

La calorimétrie

Techniques avancées

Vincent Boudry
LLR, *École polytechnique*

LLR

École du détecteur à la mesure
Roscoff, juin 2015

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

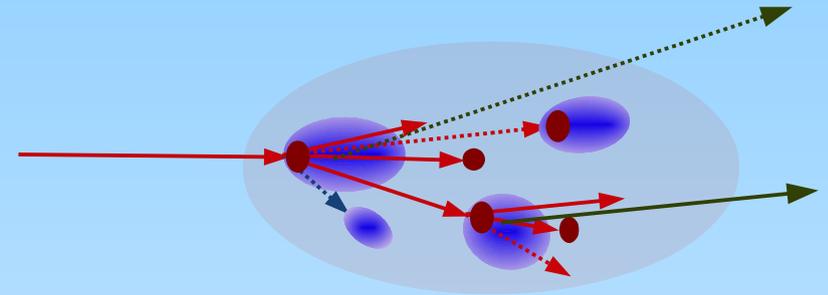
Jeudi

Vendredi

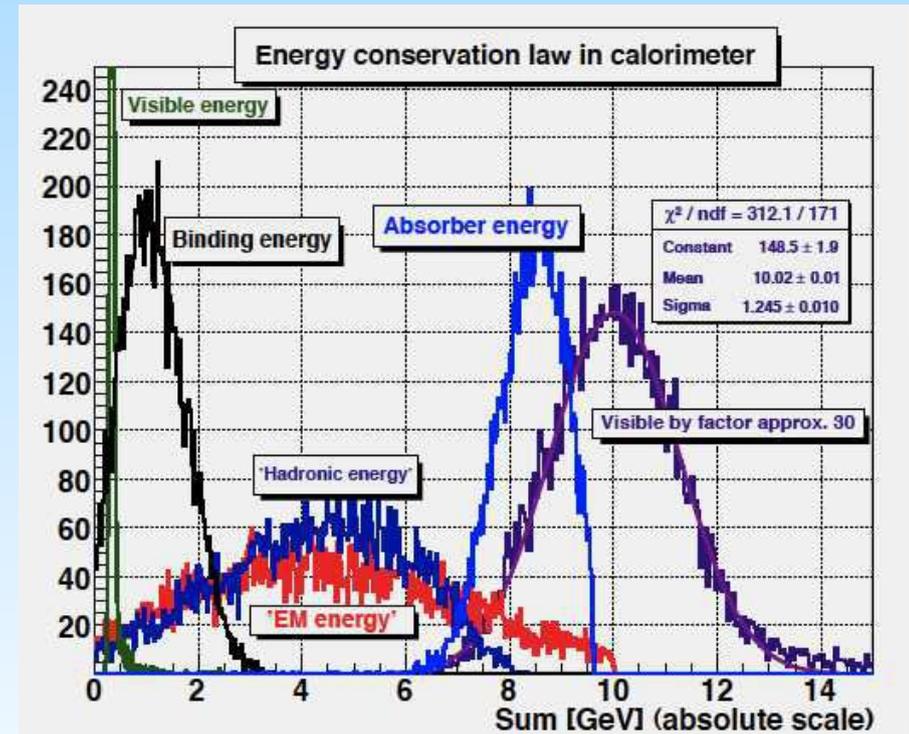
Techniques d'amélioration de la mesure des gerbes hadroniques

Bilan énergétique d'une gerbe hadronique :

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

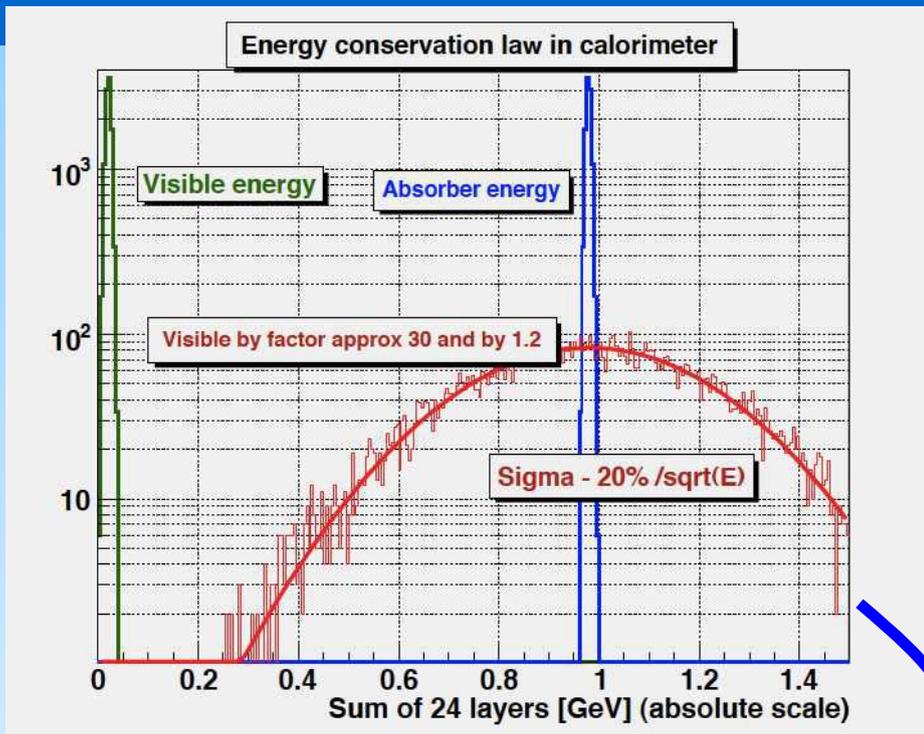


- $E_{EM} = \pi^0 \sim 30\% - 60\%$ à 10–200 GeV
(f_{EM} ou F_0)
- $E_{tr} = \pi$ chargés & protons
- $E_n =$ neutrons
- $E_{nucl.} =$ Energie de liaison nucl.
(Binding energy) → Energie perdue ou «invisible»
- $E_{fuites} = \mu + \nu, \sim 1-2\%$

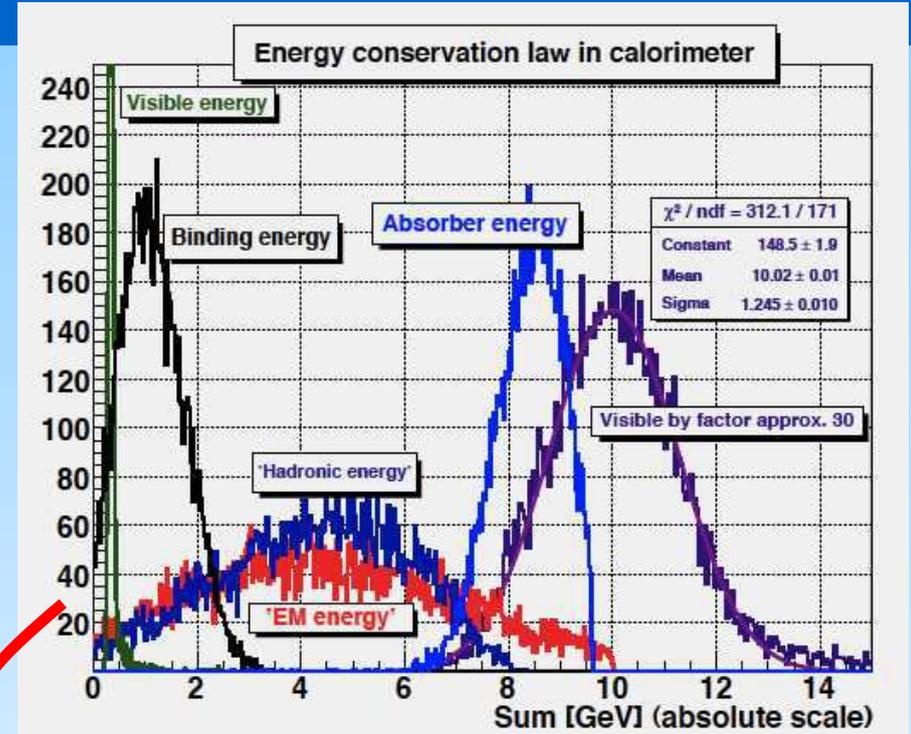


π de 10 GeV
sim. GEANT4

V. Morgunov

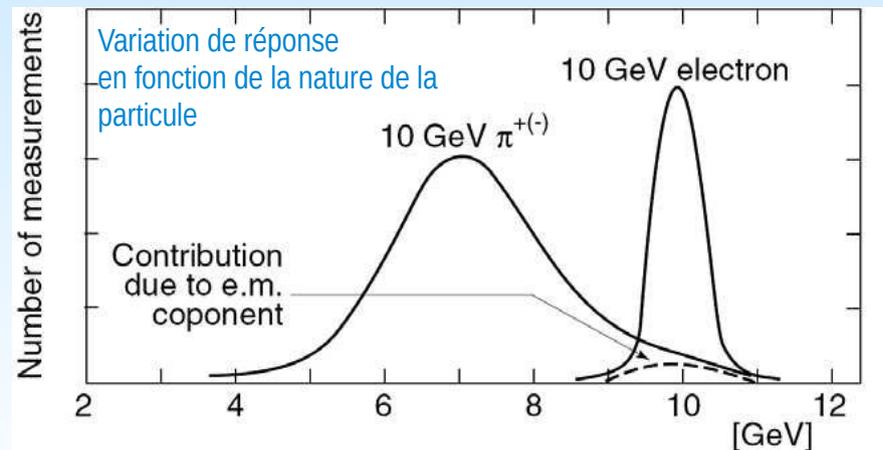


e- de 1 GeV



π de 10 GeV

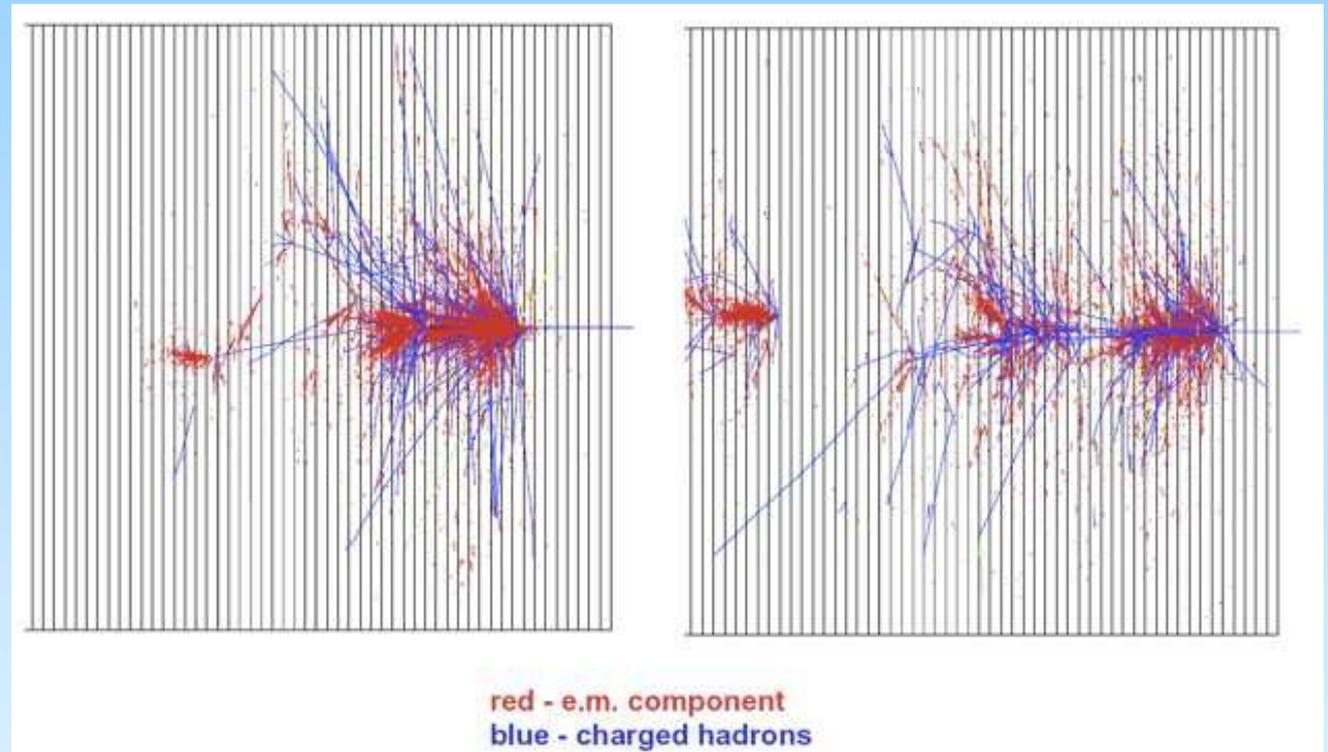
V. Morgunov



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

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 :

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

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

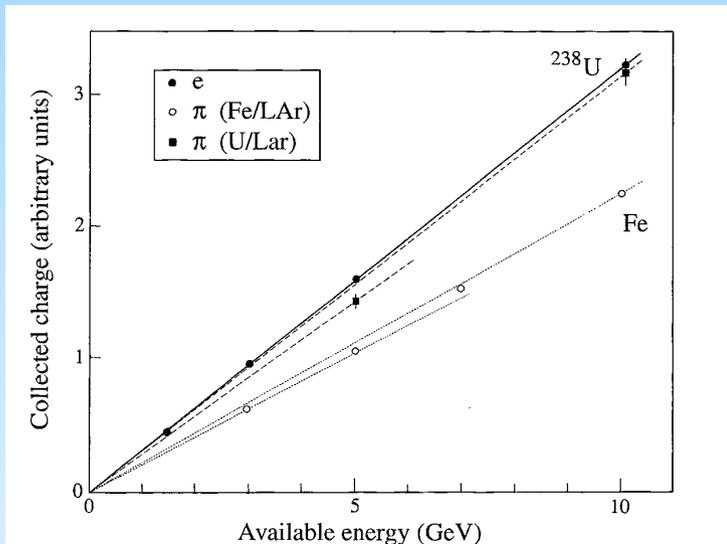
Augmenter ε_h et/ou réduire ε_e

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 (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)

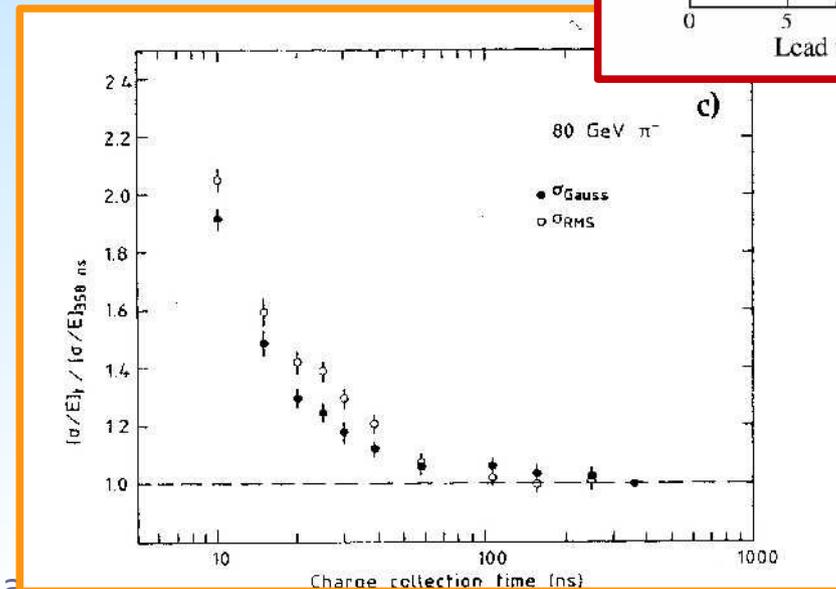
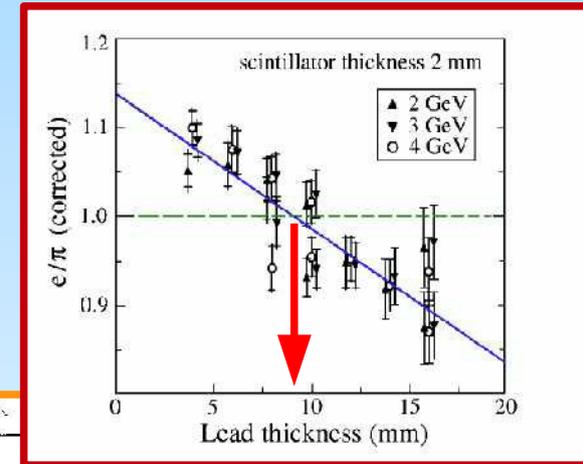
■ Exp de L3

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

■ Pb + Scintillateur

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

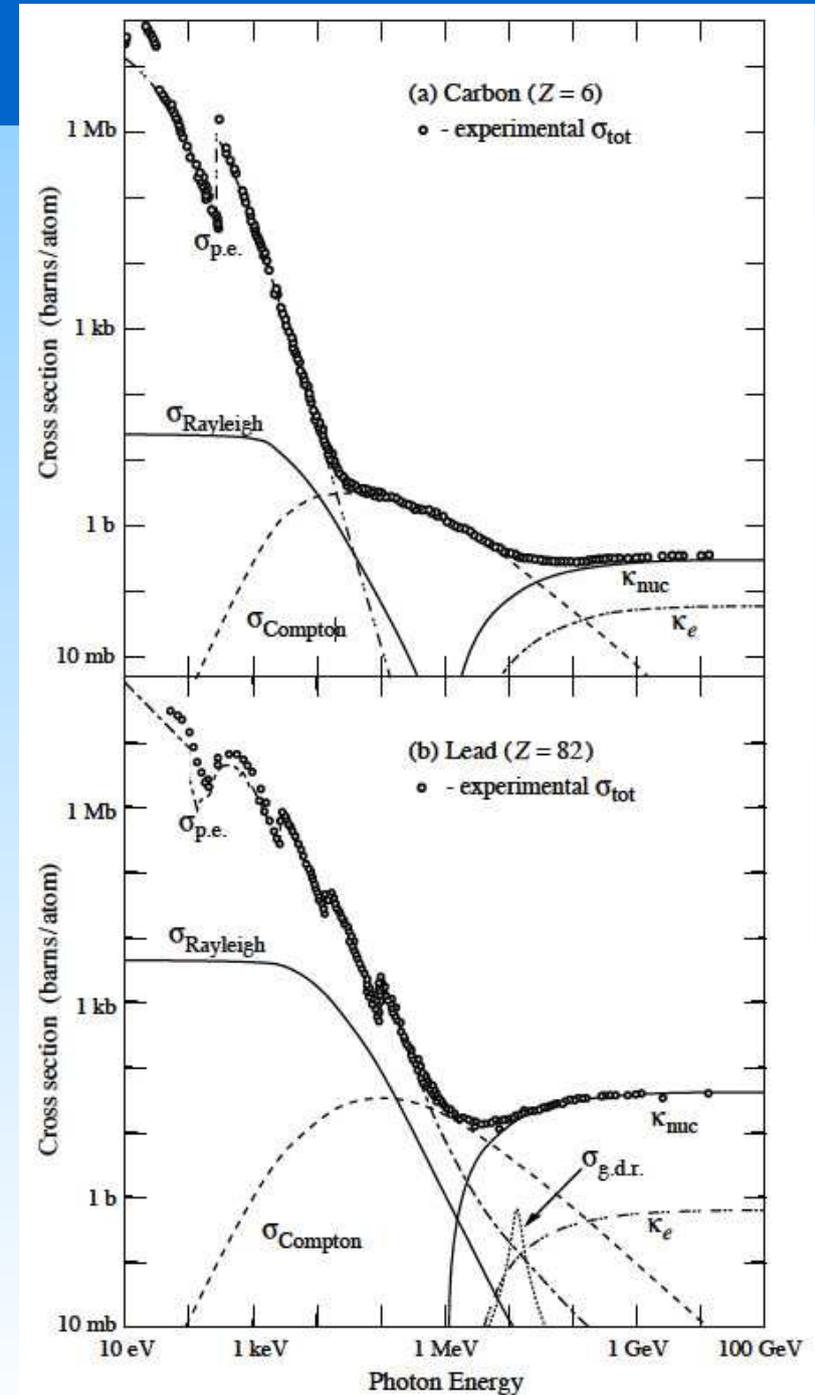
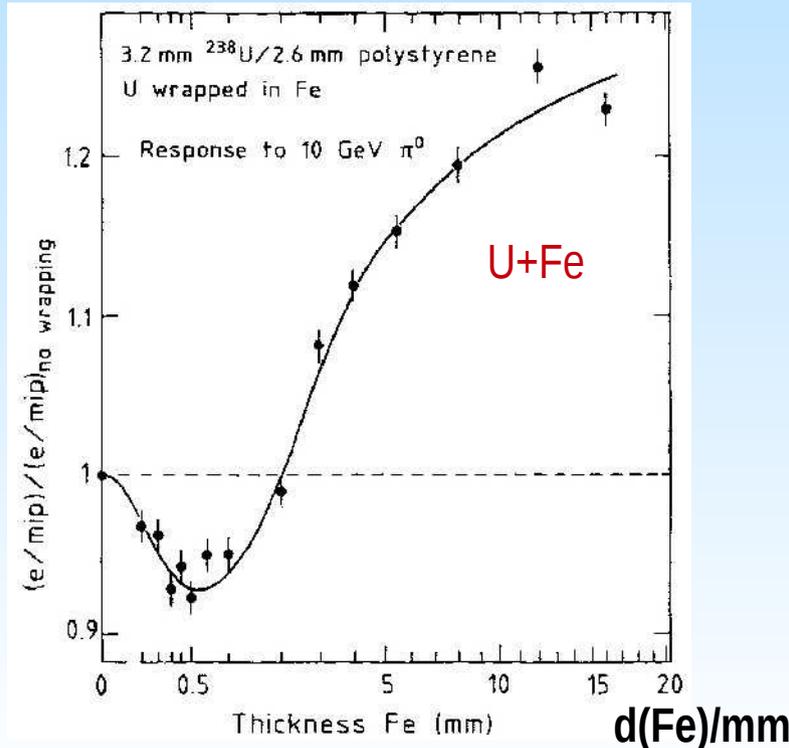
■ Intégrer plus longtemps



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



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.

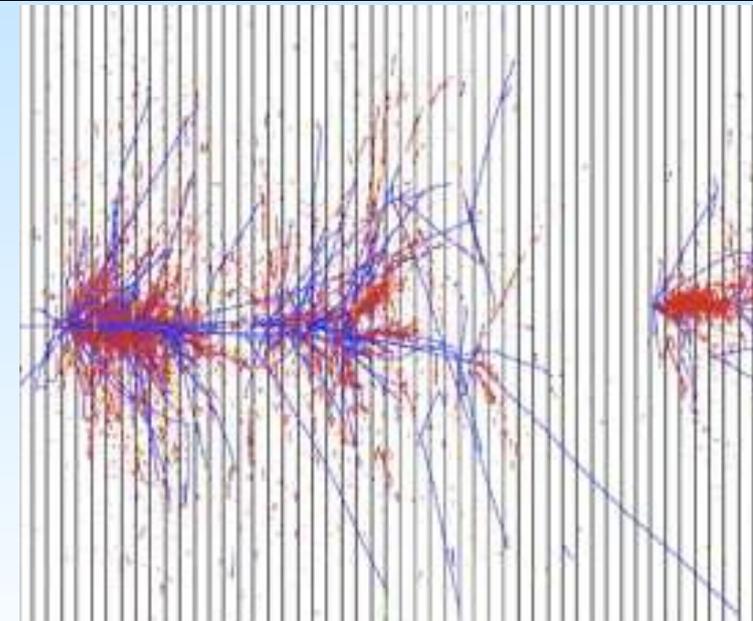
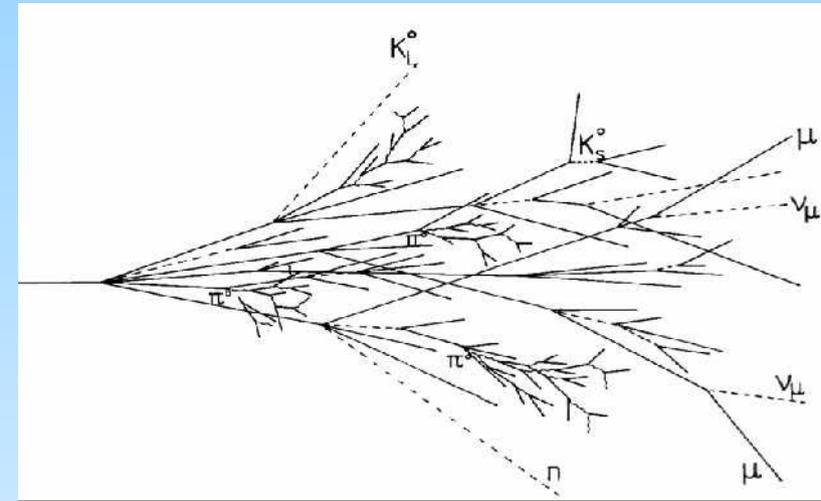
Bon ECAL ou bon HCAL ?

