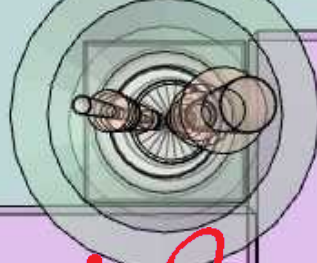


# La calorimétrie

## Partie III

Vincent Boudry  
*LLR, École polytechnique*



**LLR**

**École du détecteur à la mesure**  
**Fréjus, mai 2013**

# Plan

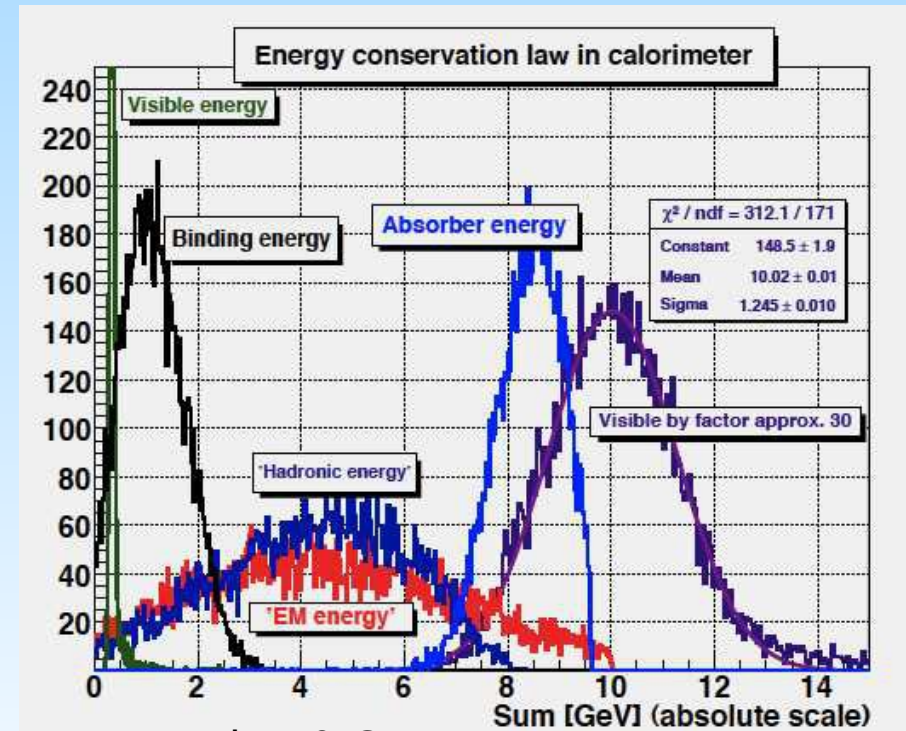
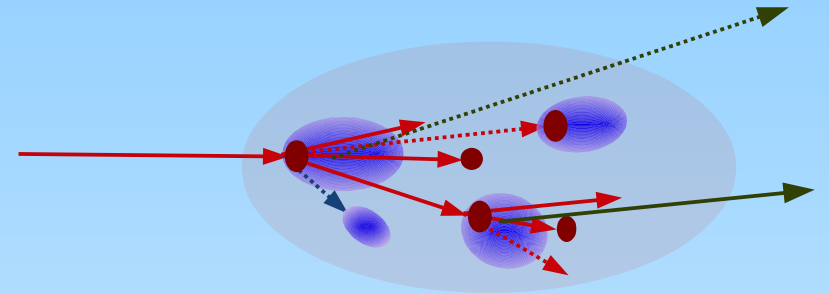
- Introduction
    - ▶ Les interactions des particules dans la matière
      - ◆ interactions hadronique, réponse en temps, ...
      - ◆ Les belles gerbes
    - ▶ Principe de la mesure en calorimétrie
      - ◆ calorimétrie électromagnétique & hadronique
      - ◆ mesure de la performance
  - Techniques de détection
    - ▶ Optique : Scintillateurs & Čerenkov
    - ▶ Electronique en milieu condensé (Solide & Liquide)
    - ▶ Détecteurs Gazeux
    - ▶ Quelques exemples
    - ▶ Effets annexes, et considérations «pour ingénieurs»
  - La pratique et le futur...
    - ▶ Quelques ruses...
    - ▶ Le futur de la calorimétrie : dual readout & le particle flow.
- 
- Mercredi**
- Jeudi**
- Vendredi**

# **Techniques d'amélioration de la mesure**

# Bilan énergétique d'une gerbe hadronique :

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

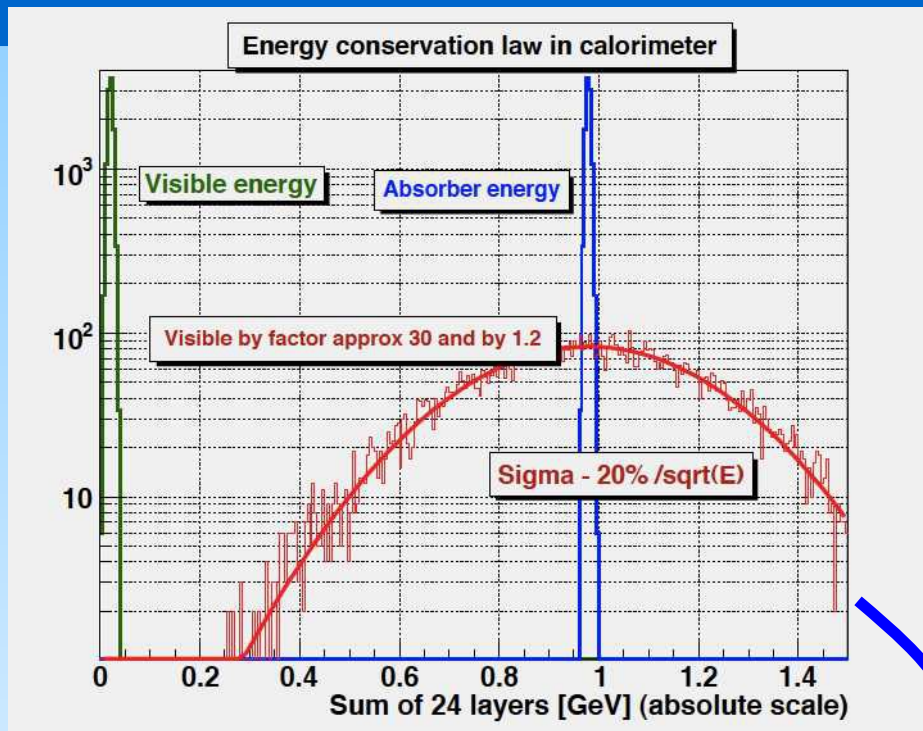
- $E_{EM} = \pi^0 \sim 30\%-60\%$  à 10-200 GeV  
( $f_{EM}$  ou  $F_0$ )
- $E_{tr} = \pi$  chargés & protons
- $E_n =$  neutrons
- $E_{nucl.} =$  Energie de liaison nucl.  
(Binding energy) → Energie perdue ou «invisible»
- $E_{fuites} = \mu + \nu, \sim 1-2\%$



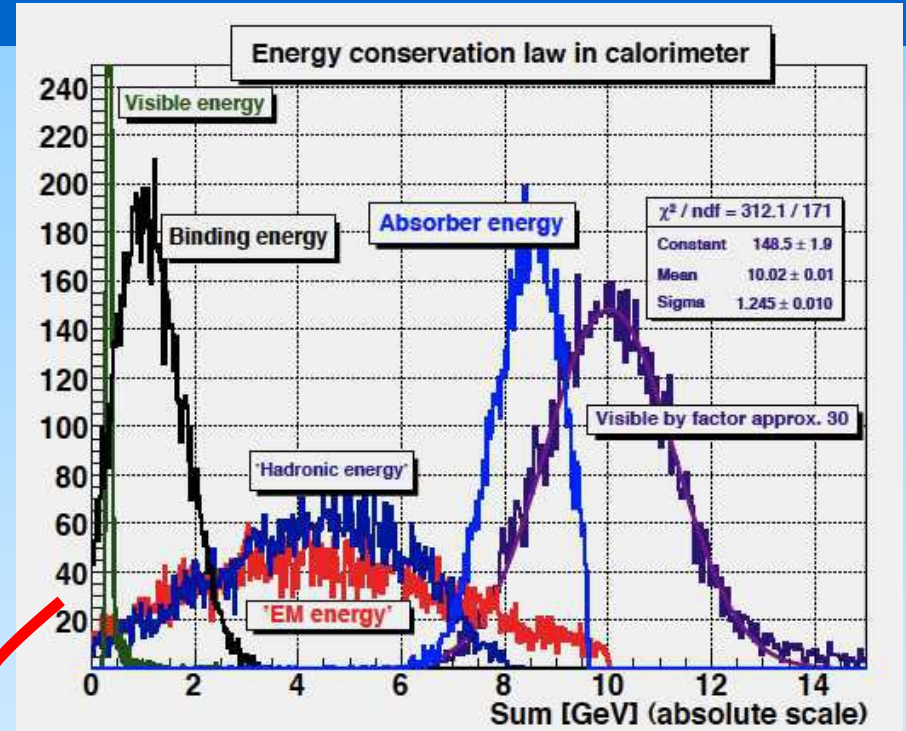
$\pi$  de 10 GeV  
sim. GEANT4

V. Morgunov

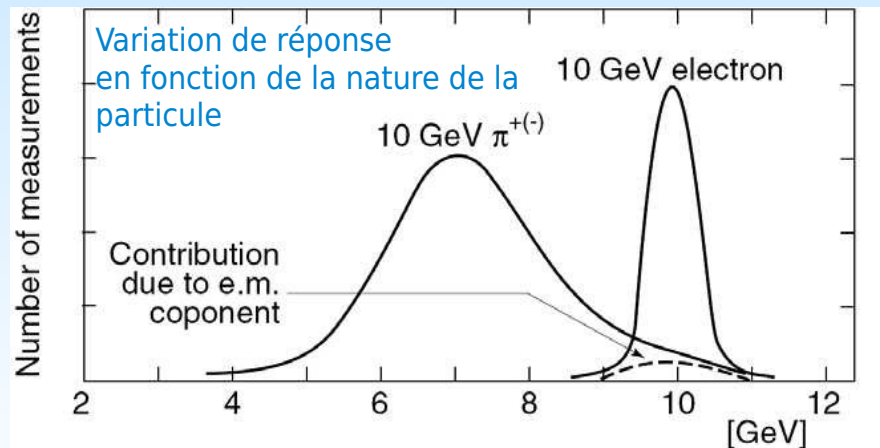




e- de 1 GeV



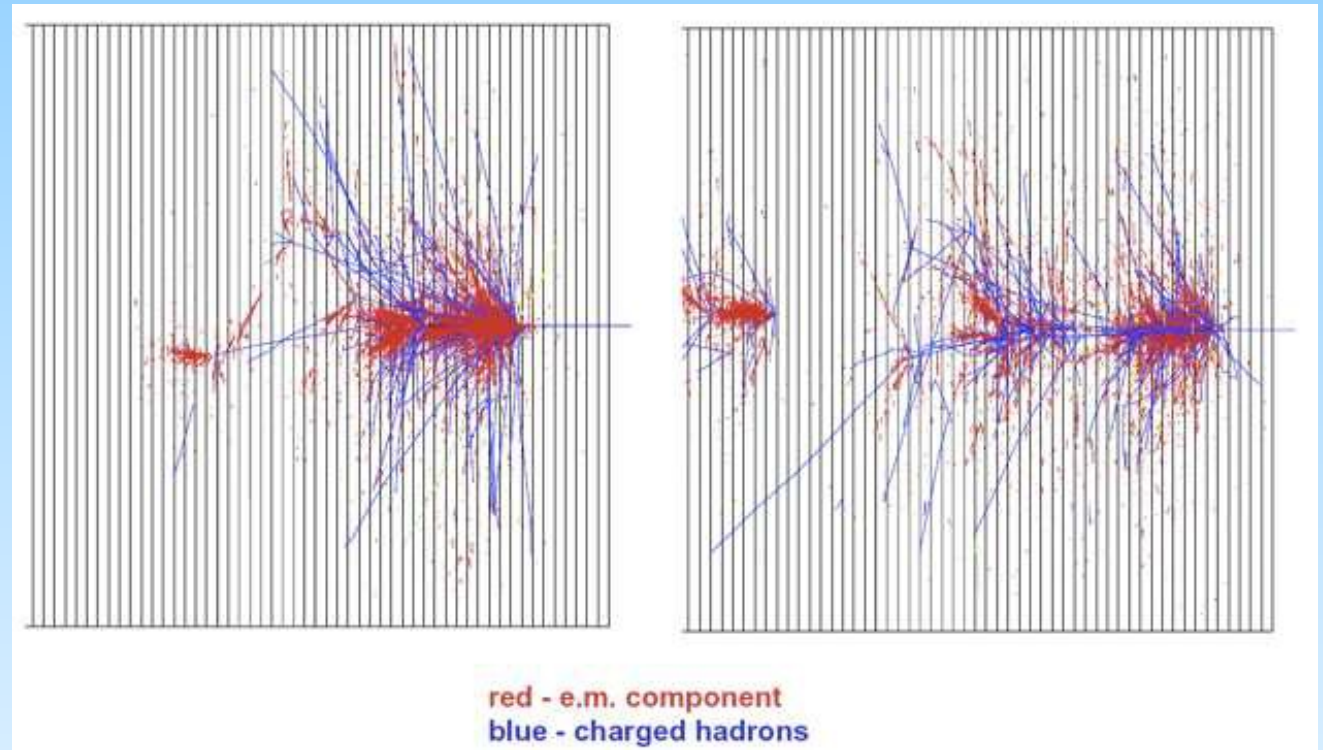
$\pi$  de 10 GeV V. Morgunov



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

▶  $E_h = E_{tr} + E_n$

▶  $\varepsilon_e$  = fraction d'énergie EM détectée

▶  $\varepsilon_h$  = fraction d'énergie Hadronique détectée

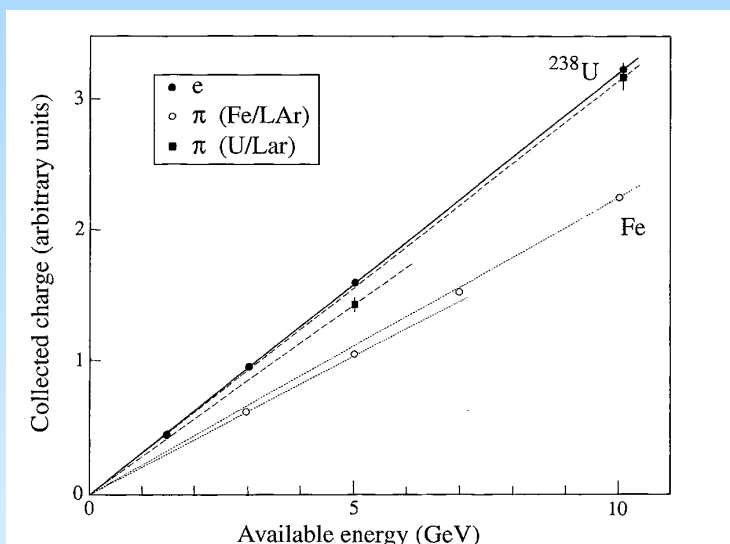
Augmenter  $\varepsilon_h$  et/ou réduire  $\varepsilon_e$

# Augmenter $\epsilon_h$

## Utilisation de $^{238}\text{U}$ (U appauvri)

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

◆  $\gamma, n, \dots$



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

## Utilisation de capteurs riches en Hydrogène

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

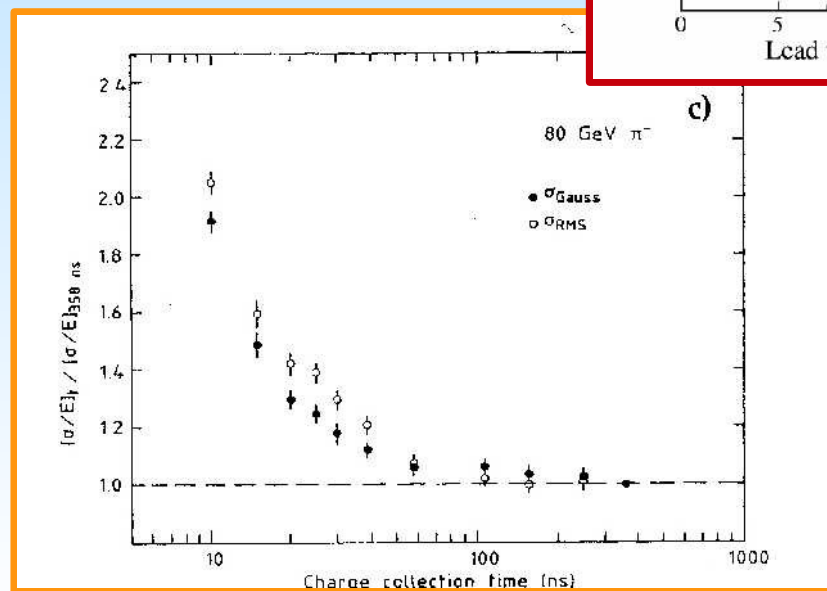
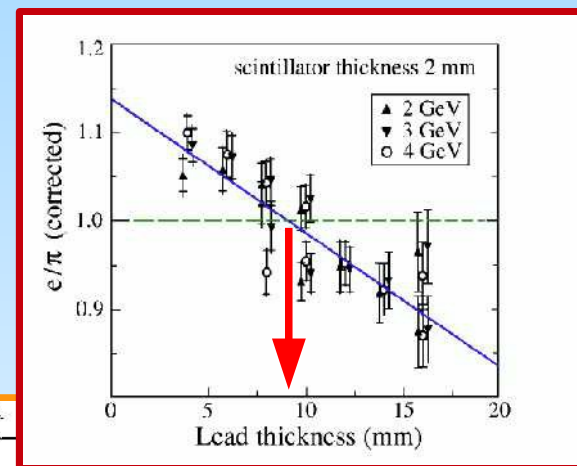
■ Exp de L3

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

■ Pb + Scintillateur

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

■ Intégrer plus longtemps

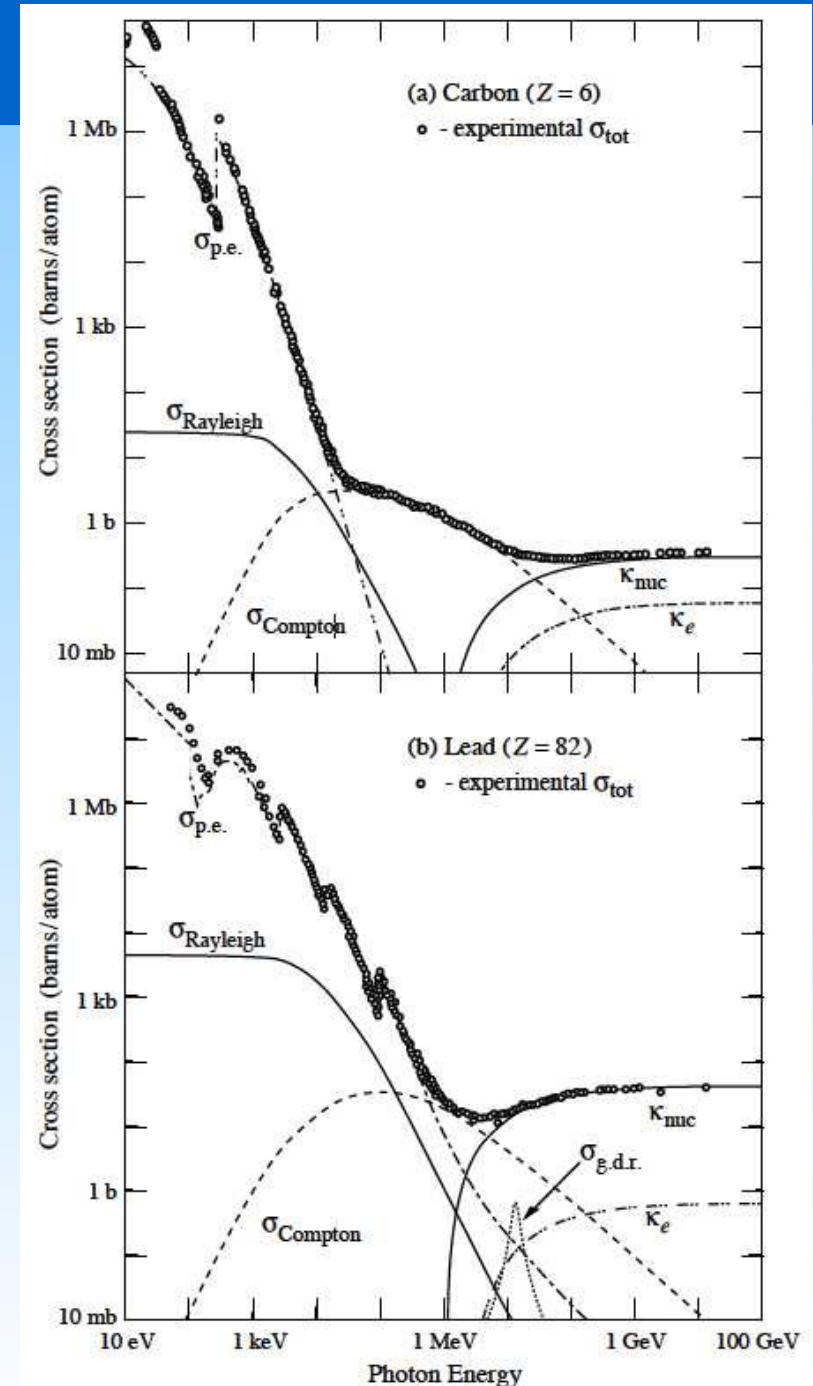
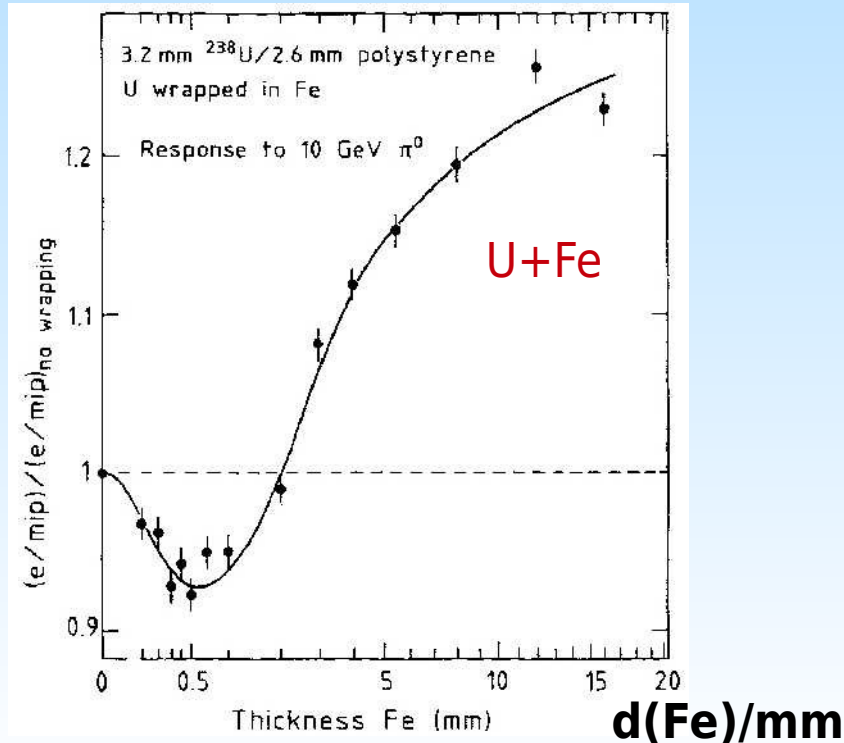




