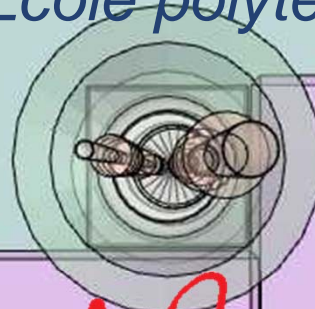


La calorimétrie

Partie 3

Vincent Boudry

LLR, École polytechnique



LLR

École du détecteur à la mesure

Oléron, 16—23 juin 2011

Plan

□ Introduction

- ▶ Les interactions des particules dans la matière
 - ◆ interactions hadronique, réponse en temps, ...
 - ◆ Les belles gerbes
- ▶ Principe de la mesure en calorimétrie
 - ◆ calorimétrie électromagnétique & hadronique
 - ◆ mesure de la performance

Jeudi

□ Techniques de détection

- ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
- ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
- ▶ Détecteurs Gazeux
- ▶ Quelques exemples
- ▶ Quelques effets «annexes» & considérations «pour les ingénieurs»

Vendredi

□ Améliorations & perspective

- ▶ Améliorer la mesure : SW & HW
- ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout & le particle flow.
- ▶ La haute granularité

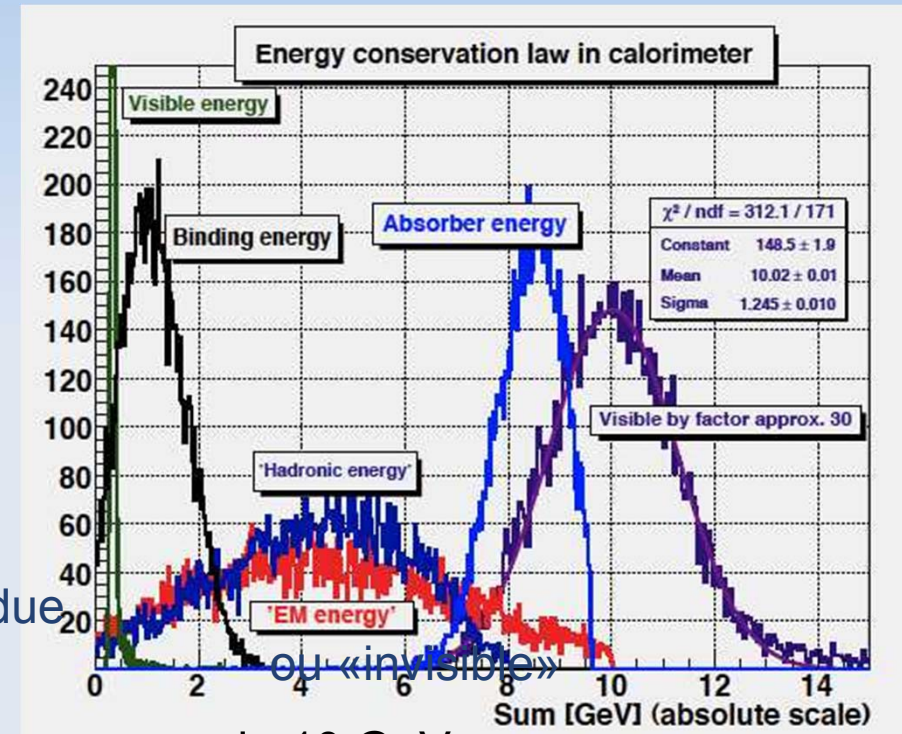
Lundi

Techniques d'amélioration de la mesure

Bilan énergétique d'une gerbe hadronique :

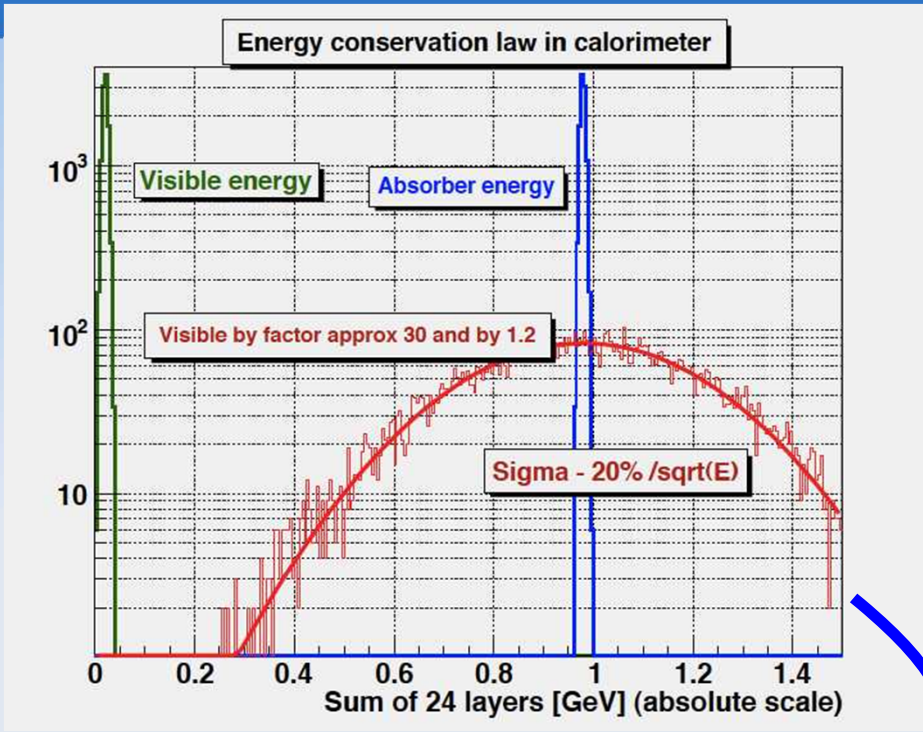
$$E = E_{EM} + E_{tr} + E_n + E_{nucl.} + E_{fuites}$$

- $E_{EM} = \pi^0 \sim 30\% - 60\%$ à 10–200 GeV
(f_{EM} ou F_0)
- $E_{tr} = \pi$ chargés & protons
- $E_n =$ neutrons
- $E_{nucl.} =$ Energie de liaison nucl.
(Binding energy) → Energie perdue
ou «invisible»
- $E_{fuites} = \mu + \nu, \sim 1-2\%$

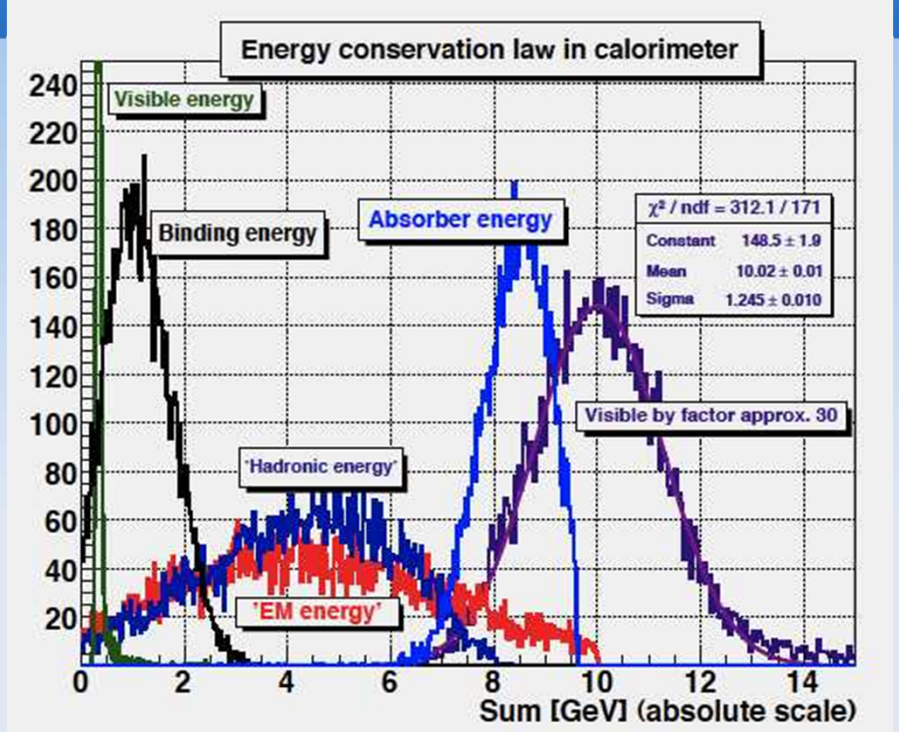


π de 10 GeV
sim. GEANT4

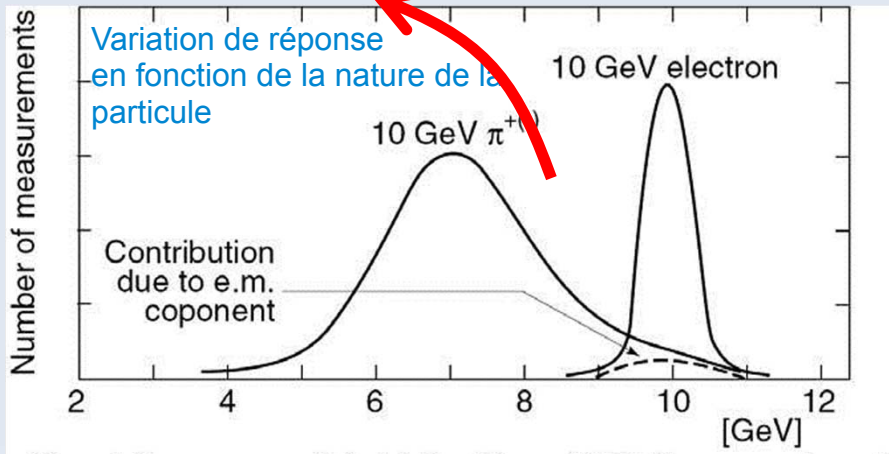
V. Morgunov



e- de 1 GeV



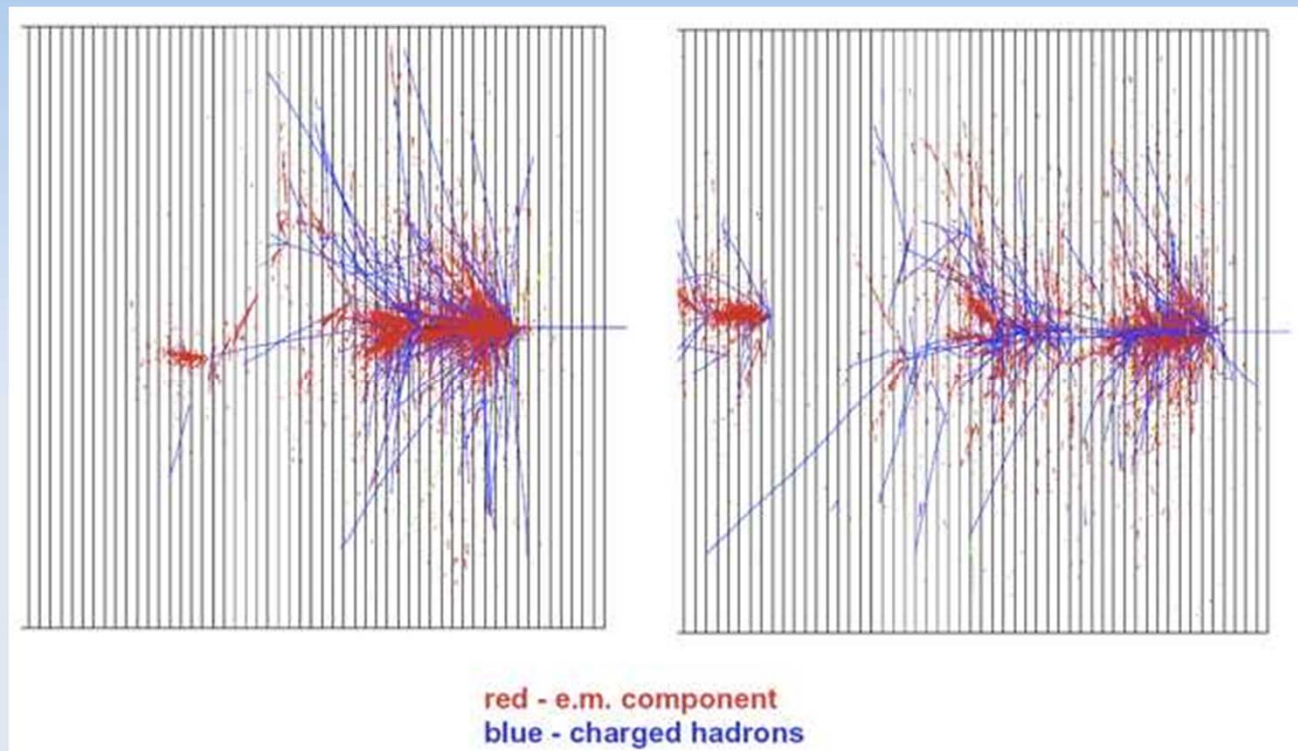
π de 10 GeV V. Morgunov



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

Améliorer la mesure des gerbes hadronique

Comment corriger expérimentalement pour ces 2 composantes ?



**Globalement
(matériel)**

Calorimètre à compensation

Dual readout

**Spatialement
(logiciel)**

Granularité + algorithmes

e/h → 1

Calorimètres à compensation

- Réponse d'un calorimètre aux hadrons :

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

Rapport
 $e/h = \varepsilon_e / \varepsilon_h$

- ▶ E_e = Energie EM
- ▶ $E_h = E_{tr} + E_n$

- ▶ ε_e = fraction d'énergie EM détectée
- ▶ ε_h = fraction d'énergie Hadronique détectée

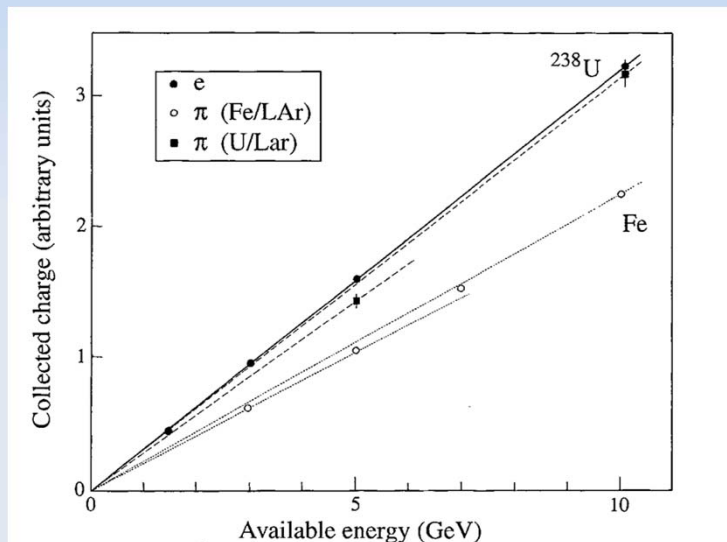
Augmenter ε_h et/ou réduire ε_e

Augmenter ϵ_h

Utilisation de ^{238}U (U appauvri)

▶ $n + \text{U} \rightarrow \text{Energie}$

◆ γ, n, \dots



- L3, DØ, ZEUS, ... (Années 80)
- Meilleurs résultats : ZEUS
 - ▶ $\alpha \sim 35\%$, $e/h \sim 1$
- Inconveniant
 - ▶ Bruit Radioactivité (\rightarrow calib)
 - ▶ «Déchets radio-actif...»

Utilisation de senseurs riches en Hydrogène

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

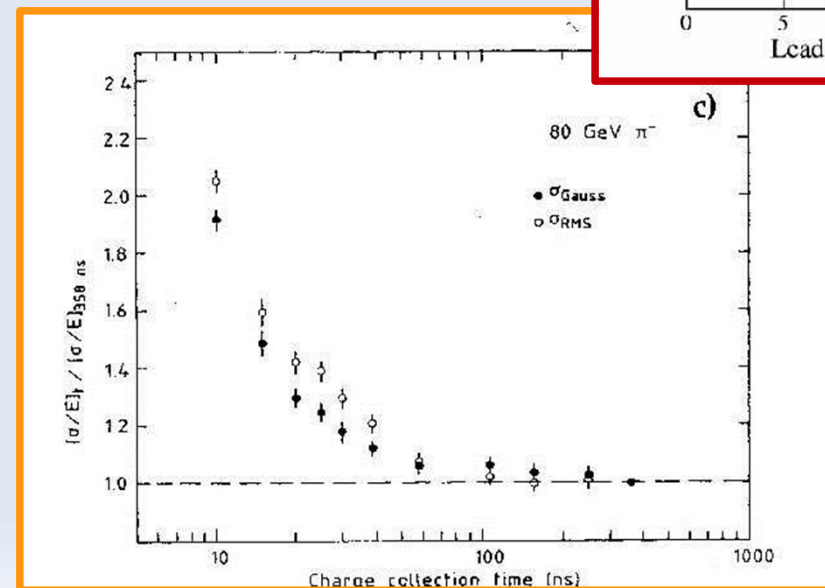
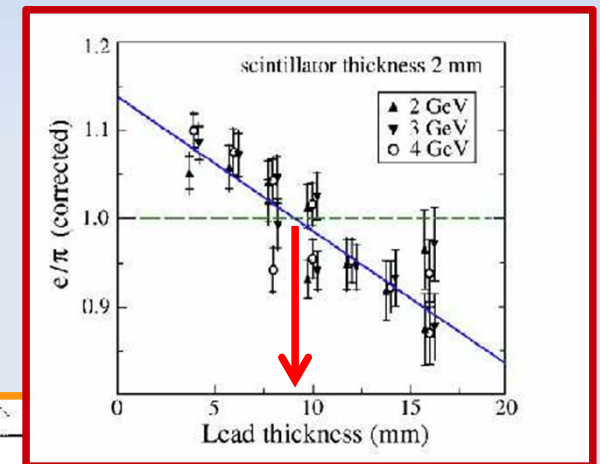
□ Exp de L3