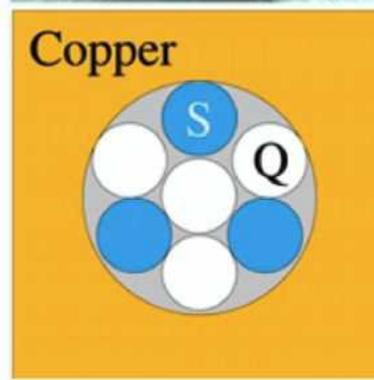
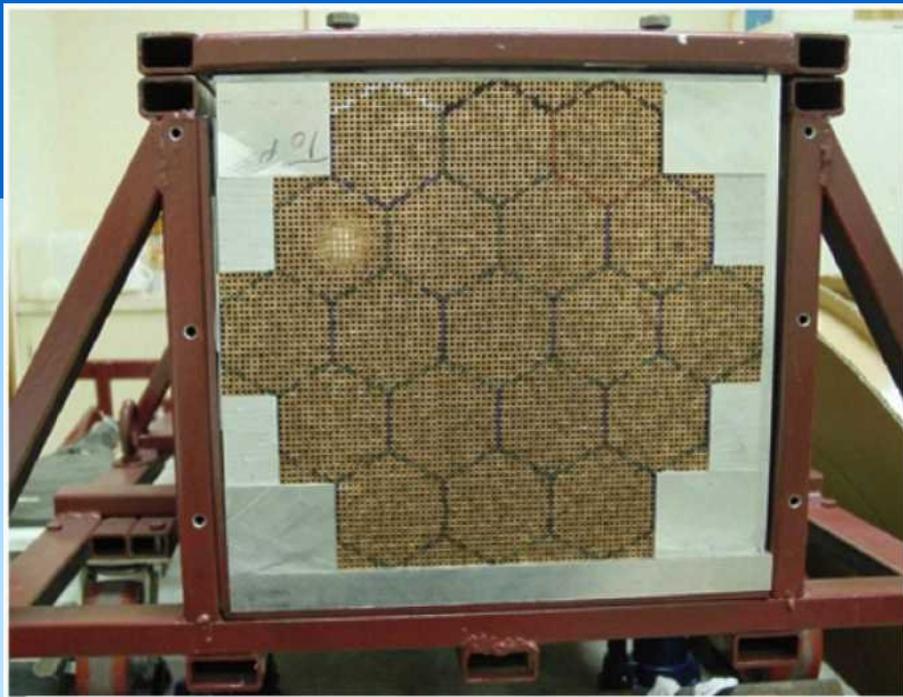
I had a DREAM...

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





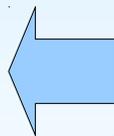
Type de SpaCal
{Spaghetti
Calorimeter}

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



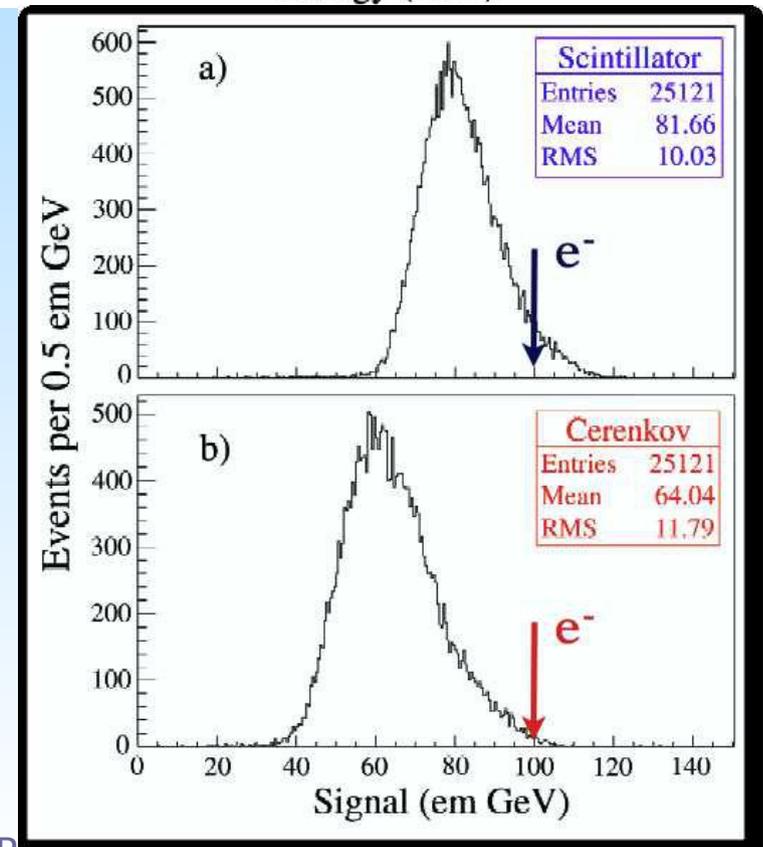
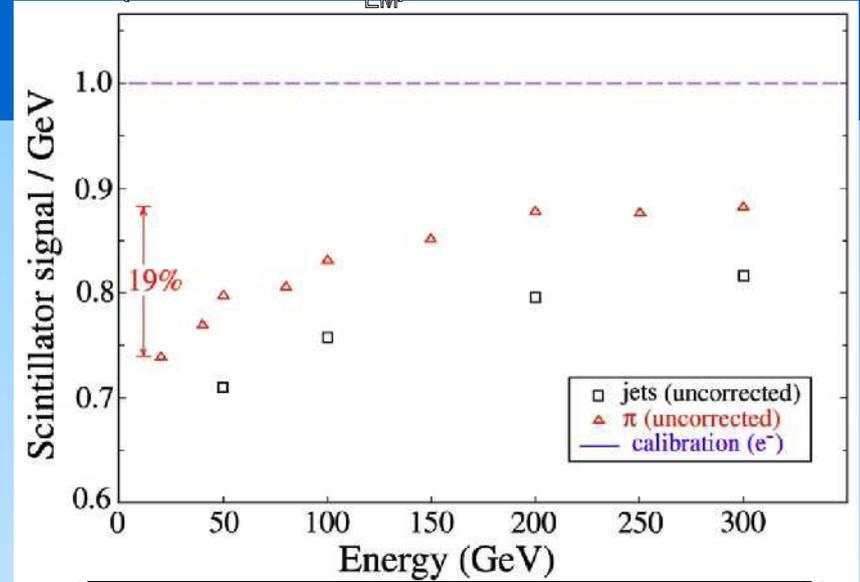
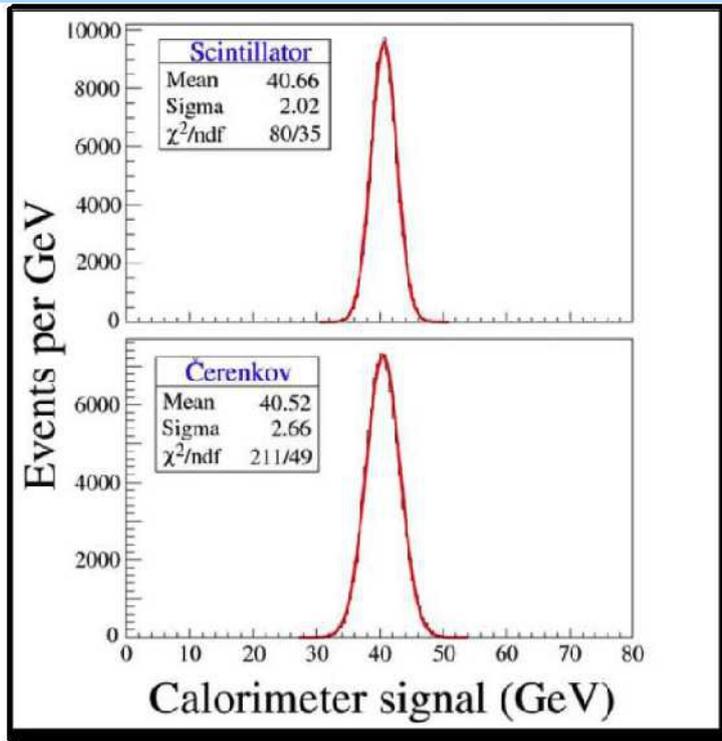
Photo multiplicateurs



Réponse aux électrons

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

Incidence : 2°
(tunneling à 0°)



Réponse aux π de 100 GeV

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

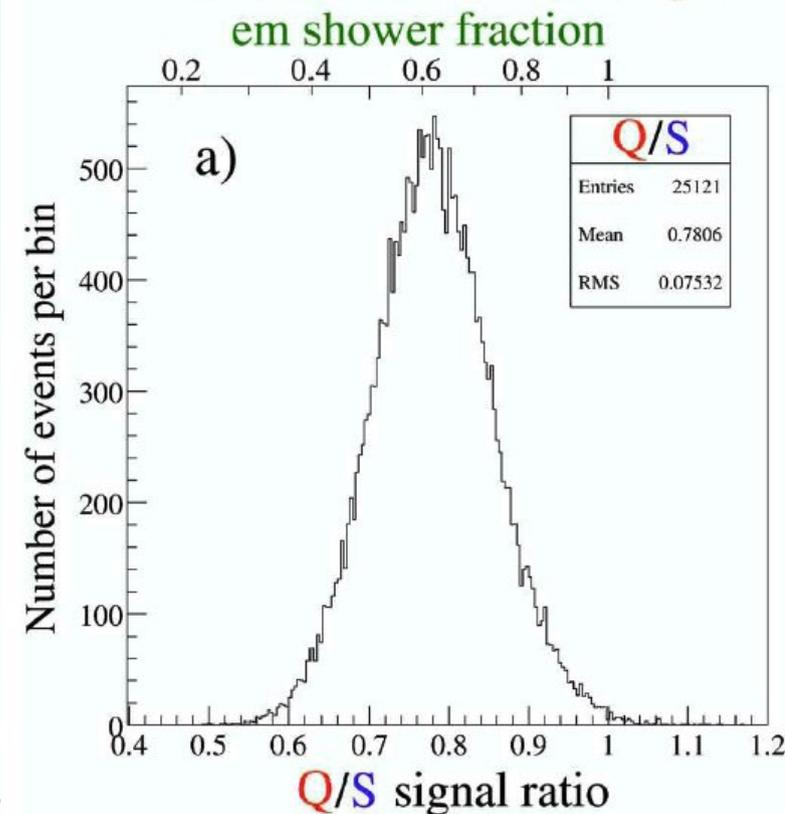
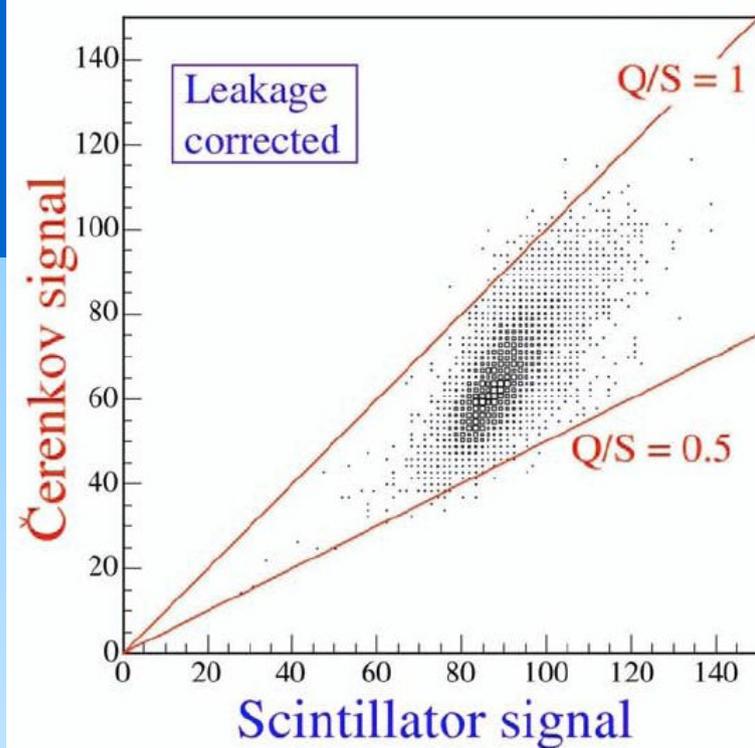
$$Q = E \left[f_{em} + \frac{1}{(e/h)_Q} (1 - f_{em}) \right]$$

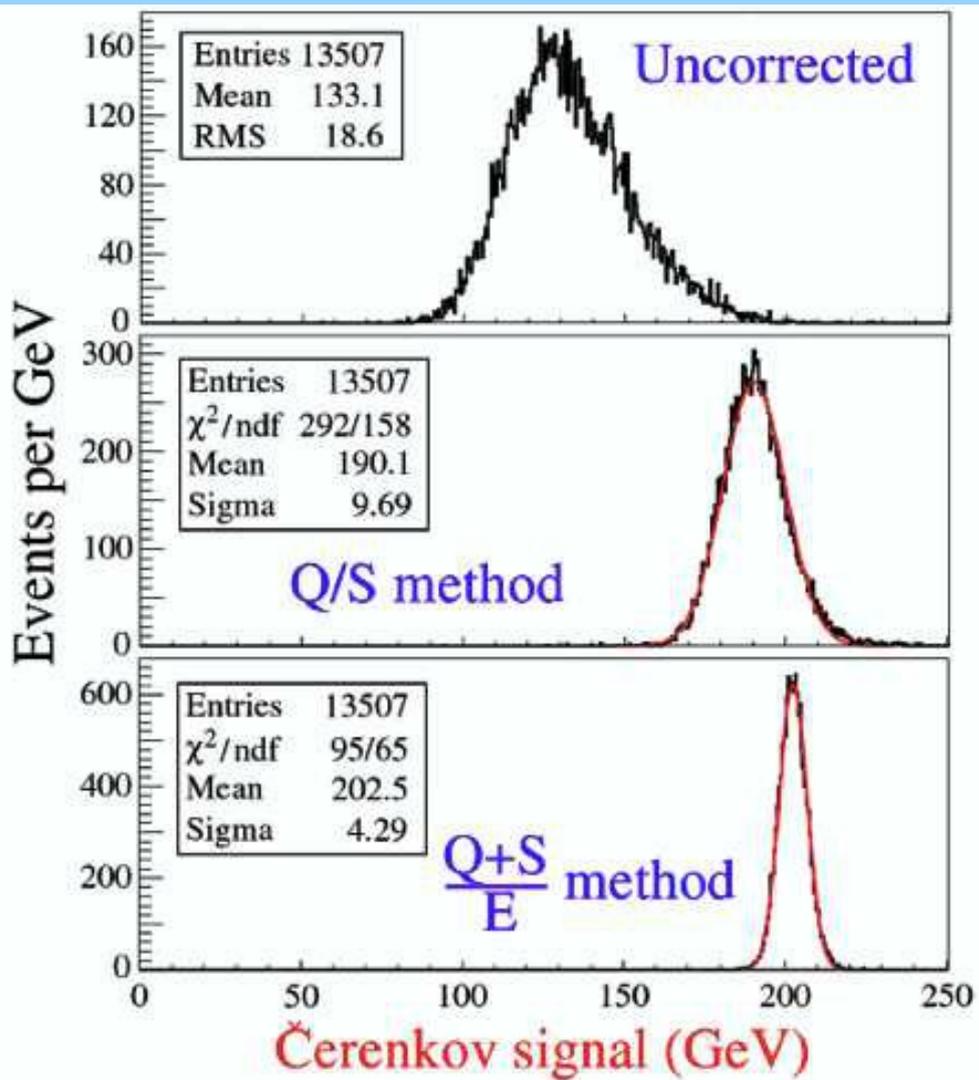
e.g. If $e/h = 1.3$ (S), 4.7 (Q)

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

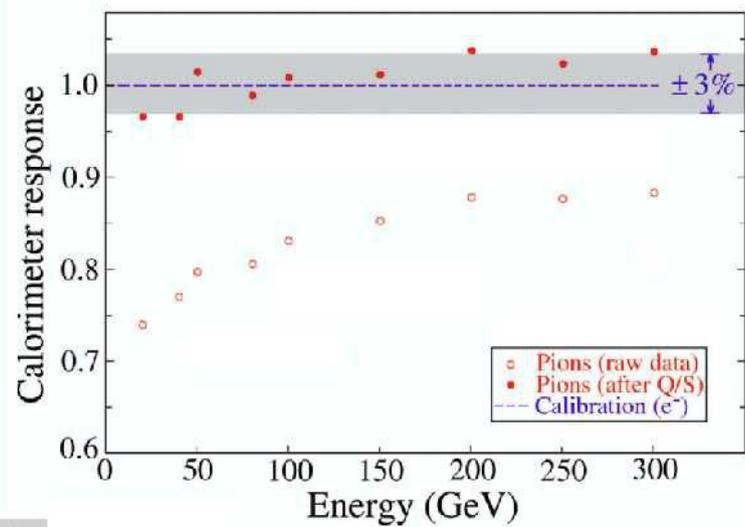
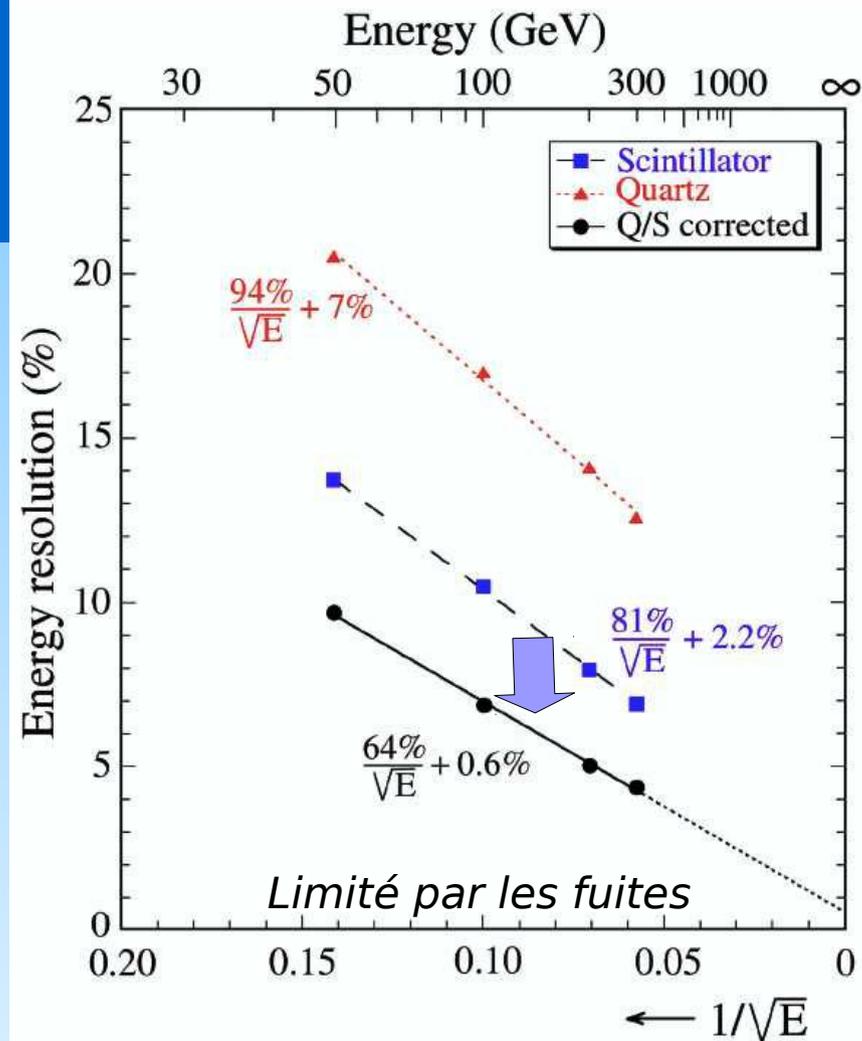
$$E = \frac{S - \chi Q}{1 - \chi}$$

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



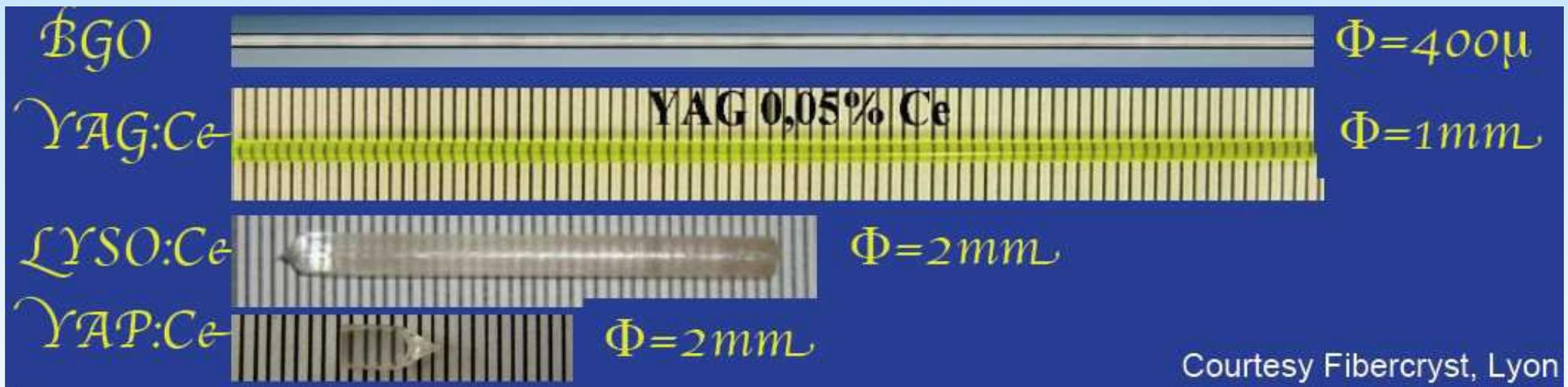
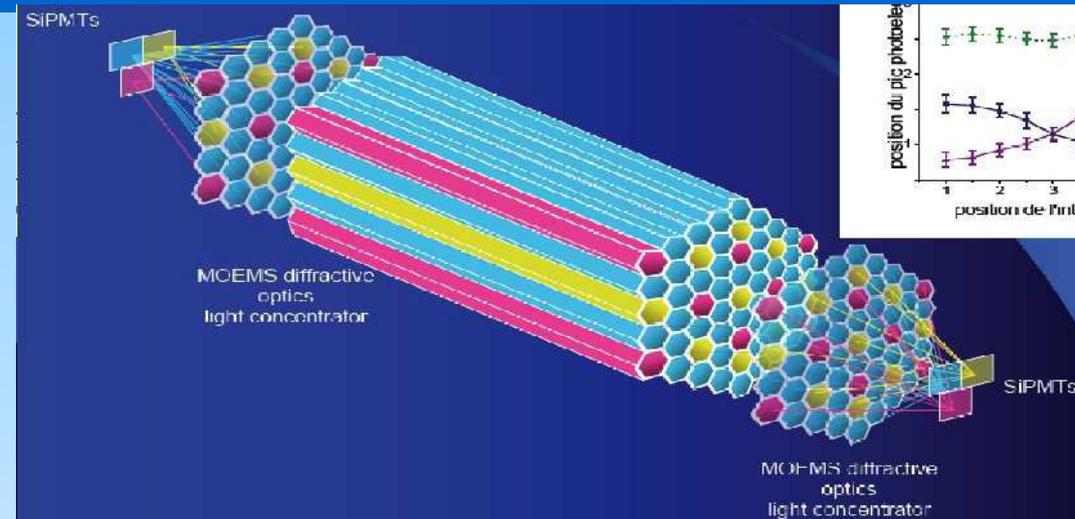


Comportement Gaussien



les méta-matériaux (option homogène)

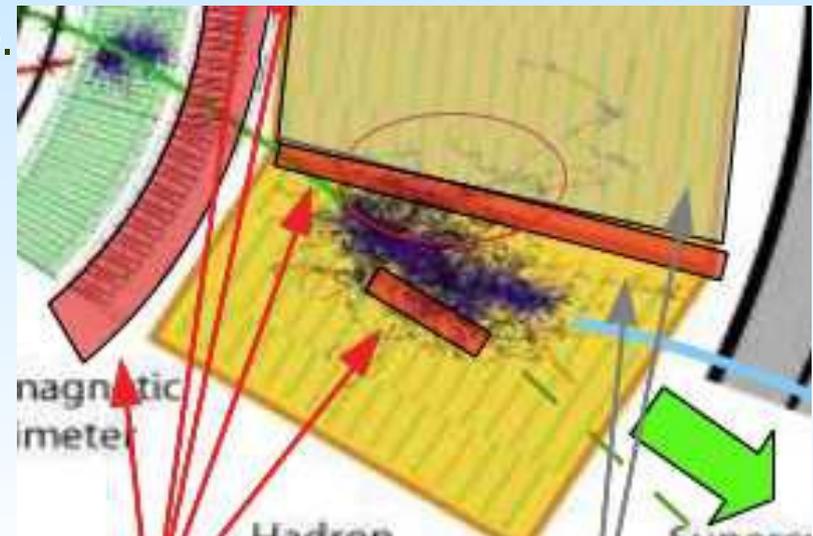
- Dual Readout avec un calorimètre quasi homogène
 - ▶ **Fibres scintillantes denses avec des matériaux réagissant différemment**
- Lecture complexe → double ou triple information 3D



Amélioration Algorithmiques (avec la granularité)

Agrégation («Clustering»)