# Diminuer $\epsilon_e$

- 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

$e/\mu$



# Bilan compensation

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

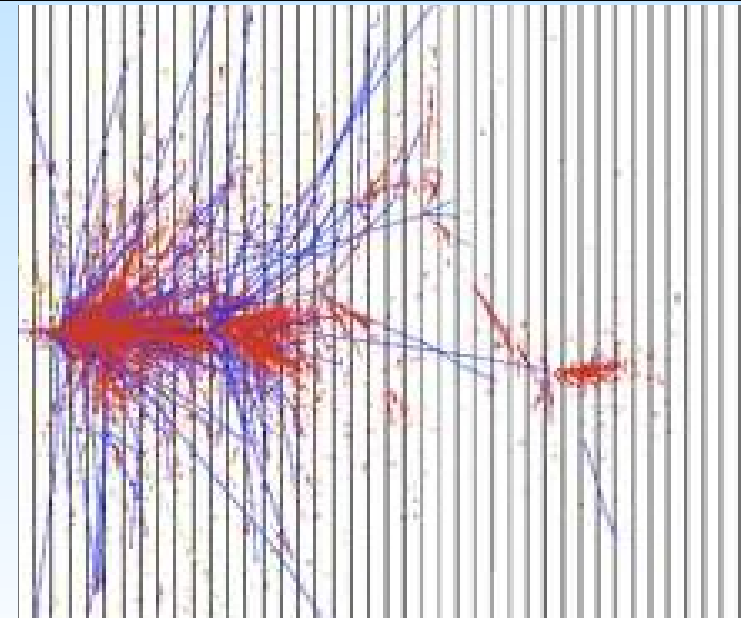
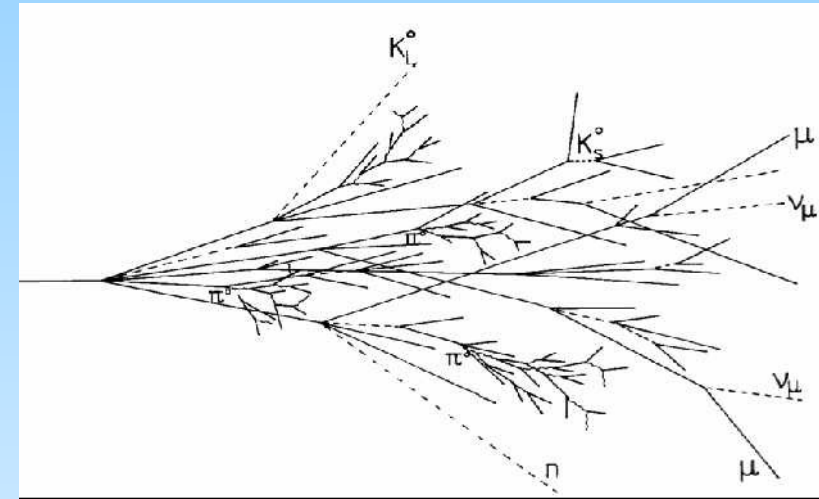
Bon ECAL ou bon HCAL ?

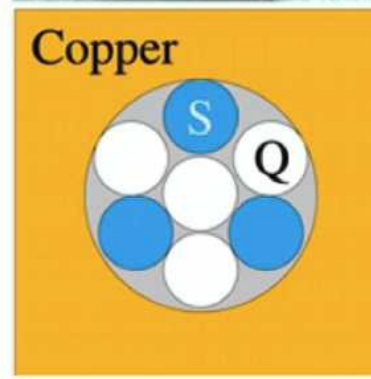
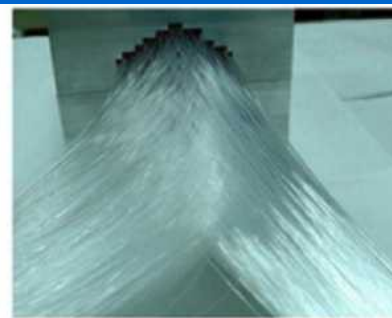
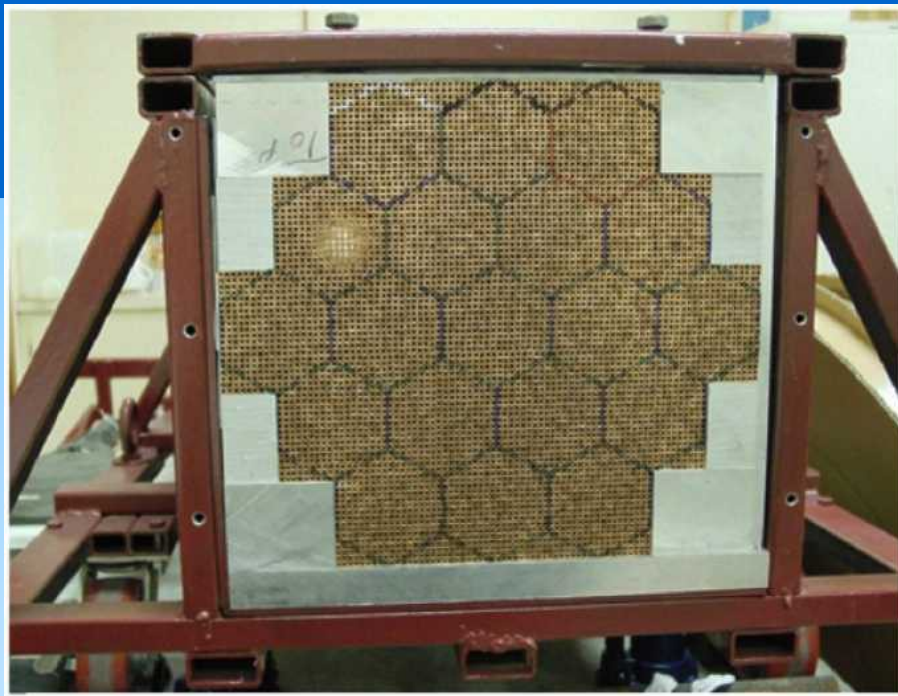
# **I had a DREAM...**

Un physicien anonyme

# DREAM (Dual REAout Module) concept

- 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
$$N_{traces}(e^\pm) / \text{MeV} \gg N_{traces}(\text{hadrons})/\text{MeV}$$
  - ▶ lecture classique du  $dE/dx$  (fibres scintillantes)
- Lecture du même milieu par 2 fibres différentes
  - ▶ 2 e/h pour 1 même événement





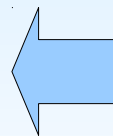
Type de SpaCal  
{Spaghetti  
Calorimeter}

• *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  $\approx 90$  km
- Hexagonal **towers** (19), each read out by 2 PMTs



Photo multiplicateurs

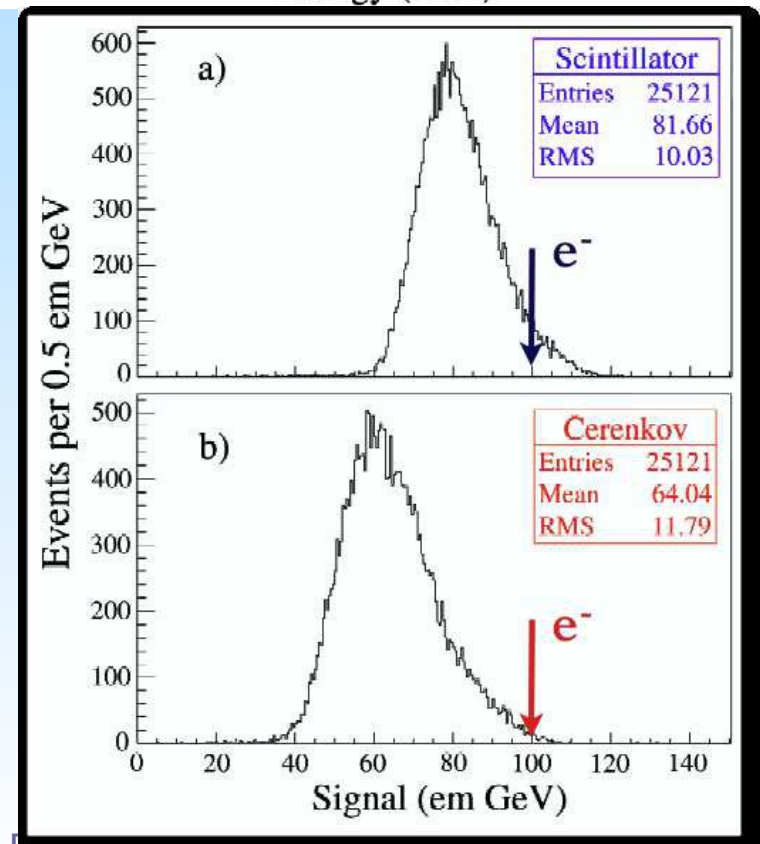
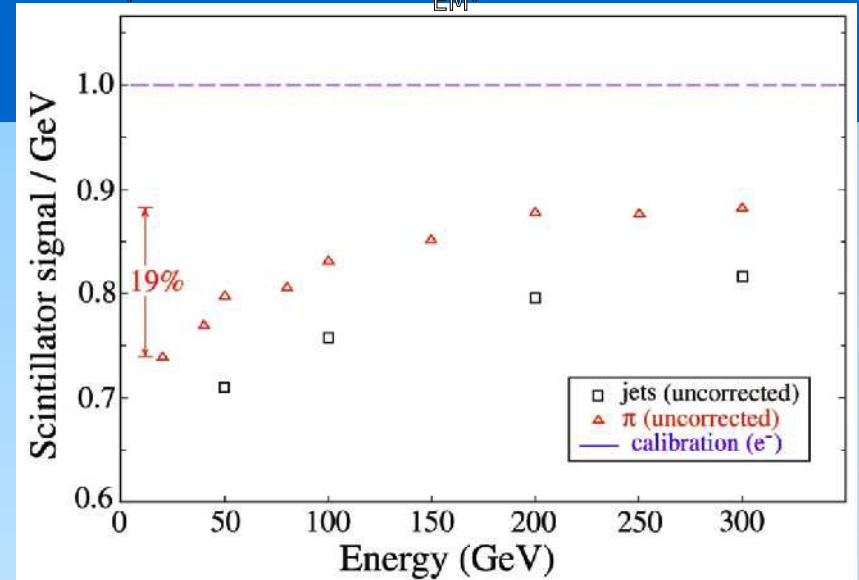
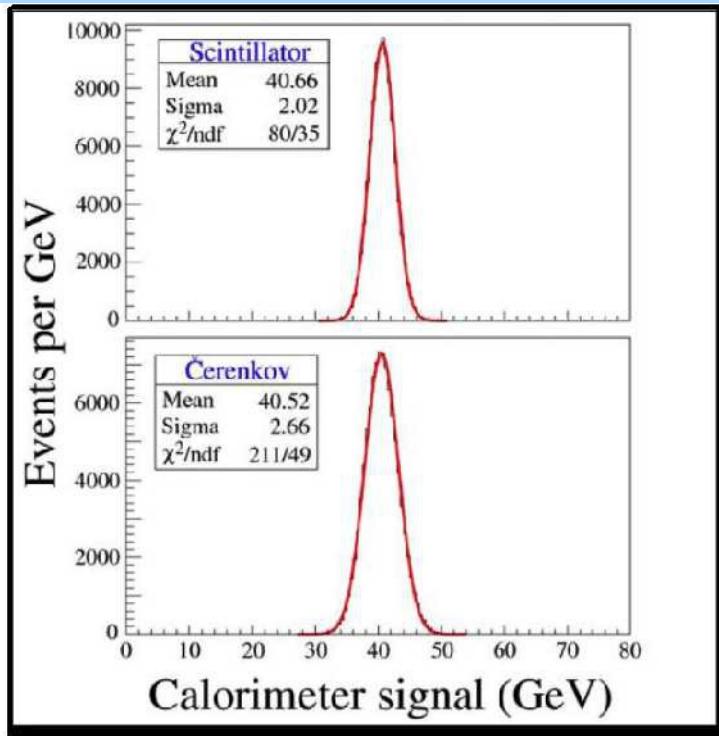




Réponse aux électrons

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

Incidence : 2°  
(tunneling à 0°)



Réponse aux  $\pi$  de 100 GeV

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

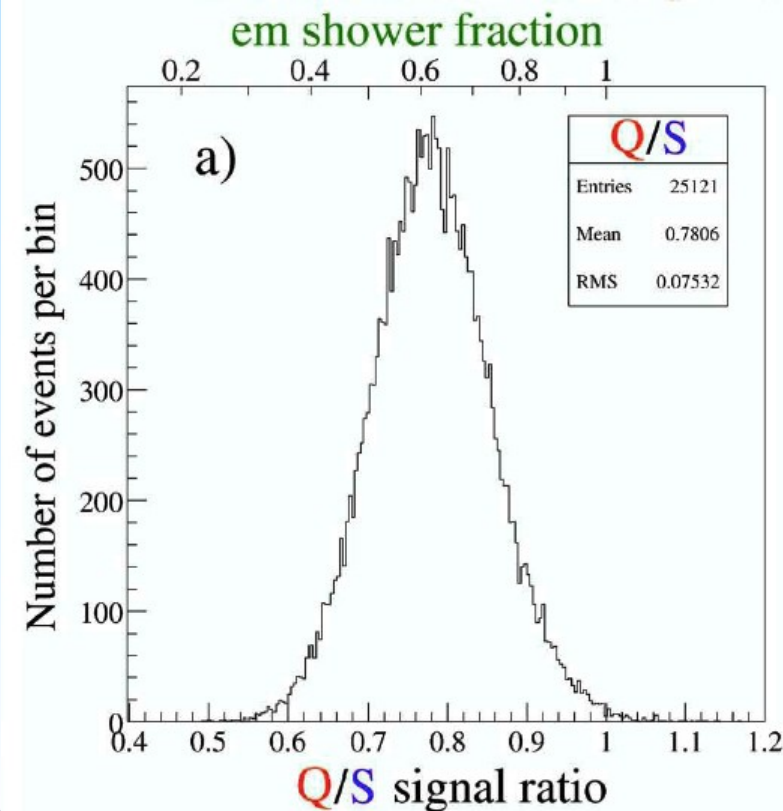
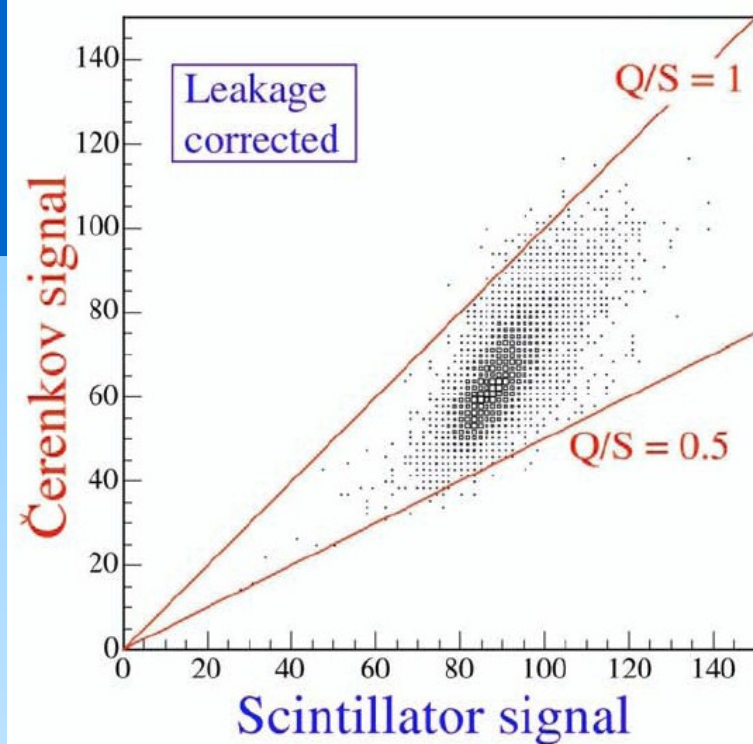
$$Q = E \left[ f_{em} + \frac{1}{(e/h)_Q} (1 - f_{em}) \right]$$

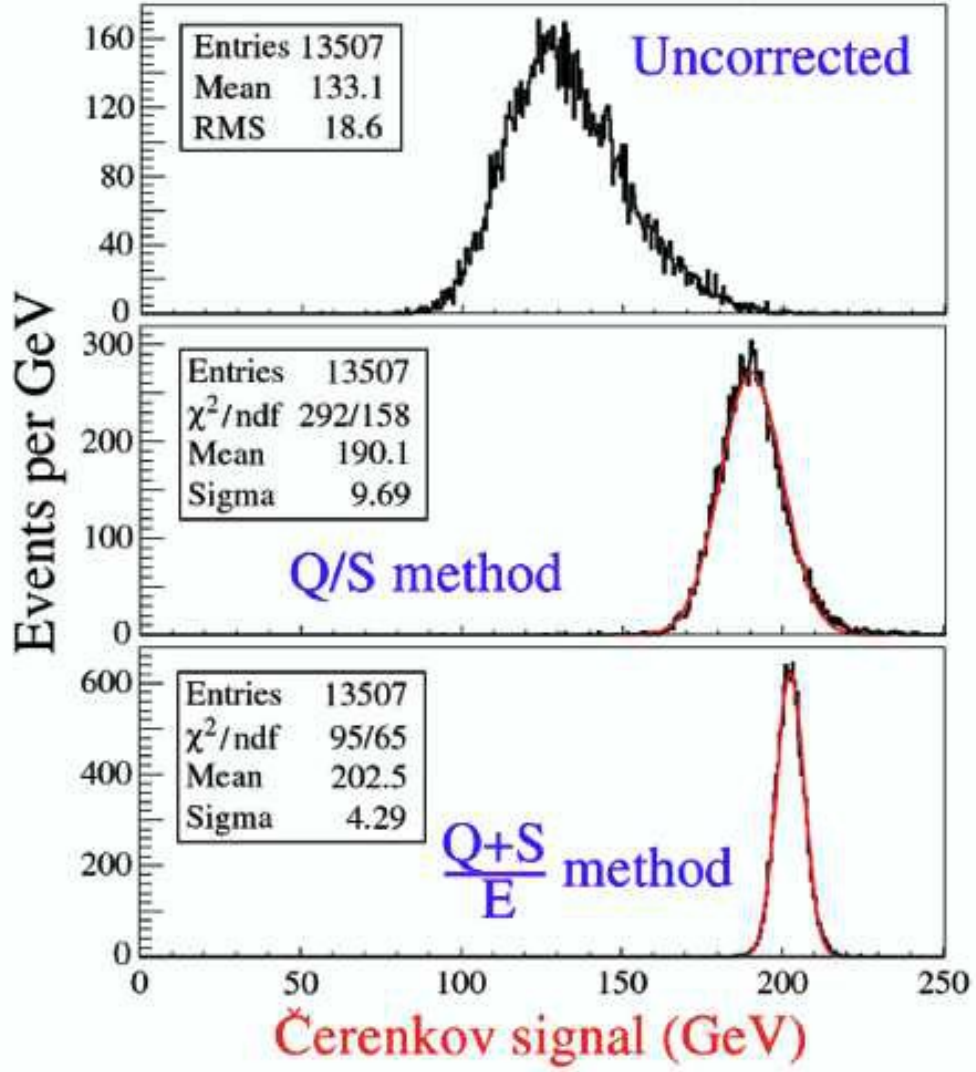
e.g. If  $e/h = 1.3$  (S),  $4.7$  (Q)