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

□ Pb + Scintillateur

▶ Rapport de volume «magique» :
Scint/Pb = 1/4

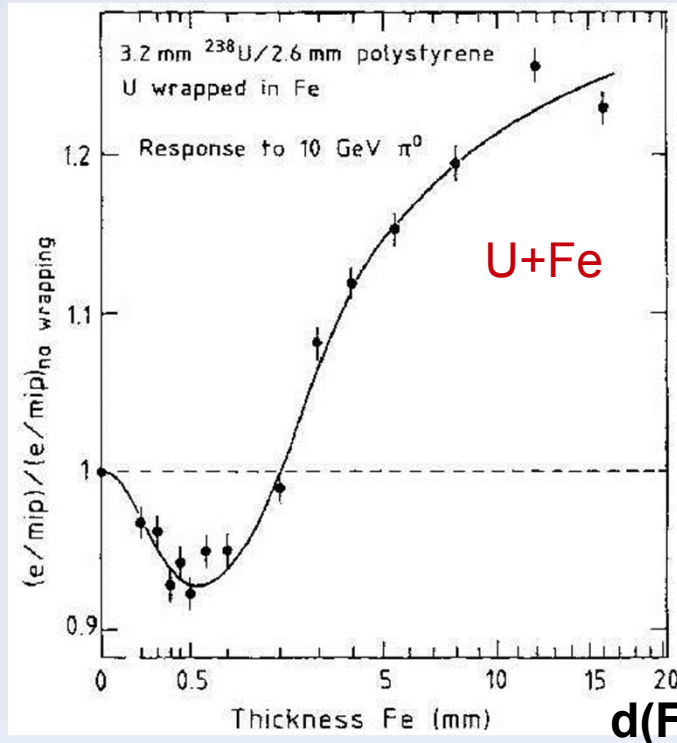
□ Intégrer plus longtemps



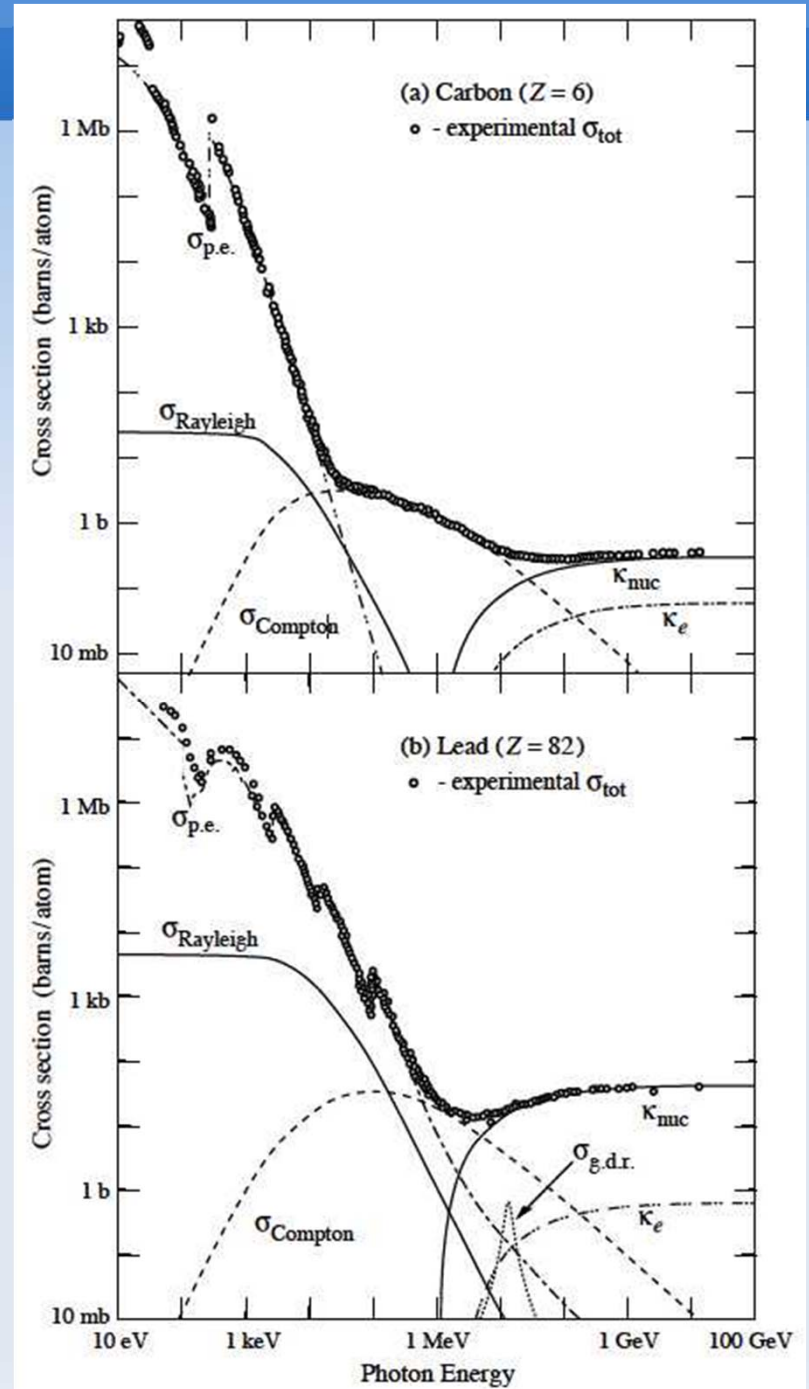
Diminuer ϵ_e

- 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

e/μ



$d(\text{Fe})/\text{mm}$



Bilan compensation

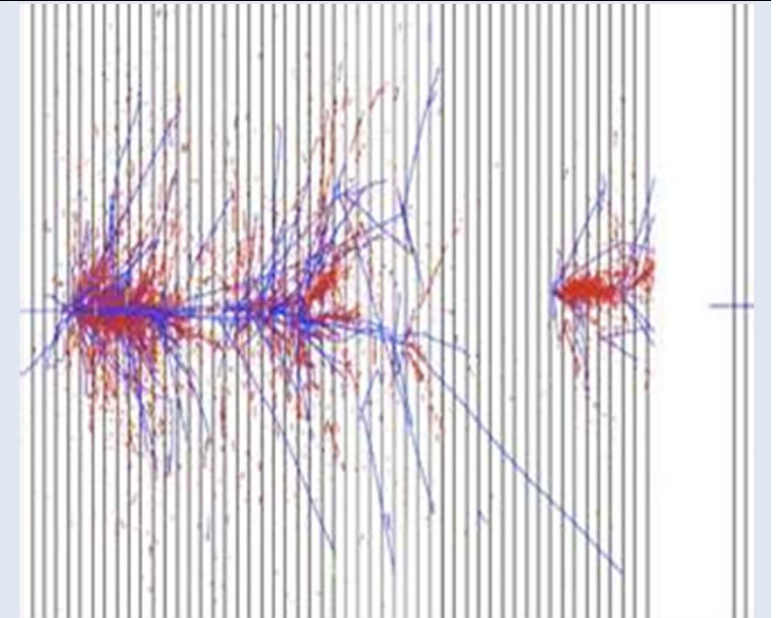
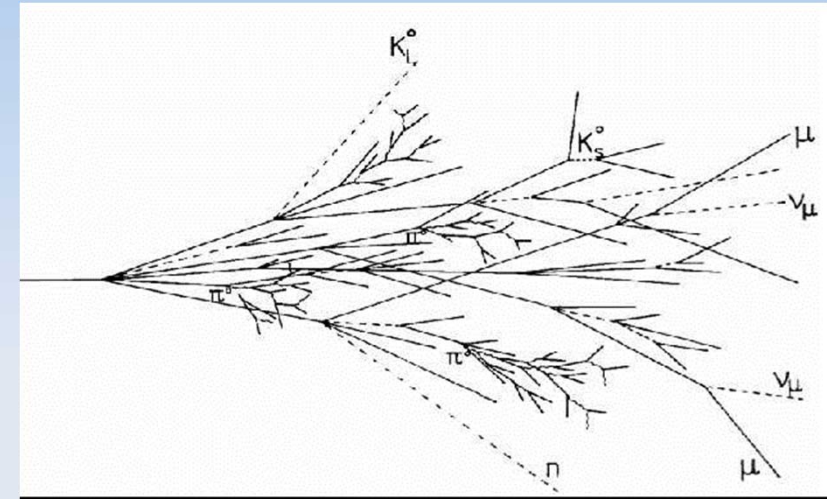
- Ajustement :
 - ▶ (A,Z) radiateur ⊗ Contenu en H du senseur
 - ⊗ temps d'intégration ⊗ Vol Rad/Senseur.
- Temps d'intégration ↔ Machine
- Meilleurs compromis pour la mesure hadronique ≠ meilleurs pour le ECAL
 - ▶ ECAL homogène : $e/h \gg 1$
 - ▶ Bon ECAL à échant. ⇒ mauvais volume pour compens.

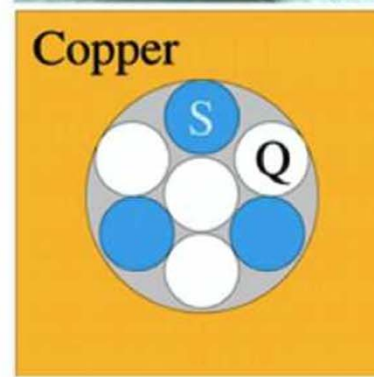
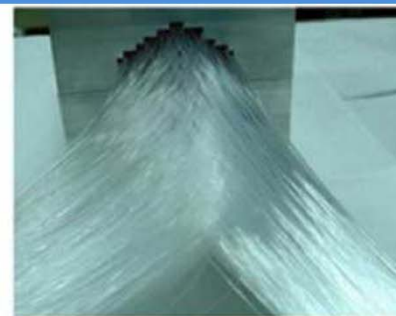
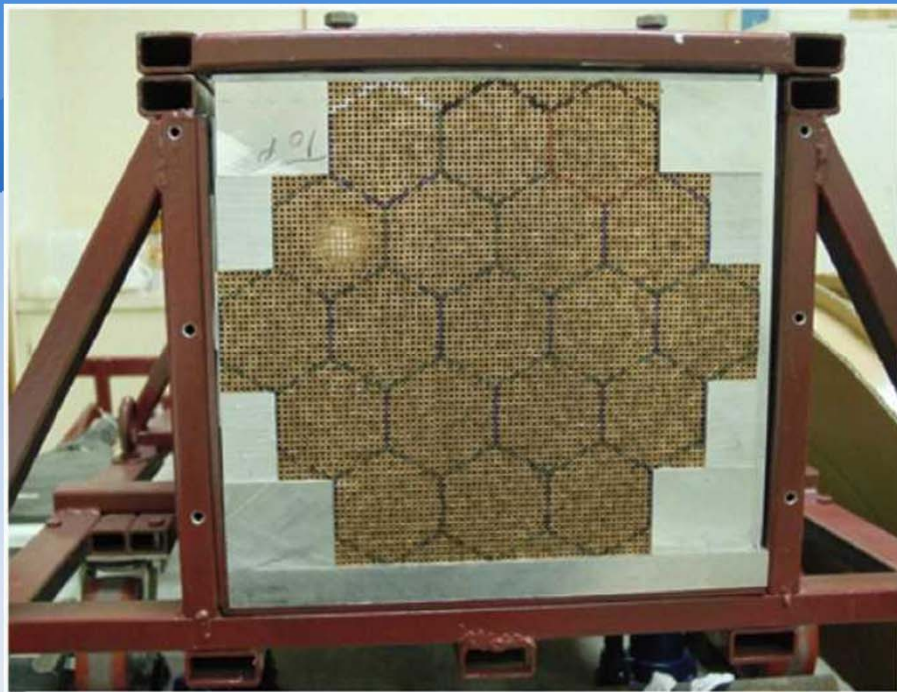


I had a DREAM...

DREAM (Dual REAout Module) concept

- Lecture duale de l'énergie
 - ▶ Identification «hardware» de la composante EM
 - ◆ Utilisation de la lumière Čerenkov produite par la partie EM de la gerbe
$$N_{\text{traces}}(e^\pm) / \text{MeV} \gg N_{\text{traces}}(\text{hadrons}) / \text{MeV}$$
 - ▶ lecture classique du dE/dx (fibres scintillantes)
- Lecture du même milieu par 2 fibres différentes
 - ▶ 2 e/h pour 1 même événement





$\vdash 2.5 \text{ mm} \dashv$
 $\vdash 4 \text{ mm} \dashv$

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

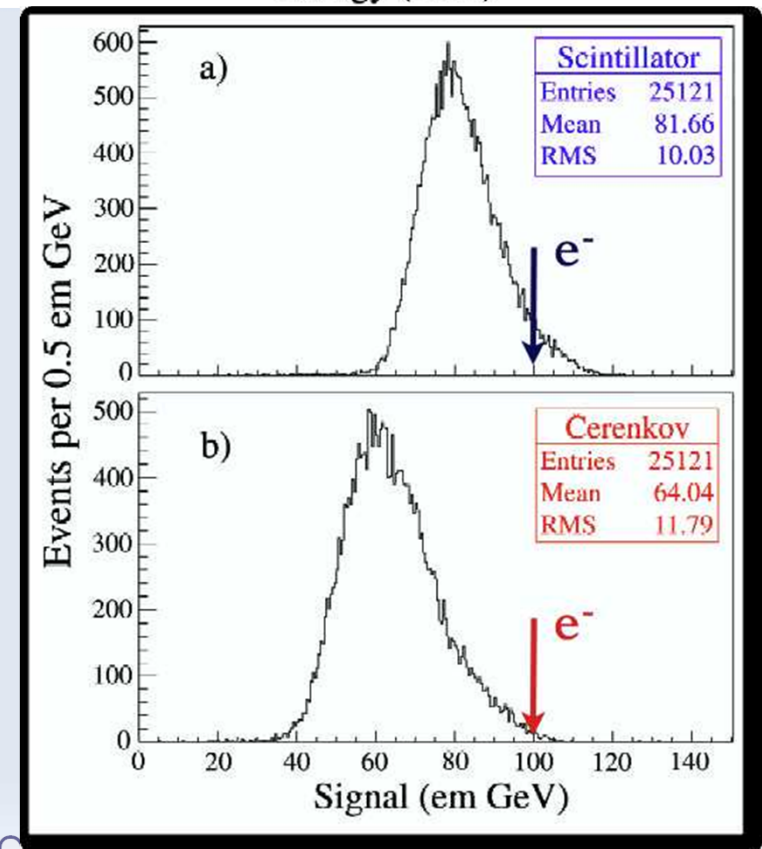
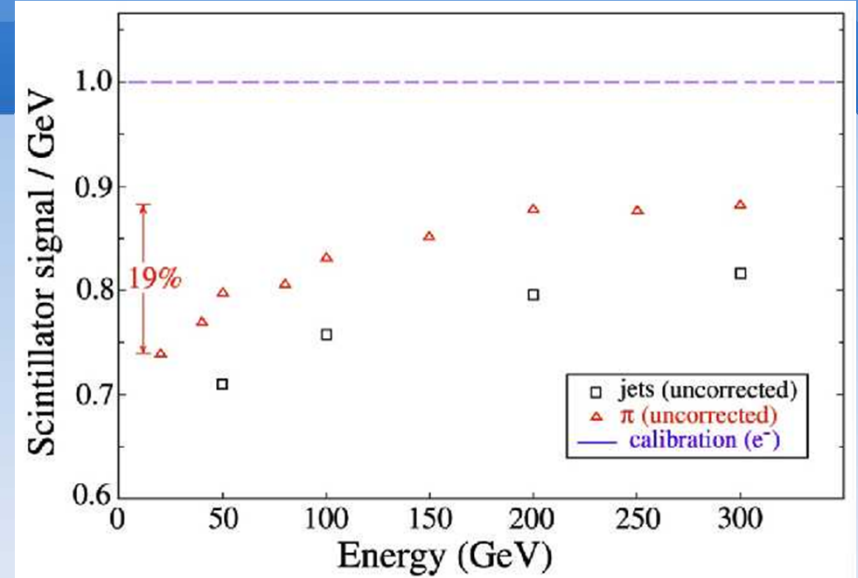
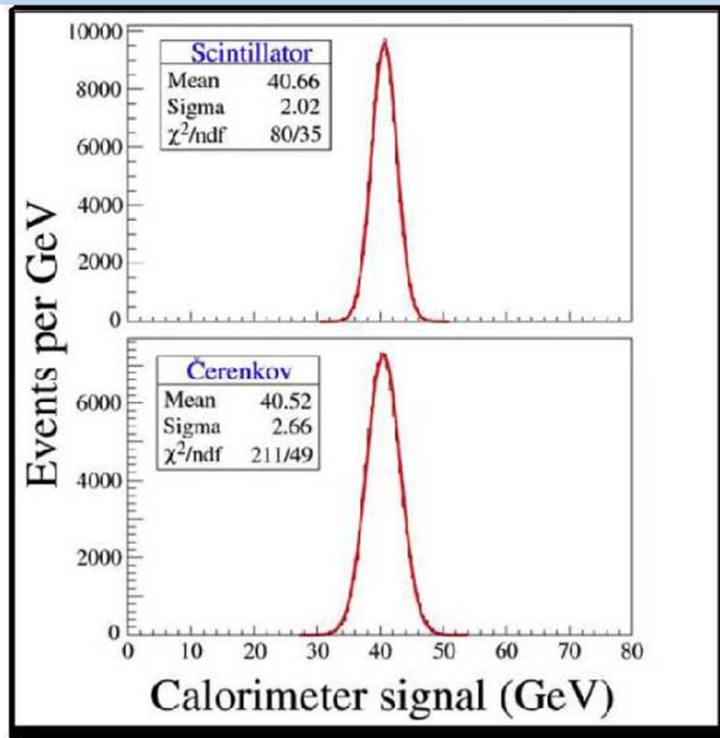


Photo multiplicateurs



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

Incidence : 2°
(tunneling à 0°)



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

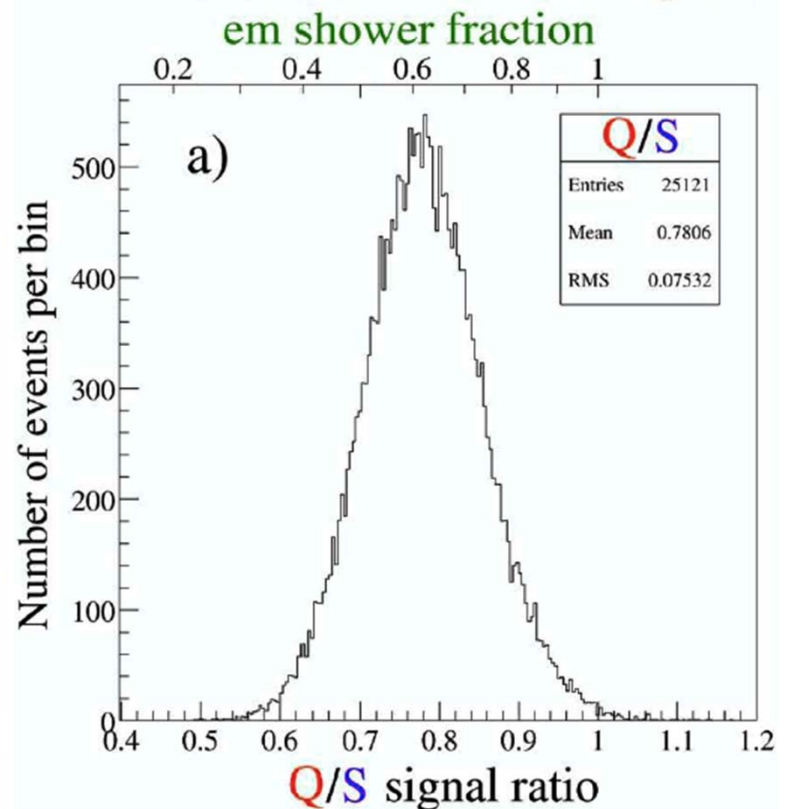
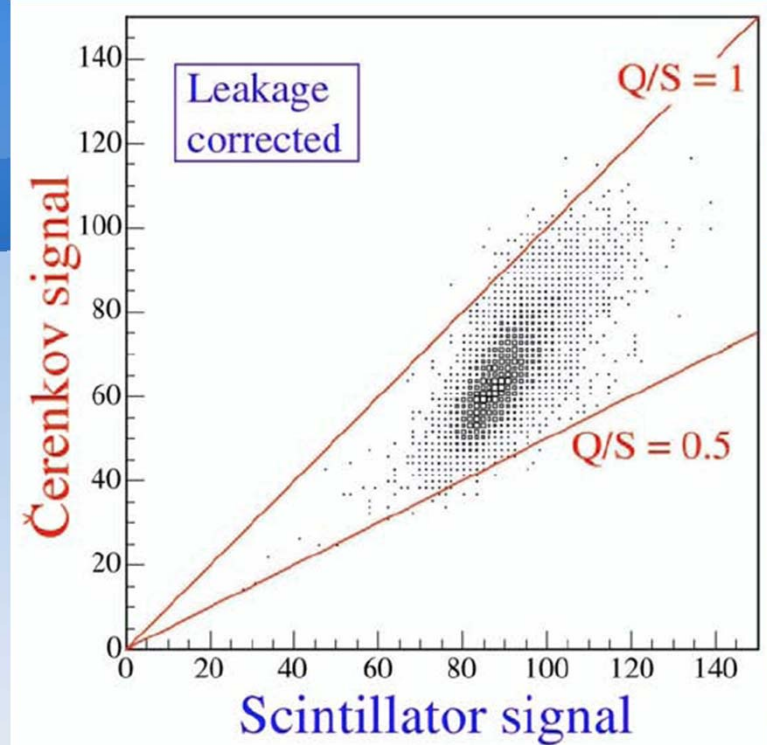
$$Q = E \left[f_{\text{em}} + \frac{1}{(e/h)_Q} (1 - f_{\text{em}}) \right]$$

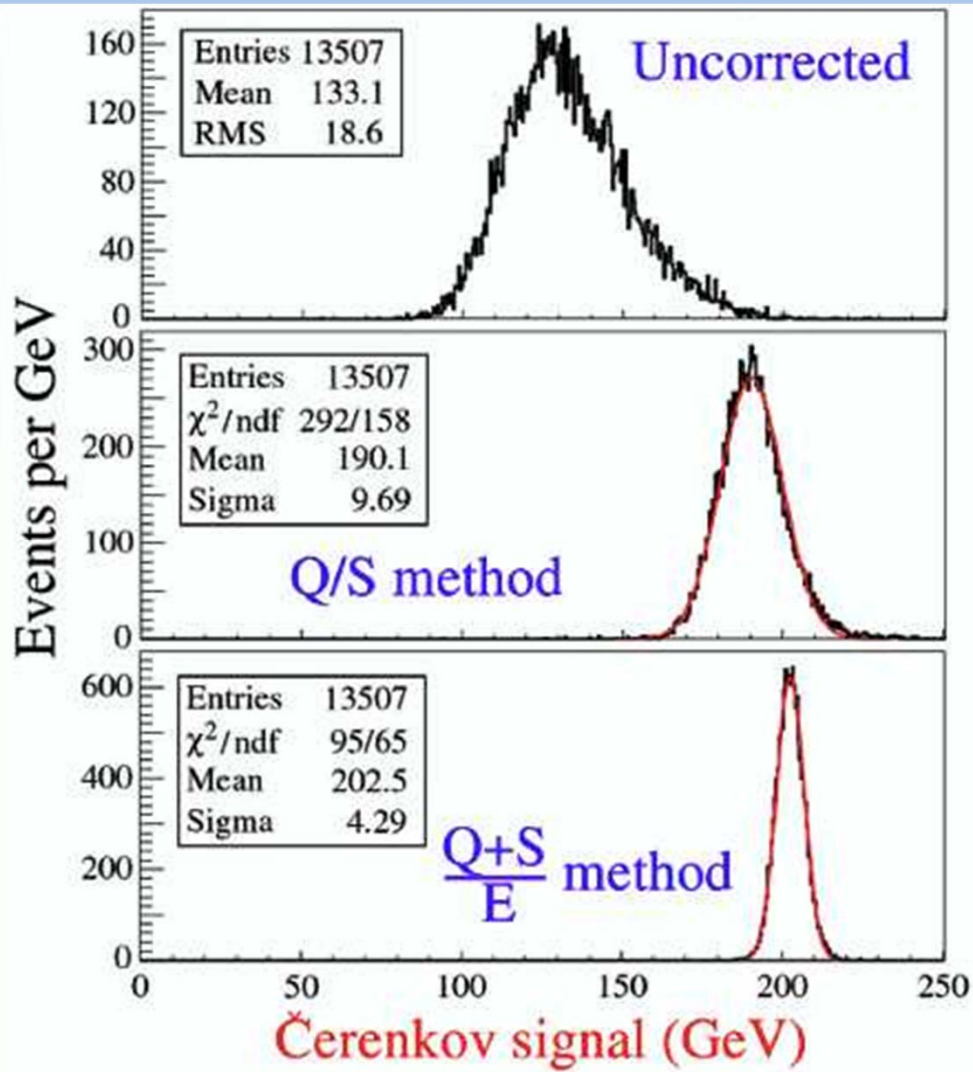
e.g. If $e/h = 1.3$ (S), 4.7 (Q)

