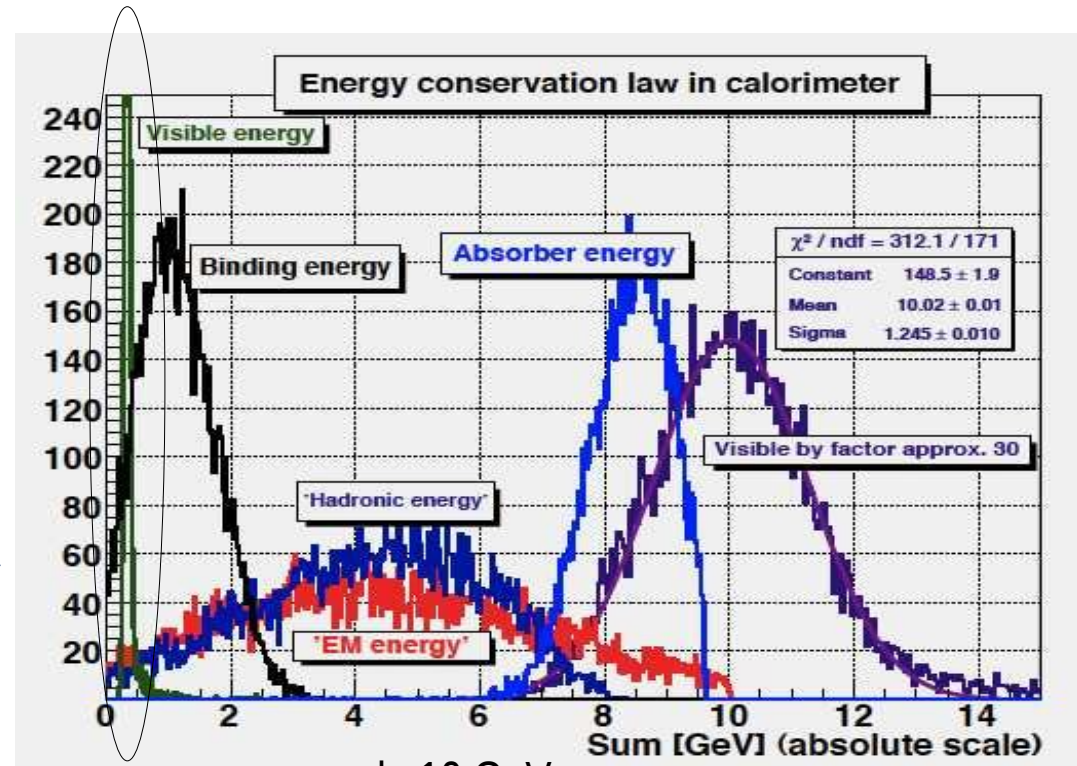
$$E_{tr} = \pi \text{ chargés \& protons}$$

$$E_n = \text{neutrons}$$

$$E_{nucl.} = \text{Energie de liaison nucl.}$$

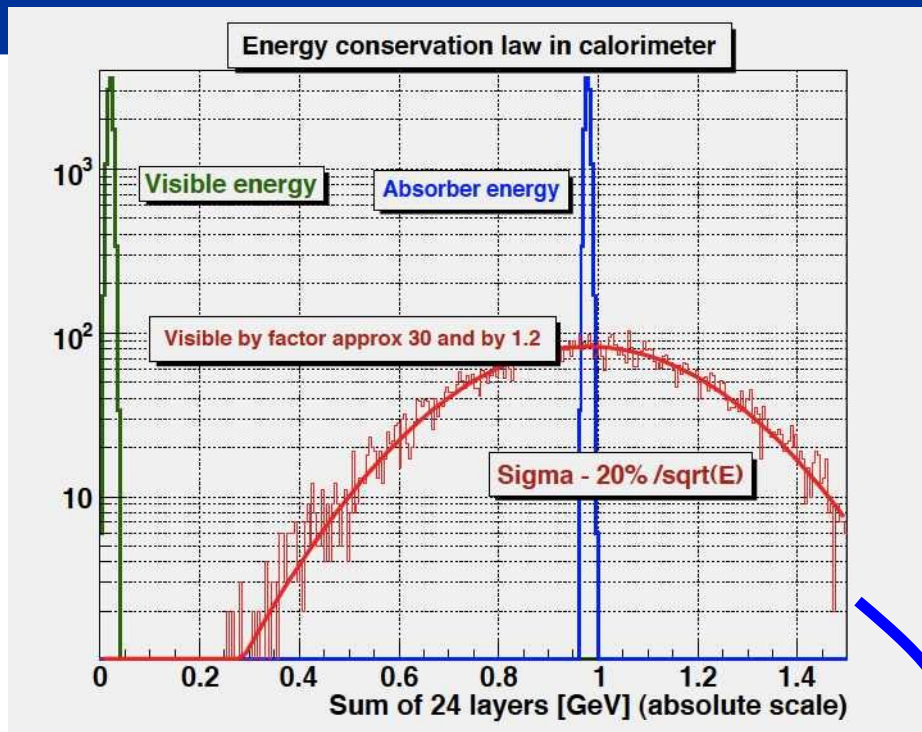
(Binding energy) → Energie perdue
ou «invisible»

$$E_{fuites} = \mu + \nu, \sim 1-2\%$$

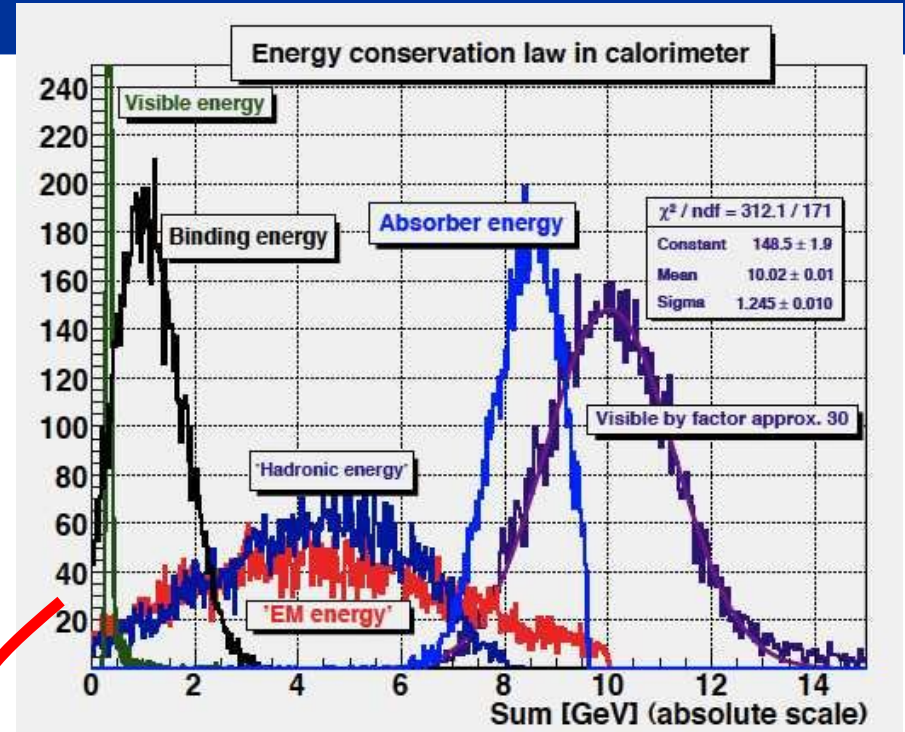


π de 10 GeV
sim. GEANT4

V. Morgunov

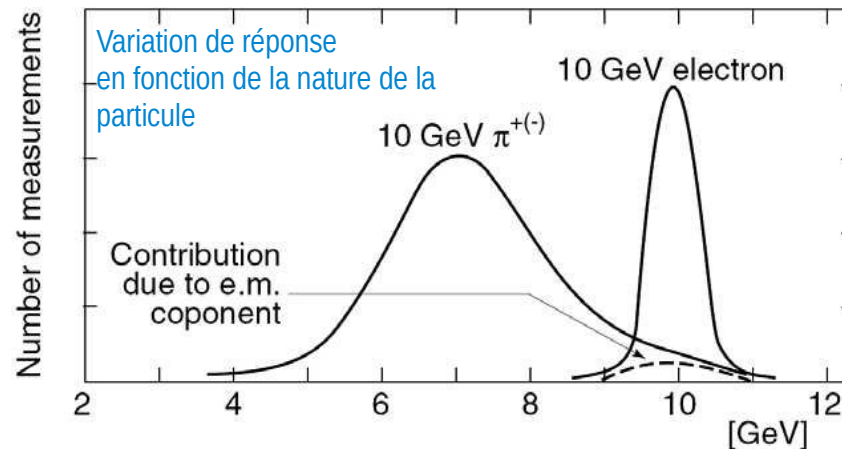


e- de 1 GeV



π de 10 GeV

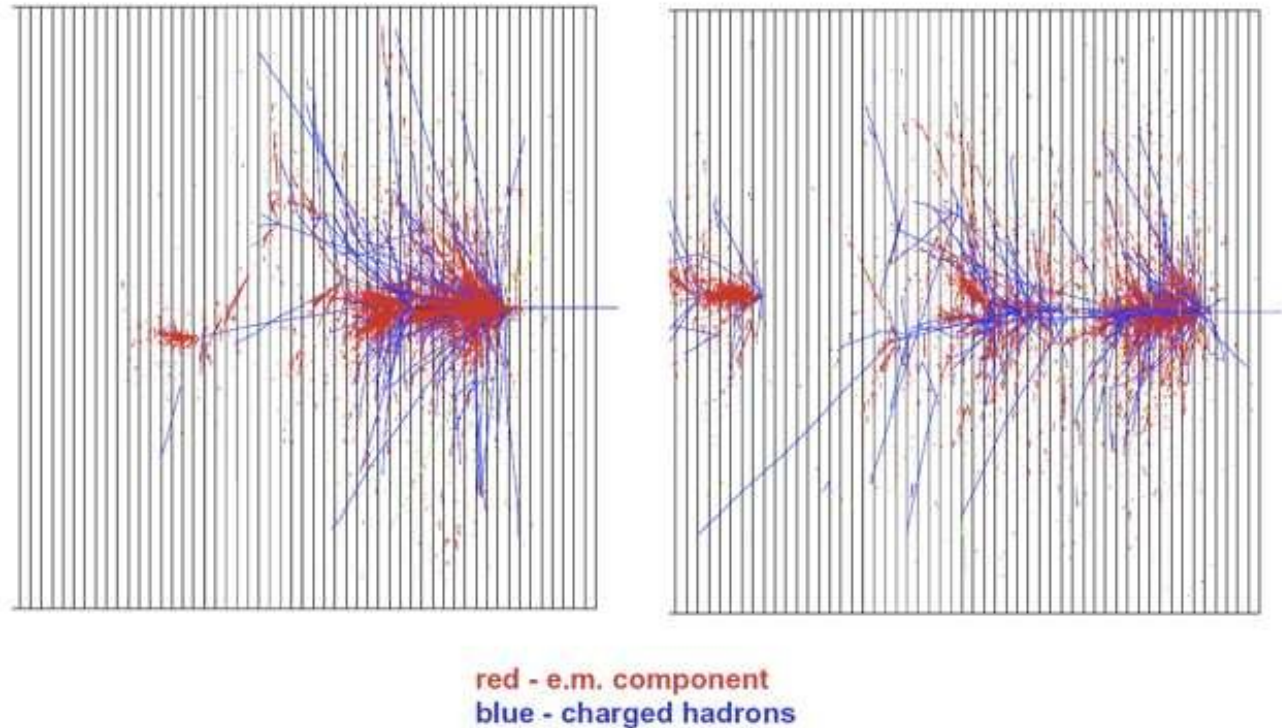
V. Morgunov



Signal (in energy units) obtained for a 10 GeV energy deposit

Voies d'amélioration

Comment corriger
expérimentalement
pour ces 2 composantes ?



Voie « Passive »
Purement matériel

Calorimètre à compensation

«Dual readout»

Voie « Active »
Matériel + logiciel
Granularité + algorithmes

e/h → 1 : Calorimètres à compensation

Réponse d'un calorimètre aux hadrons :

$$\begin{aligned} R_h &= \epsilon_e E_e + \epsilon_h E_h \\ &= (\epsilon_e F_{\pi^0} + \epsilon_h (1 - F_{\pi^0})) E \end{aligned}$$

Rapport

$$e/h = \epsilon_e / \epsilon_h$$

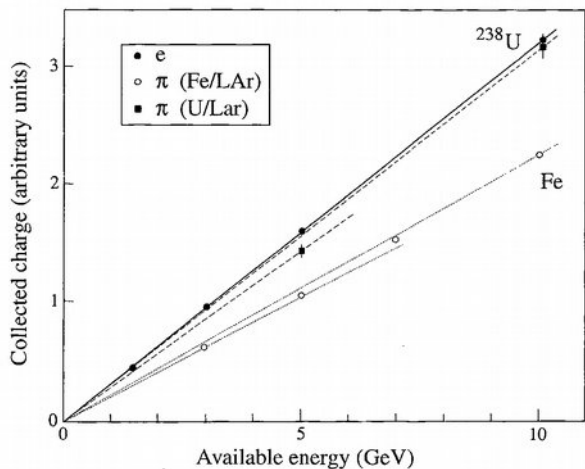
- ▶ E_e = Energie EM
- ▶ $E_h = E_{tr} + E_n$
- ▶ ϵ_e = fraction d'énergie EM détectée
- ▶ ϵ_h = fraction d'énergie Hadronique détectée

Augmenter ϵ_h et/ou réduire ϵ_e

Augmenter ϵ_h

Utilisation de ^{238}U (U appauvri)

– $n + \text{U} \rightarrow \text{Energie} (\gamma, n, \dots)$



L3, DØ, ZEUS, ... (Années 80)

Meilleurs résultats : ZEUS (U+Scint)

– $\alpha \sim 35\%$, $e/h \sim 1$

Inconvénient

- Bruit Radioactivité (\rightarrow calib)
- «Déchets radio-actif...»

Utilisation de capteurs riches en Hydrogène

– $n + \text{H} \rightarrow n + p$ (HE)

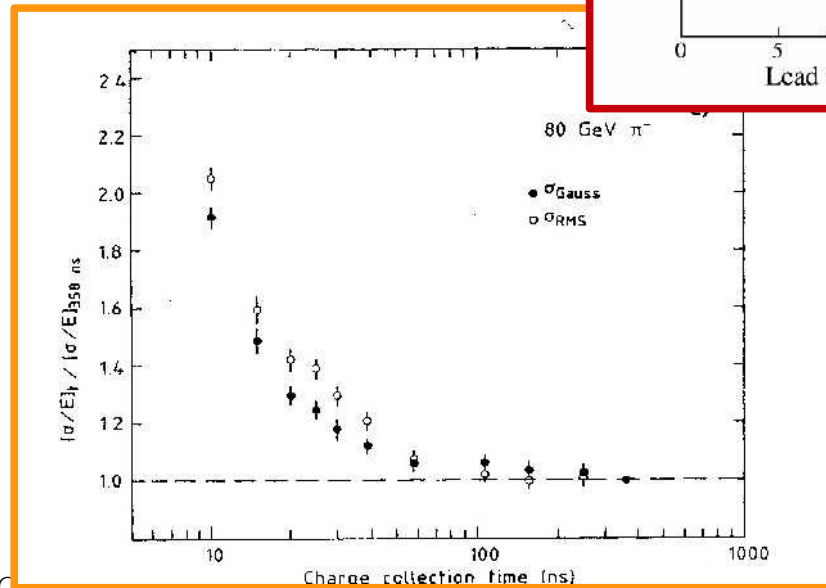
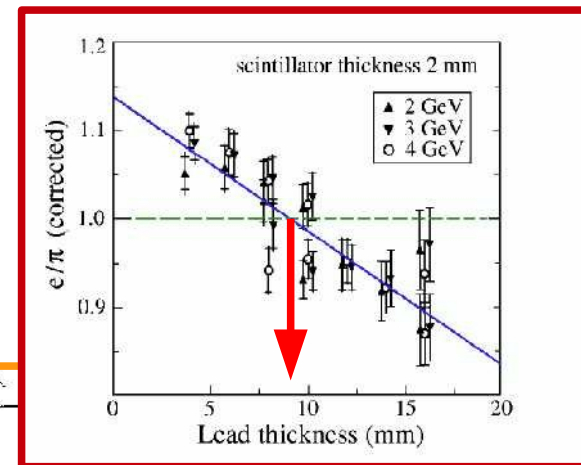
Exp de L3

– $\text{U} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{U} + \text{IsoButane}$: e/h 1.3 \rightarrow 0.6 !!!

Pb + Scintillateur

– Rapport de volume
«magique» :
 $\text{Scint}/\text{Pb} = 1/4$

Intégrer plus longtemps

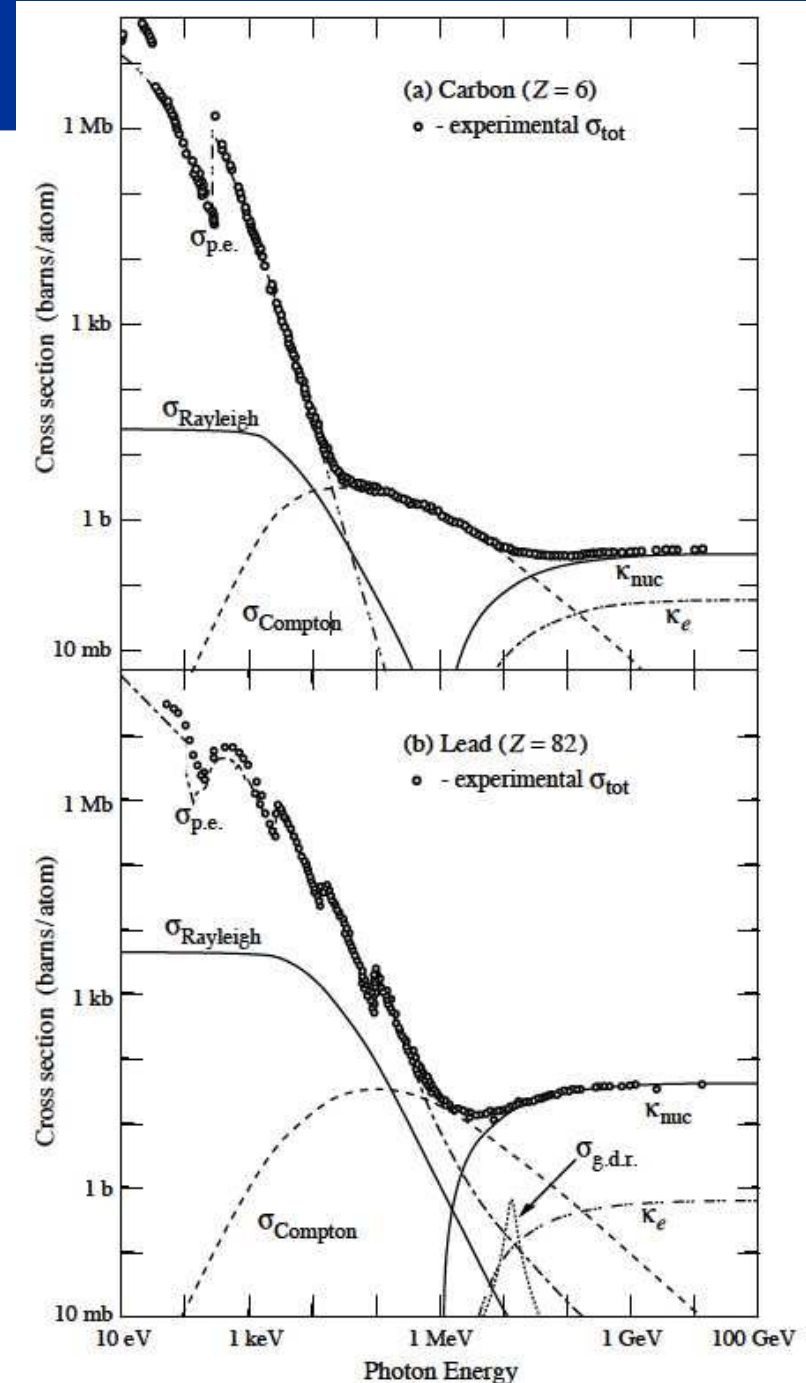
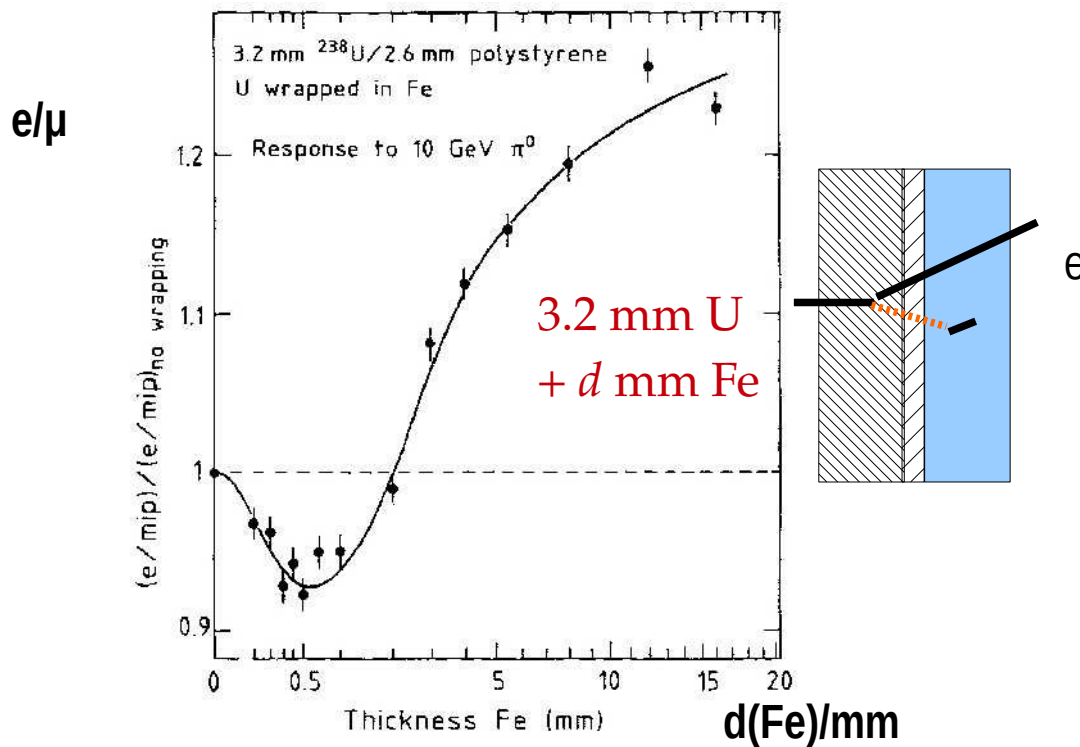


Diminuer ϵ_e

Utilisation de radiateur à grand Z

- $\sigma(\text{Photo-electrique}) \propto Z^4$
- $\gamma < 1 \text{ MeV}$ capturés dans radiateur

Ajout d'un fin filtre bas Z entre le radiateur et le senseur



Bilan compensation

Ajustement :

- (A,Z) radiateur \otimes Contenu en H du senseur
 \otimes temps d'intégration \otimes Vol Rad/ Vol Senseur.

Temps d'intégration \leftrightarrow Machine

Meilleurs compromis pour la mesure hadronique \neq meilleurs pour le ECAL

- ECAL homogène : $e/h \gg 1$
- Bon ECAL à échant. \Rightarrow mauvais volume pour compens.

Bon ECAL ou bon HCAL ?

I had a DREAM...