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

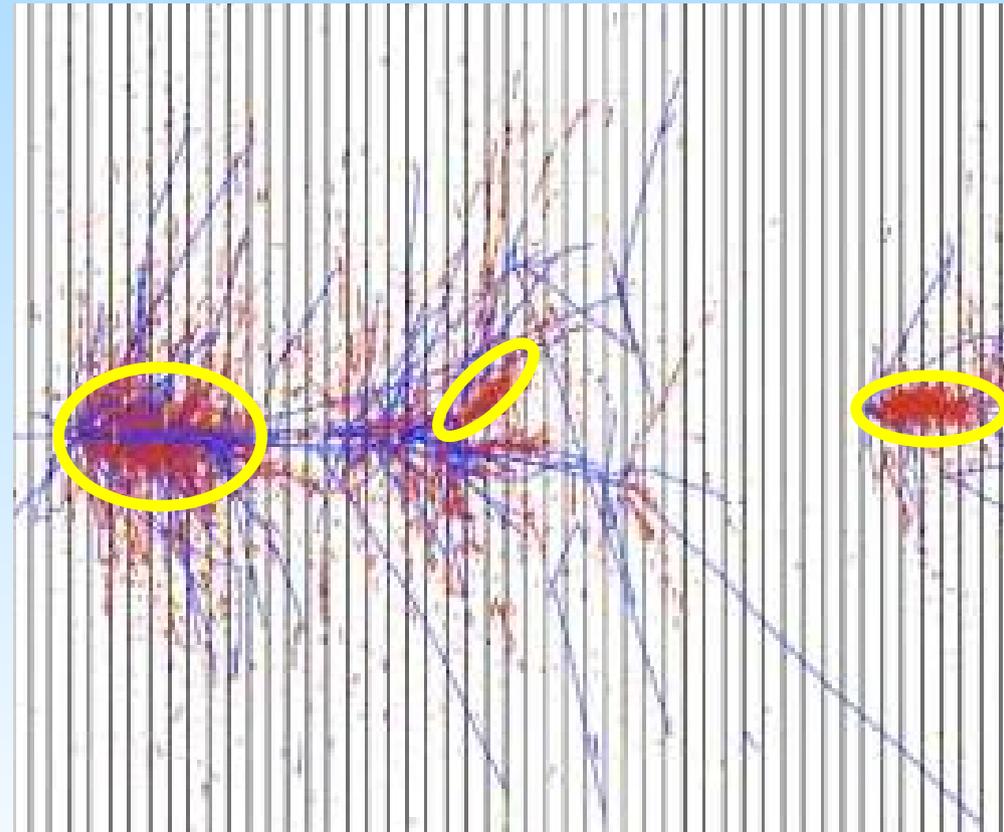


Compensation par pondération (« weighting »)

- 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

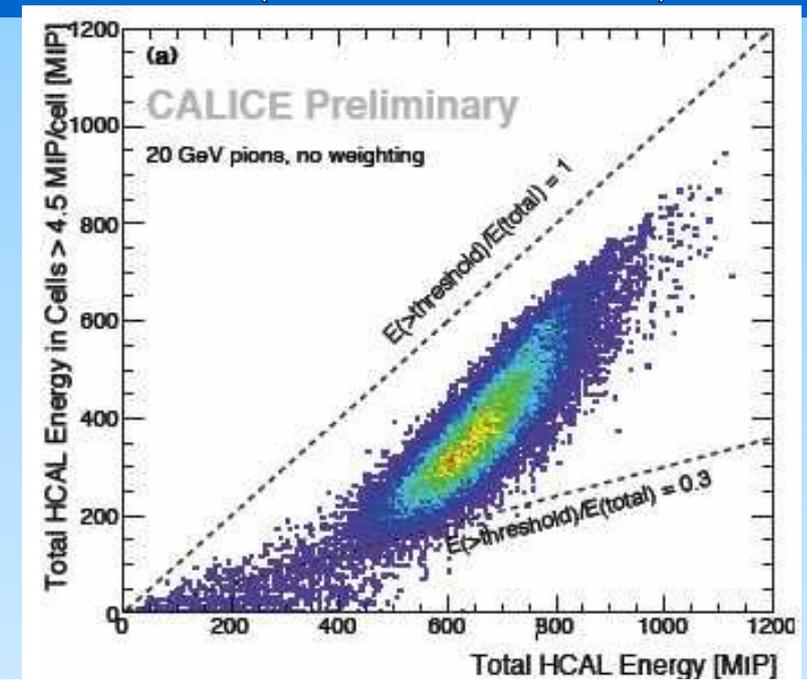
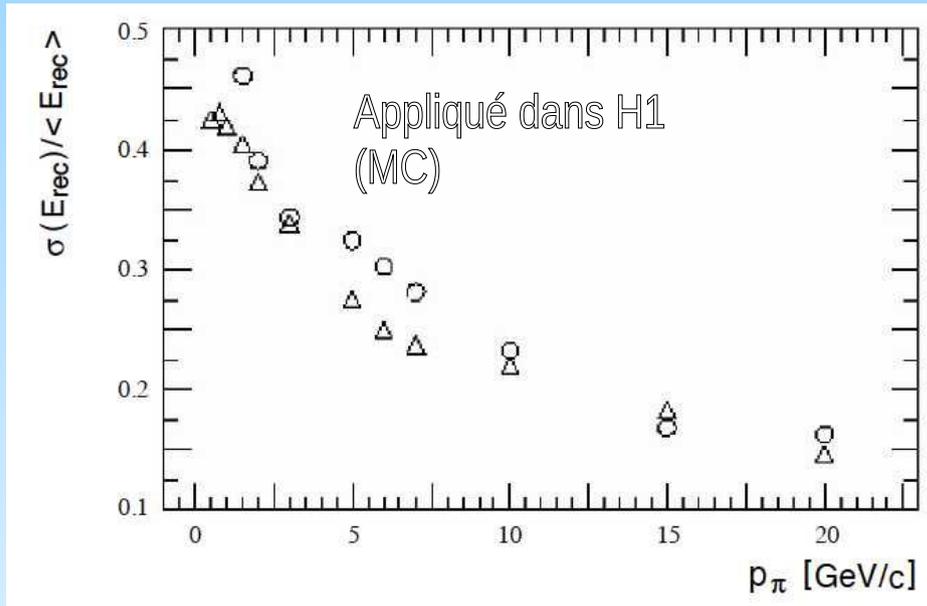
$$\rho_i = \frac{E_i}{\text{Vol}_i}$$

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

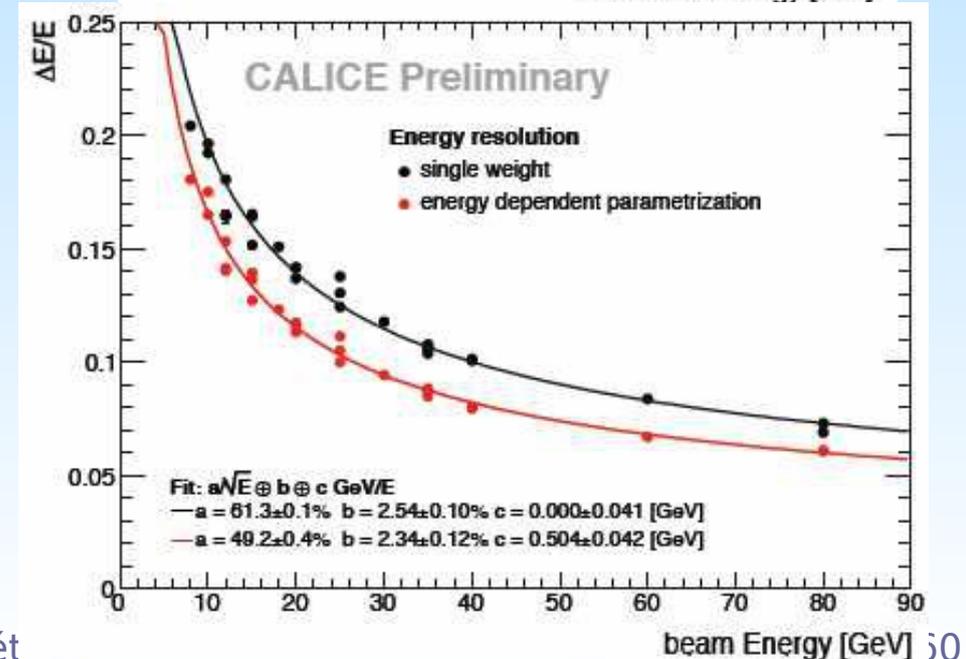


Compensation par pondération (« weighting »)

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»

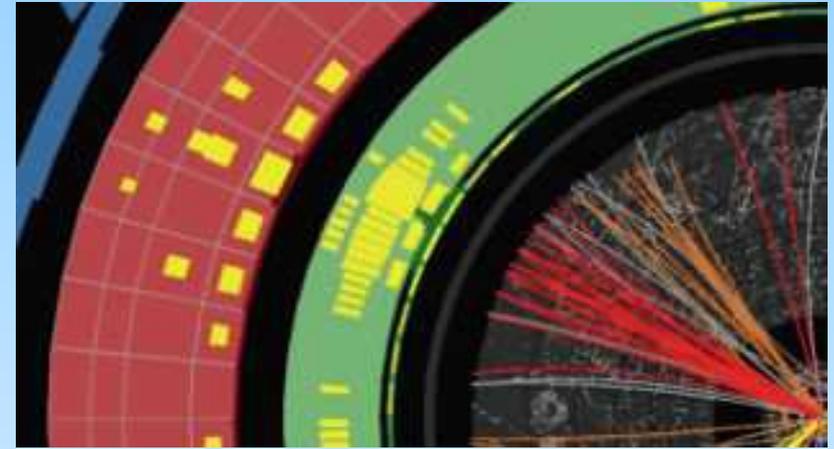
- «Simplement» reconstruire toutes les particules & prendre la meilleure mesure possible ou combiner

► Pour des particules individuelles :

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

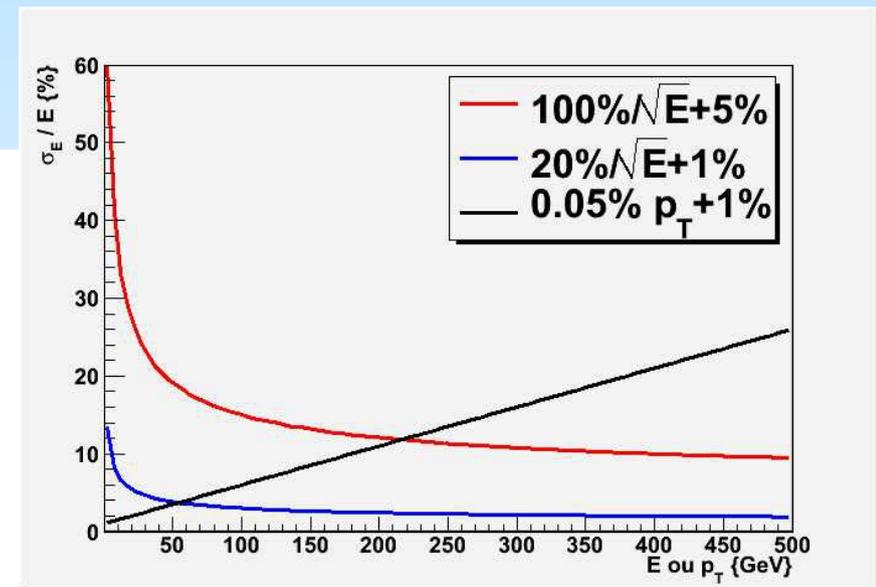
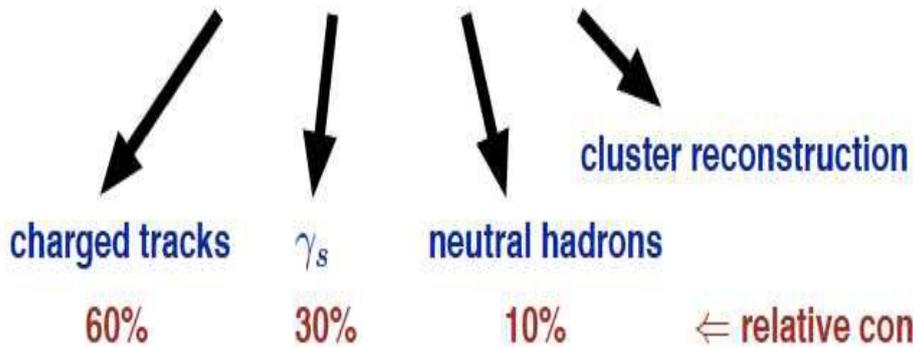
- Physique à haute énergie \equiv jets, MET (énergie transverse manquante), τ

► Mesure pour des jets :



Key feature for particle flow approach (PFA):

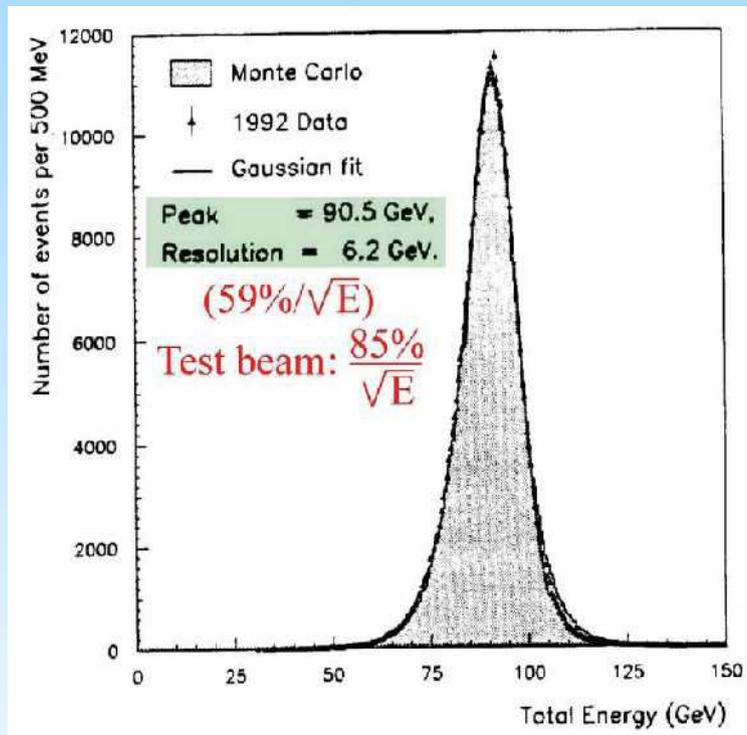
combined Tracking+ECAL+HCAL+Software info for jet energy resolution



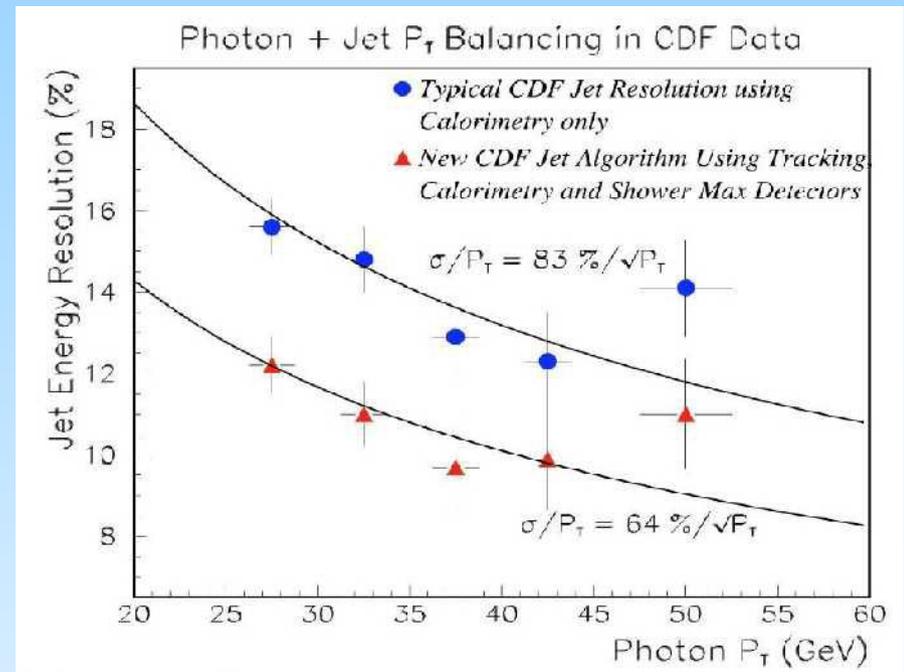
Particle Flow Analysis : «Energy flow»

PFA au LEP : ALEPH

Utilisation de particle ID +
SW compensation



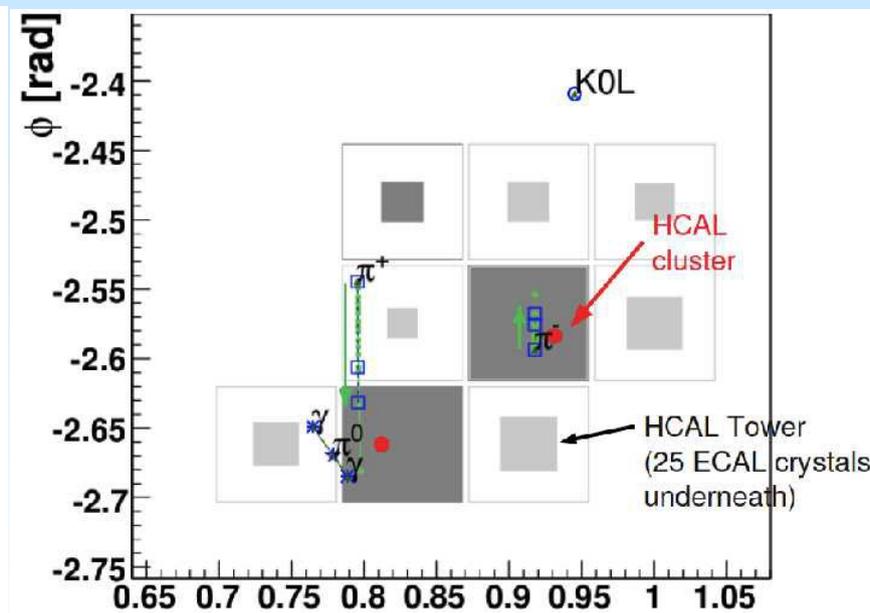
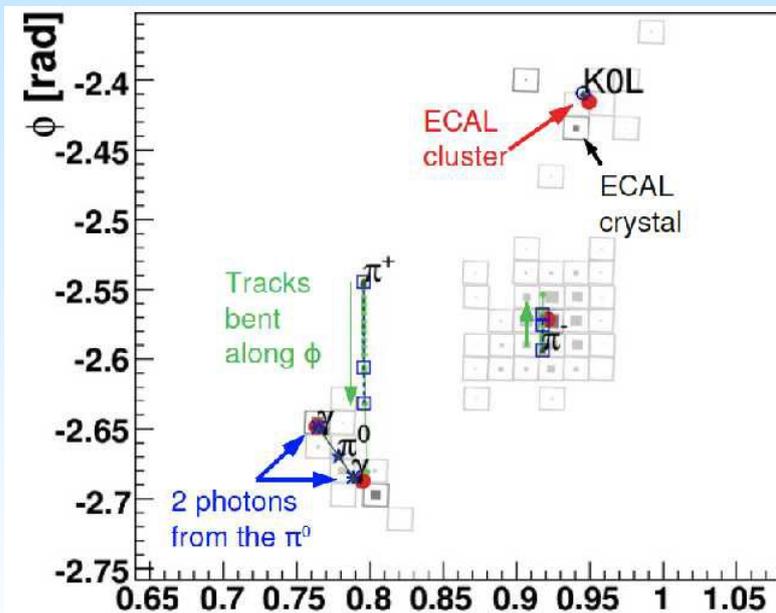
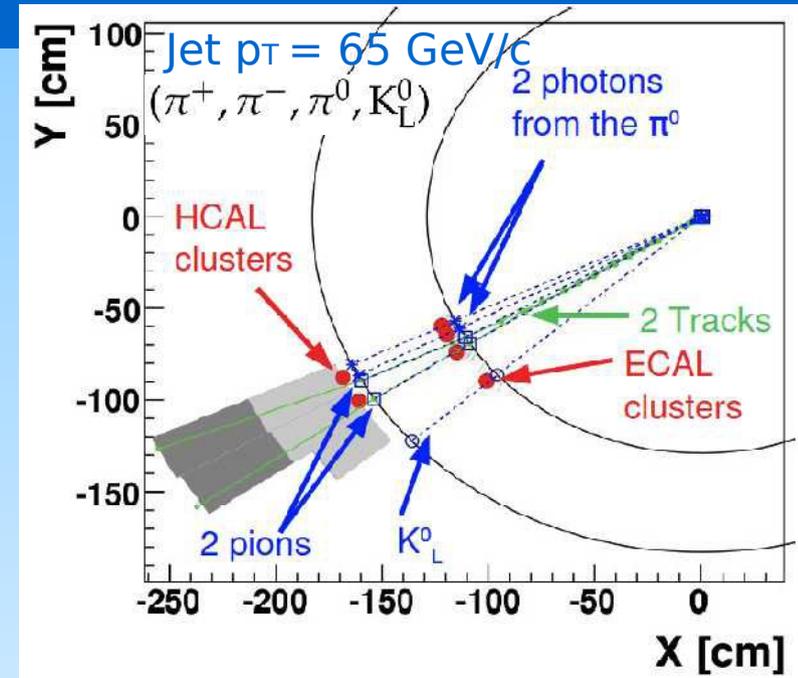
PFA au Tevatron : CDF



H1 Hadronic flow.

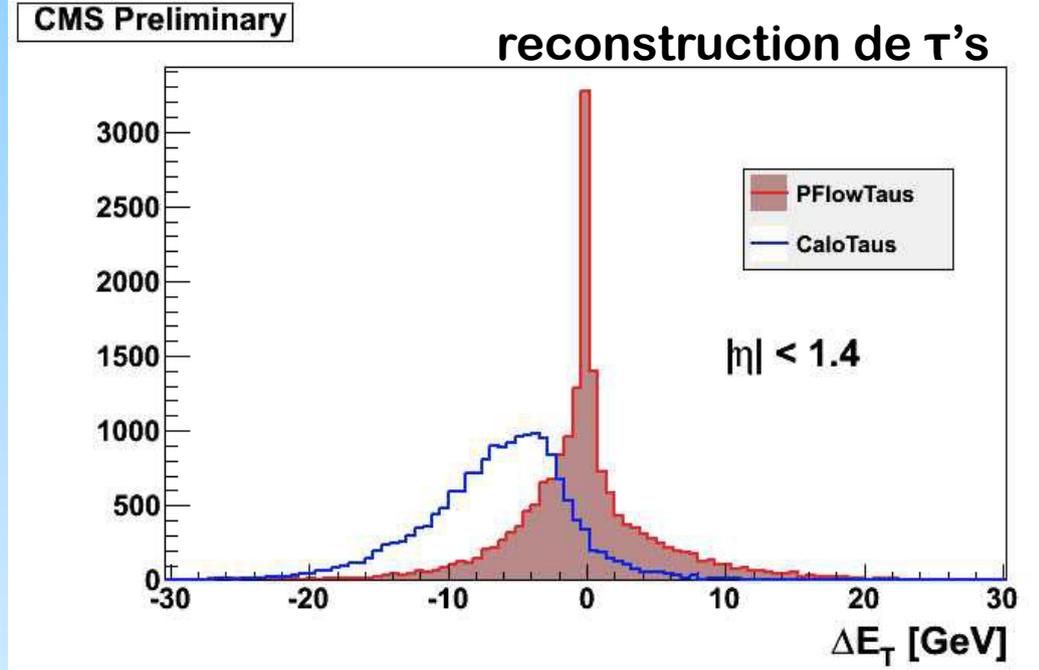
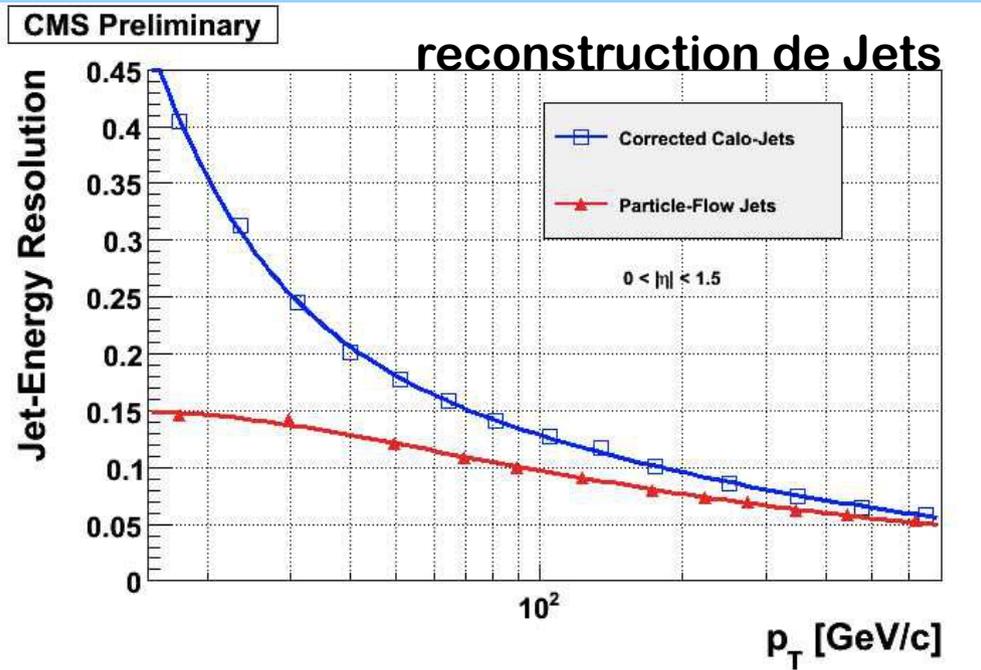
Le «particle Flow» de CMS