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

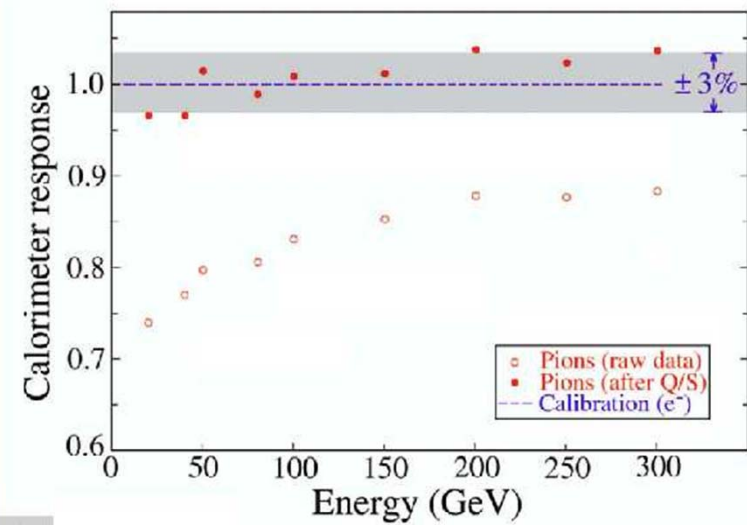
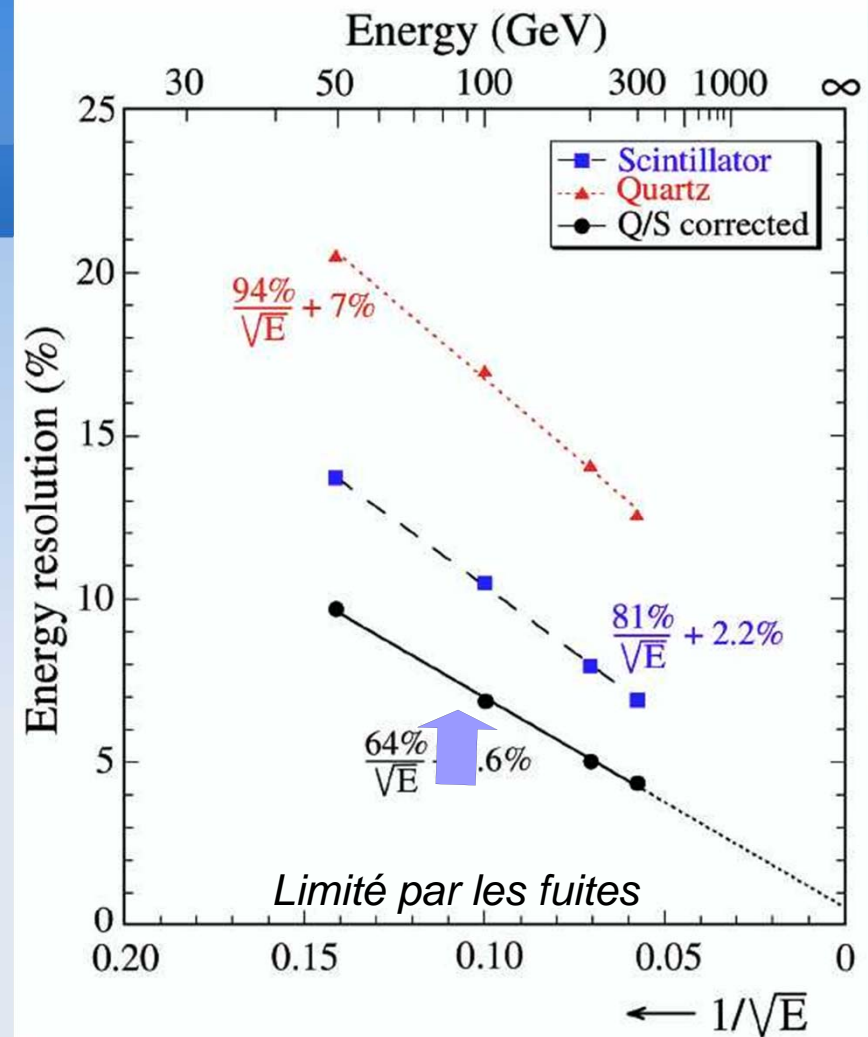
$$E = \frac{S - \chi Q}{1 - \chi}$$

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



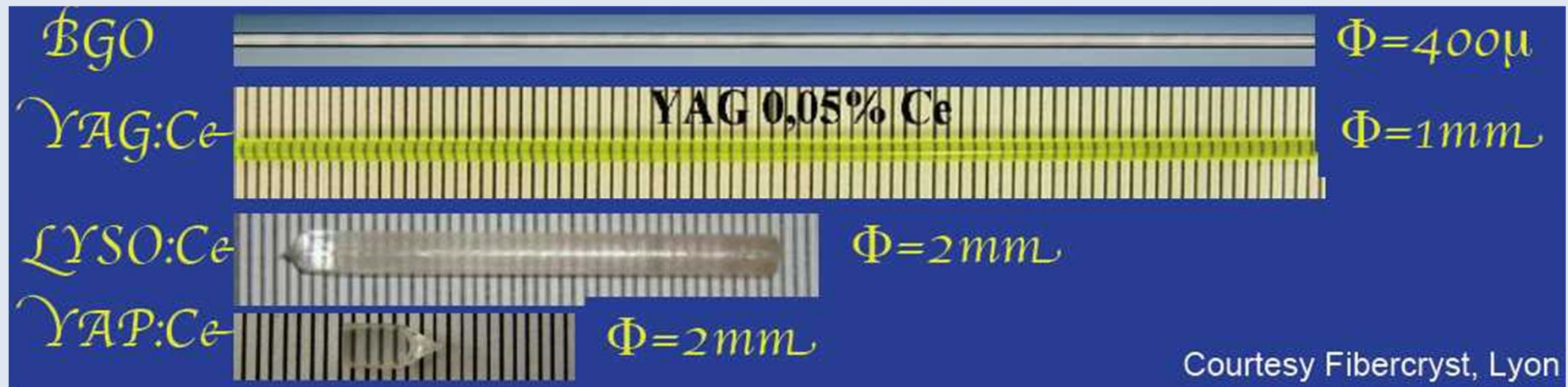
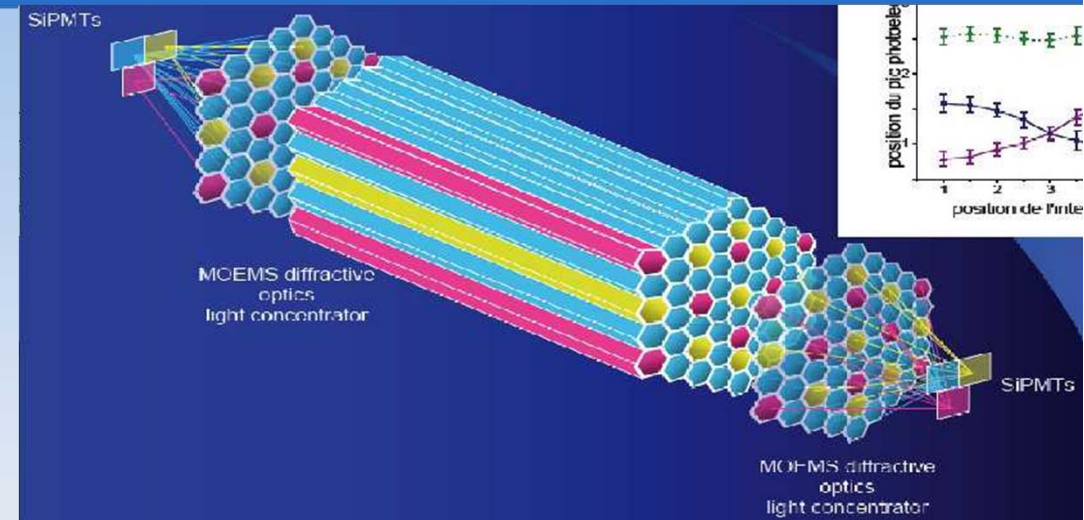


Comportement Gaussien



les méta-matériaux

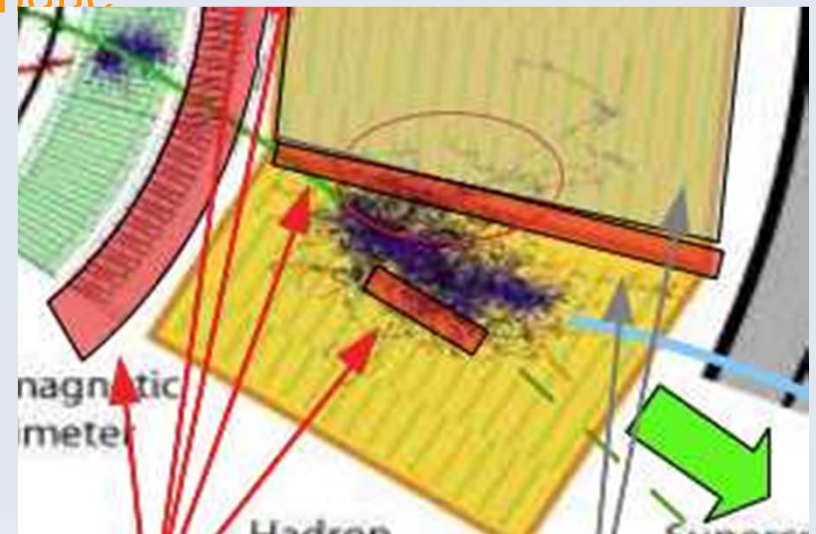
- Dural Readout avec un calorimètre quasi homogène
 - **Fibres scintillantes denses avec des matériaux réagissant différemment**
- Lecture complexe → double ou triple information 3D



Amélioration Algorithmiques

Agrégation («Clustering»)

- But : grouper les cellules proches
 - ▶ Mesure de dépôts localisés ↔ 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 (volume de donnée ↘)
 - ◆ Conservation du bruit proche : symétrique
 - ◆ par ex. : coupure à $|Q_i| > 3 \sigma_{\text{noise}}^i$
 - ▶ Corrections :
 - ◆ Fuites, Matériaux morts

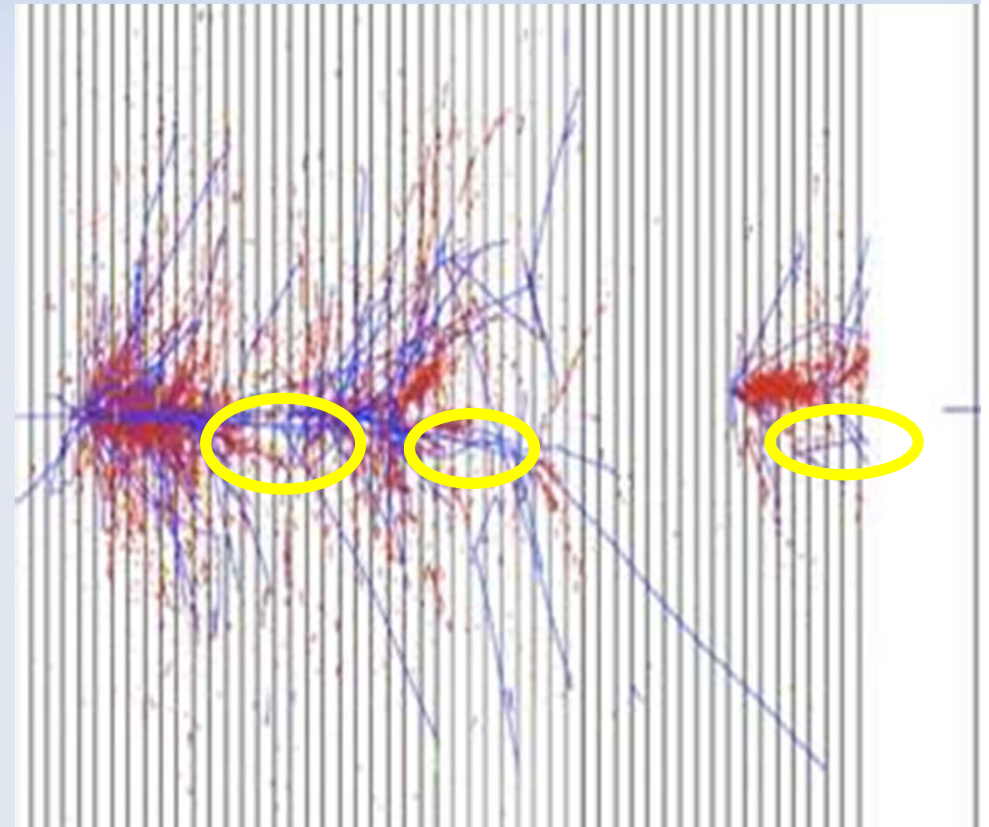


Compensation par pondération (« weighting »)

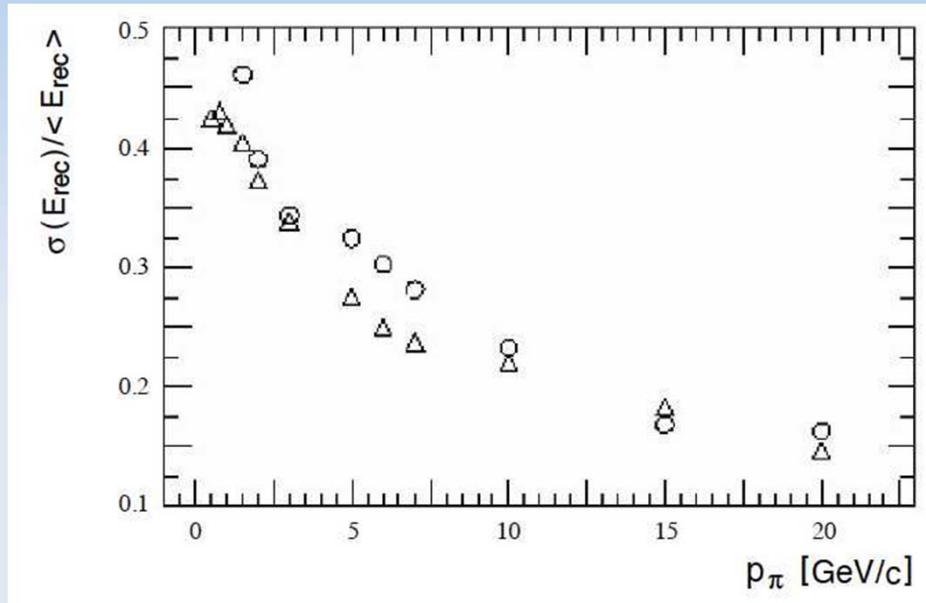
- Optimisations du signal : forme & taille
 - ▶ Dans le ECAL : e & γ vs π 's (\equiv particle ID)
[par exemple fraction dans le $E_{\text{ECAL}}/(E_{\text{ECAL}}+E_{\text{HAD}})$].
 - ▶ Dans le HCAL : Repérer les dépôts EM
 - ▶ densité en énergie

$$\rho_i = \frac{E_i}{Vol_i}$$

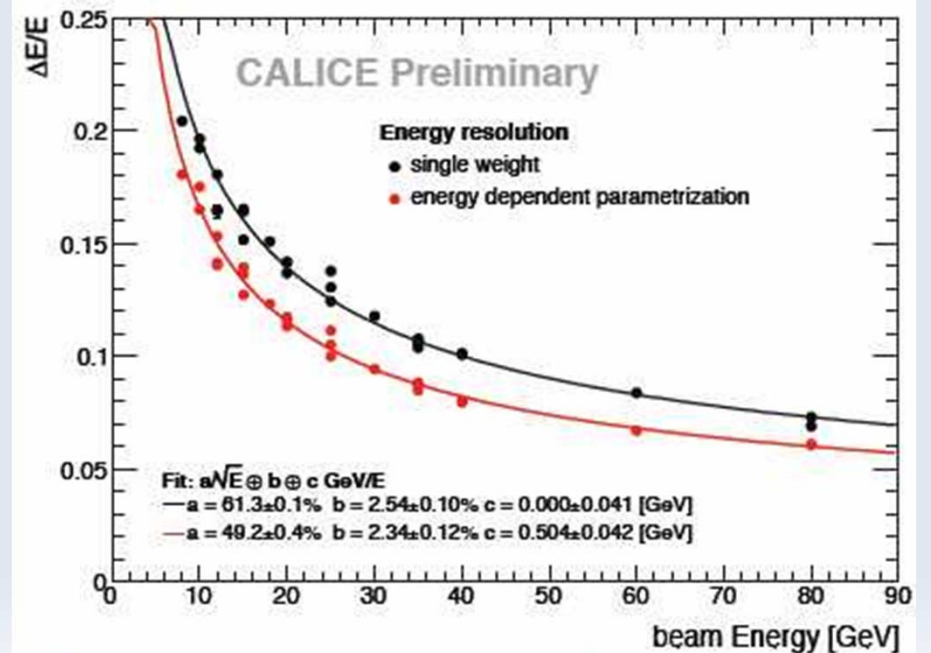
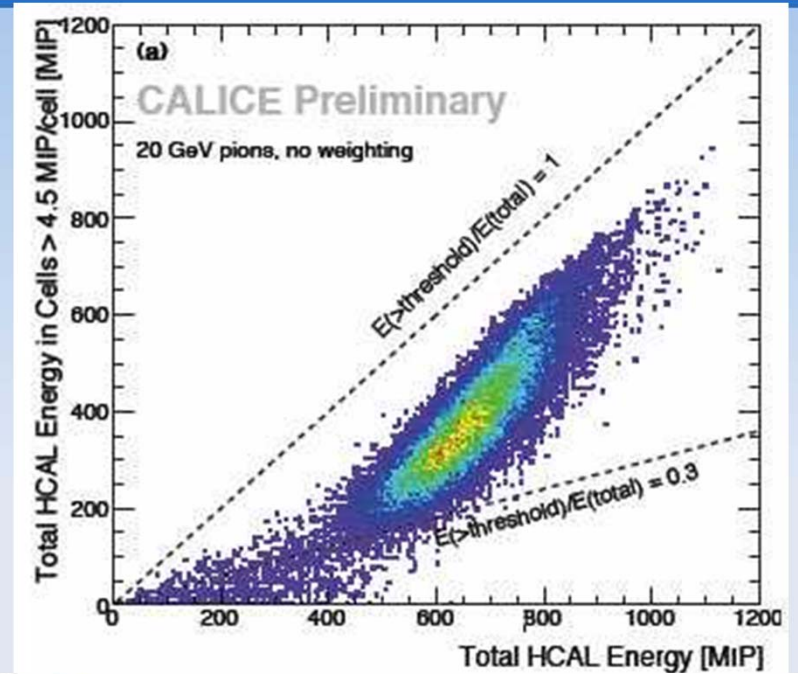
- ▶ Haut ρ_j = EM ; bas ρ_j = HAD
 - ◆ *Ajustement des poids par le MC*



Compensation par pondération (« weighting »)



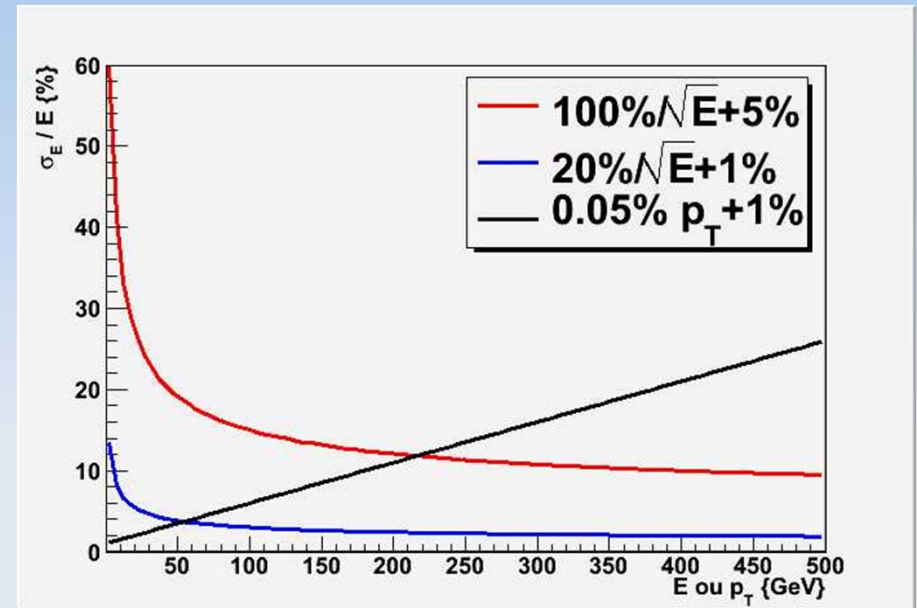
Amélioration de la résolution
& de la linéarité