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

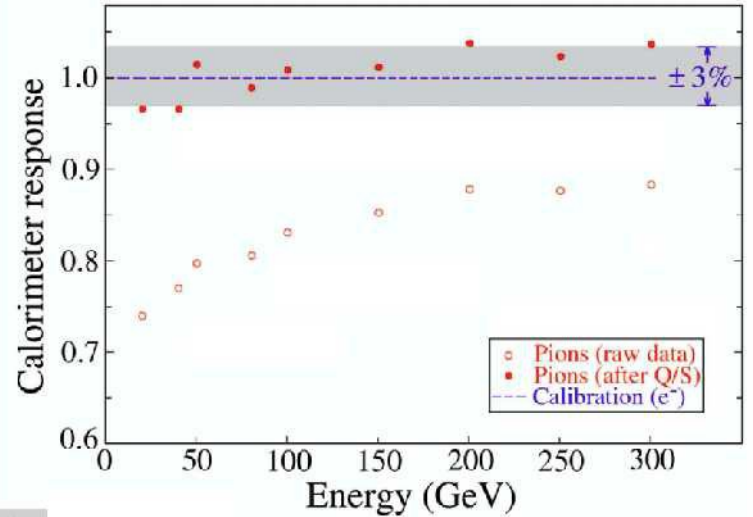
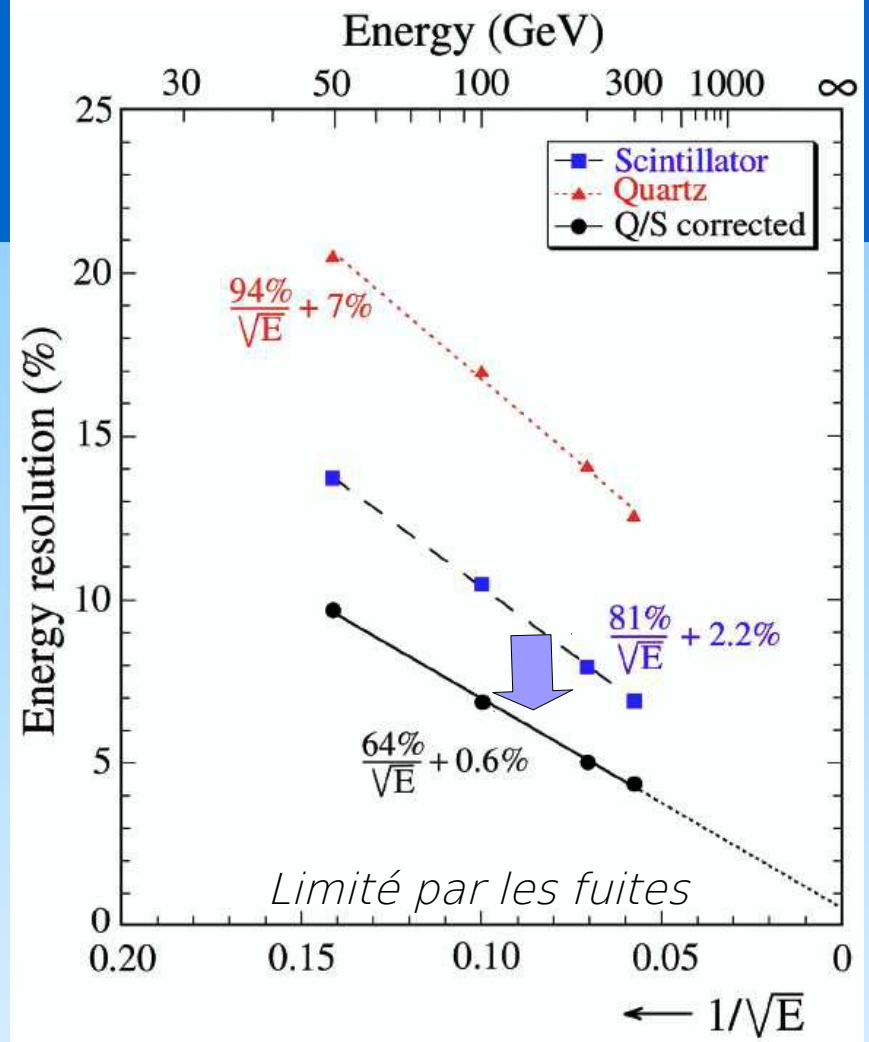
$$E = \frac{S - \chi Q}{1 - \chi}$$

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





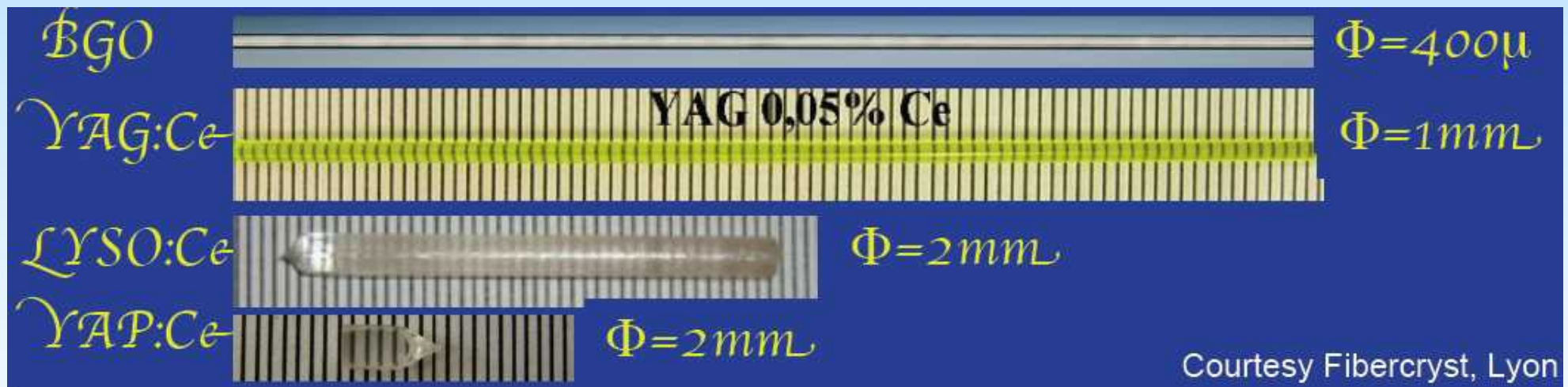
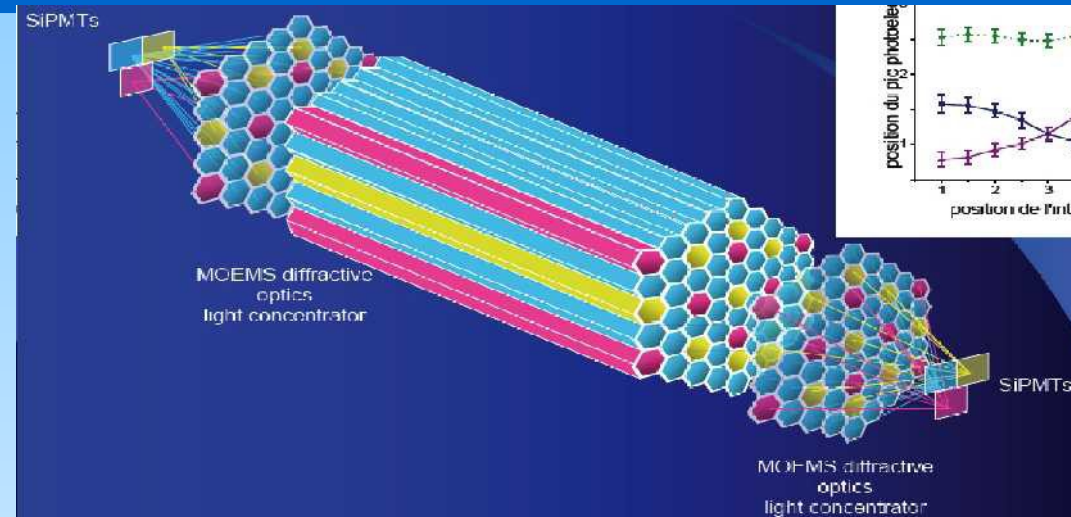
Comportement Gaussien





# 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

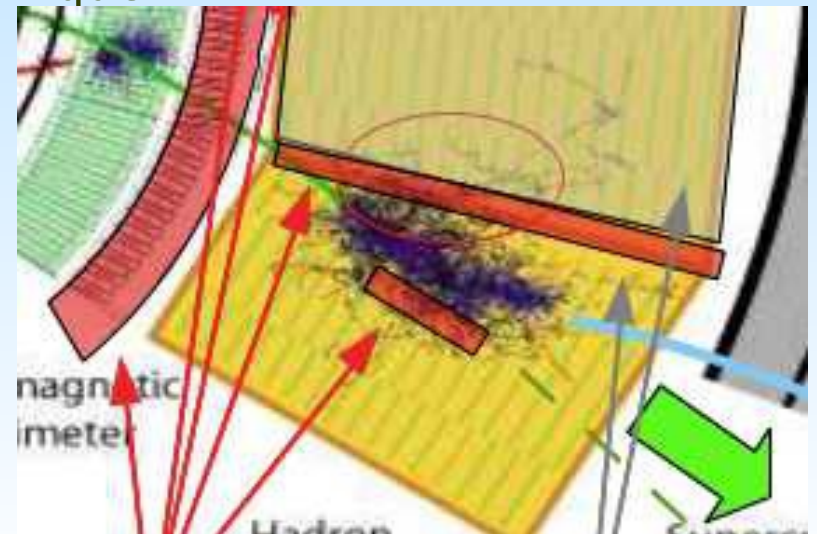


# **Amélioration Algorithmiques (avec la granularité)**



# Agrégation («Clustering»)

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

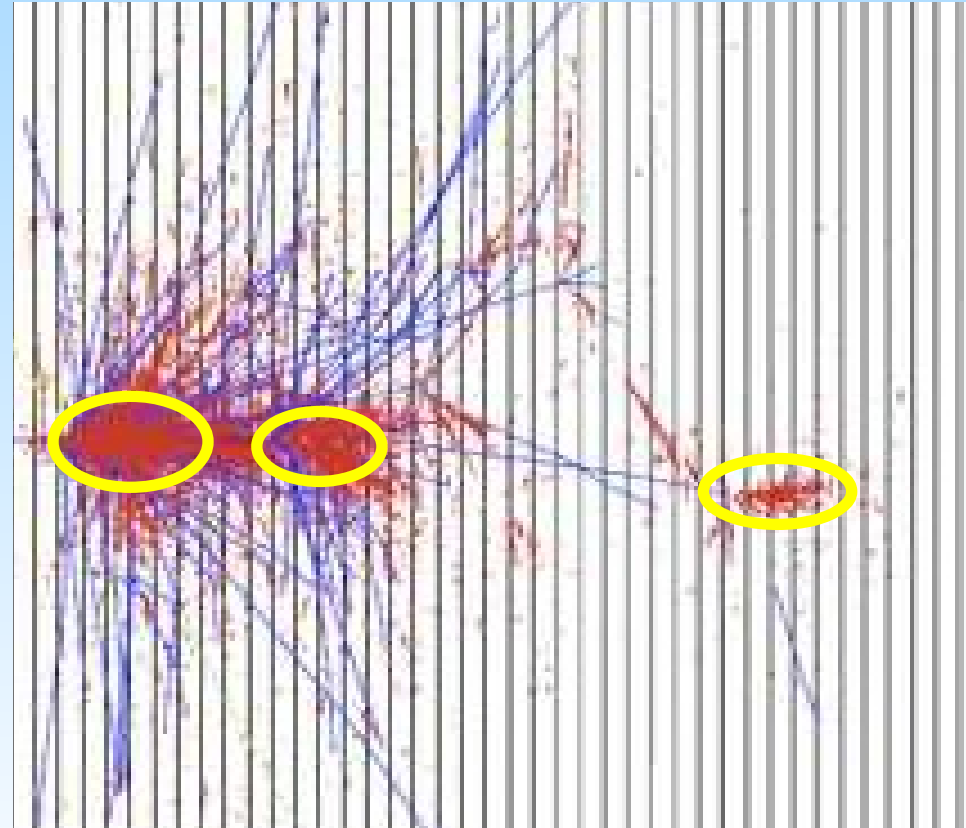


# Compensation par pondération (« weighting »)

- Optimisations du signal : forme & taille
  - ▶ Dans le ECAL : e &  $\gamma$  vs  $\pi$ '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

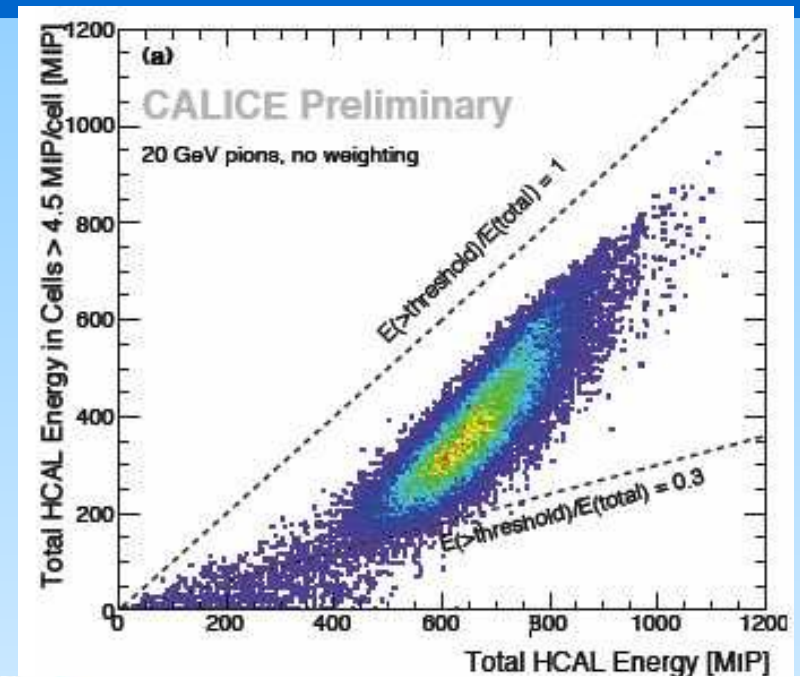
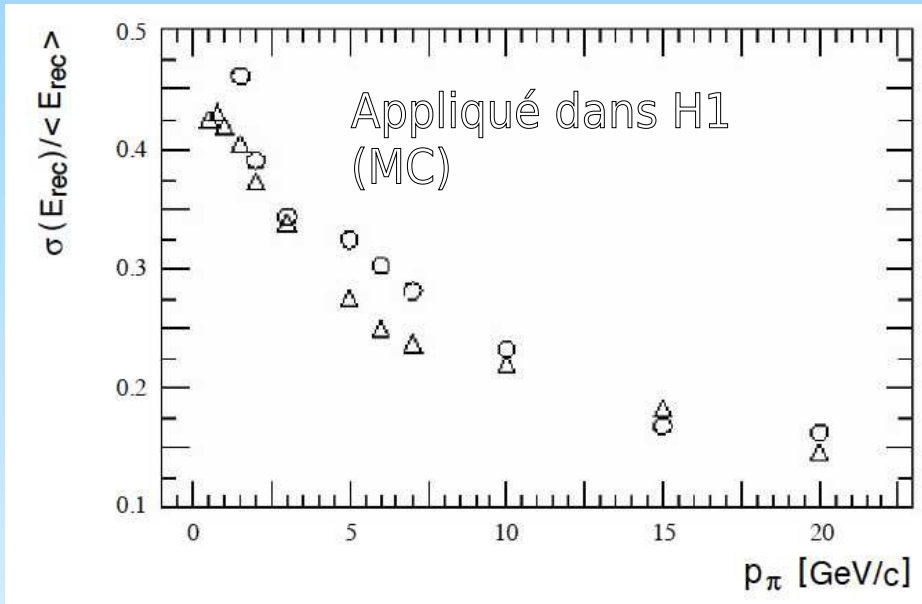
$$\rho_i = \frac{E_i}{\text{Vol}_i}$$

- ▶ Haut  $\rho_i = \text{EM}$  ; bas  $\rho_i = \text{HAD}$ 
  - ◆ *Ajustement des poids par le MC*

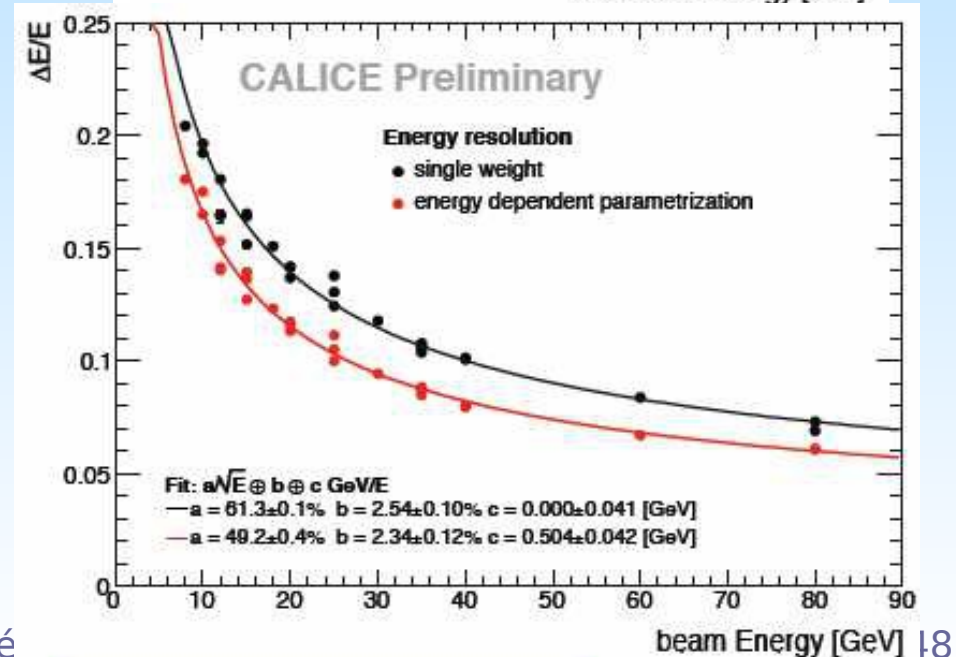


# Compensation par pondération (« weighting »)

AHCAL ( $3 \times 3 \text{ cm}^2 \times 48 \text{ couches}$ )