- 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

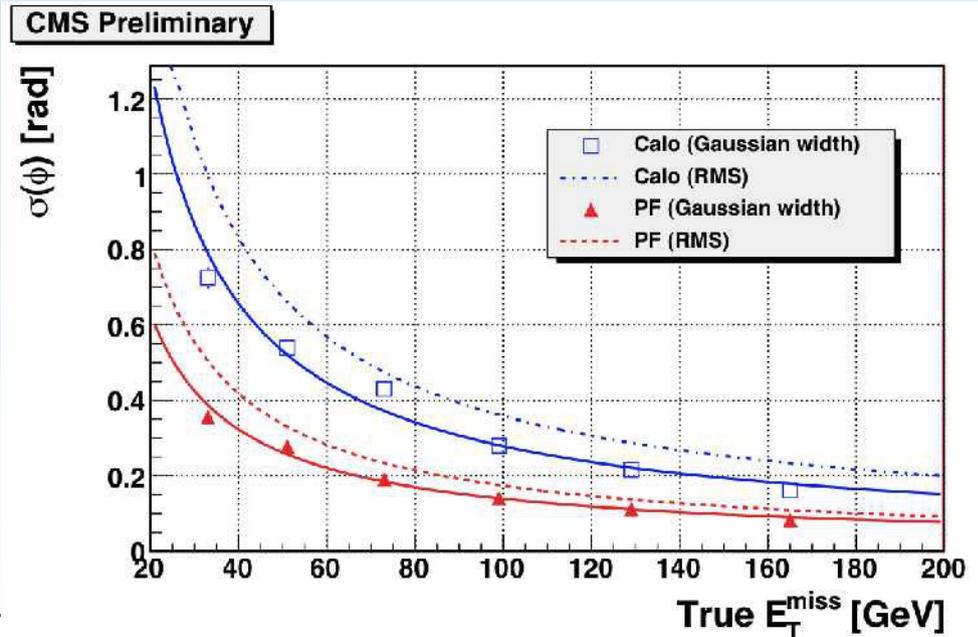


- Reconstruction d'énergie manquante

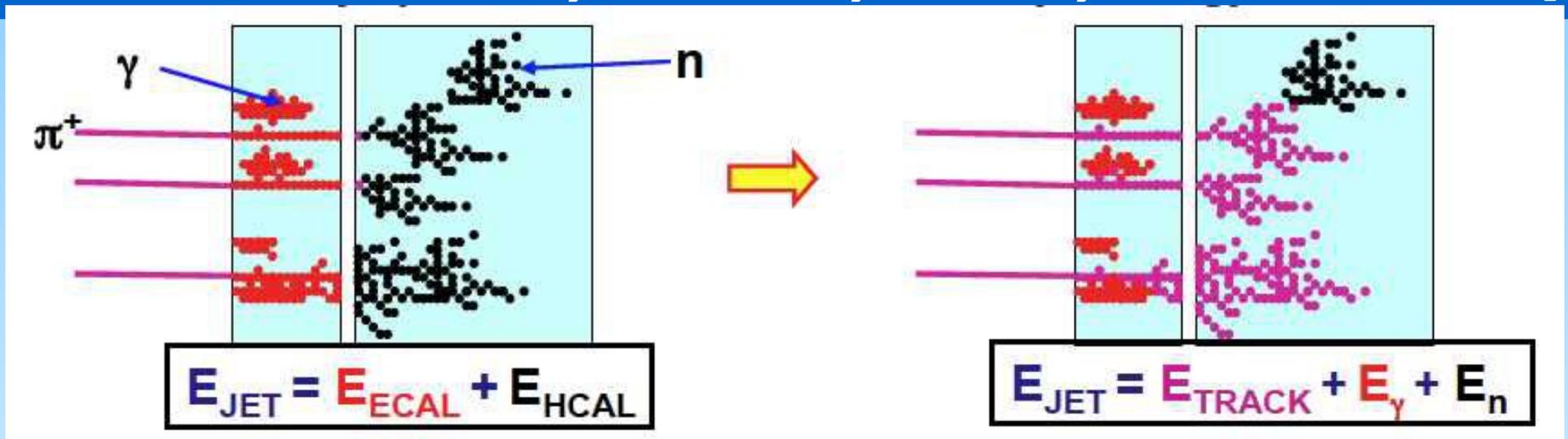
- recherche «exotique»

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

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

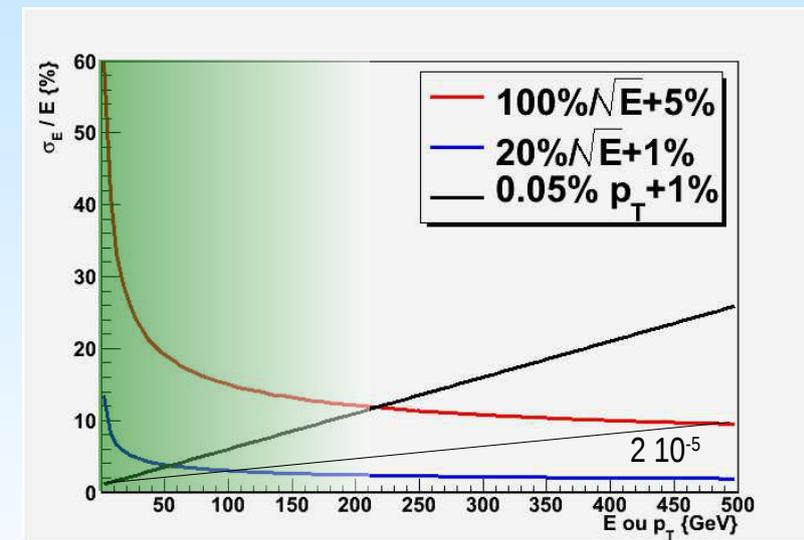


Matériel pour le Particle Flow (pour ILC/CLIC, CEPC, FCC, HL-LHC...)

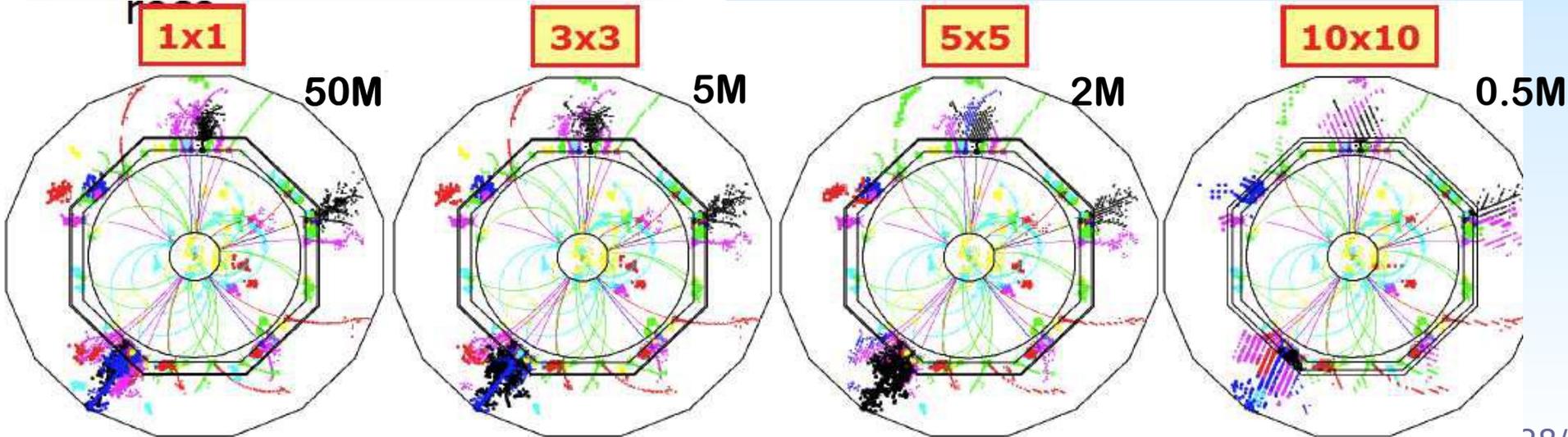
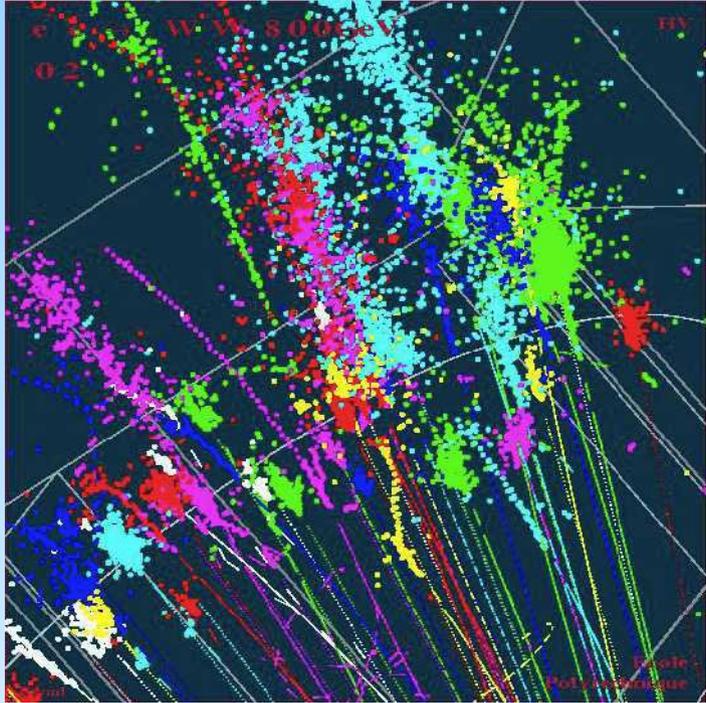
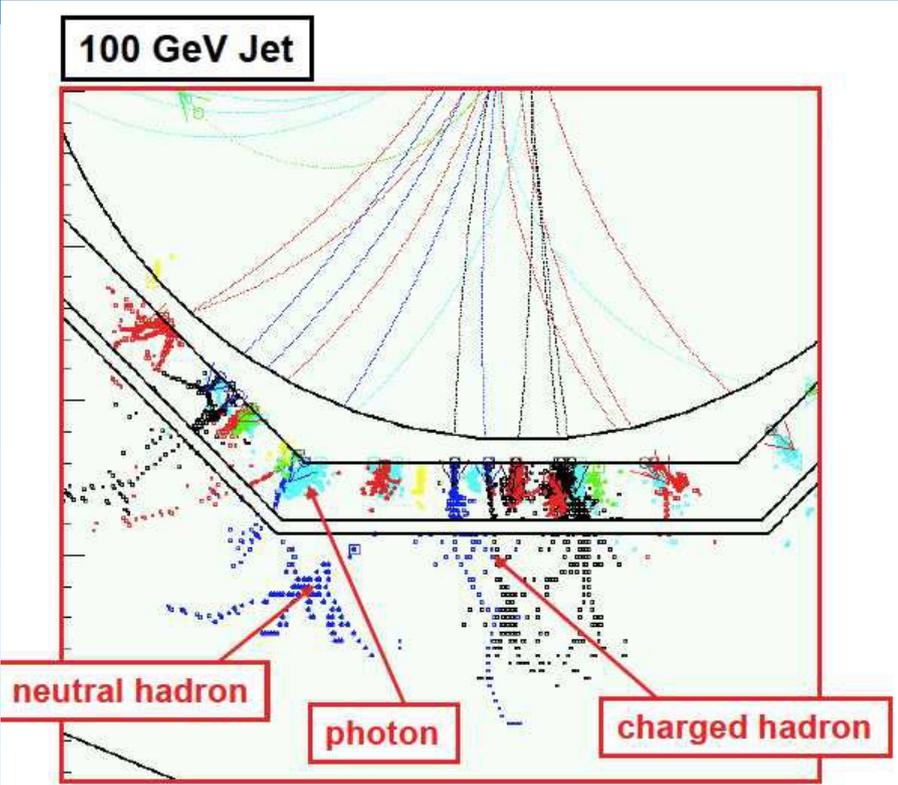


M. Thompson

- 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^0_L) dans le HCAL
- ⇒ Bien meilleure résolution !!
- Besoin d'une excellente granularité
- Logiciel sophistiqué



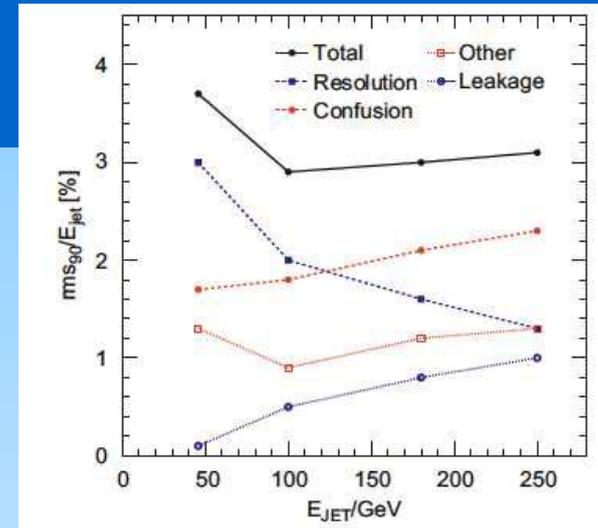
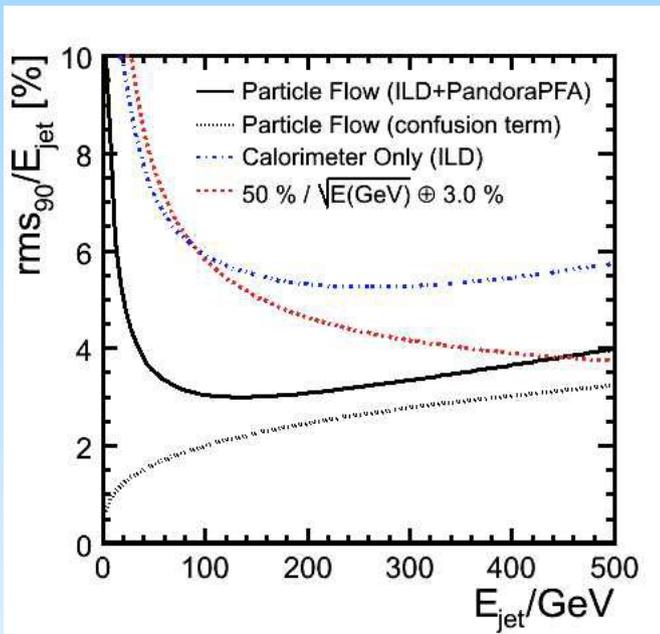
Une question de granularité



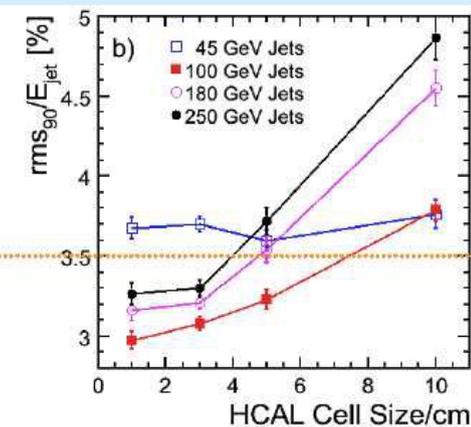
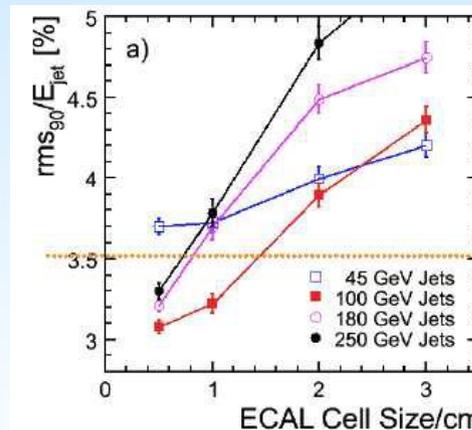
Performances du PFA (pour les jets)

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

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 ⚠

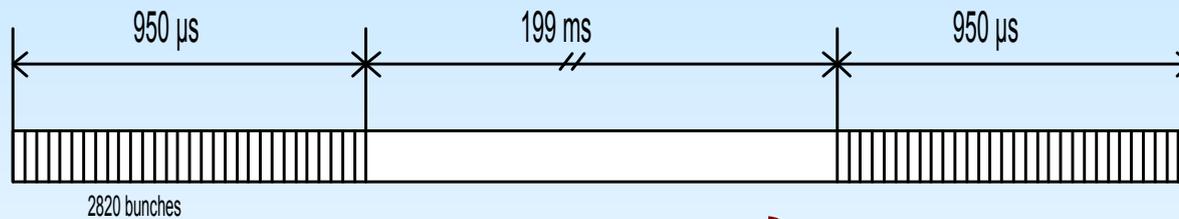


ILC Goal

La calorimétrie à haute granularité

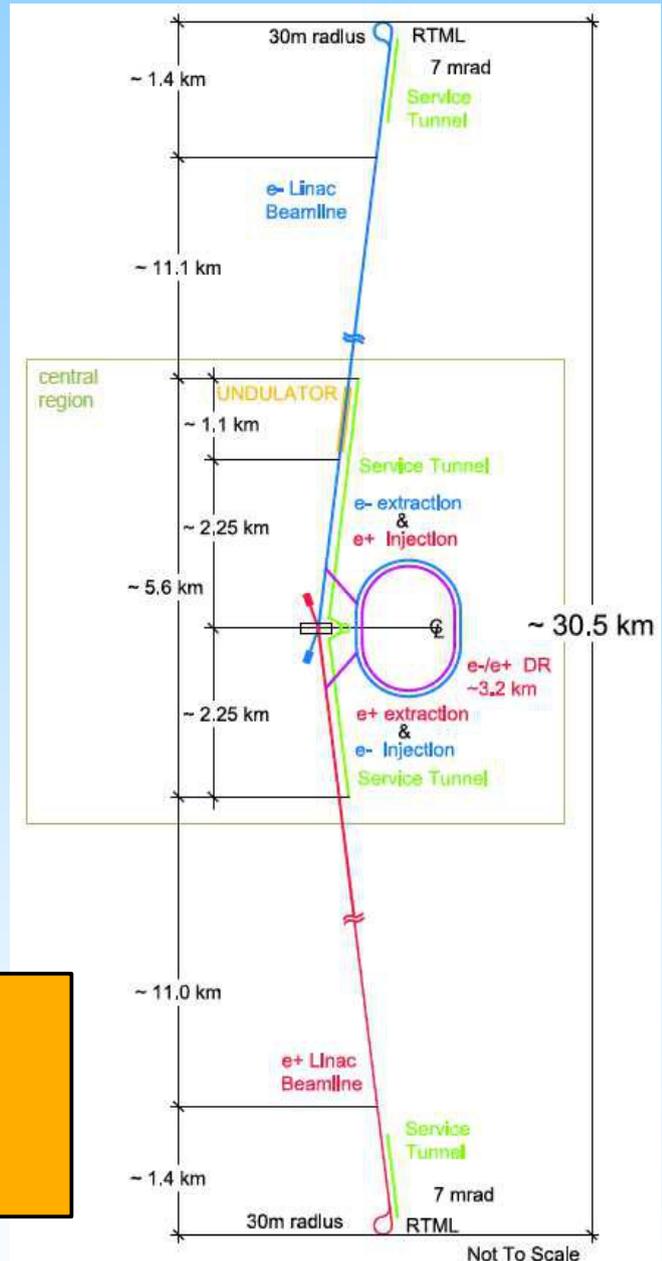
Paramètres ILC (~2027-28)

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



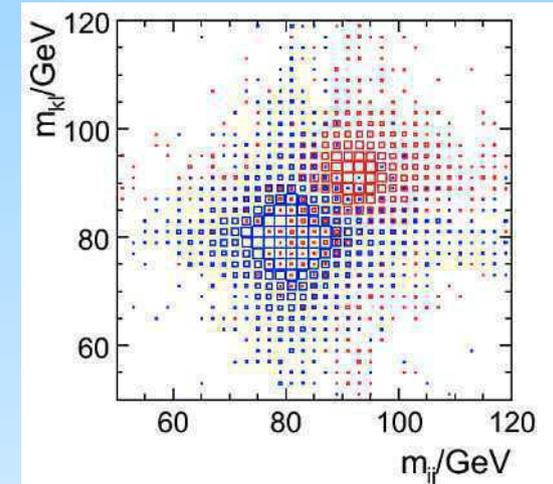
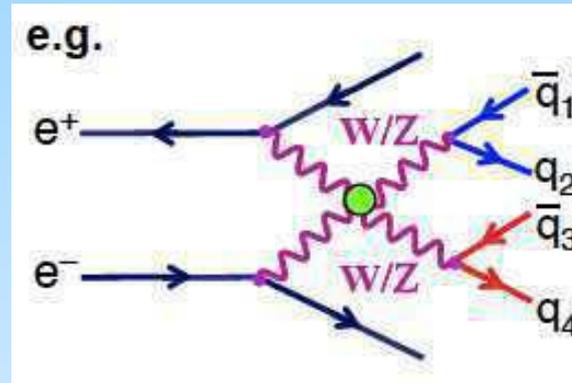
Contrainte pour les détecteurs (ILD / SiD pour l'ILC)

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

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

⇒ σ_E/E (jets) < 3.8%

▶ Sign $\sim S/\sqrt{B} \sim (\text{resol})^{-1/2}$
 $60\%/\sqrt{E} \rightarrow 30\%/\sqrt{E} \Leftrightarrow +\sim 40\% L$



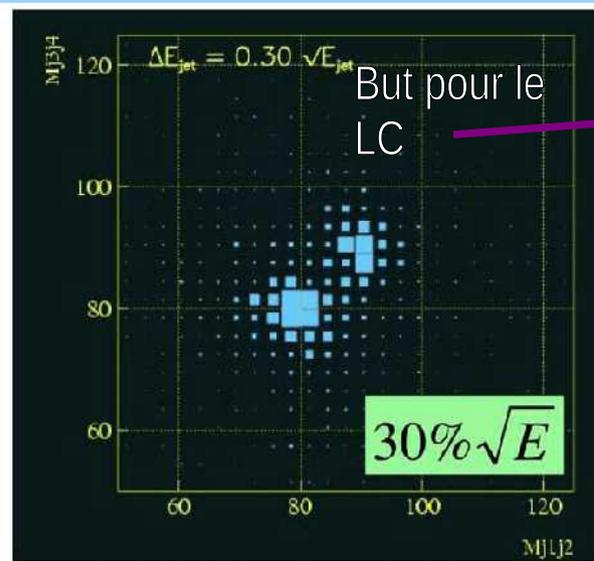
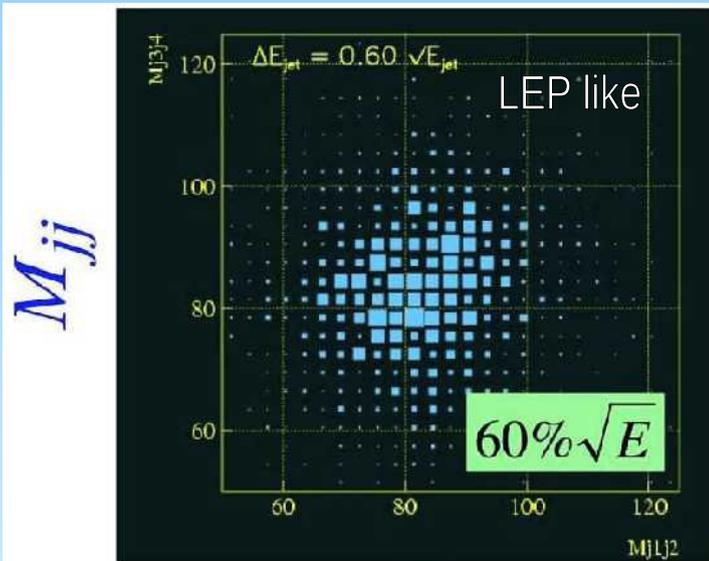
- Large TPC
 - ▶ Precision and low X_0 budget
 - ▶ Pattern recognition
- Précision par les détecteurs : vertex (Pixels) & Calo SET (strips)
 - ▶ Étiquetage des hadrons de b et c
- Large acceptance
- Fwd Calorimetry:
 - ▶ lumi, veto, beam monitoring

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.