Energy flow & particle flow

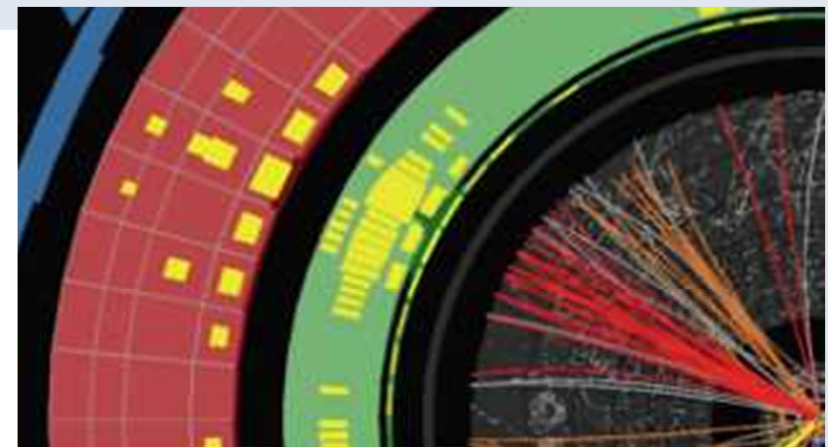
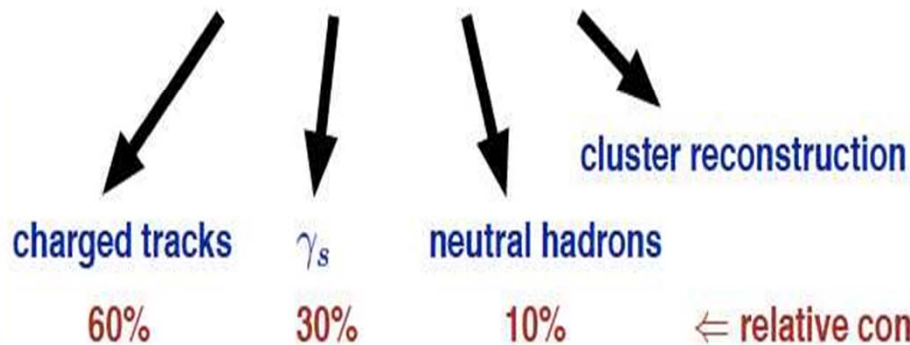
Au-delà de la calorimétrie : le «particle flow»

- «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
 - ▶ Mesure pour des jets :



Key feature for particle flow approach (PFA):

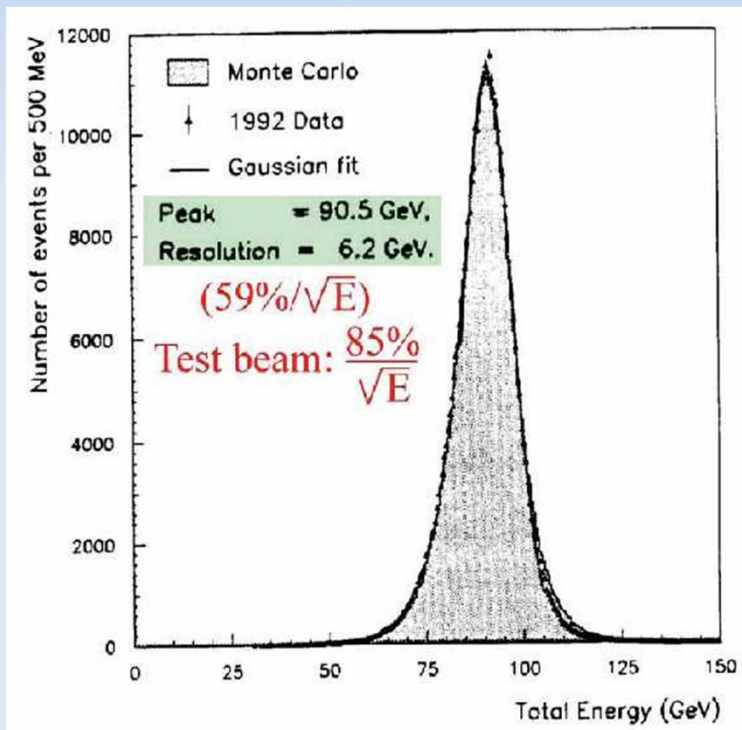
combined Tracking+ECAL+HCAL+Software info for jet energy resolution



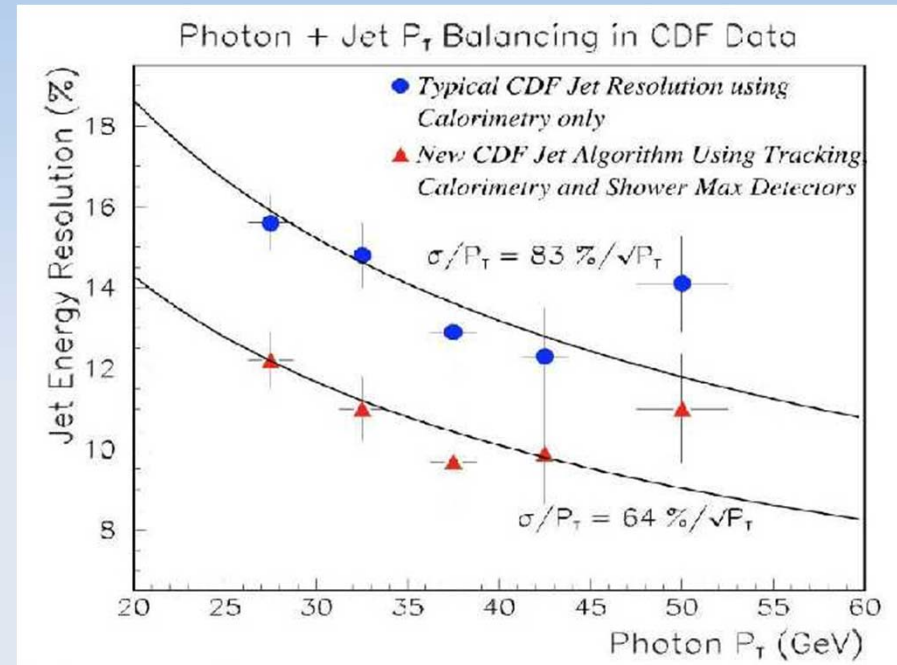
Particle Flow Analysis : «Energy flow»

PFA au LEP : ALEPH

Utilisation de particle ID +
SW compensation



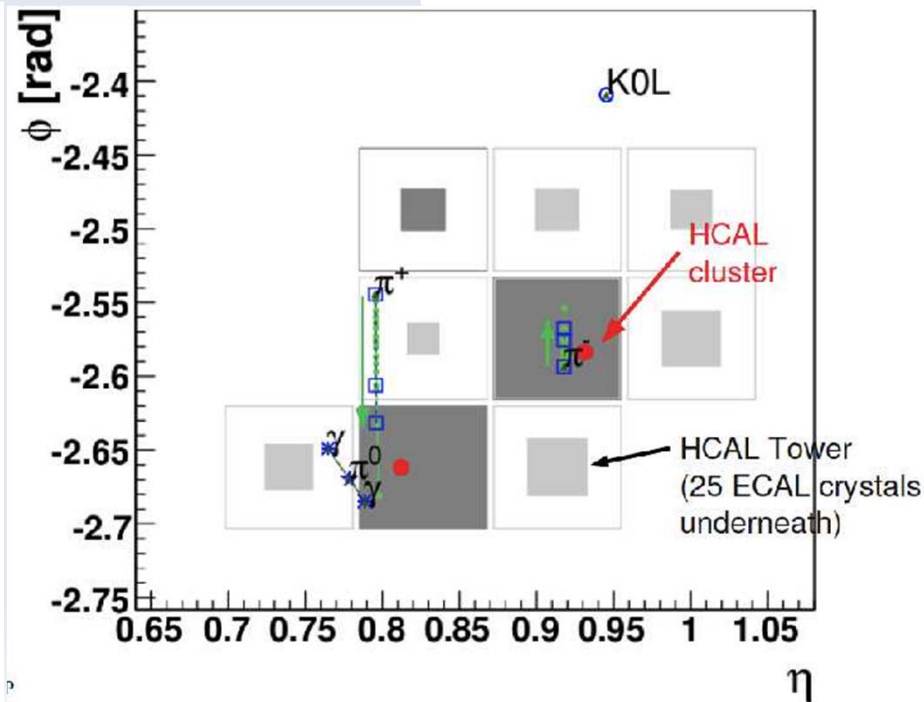
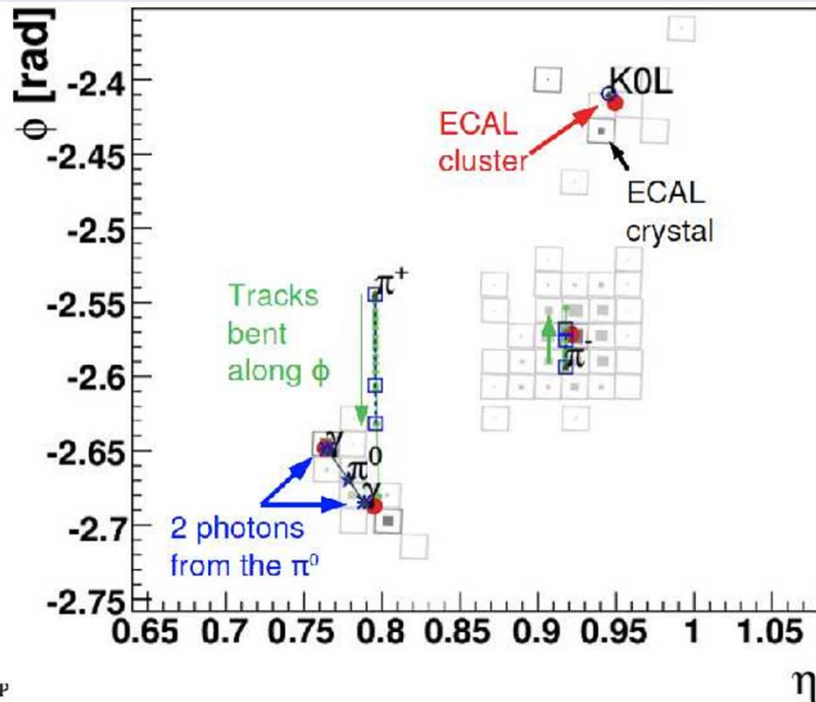
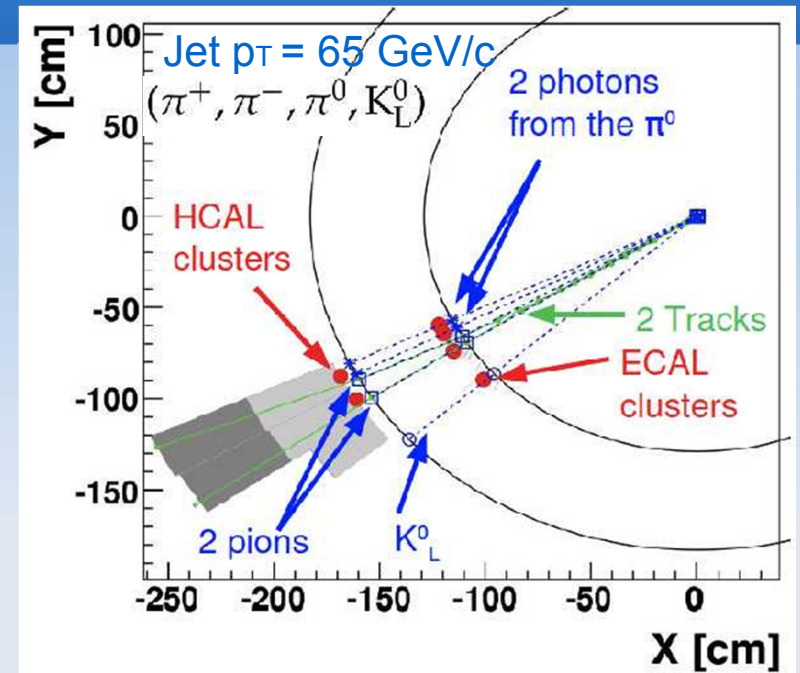
PFA au Tevatron : CDF



H1 Hadronic flow.

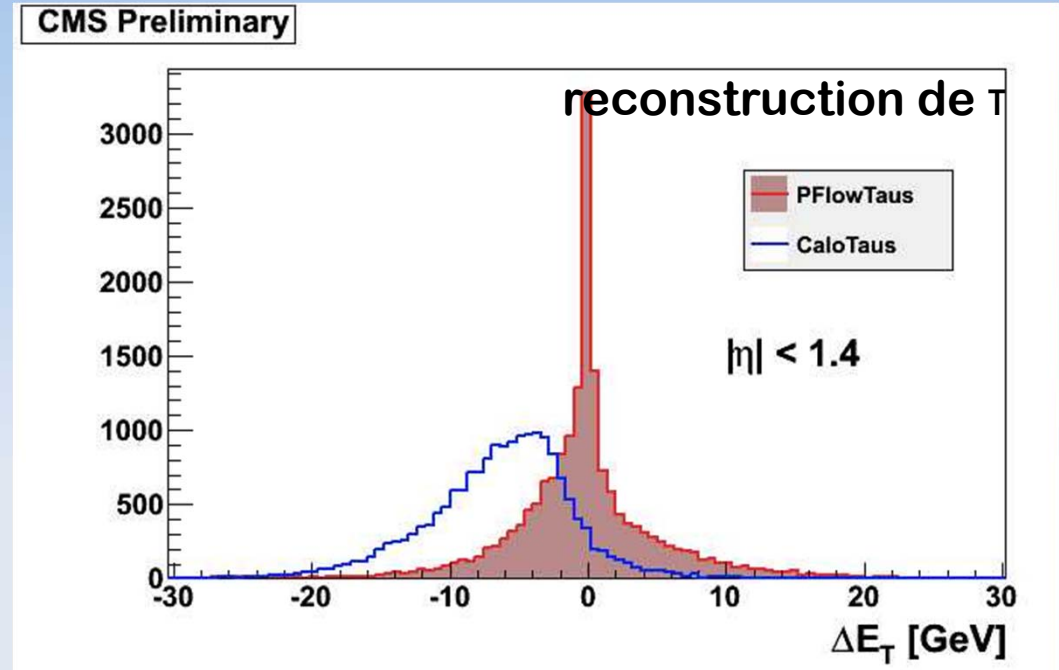
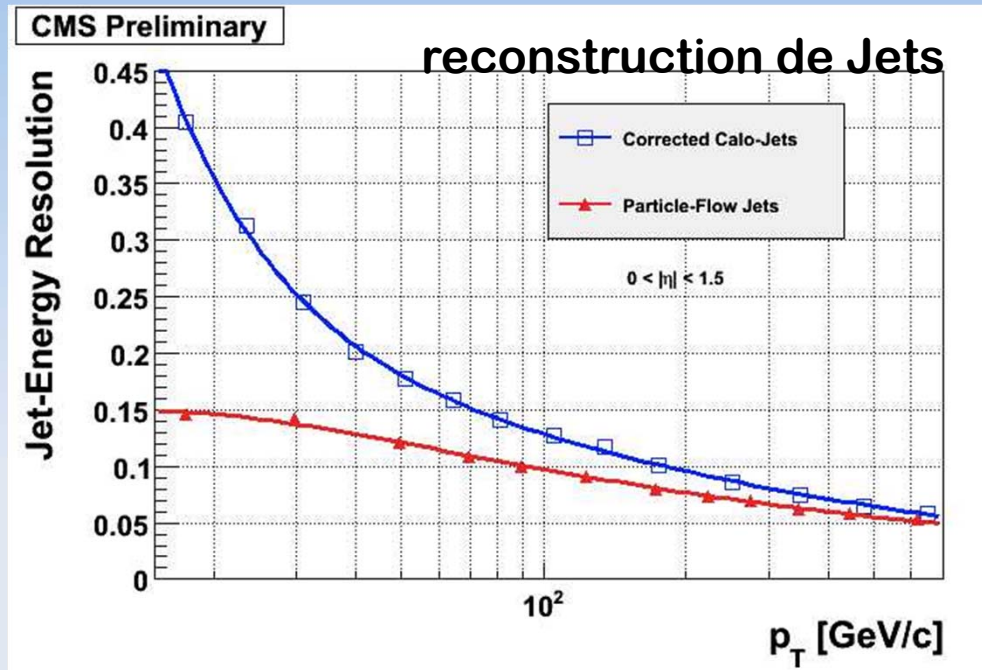
Le «particle Flow» de CMS

- 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

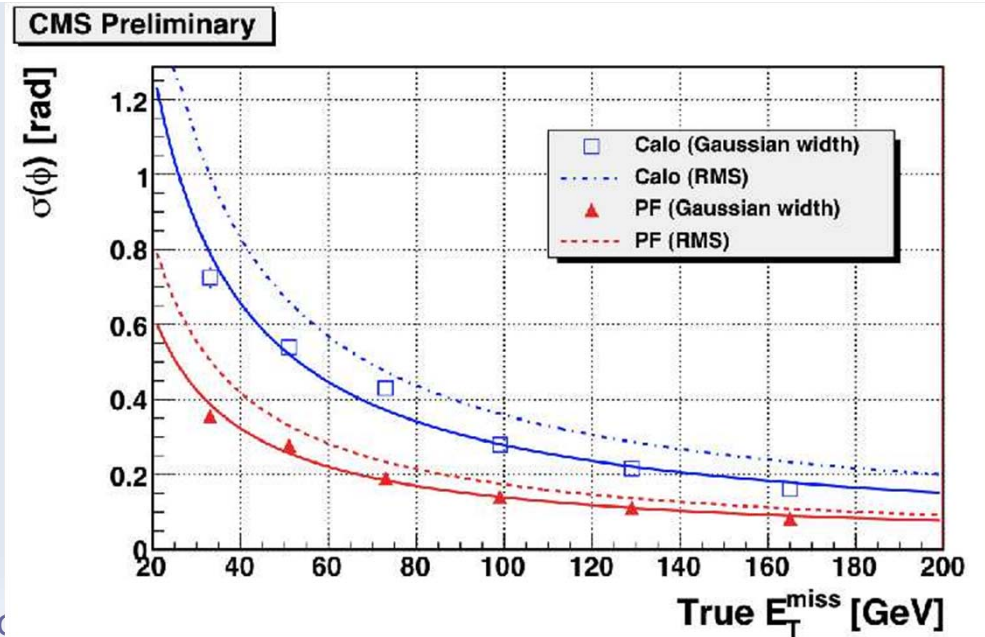


Reconstruction d'énergie manquante

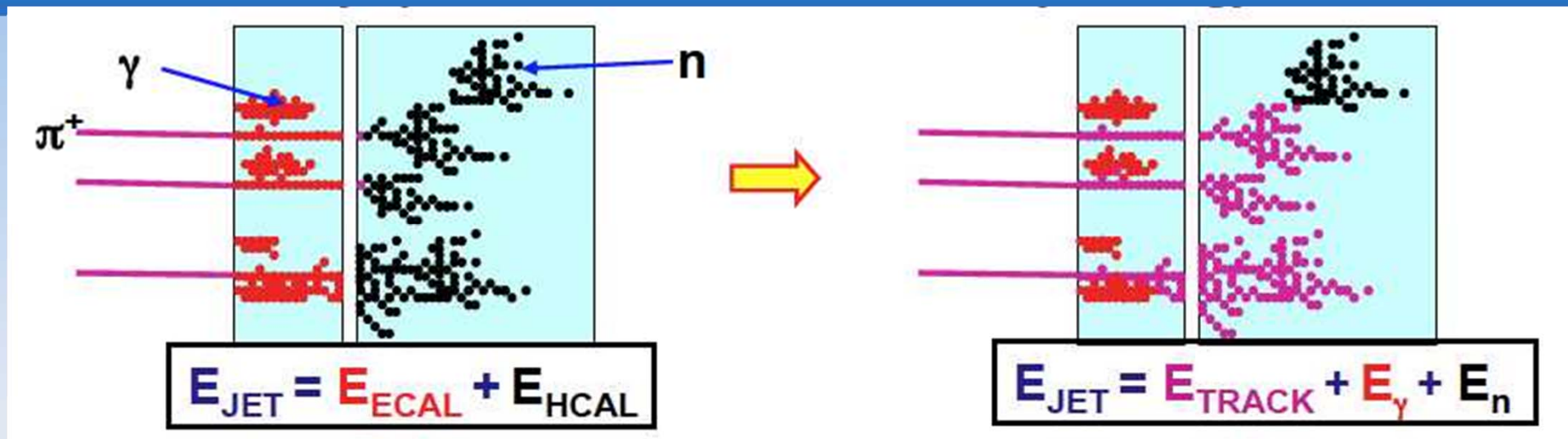
- recherche «exotique»

