
Plan

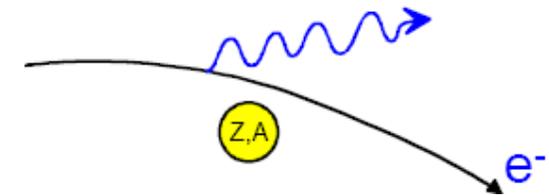
- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) **Généralités**
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

Rappels

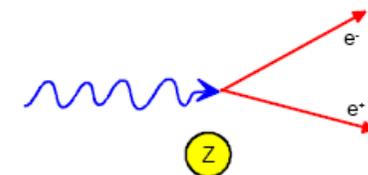
- Un électron/positron (et μ^\pm d'énergie > 1 TeV) est courbé par le champ des noyaux : c'est le **rayonnement de freinage** (ou **bremsstrahlung**) qui domine à haute énergie
 - Définit la longueur de radiation X_0 (g/cm²)
 - L'**énergie critique** est l'énergie à laquelle



$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0}$$

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Collision}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Rayonnement}}$$

- Conversion d'un photon: le mécanisme dominant à haute énergie est la **production de paires**



- En moyenne, un γ de haute énergie se convertira en e^+e^- après $1 X_0$

Principes de la calorimétrie

- Méthode destructive de mesure de l'énergie totale par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie
 - Excitation ou ionisation
 - \Rightarrow formation de **gerbes électromagnétiques** ou **hadroniques**
 - L'énergie est (partiellement) convertie en un signal proportionnel à l'énergie de la particule incidente
- On appellera **absorbeur** le milieu qui déclenche la gerbe

- Un **calorimètre** permet d'apporter de l'information pour toutes les particules qui le traversent :
 - Electrons, photons, hadrons : mesure directe de l'énergie
 - Muons : détection du passage de la particule
 - Neutrinos (par la « mesure » de l'énergie manquante)

- Détecteurs « multi tâches »
 - Mesure de l'énergie
 - Mesure de direction de la trace de la particule incidente
 - Identification des particules : la réponse d'un électron, d'un photon ou d'un muon ne sera pas la même

Plan

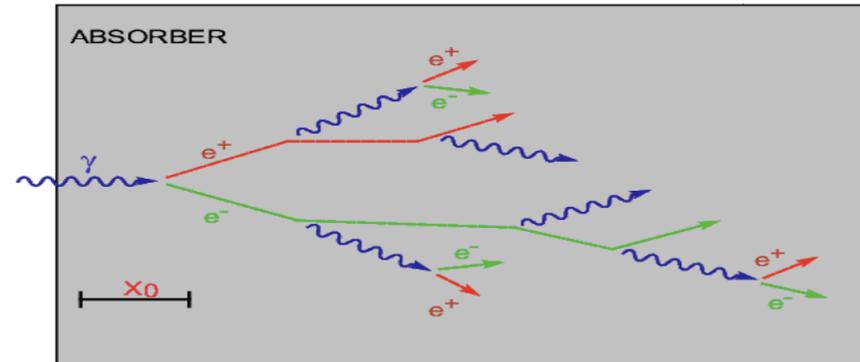
- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) **Calorimétrie électromagnétique**
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

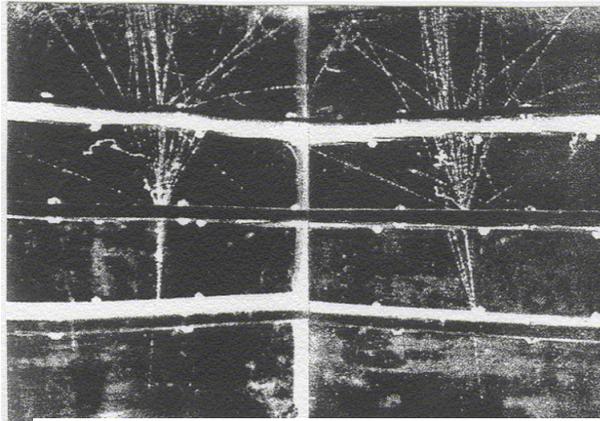
- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

- Concernes les e^\pm et les γ

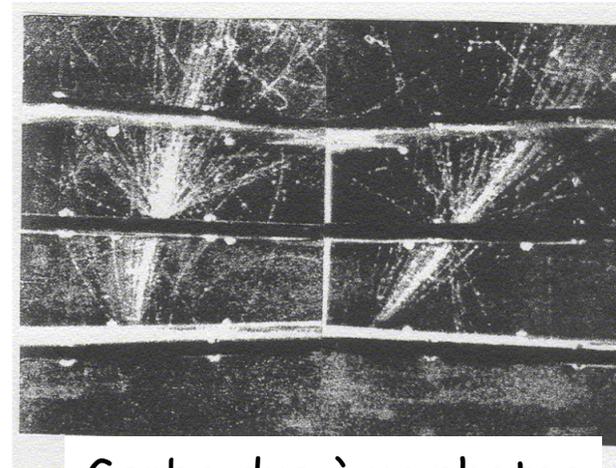
Conversion d'un γ au bout d'environ $1 X_0$



- La forme des gerbes dues aux e^\pm et aux γ est différente



Gerbe due à un électron



Gerbe due à un photon

L. Fussel (1939)

Modèle simpliste

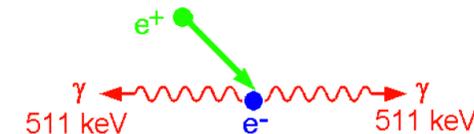
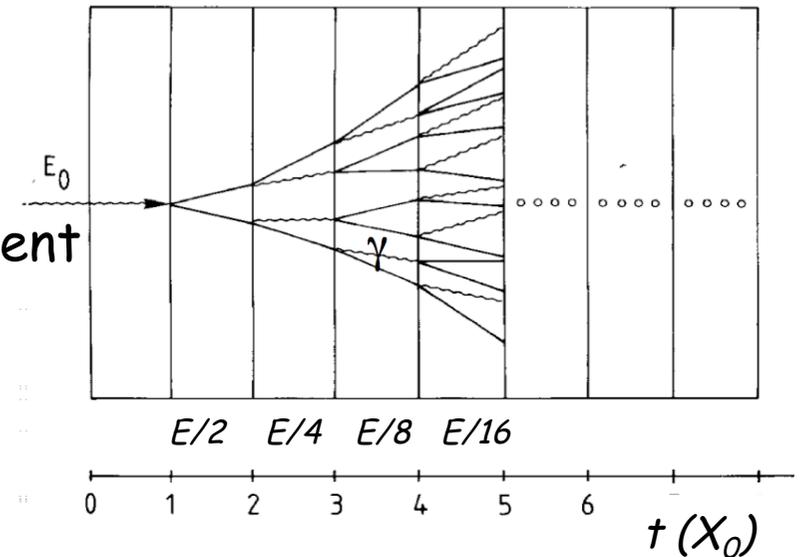
- On considère uniquement le rayonnement de freinage et la création de paires avec $X_0 = \lambda_{\text{paire}}$

$$N(t) = 2^t$$

- Le processus continue jusqu'à t_{max} pour lequel $E(t) < E_c$

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln(E/E_c)}{\ln(2)} \quad N_{\text{total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{t_{\text{max}+1}} - 1 \approx 2^{t_{\text{max}}} 2 = 2 \frac{E}{E_c}$$

- Au delà de t_{max} , les mécanismes dominants sont l'ionisation, l'effet Compton et l'effet photoélectrique
 - Les électrons finissent par s'attacher autour d'un noyau
 - Les positrons finissent par s'annihiler avec un électron libre ou peu lié



Développement des gerbes

- Forme longitudinale : $\frac{dE}{dt} \propto t^\alpha \exp(-t)$
 - Le maximum se trouve à :

$$t_{max} = \frac{\ln(E/E_c)}{\ln(2)}$$

- 95% de la gerbe est contenue dans

$$t_{95} \approx t_{max} + 0,08 \times Z + 9,6$$

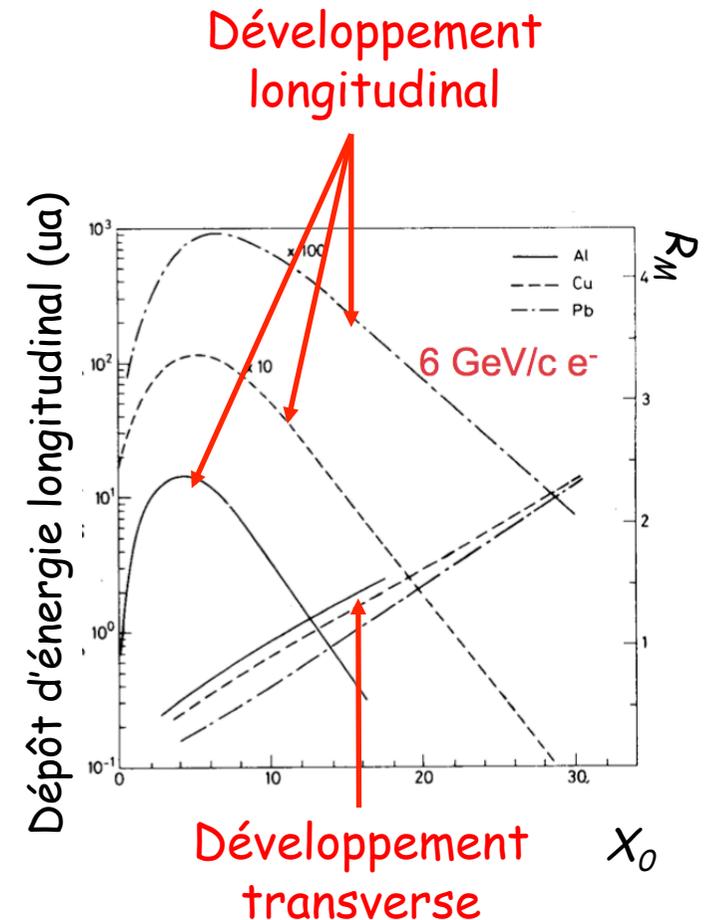
- La dimension longitudinale d'une gerbe croît comme $\ln(E)$

- Développement transverse

- 95% de la gerbe est contenue dans un cône de rayon $2 R_m$ (rayon de Molière) :

$$R_m = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0$$

- R_m s'exprime en g/cm^2 comme X_0



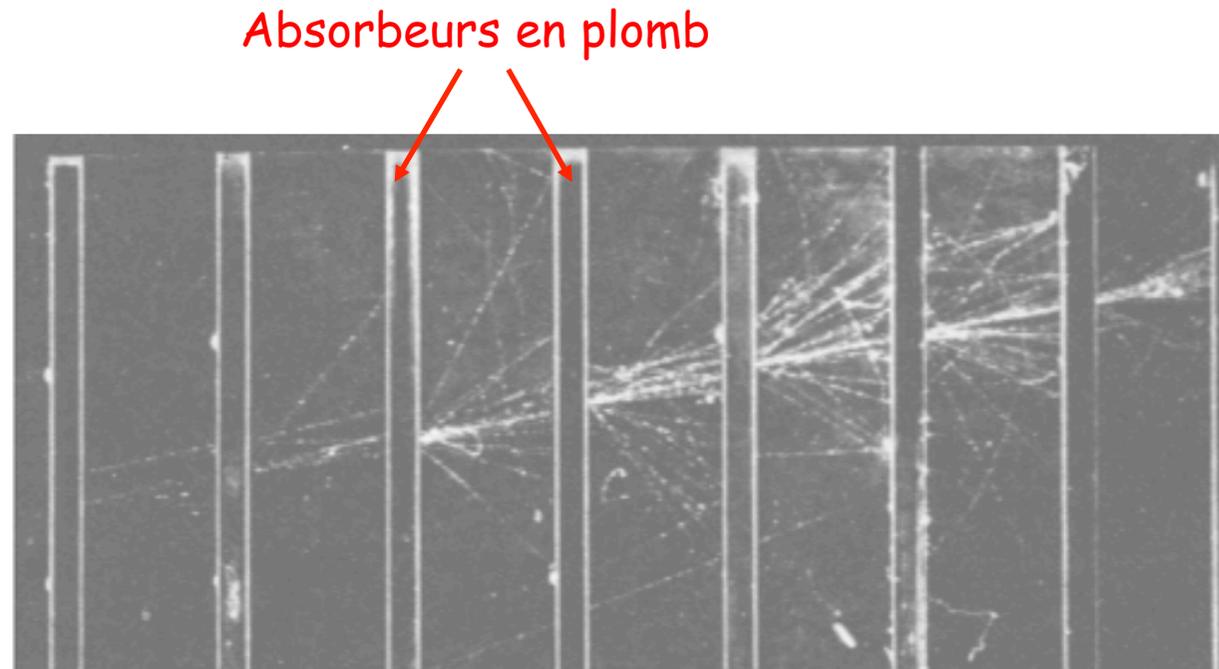
Quelques valeurs typiques

Material	Z	Density [g cm ⁻³]	X ₀ [mm]	ρ _M [mm]	dE/dx mip [MeV cm ⁻¹]	λ _{int} [mm]
C	6	2.27	188	48	3.95	381
Al	13	2.70	89	44	4.36	390
Fe	26	7.87	17.6	16.9	11.4	168
Cu	29	8.96	14.3	15.2	12.6	151
Sn	50	7.31	12.1	21.6	9.24	223
W	74	19.30	3.5	9.3	22.1	96
Pb	82	11.30	5.6	16	12.7	170
U 238	92	18.95	3.2	10	20.5	105
Concrete		2.50	107	41	4.28	400
Glass		2.23	127	53	3.78	438
Marble		2.93	96	36	4.77	362
Si	14	2.33	93.6	48	3.88	455
Ar (liquid)	18	1.40	140	80	2.13	837
Kr (liquid)	36	2.41	47	55	3.23	607
Xe (liquid)	54	2.95	24	42	3.71	572
Polystyrene		1.032	424	96	2.00	795
Plexiglas		1.18	344	85	2.28	708
Quarz		2.32	117	49	3.94	428
Pb glass		4.06	25.1	35	5.45	330
Air (2C, 1atm)		0.0012	304m	74m	0.0022	747m
H ₂ O		1.00	361	92	1.99	849
PbWO ₄		8.3	8.9	20	10.2	207
CeF ₃		6.16	16.8	26	7.9	259
LYSO		7.40	11.4	20.7	9.6	209

Tout est
tabulé !