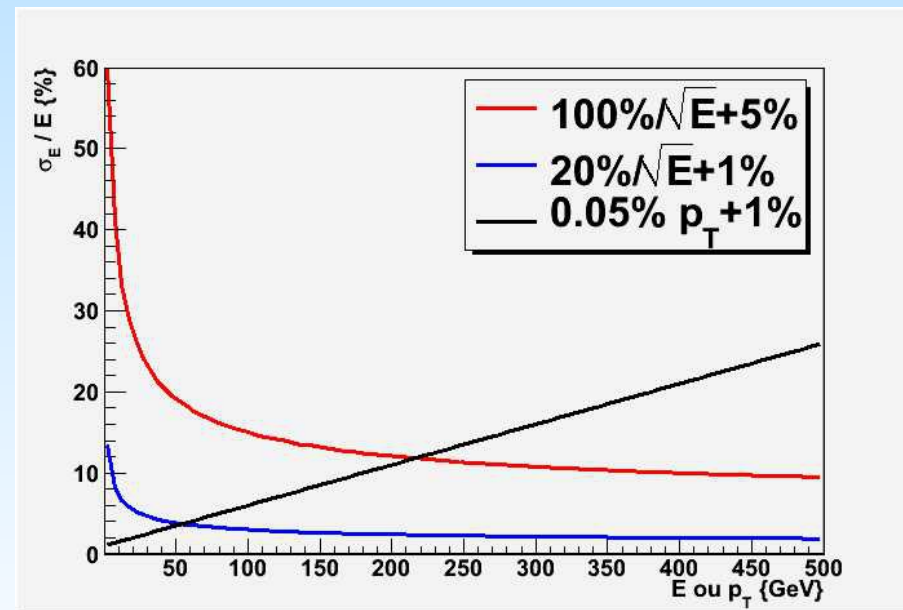
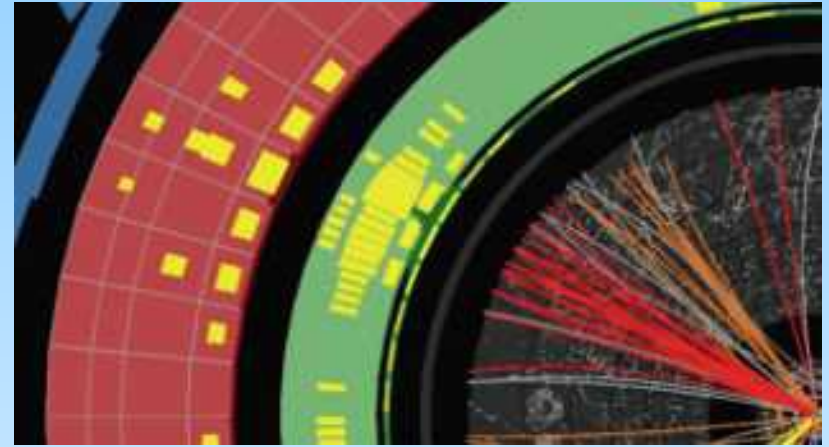
Amélioration de la résolution  
& de la linéarité



# **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),  $\tau$ 
  - ▶ Mesure pour des jets :

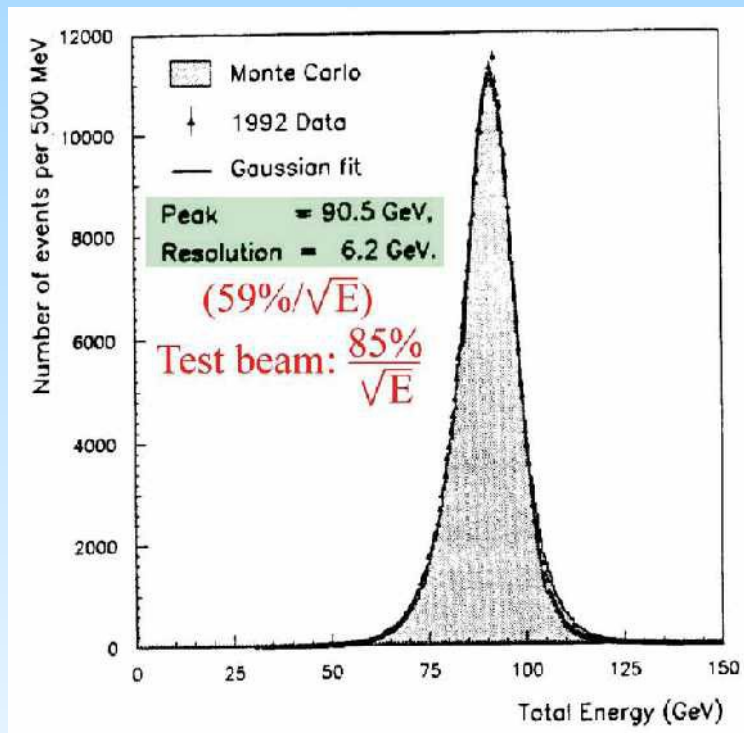




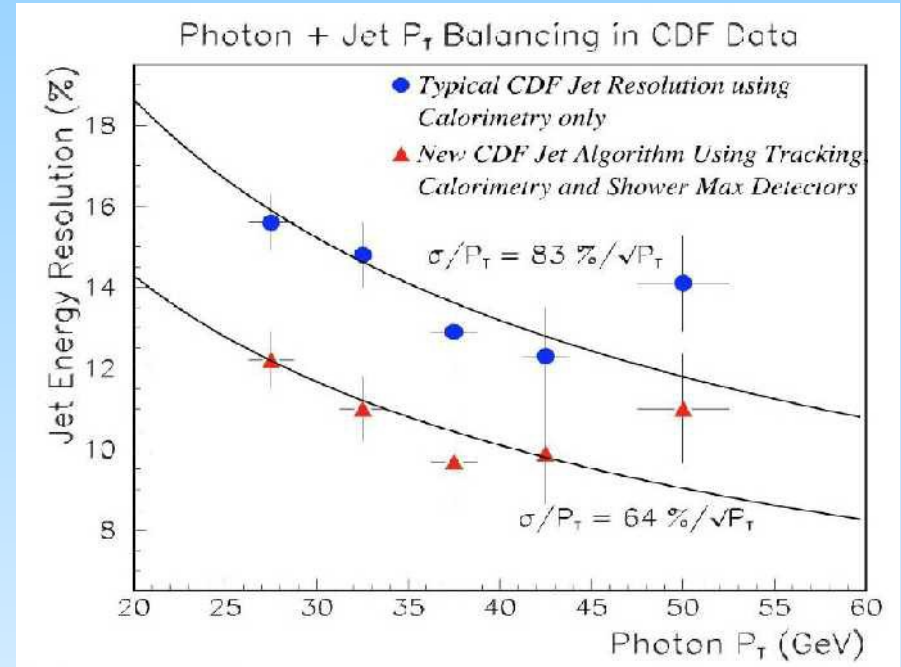
# Particle Flow Analysis : «Energy flow»

## PFA au LEP : ALEPH

Utilisation de particle ID +  
SW compensation



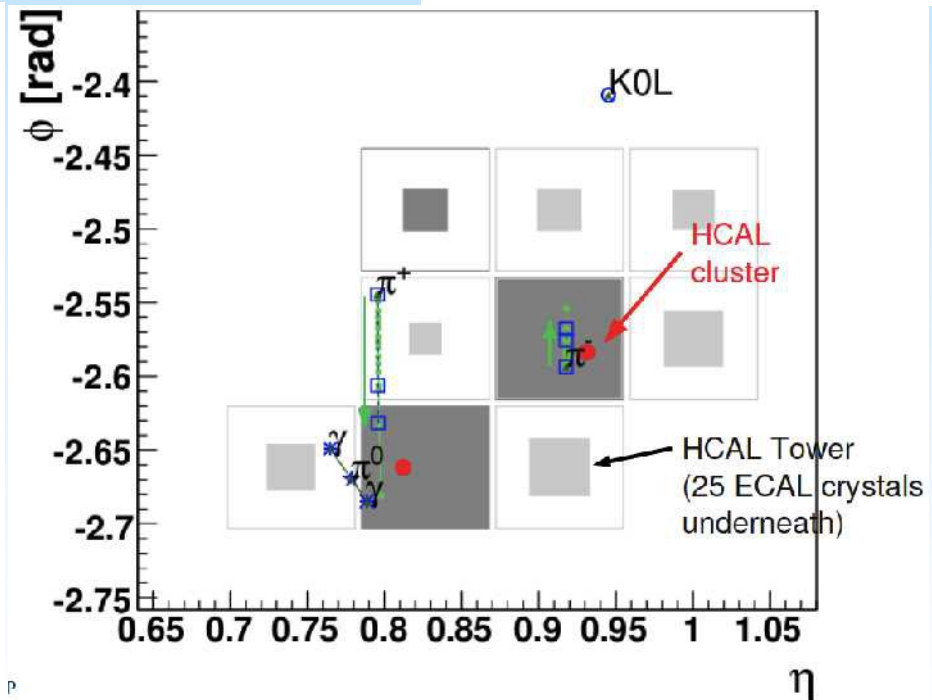
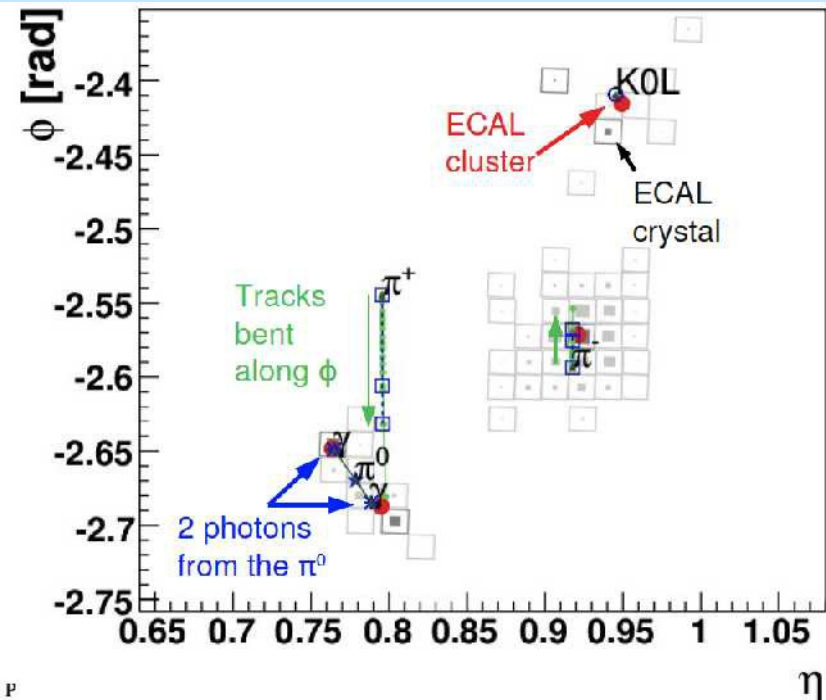
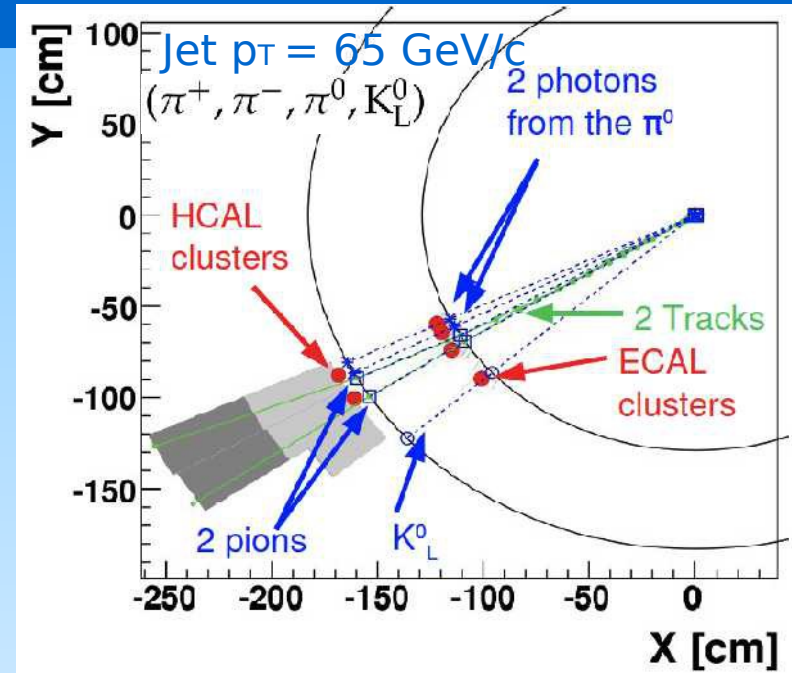
## PFA au Tevatron : CDF



H1 Hadronic flow.

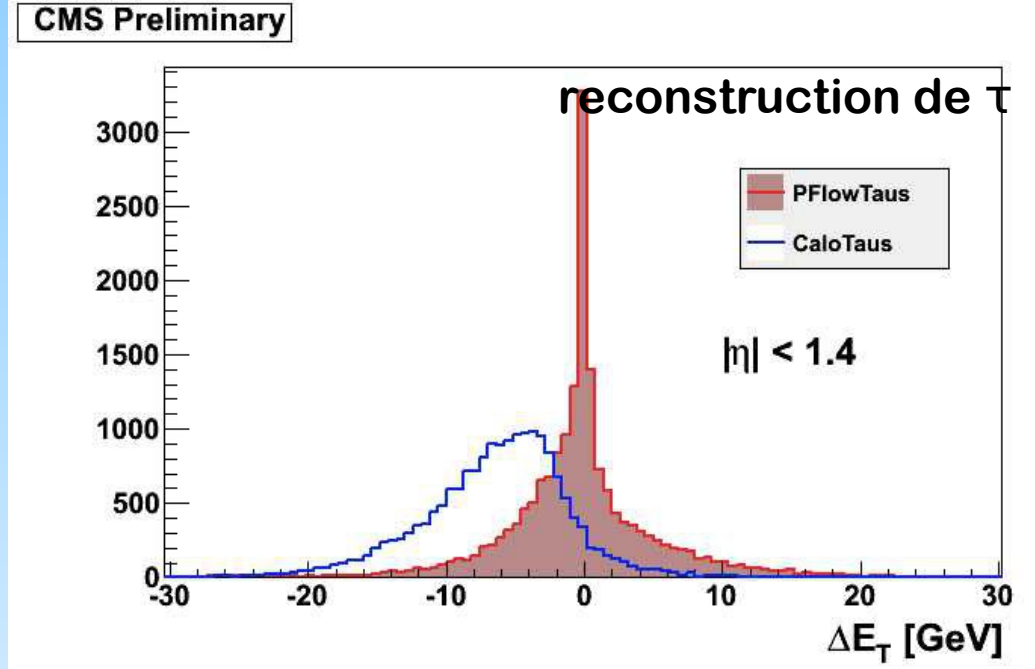
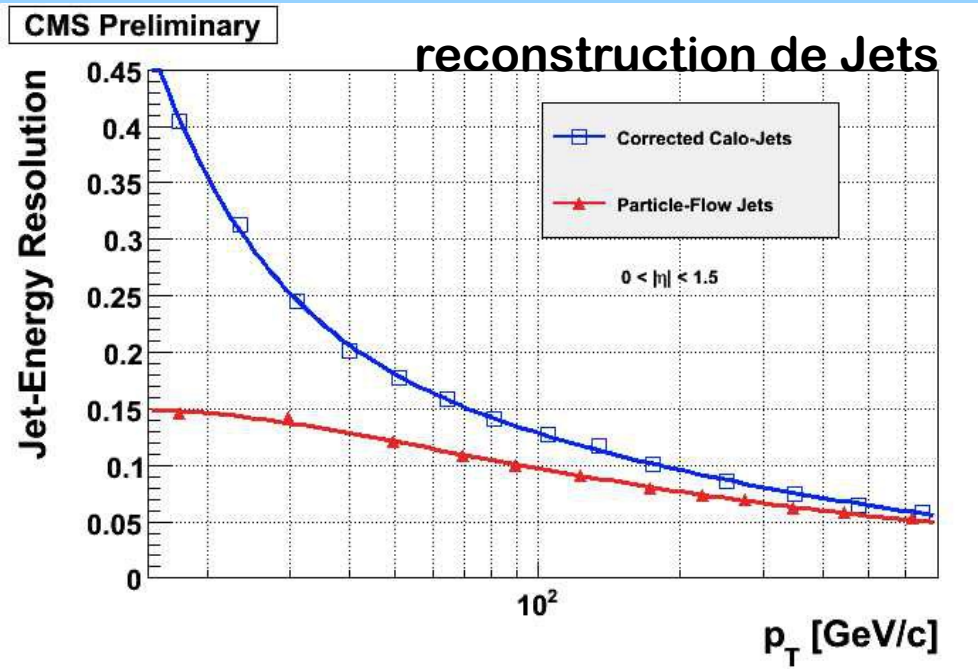
# Le «particle Flow» de CMS

- 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

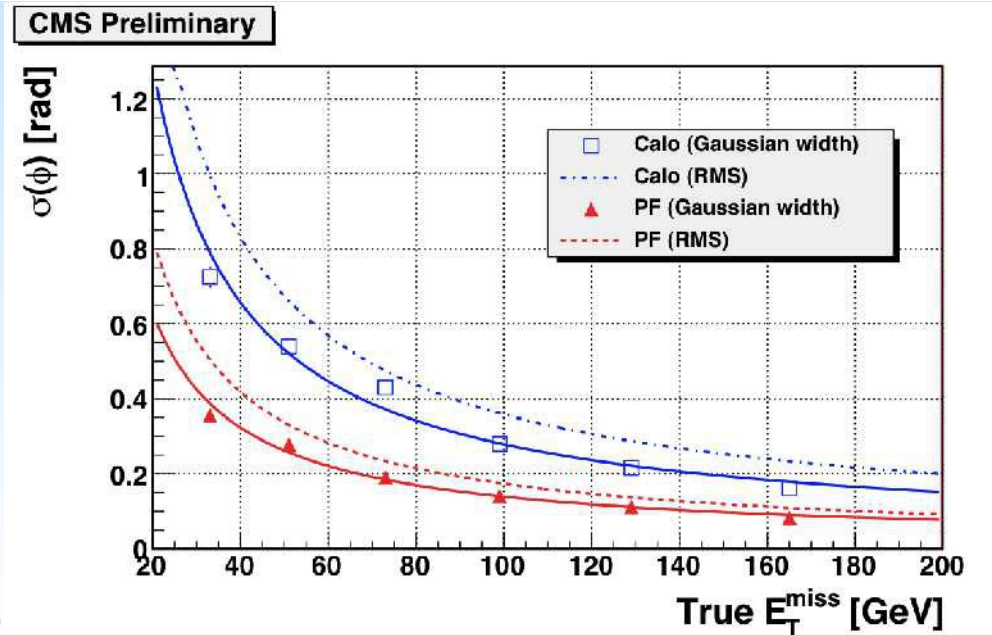
# CMS particle flow



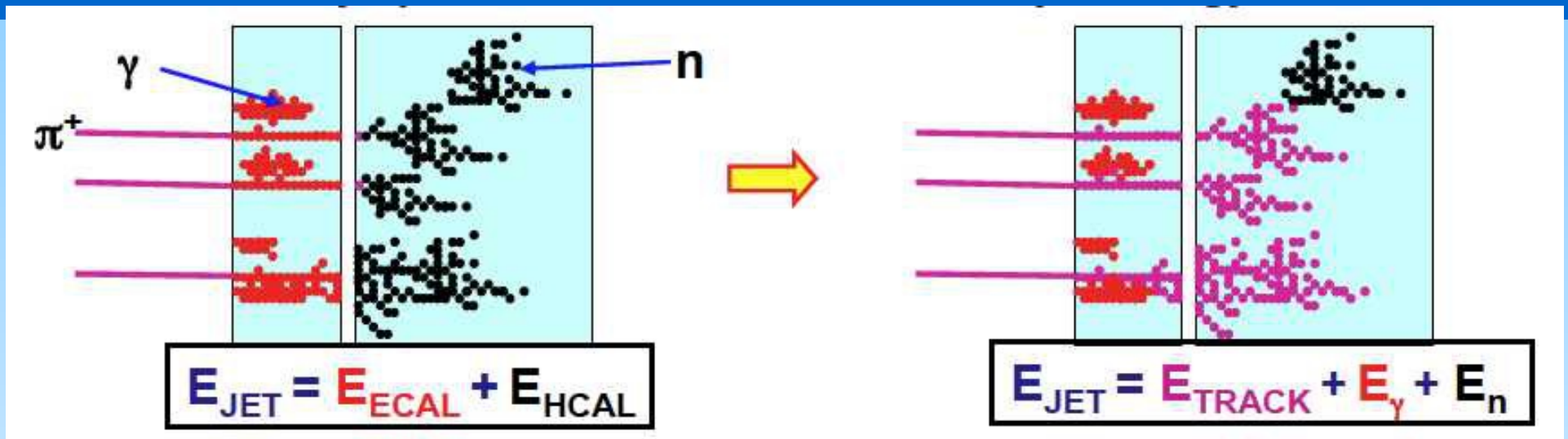
- Reconstruction d'énergie manquante
  - recherche «exotique»