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

- Gain d'un facteur ~2
Signal → Gaussien



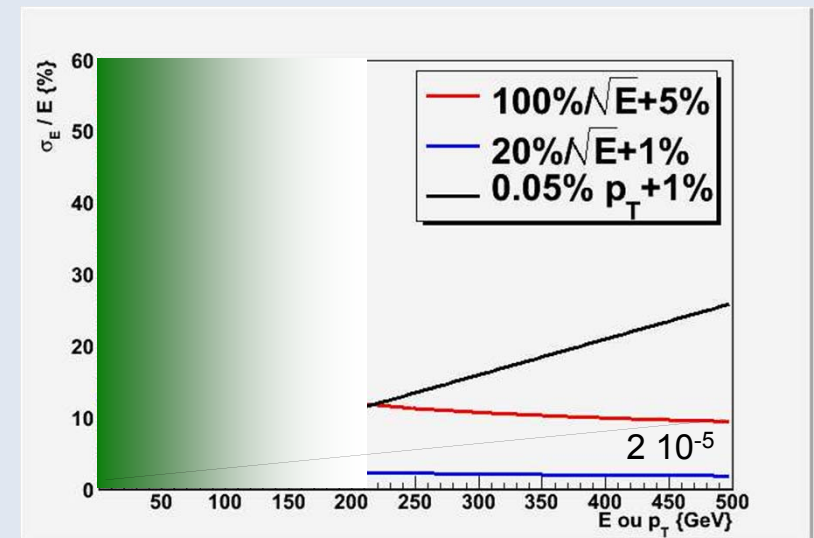
Un particle flow pour le LC : PFA



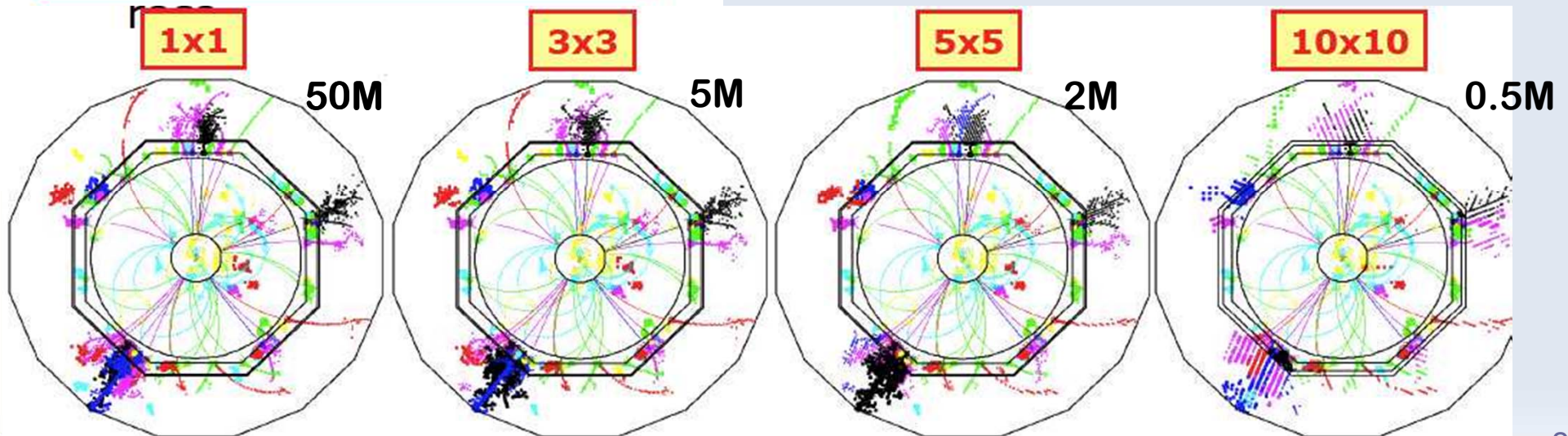
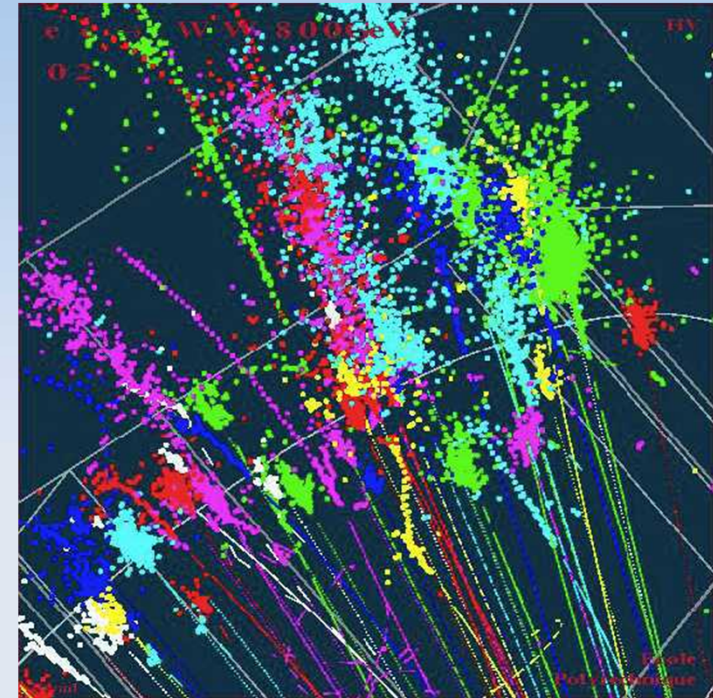
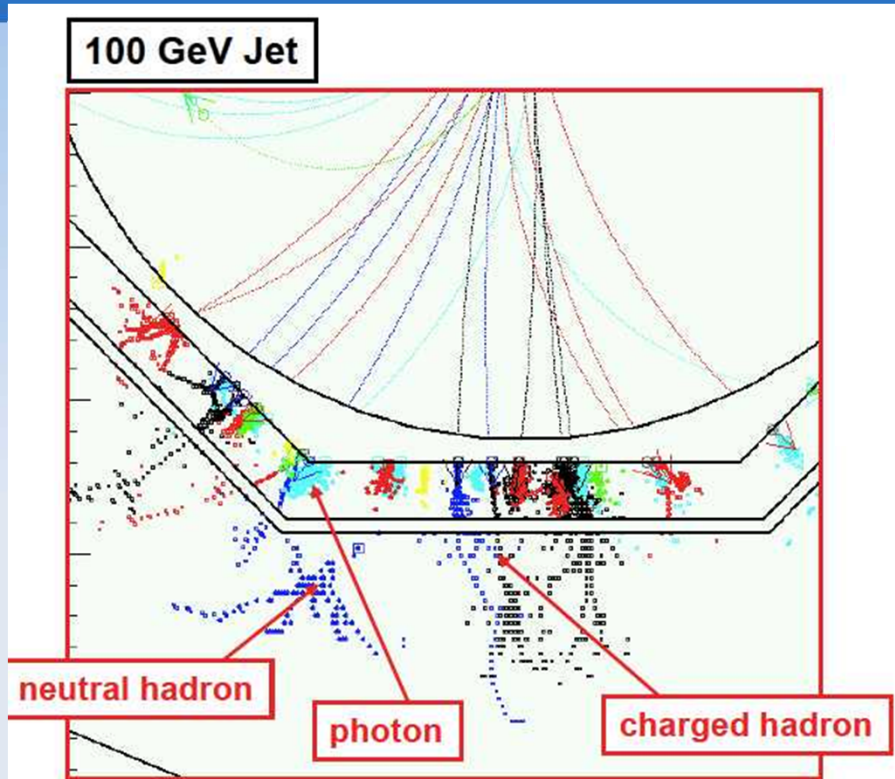
M. Thompson

- 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



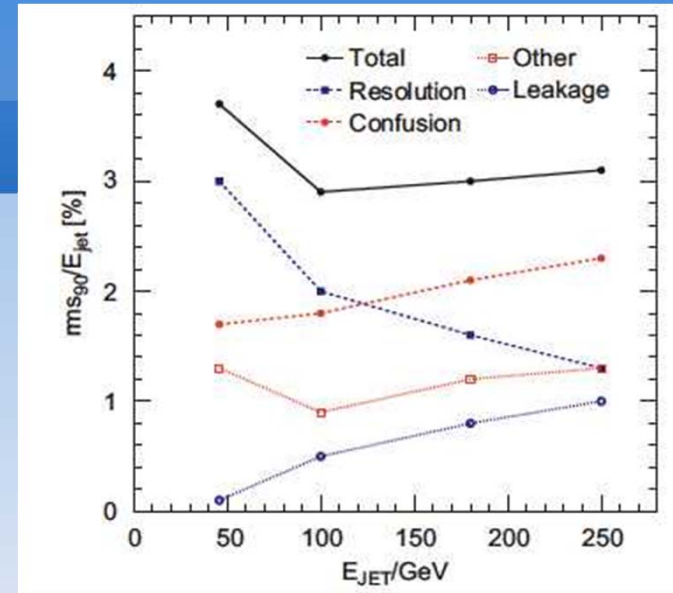
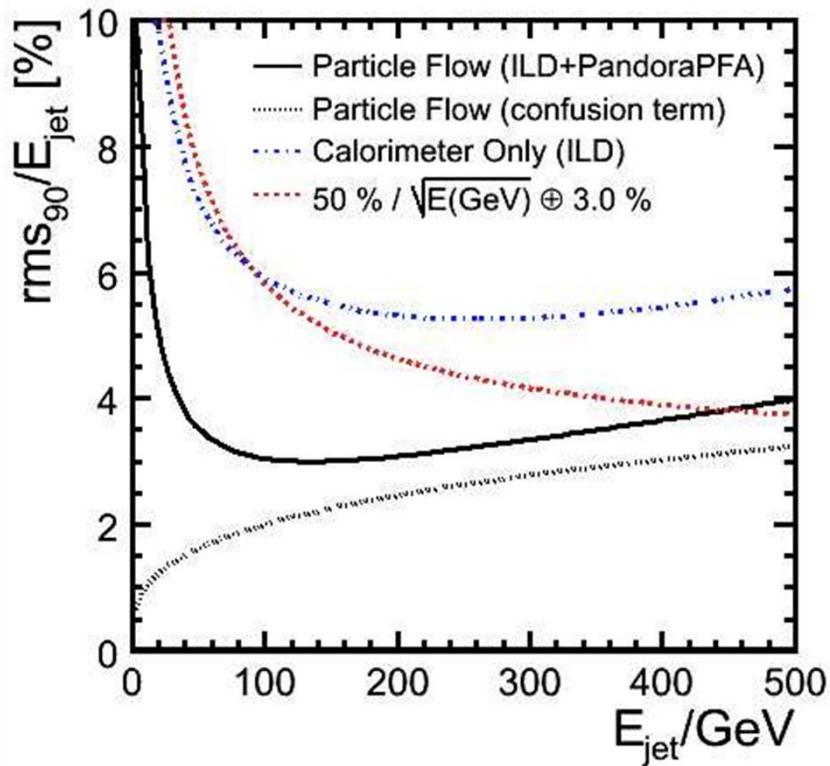
Une question de granularité



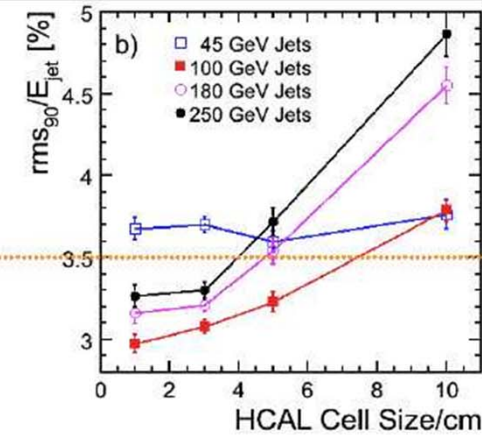
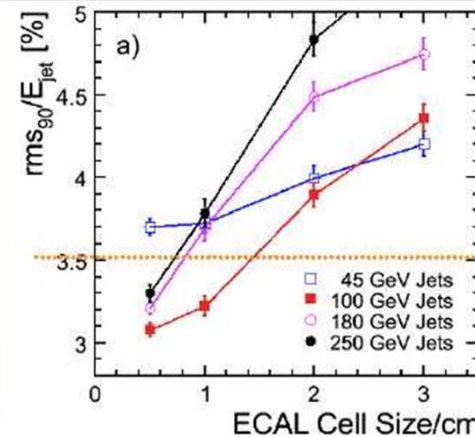
Performances du PFA (pour les jets)

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

Resolution
Tracking
Leakage
Confusion



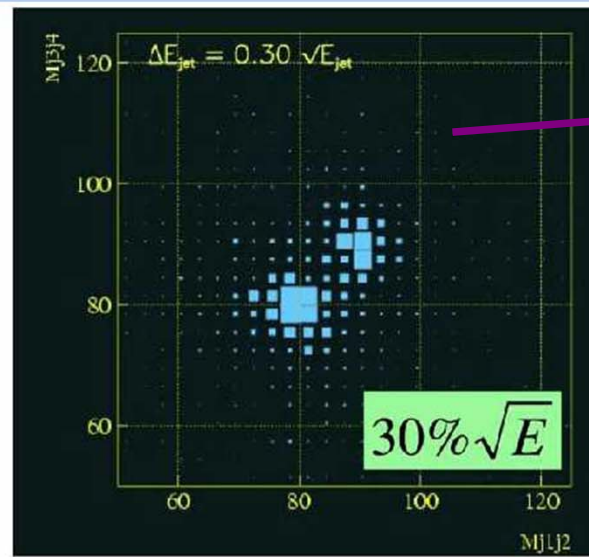
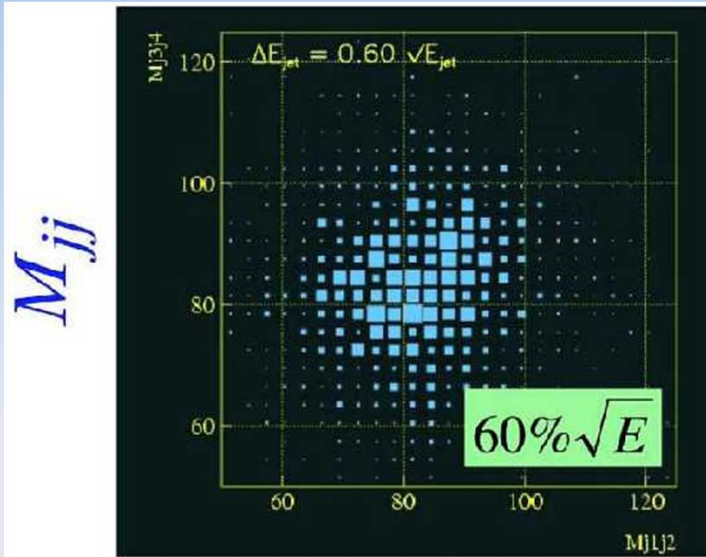
- Le Particle Flow Analysis améliore toujours
 - ▶ ~Facteur 2 vs calo seul
- La résolution du HCAL, la granularité et les fuites jouent un rôle.



ILC Goal

La calorimétrie à haute granularité

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

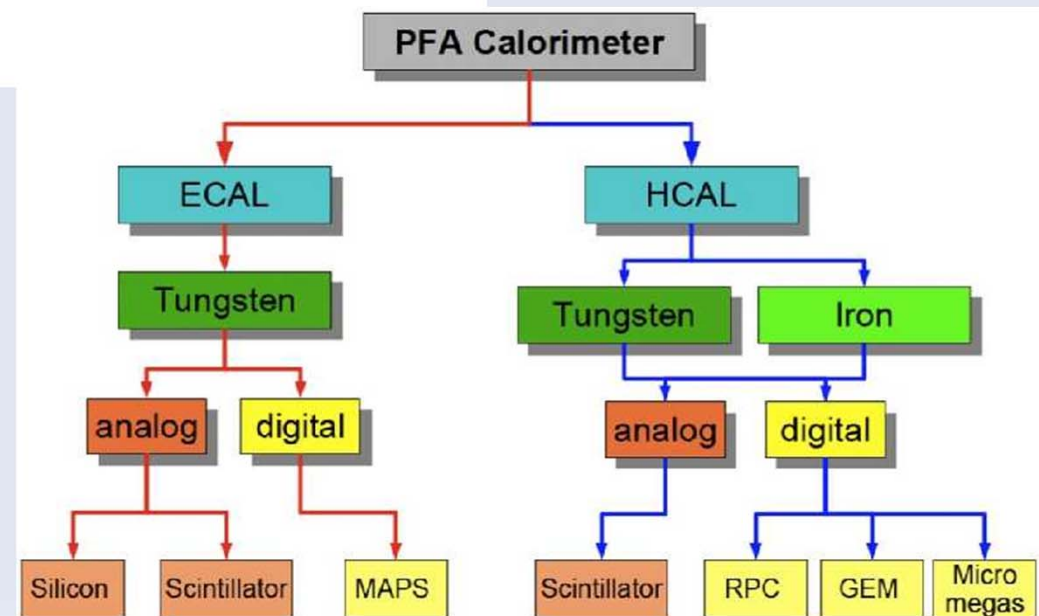


Collisionneur e^+e^-
(FLC, JLC, TESLA)
ILC : 0.5 — 1 TeV
CLIC : 1 — 3 TeV

M_{jj}

Collaboration CALICE

- mostly ILD, SiD
 - ILC, CLIC
- Test de prototype
- Physiques
 - technologiques
 - Analogique & digital

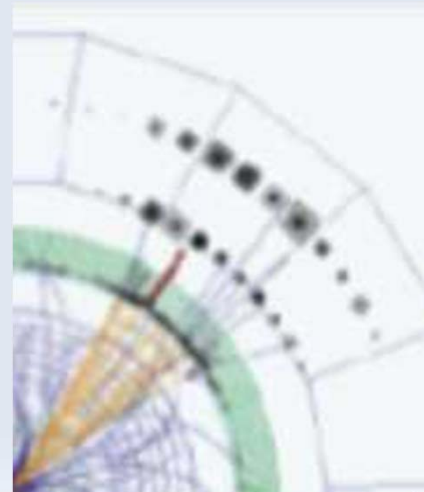
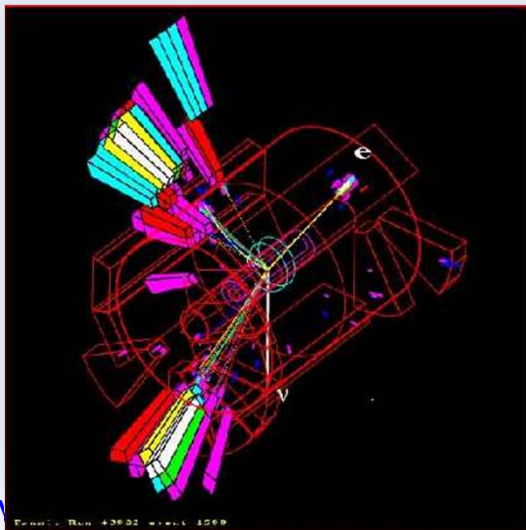
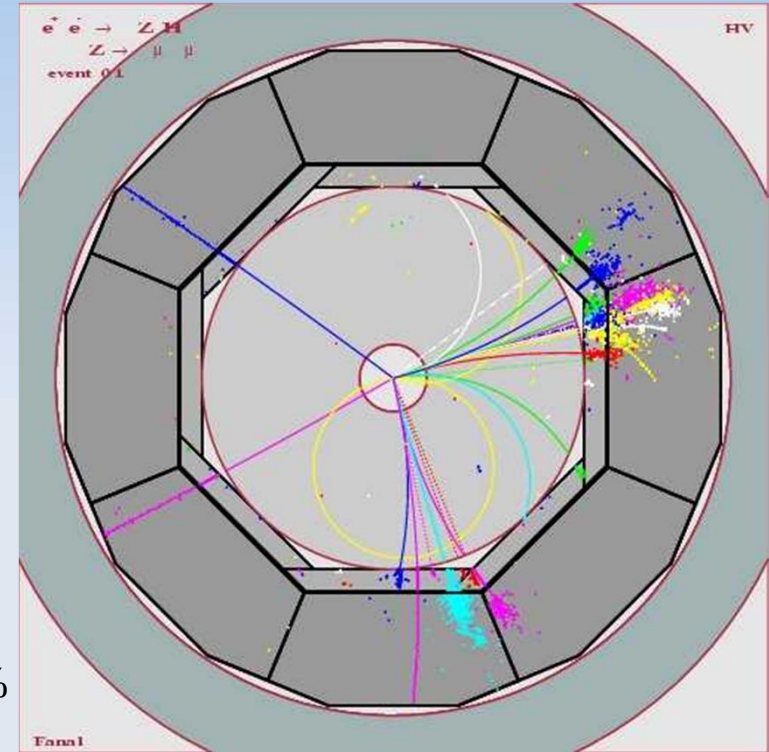