Un physicien anonyme

DREAM (Dual REAout Module)

Lecture duale de l'énergie

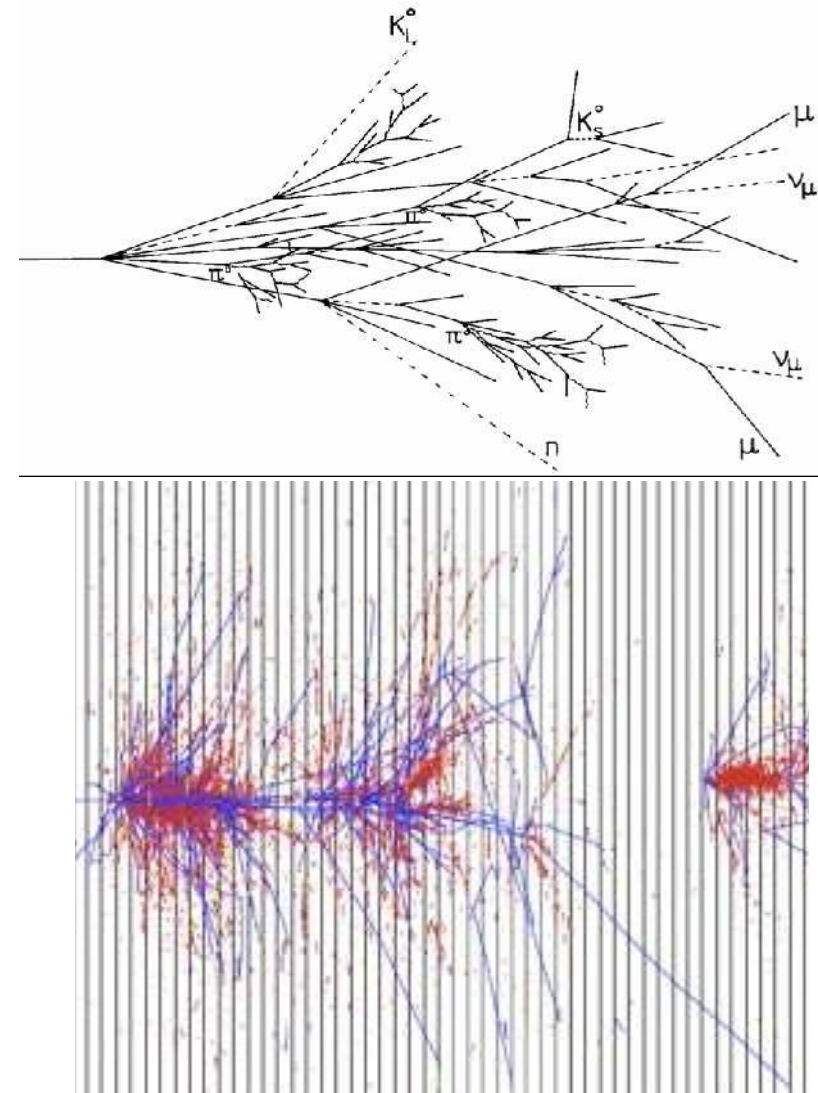
- Identification «hardware» de la composante EM = mesure de f_{EM}
 - Utilisation de la lumière Čerenkov produite par la partie EM de la gerbe

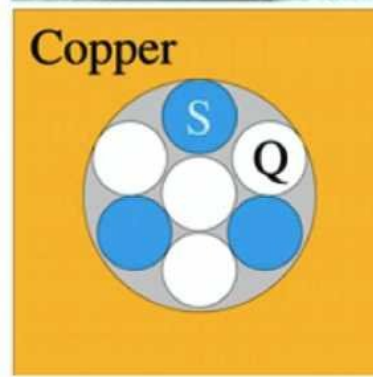
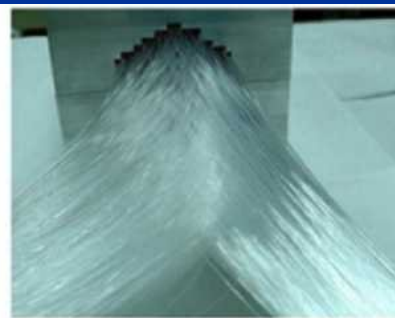
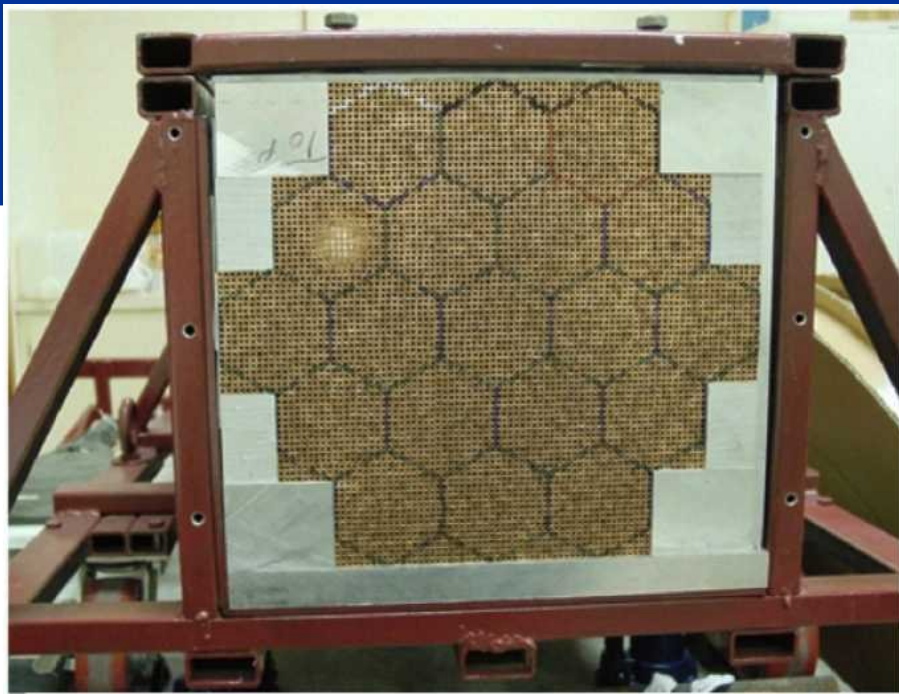
$$\frac{N_{traces}(e^\pm) / \text{MeV}}{N_{traces}(\text{hadrons}) / \text{MeV}} \gg$$

- lecture classique du dE/dx (fibres scintillantes)

Lecture du même milieu par 2 fibres différentes

⇒ 2 e/h pour 1 même événement





2.5 mm
4 mm

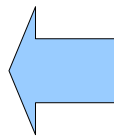
Type de SpaCal
{Spaghetti
Calorimeter}

• *Some characteristics of the DREAM detector*

- **Depth** 200 cm ($10.0 \lambda_{\text{int}}$)
- Effective **radius** 16.2 cm ($0.81 \lambda_{\text{int}}$, $8.0 \rho_M$)
- **Mass** instrumented volume 1030 kg
- Number of **fibers** 35910, diameter 0.8 mm, total length ≈ 90 km
- Hexagonal **towers** (19), each read out by 2 PMTs



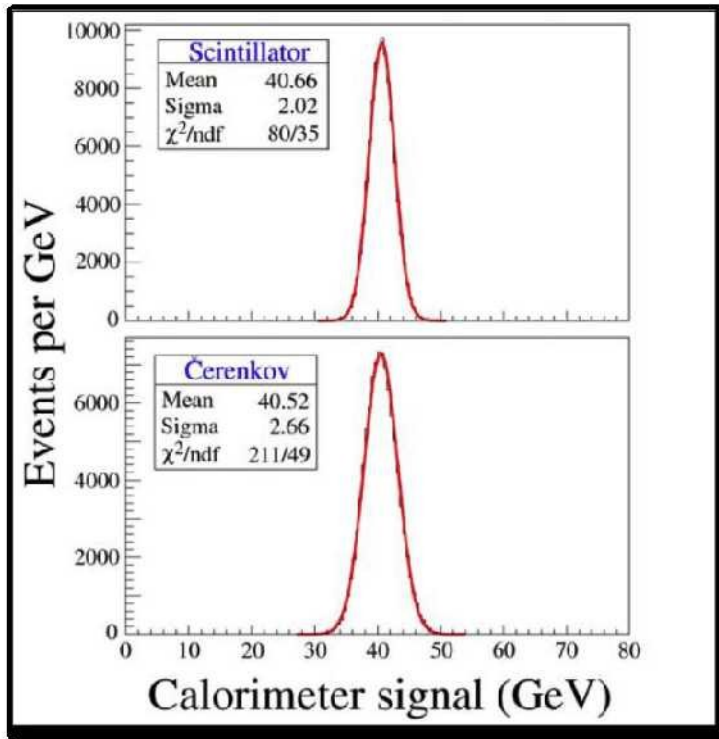
Photo multiplicateurs



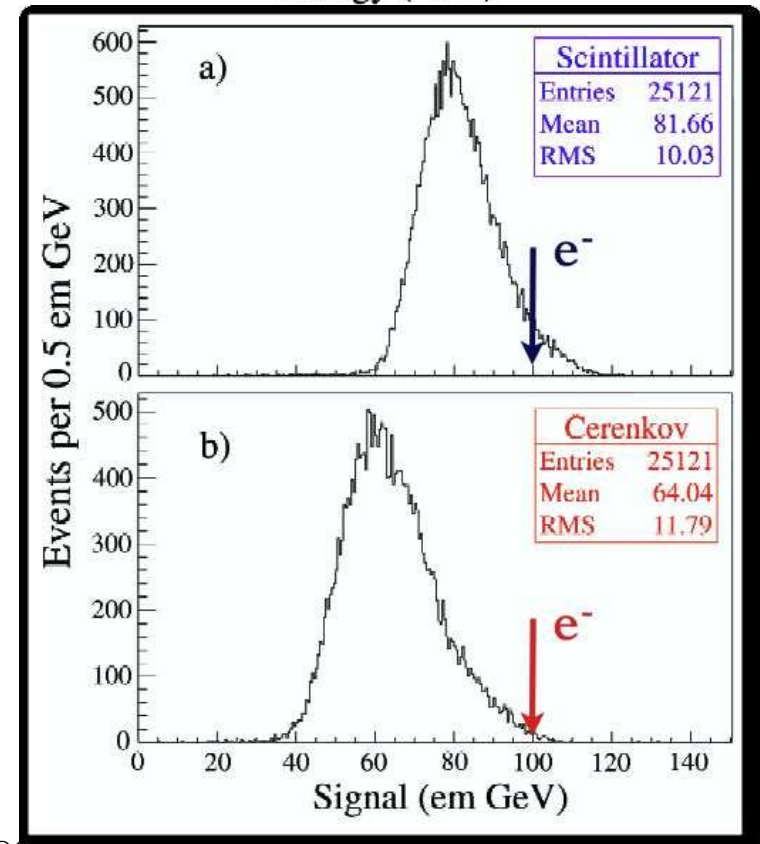
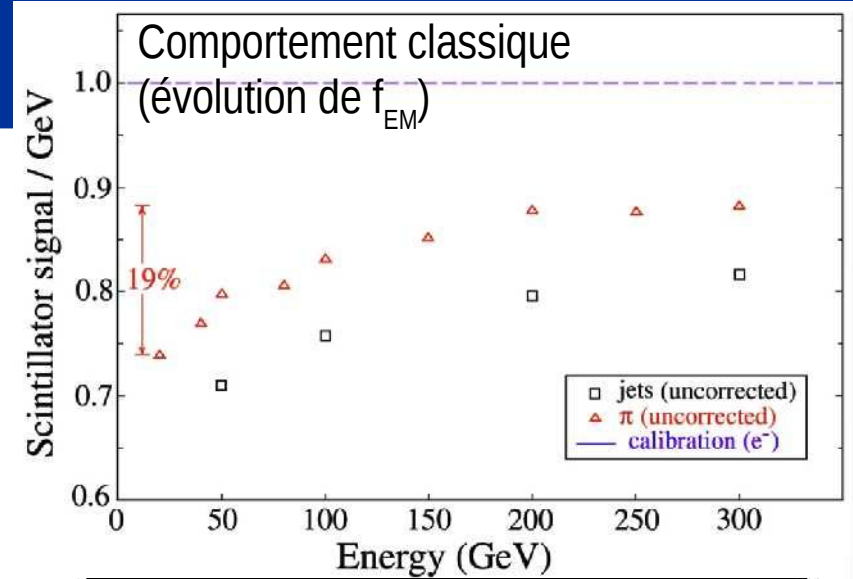
Réponse aux électrons

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{20.5\%}{\sqrt{E}} + 1.5\%$$

Incidence : 2°
(tunneling à 0°)



Réponse aux π de 100 GeV



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

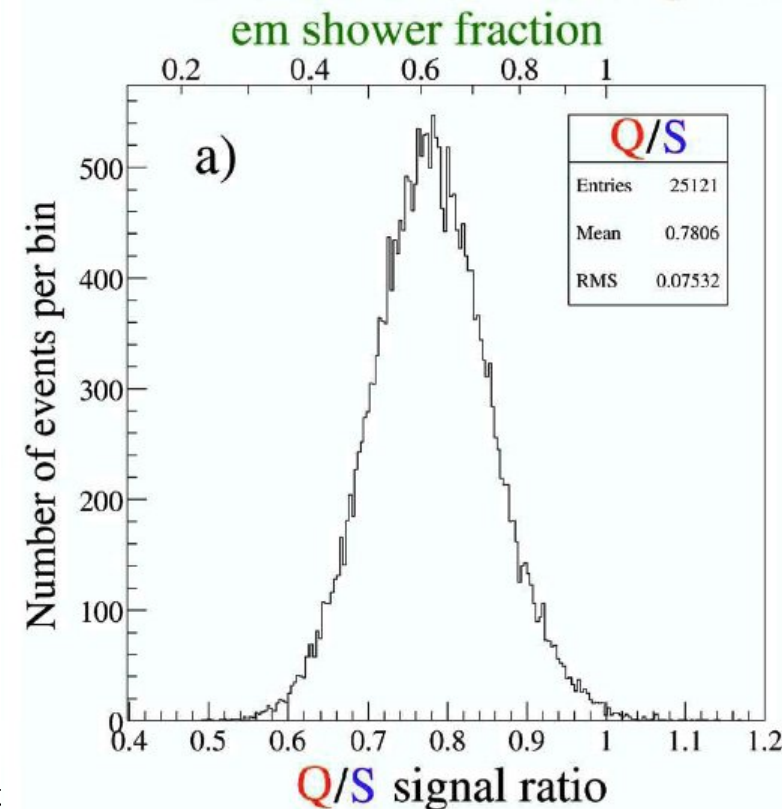
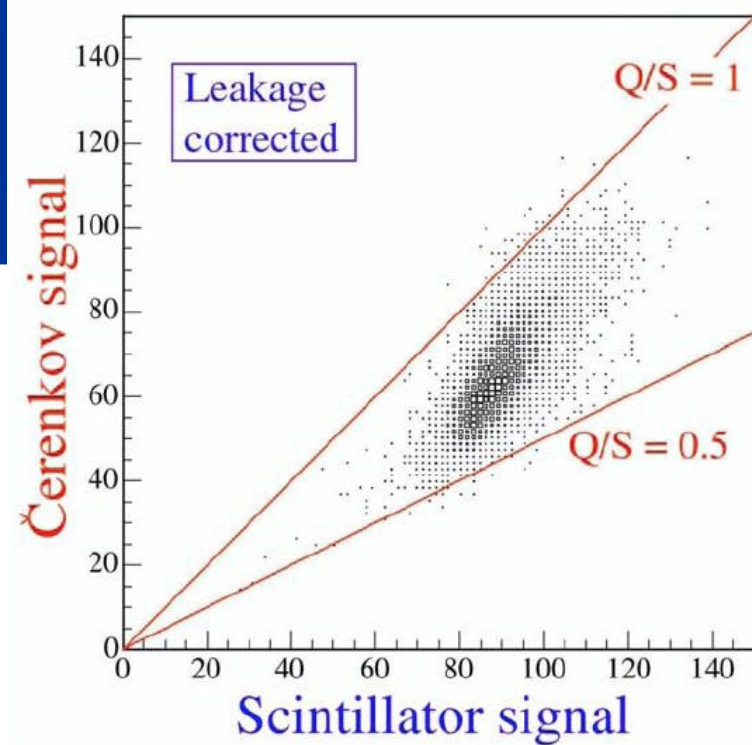
$$Q = E \left[f_{\text{em}} + \frac{1}{(e/h)_Q} (1 - f_{\text{em}}) \right]$$

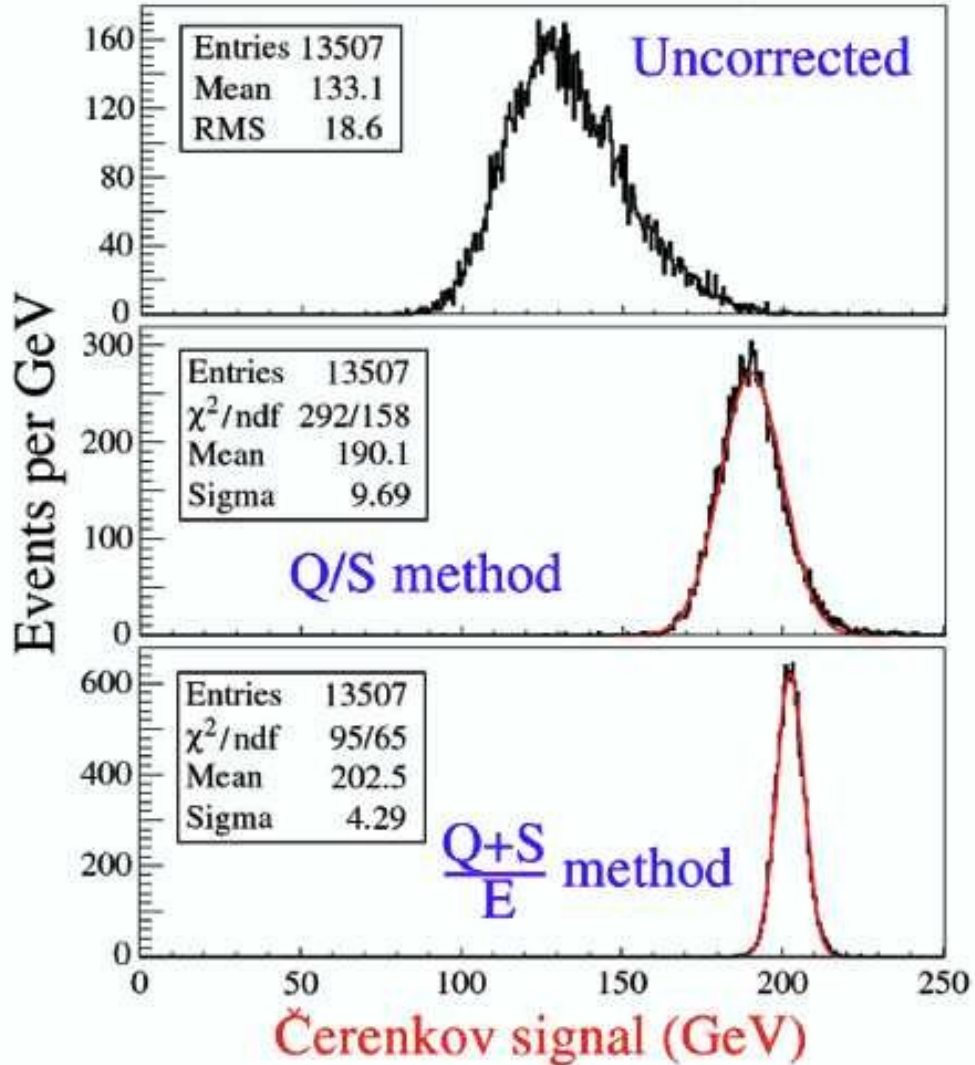
e.g. If $e/h = 1.3$ (S), 4.7 (Q)

$$\frac{Q}{S} = \frac{f_{\text{em}} + 0.21 (1 - f_{\text{em}})}{f_{\text{em}} + 0.77 (1 - f_{\text{em}})}$$

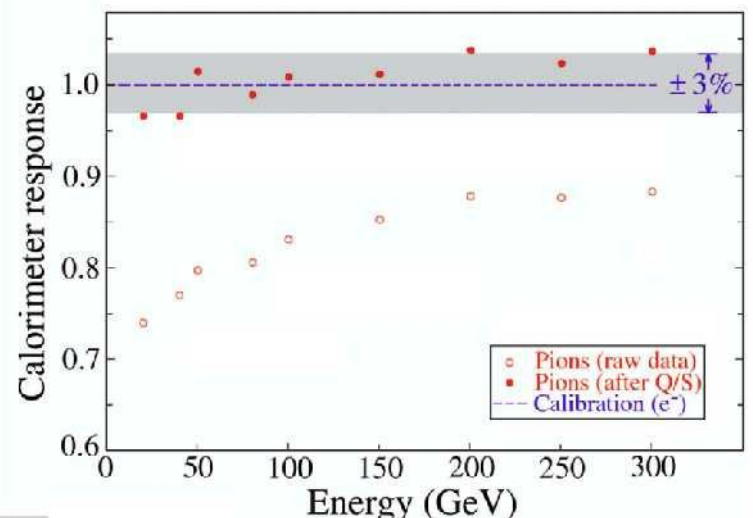
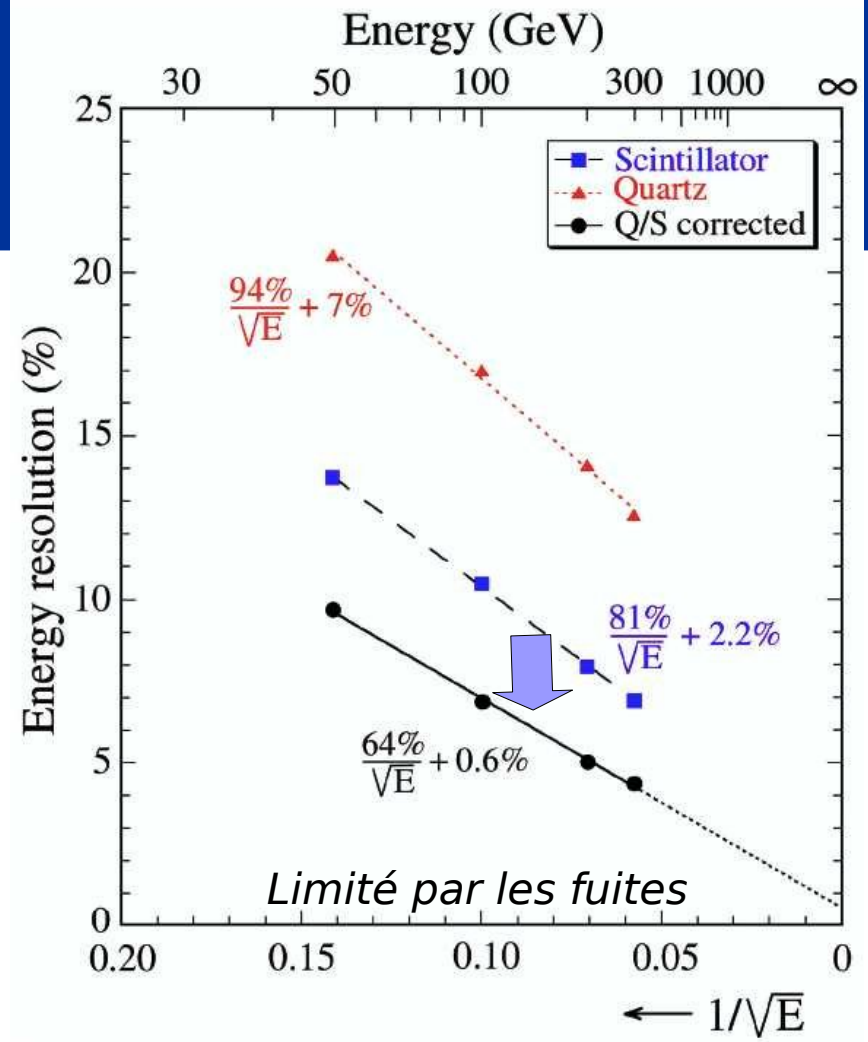
$$E = \frac{S - \chi Q}{1 - \chi}$$

with $\chi = \frac{1 - (h/e)_S}{1 - (h/e)_Q} \sim 0.3$





Comportement Gaussien

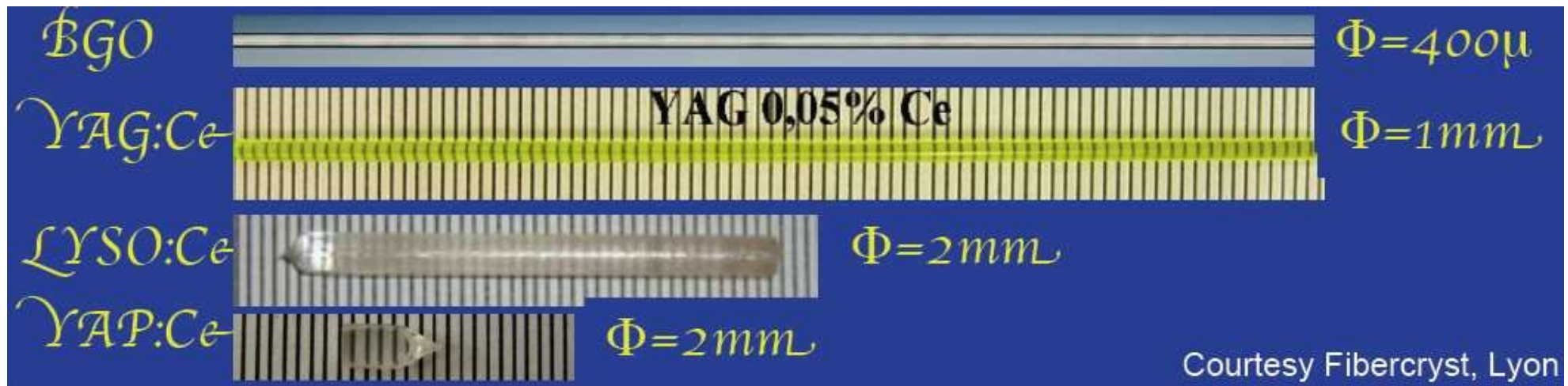
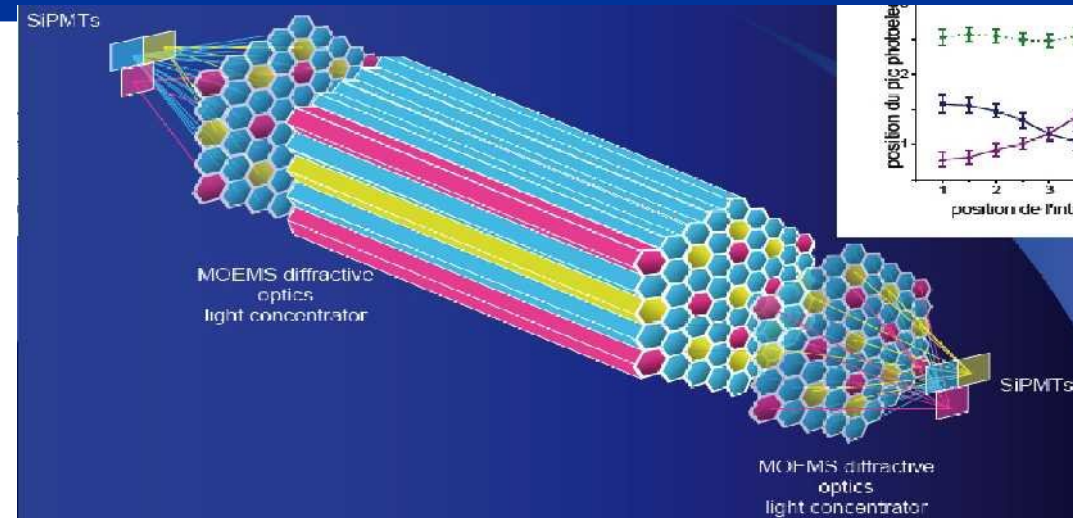


les méta-matériaux (option homogène)

Dual Readout avec un calorimètre
quasi homogène

- **Fibres scintillantes denses avec des matériaux réagissant différemment**

Lecture complexe →
double ou triple information 3D



Amélioration Algorithmiques (avec la granularité)

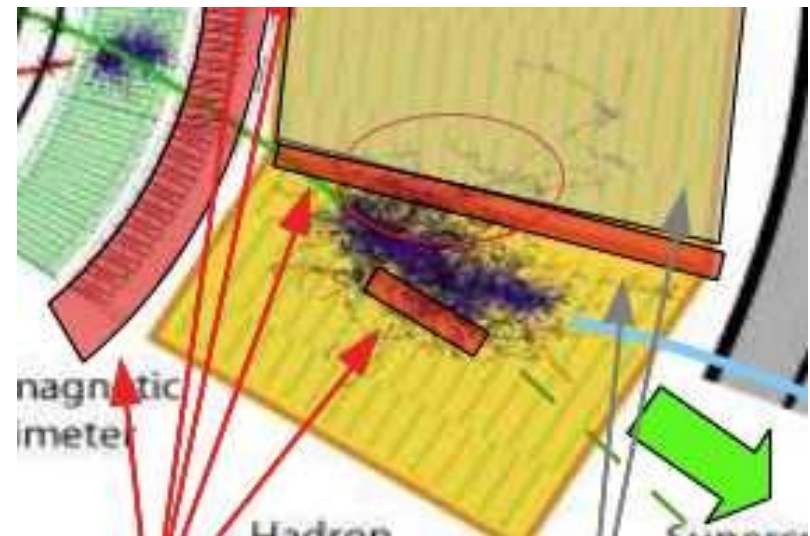
Agrégation («Clustering»)

But : grouper les cellules proches

- Mesure de dépôts localisés \leftrightarrow origine des particules
 - 1 cluster = 1 dépôt d'une particule ?
- Autour de cellules «chaudes»...
- Besoin d'une granularité suffisante

Applications :

- Suppression du bruit = cellules isolées { \oplus volume de donnée \square }
 - \triangle Conservation du bruit proche : symétrique.
par ex. : coupure à $|Q_i| > 3 \sigma_{\text{noise}}$
- Corrections :
 - Profil de gerbes
 - Fuites, Matériaux morts



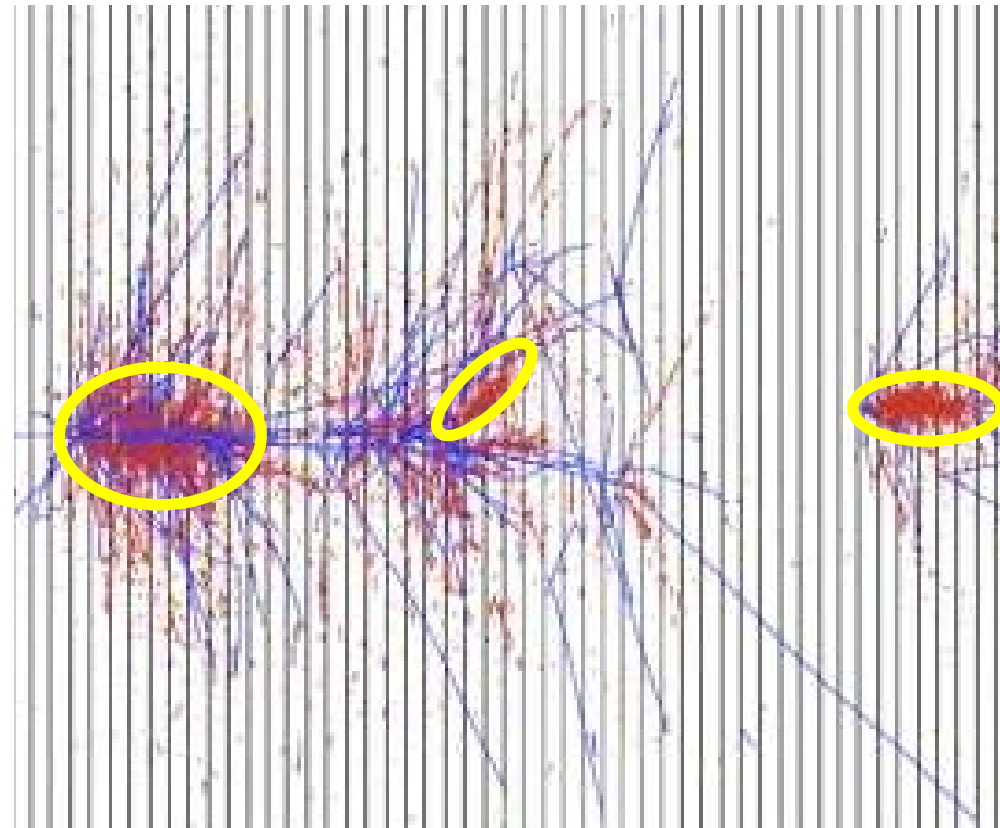
Compensation par pondération (« weighting »)