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

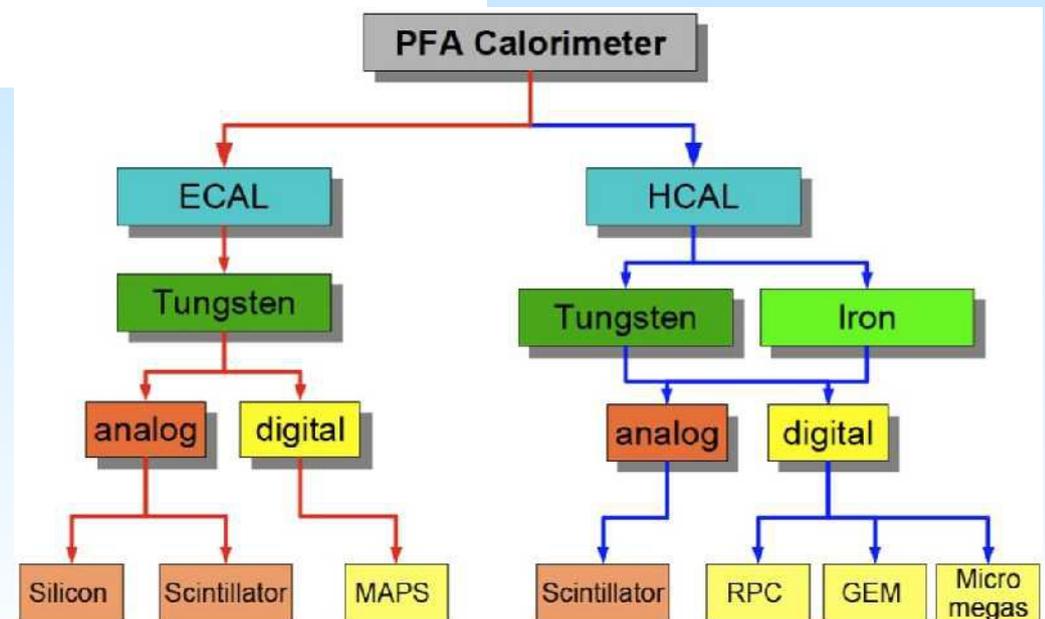


Collisionneur e^+e^-
(FLC, JLC, TESLA)
ILC : 0.5 – 1 TeV
CLIC : 1 – 3 TeV

M_{jj}

Collaboration CALICE

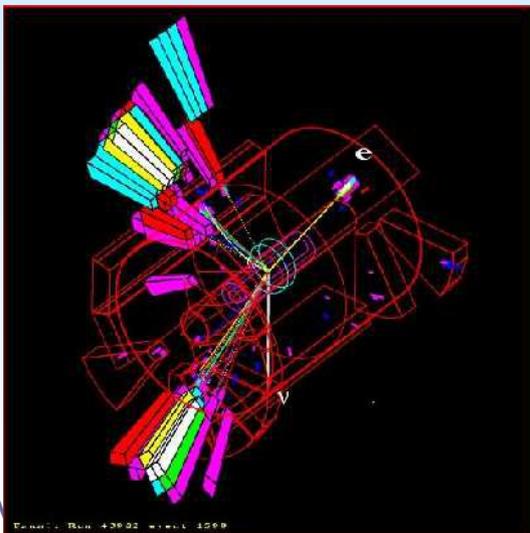
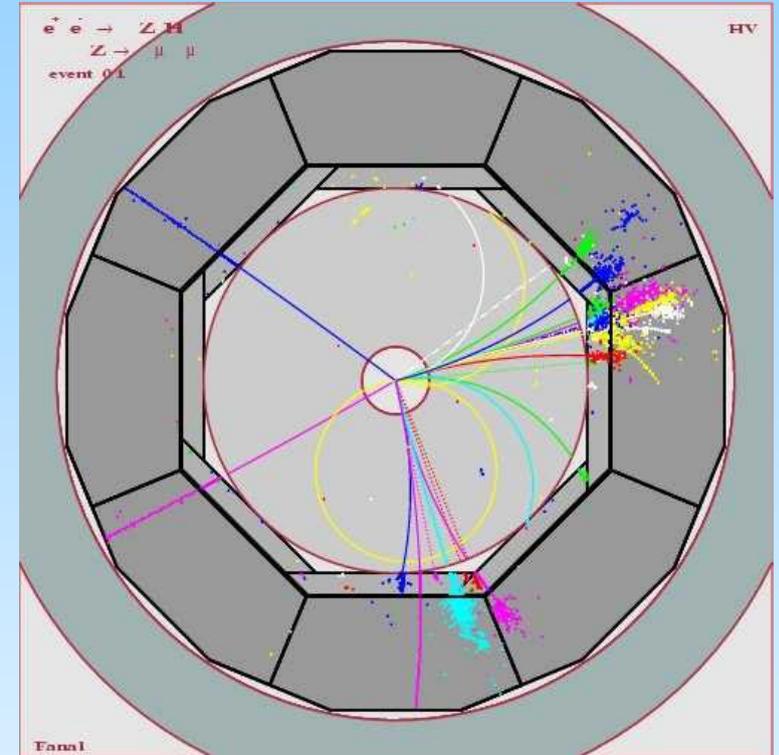
- mostly ILD, SiD
 - ILC, CLIC
- Test de prototype
- Physiques
 - technologiques
 - Analogique & digital



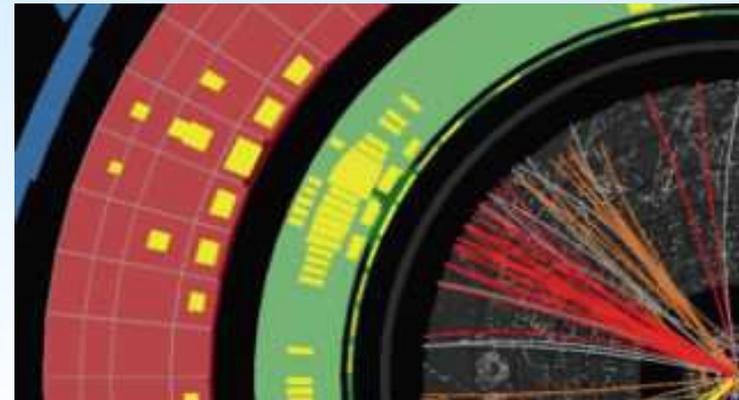
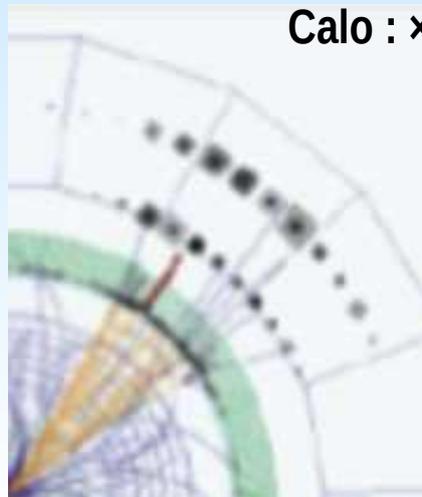
Augmentation de la granularité

F. Decamps (ATLAS & CMS : chiffres L0)

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 : $\times 1000$!



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

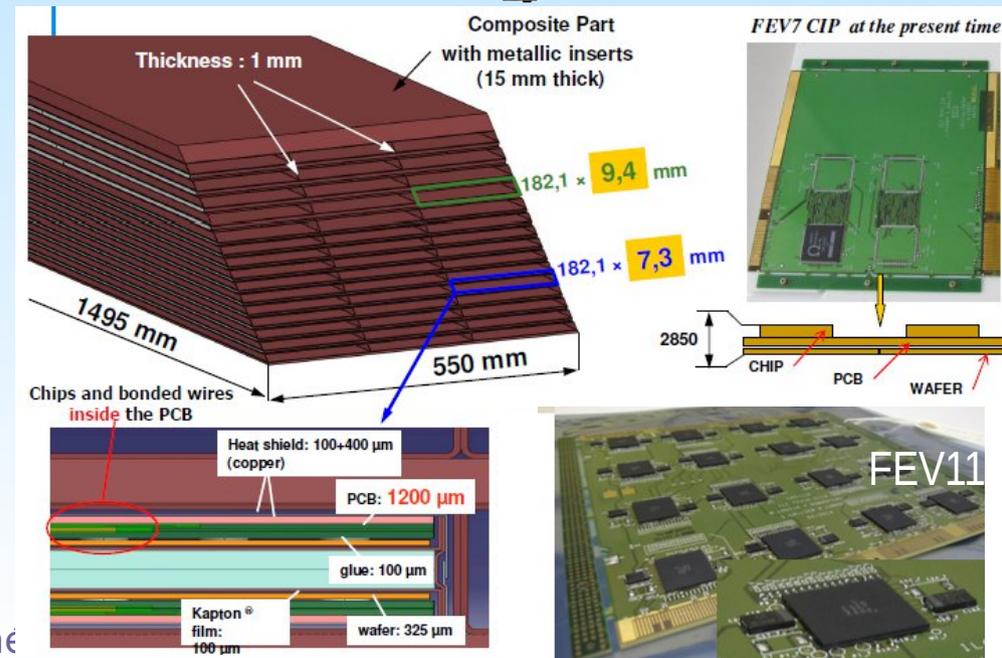
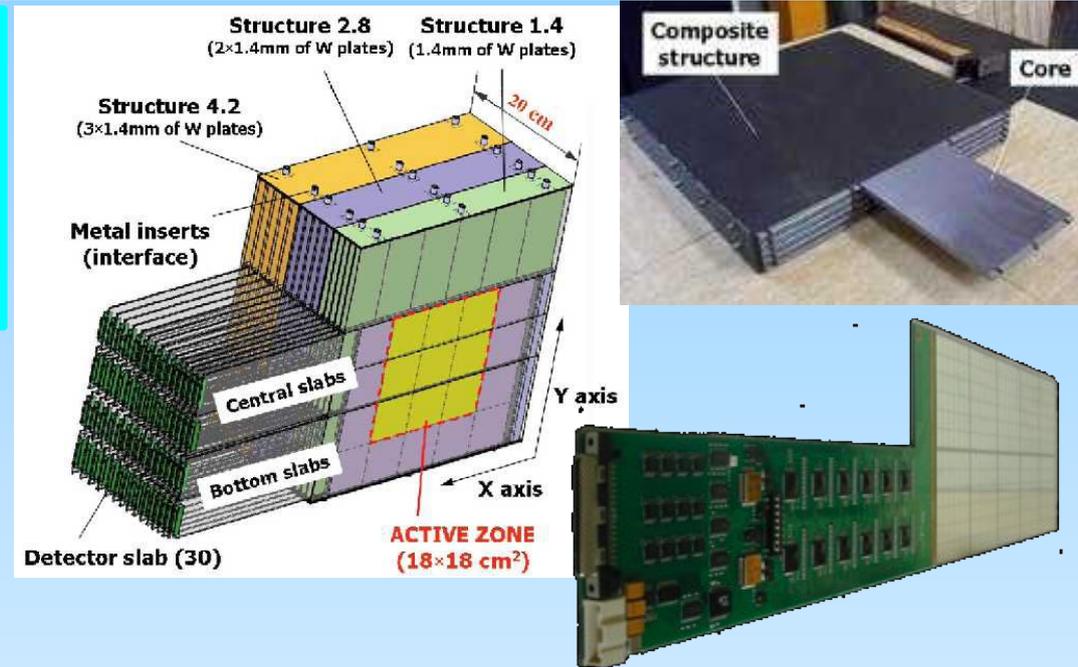
Motif

Les détecteurs au Si sont compacts: car ~ 100 paires par 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 : 5 \times 5 mm^2
→ Electronique enfouie

Très bonne efficacité de reconstruction des photons dans un environnement chargé



SKIROC : ECAL readout

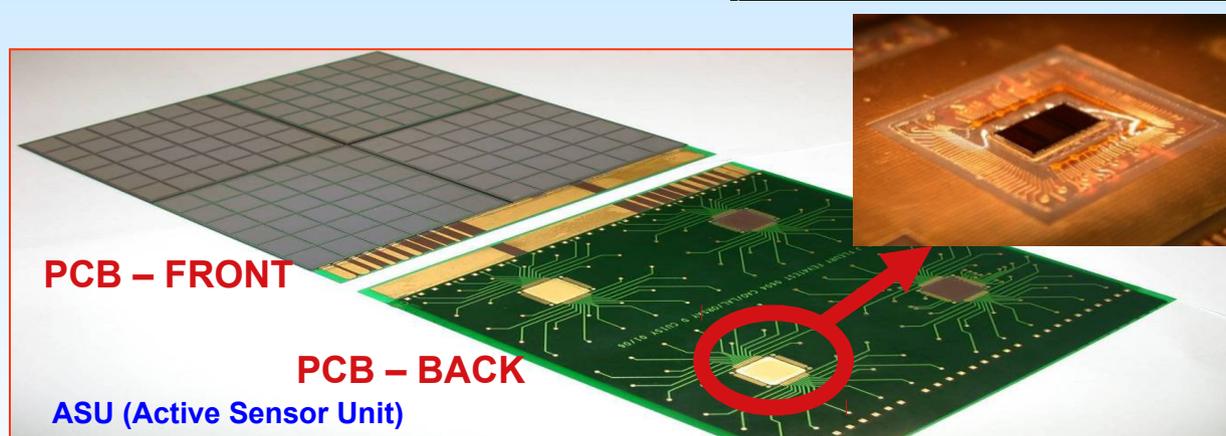
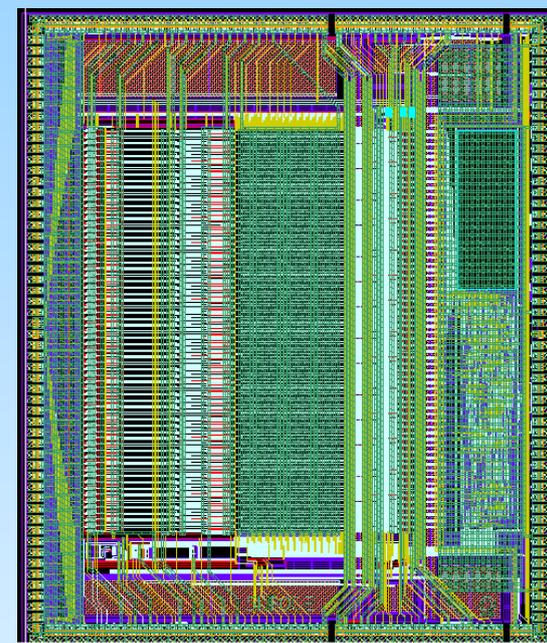
- SKIROC2 : Silicon Kalorimeter Integrated Read-Out Chip

- ▶ 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

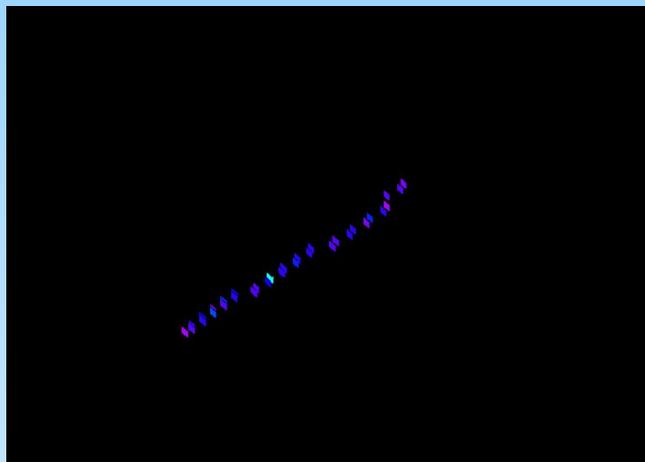
- Front End boards crucial element

C detector with PCB \approx 20 pF

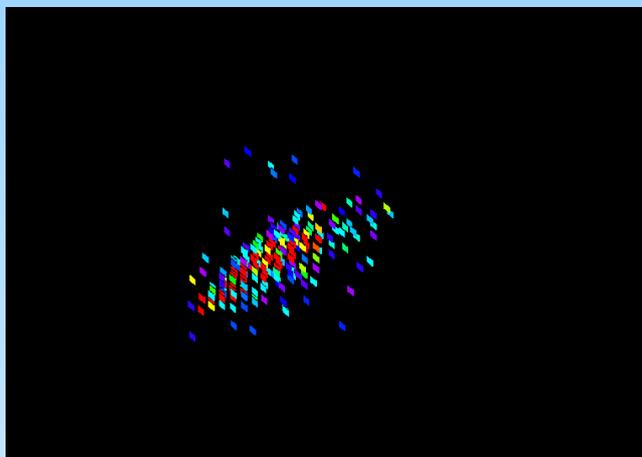
Ω mega



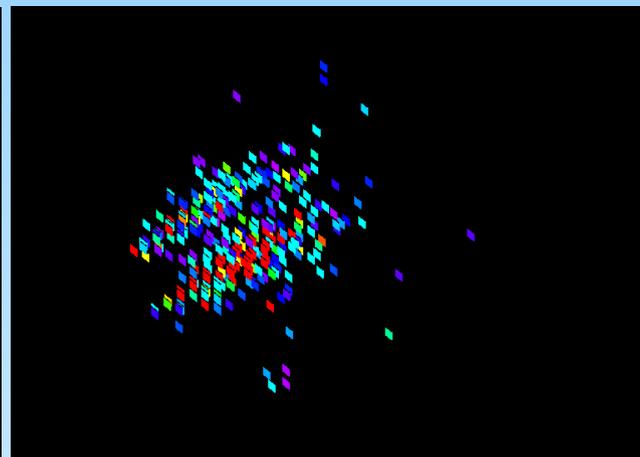
Quelques événements (test en faisceau) dans le Si-W CALICE



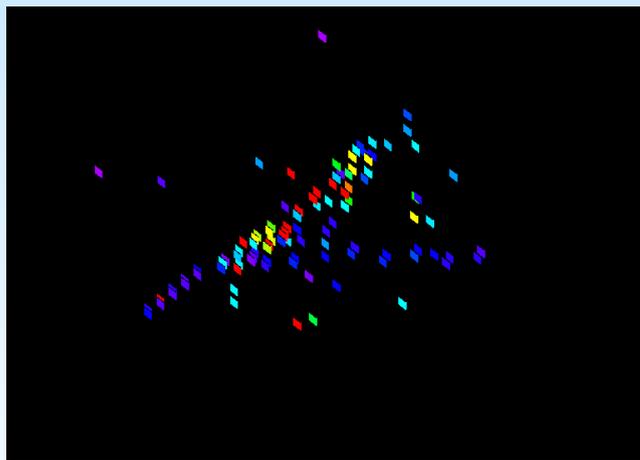
Un μ ou un π



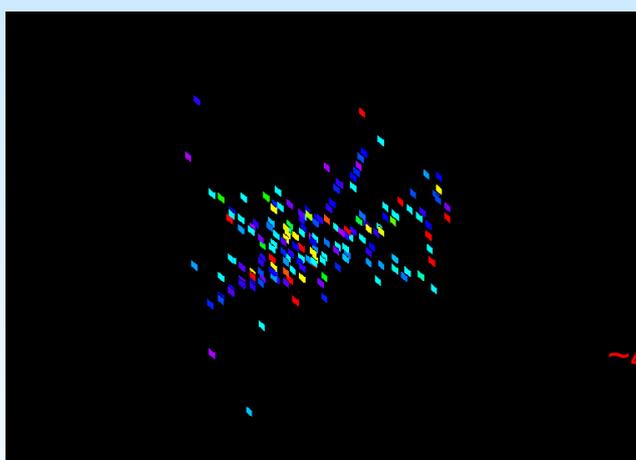
Un e^- ou un γ



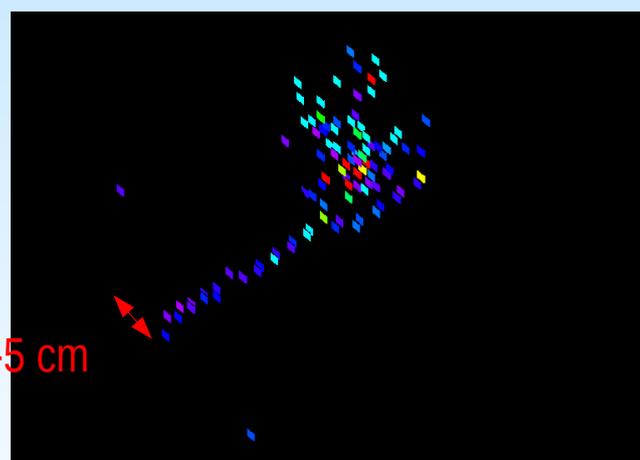
2 e^-



Un hadron (π)



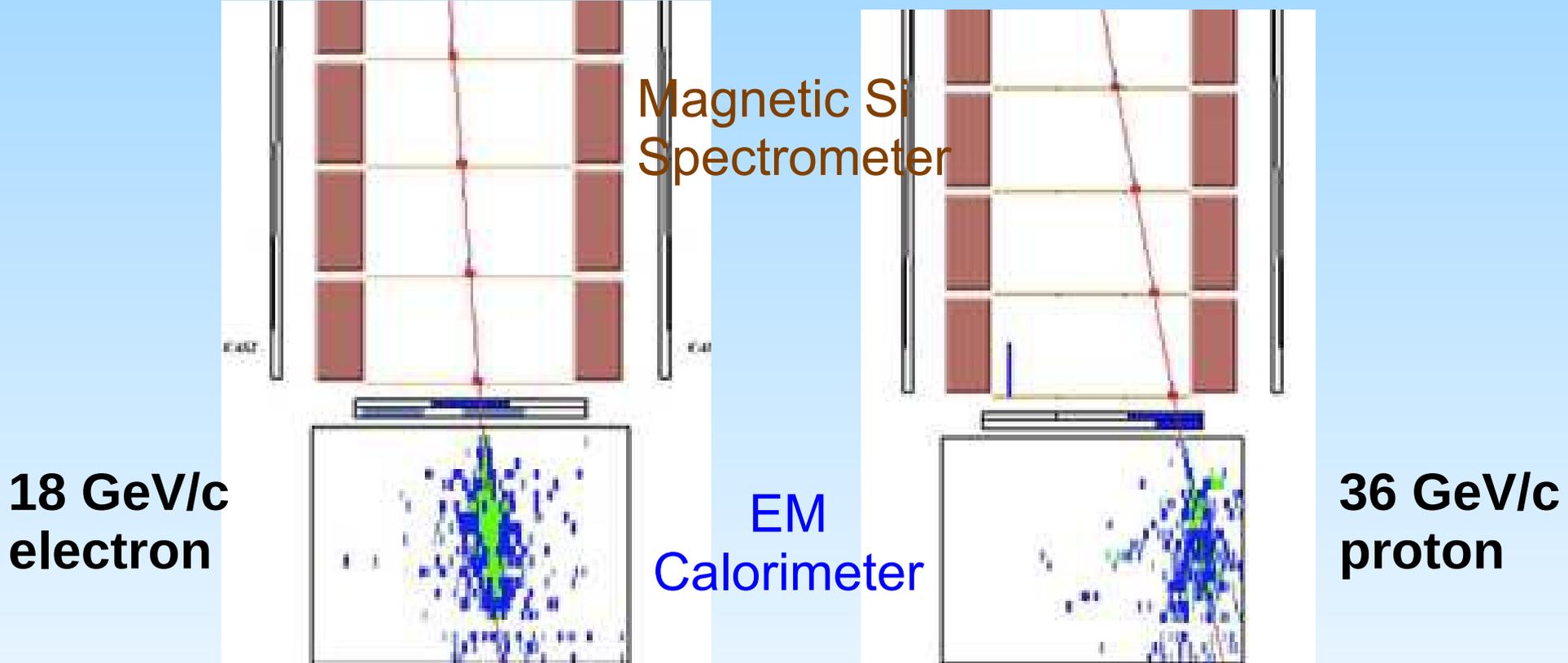
Un hadron
(avec composante EM)



hadron chargé
& h. chargé ou μ

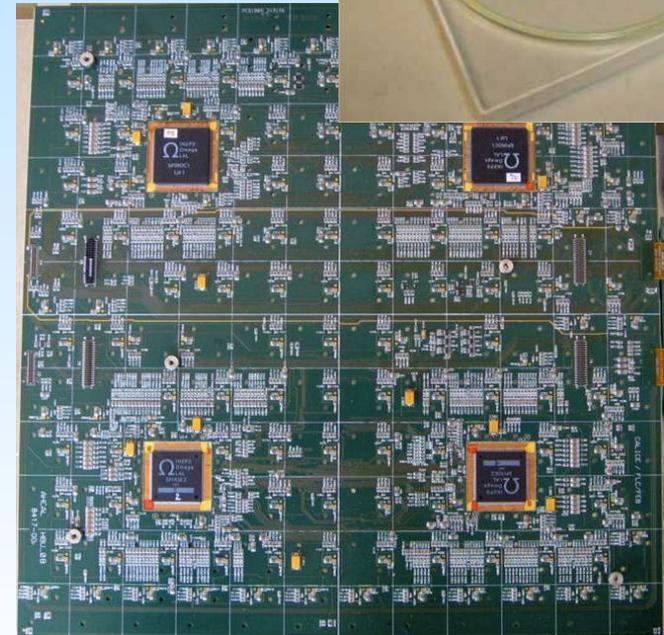
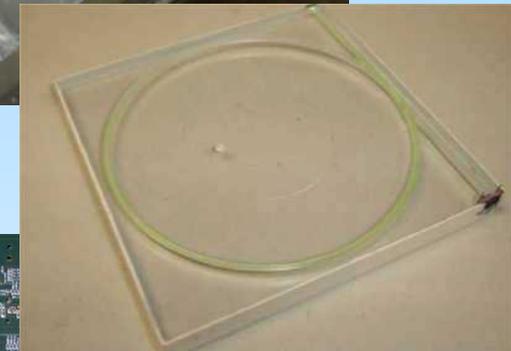
SiW ECAL : Pamela