Augmentation de la granularité

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%



Un calorimètre W-Si pour un collisionneur linéaire à électrons

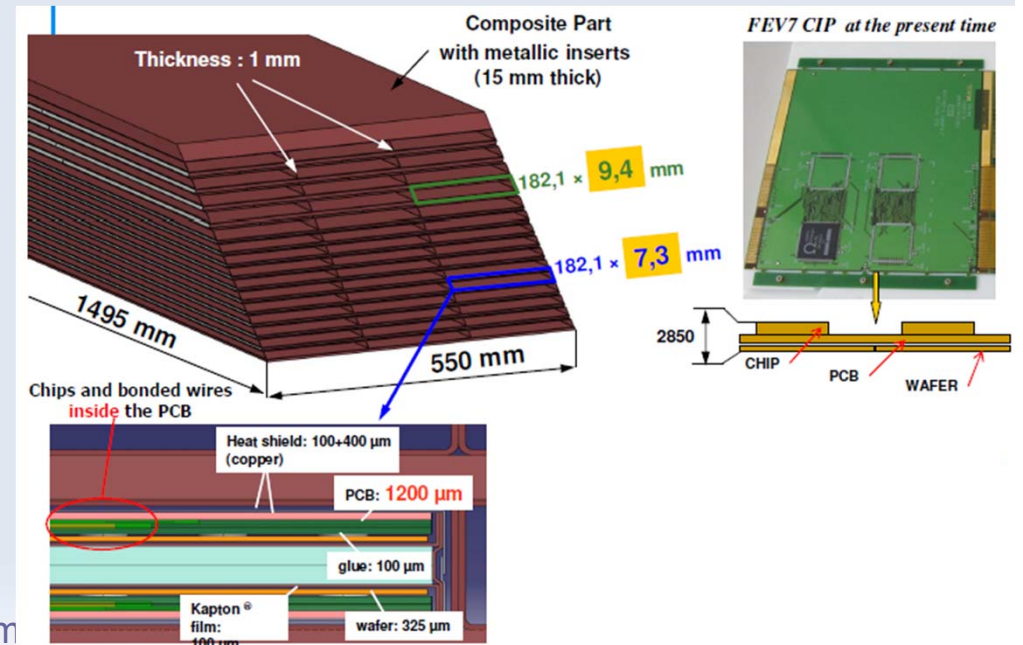
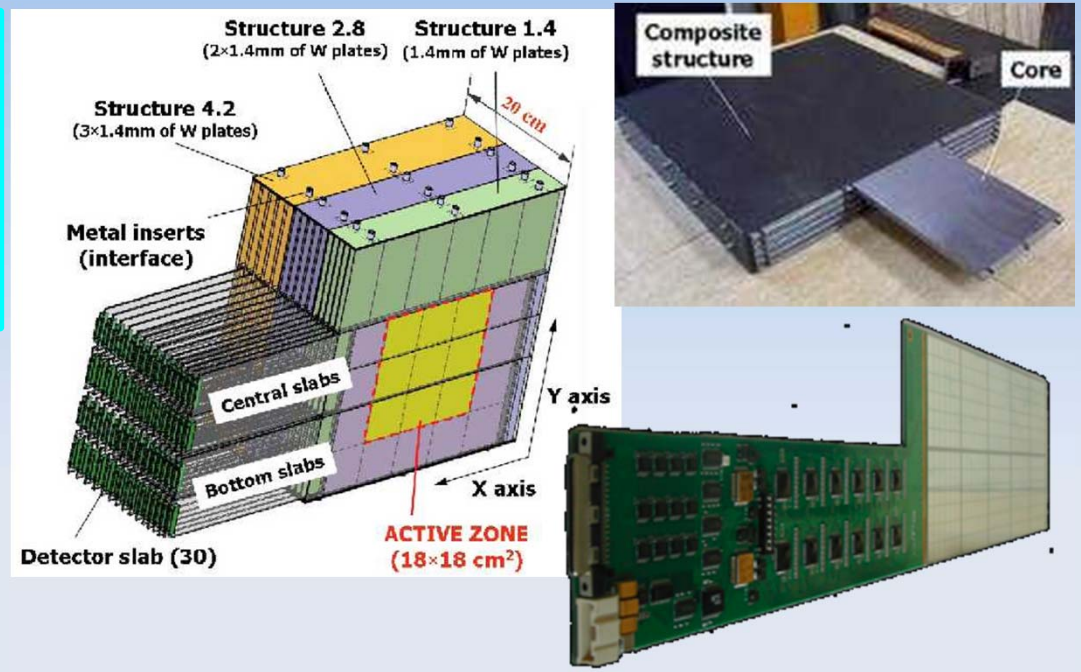
De nombreux jets de particules serrées □
 forte densité du calorimètre □
 radiateur dense W, détecteur compact Si

Motif

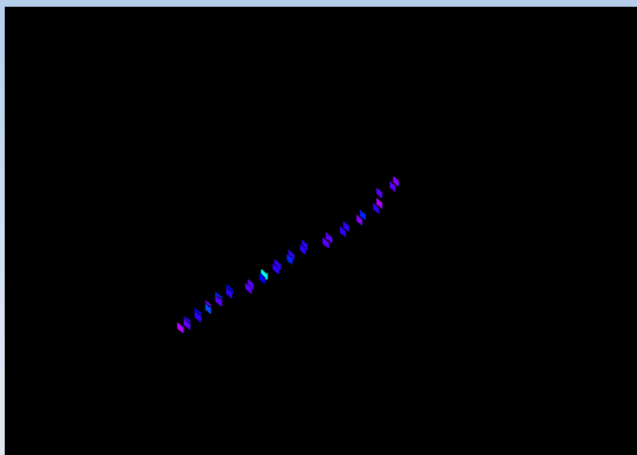
Les détecteurs au Si sont compacts:
 car ~ 100 paires par μ
 épaisseur $\sim 500 \rightarrow 50000$ paires

Le calorimètre est mince:
 $24X_0$ pour ~ 20 cm en 40 couches
 Les gerbes sont étroites $R_M \sim 1$ cm
 On peut intégrer beaucoup de canaux de lecture, 100M
 extrême granularité : 5×5 mm²

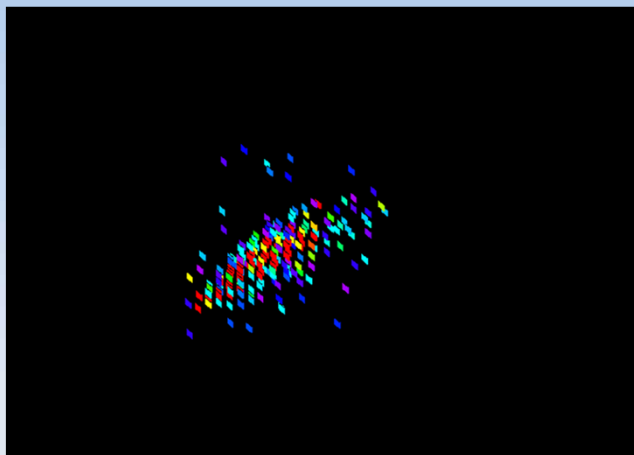
Très bonne efficacité de reconstruction des photons dans un environnement chargé



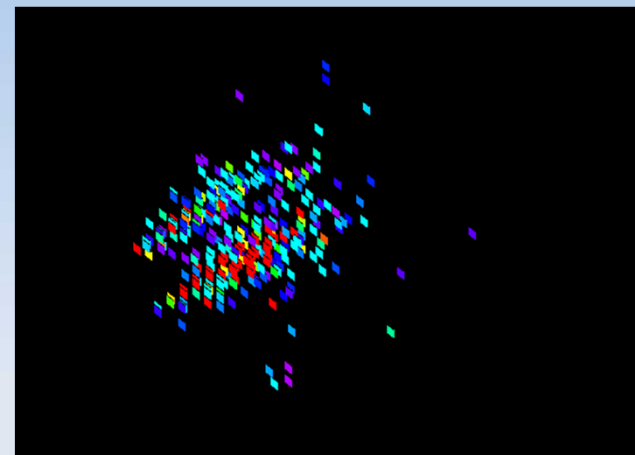
Quelques événements (test en faisceau) dans le Si-W CALICE



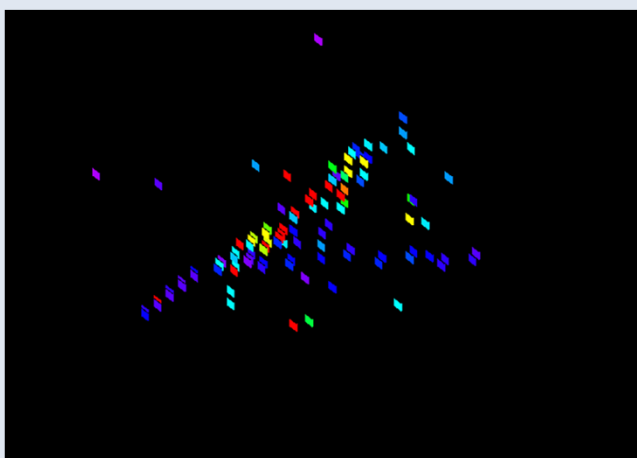
Un μ ou un π



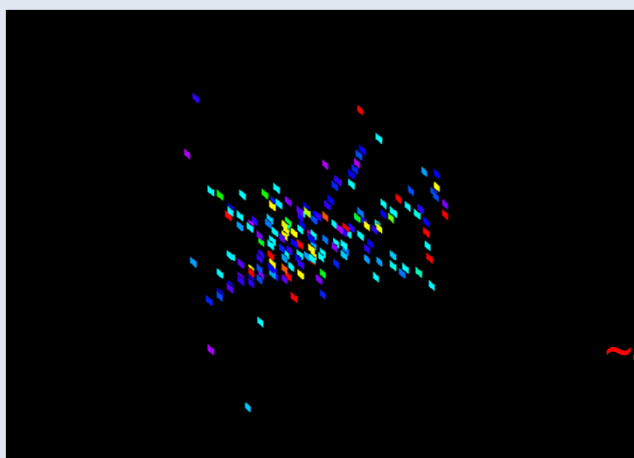
Un e^- ou un γ



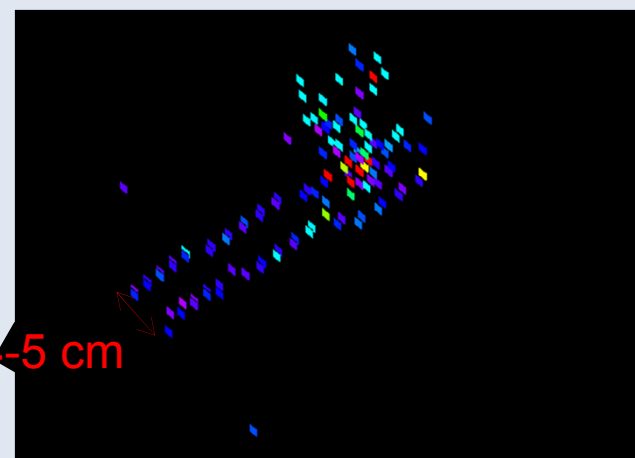
2 e^-



Un hadron (π)



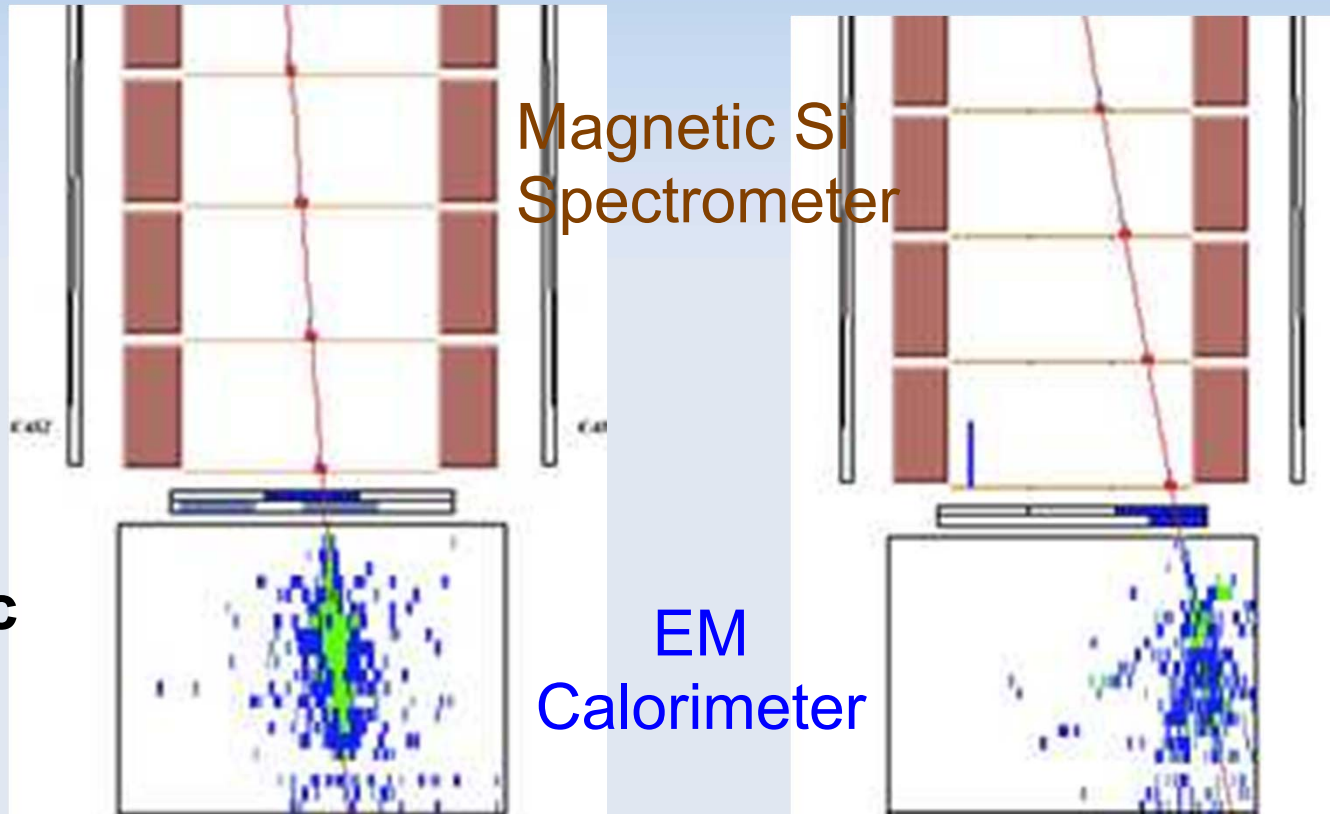
Un hadron
(avec composante EM)



hadron chargé
& h. chargé ou μ

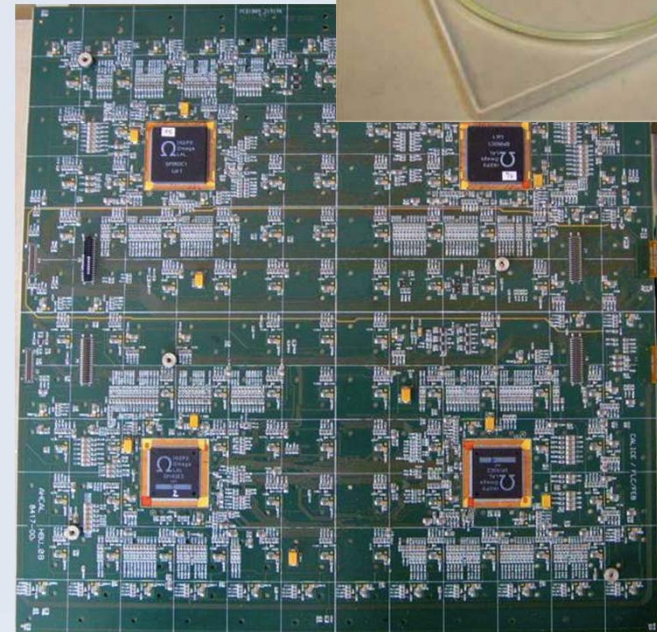
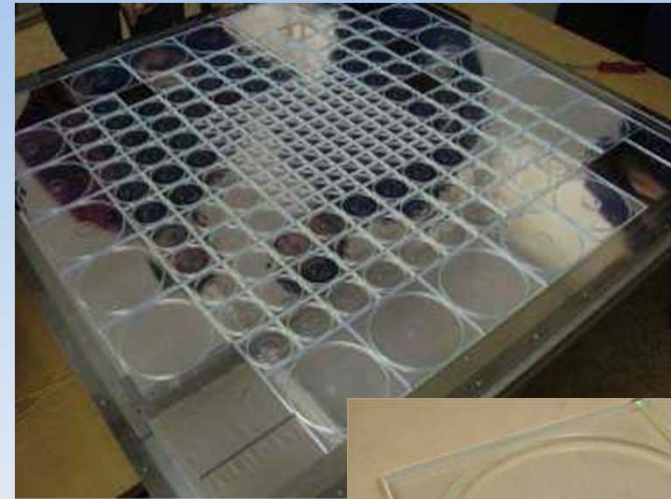
SiW ECAL : Pamela

Satellite mesure de Matière noire



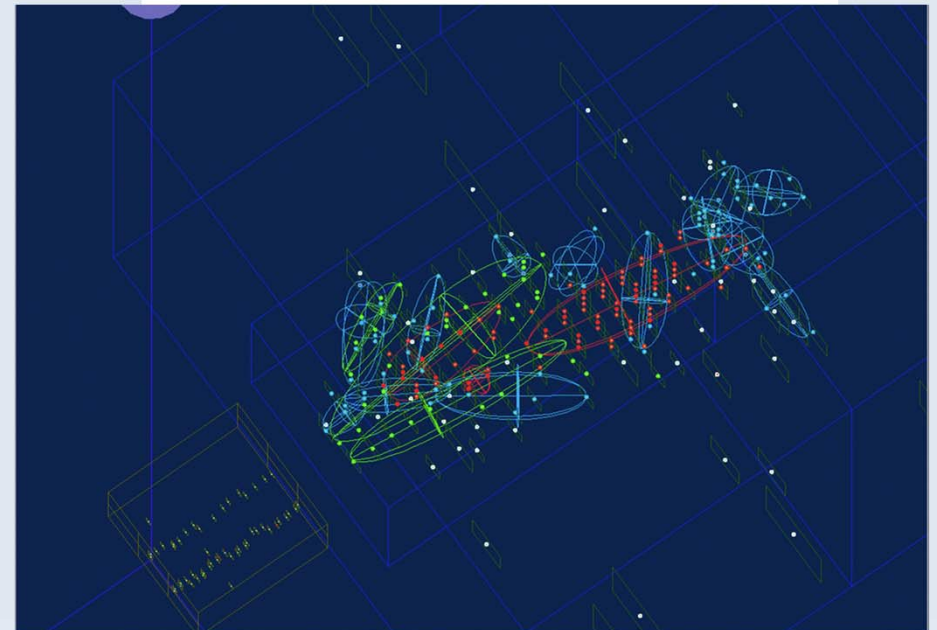
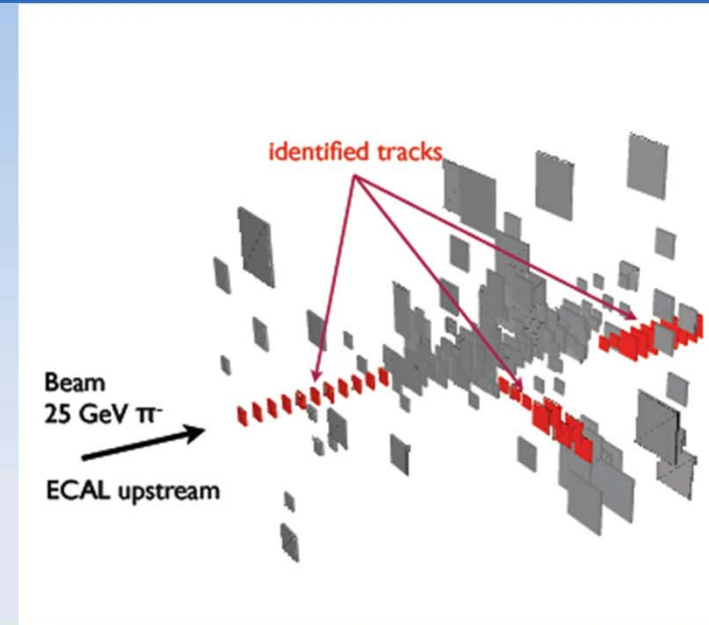
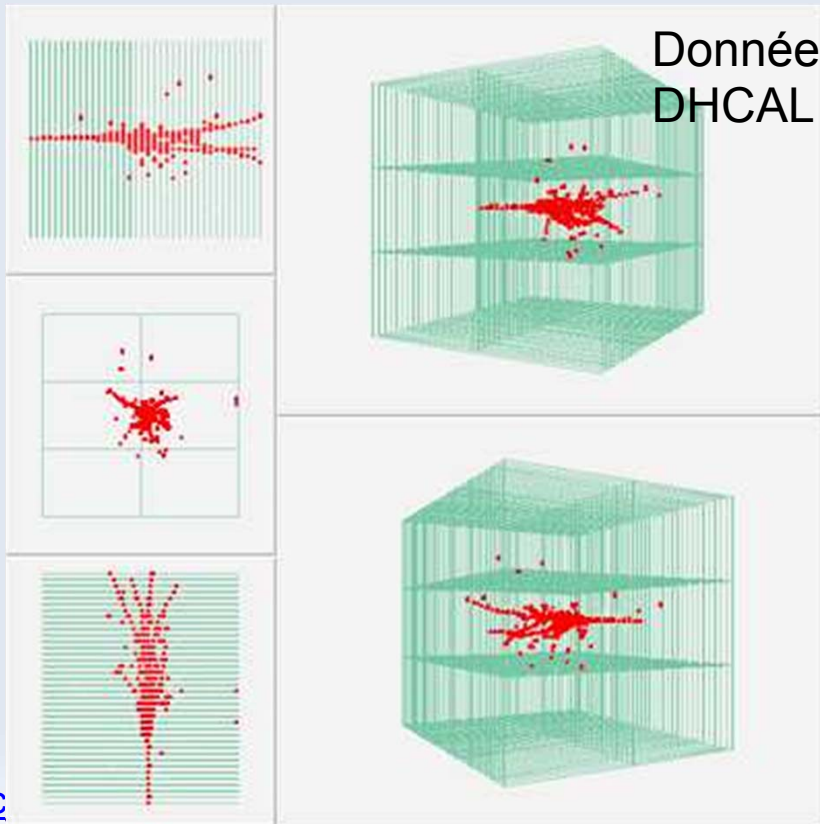
AHCAL & SDHCAL : Fe-Scint & Fe-RPC