Exemple réel

Gerbe
électromagnétique
créée par un
électron dans une
chambre à
brouillard



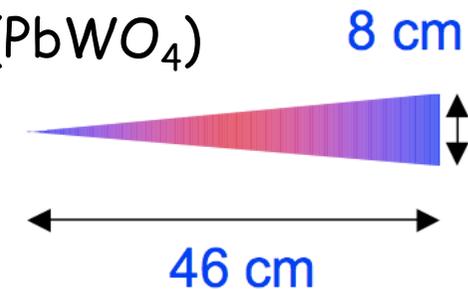
- Electron de 100 GeV dans un « verre au plomb » (PbWO_4)

- $E_c = 11,8 \text{ MeV}$

- $t_{95} \approx 23$

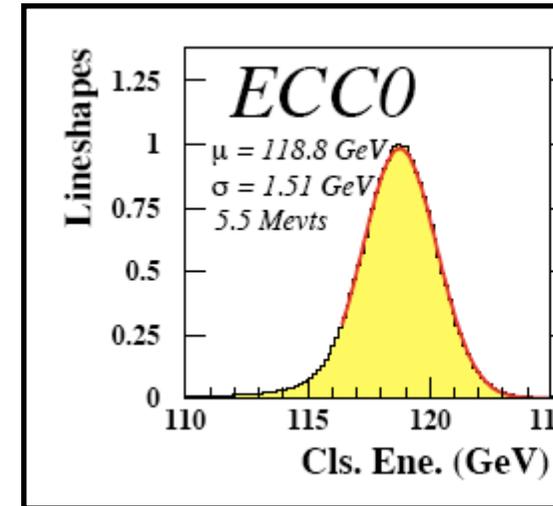
- $t_{max} \approx 13$

- $X_0 \approx 2 \text{ cm} - R_m \approx 3,6 \text{ cm}$

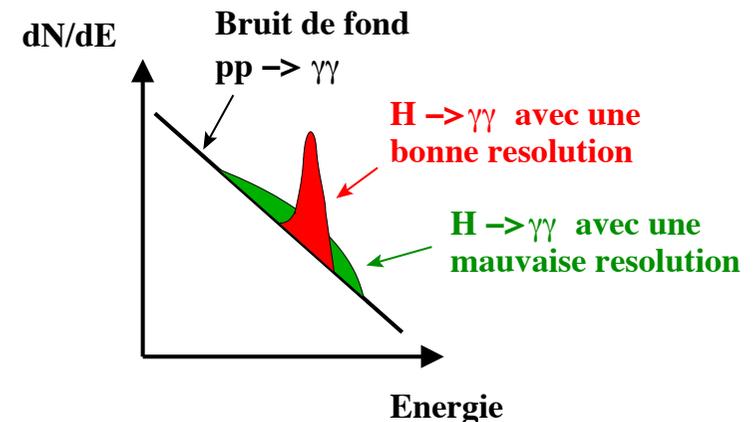


Remarque sur les résolutions

- Pour connaître la résolution en énergie d'un détecteur, on envoie sur le détecteur des particules d'énergie connues dont on essaye de recouvrir l'énergie
- Les distributions sont typiquement gaussiennes et sont caractérisées par leur largeur $\sigma(E)$
- On a besoin de la meilleure résolution possible



Exemple du calorimètre EndCap de ATLAS



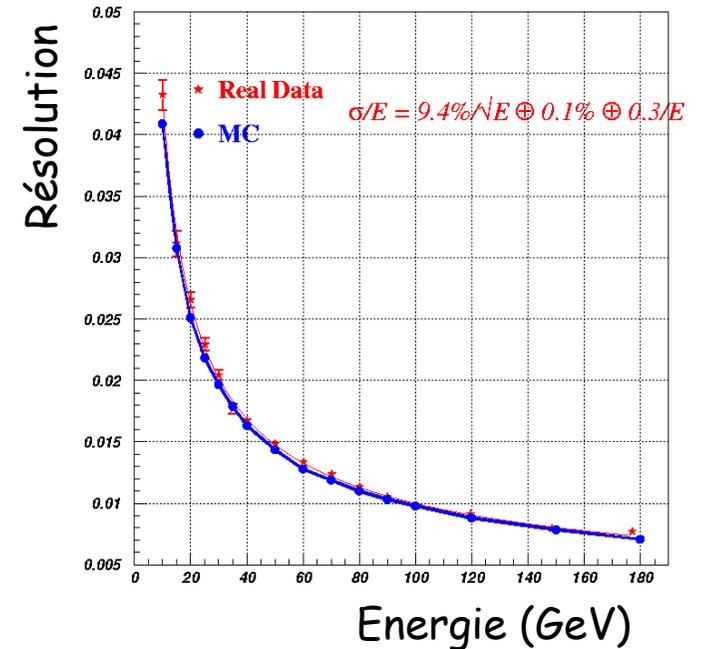
- On a typiquement pour la résolution en énergie :

2 façons d'écrire la même chose

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{c}{E} \oplus b$$

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2 + b^2$$

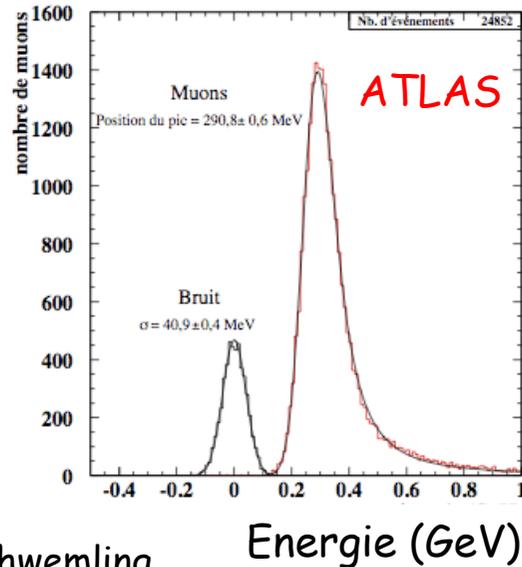
- 3 termes caractéristiques
 - a : terme d'échantillonnage
 - b : terme constant (Inhomogénéités - non linéarités - mauvaise calibration)
 - c : terme de bruit (Bruit électronique - empilement - radioactivité)
- Les résolutions spatiales et angulaires ont la même dépendance avec l'énergie de la particule incidente



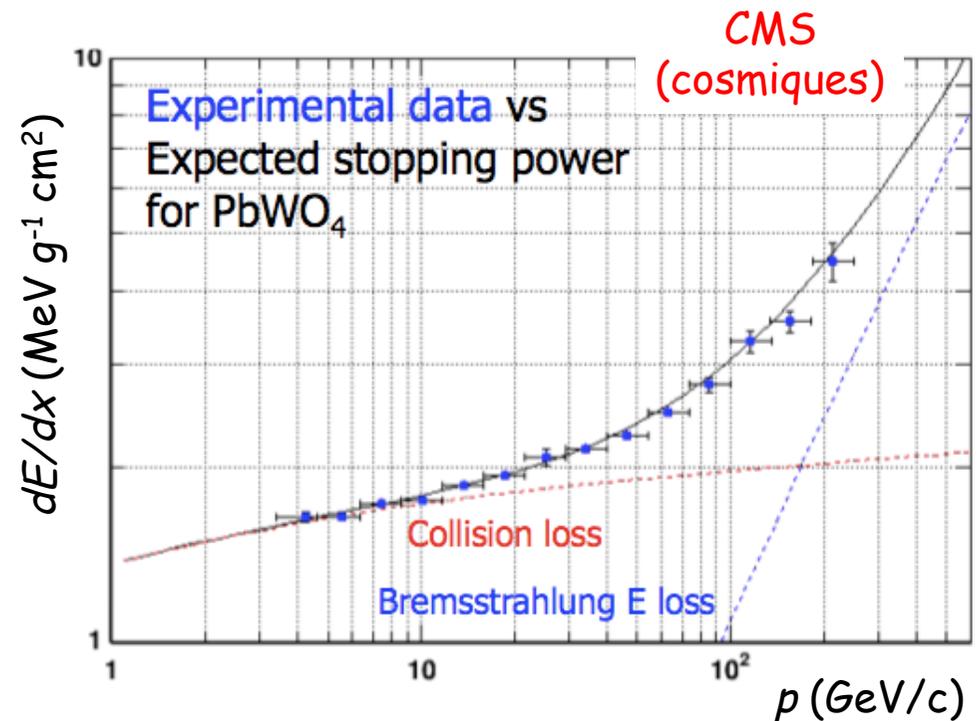
Résolution en énergie du calorimètre EM d'ATLAS

Signal déposé par les muons

- Les muons déposent également un signal très faible dans le calorimètre électromagnétique puisqu'ils sont \approx au minimum d'ionisation



P. Schwemling



M. Nessi

Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

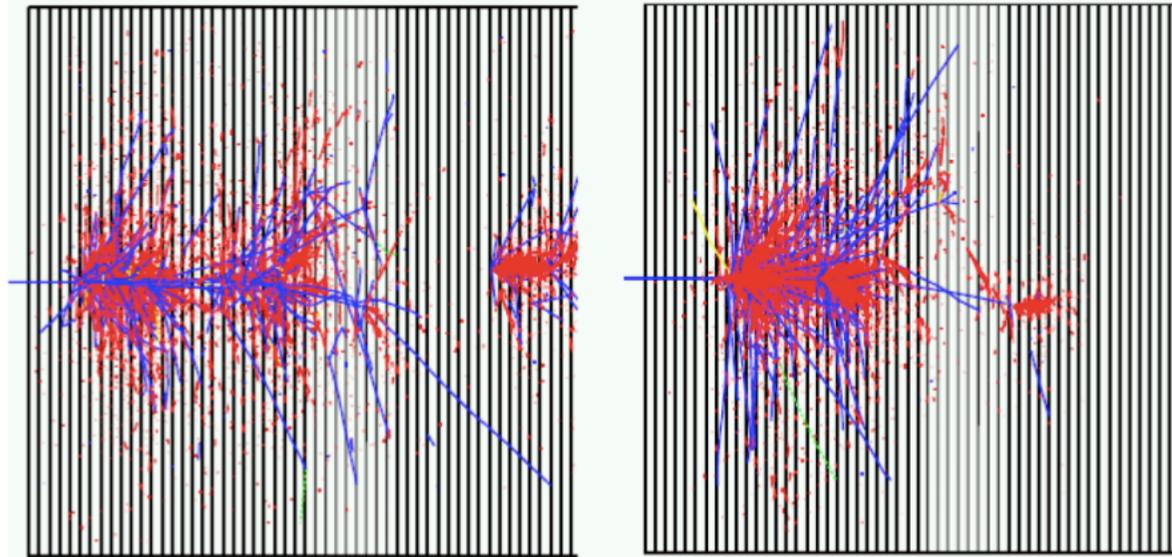
- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) **Calorimétrie hadronique**
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

Calorimétrie hadronique

M. Nessi

Même particule
(simulation)



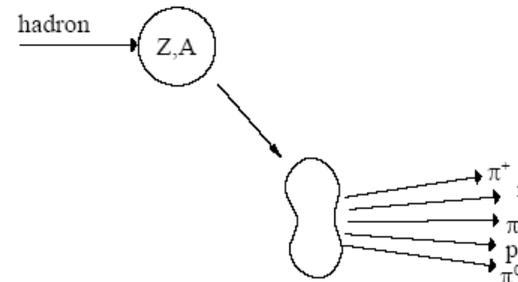
Rouge : composante
électromagnétique

Bleu : composante
hadronique

- Les gerbes hadroniques sont très fluctuantes : le dépôt d'énergie n'est pas uniforme

Interaction des hadrons neutres et chargés avec la matière

- Déterminée par des processus nucléaires inélastiques
 - Excitation puis création de fragments puis production de particules secondaires



multiplicity $\propto \ln(E)$

$p_t \approx 0.35 \text{ GeV}/c$

- A haute énergie ($> 1 \text{ GeV}$), la section efficace dépend peu de l'énergie et du type de la particule incidente (p, K, π , ..) :

$$\sigma_{Inel} \approx \sigma_0 A^{0,7} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 \approx 35 \text{ mb}$$

- Par analogie avec X_0 , on définit la **longueur d'interaction hadronique** λ_I par :