Optimisations du signal : forme & taille

- Dans le ECAL : e & γ vs π 's (\equiv particle ID)
[par exemple fraction dans le $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}}+E_{\text{HAD}})$].
- Dans le HCAL : Repérer les dépôts EM
- densité en énergie

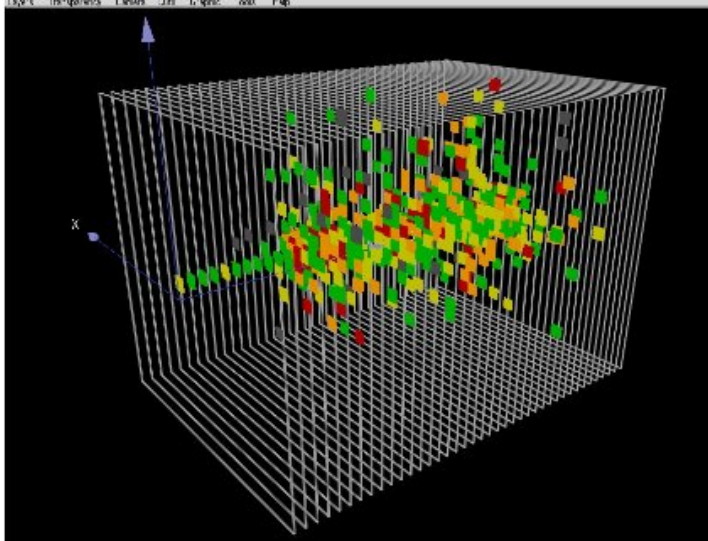
$$\rho_i = \frac{E_i}{\text{Vol}_i}$$

- Haut ρ_i = EM ; bas ρ_i = HAD
 - *Ajustement des poids par le MC*

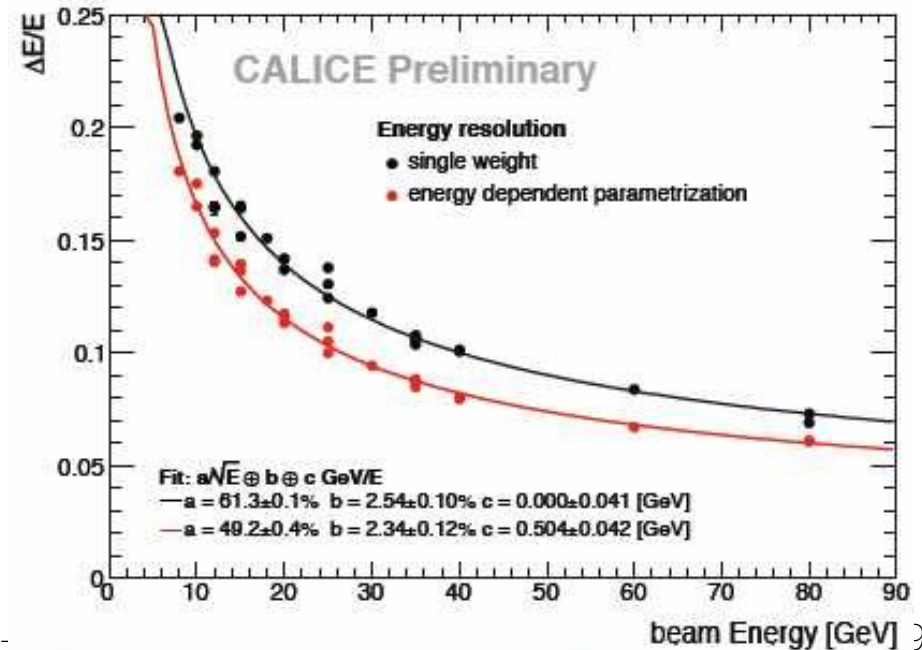
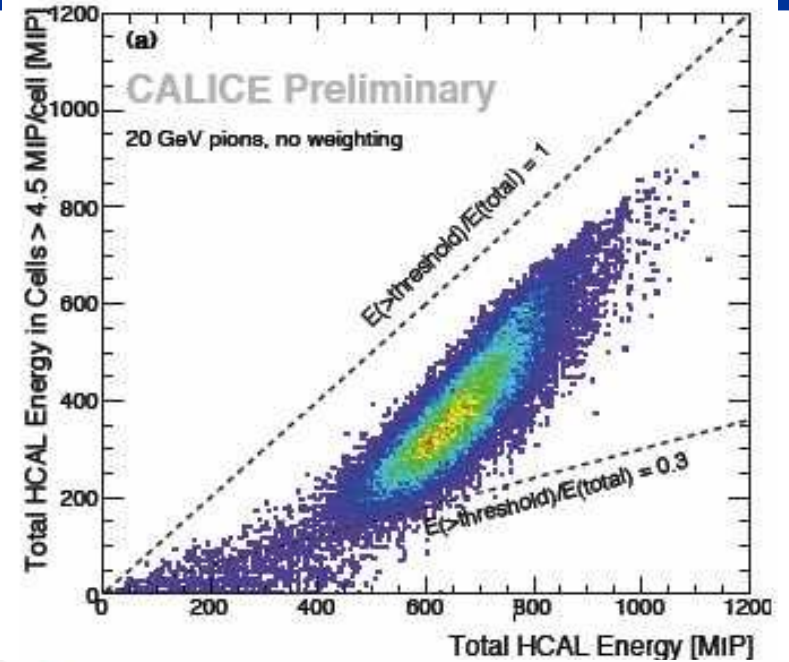
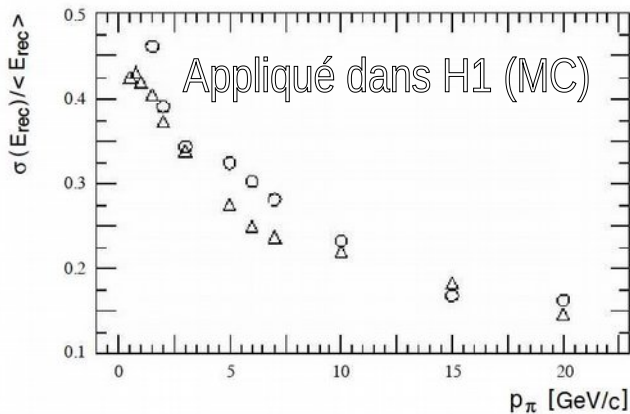


Compensation par pondération (« weighting »)

CALICE AHCAL Proto (3x3 cm² x 48 couches)



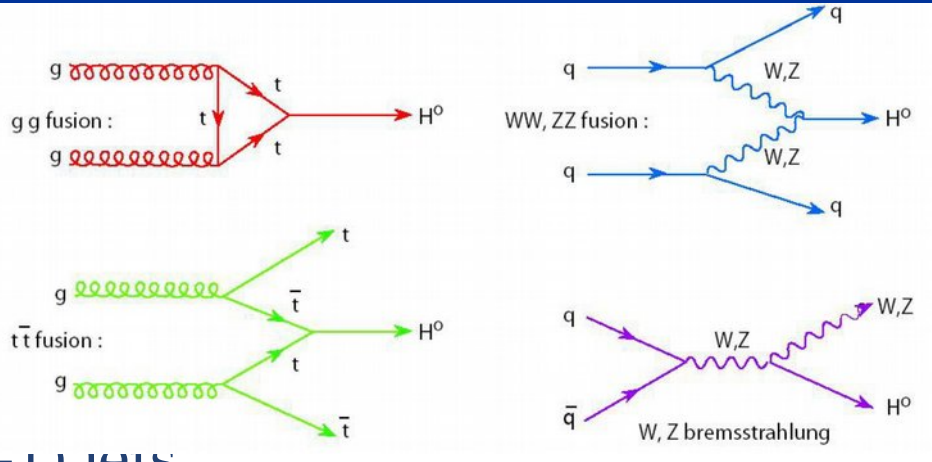
Amélioration de la résolution
& de la linéarité



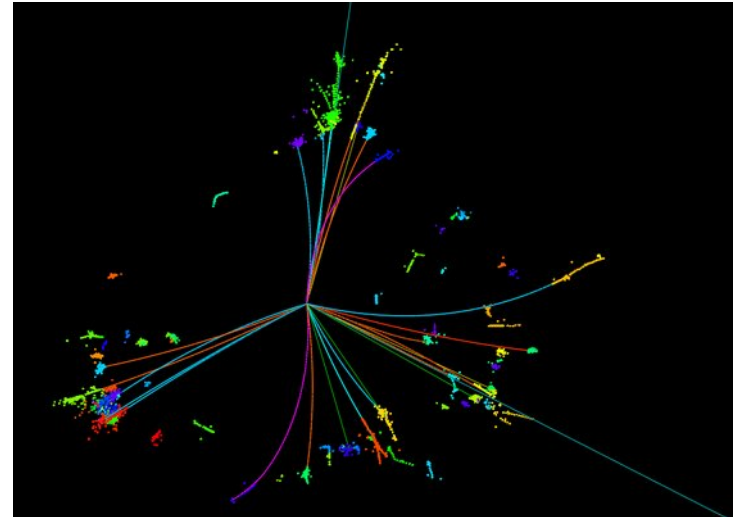
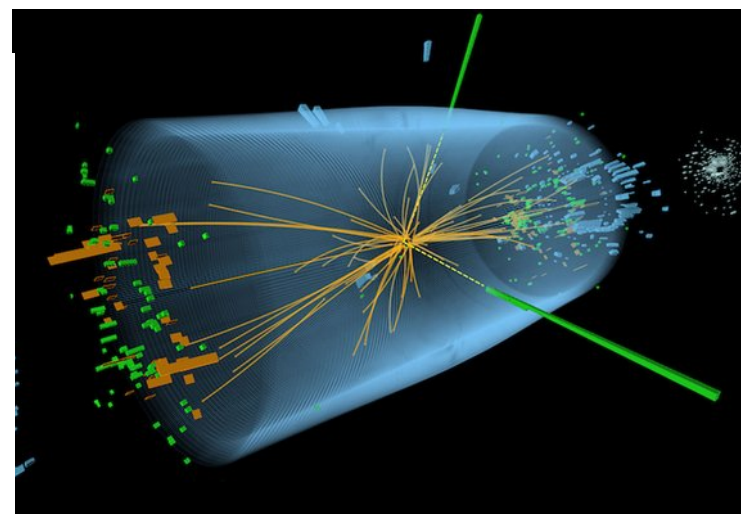
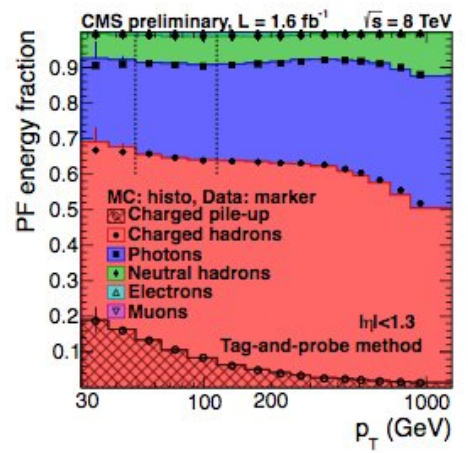
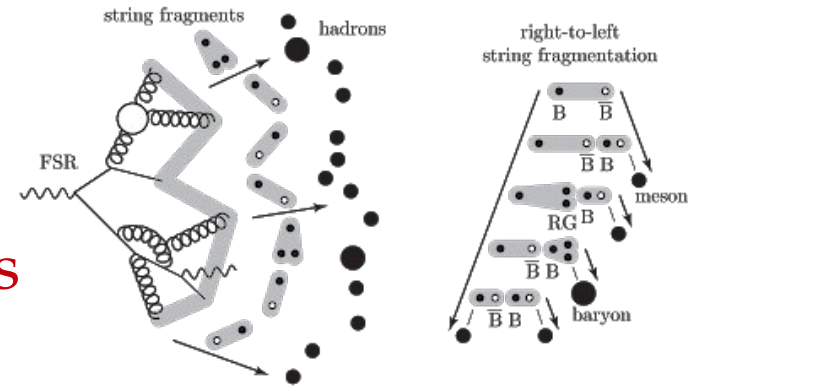
Energy flow & particle flow (une approche holistique)

Jetologie

À haute énergie $pp, ee \rightarrow q\bar{q}$
 $q\bar{q}(+g) \rightarrow 2(+1) \text{ jets}$



- $H \rightarrow WW, ZZ$
- $W, Z \rightarrow q\bar{q} \Rightarrow 4 \text{ jets}$
- si $q = t, t \rightarrow bW(\rightarrow q\bar{q}) \Rightarrow 6 \text{ jets}$



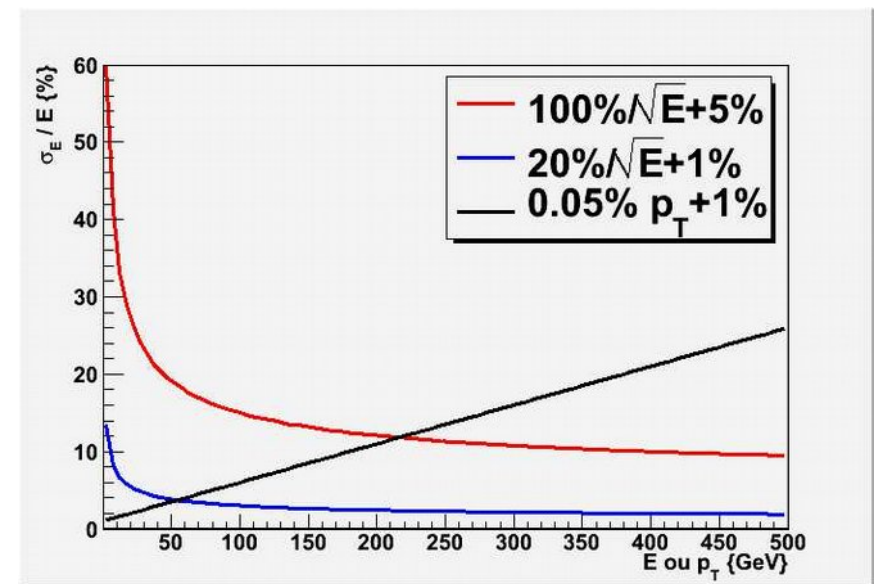
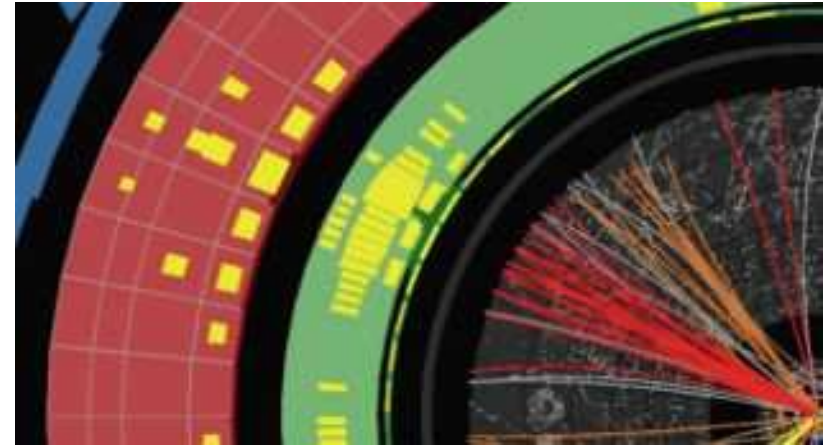
Au-delà de la calorimétrie : le «particle flow»

«Simplement» reconstruire toutes les particules
& prendre la meilleure mesure possible ou combiner

– Pour des particules individuelles :

- $a \sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$
- $\alpha_{\text{ecal}} \sim 20\%$; $\gamma_{\text{ecal}} \sim 1\%$
- $\alpha_{\text{hcal}} \sim 100\%$; $\gamma_{\text{hcal}} \sim 5\%$

Physique à haute énergie \equiv jets, MET (énergie
transverse manquante), τ

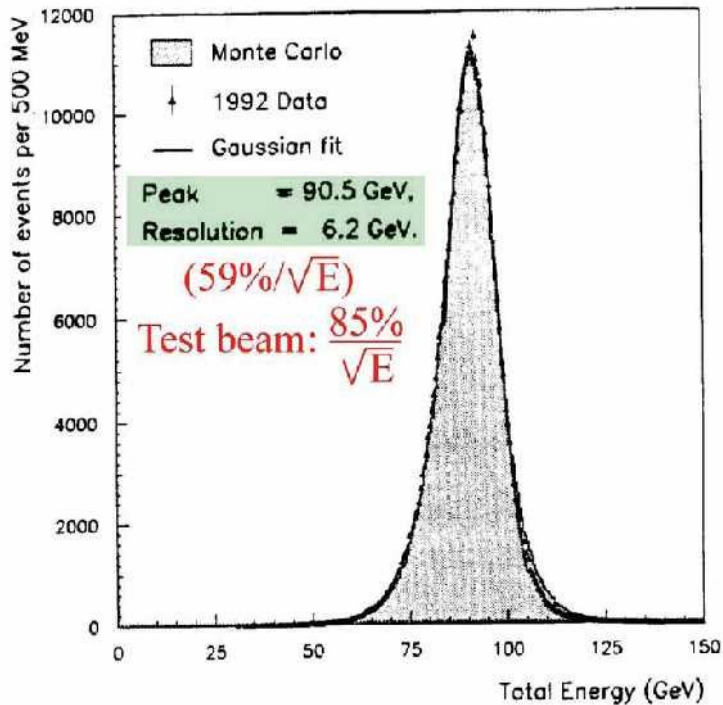


γ

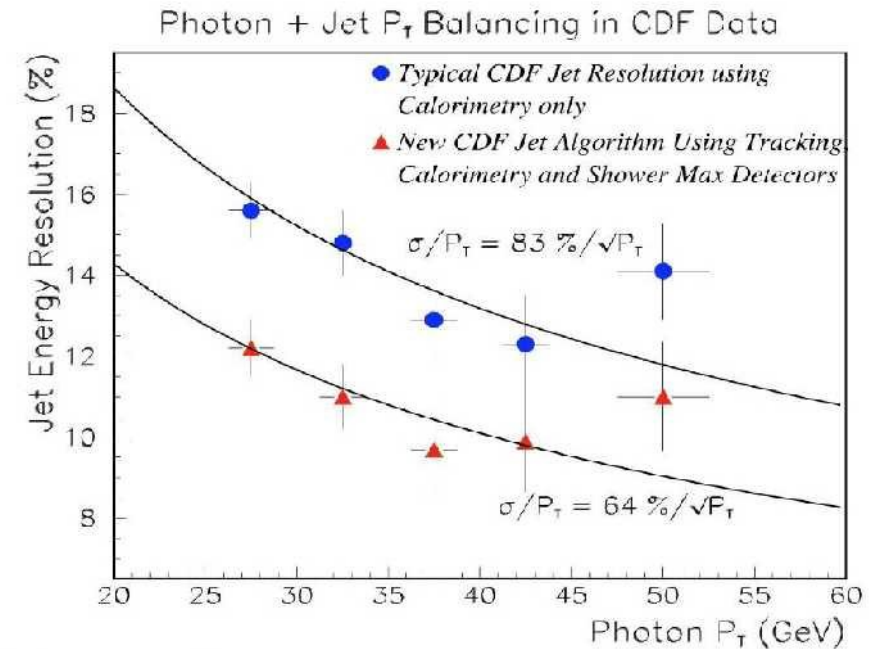
« Energy flow »

ALEPH

Utilisation de particle ID +
SW compensation



PFA au Tevatron : CDF



H1 « Hadronic flow »
(trace de $P_T < 1$ GeV)

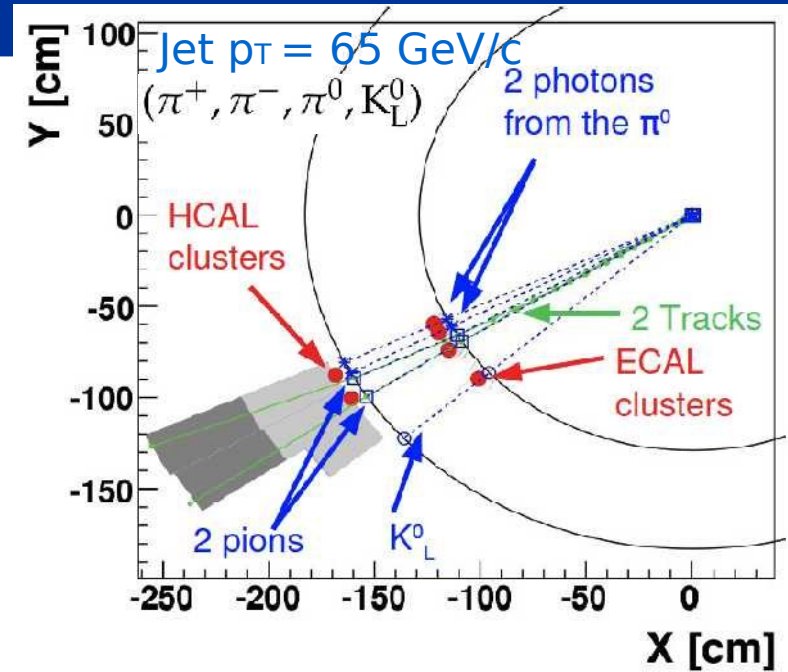
Le «particle Flow» de CMS

Lien entre objets reconstruits

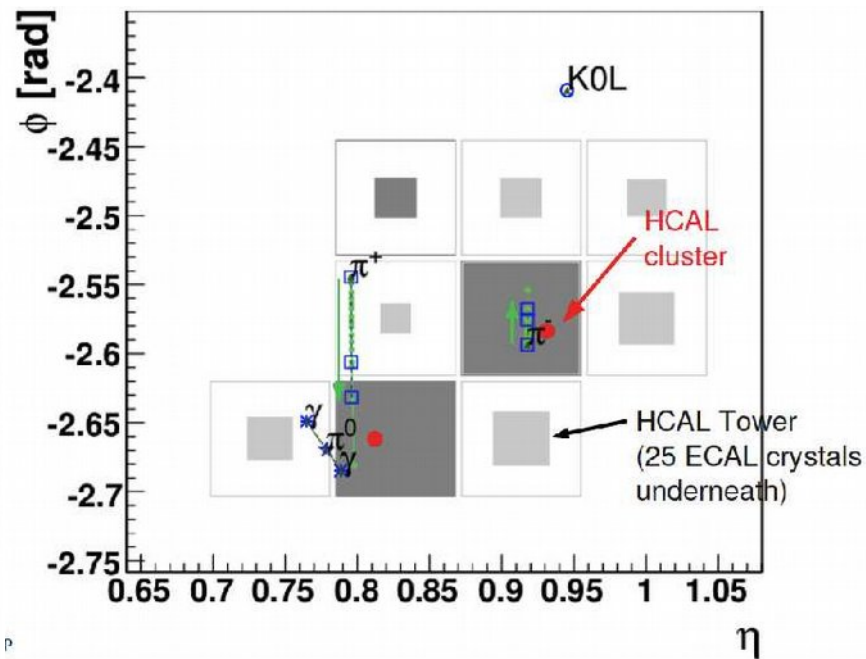
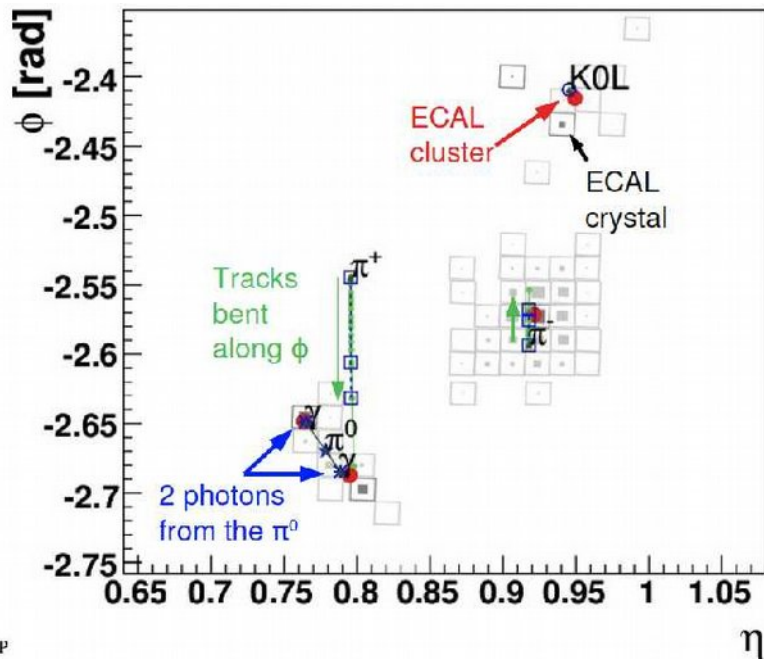
- traces, clusters, traces de muons
- suivant la direction du vertex ou des traces