Satellite mesure de Matière noire



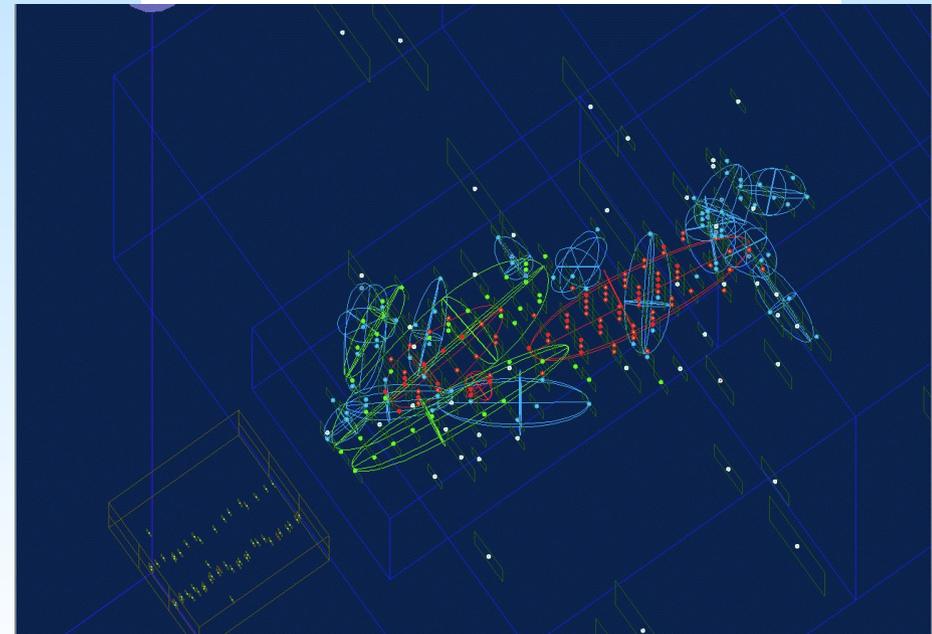
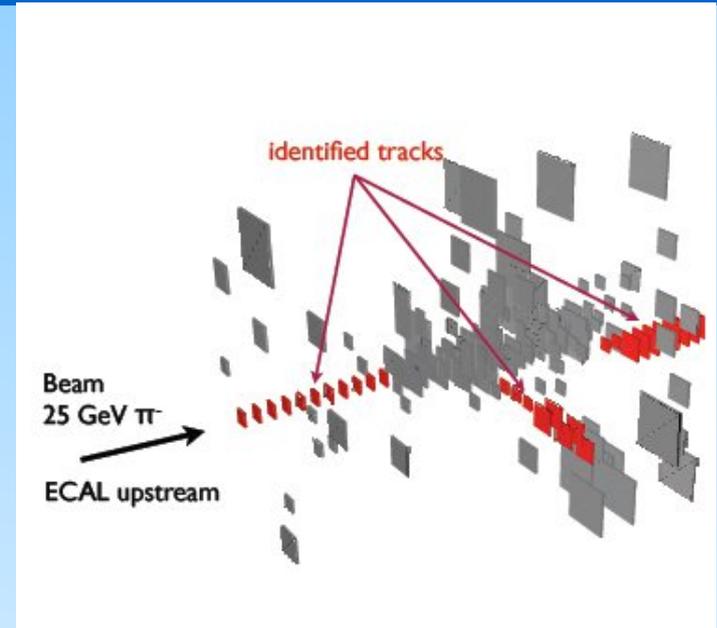
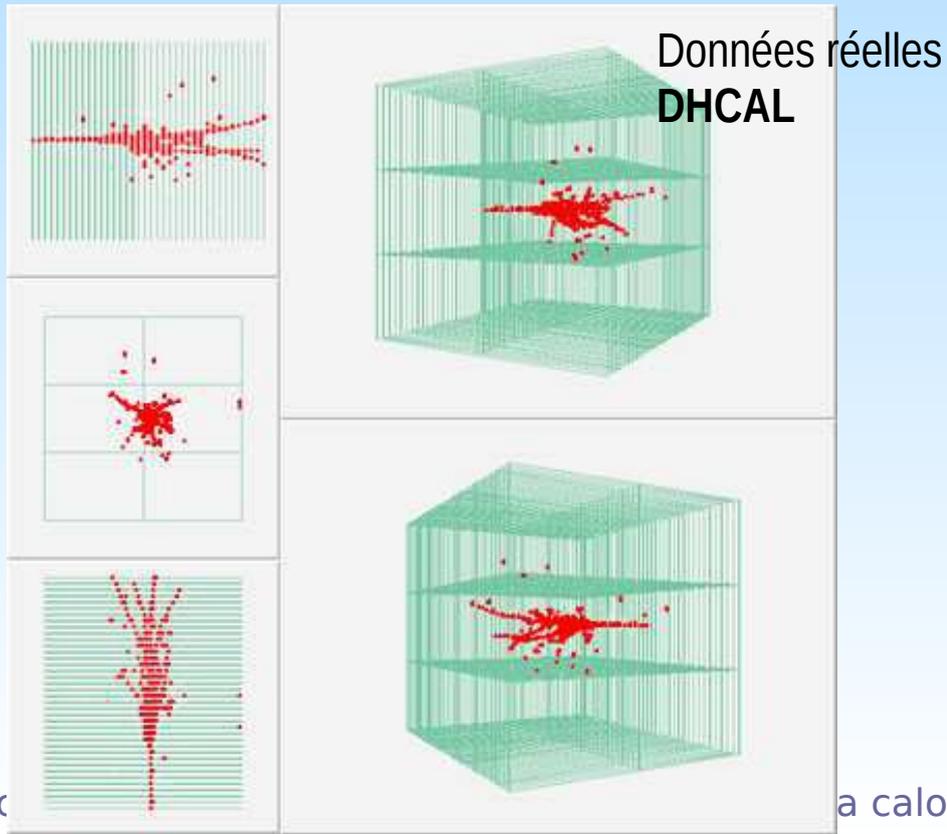
AHCAL & SDHCAL : Fe-Scint & Fe-RPC

- 38 couches 2 cm acier + tuiles scint de $3\text{mm} \times 3 \times 3\text{cm}^2$
- 48 couche de 2cm acier + RPC $1,2\text{mm} \times 1 \times 1 \text{cm}^2$
lecture digitale ou semi-digitale → 400 000 canaux

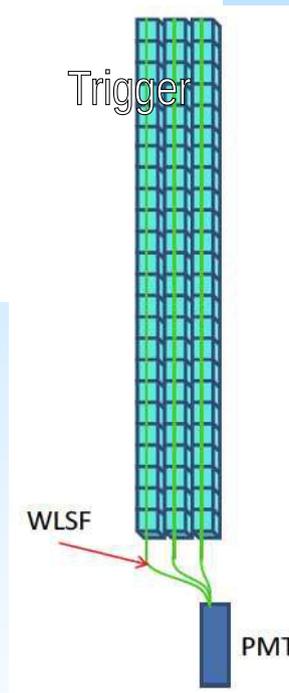
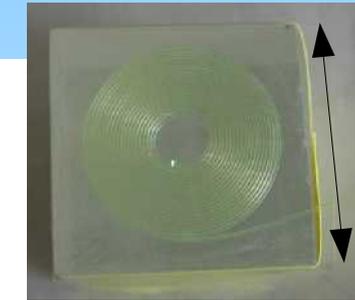
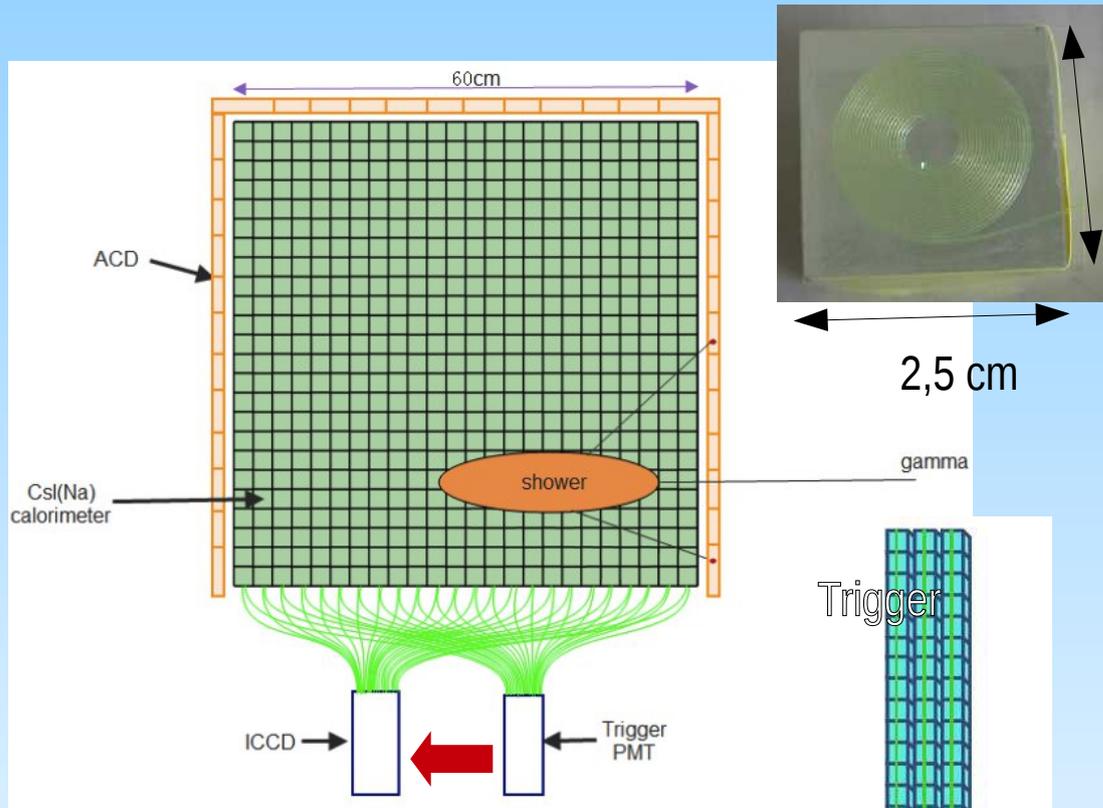


Tests en faisceau

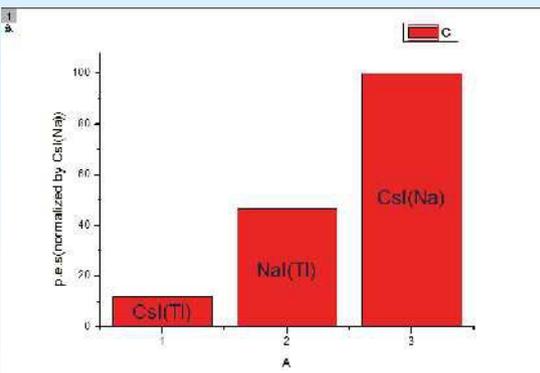
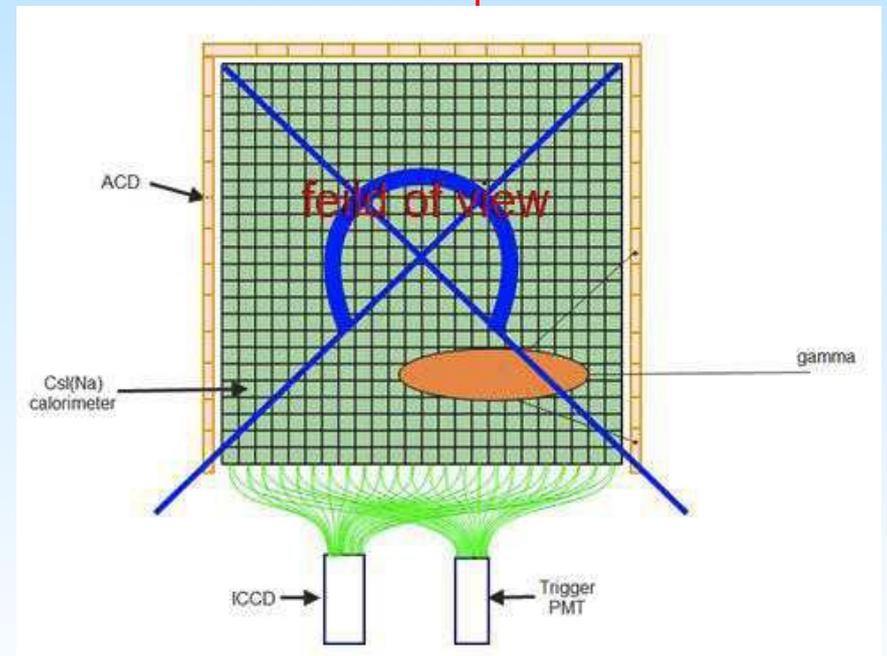
- Validation technologique
 - ▶ électronique enfouie
 - ▶ refroidissement, power-pulsing ...
- test des performances de physique pure
- Amélioration des Monte-Carlo → PFA
- test des algorithmes



Calorimétrie digitale homogène



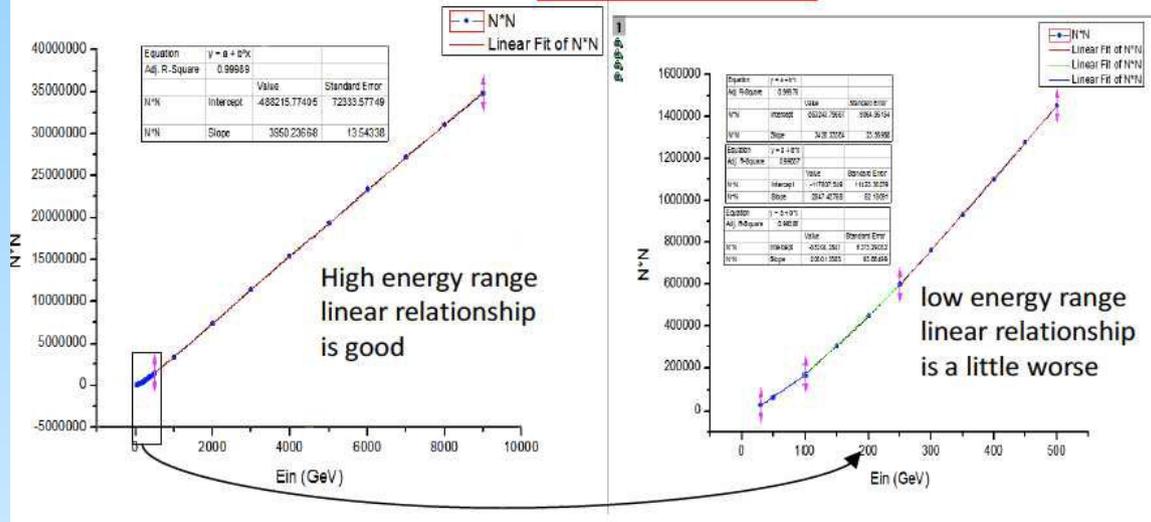
- Proposition IHEP Beijing
- Satellite → Recherche de matière noire (DM)
 - ▶ WIMPs ; $10 \text{ GeV} < m < 10 \text{ TeV}$
 - ▶ DM+DM → $ee, \gamma\gamma, \dots$
- ECAL $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$
 - ▶ recherche de pic



Calorimétrie (Semi)Digitale

From the MC data we found the relationship is:

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

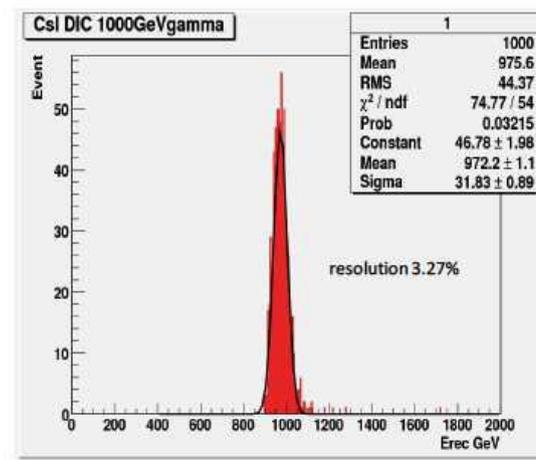


Si la taille des cellules est suffisamment petite

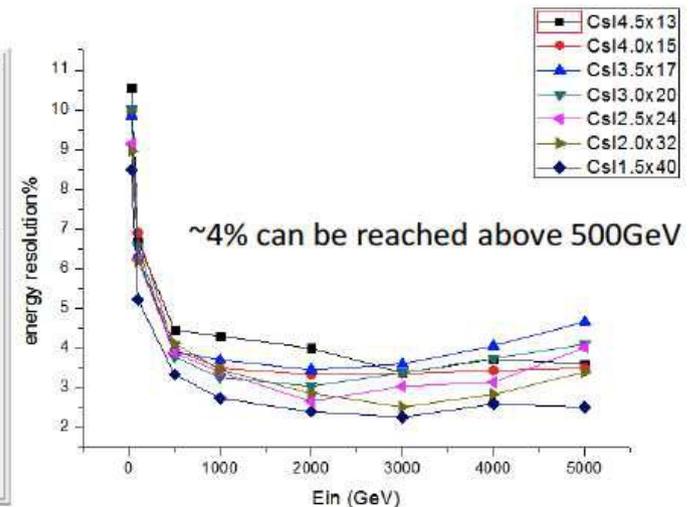
Comptage de cellule
≡ mesure !!!

REM : Vrai aussi pour les gerbes EM de basse E

Angular resolution $\sim 0.5^\circ$

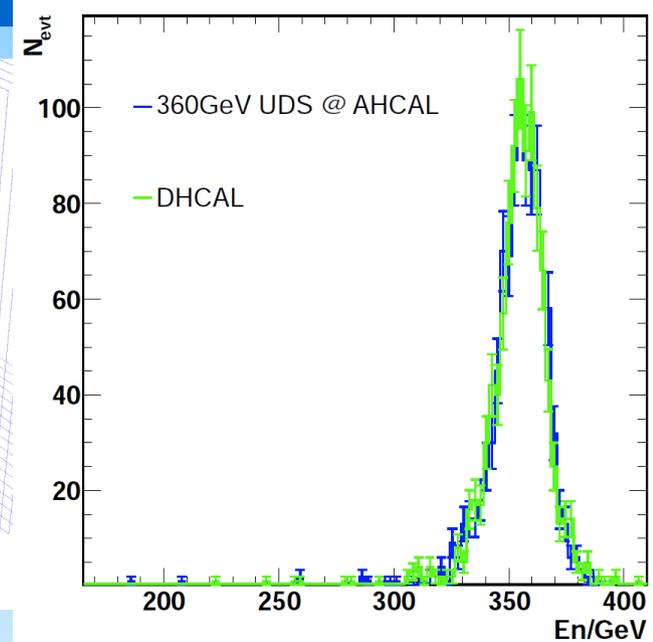
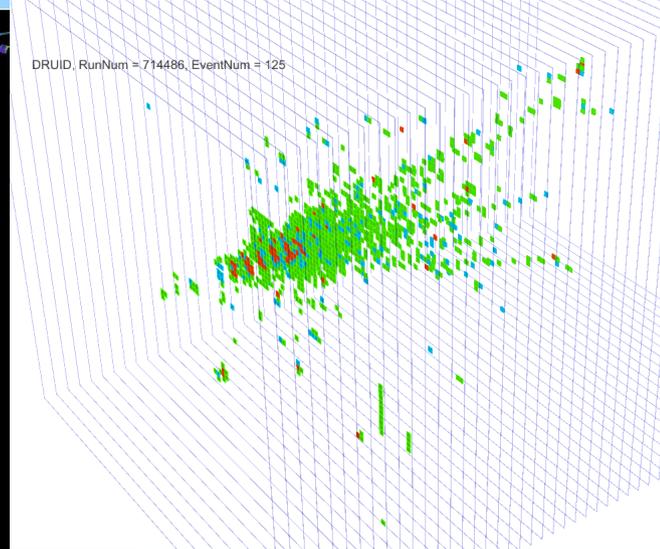
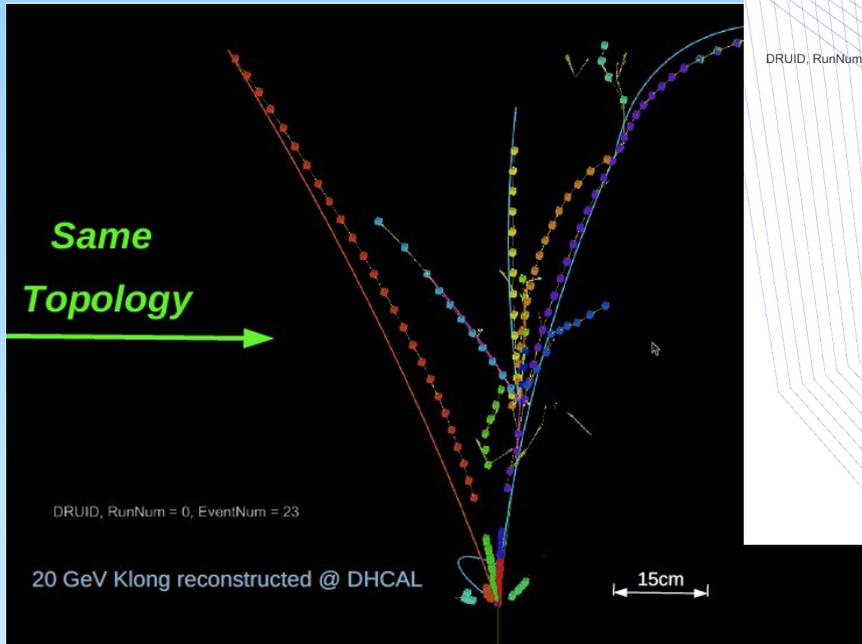