$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{Inel}} \propto A^{1/3}$$

Gerbes hadroniques

- Composante hadronique

- π^\pm , p , K^\pm , n , ν , μ ,

- Composante électromagnétique

- Photons, π^0

$$n(\pi^0) \approx \ln(E_{[GeV]}) - 4,6$$

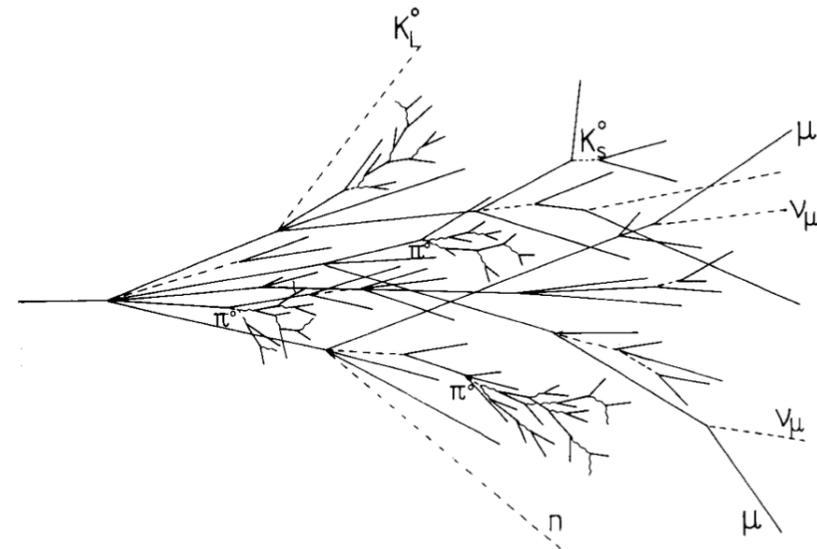
soit $\approx 18 \pi^0$ à 100 GeV

- Bien plus complexe à modéliser que les gerbes électromagnétiques

- Grandes fluctuations

- \Rightarrow Résolution en énergie moins bonne que pour les électrons
- \Rightarrow Moindre exigence sur les performances du calorimètre que pour un calorimètre électromagnétique

Gerbe hadronique



Développement des gerbes

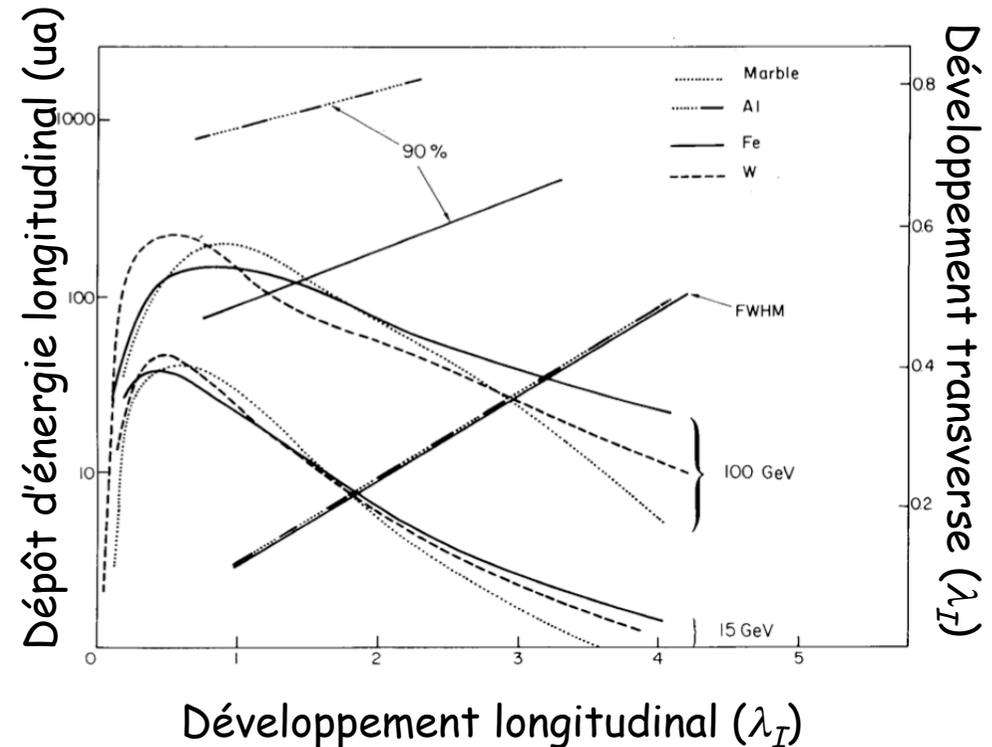
- Développement longitudinal :

$$t_{95} \approx a \ln(E) + b$$

- $t_{95} \approx 80$ cm pour Fe à 100 GeV

- Développement transverse :

- 95% de la gerbe est contenue dans un cylindre de rayon λ_I (17 cm pour Fe)



- Les gerbes hadroniques sont plus longues et plus larges que les gerbes électromagnétiques

- λ_I joue le rôle de la longueur de radiation X_0 pour les calorimètres électromagnétiques
- La plupart du temps, on a $\lambda_I \gg X_0$
 - Explique pourquoi les calorimètres hadroniques sont beaucoup plus volumineux que les calorimètres électromagnétiques

Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) **Les divers types de calorimètres**
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

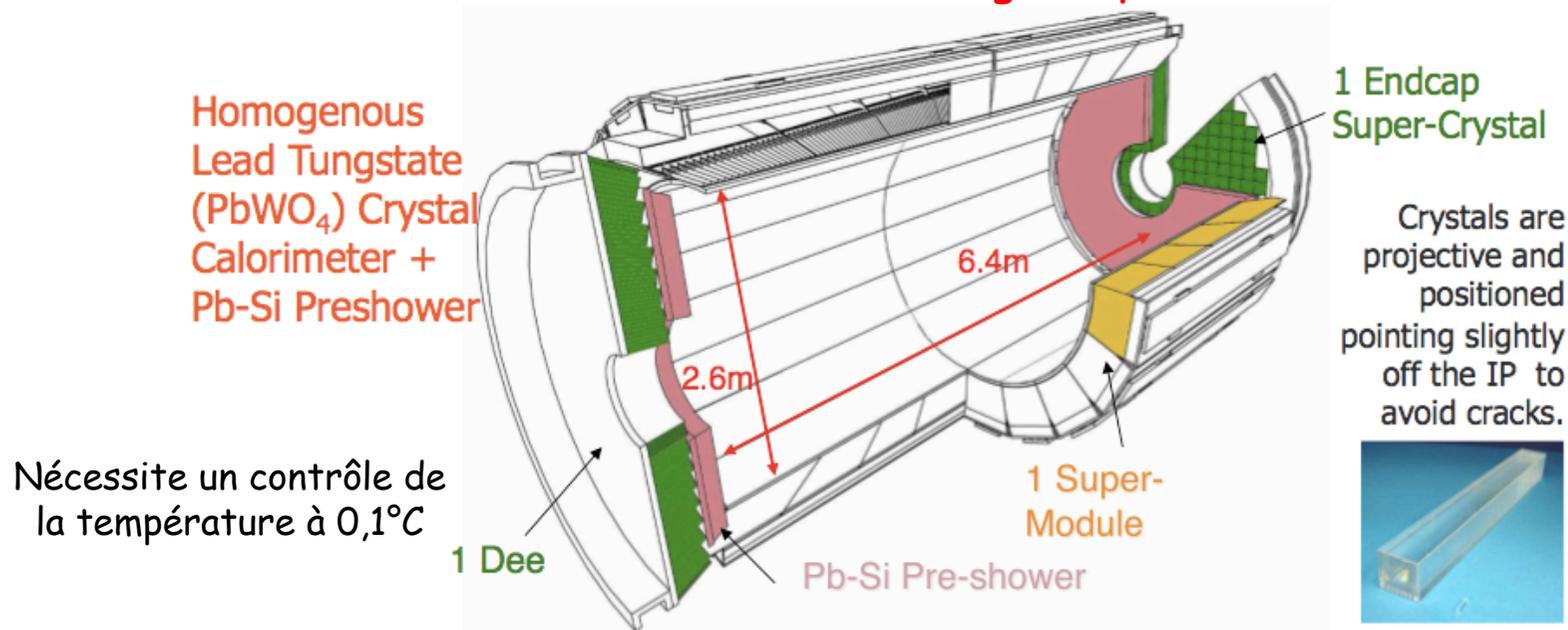
- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

Deux types de calorimètres

- Les **calorimètres homogènes** pour lesquels l'absorbeur est également le milieu de détection
 - Bonne résolution en énergie
 - Résolution spatiale moyenne
 - Pas de segmentation en profondeur
 - Ne peut servir que pour la calorimétrie EM
- Les **calorimètres à échantillonnage** (« **sampling calorimeters** ») pour lesquels l'absorbeur est différent du milieu de détection
 - Résolution en énergie moyenne
 - Bonne résolution spatiale
 - Segmentation en profondeur possible
 - Peut être utilisé en calorimétrie EM et hadronique

Calorimètres homogènes

Calorimètre électromagnétique de CMS



Nécessite un contrôle de la température à 0,1°C

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

- Endcap (EE):**
- 14648 crystals
 - 4 Dees, SuperCrystals of 5x5 xtals
 - $1.48 < |\eta| < 3.0$

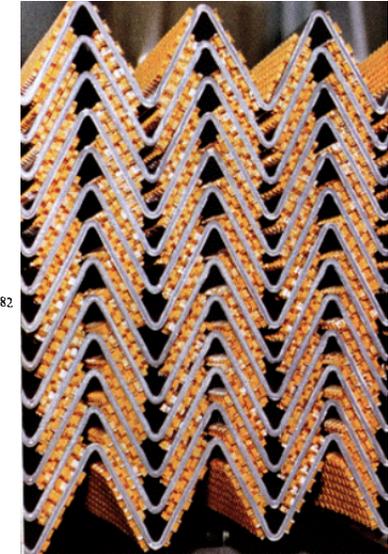
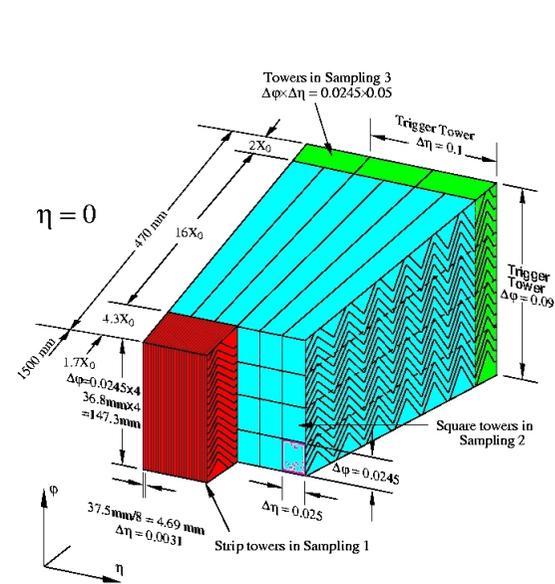
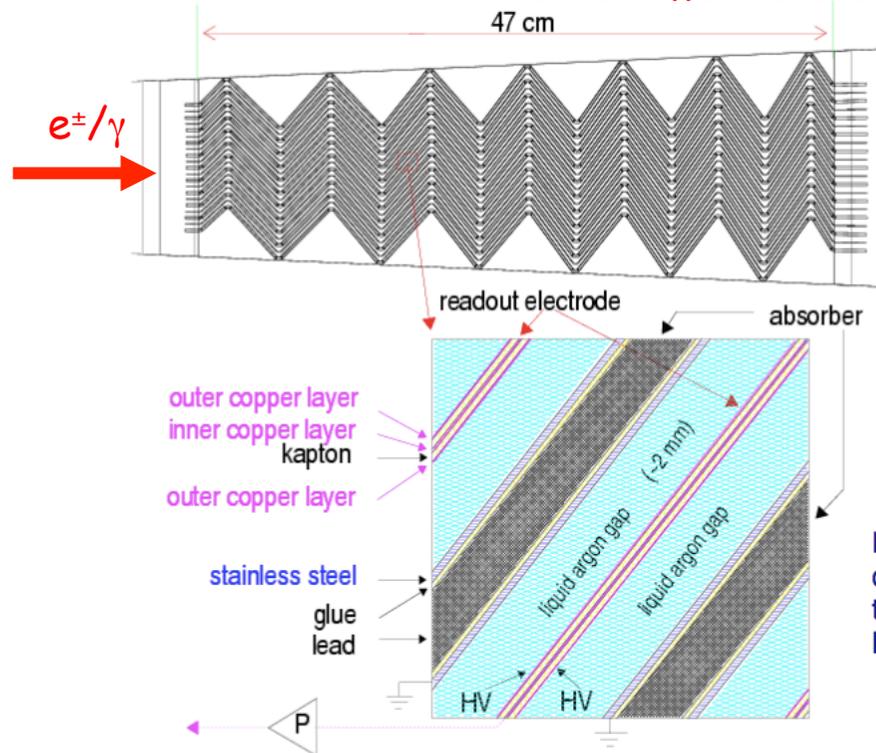
- Preshower (ES):**
- Pb-Si
 - 4 Dees
 - 4300 Si strips
 - $1.65 < |\eta| < 2.6$

M. Nessi

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{3,37\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,25\% \oplus \frac{0,108}{E_{[GeV]}}$$

Calorimètres à échantillonnage

Calorimètre électromagnétique d'ATLAS



D
d
t
l
a

- LAr (90 K)
- Absorbeurs en Pb (1-2 mm)
- 1 GeV ⇒ 5 · 10⁶ e⁻ dans LAr
- Géométrie en accordéon
- Insensible aux radiations