1 bloc ~ 1 particule

- Comparaison des compatibilités «4D»
 - Spatiales
 - Energétique

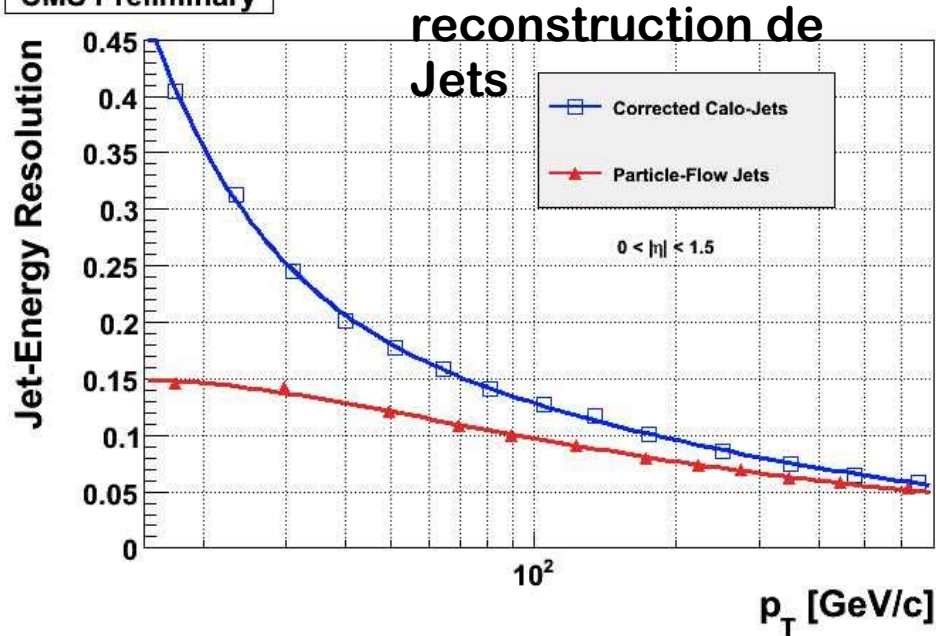


C. Bernet

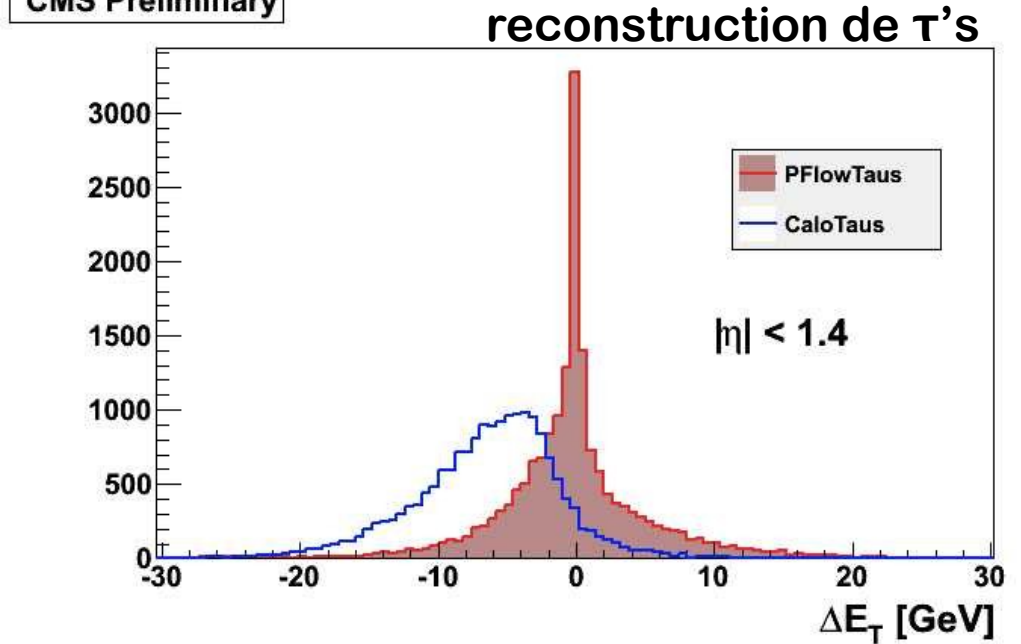


CMS particle flow

CMS Preliminary



CMS Preliminary



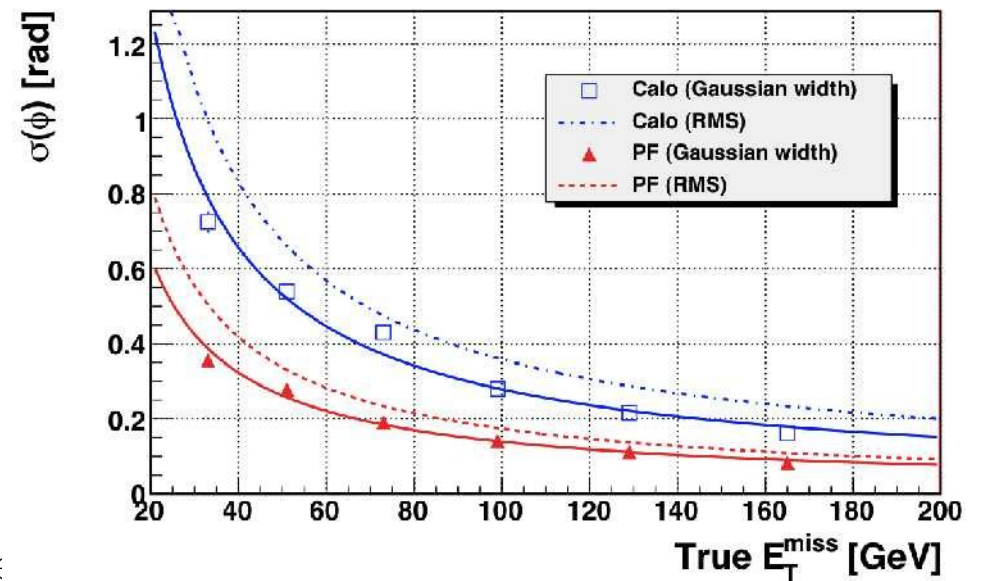
Reconstruction d'énergie manquante

- recherche «exotique»

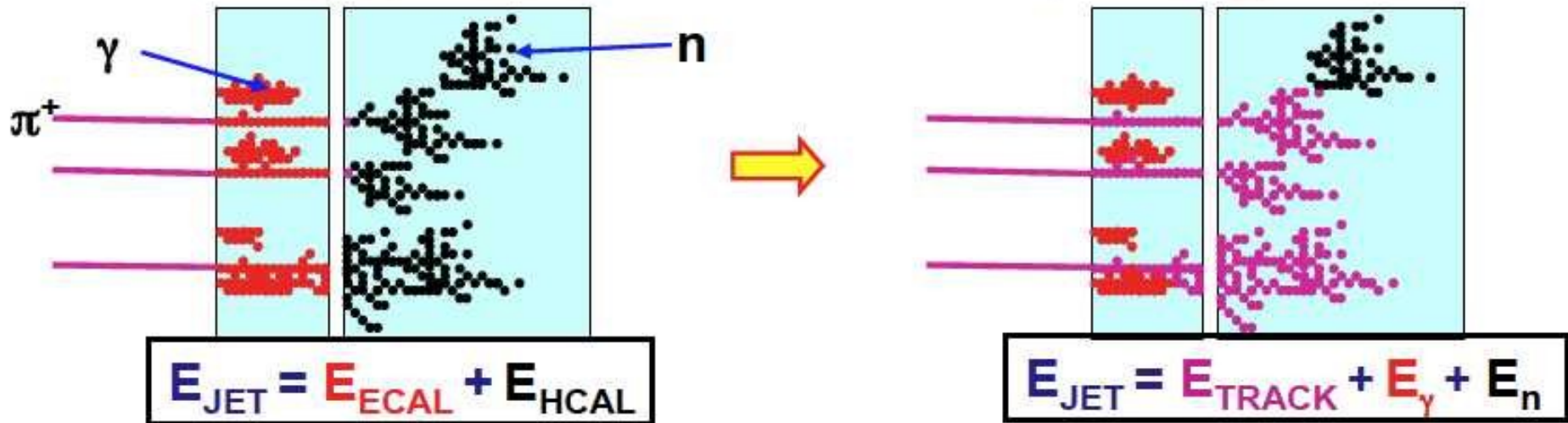
$$\vec{MET} = - \sum_{i=0}^N \vec{E}_T^i$$

- Gain d'un facteur ~ 2
Signal \rightarrow Gaussien

CMS Preliminary



Matériel pour le Particle Flow (pour ILC/CLIC, CEPC, FCC, HL-LHC...)



M. Thompson

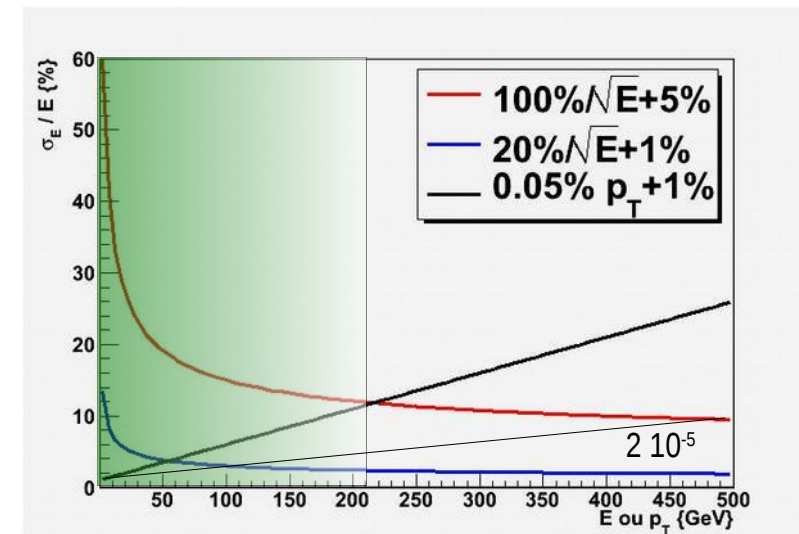
Nouveau paradigme (Particle Flow Analysis)

- 60% de chargés : mesure dans le tracker
- 30% de «petits» γ : dans le ECAL avec $20\%/\sqrt{E}$
- 10% de hadron neutres (n, K_L^0) dans le HCAL

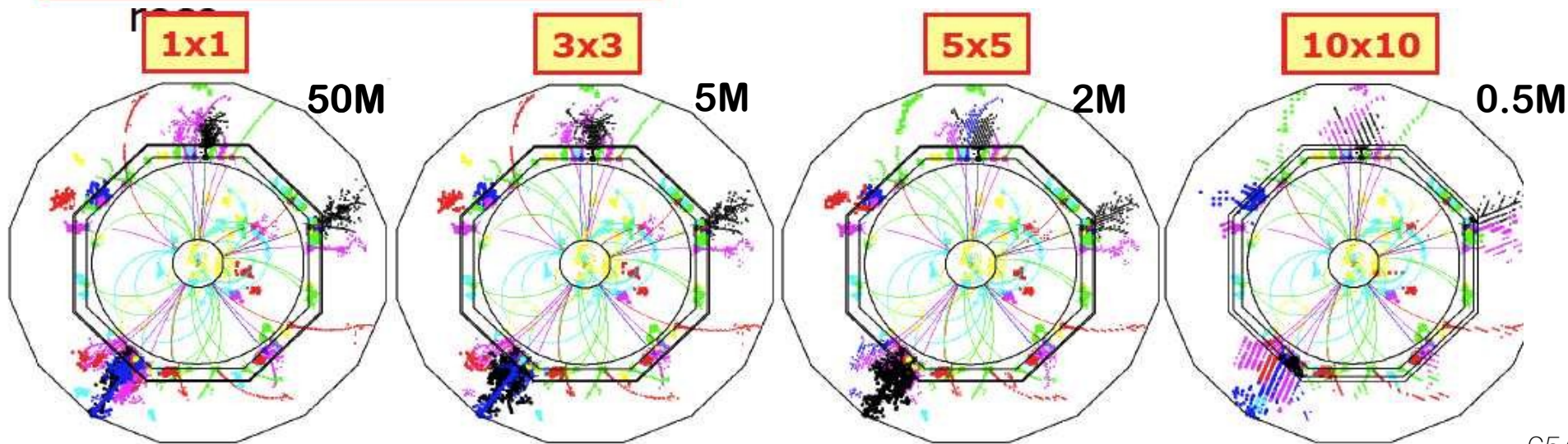
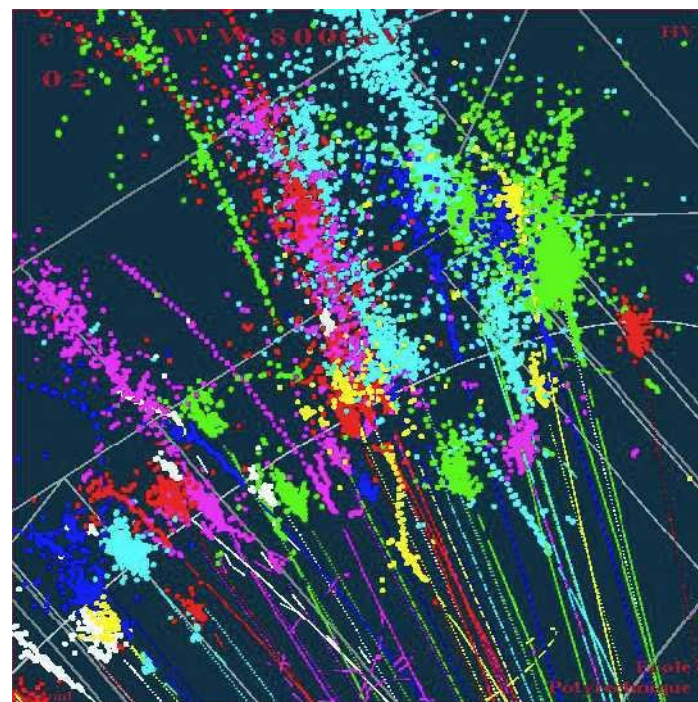
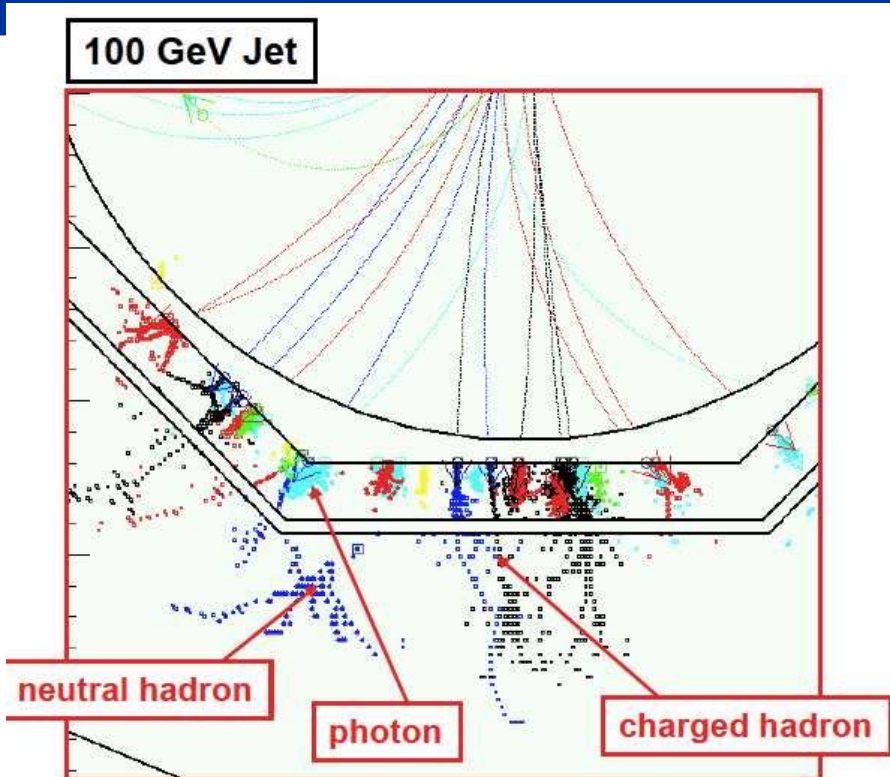
⇒ Bien meilleure résolution !!

Besoin d'une excellente granularité

Logiciel sophistiqué



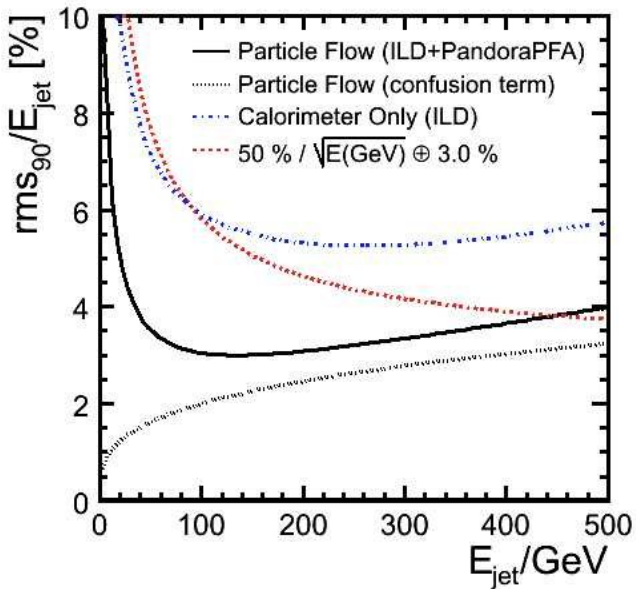
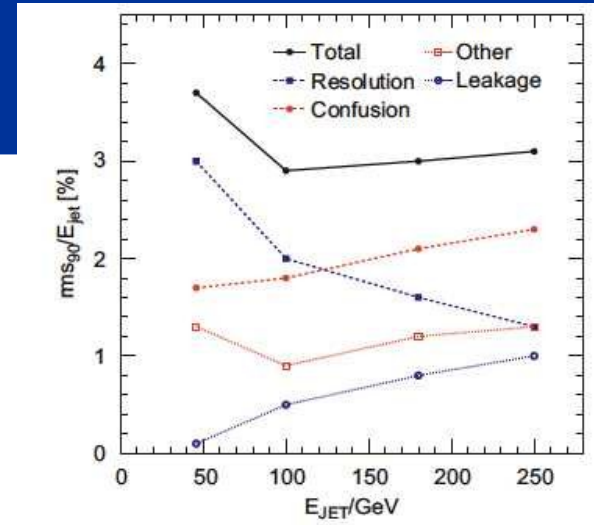
Une question de granularité



Performances du PFA (pour les jets)

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{21}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus 0.7 \oplus 0.004E \oplus 2.1 \left(\frac{R}{1825}\right)^{-1.0} \left(\frac{B}{3.5}\right)^{-0.3} \left(\frac{E}{100}\right)^{+0.3} \%$$

Resolution
 Tracking
 Leakage
 Confusion

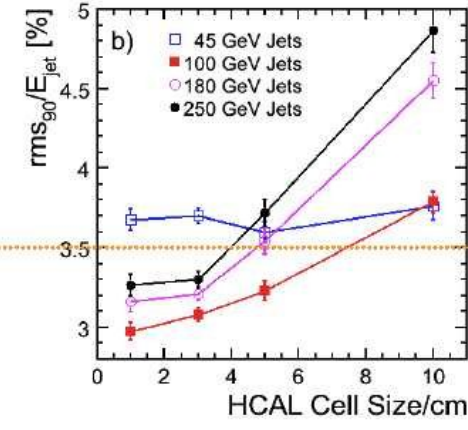
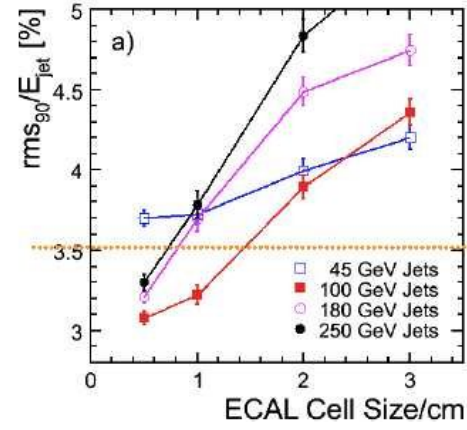


Le Particle Flow Analysis améliore toujours

— ~Facteur 2 vs calo seul

La résolution du HCAL, la granularité et les fuites jouent un rôle.

— ⚠ Depend complètement du SW ⚠



ILC Goal

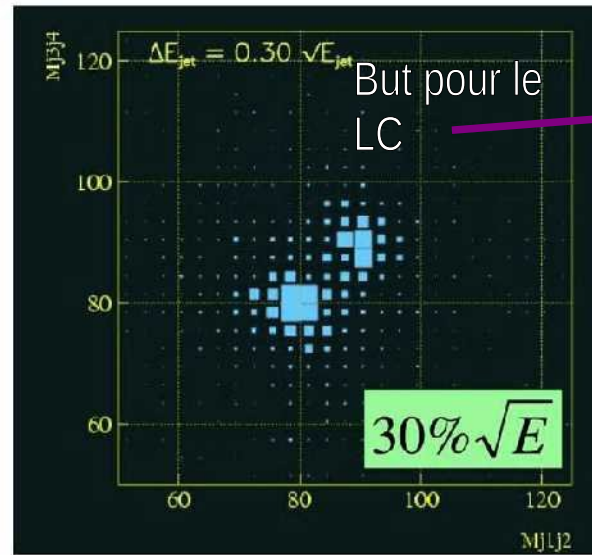
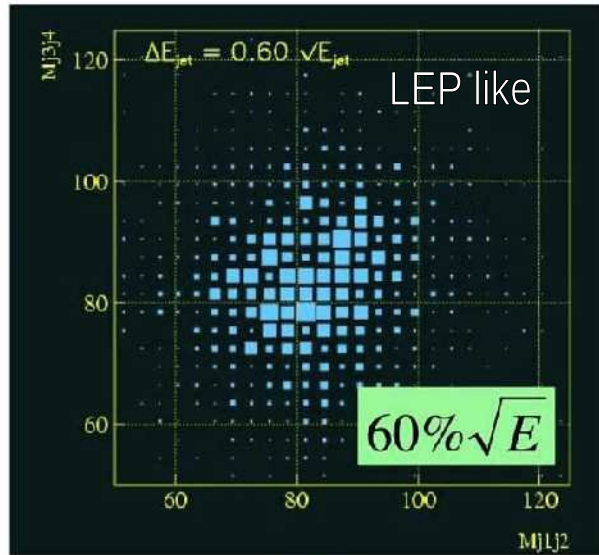


Model Limits

La calorimétrie à haute granularité

Une calorimétrie optimisée pour le particle flow : ILD, SiD & Calice

M_{jj}



Collisionneur e^+e^-
(FLC, JLC, TESLA)
ILC : 0.5 — 1 TeV
CLIC : 1 — 3 TeV

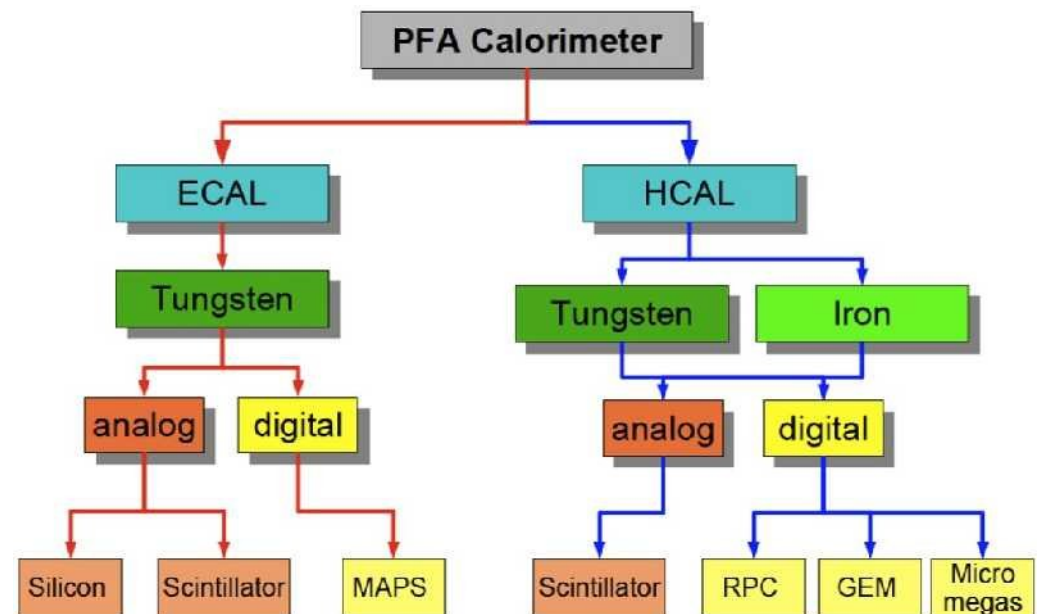
M_{jj}

Collaboration CALICE

- mostly ILD, SiD
- ILC, CLIC

Test de prototype

- Physiques
- technologiques
- Analogique & digital



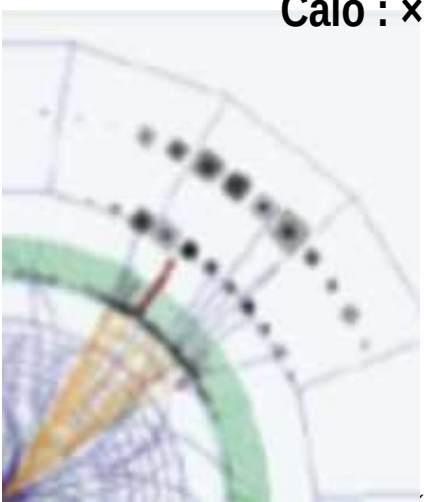
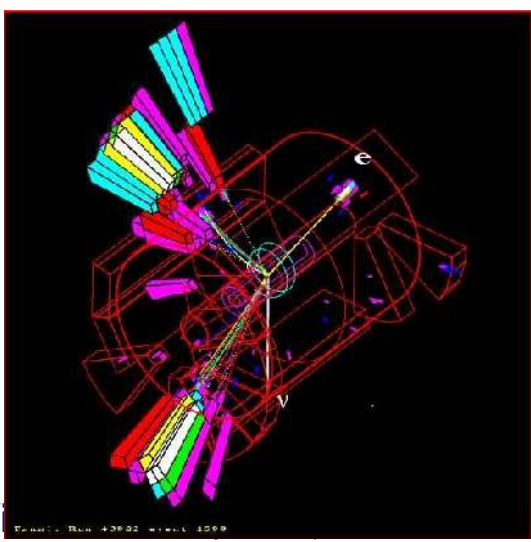
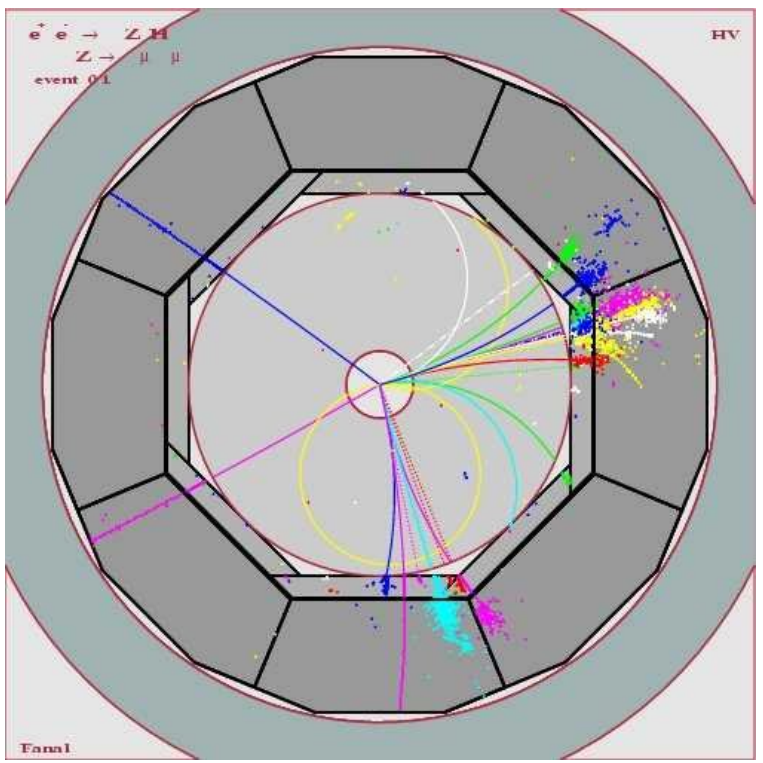
Augmentation de la granularité

F. Decamps (ATLAS & CMS : chiffres Lol)

Détecteur	Anneaux	Nb Canaux	% Calo	% Tracking
OPAL	LEP	180 000	60%	40%
DELPHI	LEP	130 000	20%	60%
ALEPH	LEP	530 000	80%	15%
L3	LEP	100 000		
CDF	TEVATRON	150 000	40%	50%
D0	TEVATRON	120 000	50%	40%
H1	HERA	250 000	30%	70%
L3P	LHC	1 000 000	15%	85%
CMS	LHC	16 000 000	2%	98%
ATLAS	LHC	4 000 000	2%	98%
SDC	SSC	30 000 000	3%	97%
GEM	SSC	4 250 000	3%	97%

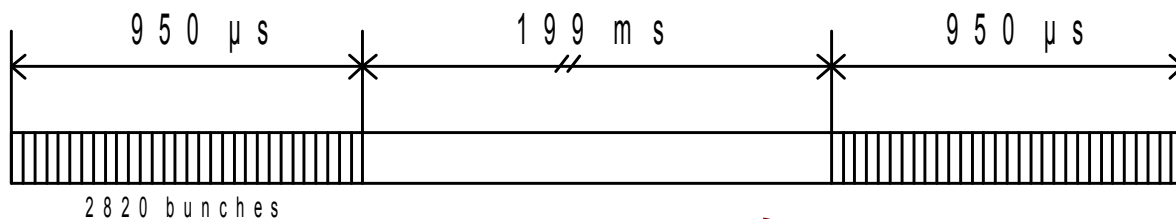
ILD | ILC | 10^9 | 12-18% | 82-88%

Calo : x 1000 !