Energy reconstruction distribution of 1000GeV gamma-ray



Energy resolution compare of different granularity 1.5—4.5 cm

Perspective de la très haute granularité

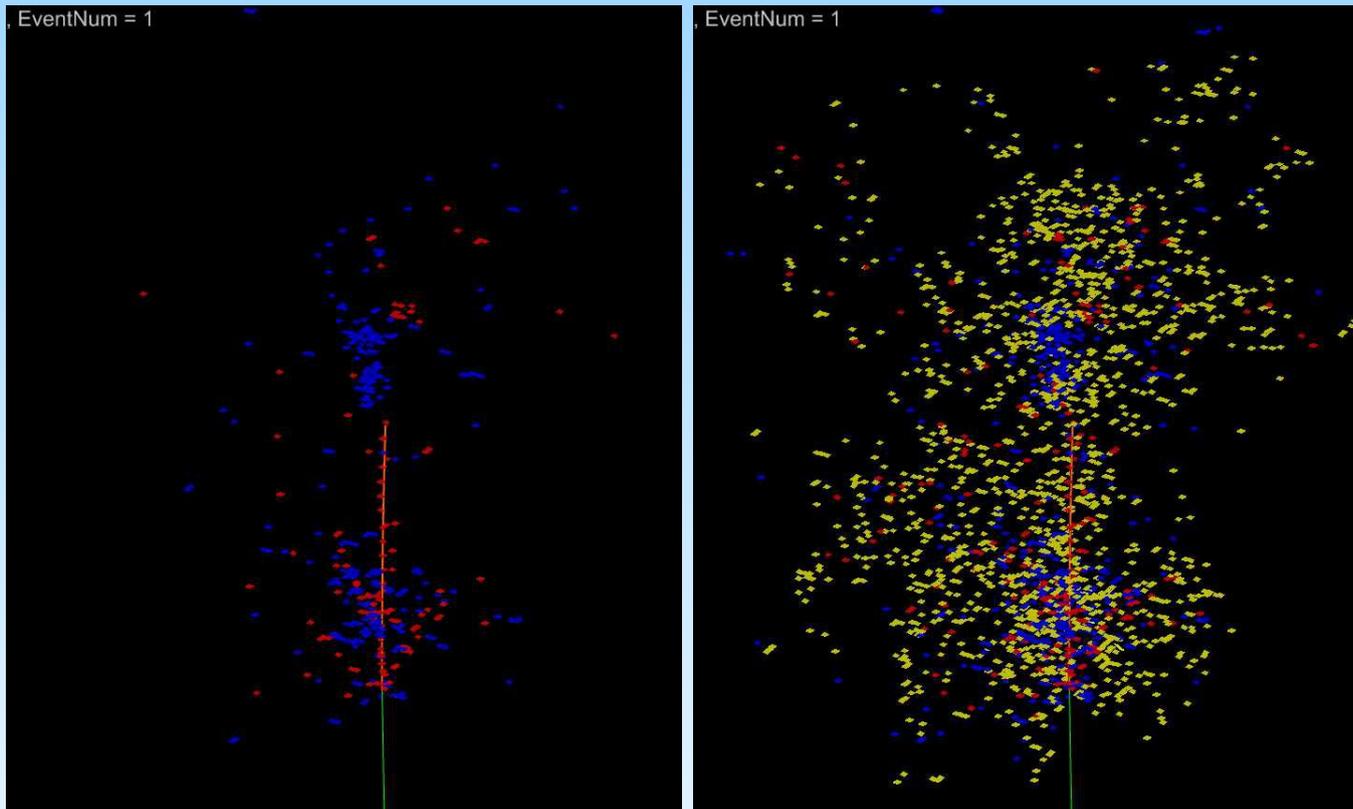


Imagerie calorimétrique

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

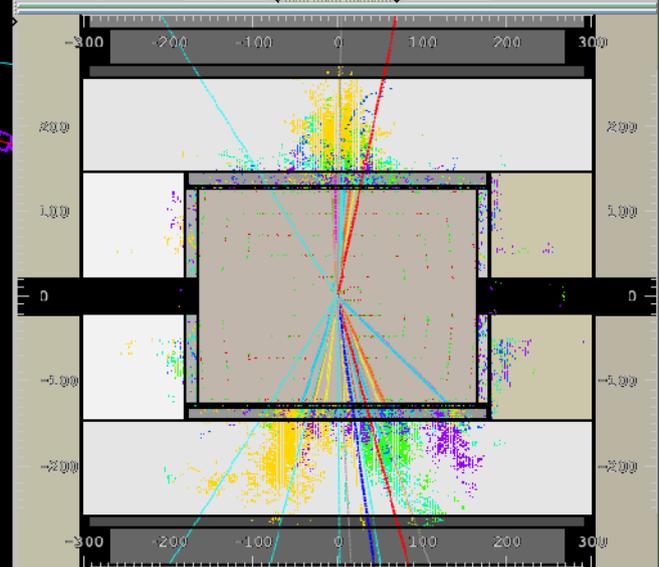
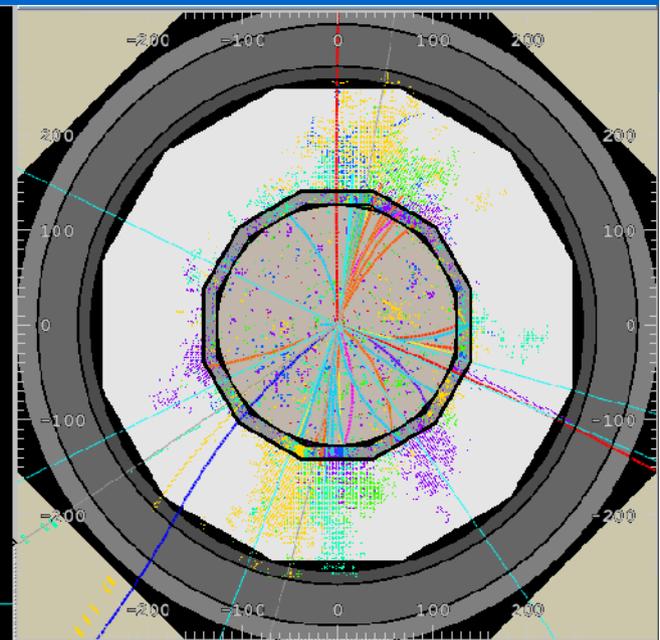
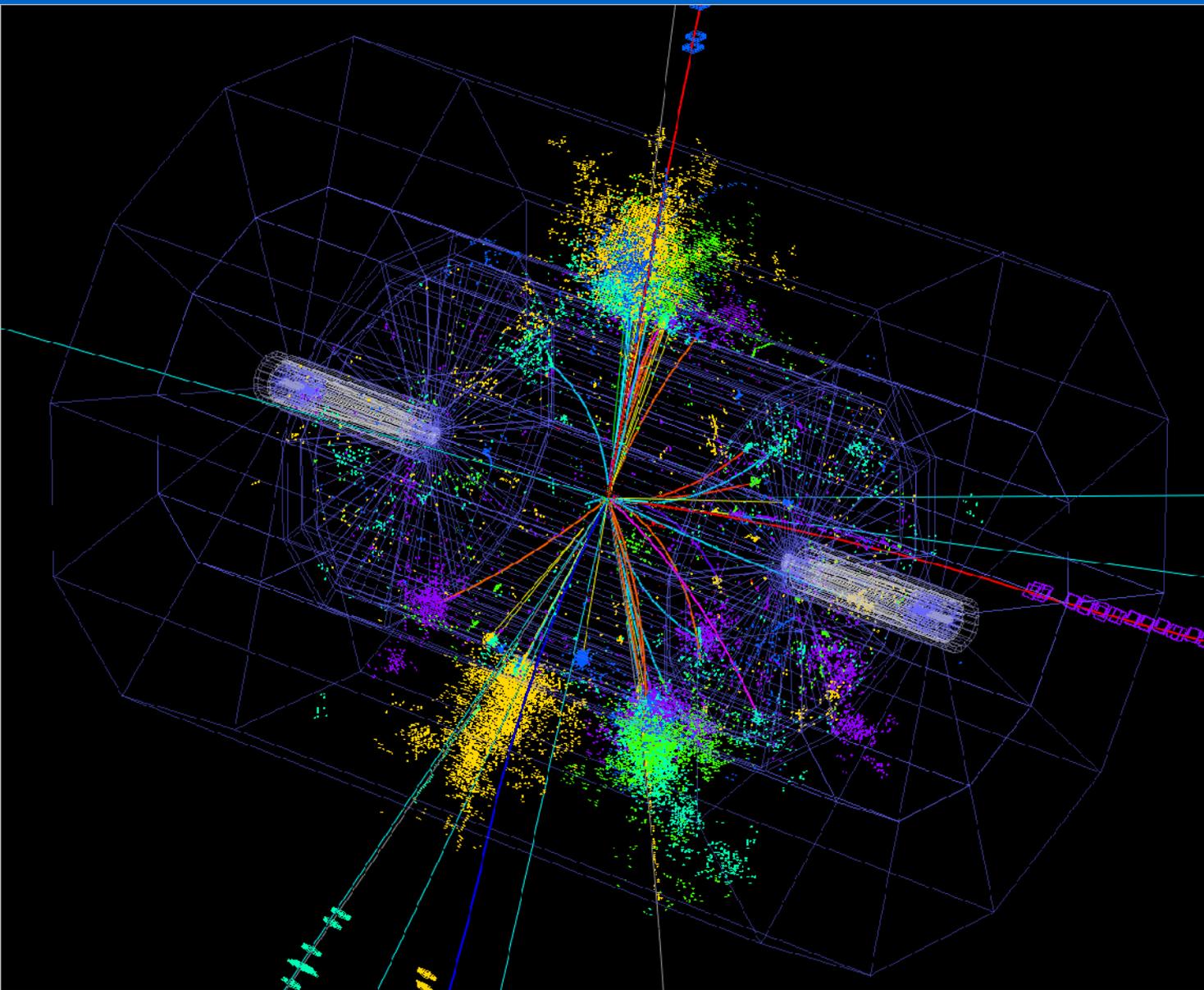


Avec ou sans neutrons ?



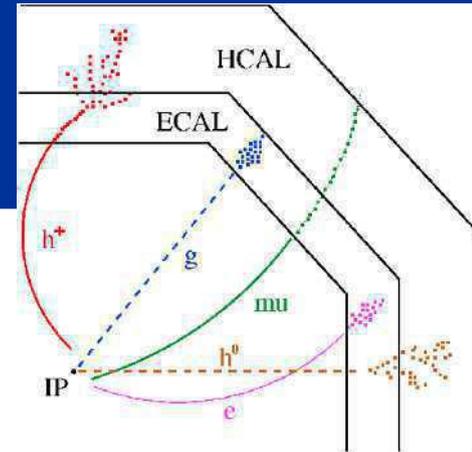
⇔ Capteurs sans ou avec H ?

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



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

Calorimétrie ultra-granulaire



Calorimètres U.G. 1000x 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

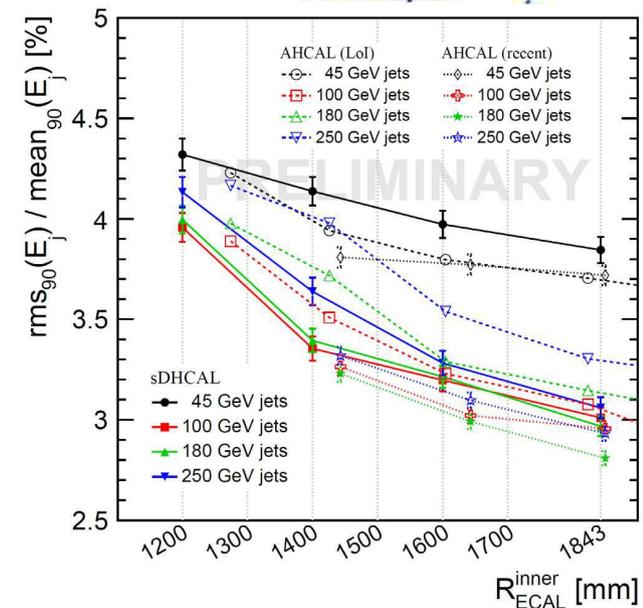
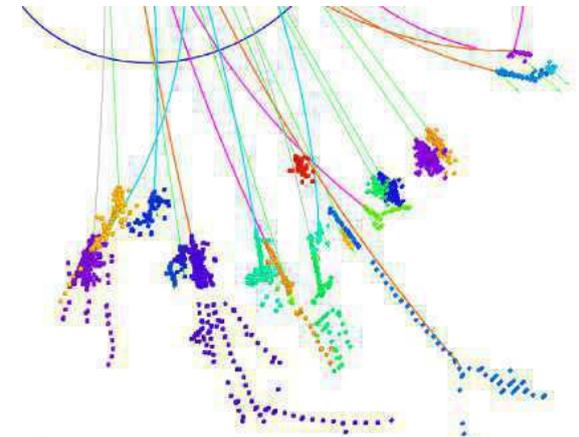
- Costing → Ex Si-W ECAL

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

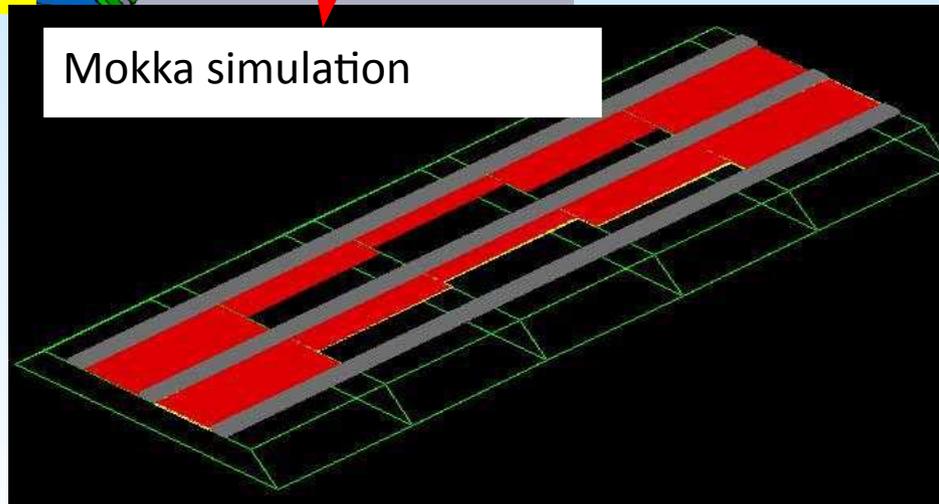
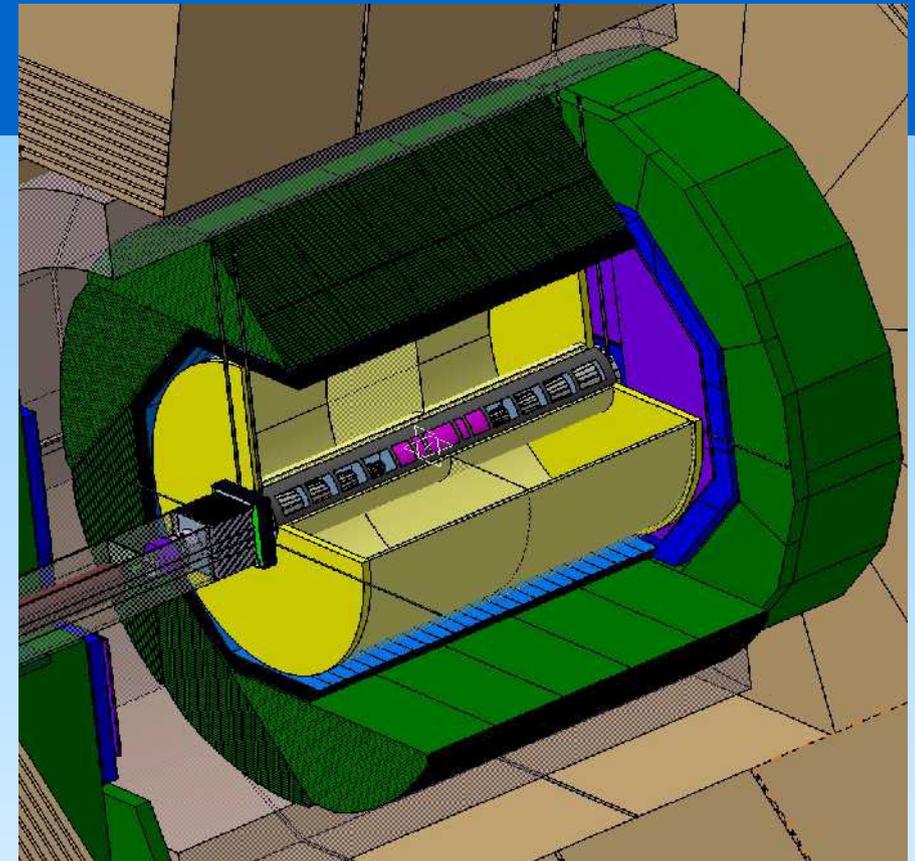
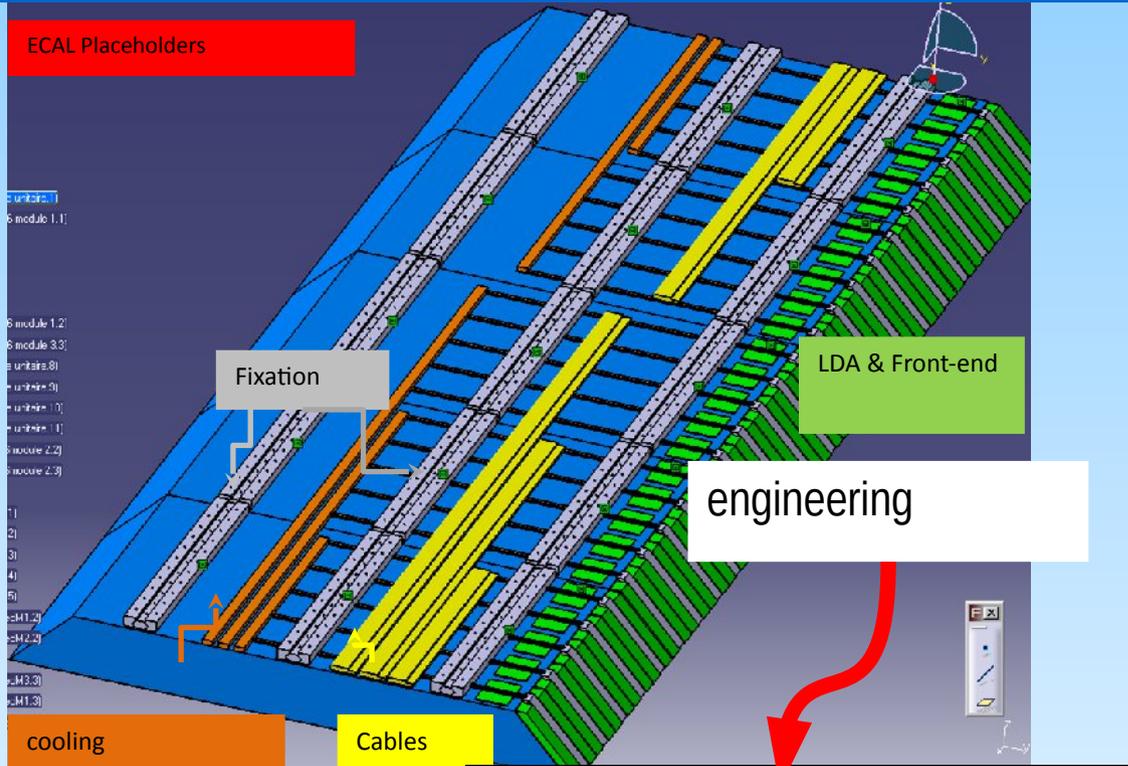
Particle Flow

- Outils de reconstruction PFA :

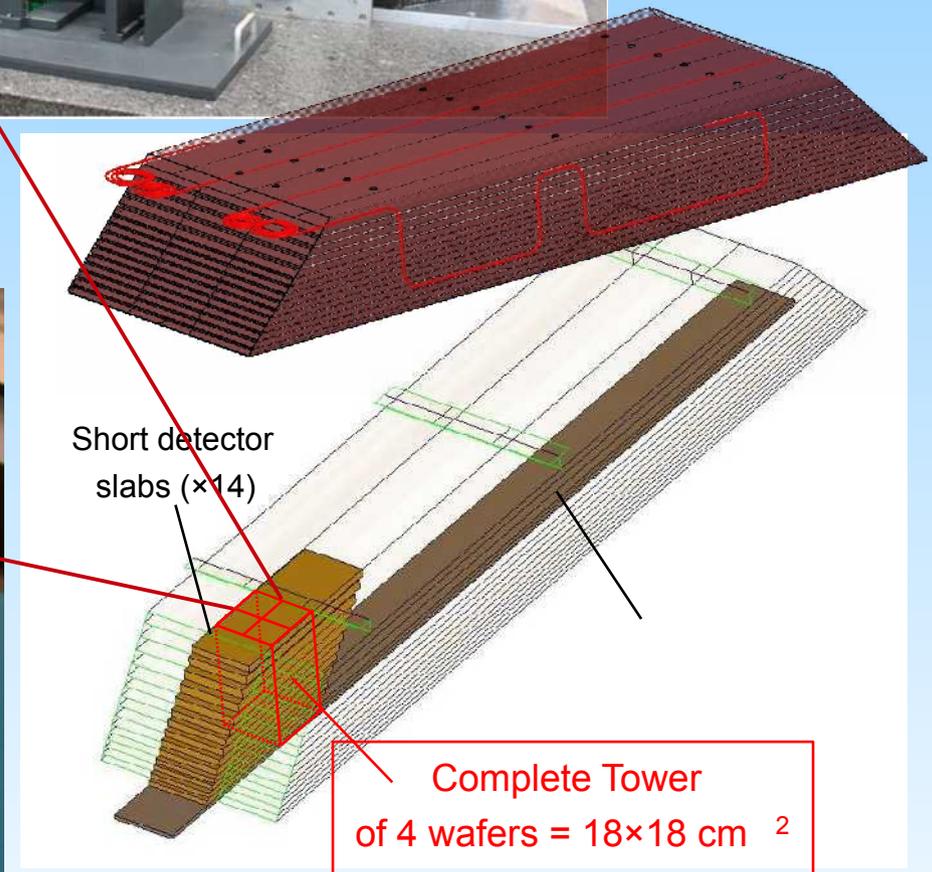
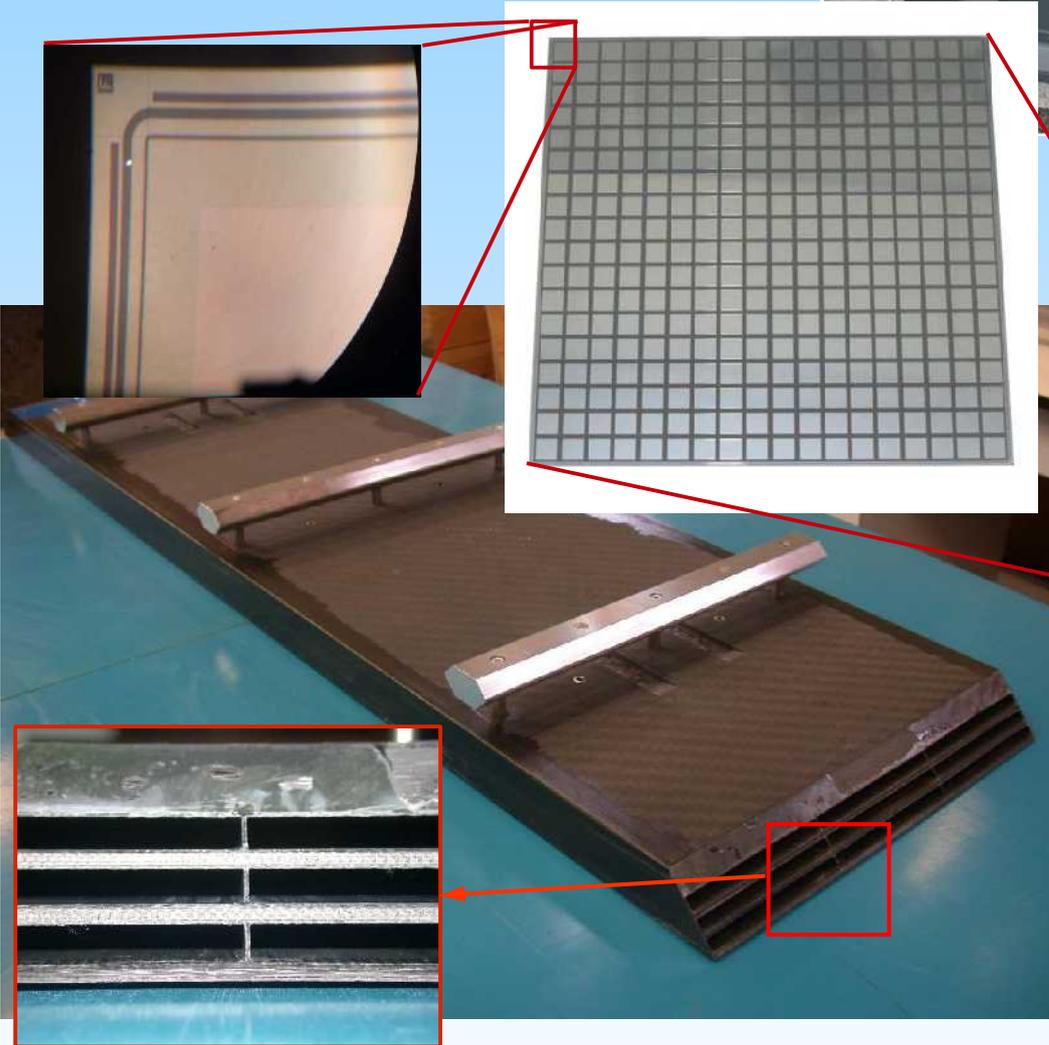
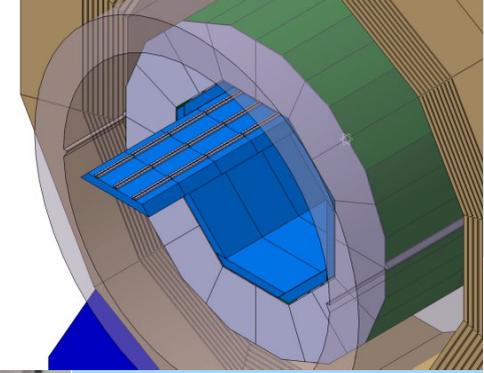
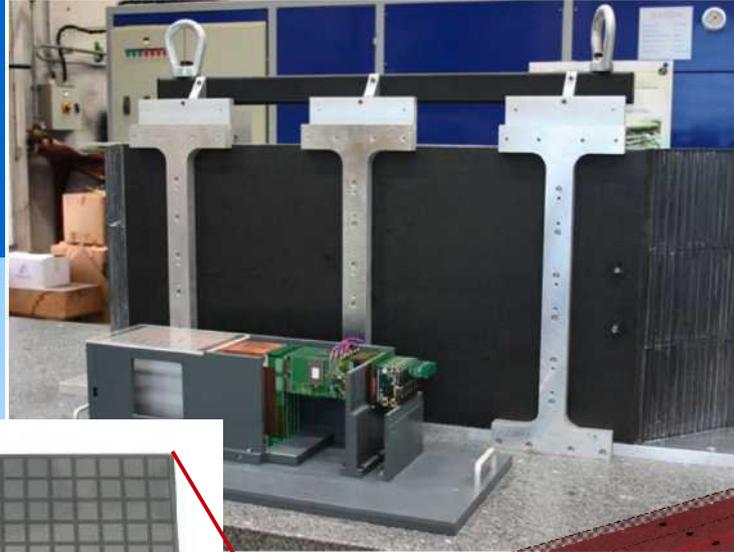
- **Difficulté : perf en JER = HW ⊗ SW**