Résolution en énergie

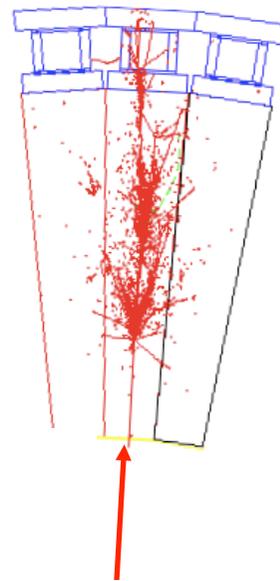
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{9,4\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,1\% \oplus \frac{0,3}{E_{[GeV]}}$$

Calorimètres hadroniques

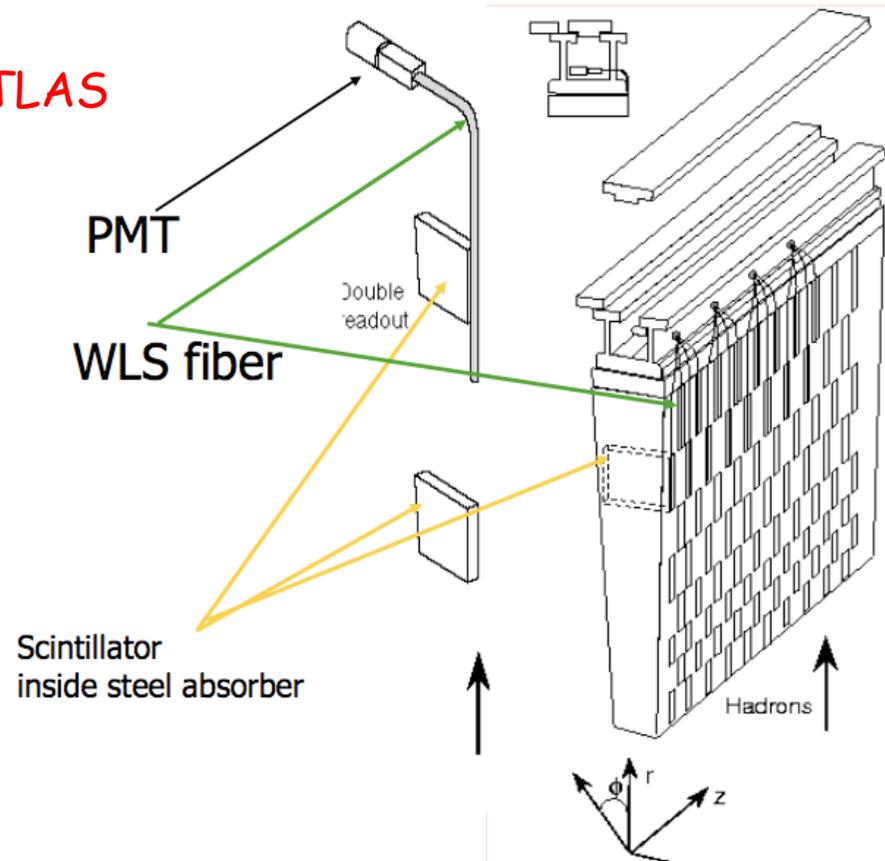
CMS



Absorbeurs en cuivre (1500 t) + scintillateurs



ATLAS



Absorbeurs acier + plaques scintillantes

Résolution en énergie :
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 5\%$$

Plan

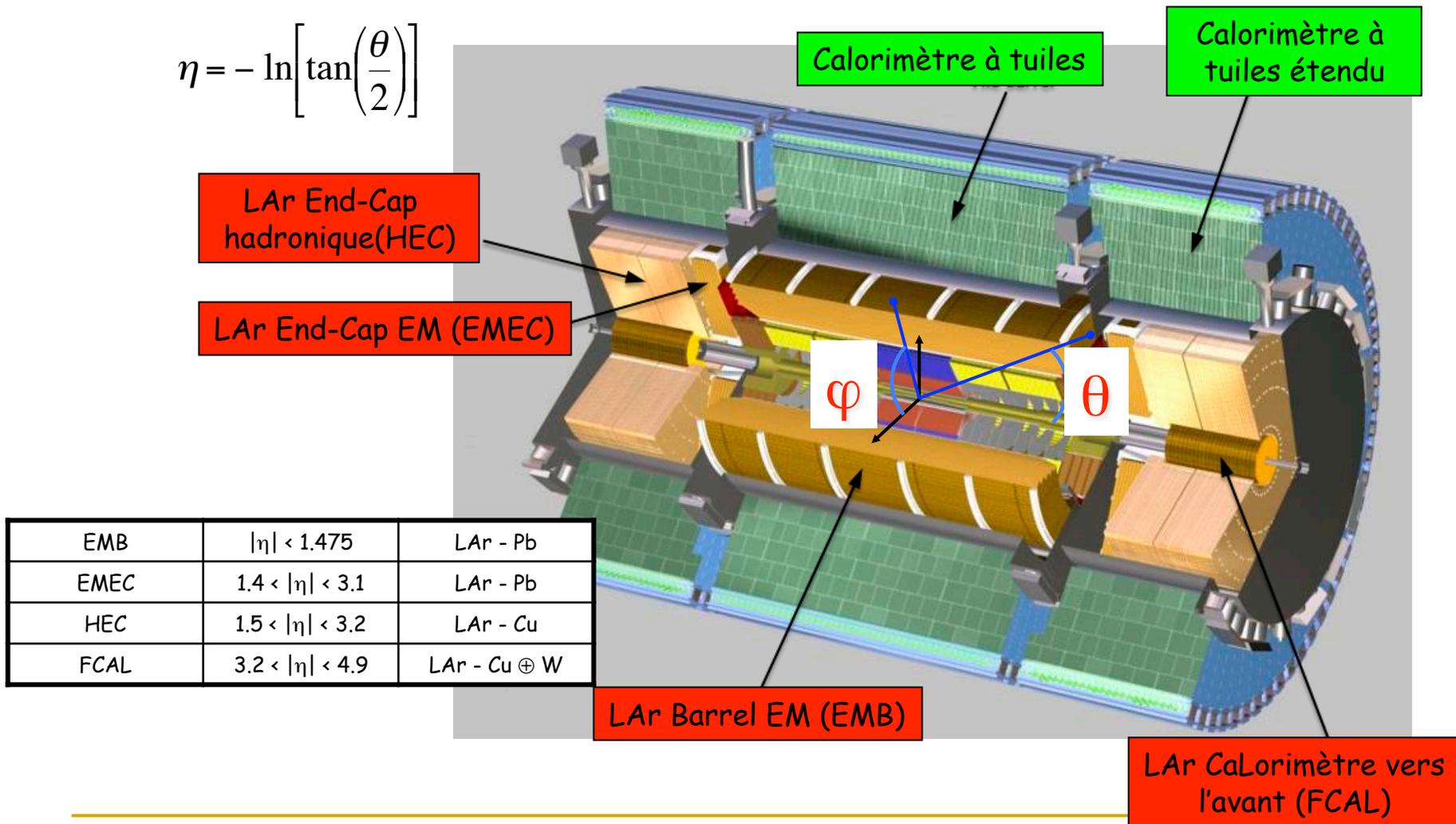
- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) **Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS**

- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

TileCal et Extended TileCal servent au retour de flux du solénoïde

$$\eta = -\ln\left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$$



Prérequis

- Aucune bulle !
- Température du bain d'argon : 88.4 K
- Uniformité meilleure que 0.3 K
- Stabilité meilleure que 0.1 K
- Opération continue pendant 10 ou 15 ans
- Pureté meilleure que 2 ppm d'équivalent O_2



Propriétés communes à tous les cryostats

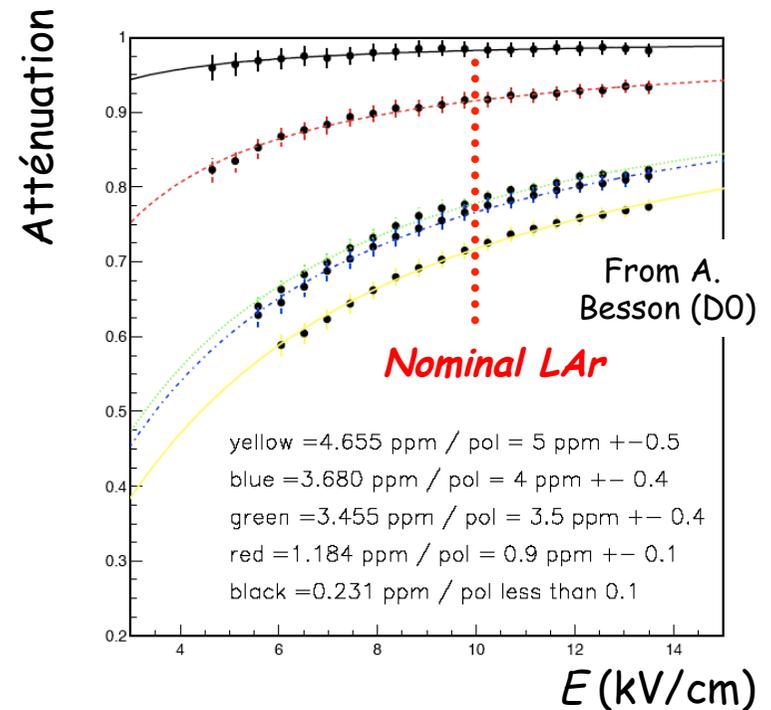
- Deux enceintes concentriques (chaude et froide)
 - L'enceinte chaude repose sur des pieds en fibre de verre-epoxy (isolation thermique et électrique)
 - Les 3 cryostats ont été testés à froid avec les détecteurs en surface au CERN avant d'être descendus dans le puit
- ⇒ 9 cycles thermiques jusqu'à maintenant

Cryostat Barrel (ou tonneau)

- 43 m³ de LAr
- 128000 canaux d'électronique
- Vide d'isolation partagé avec le solénoïde

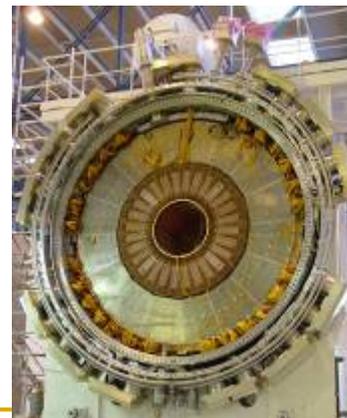
Cryostat End-Cap (ou bouchon)

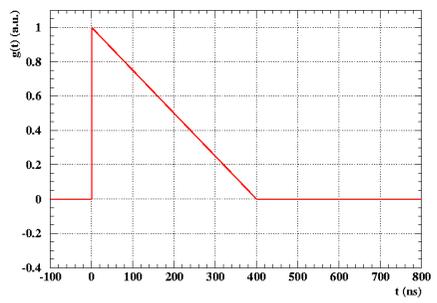
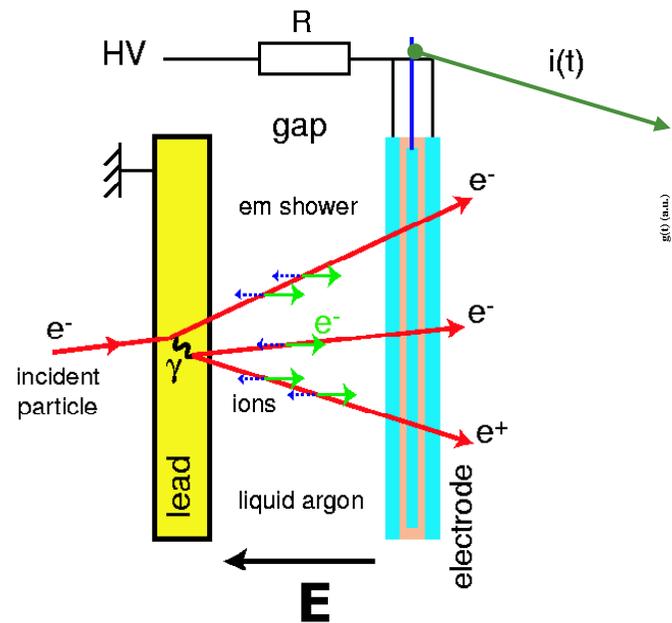
- 17 m³ de LAr
- 5000 canaux d'électronique
- Déplacé de 12 m pendant une ouverture d'ATLAS



Cryostat End-Cap

Cryostat Barrel

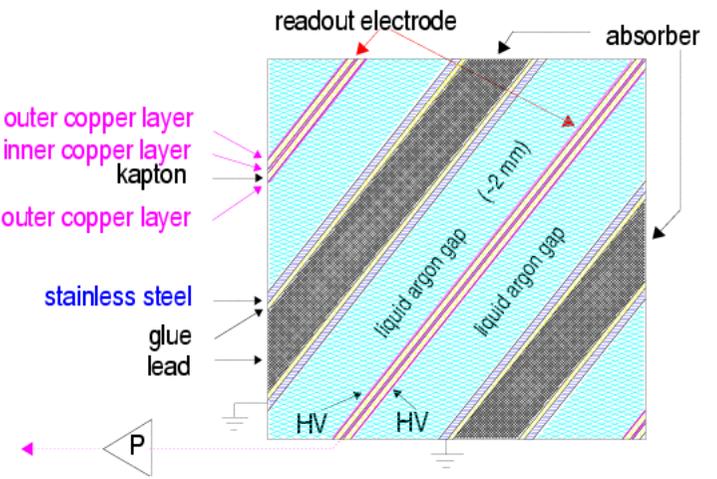




$t_{\text{dérive}} = 450 \text{ ns}$ dans EMB

Propriétés de l'argon liquide

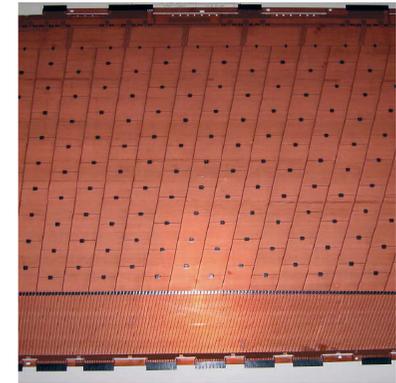
- Stabilité sur des années
- Résistant aux radiations
- Réponse linéaire
- Calorimètre à échantillonnage :
 - ✓ Bonne résolution spatiale (wrt calorimètres homogènes)
 - ✓ Mauvaise résolution en énergie (wrt calorimètres homogènes)