- 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

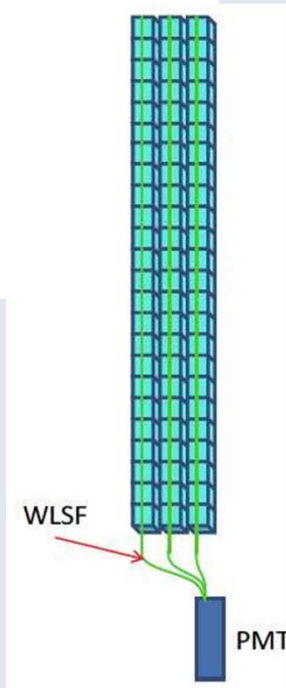
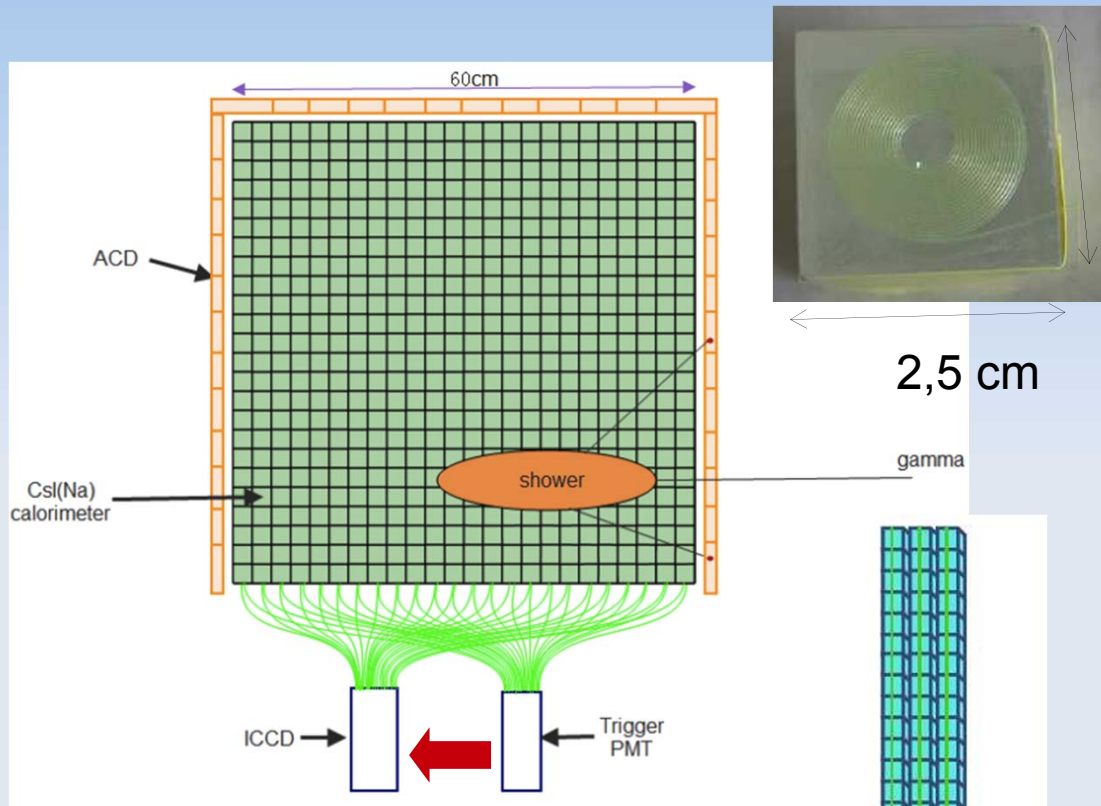


Tests en faisceau

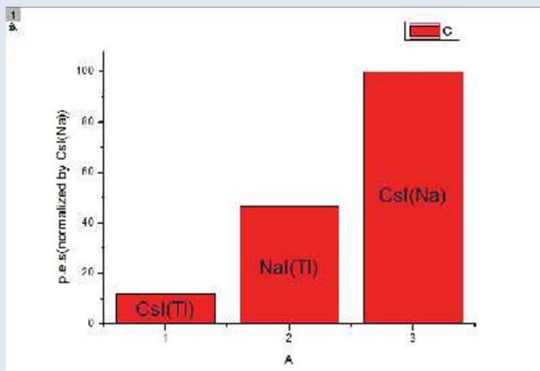
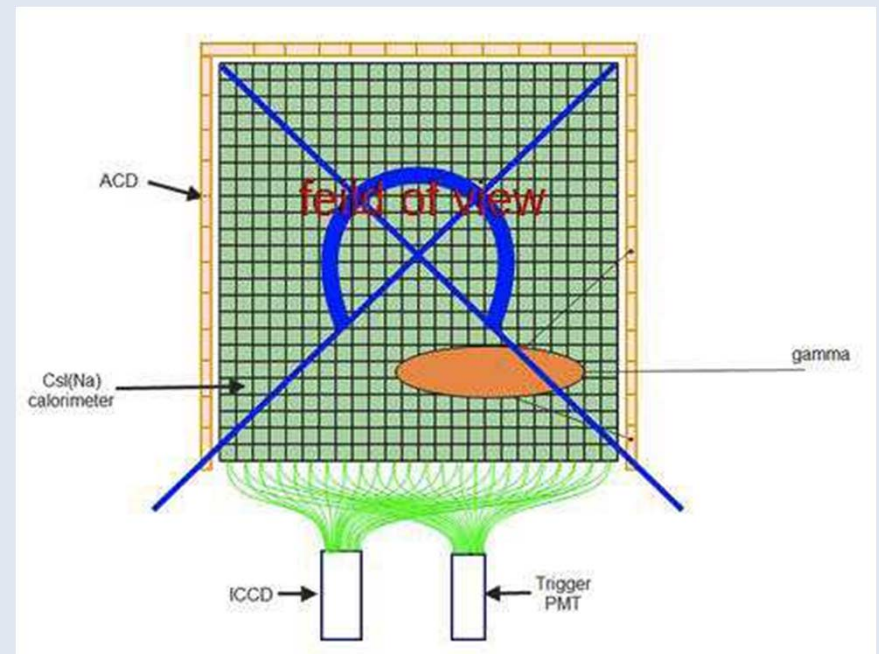
- Validation technologique
 - ▶ **électronique enfouie**
 - ▶ **refroidissement, power-pulsing ...**
- test des performances de physique pure
- Amélioration des Monte-Carlo → PFA
- test des algorithmes



Calorimétrie digitale homogène

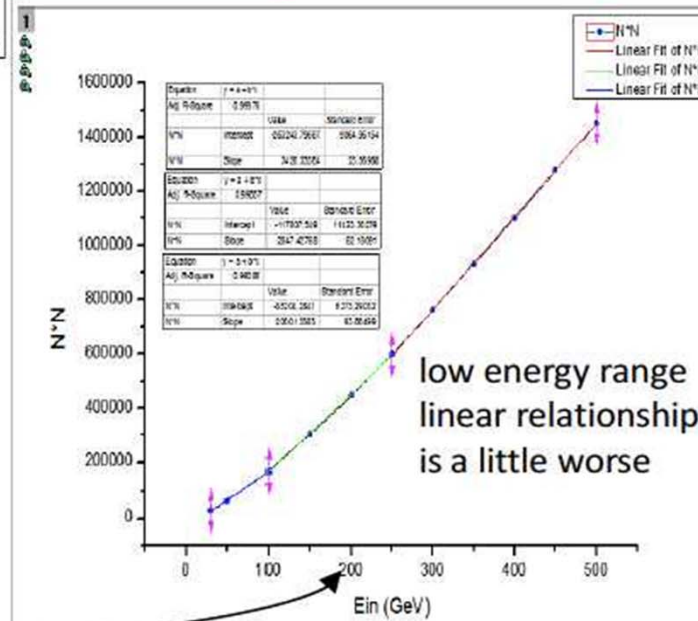
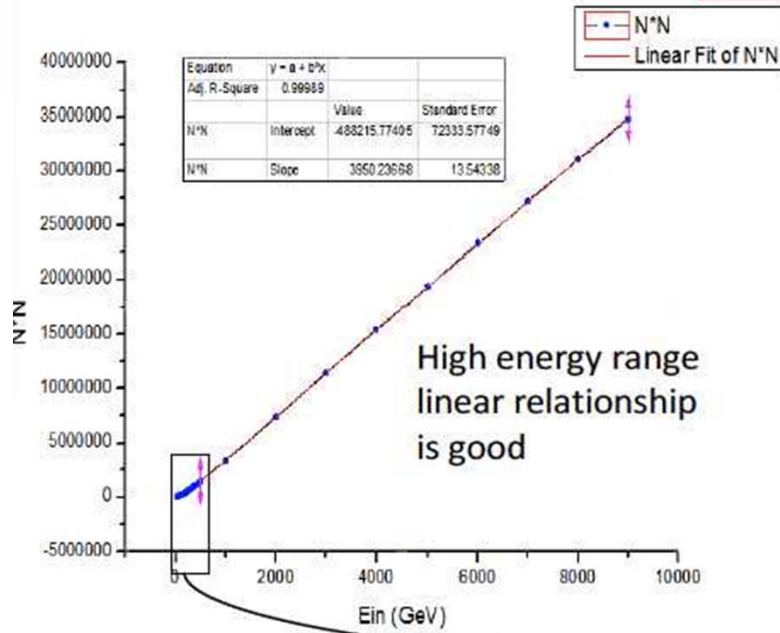


- Proposition IHEP Beijing
- Satellite → Recherche de matière noire (DM)
 - ▶ WIMPs ; $10 \text{ GeV} < m < 10 \text{ TeV}$
 - ▶ DM+DM → $e\bar{e}, \gamma\gamma, \dots$
- ECAL $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$
 - ▶ recherche de pic



From the MC data we found the relationship is:

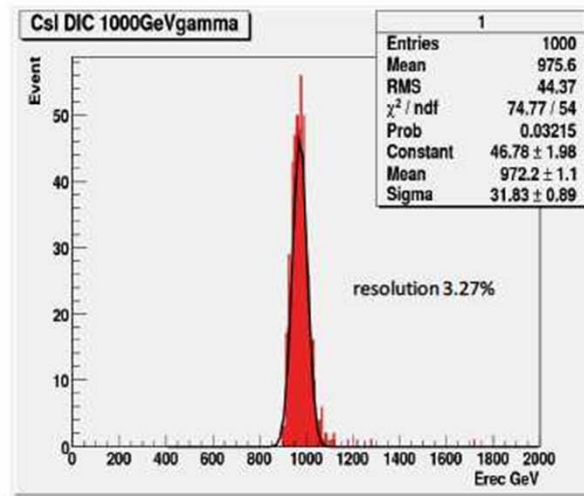
$$N_{hit}^2 \propto E_{incident}$$



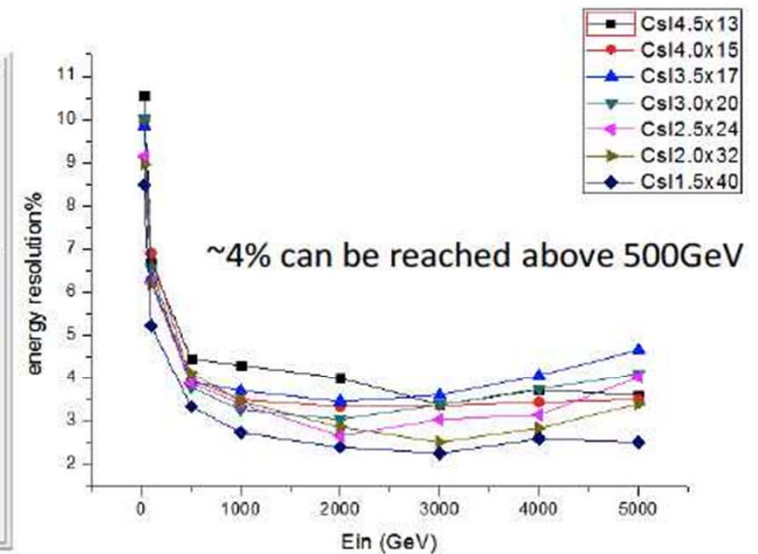
Si la taille des cellules est suffisamment petite

Comptage de cellule \equiv mesure !!!

Angular resolution $\sim 0.5^\circ$

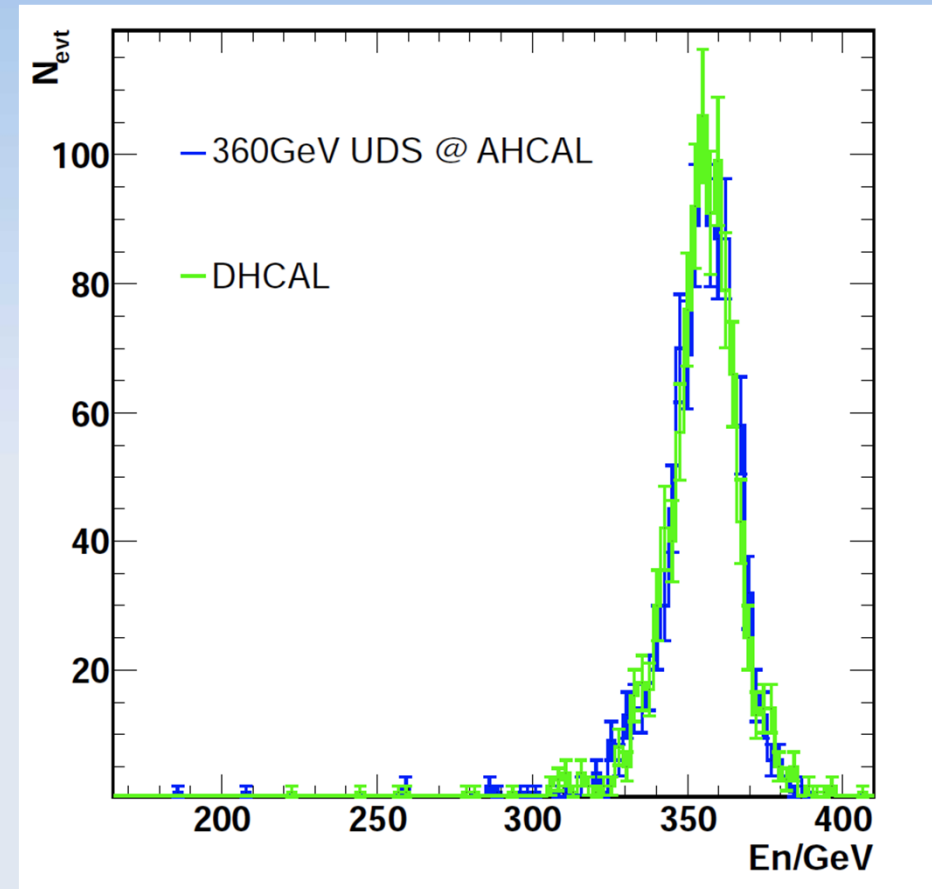
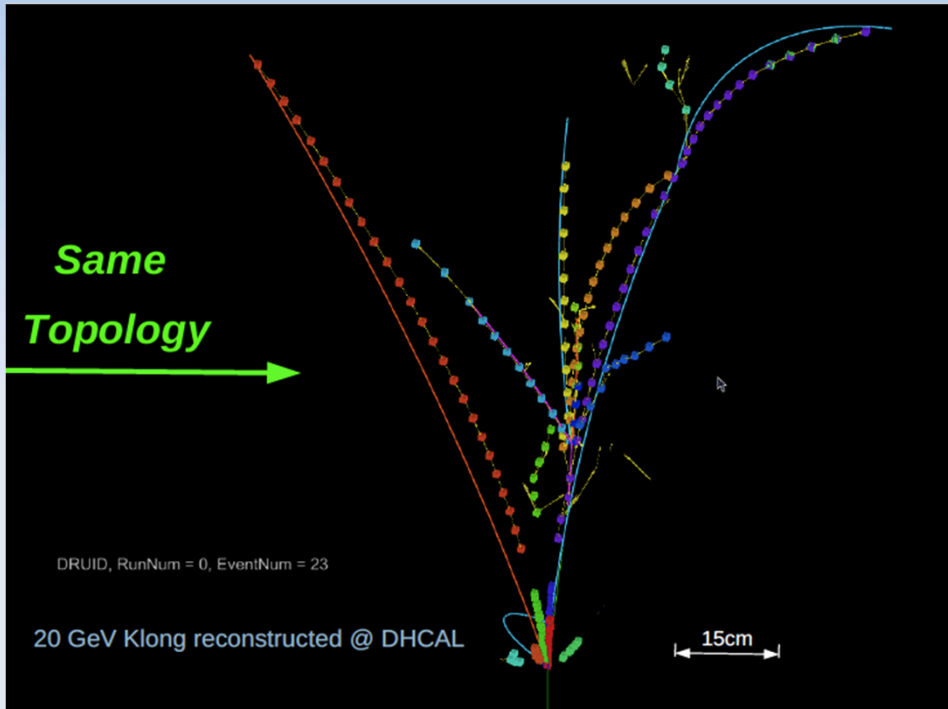


Energy reconstruction distribution of 1000GeV gamma-ray



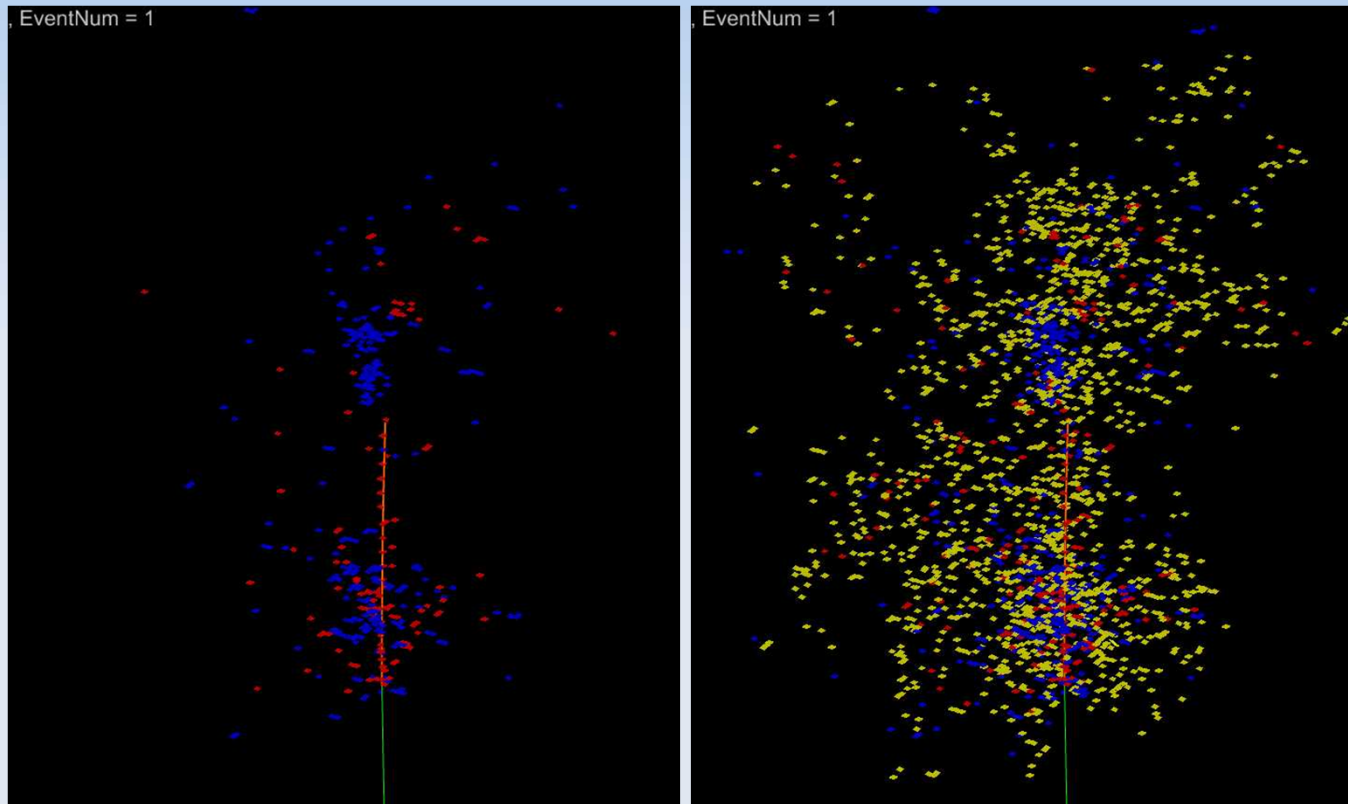
Energy resolution compare of different granularity 1.5—4.5 cm