Simulation ILD



Mécanique



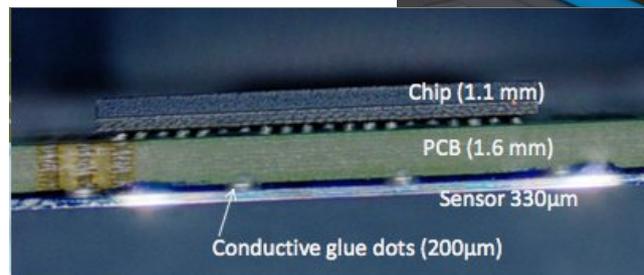
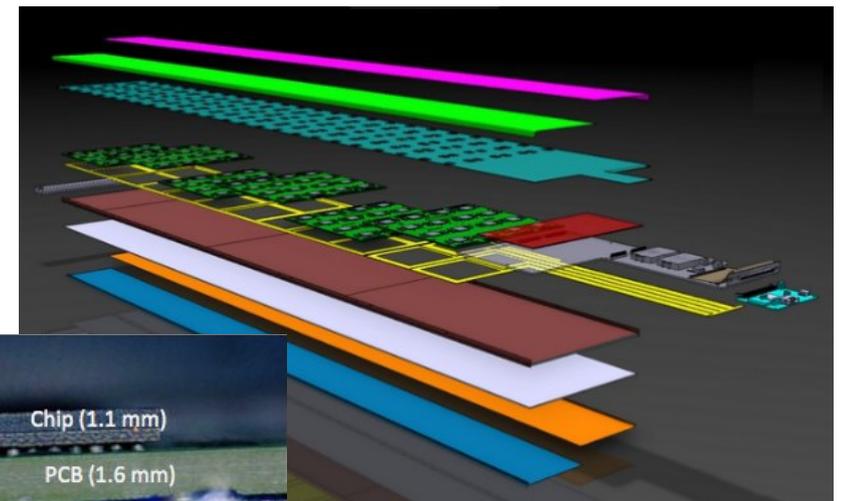
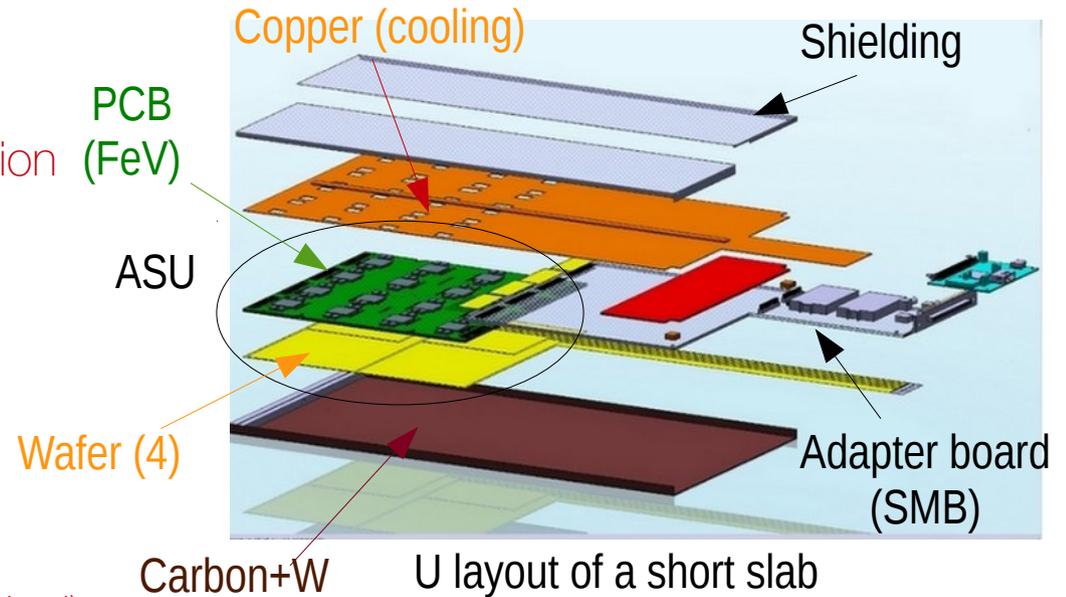
ILD SiW-ECAL R&D

R&D for “mass production” and QA

- Quality tests & preparation of large production
- Modularity → ASU & SLABs
 - Choice of square wafers (≠ from hex: SiD, CMS HGCal)

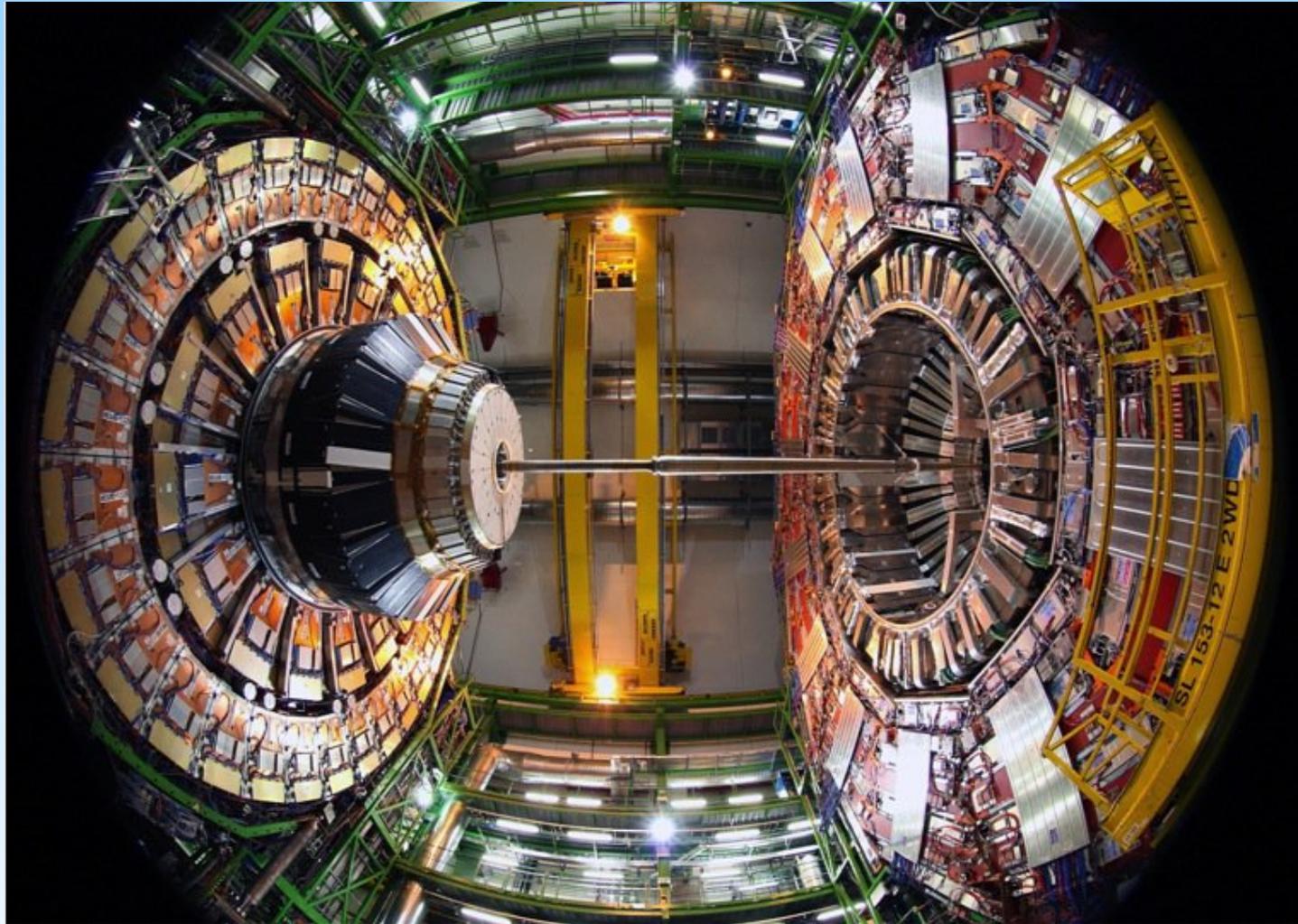
Numbers ($R_{\text{ECAL}} = 1,8 \text{ m}$, $|Z_{\text{Endcaps}}| = 2,35 \text{ m}$)
(likely to be reduced by 30–40%)

- **40** Barrel modules: 40 (as of today all identical)
- **24** Endcap Modules: 24 (3 types)
- **9600** Slabs = 6000 (B) + 3600 (EC)
 - many ≠ lengths
- **~75K** ASUs (1024 canaux chacun)
 - **300K** Wafers (2500 m²)
 - **1.2M** VFE chips
 - **77M** Channels



U layout of a long slab

1ere 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 empiement (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 ($\langle \text{PU} \rangle \sim 140$)

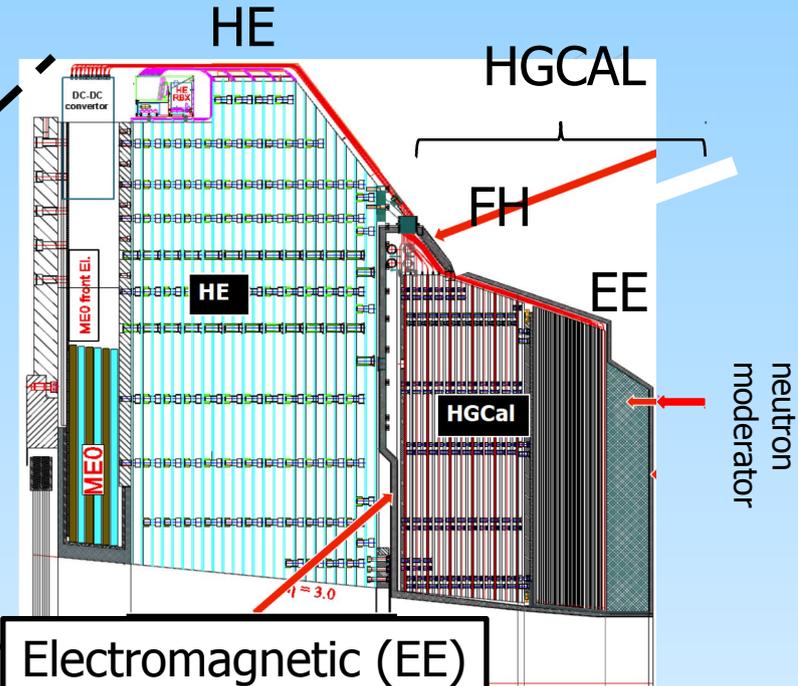
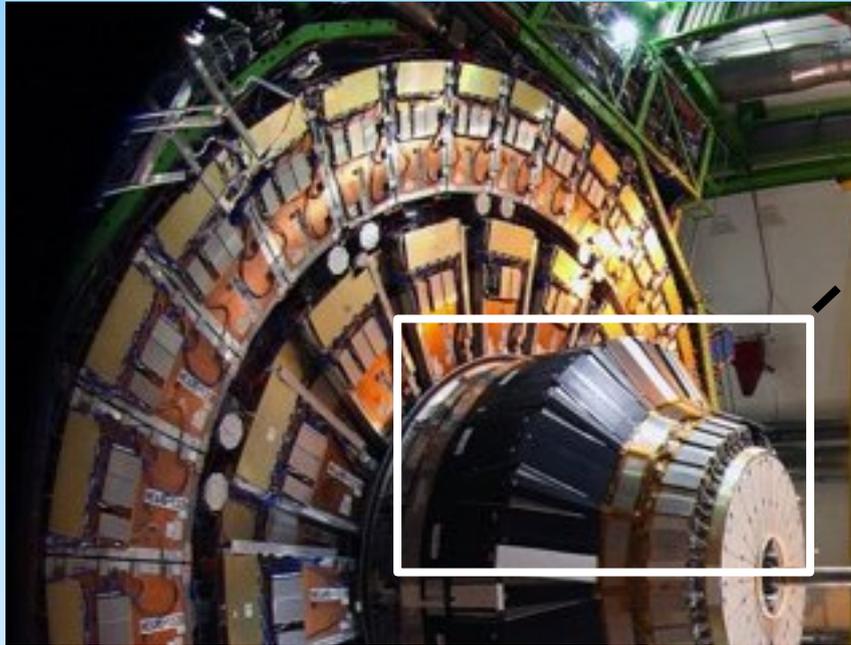
Les HGCAL (bouchons avant)

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

Utiliser la topologie des dépôts et le 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

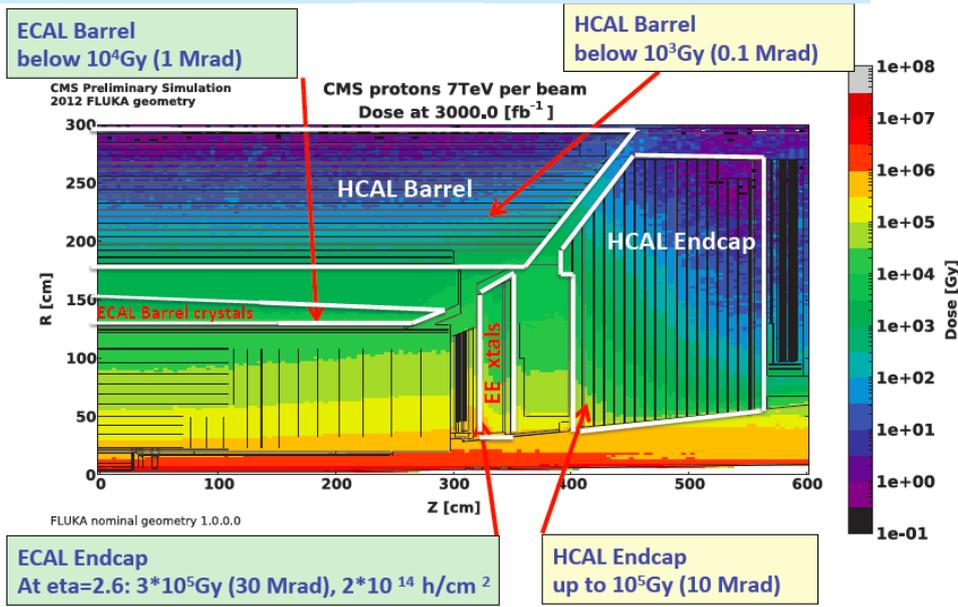


Electromagnetic (EE)
26 X_0 28 layers
 10 \times 0.64 X_0 +
 10 \times 0.88 X_0 +
 9 \times 1.1 X_0

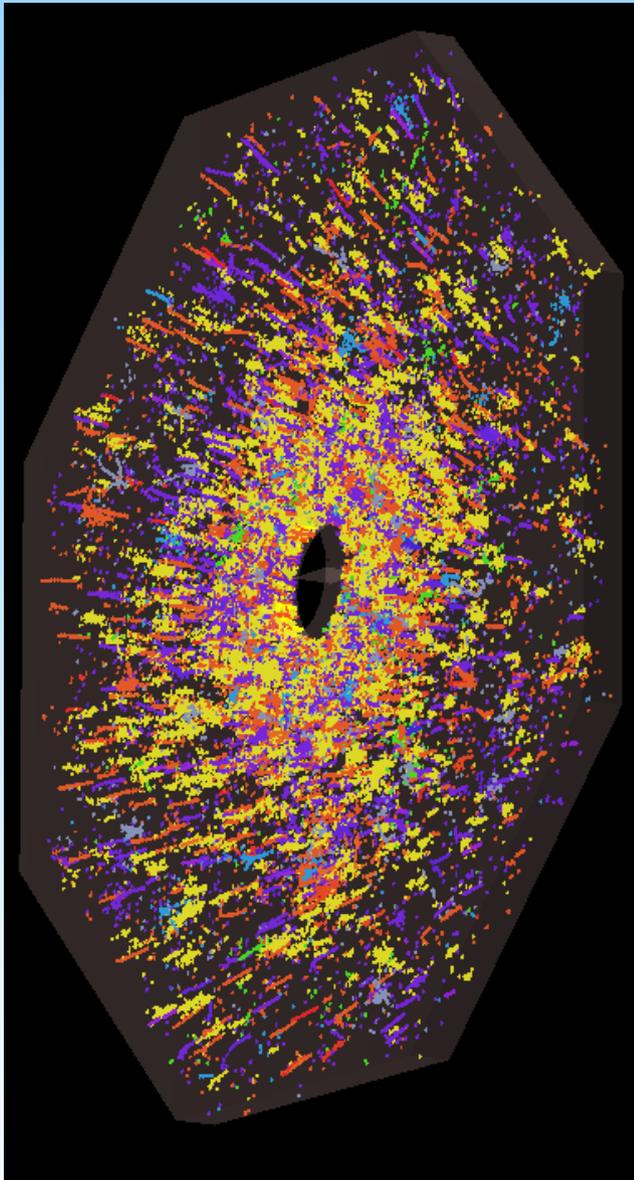
η dependent
 • depletion of the Si
 • cell size

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

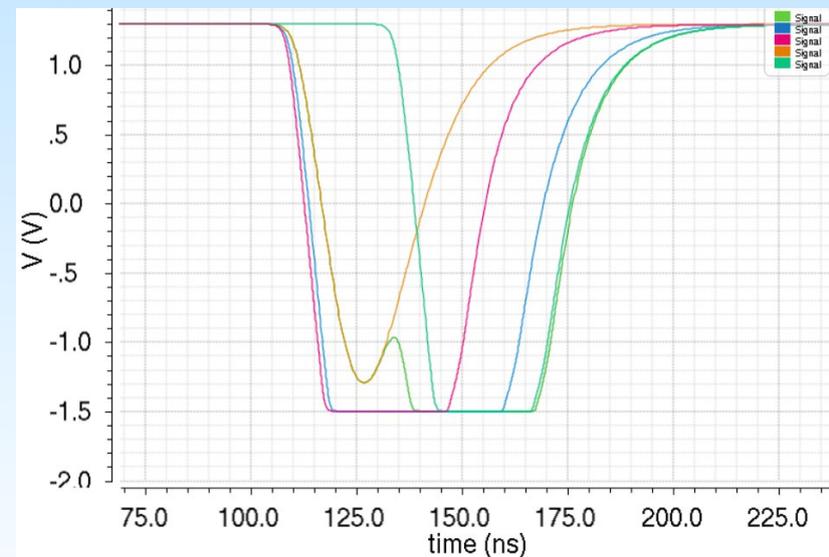
HL-LHC \times 12 wrt LHC



Calorimétrie « 5D »



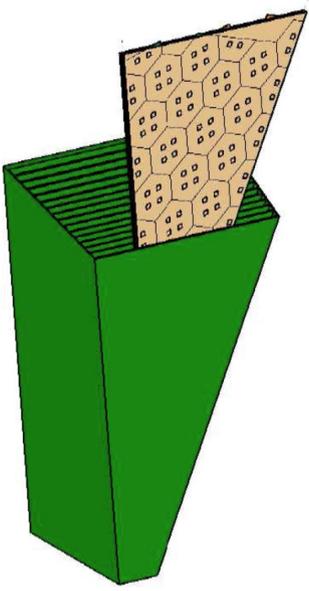
- Séparation Software des différentes contributions
- Réelle reconstruction « 5D »
 - ▶ 3D espace,
 - ▶ Energie & Temps
- Mesure en temps et Time-over-Threshold (TOT)
 - ▶ but : 100ps / plan, ~30 ps / gerbe



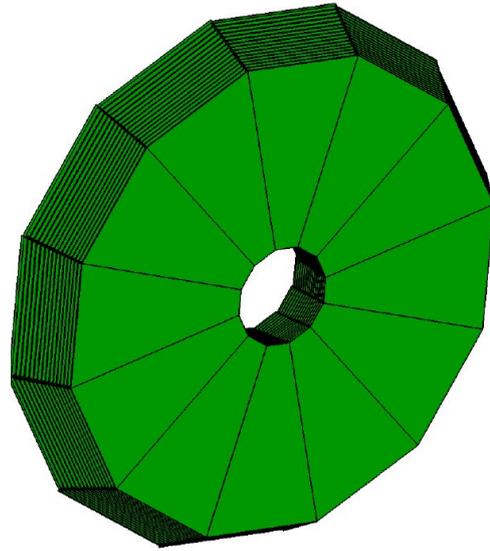
The HGCAL Mechanics (prelim)

Petal/Wedge

Carbon Fibre Structure with embedded W Plates (3° tilt)

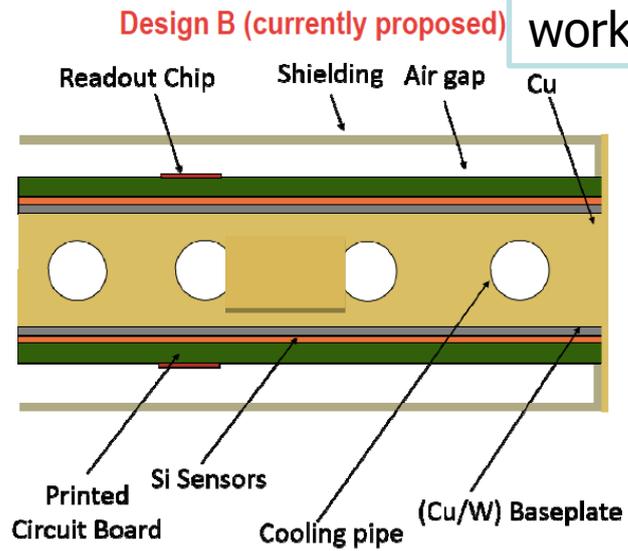


Wedges to be glued together to form a **monolithic structure**



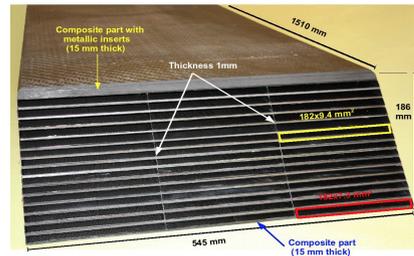
Si readout
W + Cu absorbent
2 readout layers/cassette

CO2 cooling
working temp: -30°C

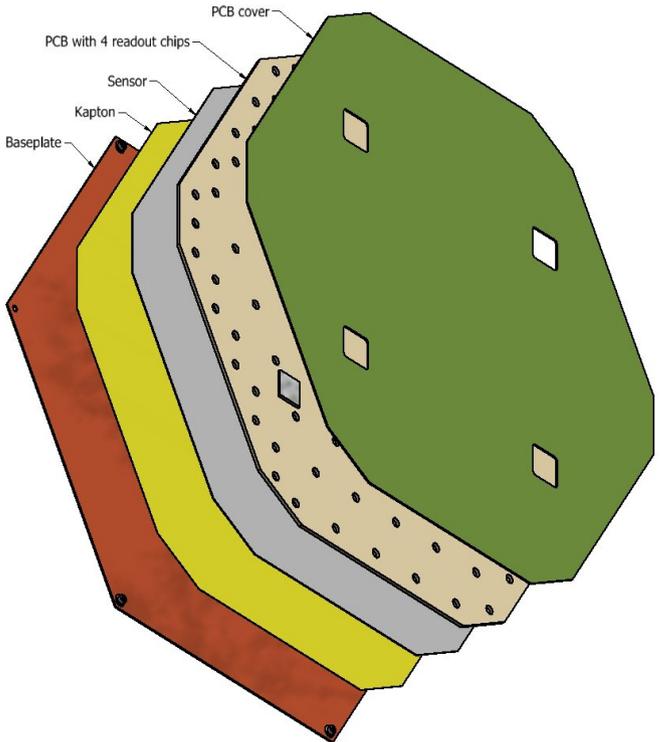


2 read-out layers per cassette sliding in each slot

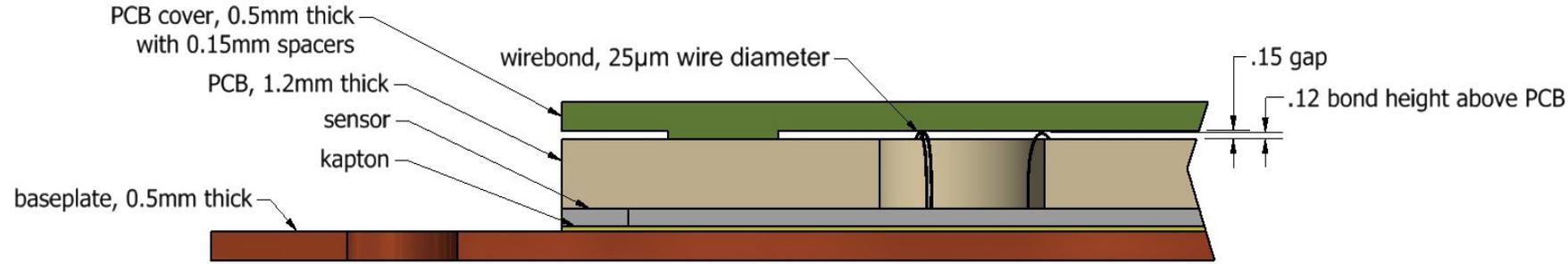
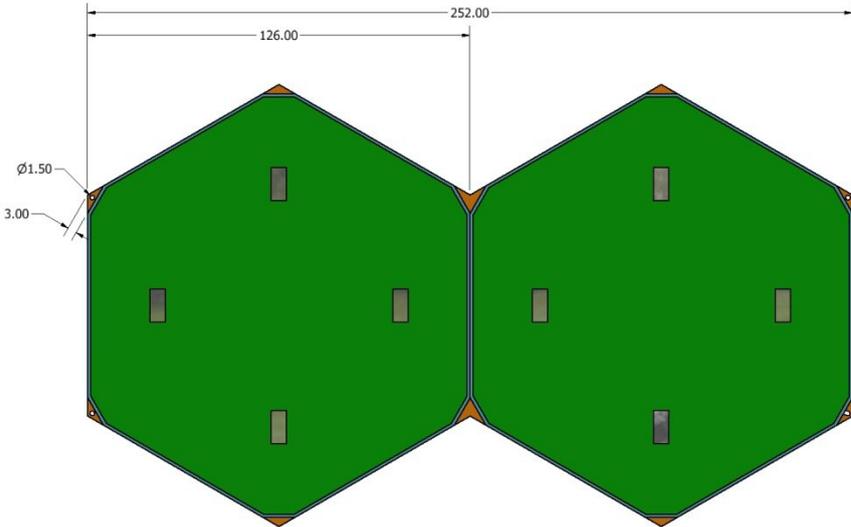
Building technique inspired by the R&D for CALICE (ILC), e.g. large prototype + demonstrators of a cassette have been made at LLR (in Si+Pb/W) and at FNAL



The HGCAL Readout Modules (prelim)



1 "module" = 2 × 6" Wafers



Planning and Milestones (prelim)

For the HGICAL which comprises the silicon-based ECAL and front HCAL

- **4 years** **Q2 2015 → Q2 2019**

R&D and Test Beams

- **4 years** **Q2 2019 → Q3 2023**

Construction

The HGICAL + BH must be ready for installation in early fall 2023 !

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 (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
- Collègues CMS
 - ▶ Yves Strois, Ch. Ochando
- Cours de L. Marleau