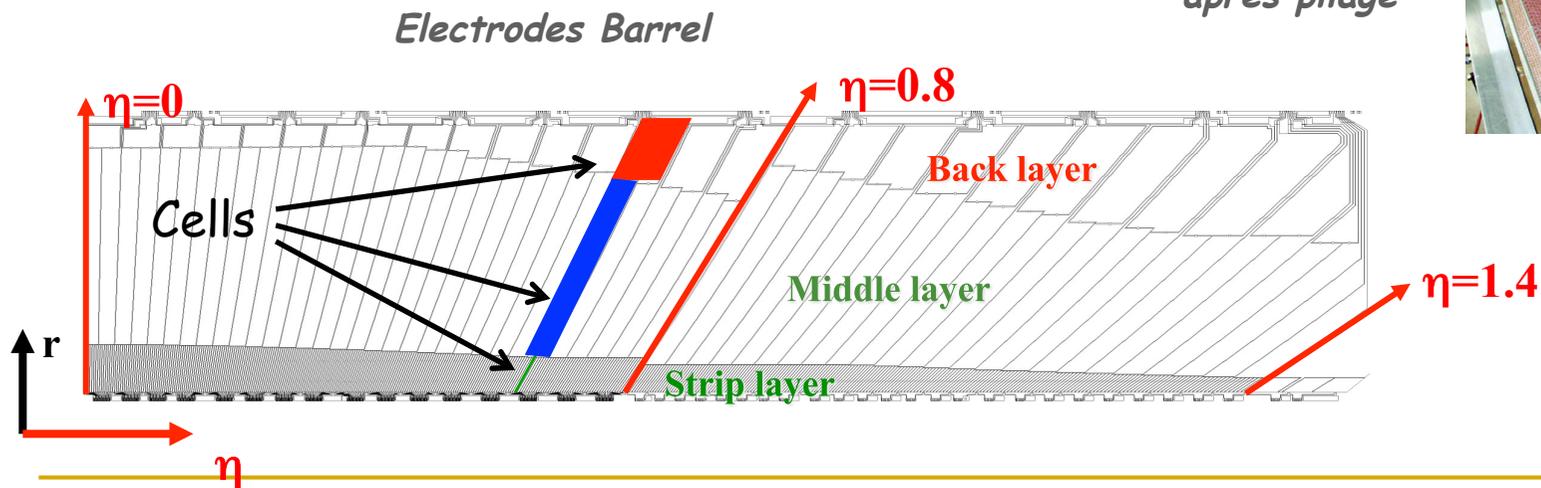
Principales propriétés

- 4 types d'électrode : 2 pour EMB et 2 pour EMEC
- les électrodes font $275 \mu\text{m}$:
 - ✓ 3 couches de Cu
 - ✓ 2 couches d'isolant (polyimide)
- les deux couches externes sont à la HT
- Le signal est lu sur l'électrode centrale
- 2 ou 3 compartiments en profondeur
- Epaisseur du gap d'argon
 - ✓ EMB : 2.1 mm de chaque côté de l'électrode (450 ns de temps de dérive pour 2000 V)
 - ✓ EMEC : de 0.9 à 3.1 mm de chaque côté de l'électrode

Electrode Barrel avant pliage



Electrode Barrel après pliage



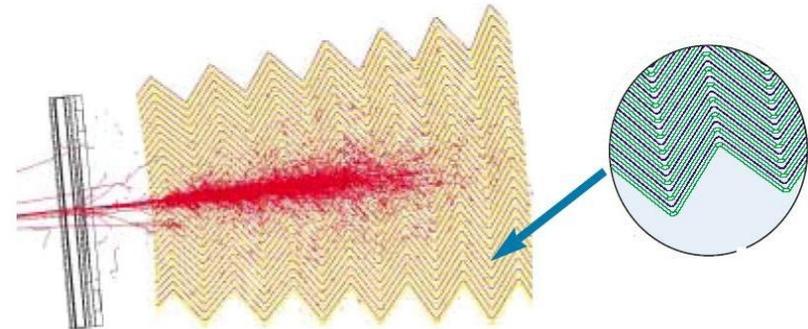
Propriétés principales

- Absorbéurs en plomb (+ mince couche d'acier)
- Bonne hermiticité (pas de crack en azimut)
- Courbure dans la direction des particules
- 1 GeV déposé donne environ $5 \cdot 10^6$ électrons
- Plusieurs compartiments en profondeur

EMB

- $|\eta| < 1.475$
- Vagues de l'accordéon parallèles à l'axe du faisceau
- Les angles des vagues changent avec le rayon pour garder constant l'épaisseur d'argon

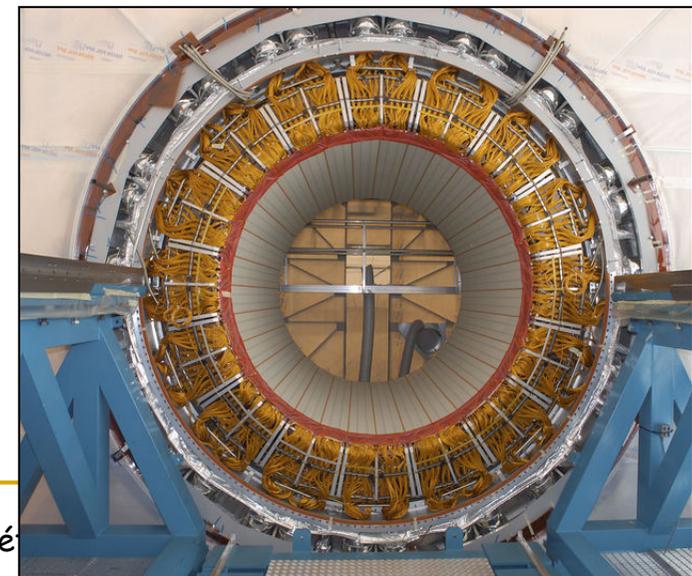
Développement de la gerbe dans l'accordéon



EMB durant l'assemblage



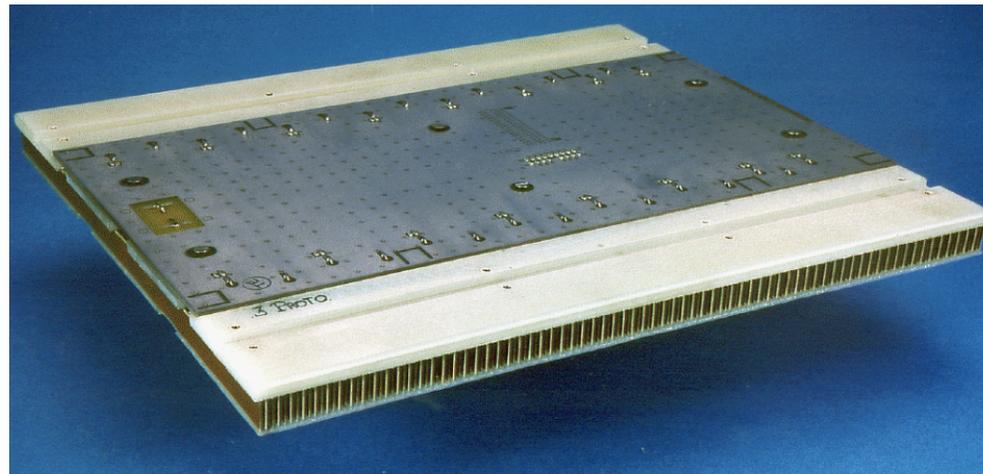
Une roue complète du EMB



Prééchantillonneur

- Nécessaire pour corriger l'énergie perdue en amont du calorimètre (principalement à basse énergie)
- Mince couche LAr instrumentée (11 mm pour EMB et 5 mm pour EMEC) devant le 1^{er} compartiment de l'accordéon
- Couverture jusqu'à $|\eta| = 1.8$

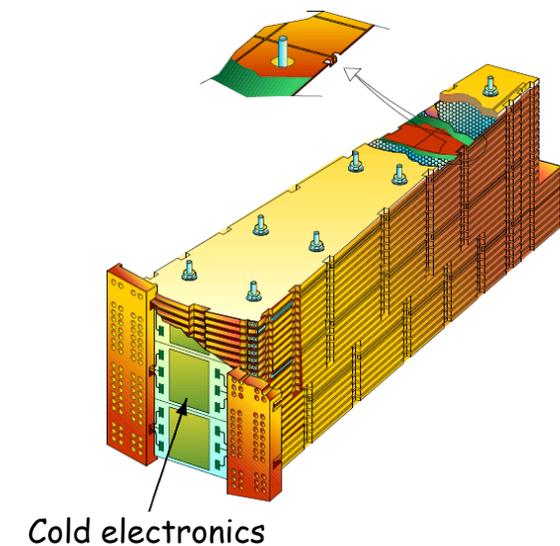
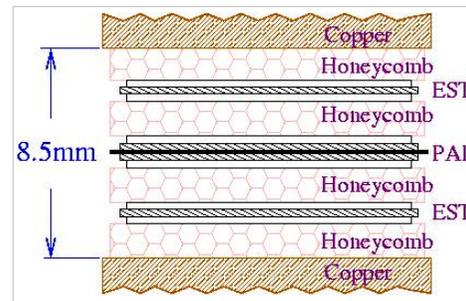
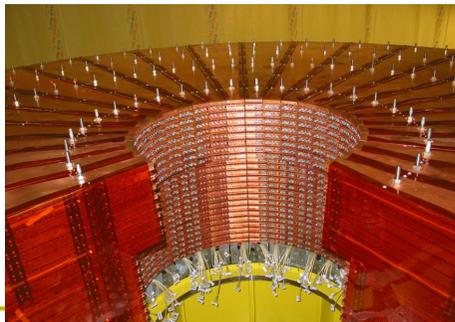
Prééchantillonneur EMB



Calorimètre hadronique End-Cap (HEC)

Propriétés principales

- Insensible aux radiations
- Absorbateurs en Cu (25/50 mm d'épaisseur) à géométrie parallèle plane (25 et 50 mm d'épaisseur)
- 2 x 2 roues (avant et arrière) de diamètre $\phi = 2$ m
- 2 x (2 x 32) modules
- $10 \lambda_I$
- 24/16 gaps pour les roues avant/arrière
- 4 compartiments longitudinaux
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ (0.2×0.2 pour $|\eta| > 2.5$)
- Electronique froide
- Transformateur électrostatique
 - ✓ Réduit les contraintes sur la HT (chaque gap consiste de 4 sous-gaps de 1.85 mm)
 - ✓ Lecture de l'électrode centrale uniquement
 - ✓ Optimisation du rapport signal/bruit

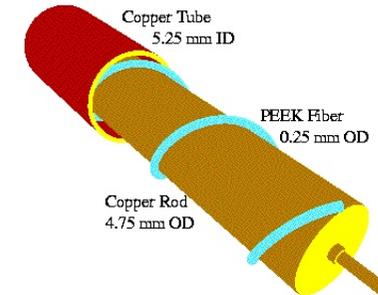


Calorimètre hadronique vers l'avant (FCAL)

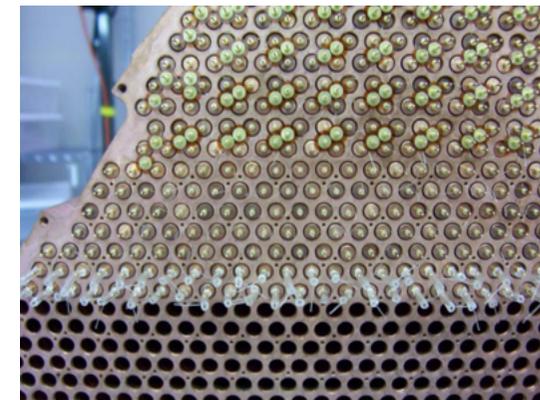
Propriétés principales

- $2.5 < |\eta| < 4.9$
- Résistant aux radiations
- Electrodes en Cu parallèles à l'axe du faisceau
- 2 x 3 roues (1 EM et 2 hadroniques)
 - ✓ Matrice Cu pour la roue EM ($28 X_0$, $2.6 \lambda_I$)
 - ✓ Matrice W pour les roues hadroniques ($3.7 \lambda_I$ chacune)
- $10 \lambda_I$ pour l'ensemble du FCAL
- Epaisseur des gaps d'argon liquide : de $250 \mu\text{m}$ (EM) à $500 \mu\text{m}$ (hadronique)
- Temps de dérive de 60 ns (65% après 25 ns)
- 3 compartiments longitudinaux
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$
- Pas de tracking en amont permettant une séparation électron/photon
- Nécessaire pour asymétrie avant/arrière des Z' lourds - couplages électrofaibles - SUSY