Perpective de la très haute granularité



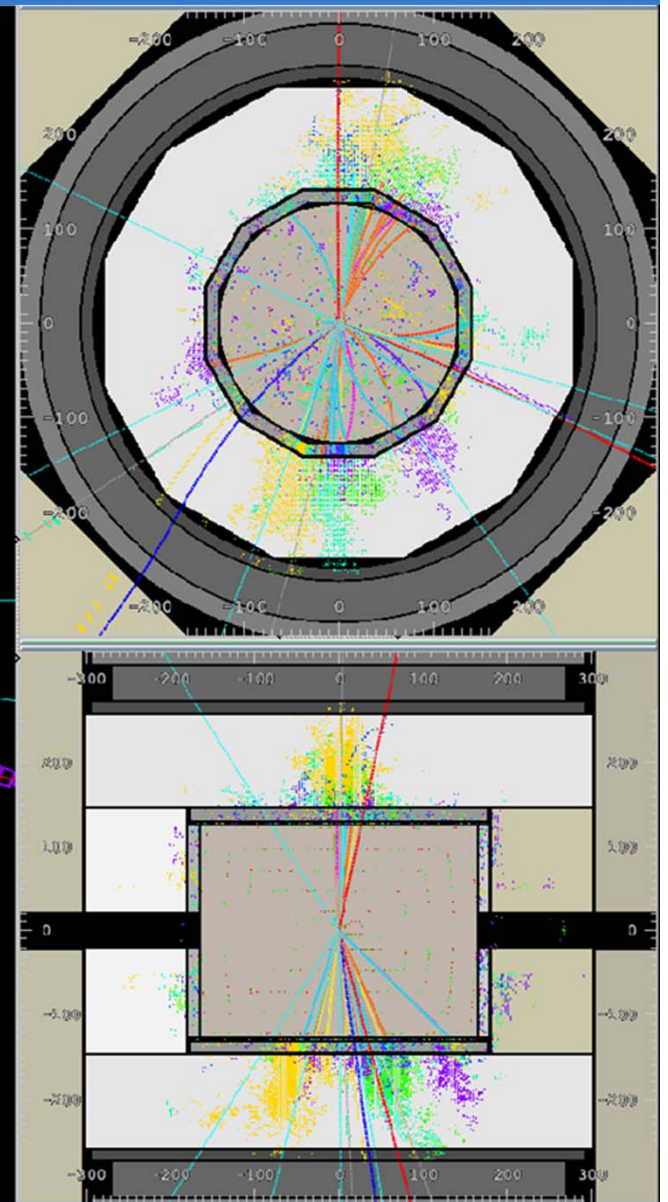
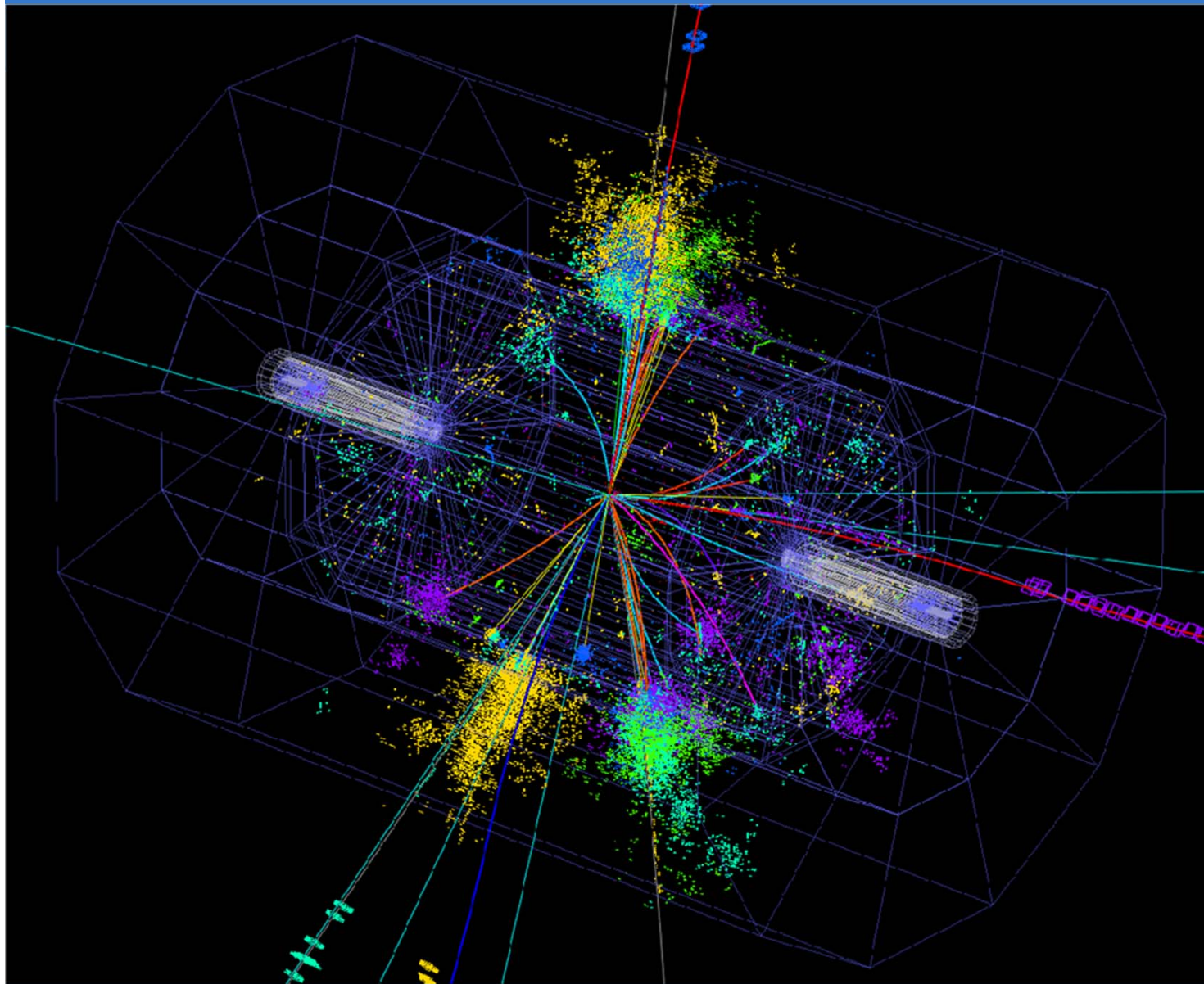
Imagerie calorimetrique → le retour aux chambres à bulle ?

Avec ou sans neutrons ?



⇔ Senseurs sans ou avec H ?

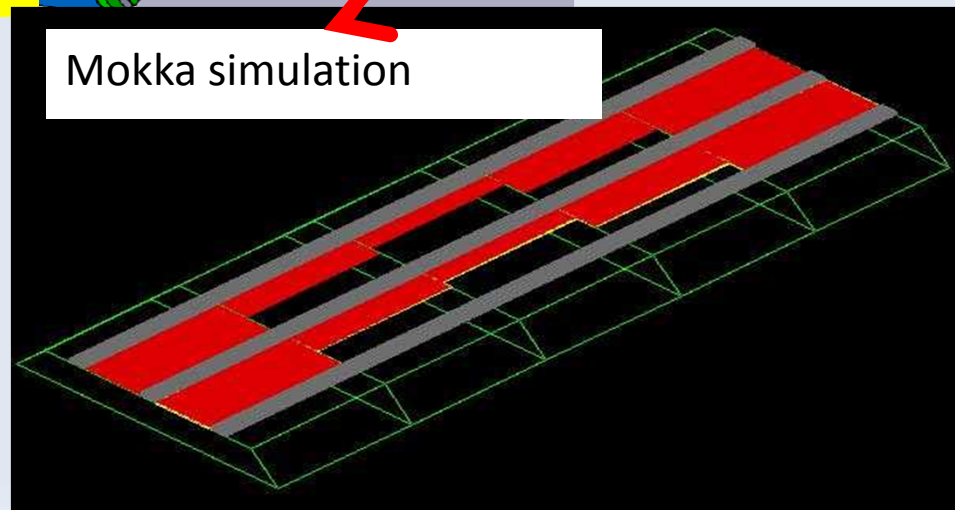
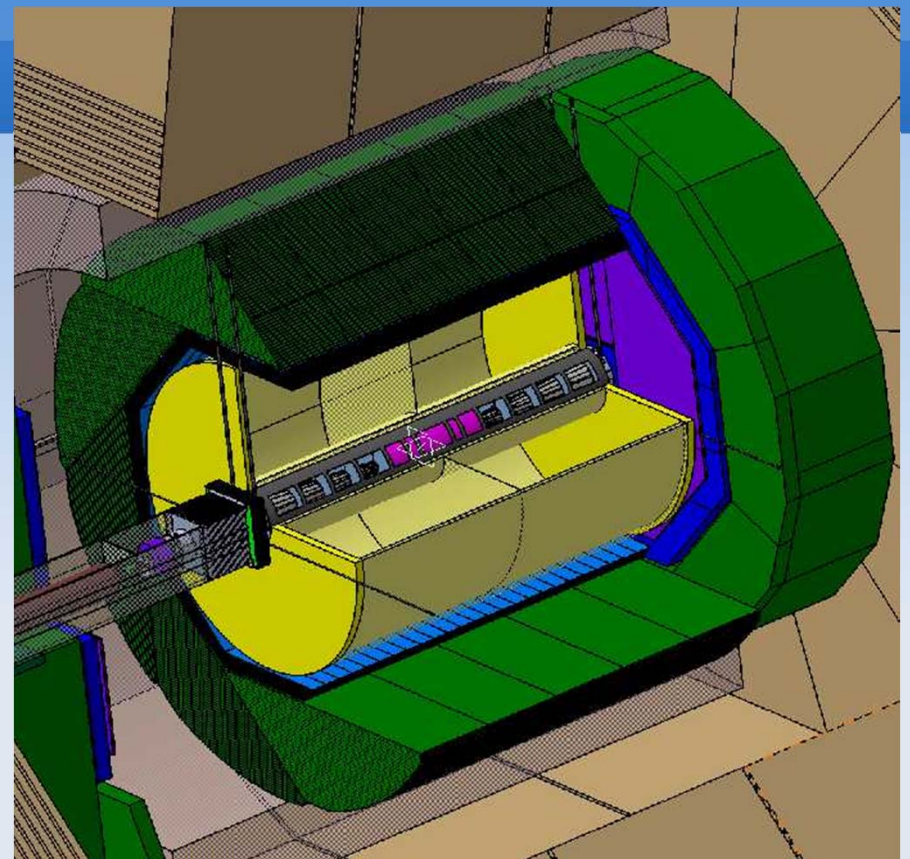
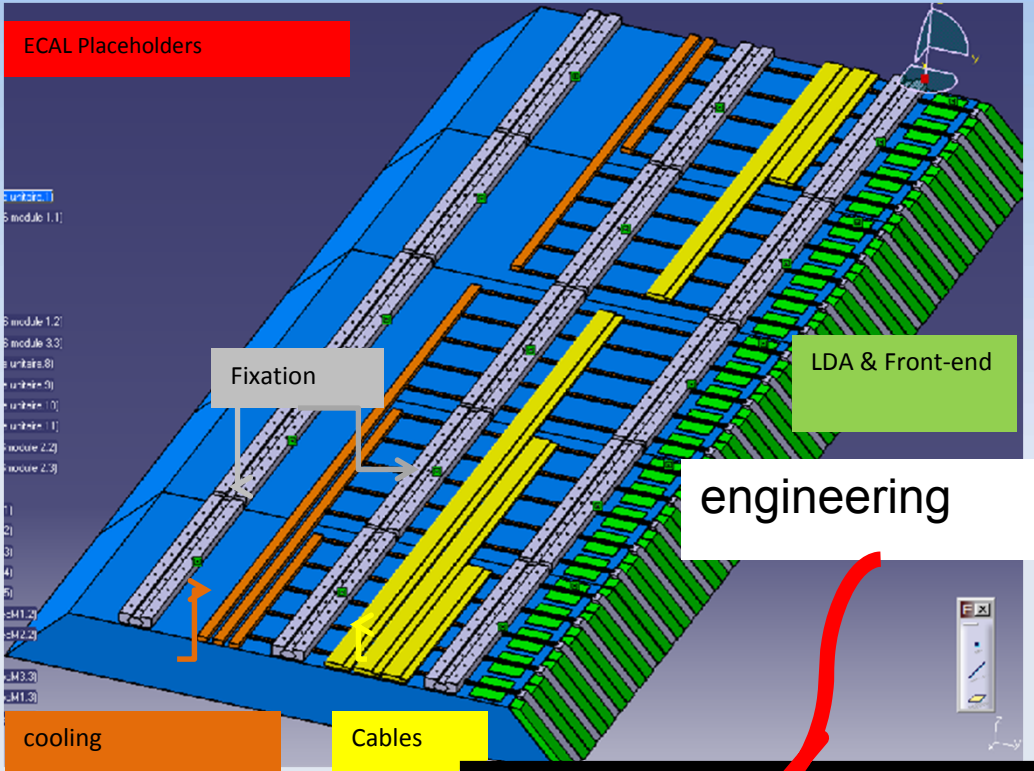
Faut-il privilégier la résolution brute ou faciliter la reconstruction ?

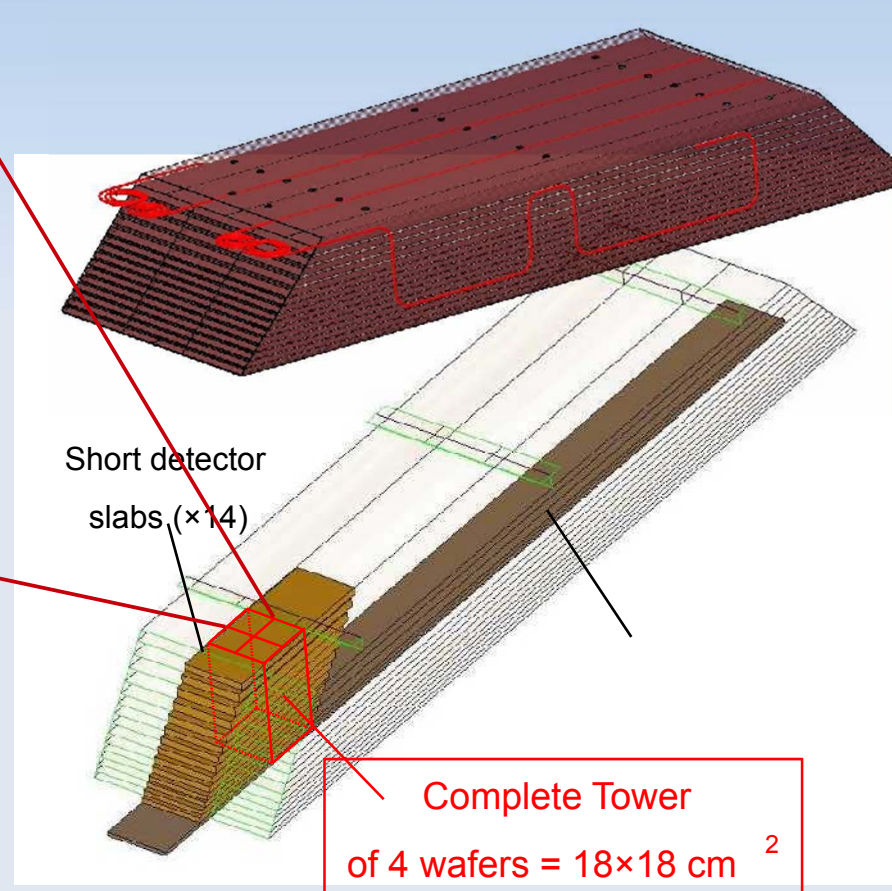
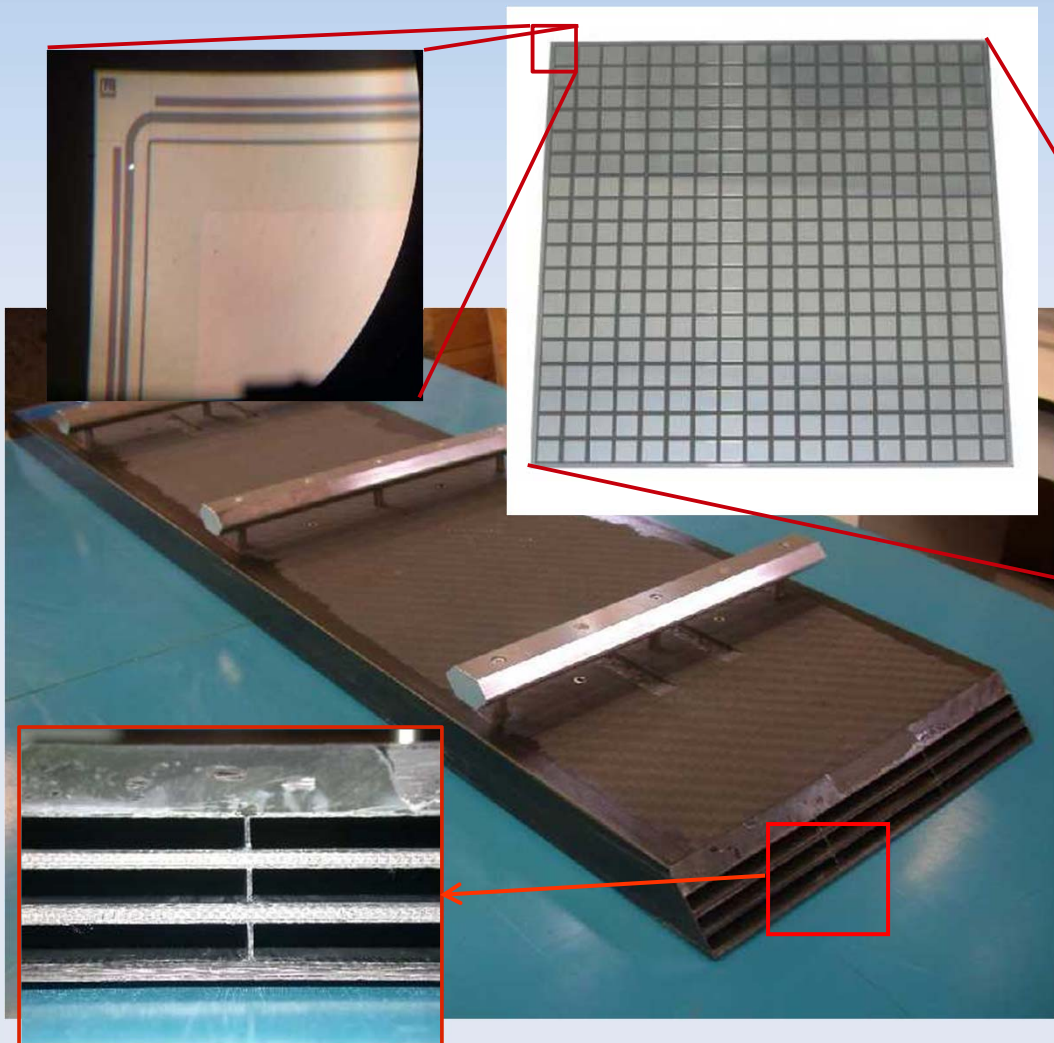


$t\bar{t}$ à 500 GeV

Quelques considérations pour les ingénieurs (mais pas uniquement!)

- La mécanique : le calorimètre volant
 - ▶ Zone mortes
 - ▶ déformations / précision
- L'électronique
 - ▶ La consommation (power pulsing)
 - ▶ La dissipation thermique
 - ▶ les CEM, mise à la masse
- Les services
 - ▶ passage des services
 - ▶ l'intégration
- L'acquisition
 - ▶ Flux de données
 - ▶ Redondance
 - ▶ Fiabilité de l'électronique «profonde» [REM : ce n'est pas spatial]
- L'intégration
 - ▶ Coûts
 - ▶ Risques :
 - ◆ la dépendance à 1 fournisseur
 - ◆ obsolescence du matériel : déjà vieux à l'installation





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 $f_{EM} \sim 30\% \pm 10\%$ ($f(E)$) 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
 - ◆ $3\text{--}20\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$ pour les ECAL ; $50\text{--}100\%/\sqrt{E} \oplus 3\text{--}5\%$ 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 (ecole instrumentation du CERN)
 - ▶ *R. Wigmans, D. Fournier, F. Sefkow. M, Diemoz, ...*
- Présentations à CALOR-2010
- Collègues ILC et CALICE
 - ▶ *Henri Videau, Jean-Claude Brient, Riccardo Fabbri, Frank Simon*
- Cours de L. Marleau