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

- Gain d'un facteur ~2   
 Signal → Gaussien



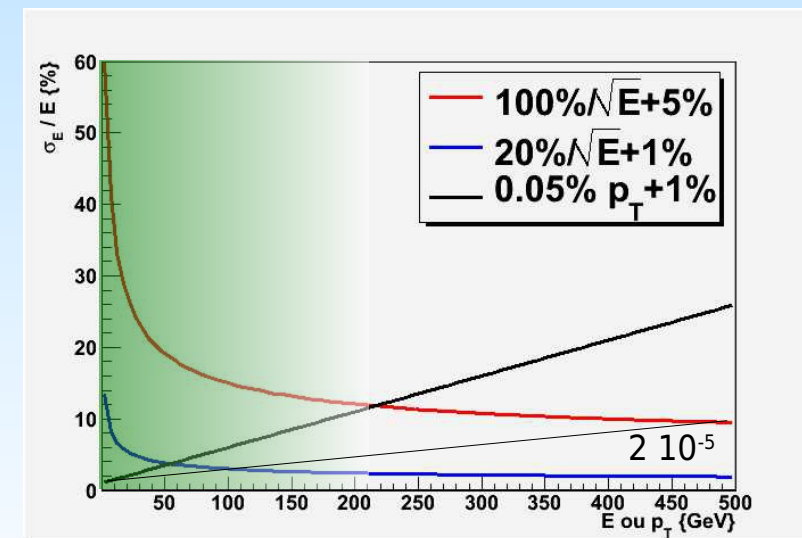
# Un particle flow pour le LC : PFA



M. Thompson

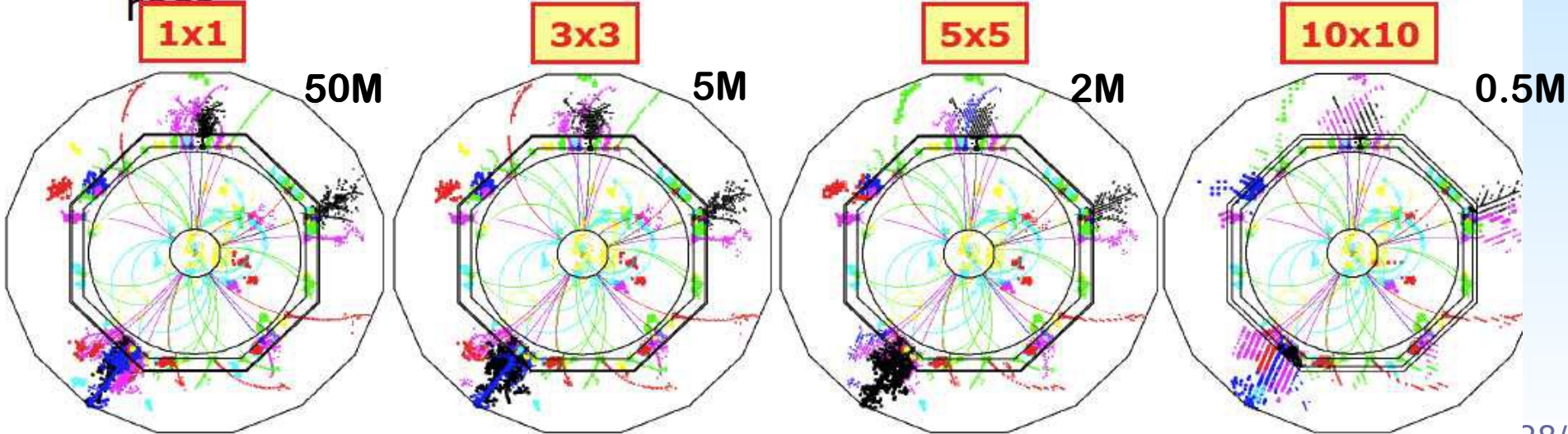
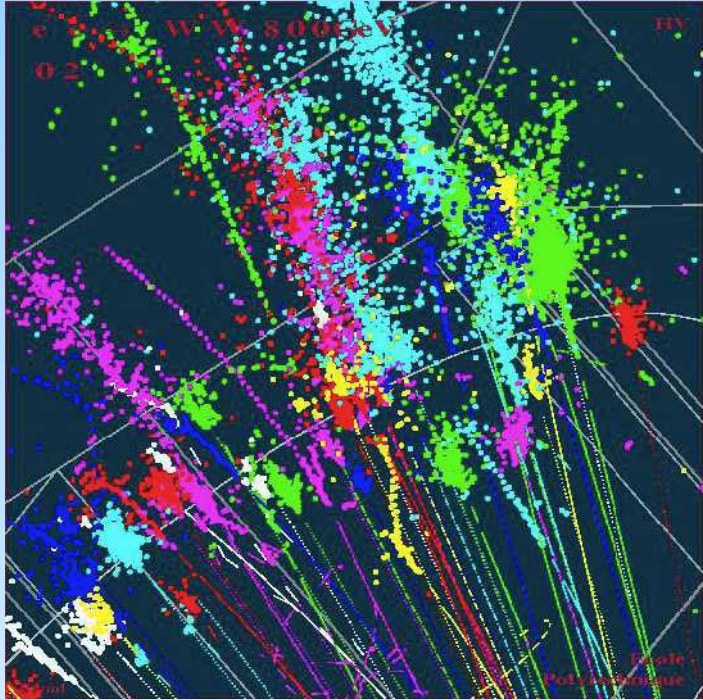
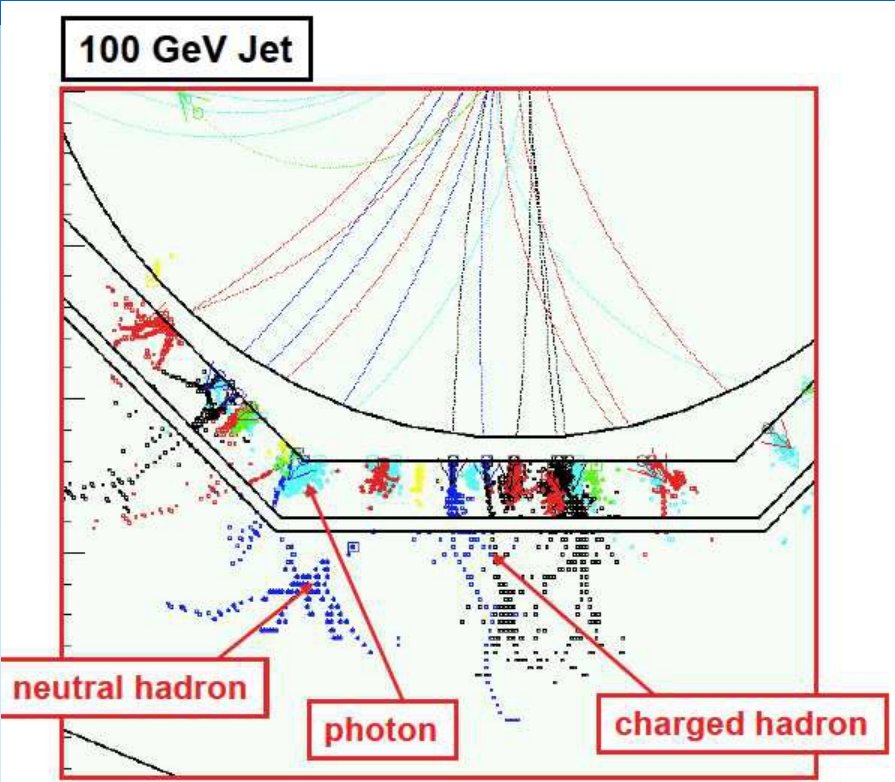
- Nouveau paradigme (Particle Flow Analysis)
  - ▶ 60% de chargés : mesure dans le tracker
  - ▶ 30% de «petits»  $\gamma$  : dans le ECAL avec  $20\%/ \sqrt{E}$
  - ▶ 10% de hadron neutres ( $n, K_L^0$ ) dans le HCAL

⇒ Bien meilleure résolution !!
- Besoin d'une excellente granularité
- Logiciel sophistiqué





# Une question de granularité

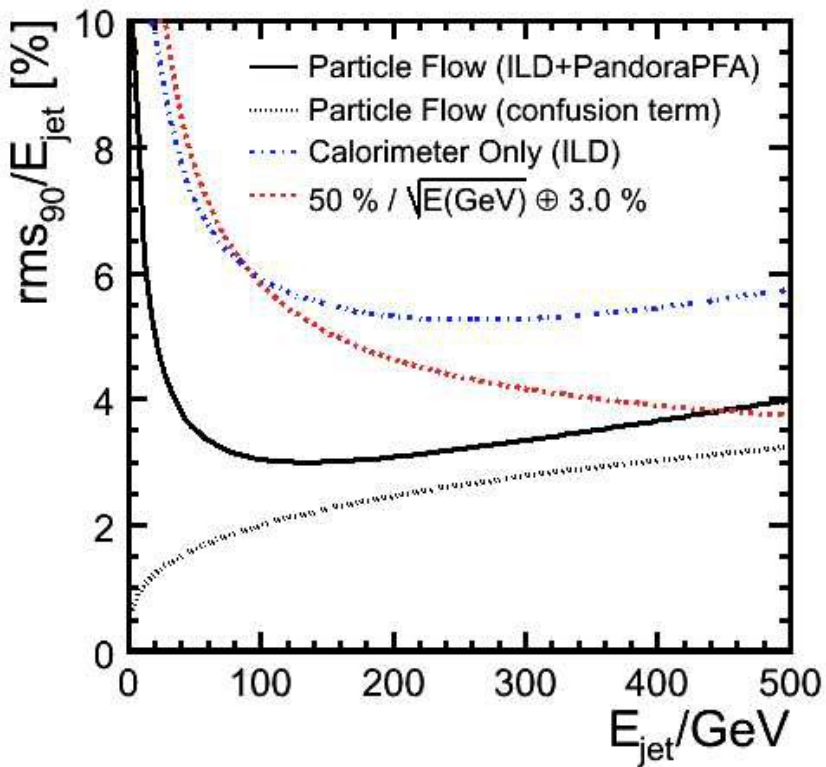
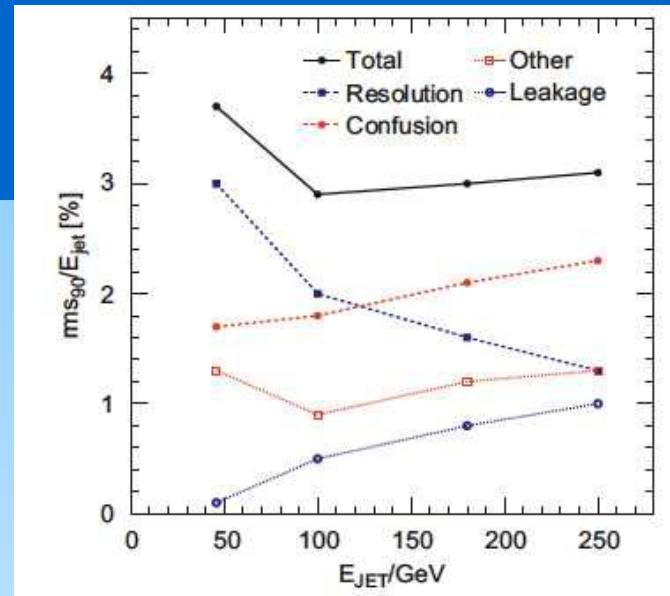




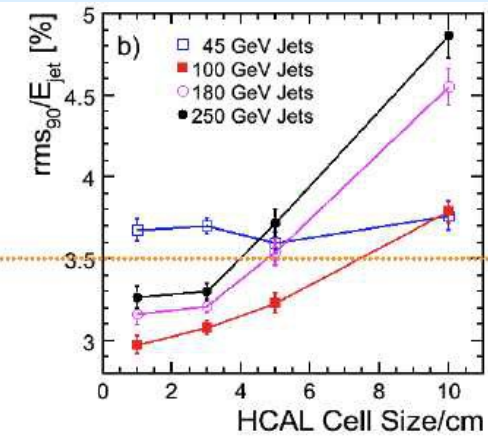
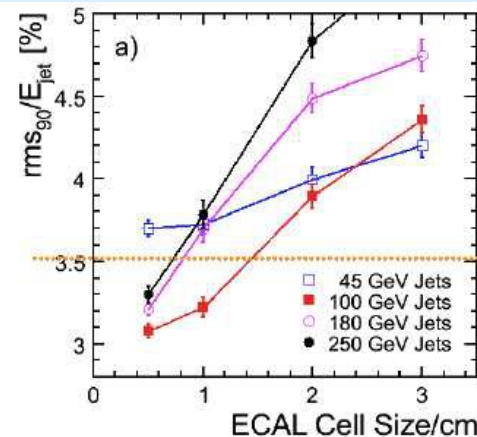
# Performances du PFA (pour les jets)

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

Resolution   
 Tracking   
 Leakage   
 Confusion



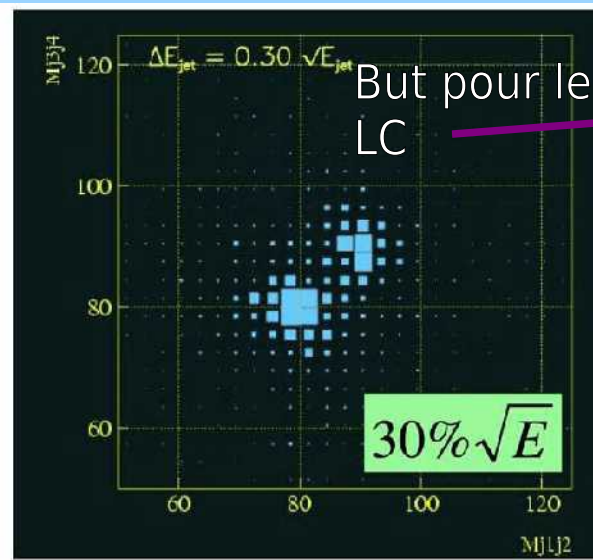
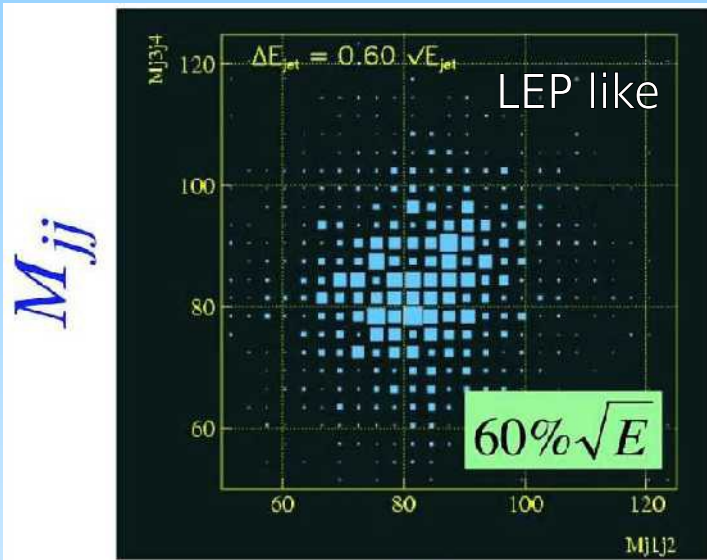
- Le Particle Flow Analysis améliore toujours
  - ▶ ~Facteur 2 vs calo seul
- La résolution du HCAL, la granularité et les fuites jouent un rôle.



ILC Goal

# **La calorimétrie à haute granularité**

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



Collisionneur e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>  
(FLC, JLC, TESLA)  
ILC : 0.5 – 1 TeV  
CLIC : 1 – 3 TeV

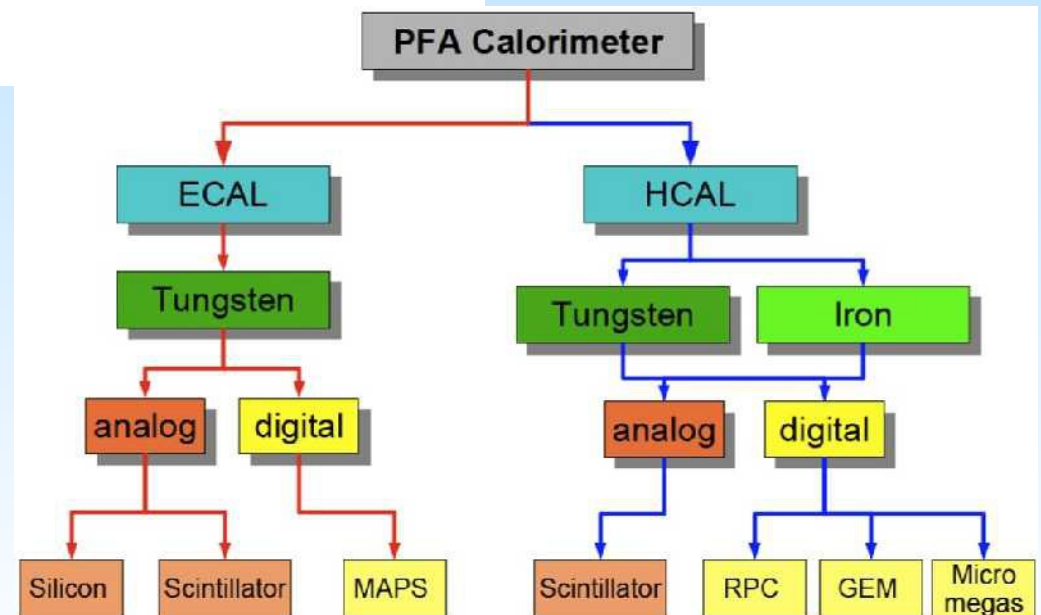
$M_{jj}$

Collaboration CALICE

- mostly ILD, SiD
- ILC, CLIC

Test de prototype

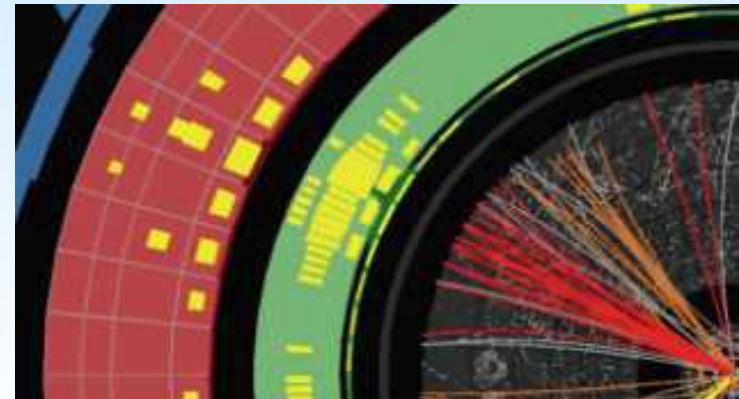
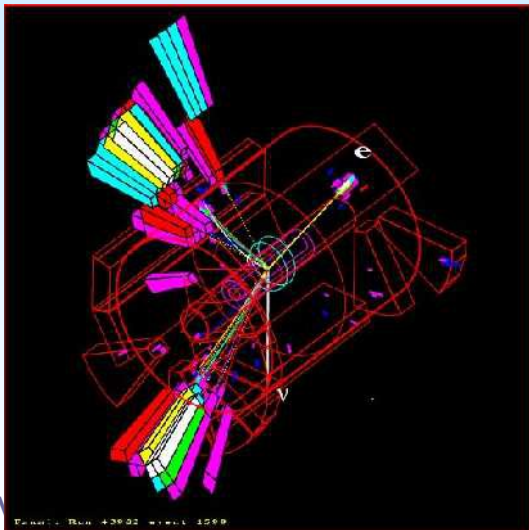
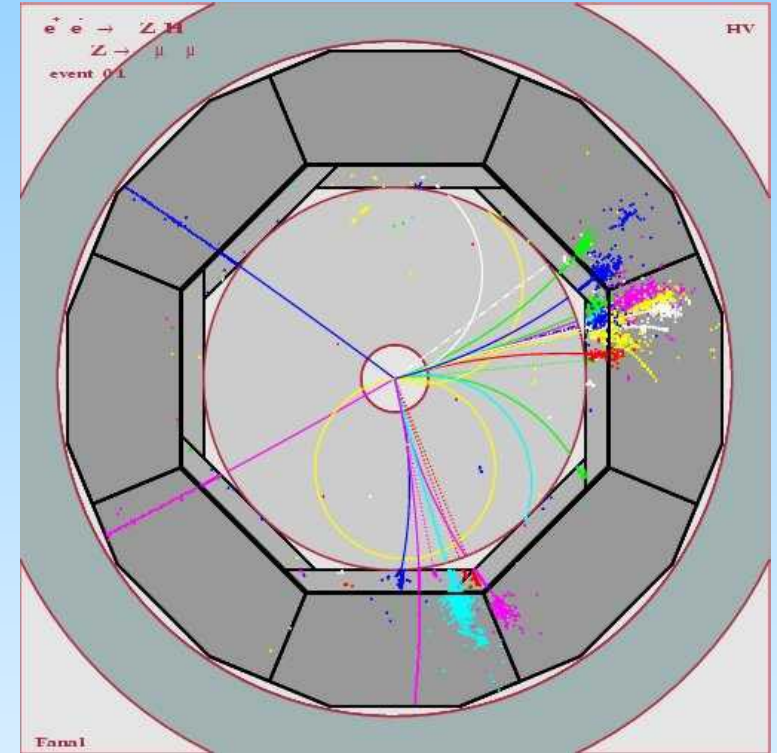
- Physiques
- technologiques
- Analogique & digital