Electrode



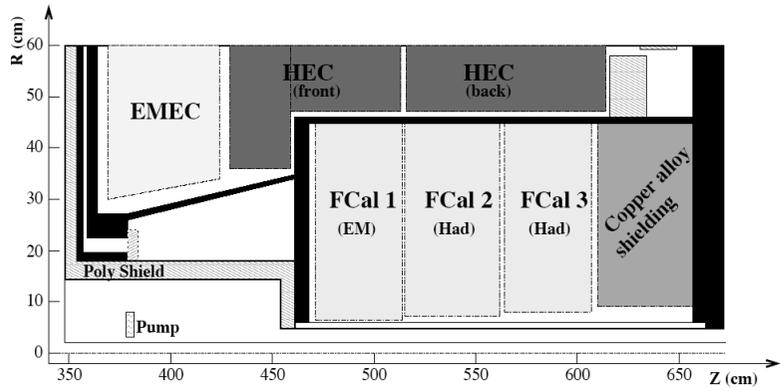
Matrice du FCAL pendant l'assemblage des électrodes



Le calorimètre d'ATLAS à LAr

Function	EM	Hadronic	Hadronic
Mass of module (kg)	2119	3826	3695
Main absorber material	Copper	Tungsten	Tungsten
LAr gap width mm	0.269	0.376	0.508
Radiation length X_0	27.6	91.3	89.2
Absorption length λ	2.66	3.68	3.60
Number of electrodes	12260	10200	8224
Number of read out channels	1008	500	254

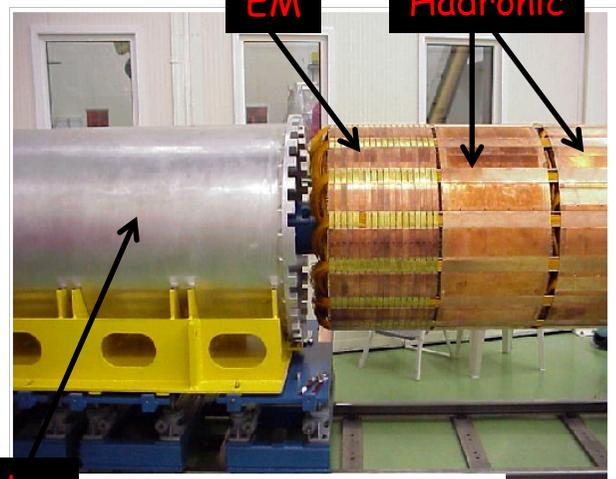
Paramètres du FCAL construit



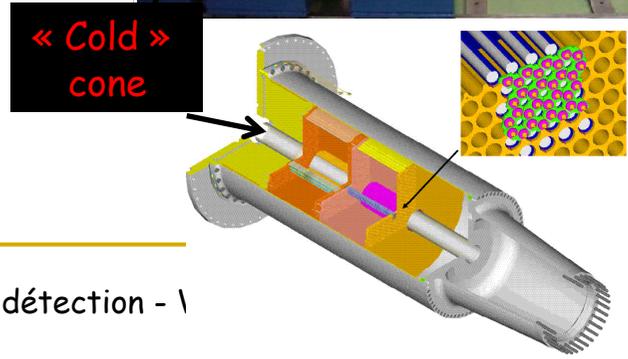
Pendant l'assemblage



EM Hadronic



- Le HEC recouvre FCAL1 pour assurer une couverture complète
- Vérifié en faisceau test combinant EMEC, HEC et FCAL

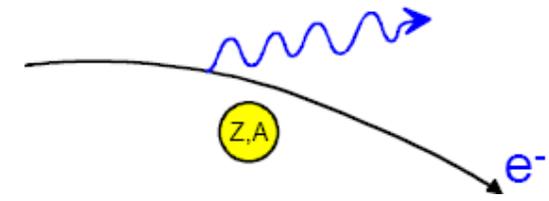


Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules
- V. **Calorimétrie**
 - 1) **Généralités**
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS
- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

Rappels

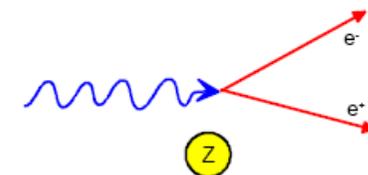
- Un électron/positron (et μ^\pm d'énergie > 1 TeV) est courbé par le champ des noyaux : c'est le **rayonnement de freinage** (ou **bremsstrahlung**) qui domine à haute énergie
 - Définit la longueur de radiation X_0 (g/cm²)
 - L'**énergie critique** est l'énergie à laquelle



$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0}$$

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Collision}} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Rayonnement}}$$

- Conversion d'un photon: le mécanisme dominant à haute énergie est la **production de paires**



- En moyenne, un γ de haute énergie se convertira en e^+e^- après $1 X_0$

Principes de la calorimétrie

- Méthode destructive de mesure de l'énergie totale par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie
 - Excitation ou ionisation
 - \Rightarrow formation de **gerbes électromagnétiques** ou **hadroniques**
 - L'énergie est (partiellement) convertie en un signal proportionnel à l'énergie de la particule incidente
- On appellera **absorbeur** le milieu qui déclenche la gerbe

- Un **calorimètre** permet d'apporter de l'information pour toutes les particules qui le traversent :
 - Electrons, photons, hadrons : mesure directe de l'énergie
 - Muons : détection du passage de la particule
 - Neutrinos (par la « mesure » de l'énergie manquante)

- Détecteurs « multi tâches »
 - Mesure de l'énergie
 - Mesure de direction de la trace de la particule incidente
 - Identification des particules : la réponse d'un électron, d'un photon ou d'un muon ne sera pas la même

Plan

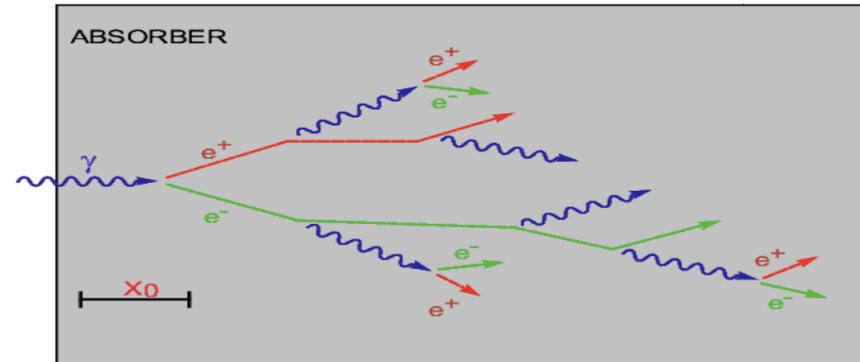
- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) **Calorimétrie électromagnétique**
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

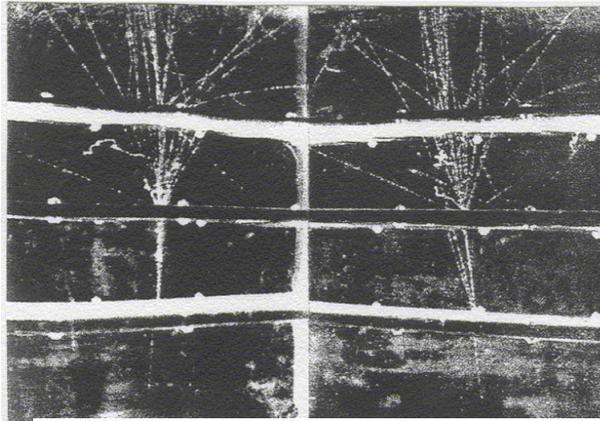
- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

- Concernes les e^\pm et les γ

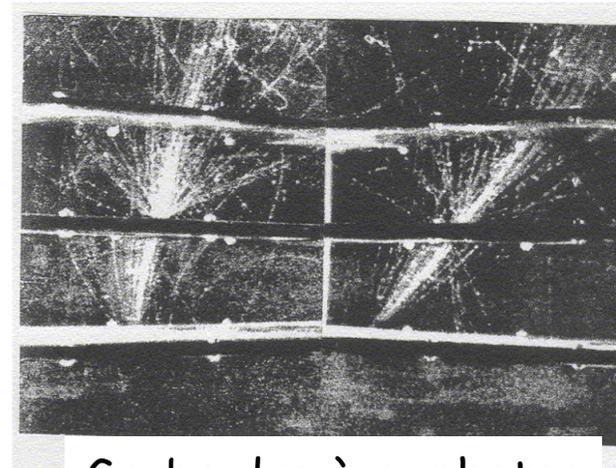
Conversion d'un γ au bout d'environ $1 X_0$



- La forme des gerbes dues aux e^\pm et aux γ est différente



Gerbe due à un électron



Gerbe due à un photon

L. Fussel (1939)

Modèle simpliste

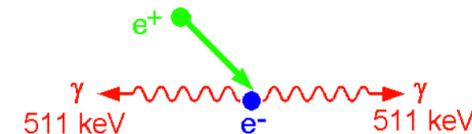
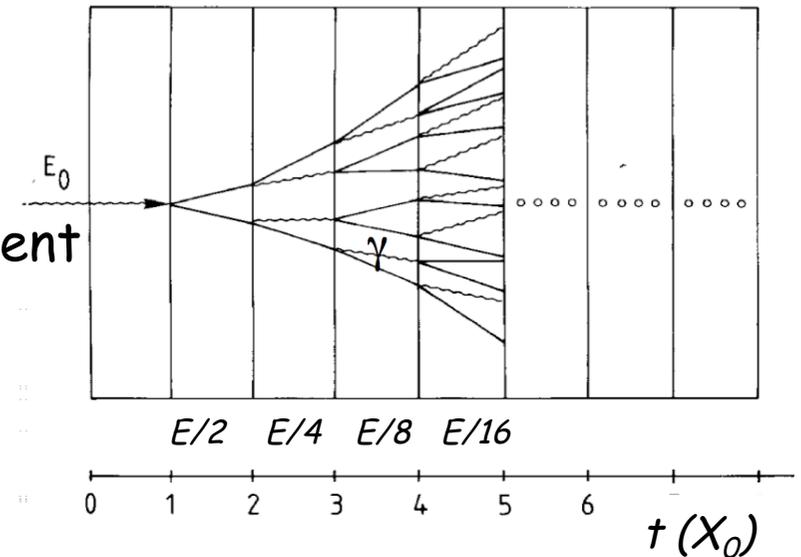
- On considère uniquement le rayonnement de freinage et la création de paires avec $X_0 = \lambda_{\text{paire}}$

$$N(t) = 2^t$$

- Le processus continue jusqu'à t_{max} pour lequel $E(t) < E_c$

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln(E/E_c)}{\ln(2)} \quad N_{\text{total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{t_{\text{max}+1}} - 1 \approx 2^{t_{\text{max}}} 2 = 2 \frac{E}{E_c}$$

- Au delà de t_{max} , les mécanismes dominants sont l'ionisation, l'effet Compton et l'effet photoélectrique
 - Les électrons finissent par s'attacher autour d'un noyau
 - Les positrons finissent par s'annihiler avec un électron libre ou peu lié



Développement des gerbes

- Forme longitudinale : $\frac{dE}{dt} \propto t^\alpha \exp(-t)$
 - Le maximum se trouve à :

$$t_{max} = \frac{\ln(E/E_c)}{\ln(2)}$$

- 95% de la gerbe est contenue dans

$$t_{95} \approx t_{max} + 0,08 \times Z + 9,6$$

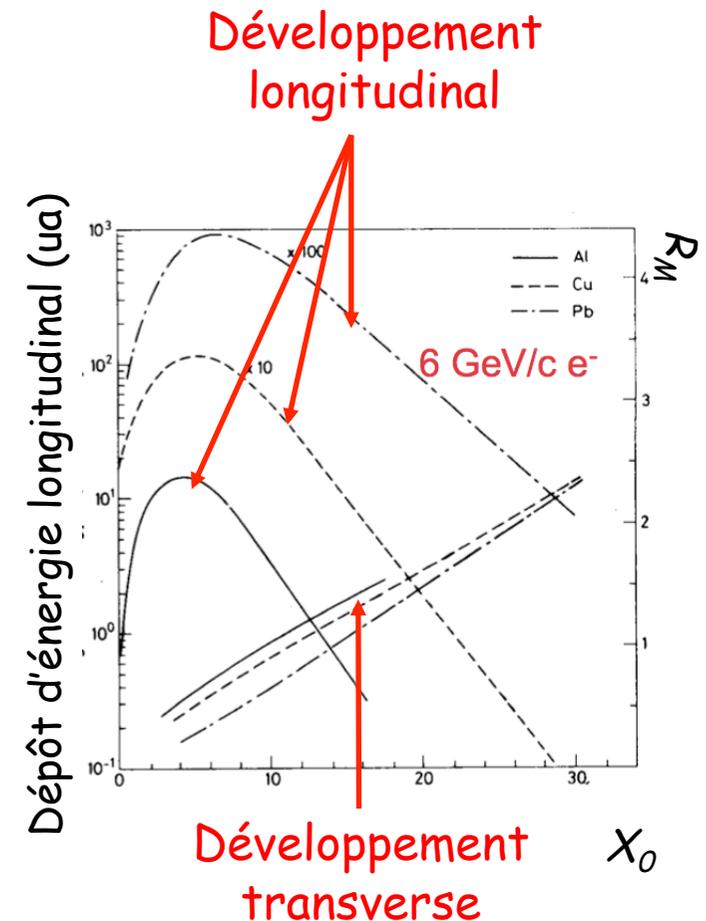
- La dimension longitudinale d'une gerbe croît comme $\ln(E)$