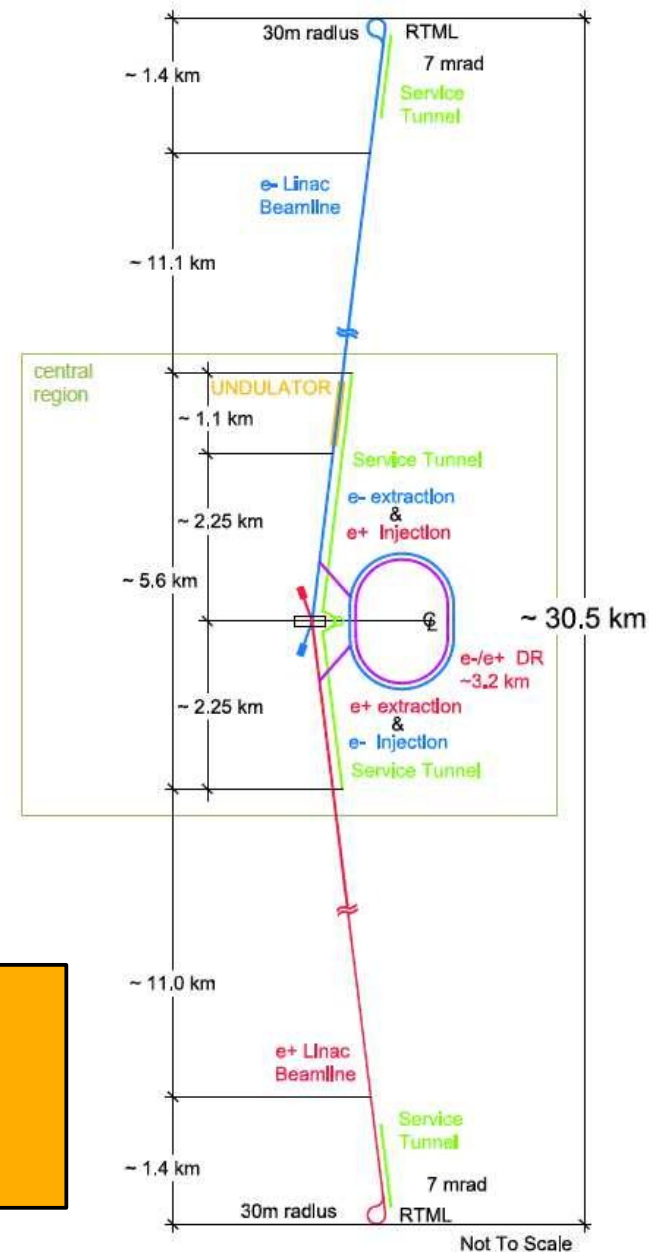
Paramètres ILC (~2027-28)

Max. Center-of-mass energy	250–1000 (90)	GeV
Peak Luminosity	$0,8\text{--}3 \times 10^{34}$	$1/\text{cm}^2\text{s}$
Beam Current	5.8	mA
Repetition rate	5	Hz
Average accelerating gradient	31.5	MV/m
Beam pulse length	0.95	ms
Total Site Length	31	km
Total AC Power Consumption	120-300	MW



- Temps entre collisions 350–700 ns
- Trains de 1300–2700 Bunches
- Faible occupation des détecteurs
- Bdf bas: $e^+e^- \rightarrow qq \sim 0.1 / \text{BC}$
 $\rightarrow \gamma\gamma \rightarrow X \sim 200 / \text{BX}$

- Power Pulsing ($\leq 1\%$)
- High B
- Trigger-less
- Lecture différée



Un calorimètre W-Si pour un collisionneur linéaire à électrons

De nombreux jets de particules serrés → forte densité du calorimètre → radiateur dense W, détecteur compact Si

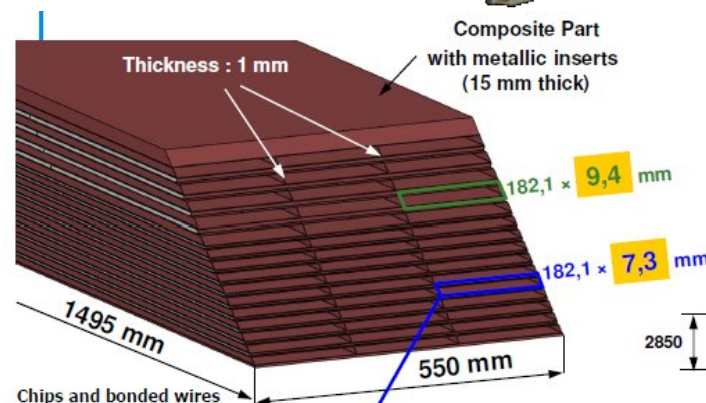
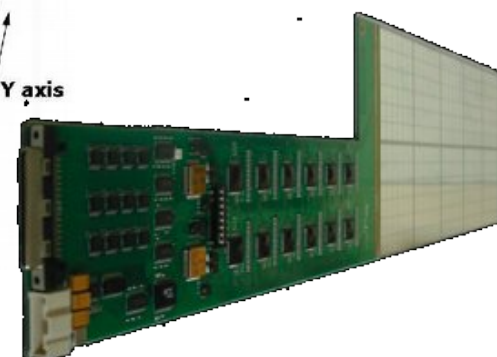
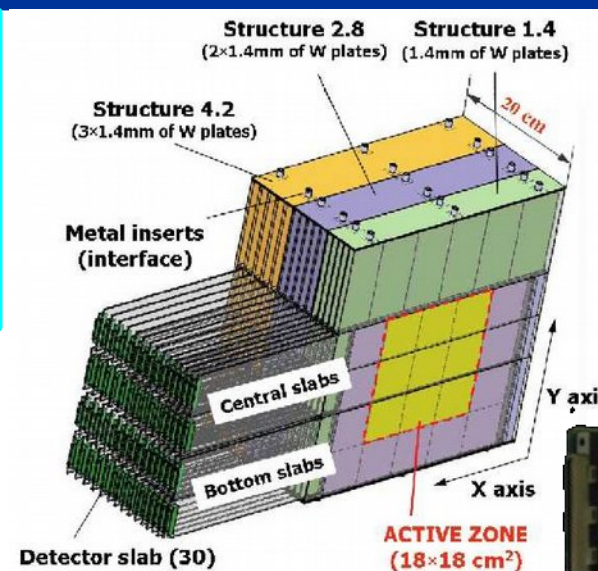
Motif

Les détecteurs au Si sont compacts: car ~ 100 paires par μm épaisseur ~ 500 μm → 50000 paires

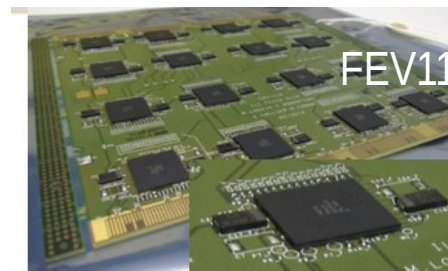
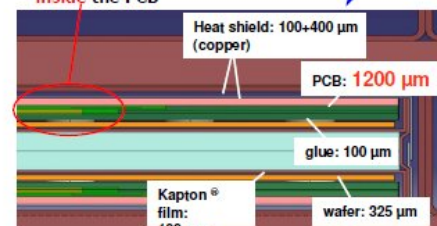
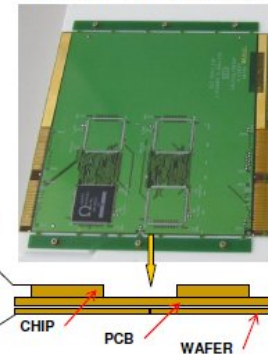
Le calorimètre est mince: 24 X_0 pour ~20 cm en 40 couches
Les gerbes sont étroites $R_M \sim 1\text{cm}$

beaucoup de canaux de lecture, 100M
extrême granularité : 5x5 mm² → Electronique enfouie

Très bonne efficacité de reconstruction des photons dans un environnement chargé



FEV7 CIP at the present time

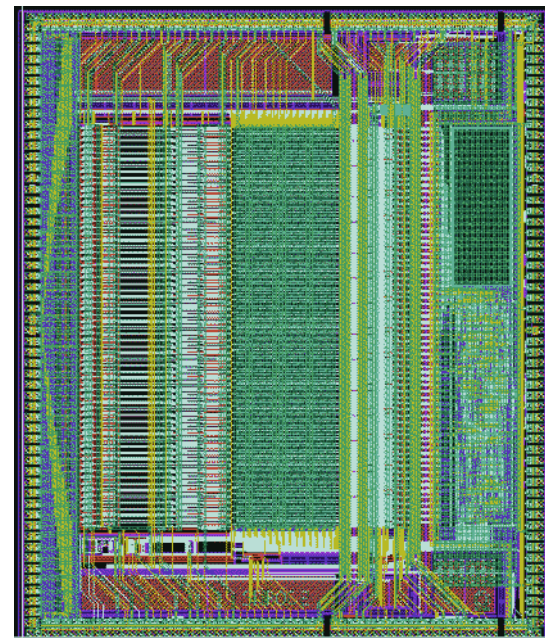


SKIROC : ECAL readout

SKIROC2 : Silicon Kalorimeter Integrated Read-Out Chip

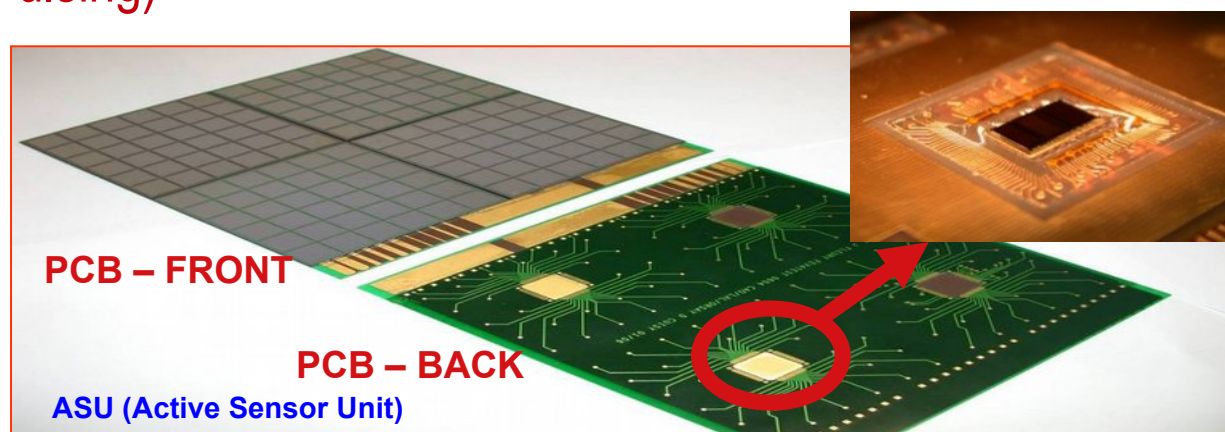
- 64 canaux, AMS SiGe 0.35 μm , 70 mm^2
- **Très grande gamme dynamique:**
 - HG for 0.5-150 MIP, LG for 150-2500 MIP
- Auto-déclenchement, Stockage Analogique (16 evts), Numérisation (12b), Etiquetage en temps (BC)
- Token-ring ReadOut (Chainage)
- Basse consommation (Power-Pulsing)
- Testability at wafer level

Omega

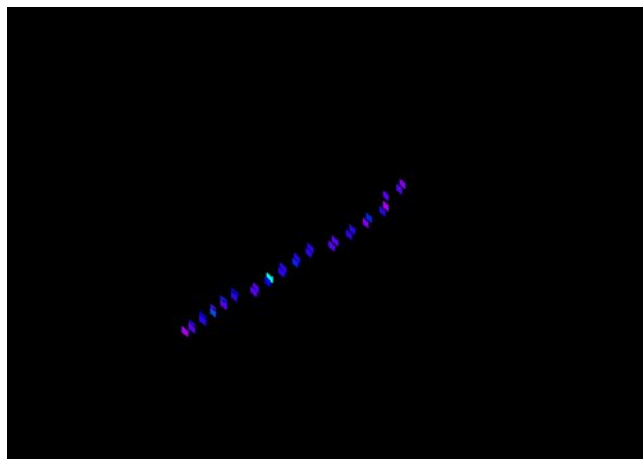


Front End boards
crucial element

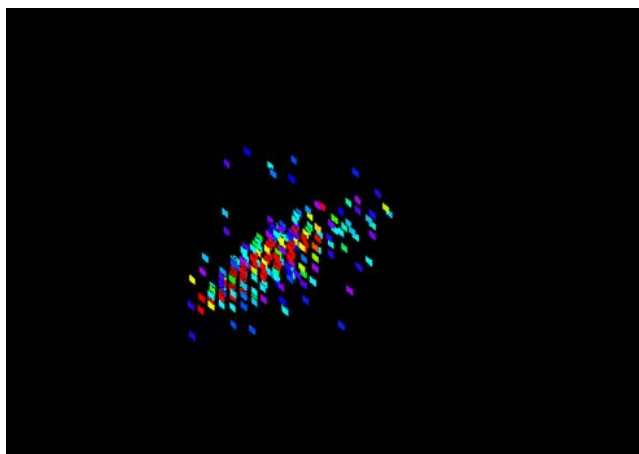
ECAL detector with PCB ≈ 20 pF



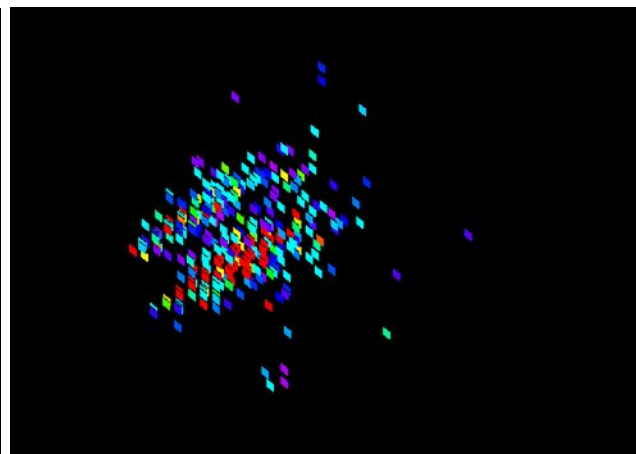
Quelques événements (test en faisceau) dans le Si-W CALICE



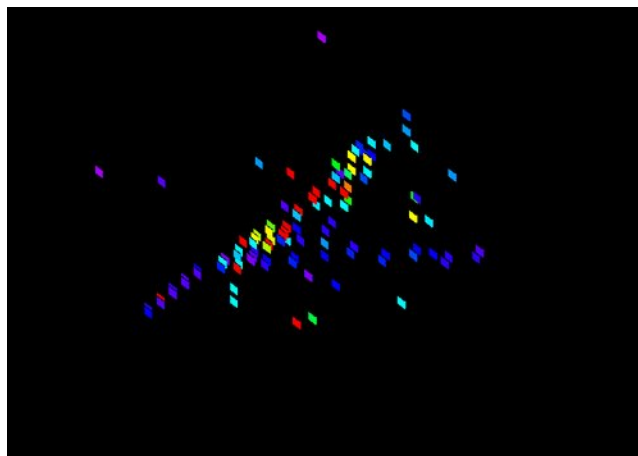
Un μ ou un π



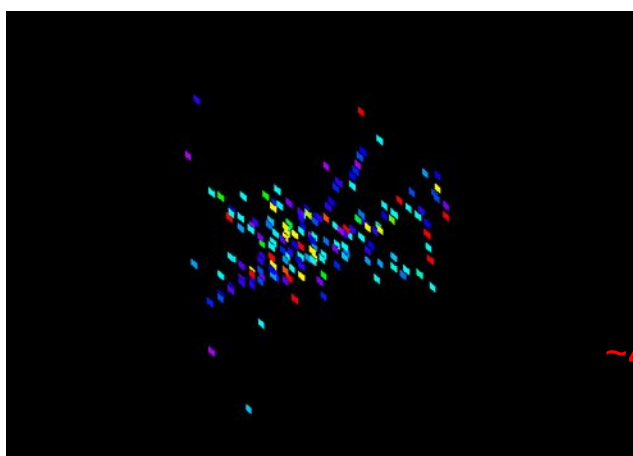
Un e^- ou un γ



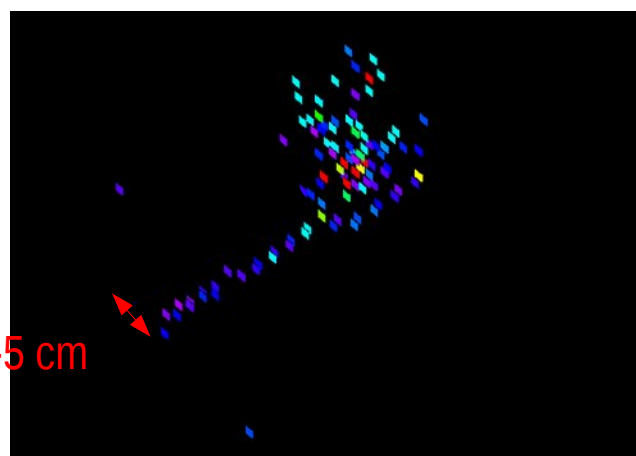
2 e^-



Un hadron (π)



Un hadron
(avec composante EM)



~4-5 cm

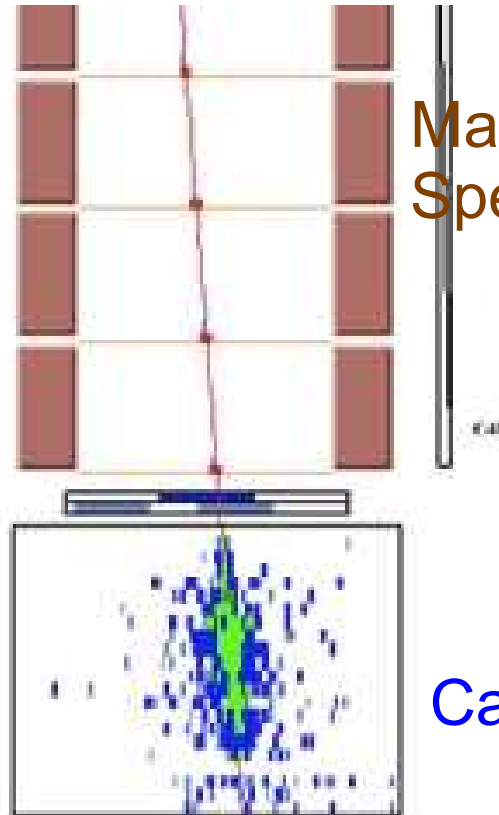
hadron chargé
& h. chargé ou μ

SiW ECAL : Pamela

Satellite mesure de Matière noire

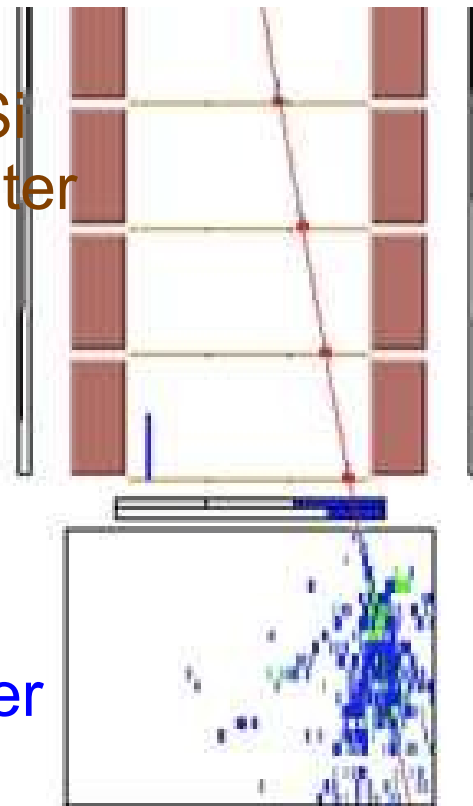
Magnetic Si
Spectrometer

**18 GeV/c
electron**



EM
Calorimeter

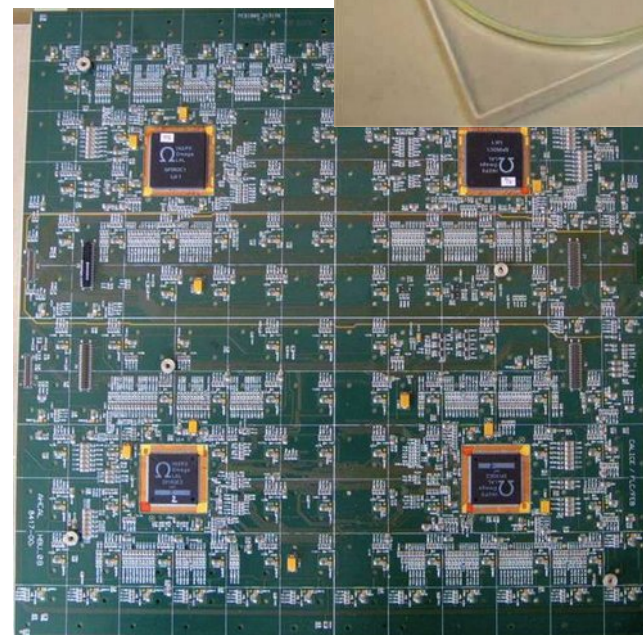
**36 GeV/c
proton**



AHCAL & SDHCAL : Fe-Scint & Fe-RPC

38 couches 2 cm acier + tuiles scint de 3mm × 3×3cm²

48 couche de 2cm acier + RPC 1,2mm × 1×1 cm²
lecture digitale ou semi-digitale → 400 000 canaux



Tests en faisceau

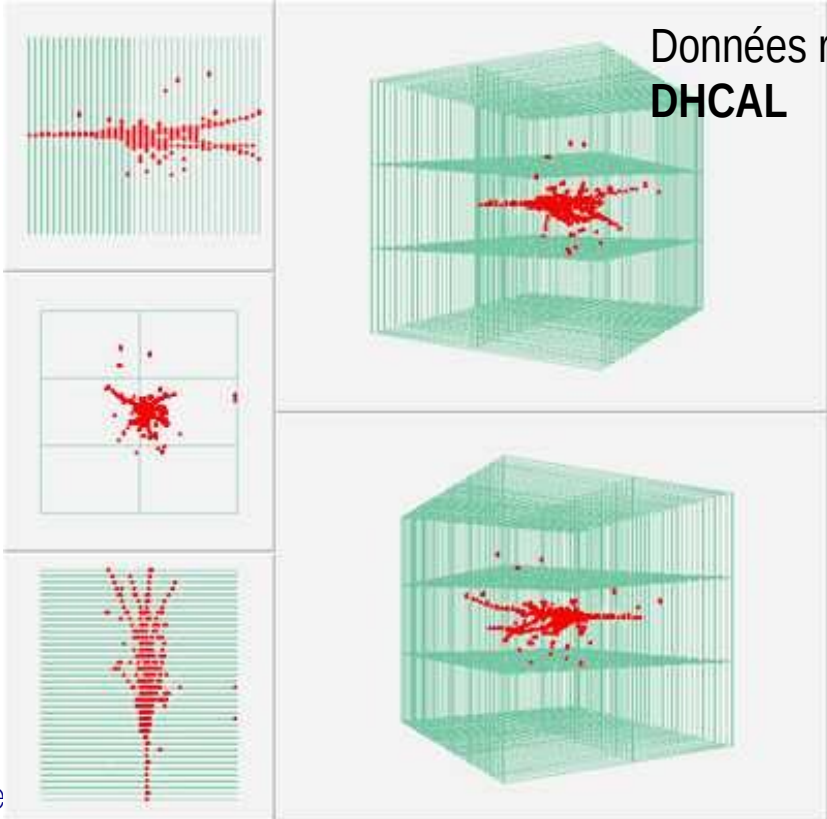
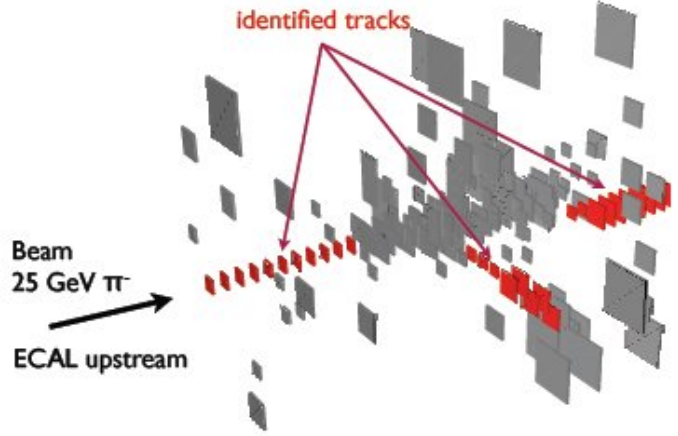
Validation technologique

- électronique enfouie
- refroidissement, power-pulsing ...