# Augmentation de la granularité

F. Decamps (ATLAS & CMS : chiffres L0L)

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

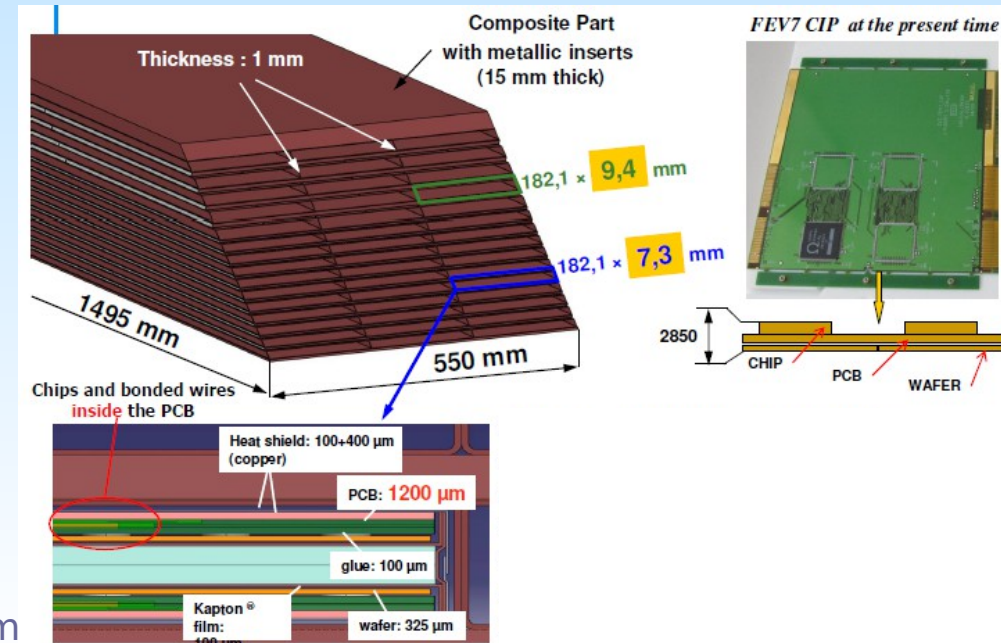
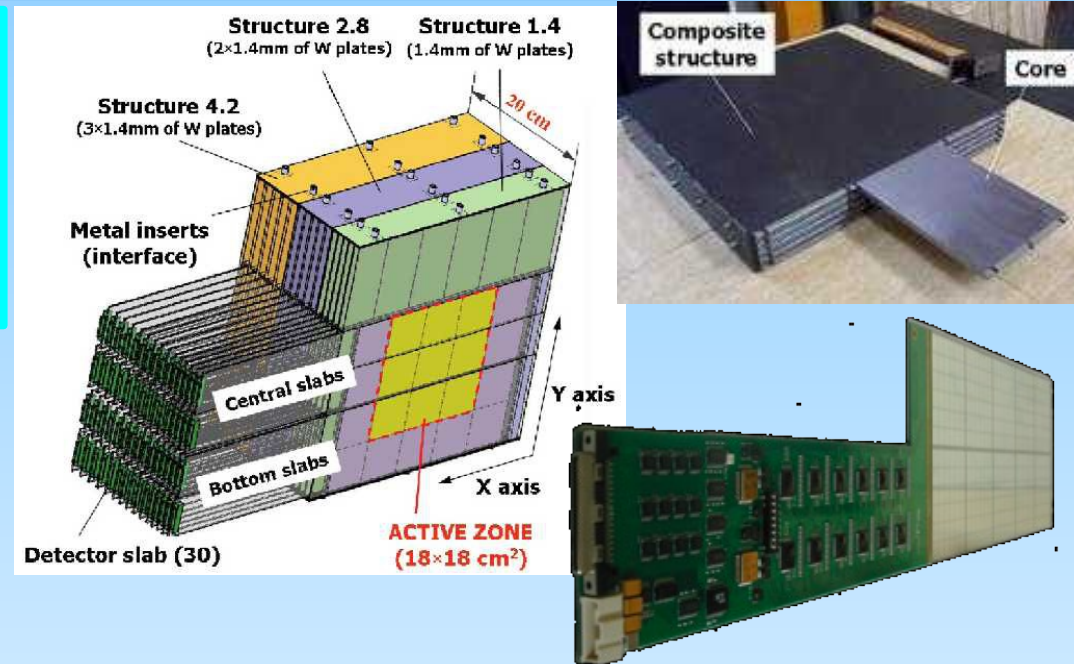
De nombreux jets de particules serrées → forte densité du calorimètre → radiateur dense **W**, détecteur compact **Si**

Motif

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

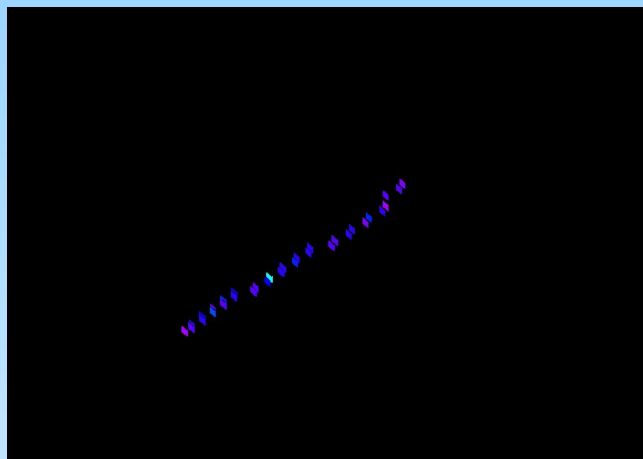
Le calorimètre est mince:  $24X_0$  pour ~20 cm en 40 couches  
Les gerbes sont étroites  $R_M \sim 1\text{cm}$   
On peut intégrer beaucoup de canaux de lecture, 100M  
extrême granularité :  $5 \times 5 \text{ mm}^2$

Très bonne efficacité de reconstruction des photons dans un environnement chargé

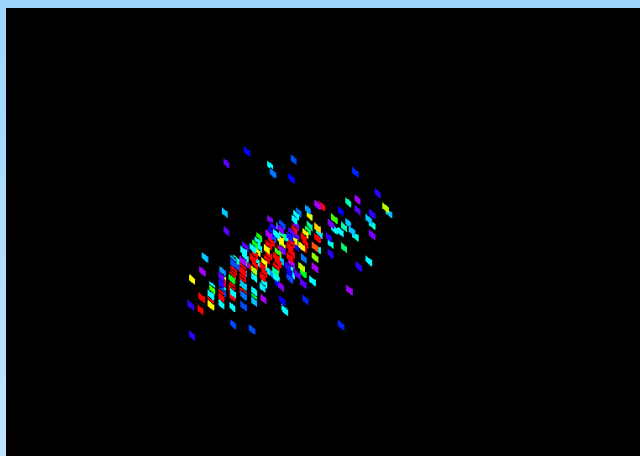




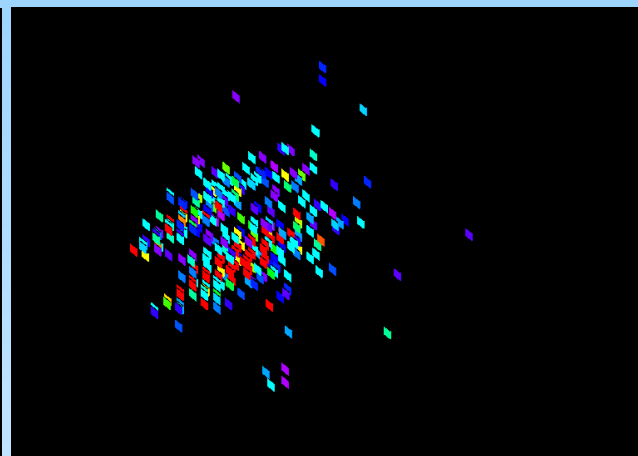
# Quelques événements (test en faisceau) dans le Si-W CALICE



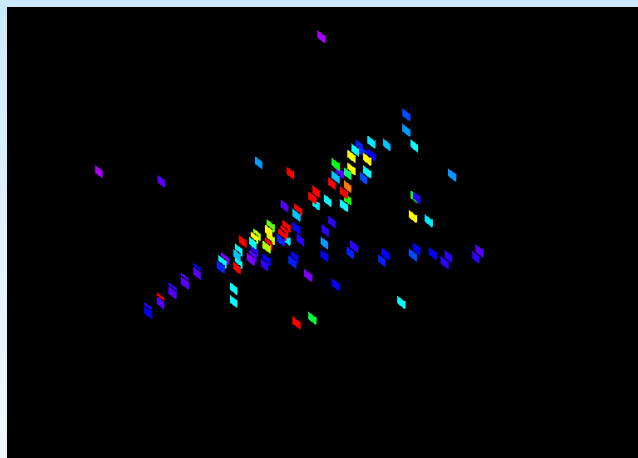
Un  $\mu$  ou un  $\pi$



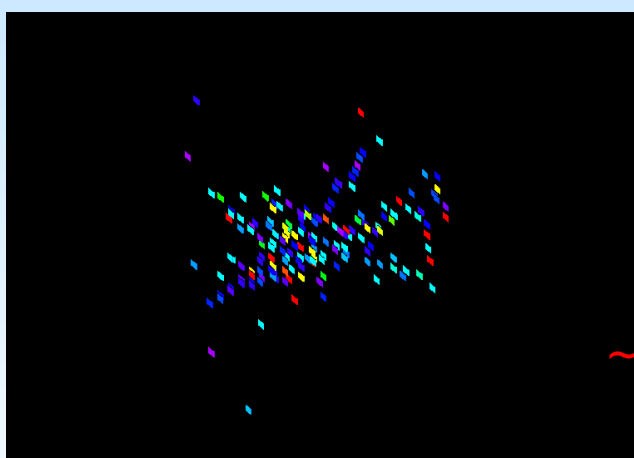
Un  $e^-$  ou un  $\gamma$



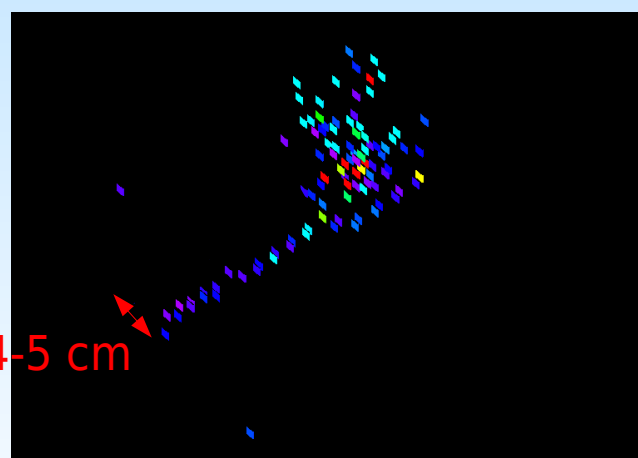
2  $e^-$



Un hadron ( $\pi$ )



Un hadron  
(avec composante EM)



hadron chargé  
& h. chargé ou  $\mu$

# SiW ECAL : Pamela

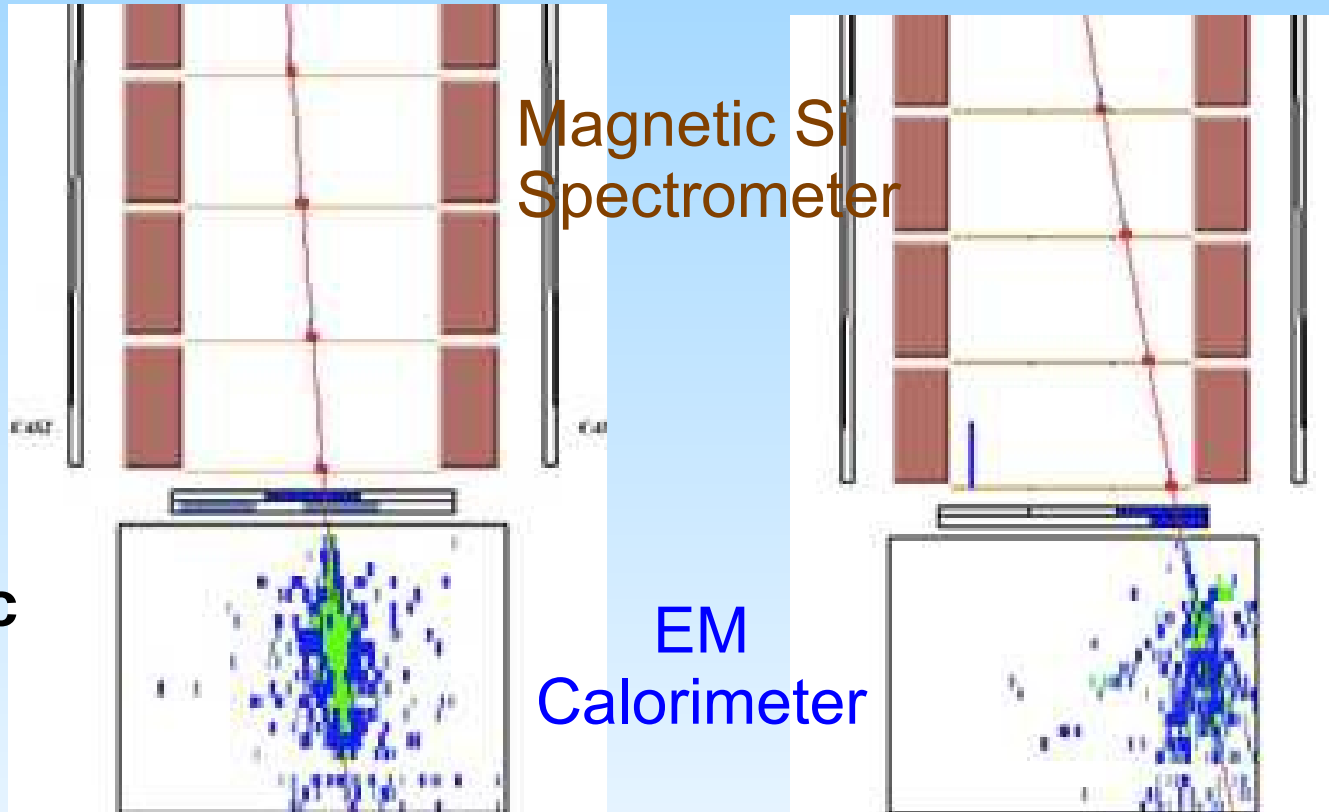
Satellite mesure de Matière noire

Magnetic Si  
Spectrometer

EM  
Calorimeter

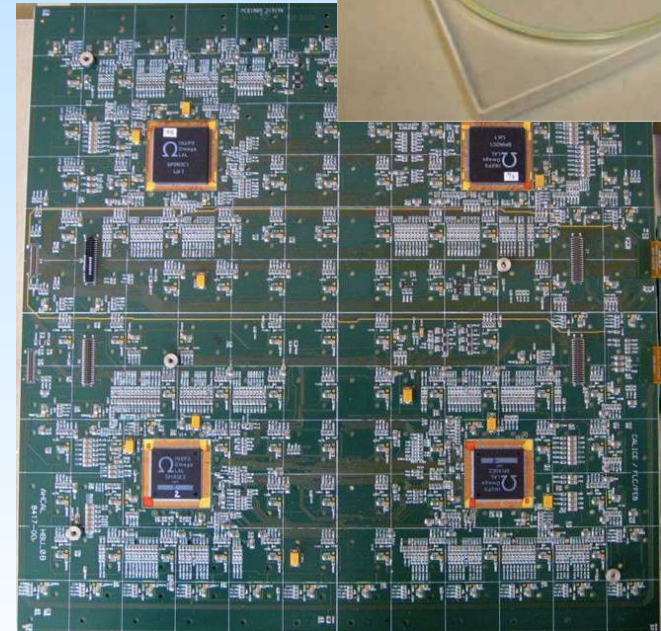
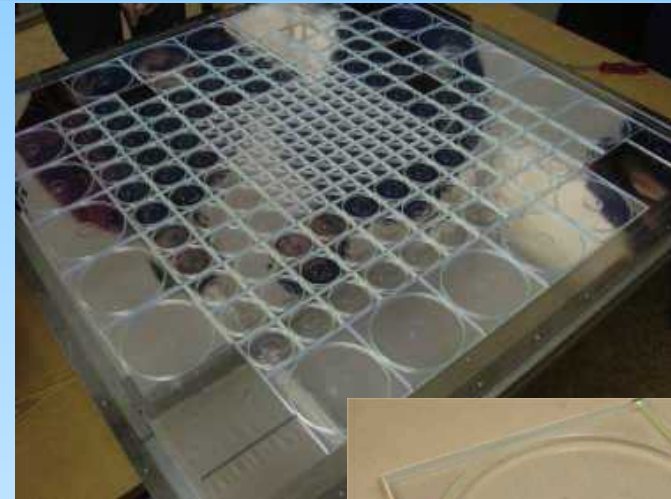
**18 GeV/c  
electron**

**36 GeV/c  
proton**



# AHCAL & SDHCAL : Fe-Scint & Fe-RPC

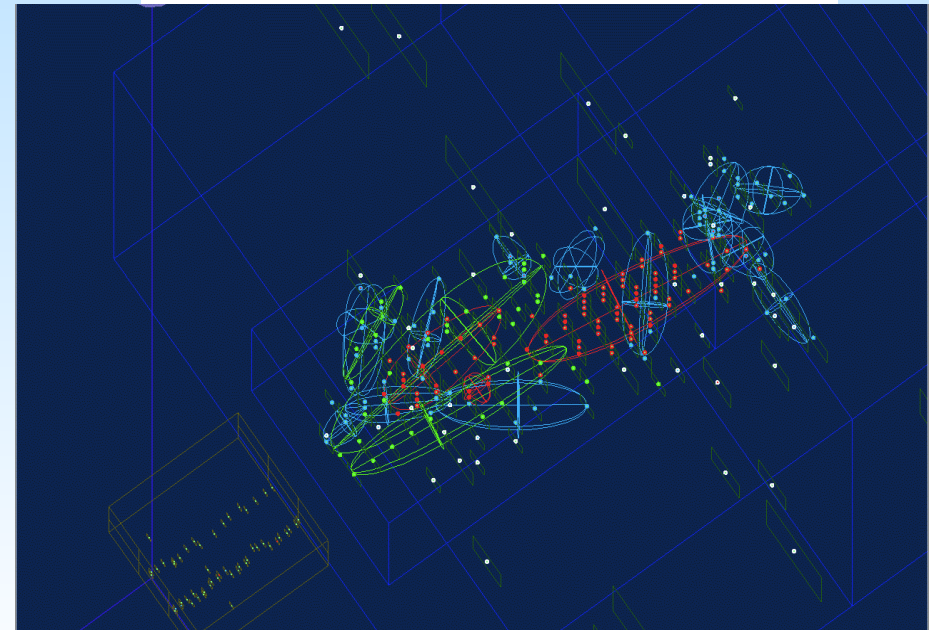
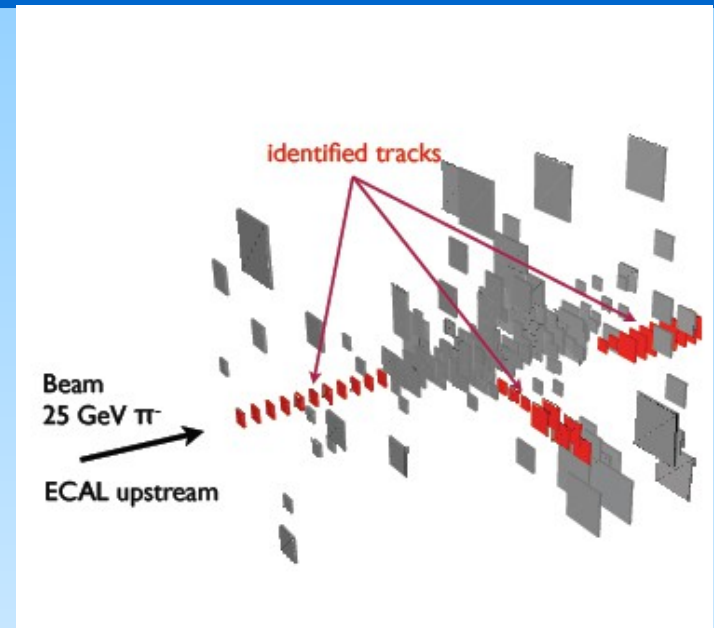
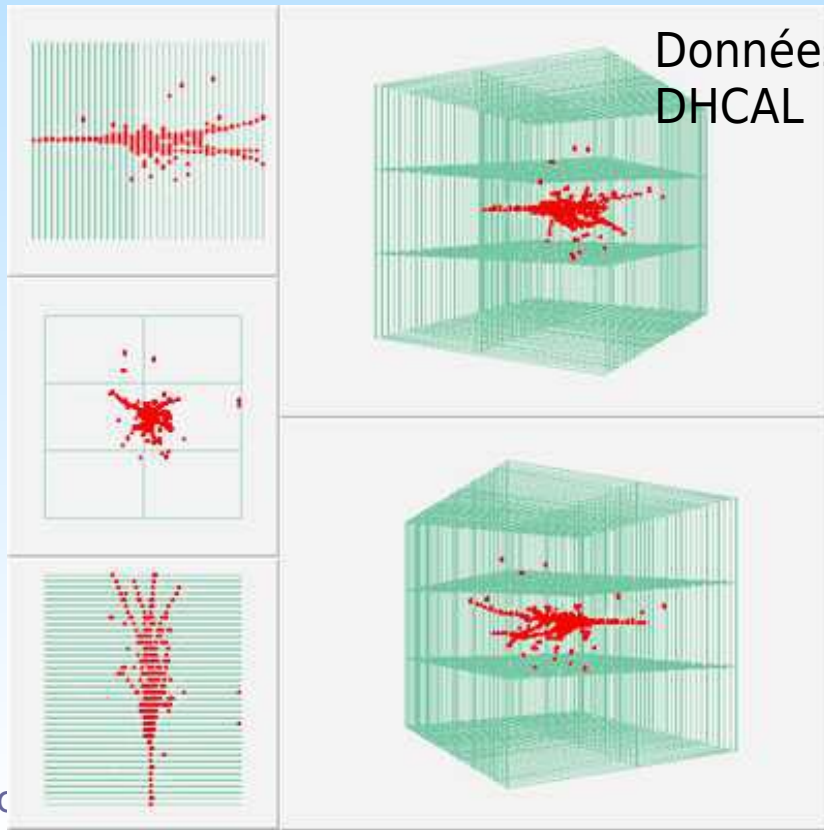
- 38 couches 2 cm acier + tuiles scint de 3mm × 3×3cm<sup>2</sup>
- 48 couche de 2cm acier + RPC 1,2mm × 1×1 cm<sup>2</sup> lecture digitale ou semi-digitale