- Développement transverse

- 95% de la gerbe est contenue dans un cône de rayon $2 R_m$ (rayon de Molière) :

$$R_m = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0$$

- R_m s'exprime en g/cm^2 comme X_0



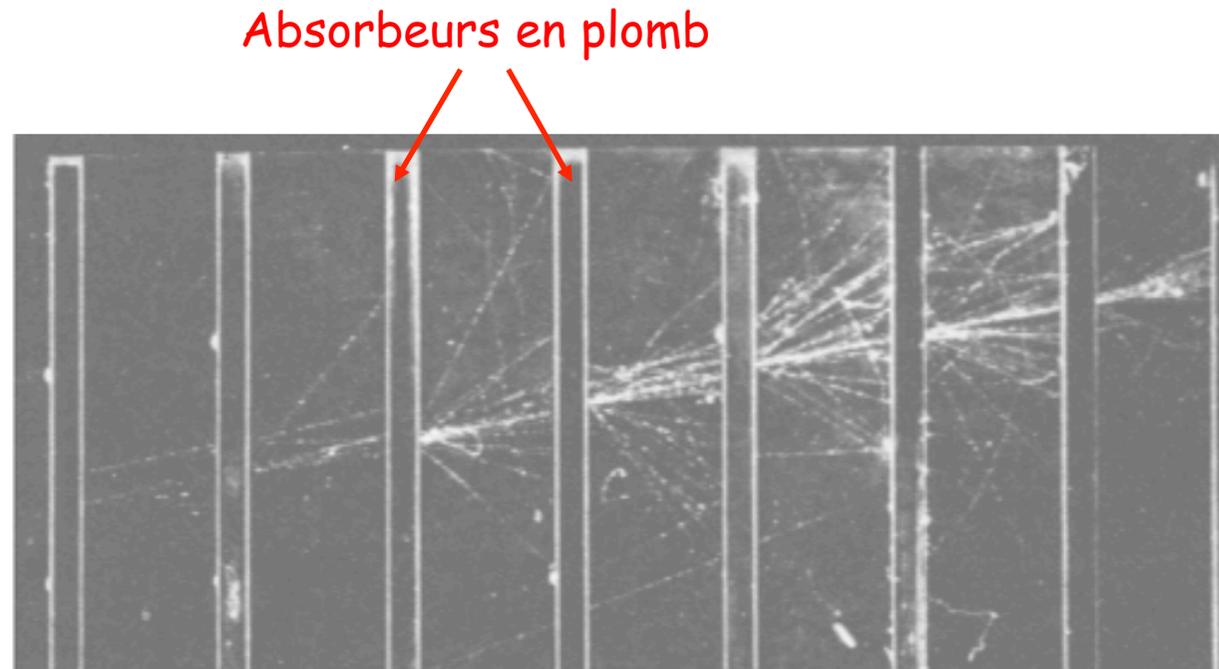
Quelques valeurs typiques

Material	Z	Density [g cm ⁻³]	X ₀ [mm]	ρ _M [mm]	dE/dx mip [MeV cm ⁻¹]	λ _{int} [mm]
C	6	2.27	188	48	3.95	381
Al	13	2.70	89	44	4.36	390
Fe	26	7.87	17.6	16.9	11.4	168
Cu	29	8.96	14.3	15.2	12.6	151
Sn	50	7.31	12.1	21.6	9.24	223
W	74	19.30	3.5	9.3	22.1	96
Pb	82	11.30	5.6	16	12.7	170
U 238	92	18.95	3.2	10	20.5	105
Concrete		2.50	107	41	4.28	400
Glass		2.23	127	53	3.78	438
Marble		2.93	96	36	4.77	362
Si	14	2.33	93.6	48	3.88	455
Ar (liquid)	18	1.40	140	80	2.13	837
Kr (liquid)	36	2.41	47	55	3.23	607
Xe (liquid)	54	2.95	24	42	3.71	572
Polystyrene		1.032	424	96	2.00	795
Plexiglas		1.18	344	85	2.28	708
Quarz		2.32	117	49	3.94	428
Pb glass		4.06	25.1	35	5.45	330
Air (2C, 1atm)		0.0012	304m	74m	0.0022	747m
H ₂ O		1.00	361	92	1.99	849
PbWO ₄		8.3	8.9	20	10.2	207
CeF ₃		6.16	16.8	26	7.9	259
LYSO		7.40	11.4	20.7	9.6	209

Tout est
tabulé !

Exemple réel

Gerbe
électromagnétique
créée par un
électron dans une
chambre à
brouillard



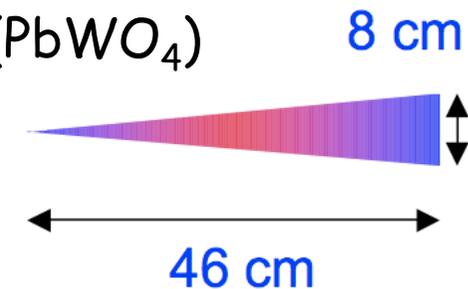
- Electron de 100 GeV dans un « verre au plomb » (PbWO_4)

- $E_c = 11,8 \text{ MeV}$

- $t_{95} \approx 23$

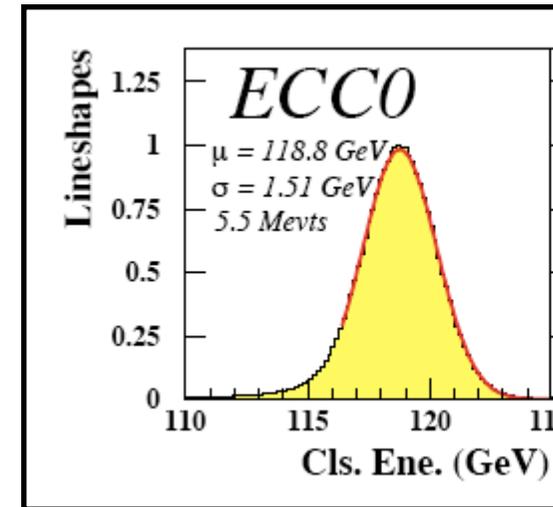
- $t_{max} \approx 13$

- $X_0 \approx 2 \text{ cm} - R_m \approx 3,6 \text{ cm}$

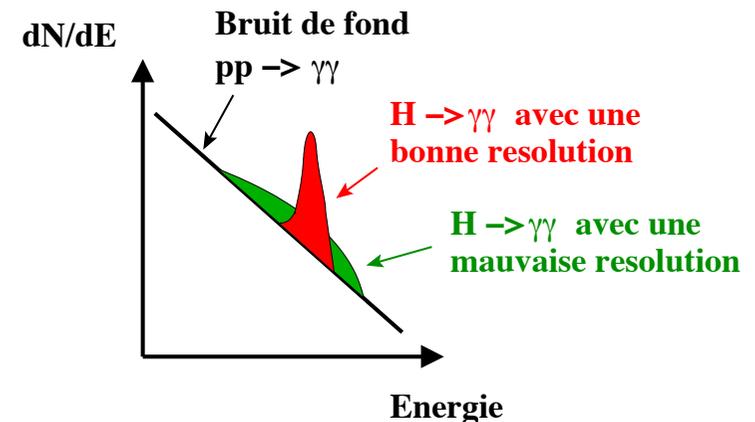


Remarque sur les résolutions

- Pour connaître la résolution en énergie d'un détecteur, on envoie sur le détecteur des particules d'énergie connues dont on essaye de recouvrir l'énergie
- Les distributions sont typiquement gaussiennes et sont caractérisées par leur largeur $\sigma(E)$
- On a besoin de la meilleure résolution possible



Exemple du calorimètre EndCap de ATLAS



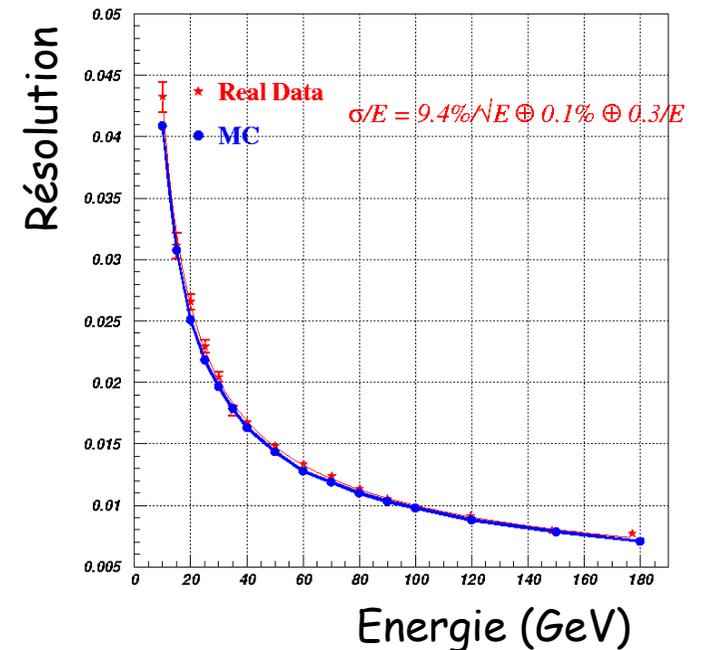
- On a typiquement pour la résolution en énergie :

2 façons d'écrire la même chose

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{c}{E} \oplus b$$

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)^2 = \left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2 + b^2$$

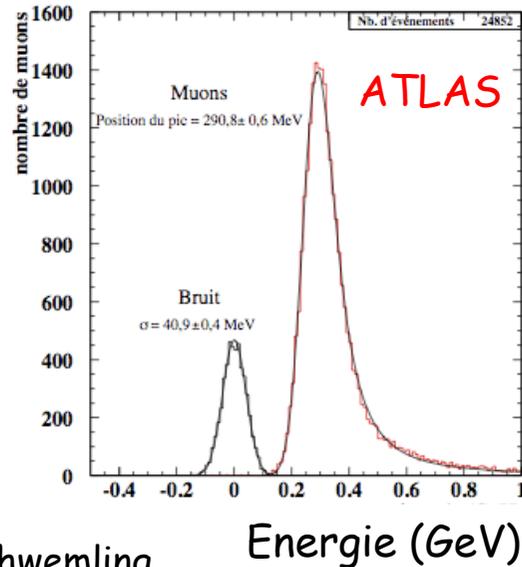
- 3 termes caractéristiques
 - a : terme d'échantillonnage
 - b : terme constant (Inhomogénéités - non linéarités - mauvaise calibration)
 - c : terme de bruit (Bruit électronique - empilement - radioactivité)
- Les résolutions spatiales et angulaires ont la même dépendance avec l'énergie de la particule incidente



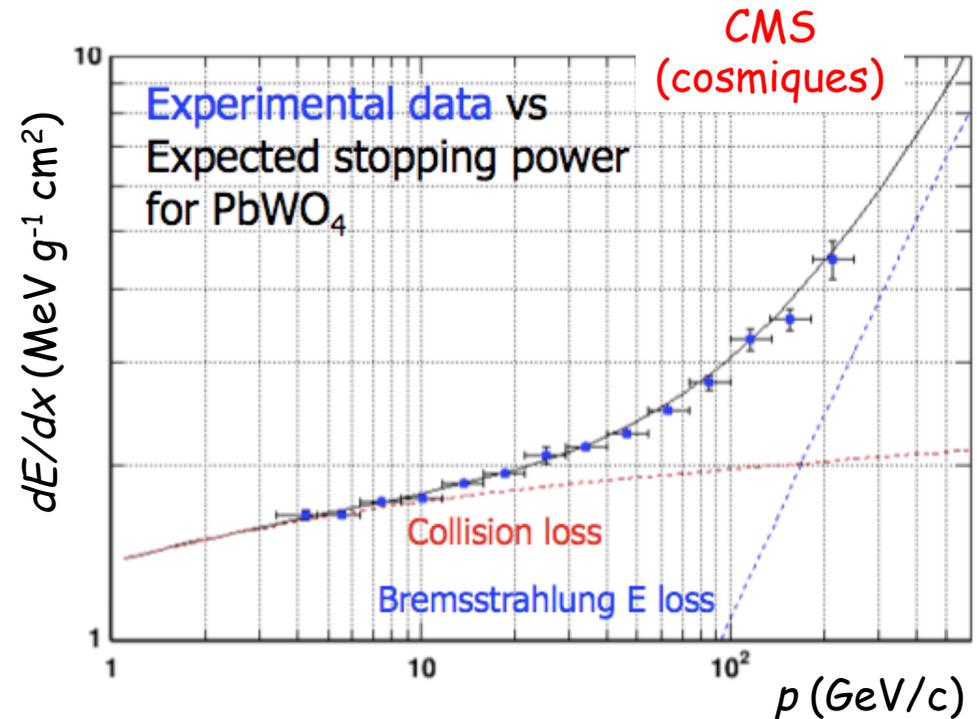
Résolution en énergie du calorimètre EM d'ATLAS

Signal déposé par les muons

- Les muons déposent également un signal très faible dans le calorimètre électromagnétique puisqu'ils sont \approx au minimum d'ionisation