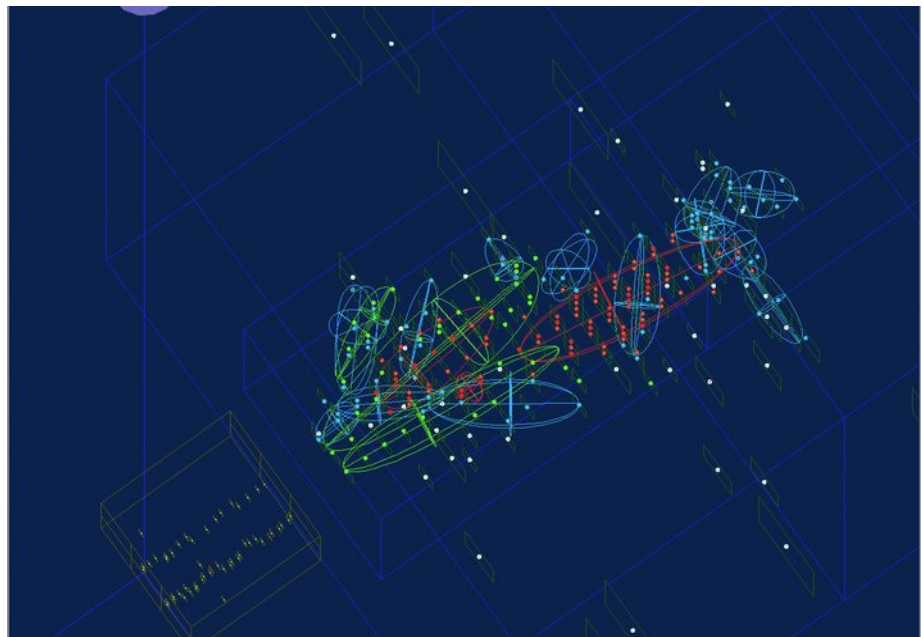
test des performances de physique pure

Amélioration des Monte-Carlo → PFA

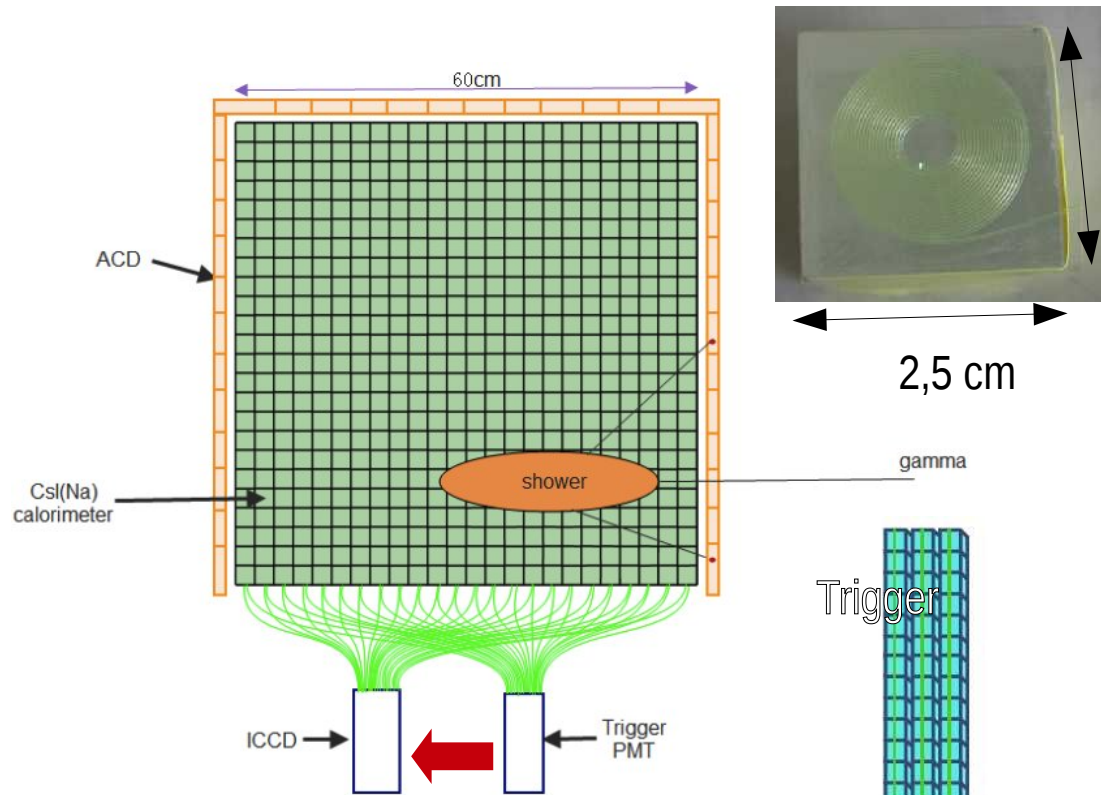
test des algorithmes



Données réelles
DHCAL



Calorimétrie digitale homogène

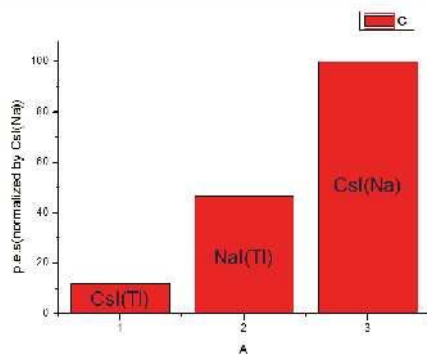
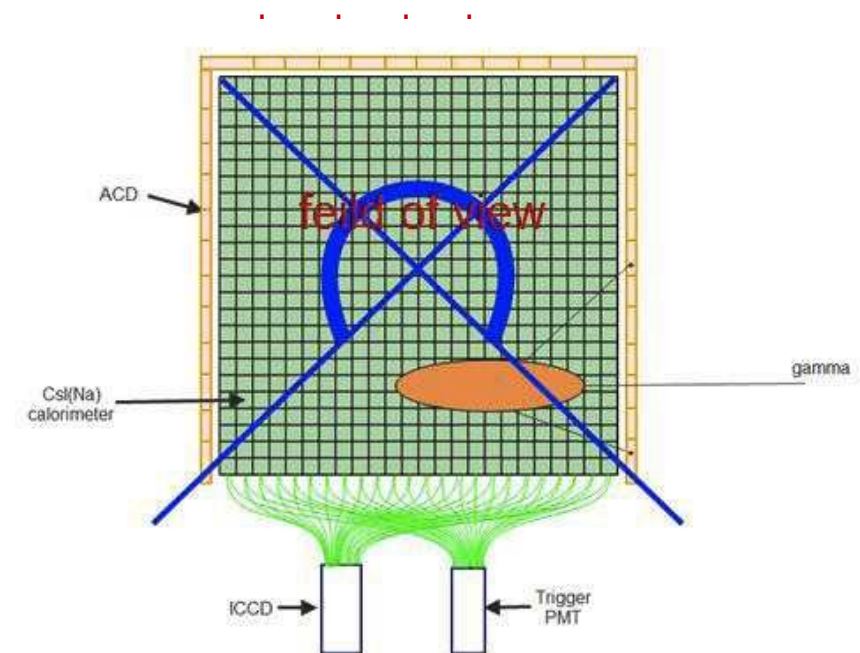
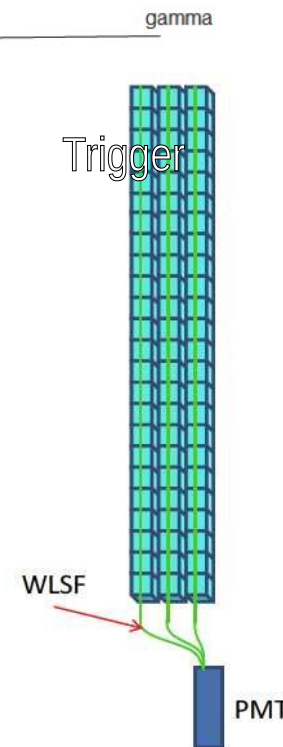


Proposition IHEP Beijing

Satellite → Recherche de matière noire (DM)

- WIMPs ; $10 \text{ GeV} < m < 10 \text{ TeV}$
- DM+DM → $e\bar{e}, \gamma\gamma, \dots$

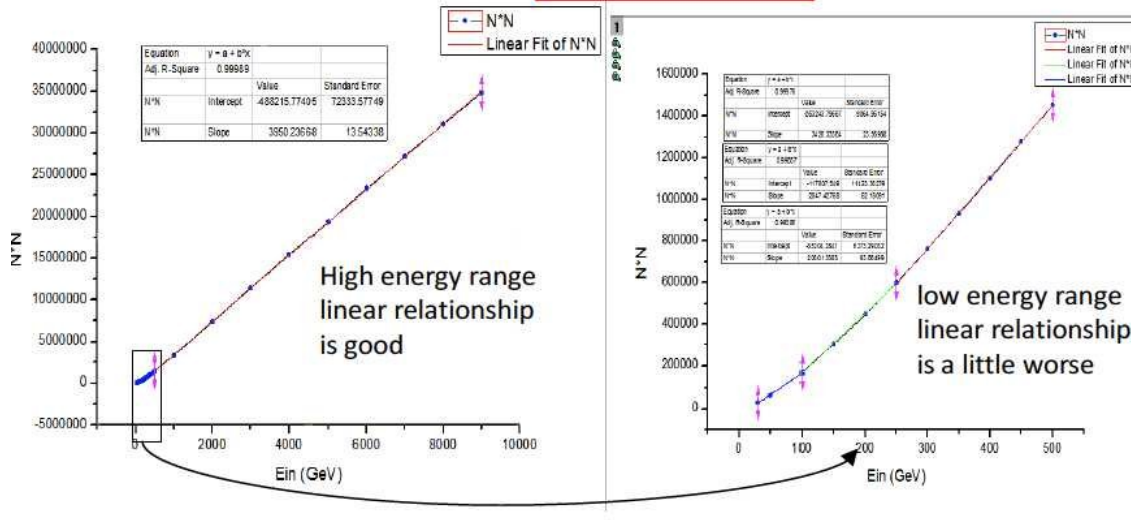
ECAL $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$



Calorimétrie (Semi)Digitale

From the MC data we found the relationship is:

$$N_{hit}^2 \propto E_{incident}$$

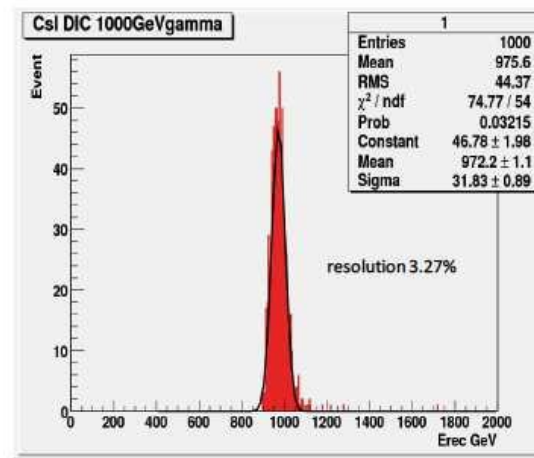


Si la taille des cellules est suffisamment petite

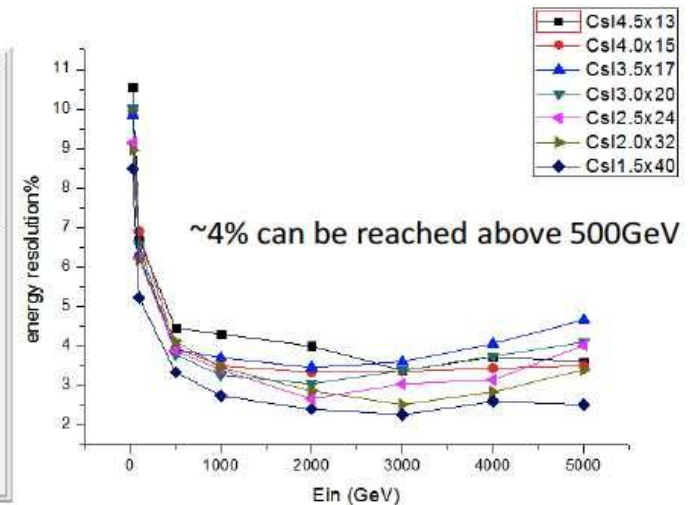
Comptage de cellule
≡ mesure !!!

REM : Vrai aussi pour les gerbes EM de basse E

Angular resolution $\sim 0.5^\circ$

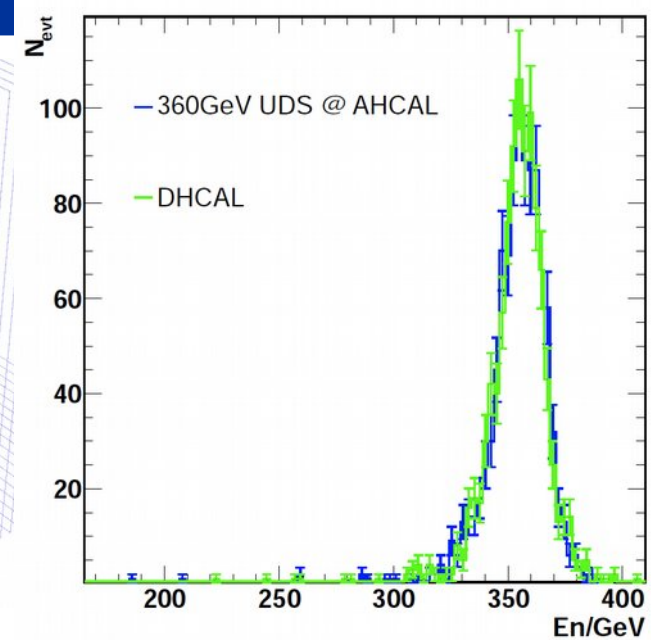
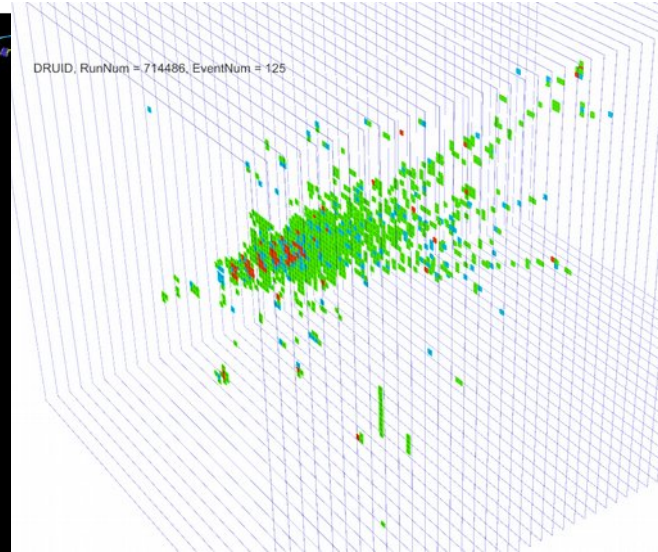
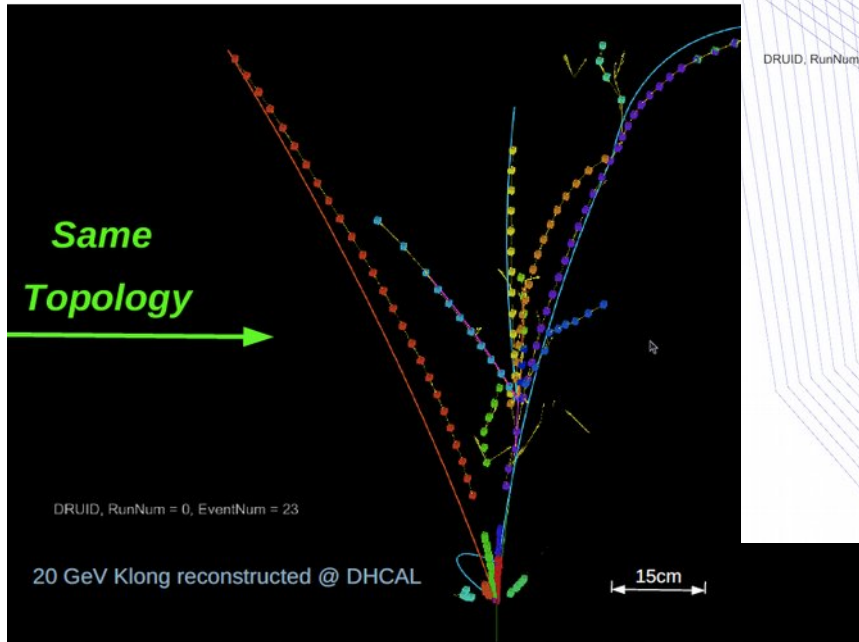


Energy reconstruction distribution of 1000GeV gamma-ray



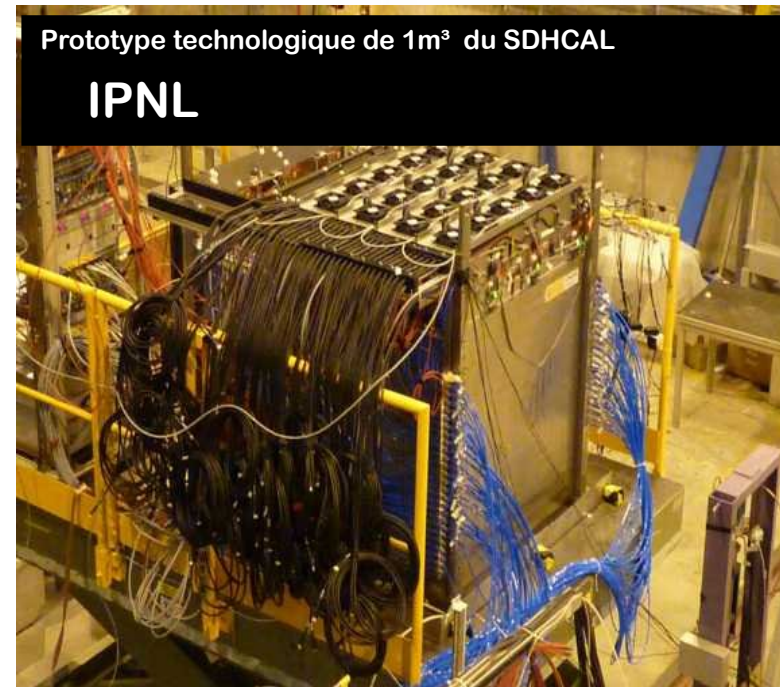
Energy resolution compare of different granularity 1.5—4.5 cm

Perpective de la très haute granularité

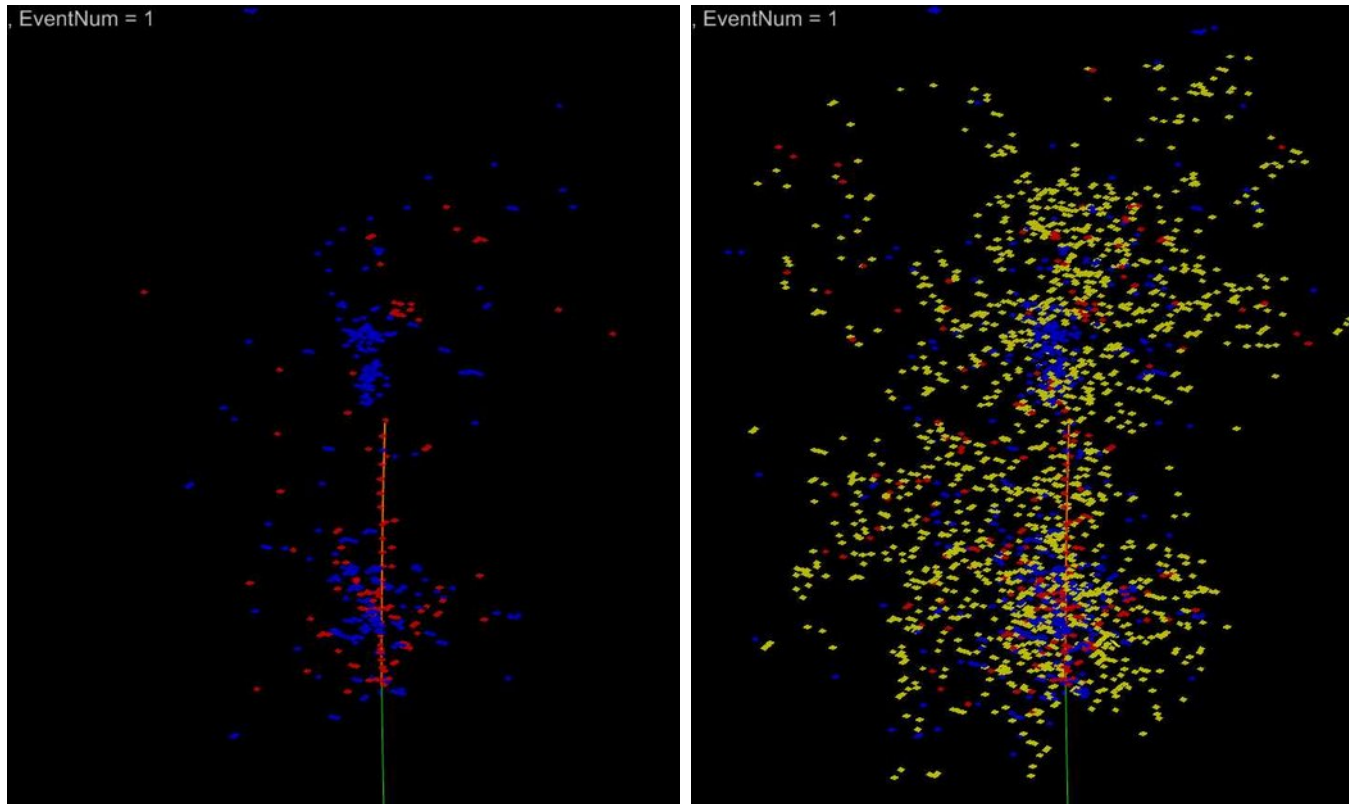


Imagerie calorimétrique

- le retour aux chambres à bulle ?
 - reconstruction de traces,
 - extrapolation des pertes
 - identification des types d'interaction
 - correction e/h

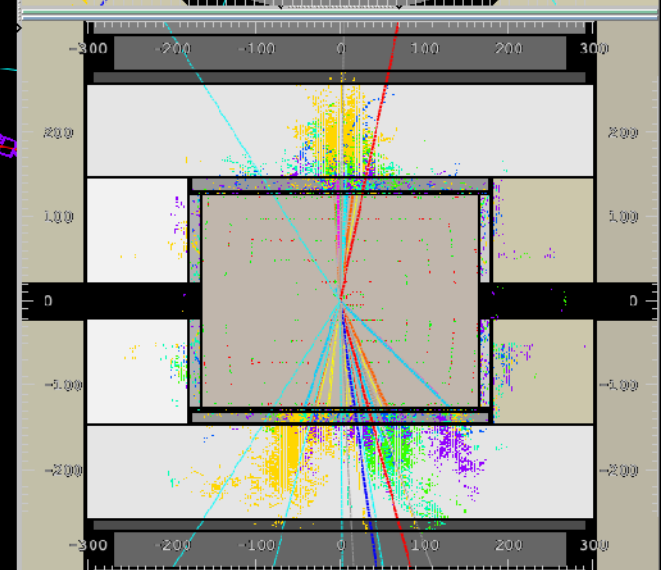
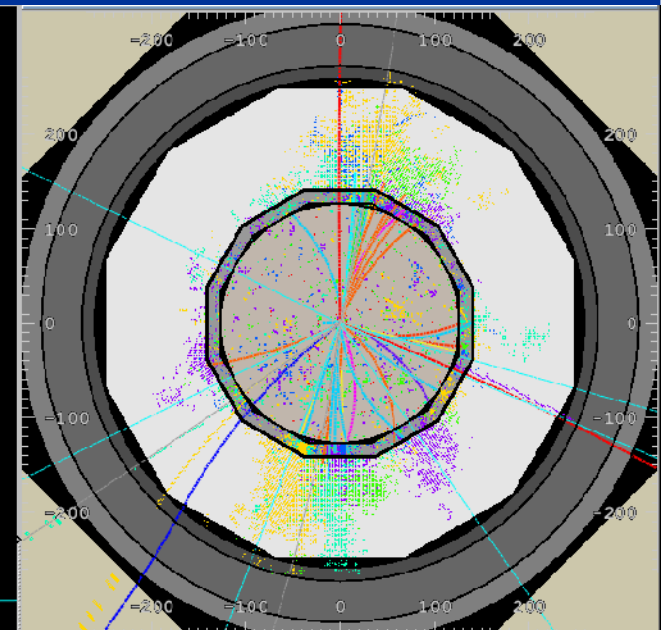
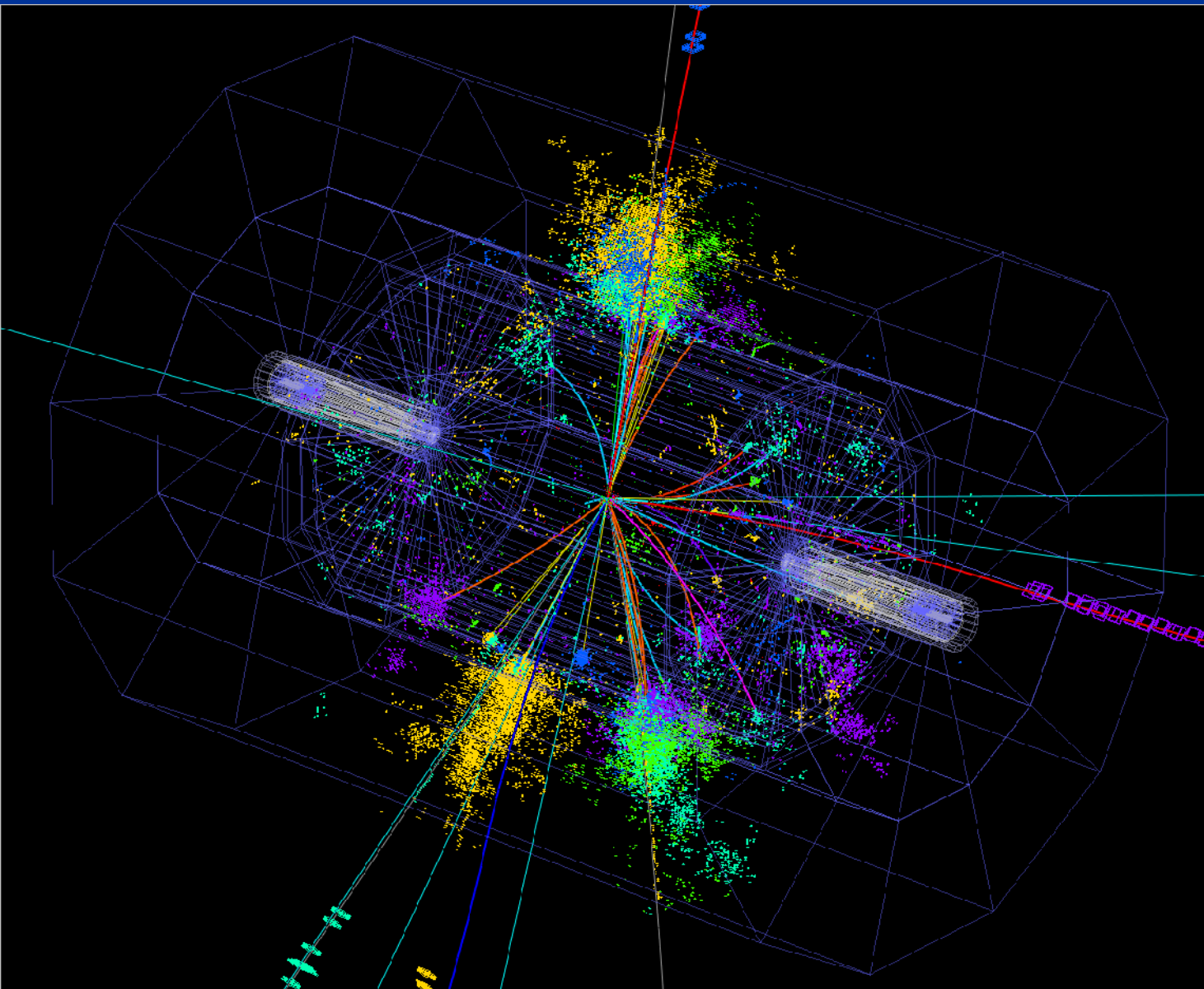


Avec ou sans neutrons ?



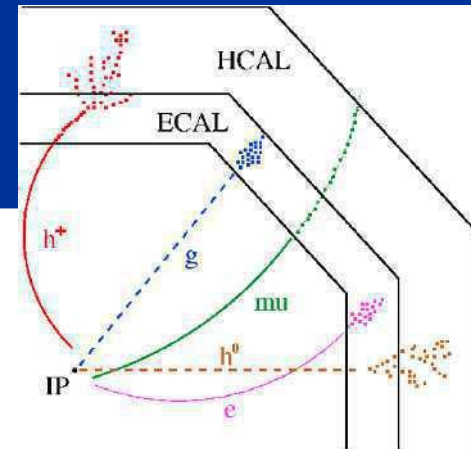
⇔ Capteurs sans ou avec H ?

Faut-il privilégier la résolution brute ou faciliter la reconstruction ?



$t\bar{t}b\bar{b}$ à 500 GeV → Performance Calcul ?