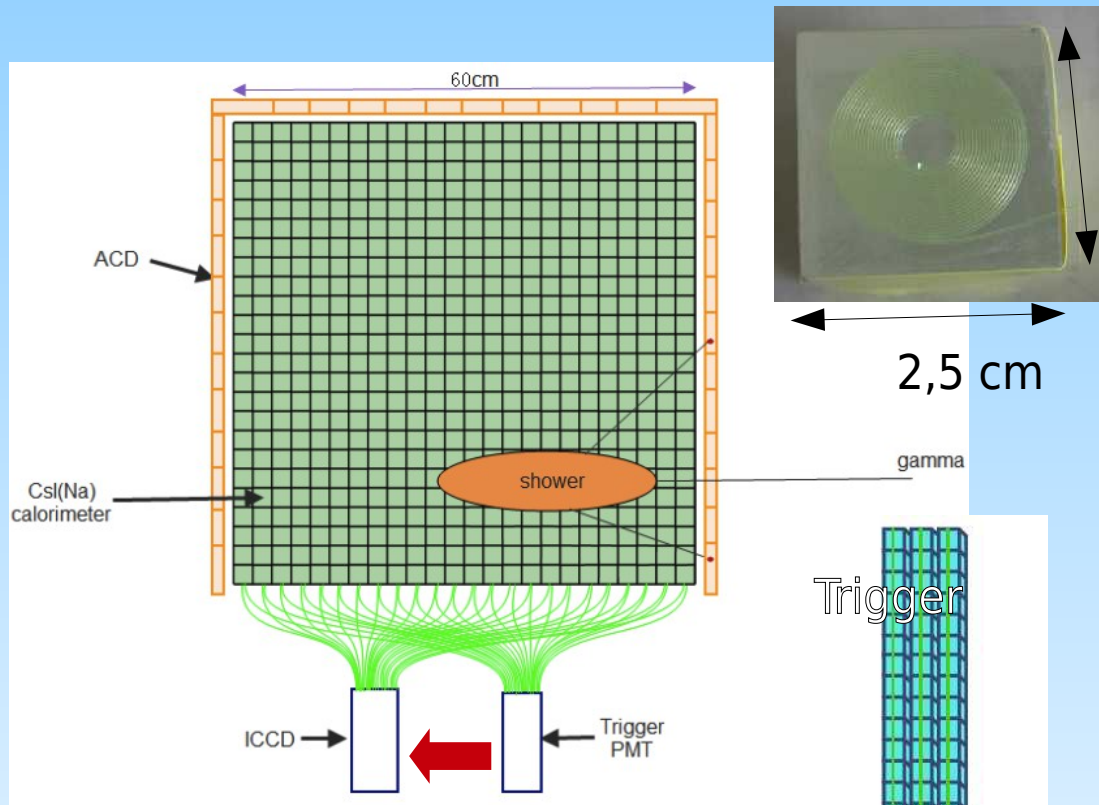


# Tests en faisceau

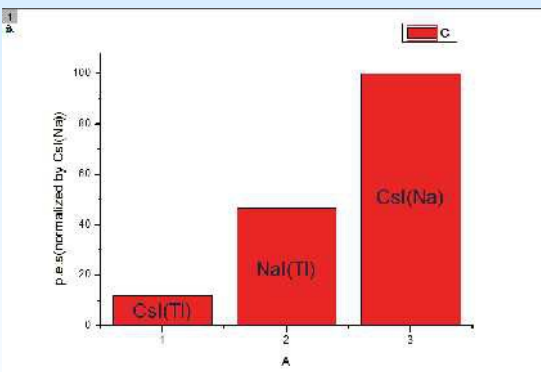
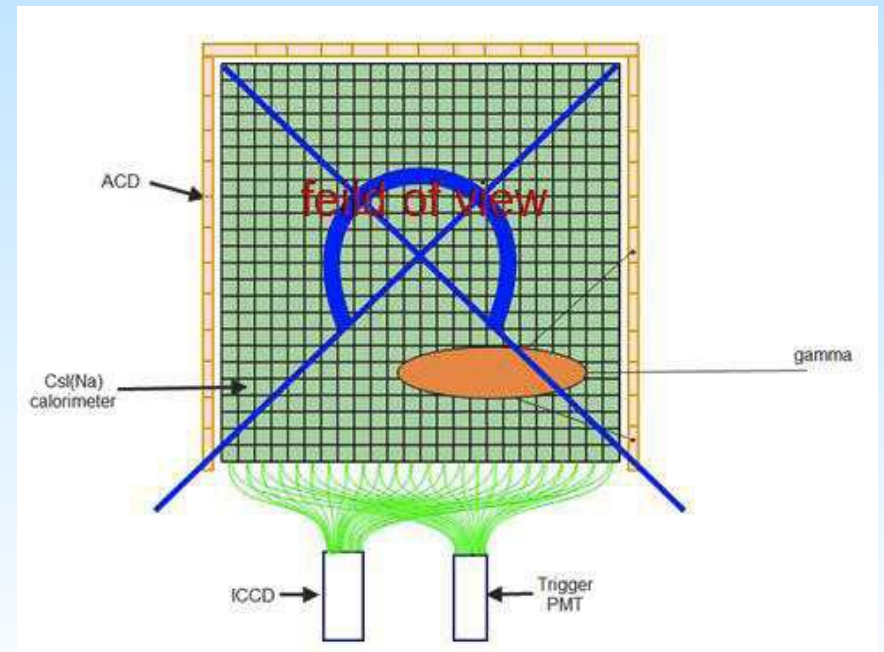
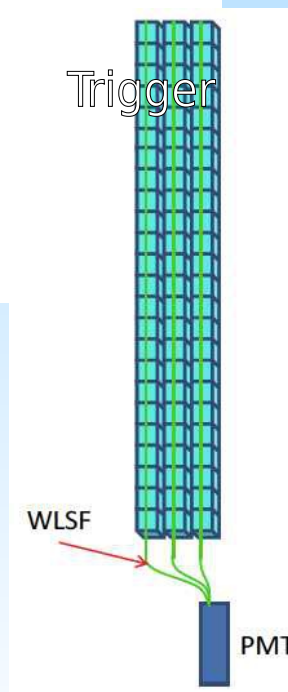
- Validation technologique
  - ▶ électronique enfouie
  - ▶ refroidissement, power-pulsing ...
- test des performances de physique pure
- Amélioration des Monte-Carlo → PFA
- test des algorithmes



# Calorimétrie digitale homogène



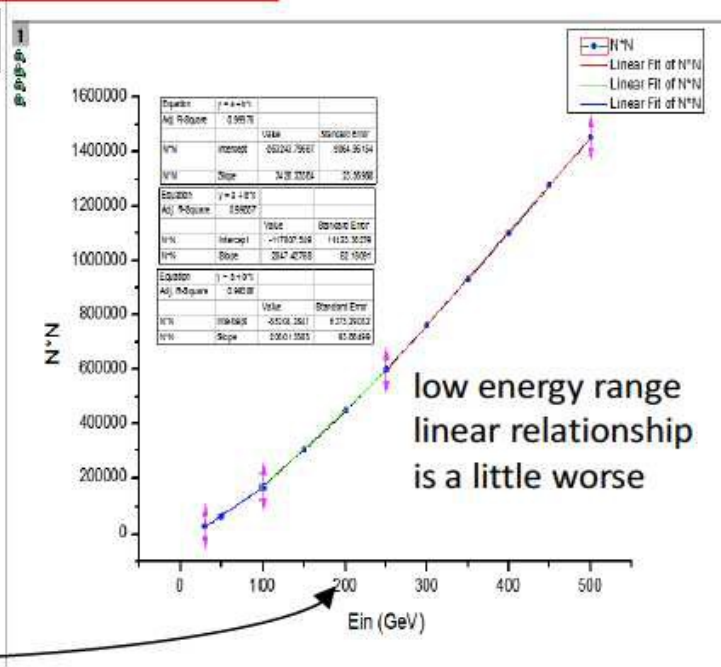
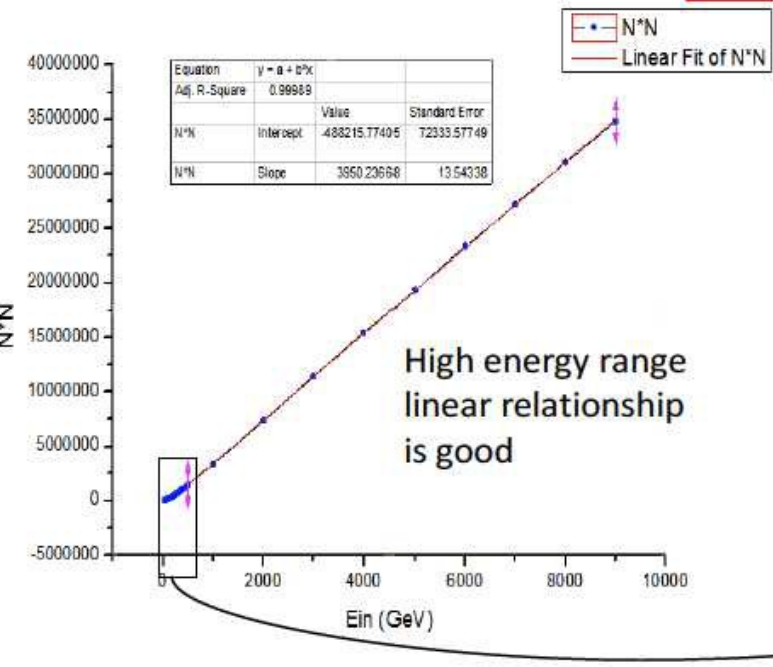
- Proposition IHEP Beijing
- Satellite → Recherche de matière noire (DM)
  - ▶ WIMPs ;  $10 \text{ GeV} < m < 10 \text{ TeV}$
  - ▶ DM+DM → **ee**, **γγ**, ...
- ECAL  $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$ 
  - ▶ recherche de pic





From the MC data we found the relationship is:

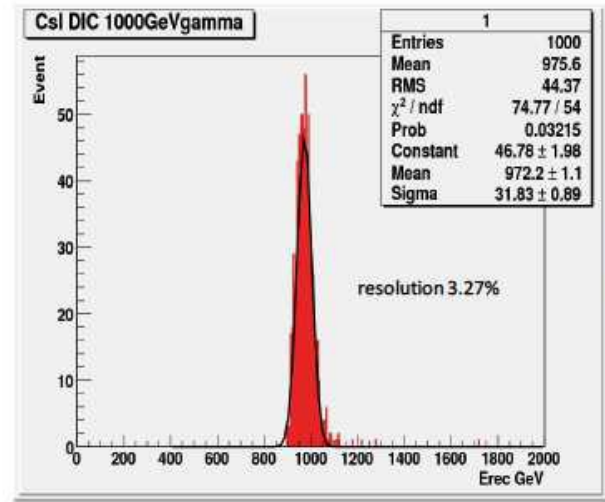
$$N_{hit}^2 \propto E_{incident}$$



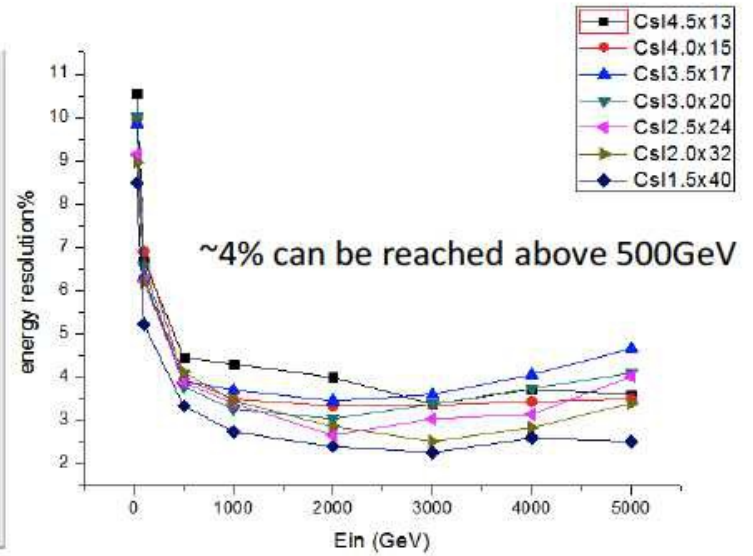
Si la taille des cellules est suffisamment petite

Comptage de cellule  $\equiv$  mesure !!!

Angular resolution  $\sim 0.5^\circ$

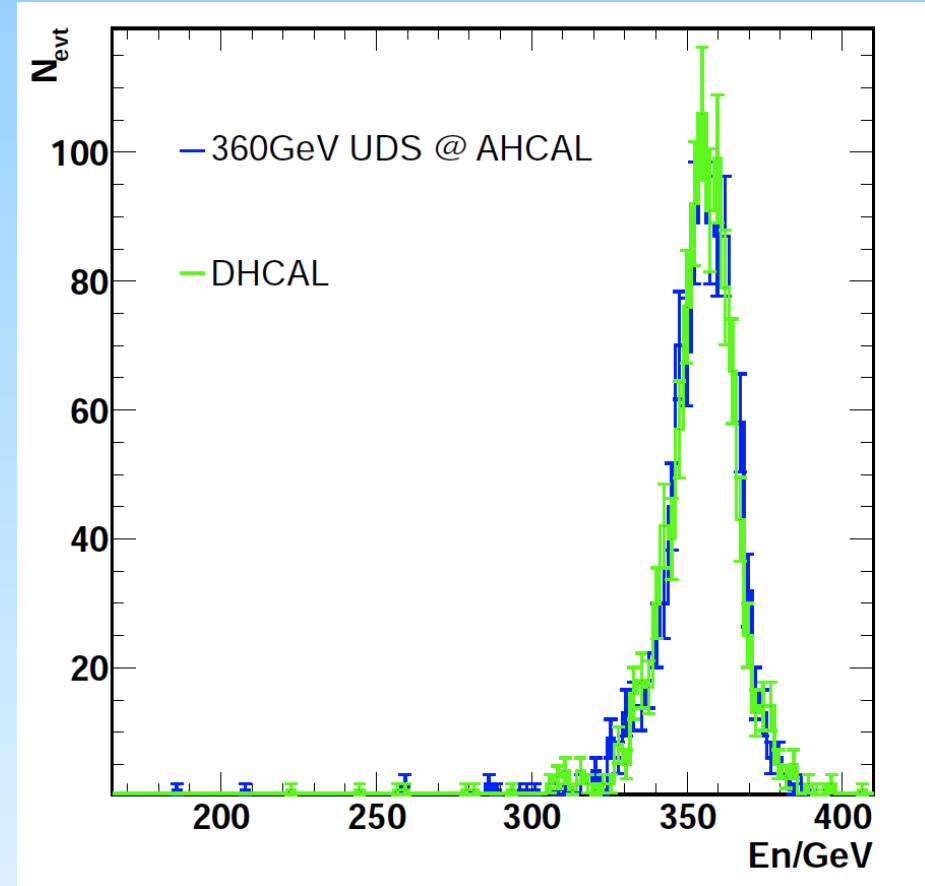
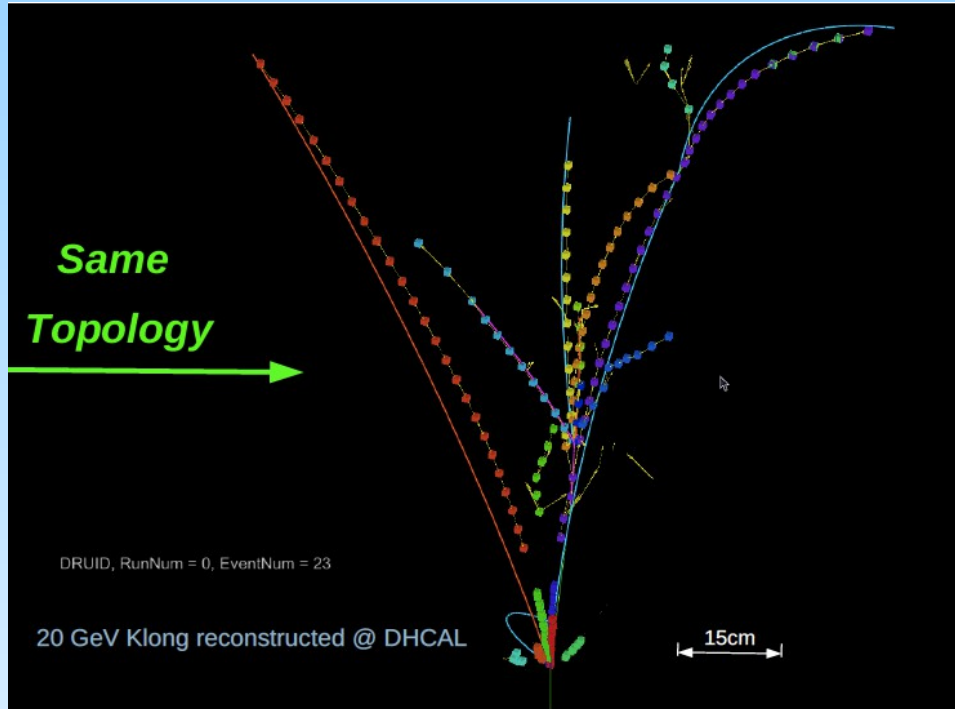


Energy reconstruction distribution of 1000GeV gamma-ray



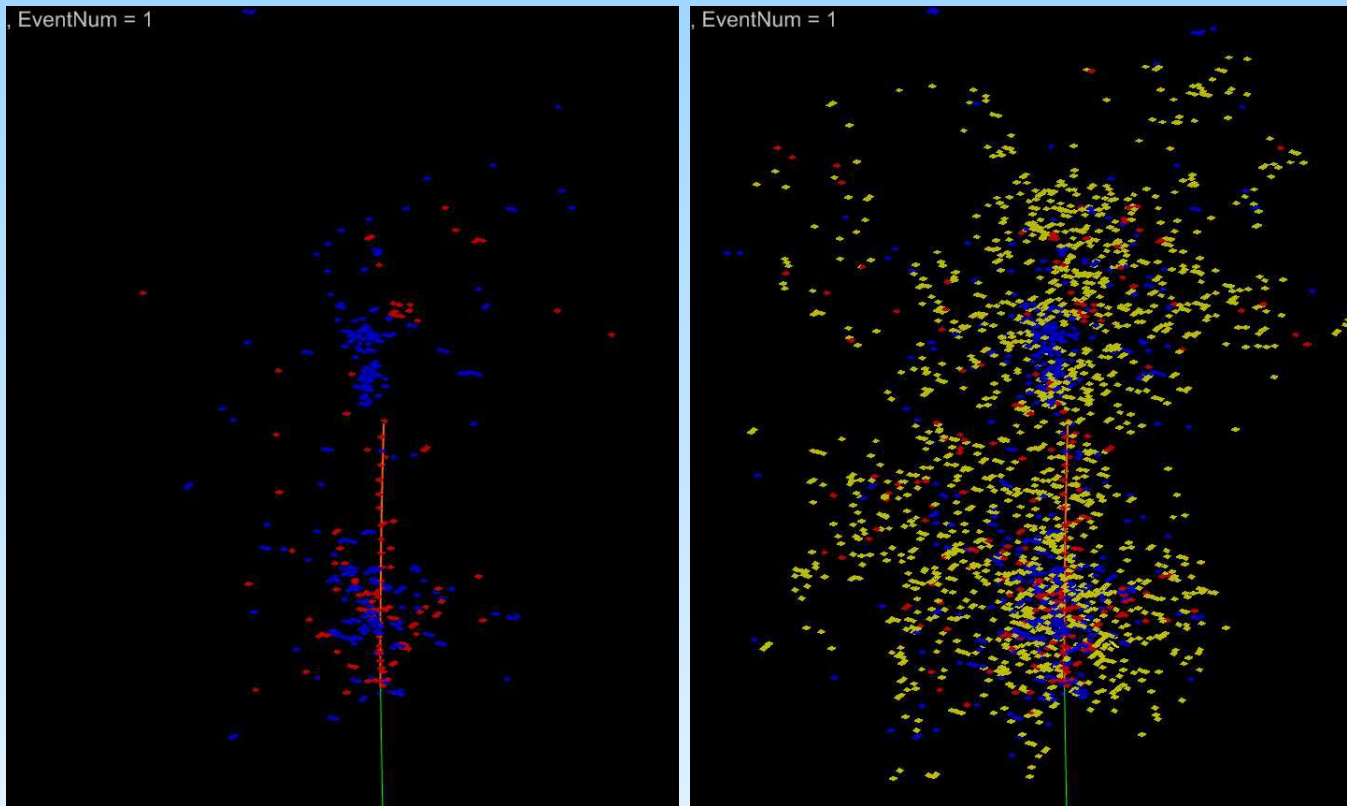
Energy resolution compare of different granularity 1.5—4.5 cm

# Perspective de la très haute granularité



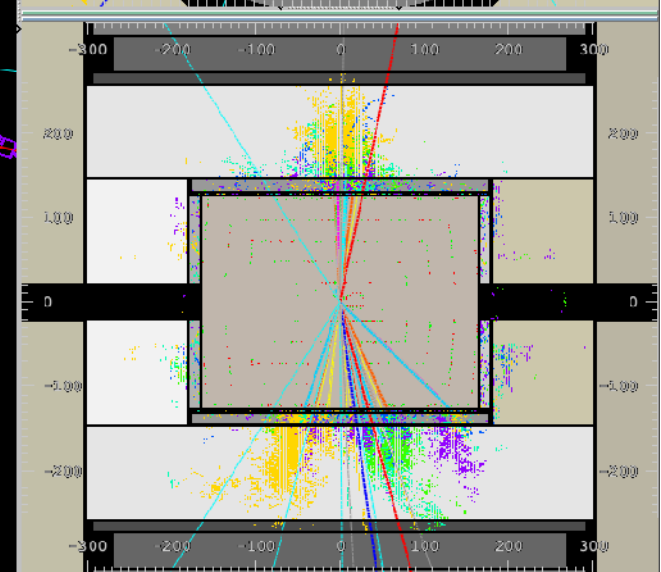
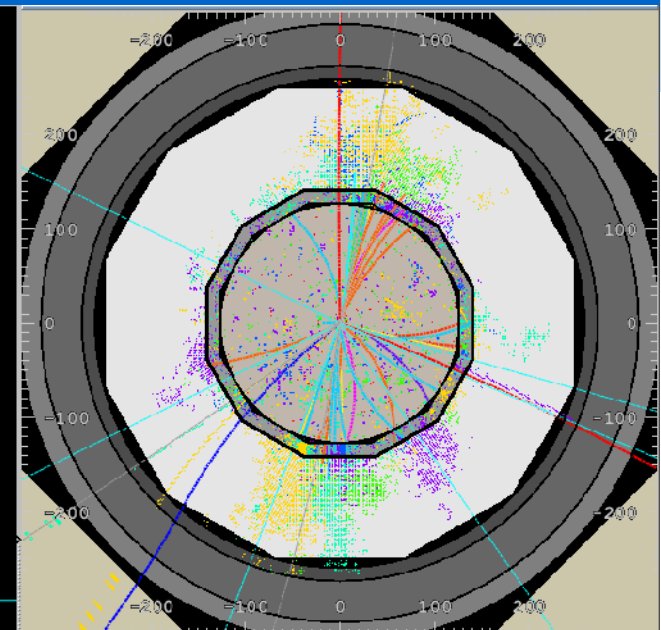
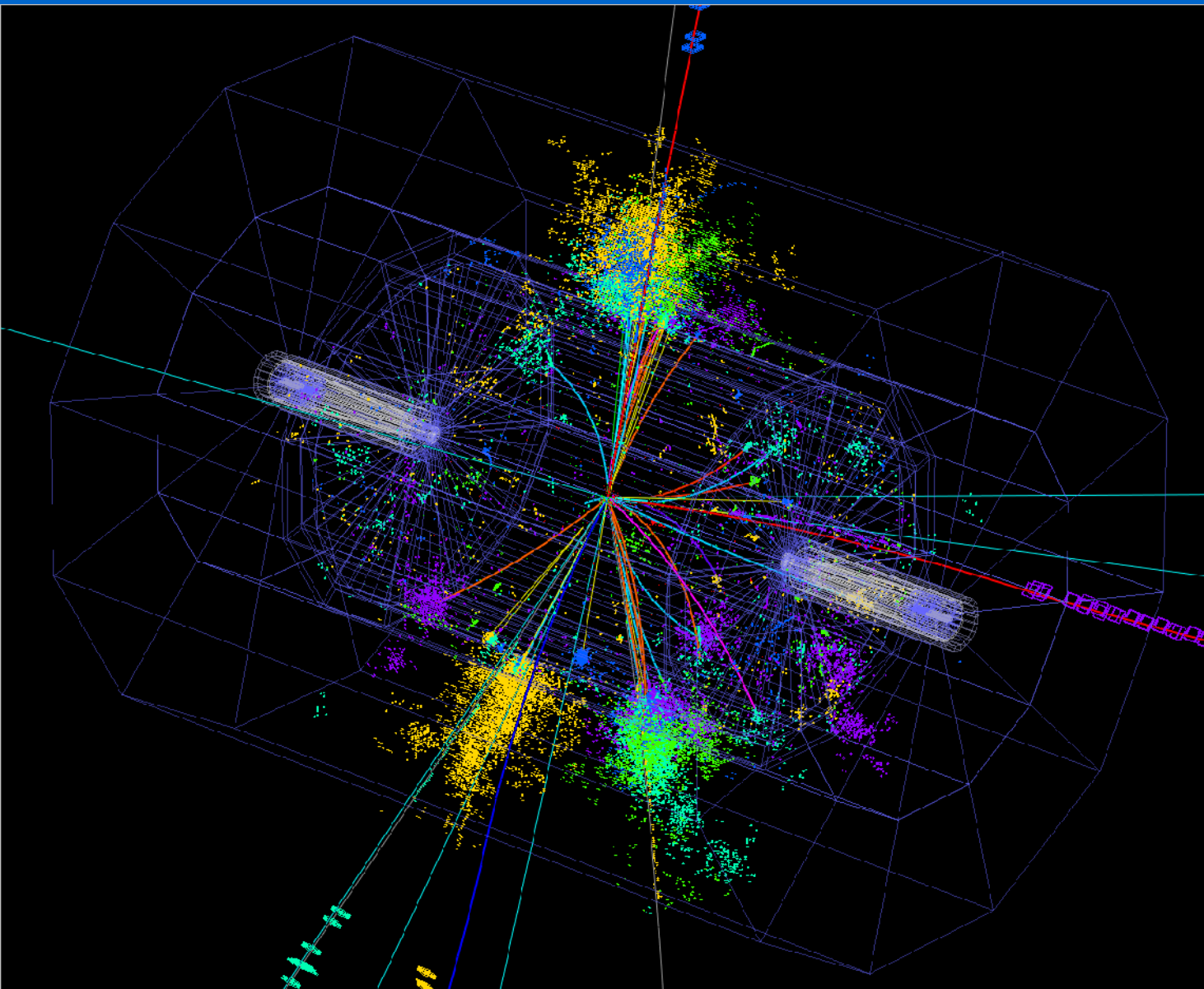
Imagerie calorimétrique → le retour aux chambres à bulle ?

# Avec ou sans neutrons ?



⇔ Capteurs sans ou avec H ?

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

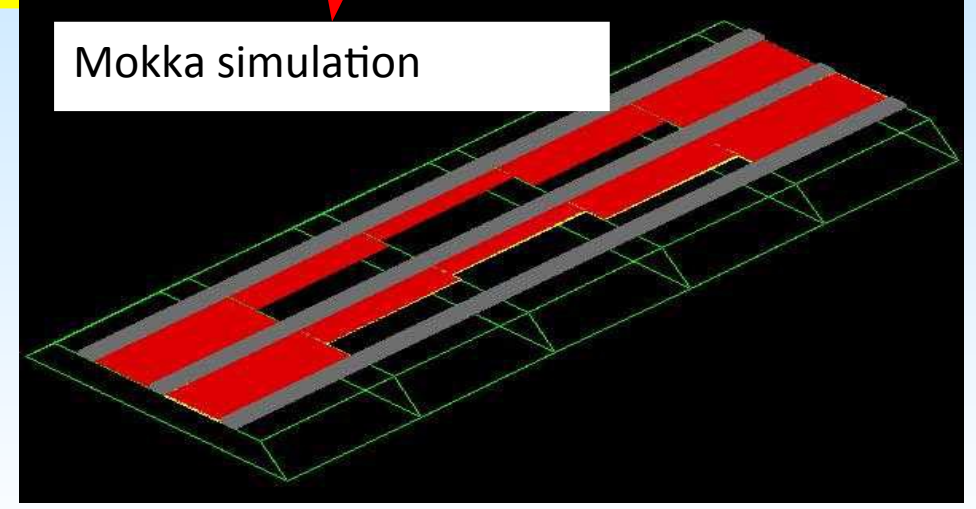
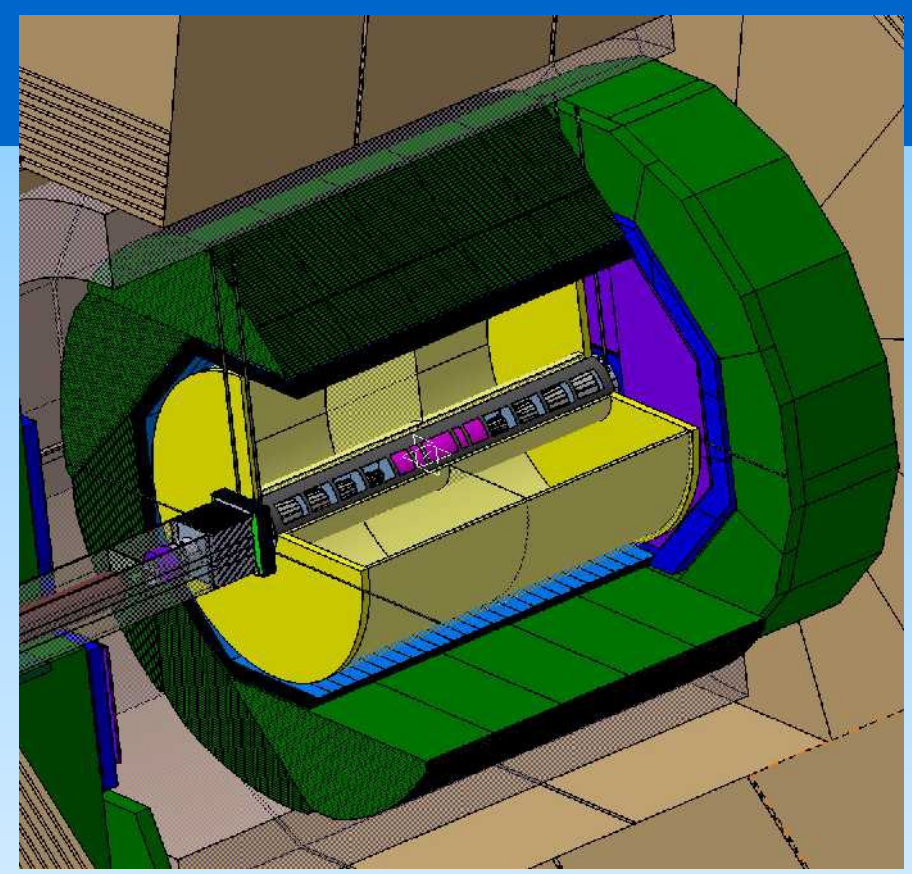
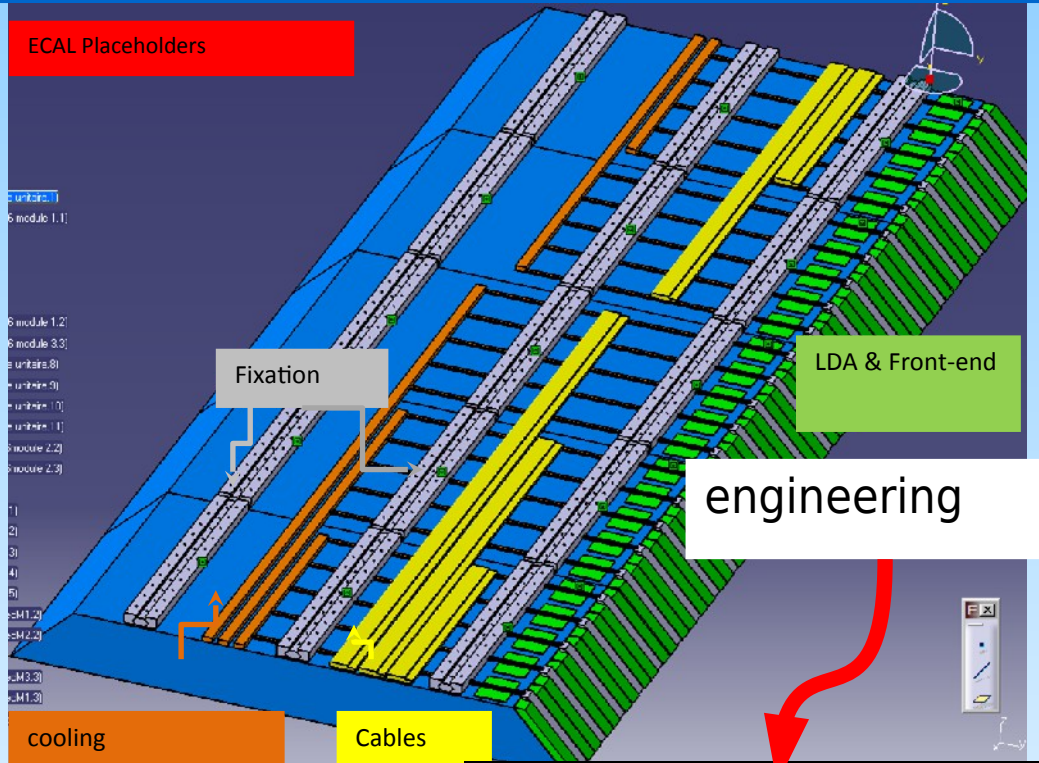


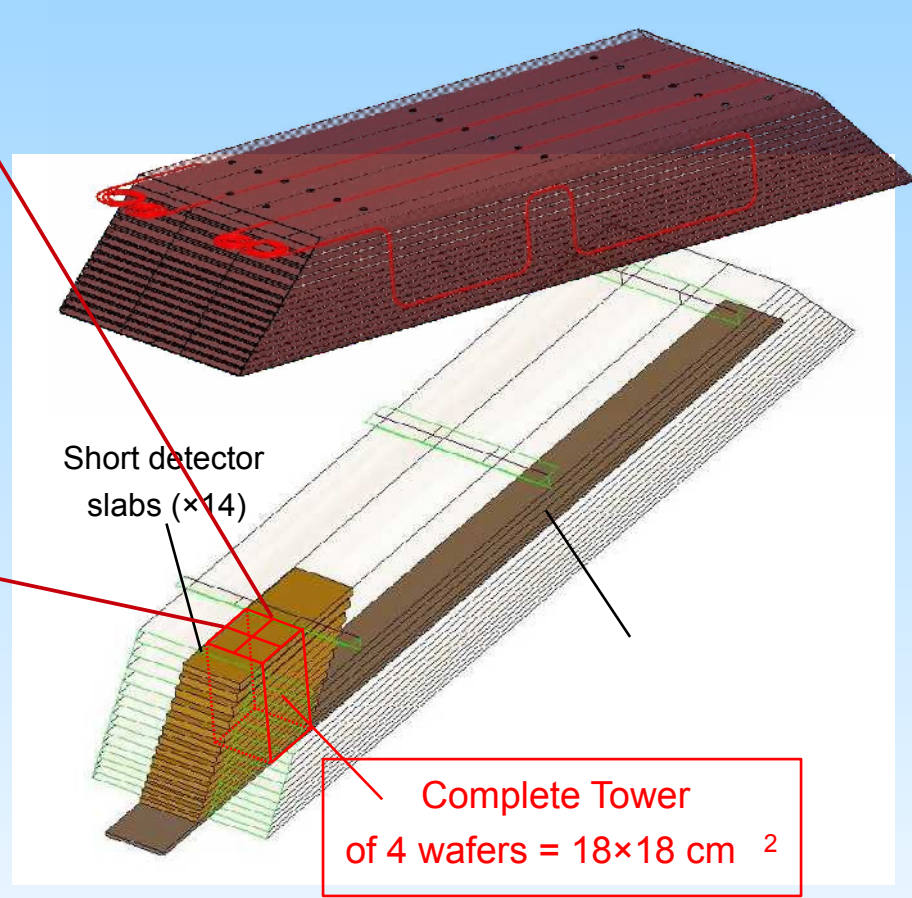
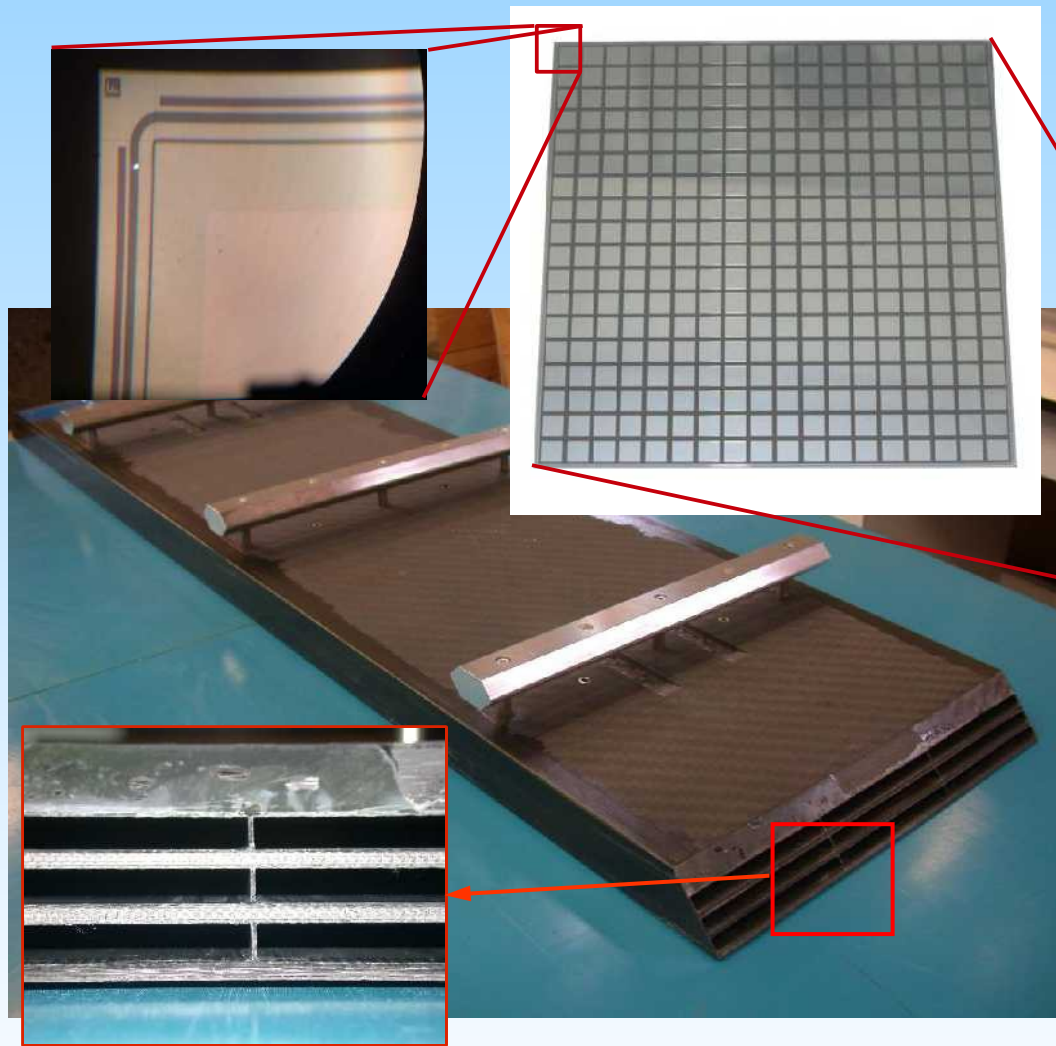
$t\bar{t}$  à 500 GeV

# 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,  $\pi$ ,...), 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 (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
- Cours de L. Marleau