Calorimétrie ultra-granulaire



Calorimètres U.G. 1000× granularité actuelle (CMS, ATLAS)

- Flux bien moindre, mais électronique intégrée

R&D nécessaire :

- Dimensionnement, Mécanique, Wafers, Electronique intégrée, VFE

CALICE

- Construction & test de Prototypes : **SiW ECAL, SDHCAL**

- Placement dans le détecteur & Intégration Optimisation : Physique vs coût, services (PP, cooling)

ILD

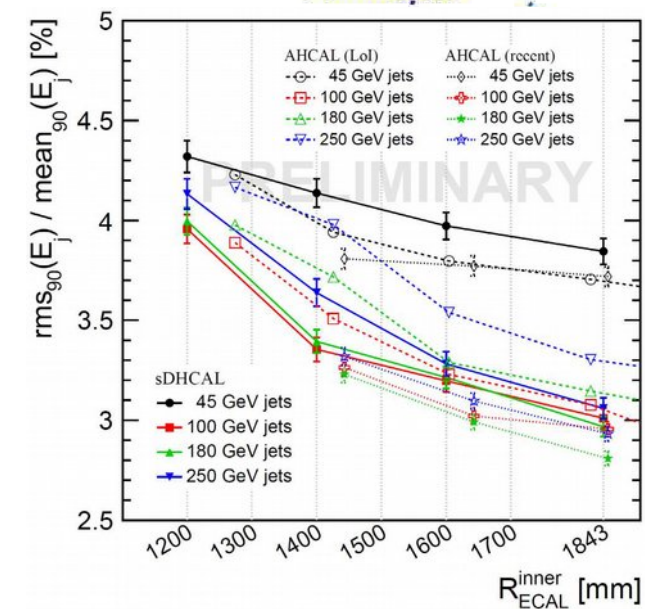
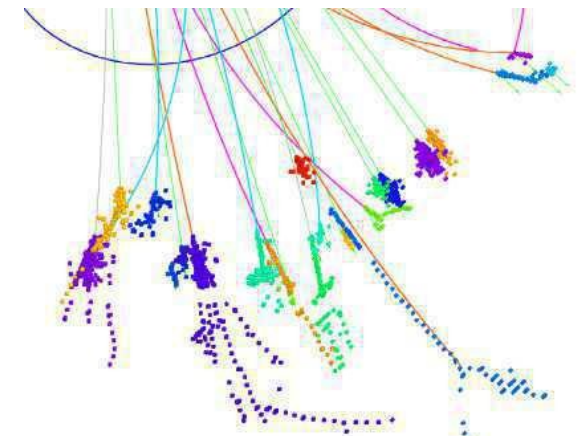
- Costing → Ex Si-W ECAL

- Outils pour la PFA : Simulation Mokka (sim. détaillée, param.) Data Format (LCIO), Macro-Information MC, Digitiseurs, Event display, Reconstruction Tools

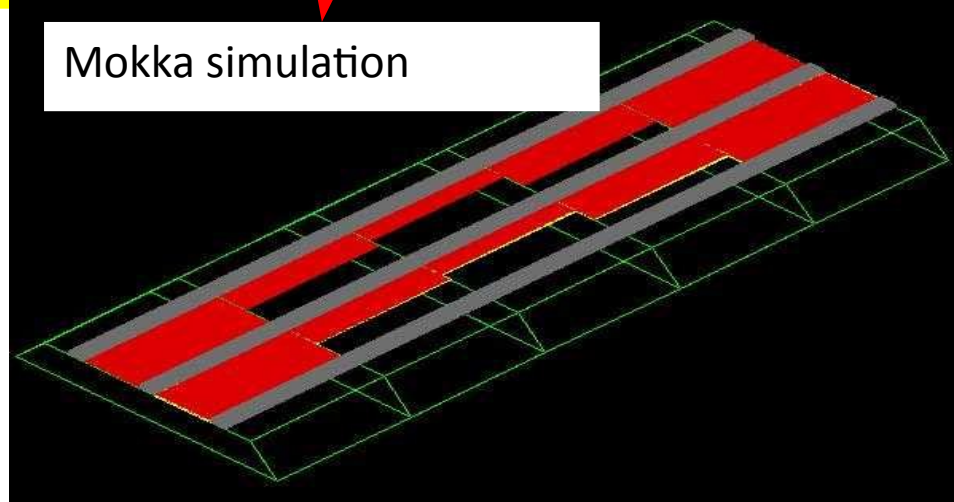
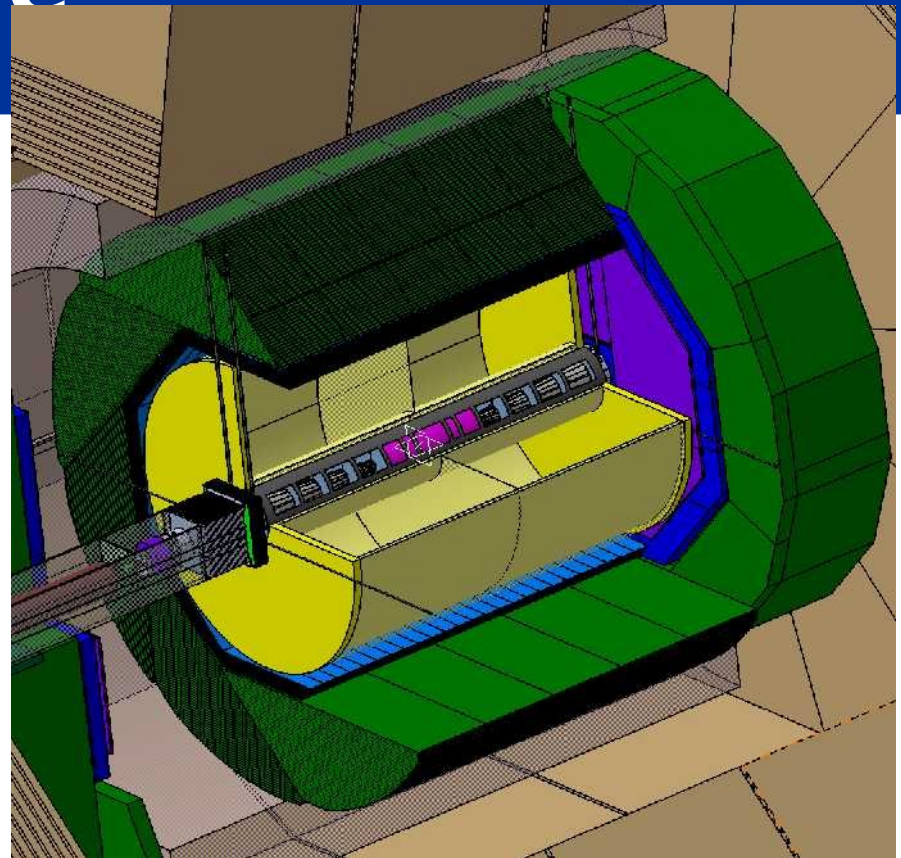
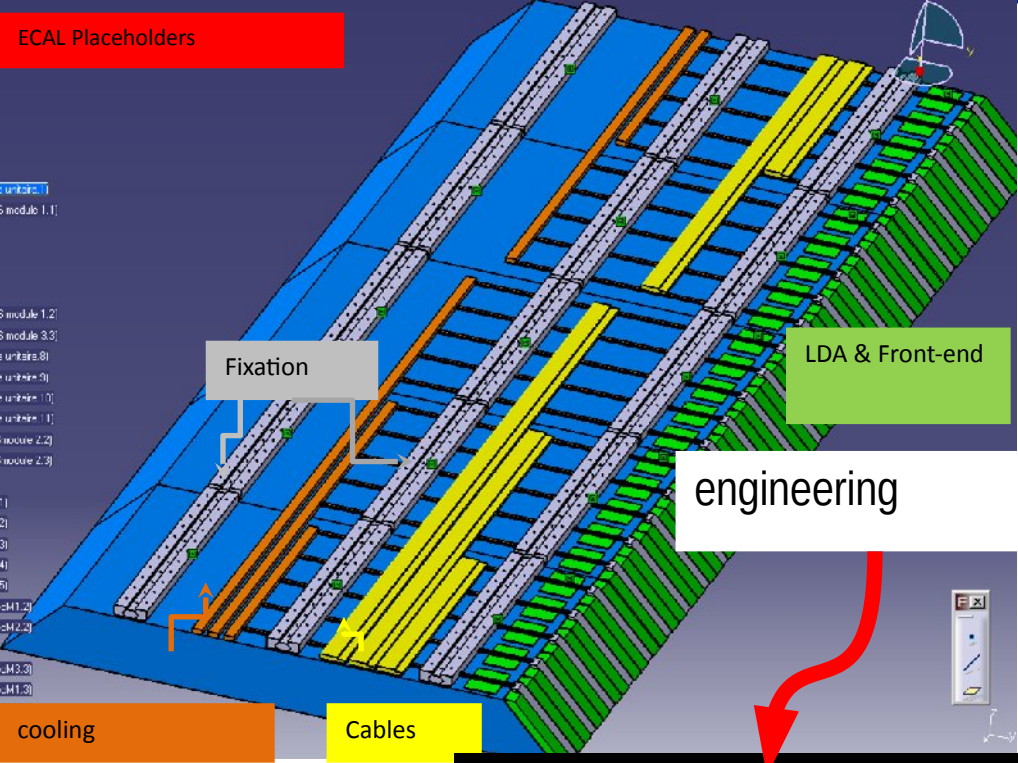
Particle Flow

- Outils de reconstruction PFA :

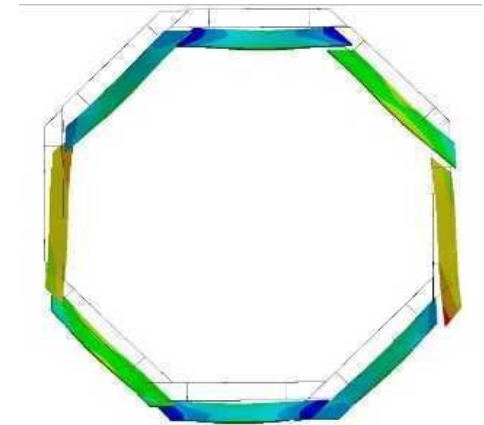
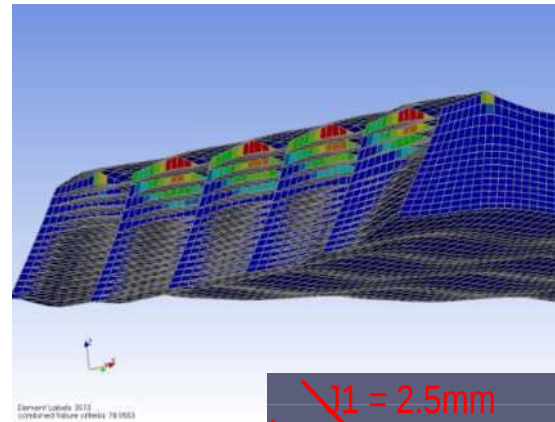
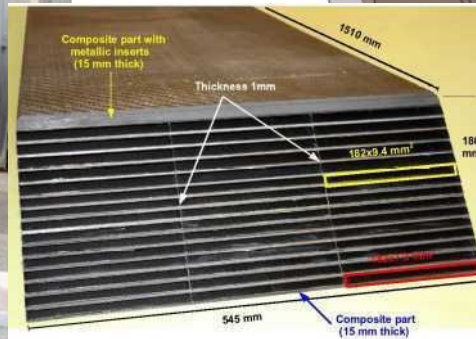
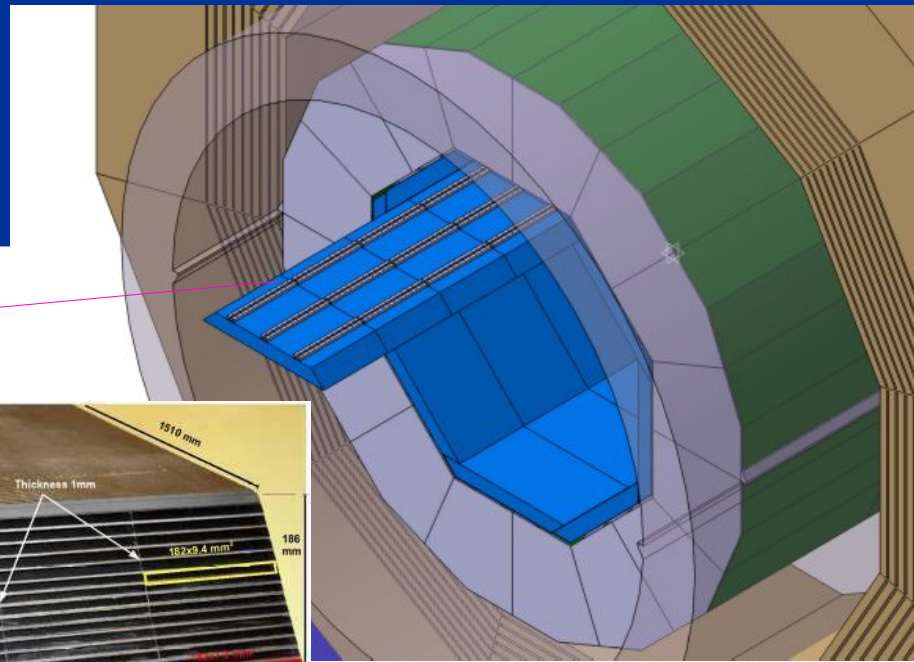
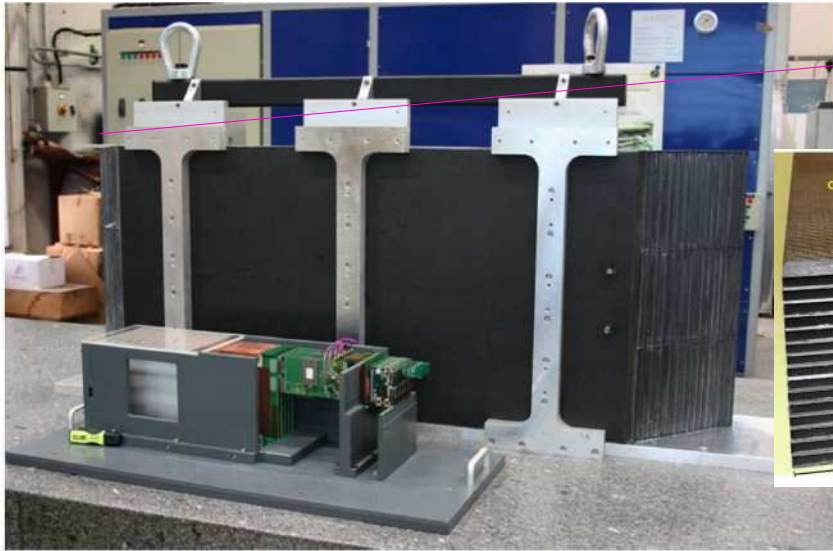
- **Difficulté** : perf en JER = HW ⊗ SW



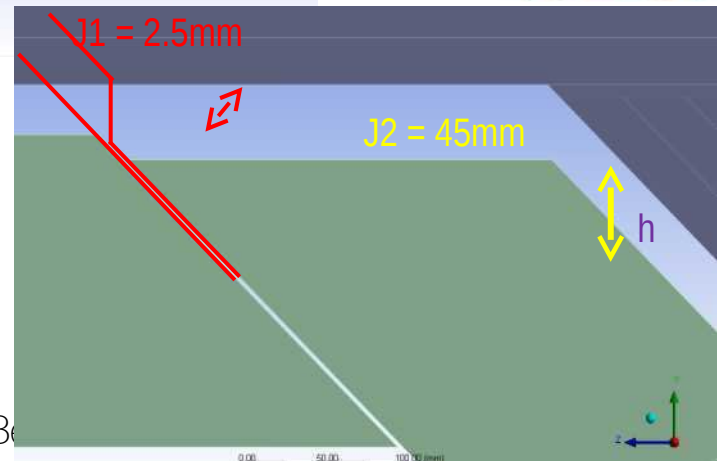
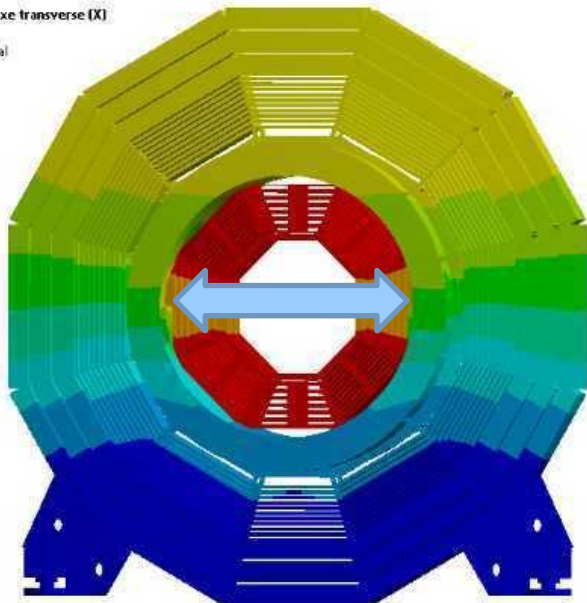
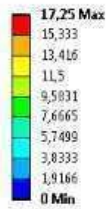
Simulation Physique



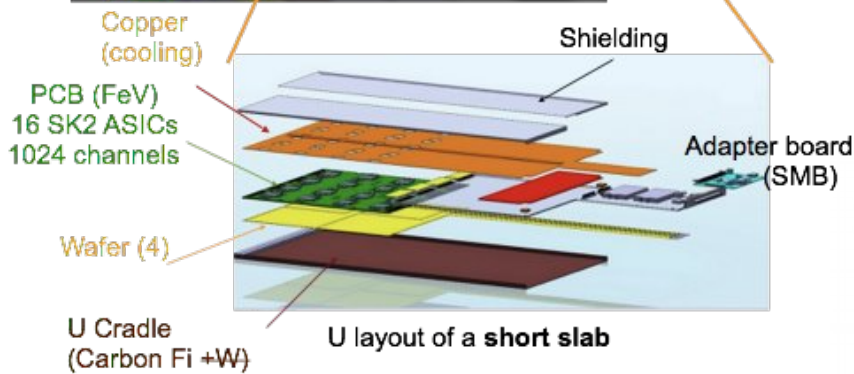
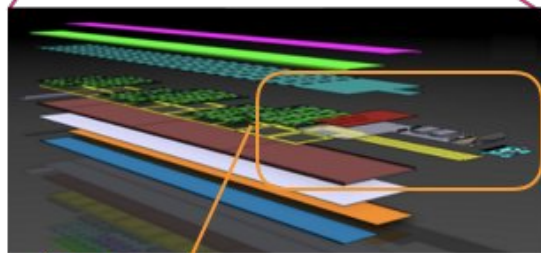
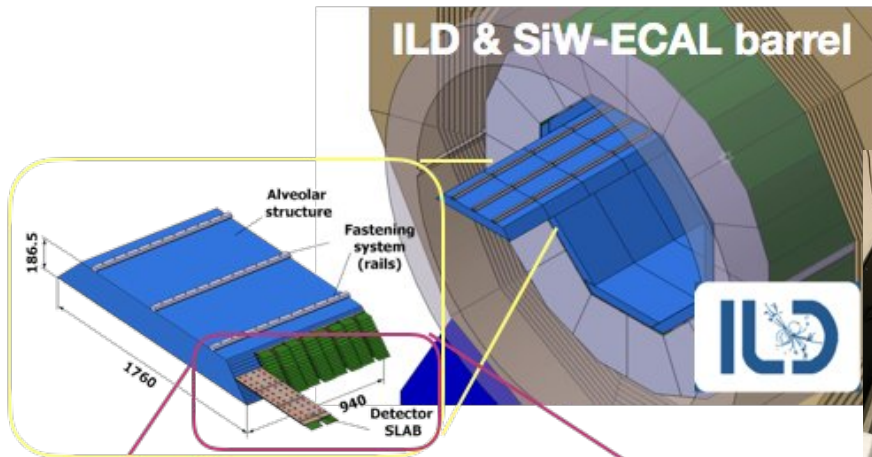
Mécanique



J: Réponse spectrale axe transverse (X)
 Déplacement total
 Type: Déplacement total
 Unité: mm
 Temps: 0
 04/09/2017 10:31



Toward SiW-ECAL for ILD



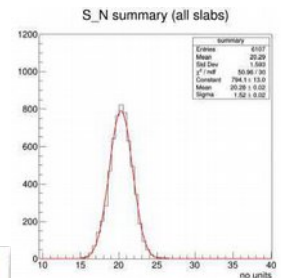
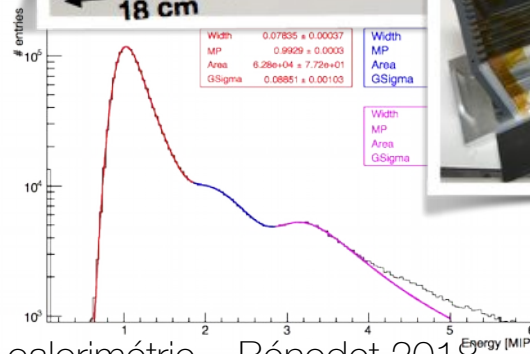
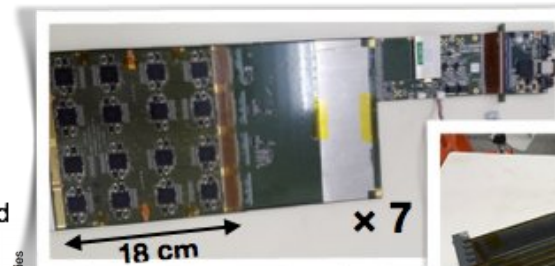
ILD SiW-ECAL

- ~10,000 SLAB's
- 100,000 ASU's
- 400,000 Wafers
- 1,600,000 ASIC's
- 100,000,000 channels

Prototyped*

- ~0.1
 - ~20
 - ~350
 - ~1000
 - ~2000/20000*
- * incl. Physical Prototype

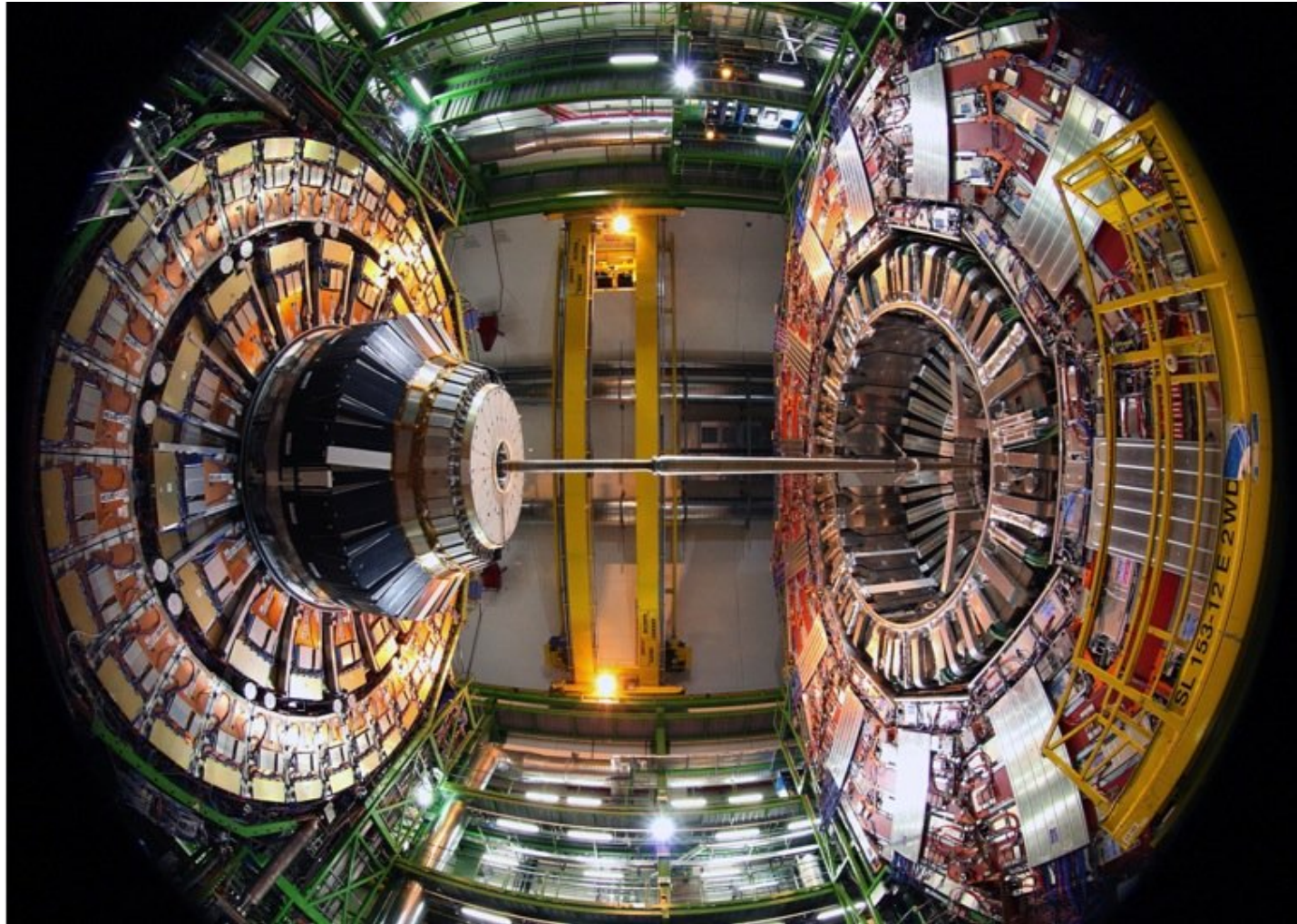
+ Mechanics , Cooling, Integration, ...



S/N = 20.3,
sigma = 1.5 (7.4 %)

(MIP position –
pedestal position) /
pedestal width

1ère application : Le HGCAL de CMS



But de l'opération

Le défi de la haute luminosité au LHC

- « Préserver la sensibilité au boson de Higgs \supset les désintégration rares et explorer les TeV (ex. SUSY) » dans un environnement à fort empilement (140 collision par croisement)



Phase 2 $\sqrt{s}_{pp} = 13-14 \text{ TeV}$ $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$
Run IV **2025-203x** HL-LHC

LS3 \equiv phase 2 upgrades

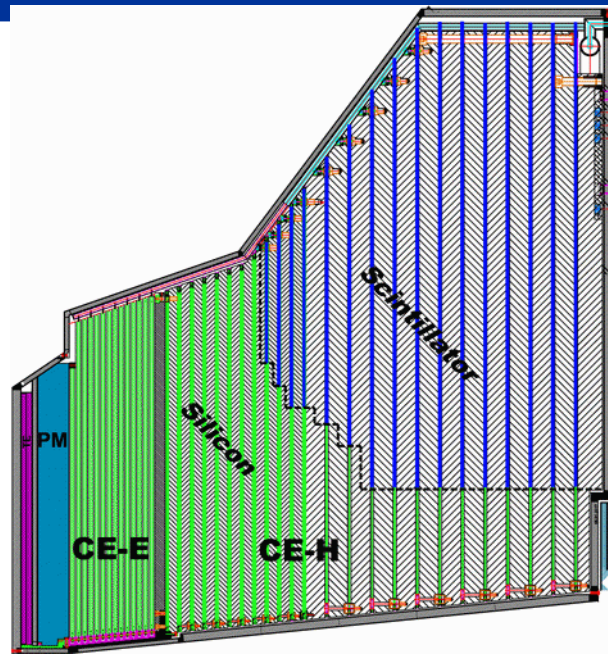
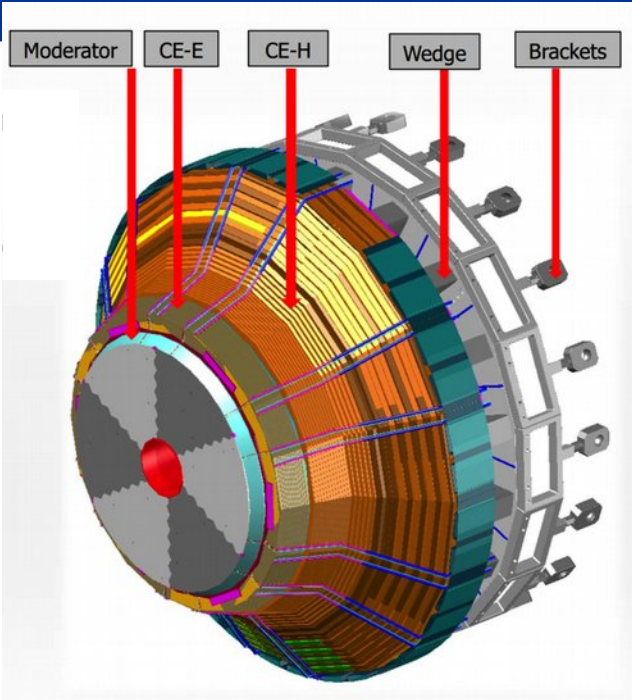
- Operate at $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ with 25 ns beam crossings ($\langle \text{PU} \rangle \sim 140$)

Les HGCAL (bouchons avant)

Calorimétrie à échantillonnage 3D dense et hautement granulaire inspiré de CALICE et adapté aux flux du HL-LHC.

Utiliser la topologie des dépôts et les capacités de tracking de la reconstruction PFA pour le trigger et l'analyse

HGCAL



EE	Cu-W / Si	26 X_0 (1.5 λ)
FH	Brass / Si	3.5 λ
HE	Cu / scint. tiles	5 λ

Electromagnetic (EE)

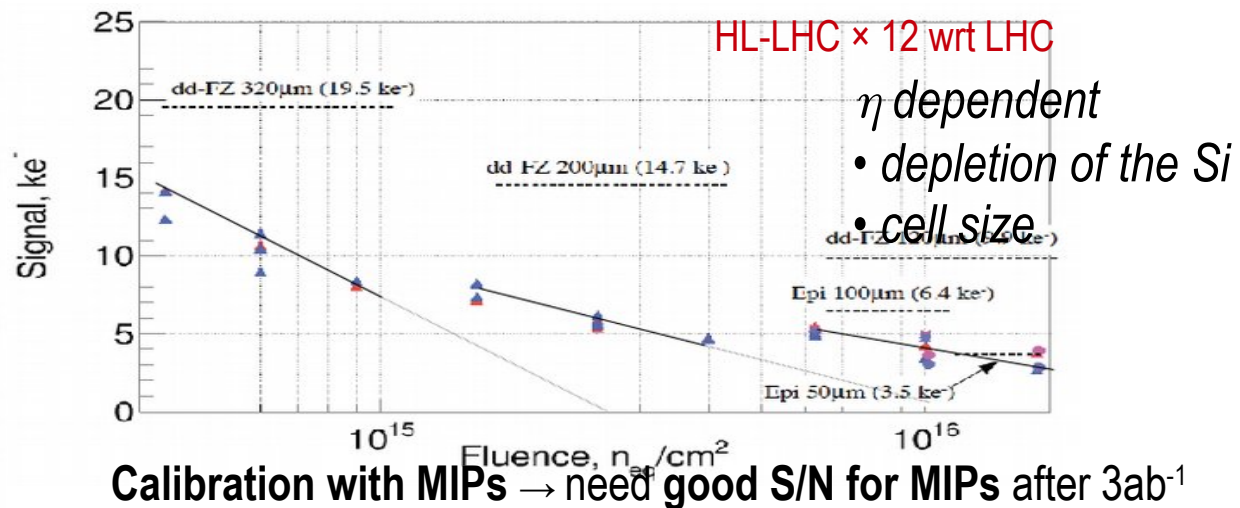
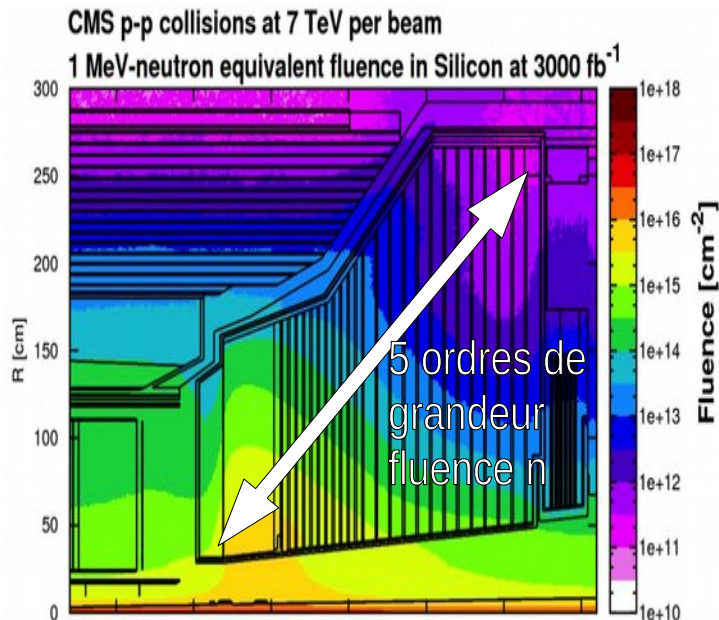
28 layers

10 \times 0.64 X_0 +

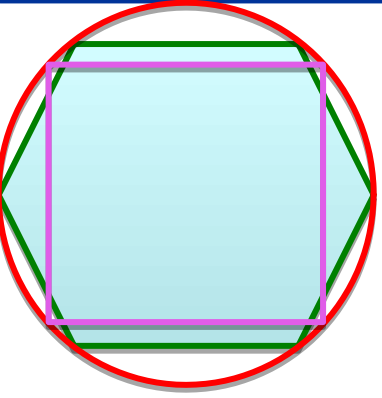
10 \times 0.88 X_0 +

9 \times 1.1 X_0

Absorbed dose in the CMS cavern
after an integrated luminosity of 3000 fb⁻¹

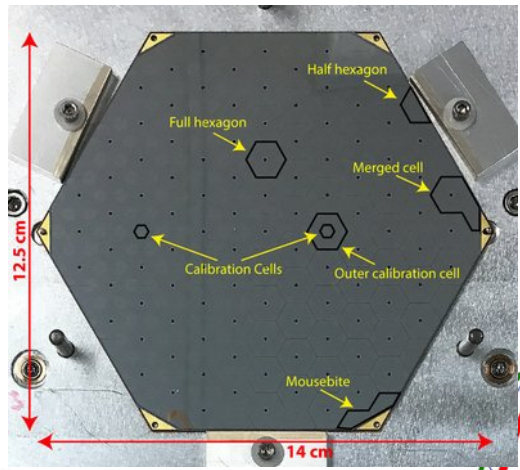


The HGCAL Cells Geometry

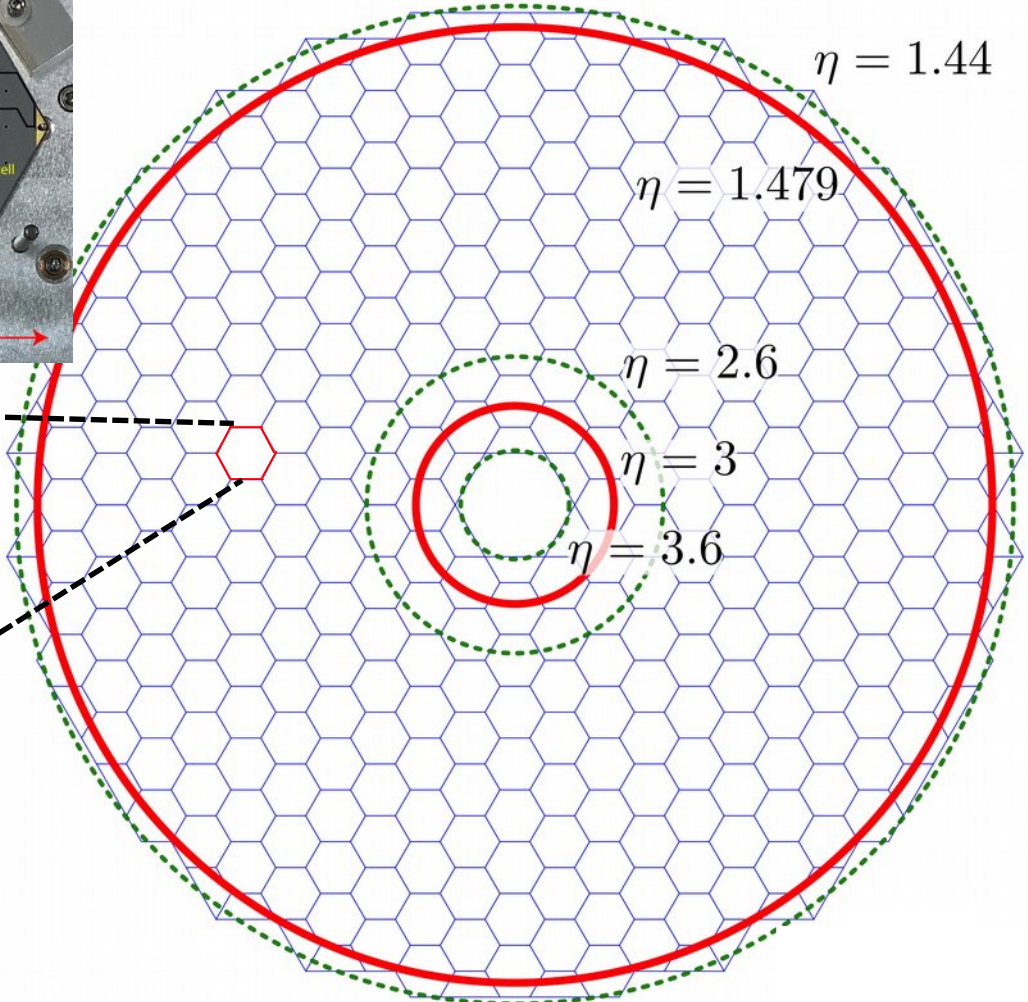
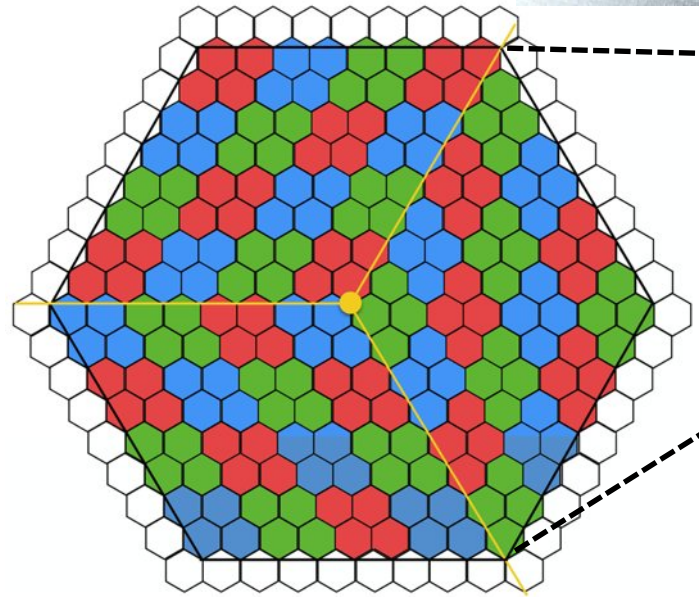


64/128/256 or 512 channels per wafers

Hexagonal 6" 8" wafers

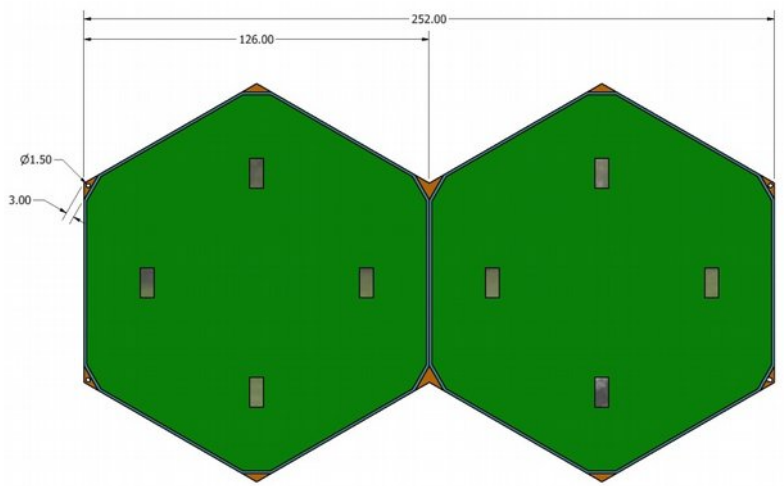
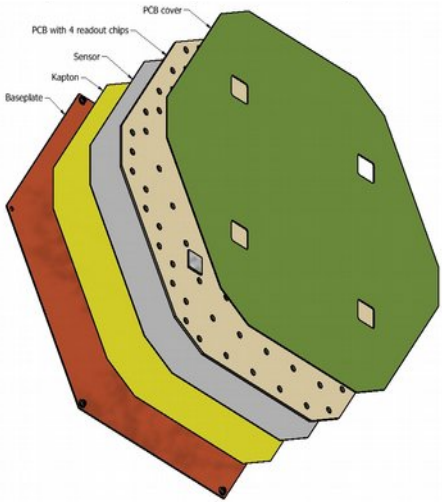


~ 25k modules (wafers) in tiled planes , ~600m²

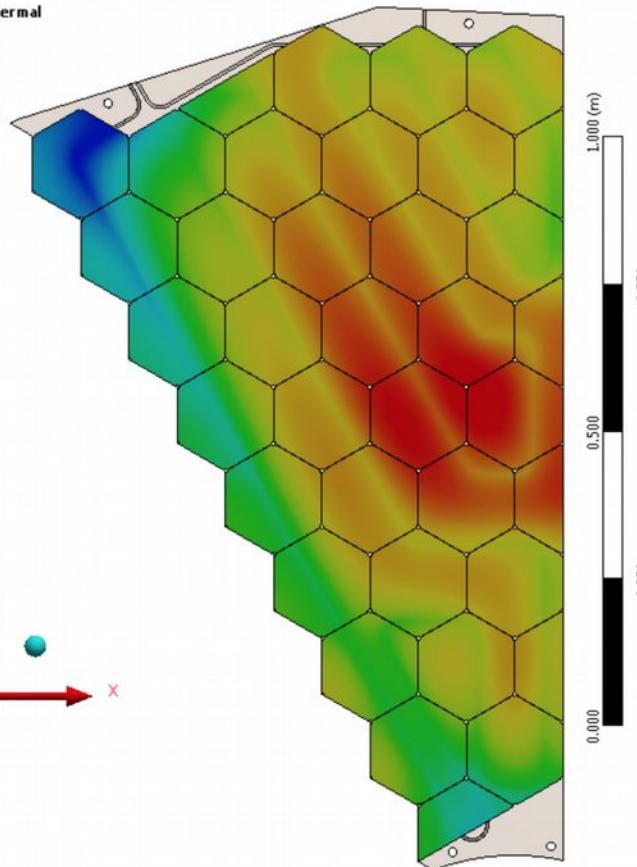
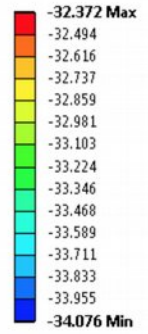


The HGCAL Readout Modules (prelim)

1 "module" = 2 × 6" Wafers

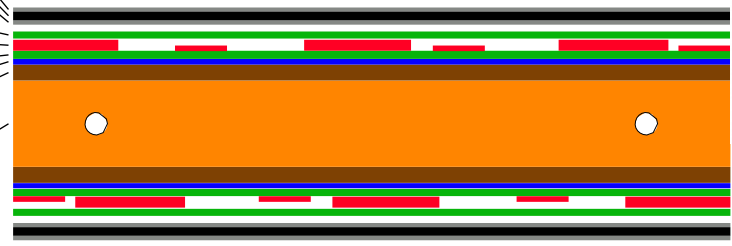


B: Steady-State Thermal
 Temperature 4
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1
 11/28/2017 3:45 PM



Stainless-steel clad
Pb absorber 2.1mm
 Stainless-steel clad

PCB motherboard
ASICs etc. PCB
 sensor board
 Silicon
 CuW baseplate
 Cu cooling plate



Calorimétrie « 5D »

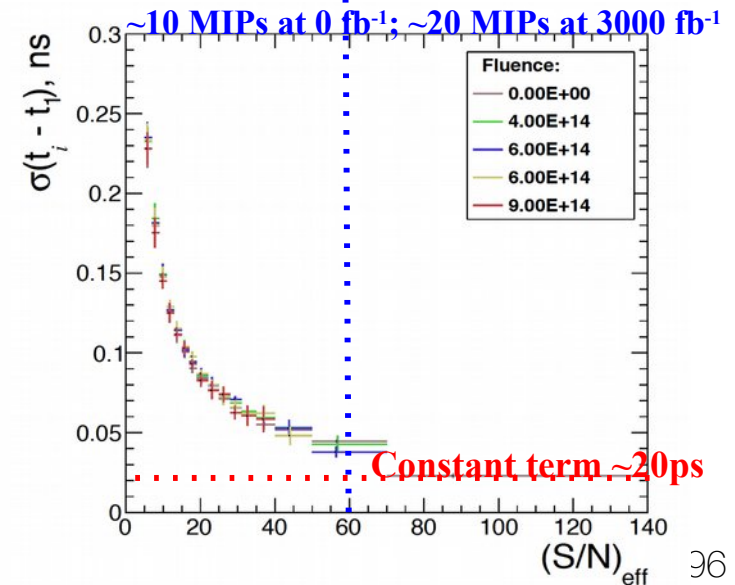
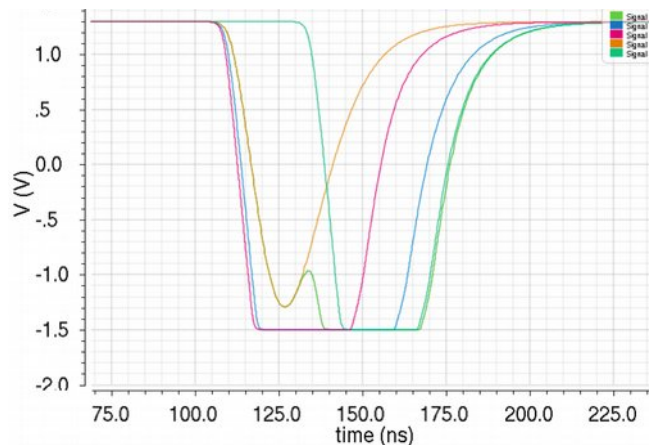
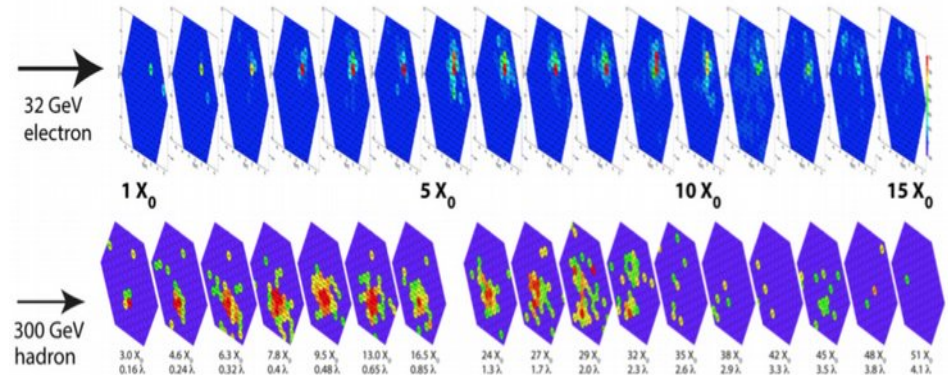
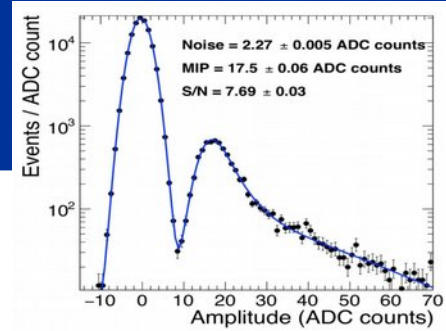
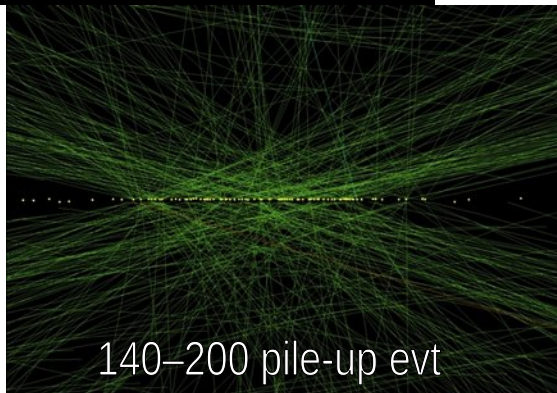
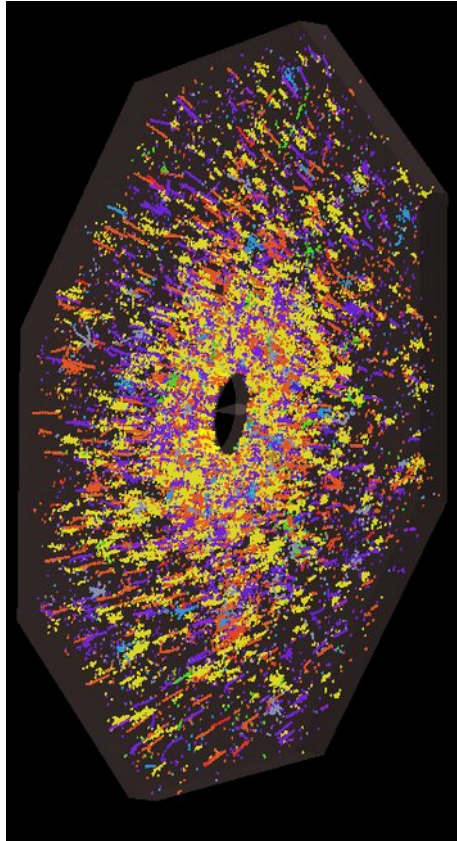
Séparation Software des différentes contributions

Réelle reconstruction « 5D »

– 4D $x, y, z, E + Temps$

Mesure en temps et
Time-over-Threshold (TOT)

– but : 100ps / plan,
~30 ps / gerbe



Résumé

Dans les gerbes EM sont composées de photons et électron/positrons

- Seuls les e^\pm déposent leur énergie en **ionisant** (la plupart à basse énergie)
- Elles sont de **forme bien définie** (un cœur + 1 halo) mesuré en X_0 et $R_{\text{molière}}$ (**$1 X_0 \sim 1 \text{ cm}$**)
- Elles sont **compactes** (99% dans $30 X_0$ et à 95% dans $2 R_M$)

Les gerbes hadroniques sont constitués de hadrons (p,n, π ,...), fragments de fission

- Elles sont de **forme irrégulière**, et de contenu très fluctuant
- Elles sont contenues à 95% dans $\sim 8\lambda_{\text{int}}$ en longueur et $1,5 \lambda_{\text{int}}$ latéralement
 $1 \lambda_{\text{int}} \sim 30 \text{ cm} \sim 30 X_0$.
- Une fraction $f_{EM} \sim 30\% - 60\%$ ($f(E)$) de leur énergie est déposée sous forme de gerbes EM

Les calorimètres estiment l'énergie par comptage de traces

- **Linéaires**
- **Résolution** : $\delta E/E = \alpha / \sqrt{E} \oplus \beta/E \oplus \gamma$
 - $\gamma \leftrightarrow$ inhomogénéités : domine à haute énergie
 - $3-20\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$ pour les ECAL ; $50-100\%/\sqrt{E} \oplus 3-5\%$ pour les HCAL

Résumé (suite)

Il existe 2 type de calorimètres :

- **«homogènes»** :
meilleures résolutions, segmentation grossière, mécaniquement limités, prix élevé
- **à échantillonnage** :
moins bonne résolution, flexibilité mécanique & de segmentation

Il existe de multiple technique de détections :

- Collection de lumière : Scintillation et/ou Čerenkov + détecteur de photons
- Collection de charges : Semi-conducteurs, liquides nobles, amplification gazeuse

Amélioration matérielles des performances :

- **Compensation** : compromis & doigté
- Double lecture \Rightarrow correction de f_{EM}

Amélioration logicielle (avec Segmentation)

- **Clustering** \Rightarrow réduction du bruit ; Identification de particules, détermination de la direction
- Améliorations SW
 - Pondération & Weighting
 - Particle Flow : résolution \rightarrow segmentation

Remerciements & Emprunts

Précédents cours de cette école

- Isabelle Wingerter-Seez (Oléron 2009)

Marzio Nessi (XI ICFA SCHOOL ON INSTRUMENTATION IN ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS)

Cours à EDIT-2011 (école instrumentation du CERN)

- R. Wigmans, D. Fournier, F. Sefkow, M. Diemoz, ...

Présentations à CALOR'2010, CHEF'2013

Collègues ILC et CALICE

- Henri Videau, Jean-Claude Brient, Riccardo Fabbri, Frank Simon, Manqi Ruan, G. Garillot

Collègues CMS

- Yves Sirois, Ch. Ochando, D. Barney

Cours de L. Marleau

Extra

Contrainte pour les détecteurs (ILD / SiD pour l'ILC)

Prédicat « de base »: sep of $H \rightarrow WW/ZZ \rightarrow 4j$

$$\sigma_Z/M_Z \sim \sigma_W/M_W \sim 2.7\% \oplus 2.75 \sigma_{\text{sep}}$$

$$\Rightarrow \sigma_E/E (\text{jets}) < 3.8\%$$

$$- 60\%/\sqrt{E} \rightarrow 30\%/\sqrt{E} \Leftrightarrow +\sim 40\% L$$

Large TPC

- Precision and low X0 budget
- Pattern recognition

Précision par les détecteurs : vertex (Pixels) & Calo SET (strips)

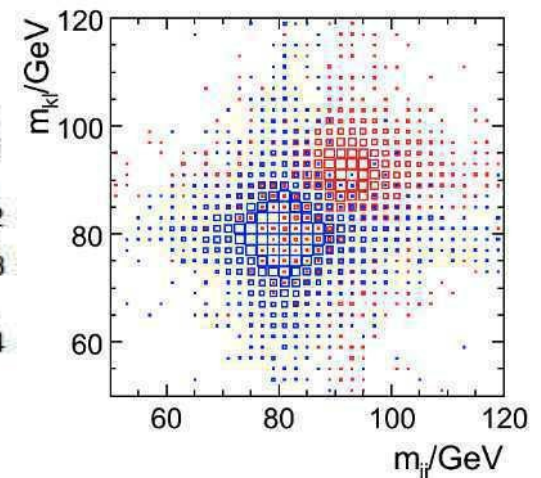
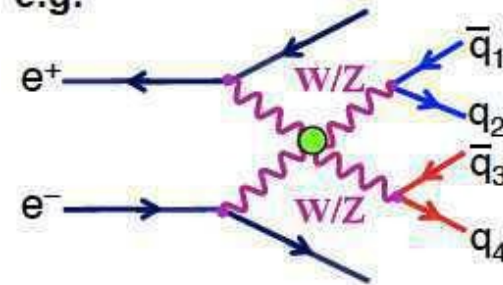
- Étiquetage des hadrons de b et c

Large acceptance

Fwd Calorimetry:

- lumi, veto, beam monitoring

e.g.



Le paradigme du PFA

- Jets = 65% chargés + 25% γ + 10% h^0
Traces ECAL HCAL
- TPC $\delta p/p \sim 5 \cdot 10^{-5}$; VTX $\sigma_{x,y,z} \sim 10 \mu\text{m}$

H. Videau and J. C. Brient, "Calorimetry optimised for jets," in Proc. 10th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 2002), Pasadena, California. March, 2002.