P. Schwemling



M. Nessi

Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

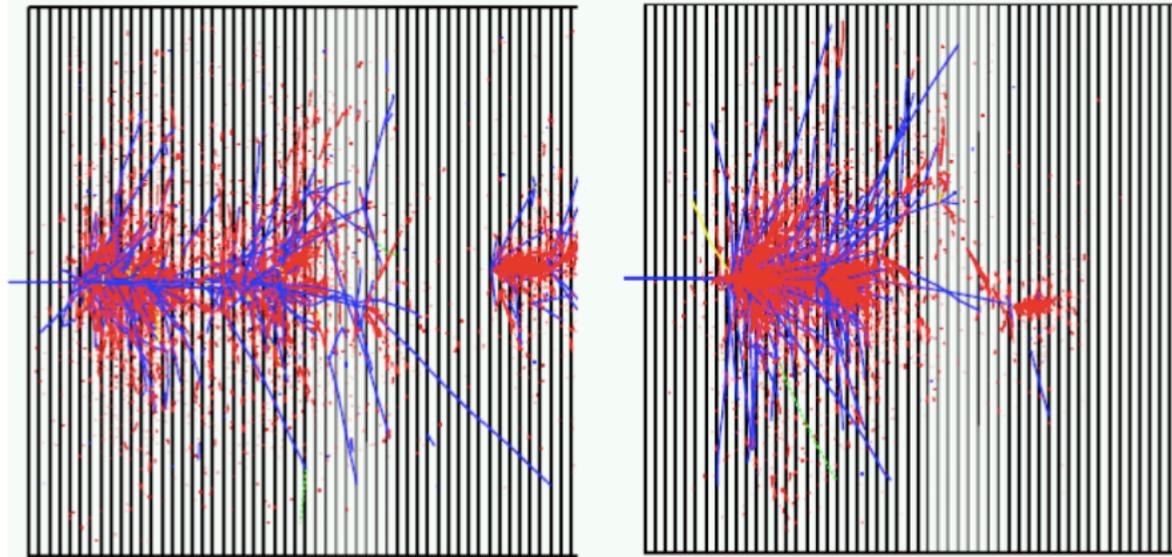
- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) **Calorimétrie hadronique**
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

Calorimétrie hadronique

M. Nessi

Même particule
(simulation)



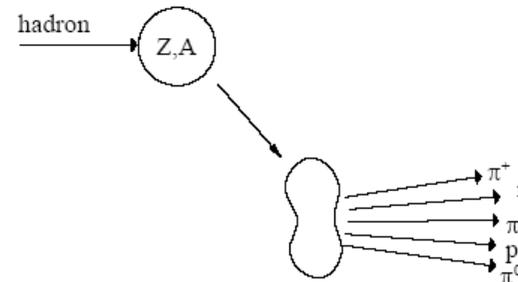
Rouge : composante
électromagnétique

Bleu : composante
hadronique

- Les gerbes hadroniques sont très fluctuantes : le dépôt d'énergie n'est pas uniforme

Interaction des hadrons neutres et chargés avec la matière

- Déterminée par des processus nucléaires inélastiques
 - Excitation puis création de fragments puis production de particules secondaires



multiplicity $\propto \ln(E)$

$p_t \approx 0.35 \text{ GeV}/c$

- A haute énergie ($> 1 \text{ GeV}$), la section efficace dépend peu de l'énergie et du type de la particule incidente (p, K, π , ..) :

$$\sigma_{Inel} \approx \sigma_0 A^{0,7} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 \approx 35 \text{ mb}$$

- Par analogie avec X_0 , on définit la **longueur d'interaction hadronique** λ_I par :

$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{Inel}} \propto A^{1/3}$$

Gerbes hadroniques

- Composante hadronique

- π^\pm , p , K^\pm , n , ν , μ ,

- Composante électromagnétique

- Photons, π^0

$$n(\pi^0) \approx \ln(E_{[GeV]}) - 4,6$$

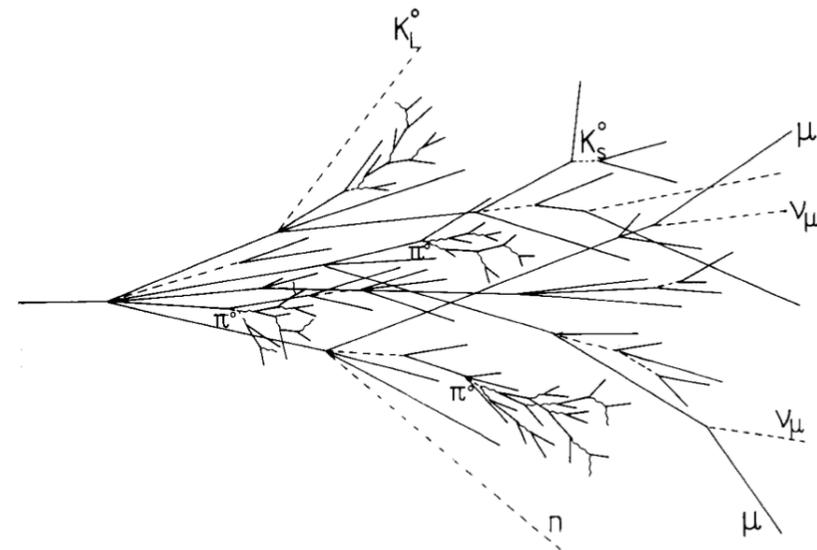
soit $\approx 18 \pi^0$ à 100 GeV

- Bien plus complexe à modéliser que les gerbes électromagnétiques

- Grandes fluctuations

- \Rightarrow Résolution en énergie moins bonne que pour les électrons
- \Rightarrow **Moindre exigence sur les performances du calorimètre que pour un calorimètre électromagnétique**

Gerbe hadronique



Développement des gerbes

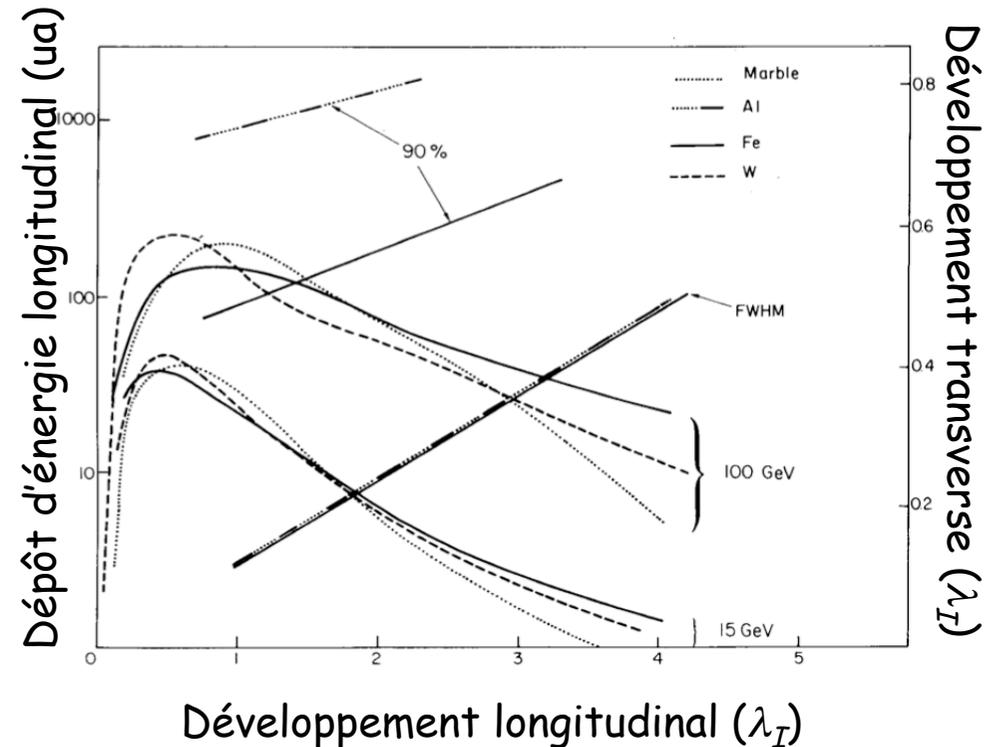
- Développement longitudinal :

$$t_{95} \approx a \ln(E) + b$$

- $t_{95} \approx 80$ cm pour Fe à 100 GeV

- Développement transverse :

- 95% de la gerbe est contenue dans un cylindre de rayon λ_I (17 cm pour Fe)



- Les gerbes hadroniques sont plus longues et plus larges que les gerbes électromagnétiques

- λ_I joue le rôle de la longueur de radiation X_0 pour les calorimètres électromagnétiques
- La plupart du temps, on a $\lambda_I \gg X_0$
 - Explique pourquoi les calorimètres hadroniques sont beaucoup plus volumineux que les calorimètres électromagnétiques

Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) **Les divers types de calorimètres**
 - 5) Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS

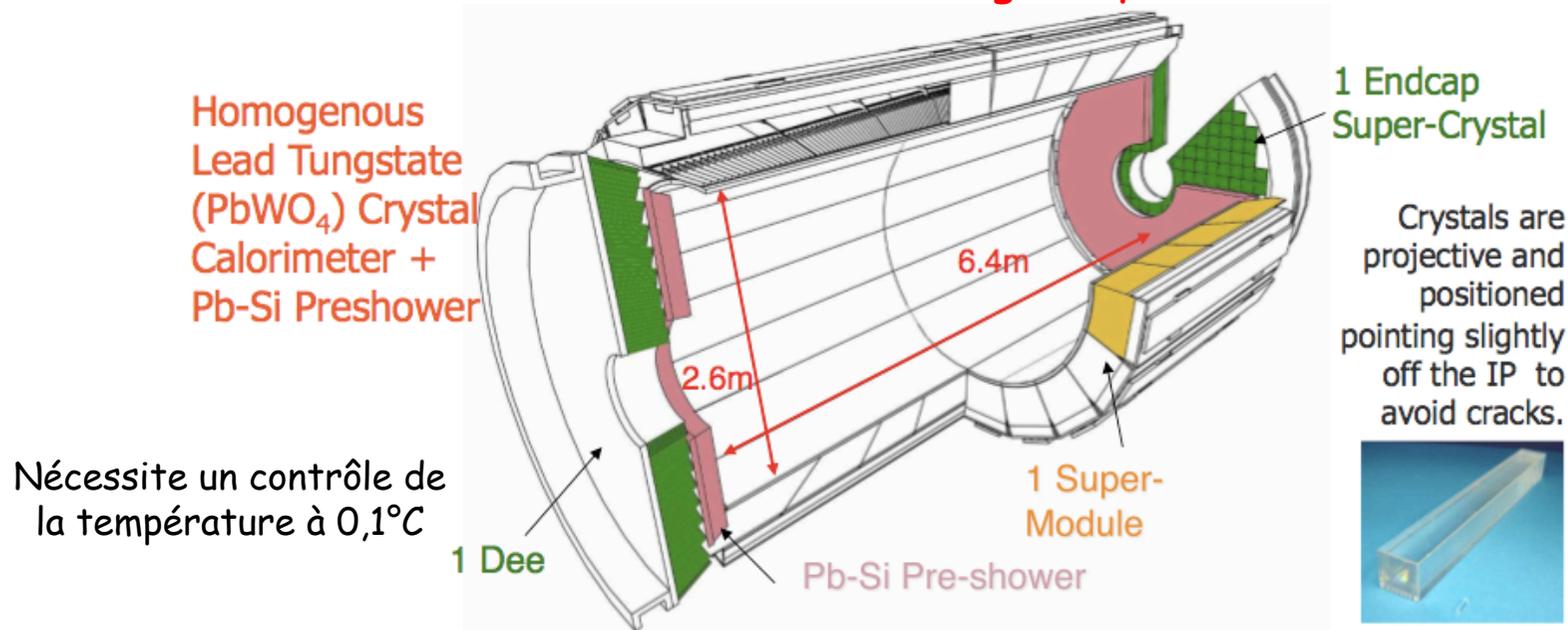
- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

Deux types de calorimètres

- Les **calorimètres homogènes** pour lesquels l'absorbeur est également le milieu de détection
 - Bonne résolution en énergie
 - Résolution spatiale moyenne
 - Pas de segmentation en profondeur
 - Ne peut servir que pour la calorimétrie EM
- Les **calorimètres à échantillonnage** (« **sampling calorimeters** ») pour lesquels l'absorbeur est différent du milieu de détection
 - Résolution en énergie moyenne
 - Bonne résolution spatiale
 - Segmentation en profondeur possible
 - Peut être utilisé en calorimétrie EM et hadronique

Calorimètres homogènes

Calorimètre électromagnétique de CMS



Nécessite un contrôle de la température à 0,1°C

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

- Endcap (EE):**
- 14648 crystals
 - 4 Dees, SuperCrystals of 5x5 xtals
 - $1.48 < |\eta| < 3.0$

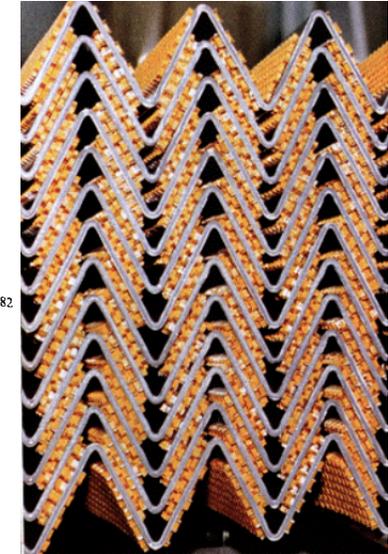
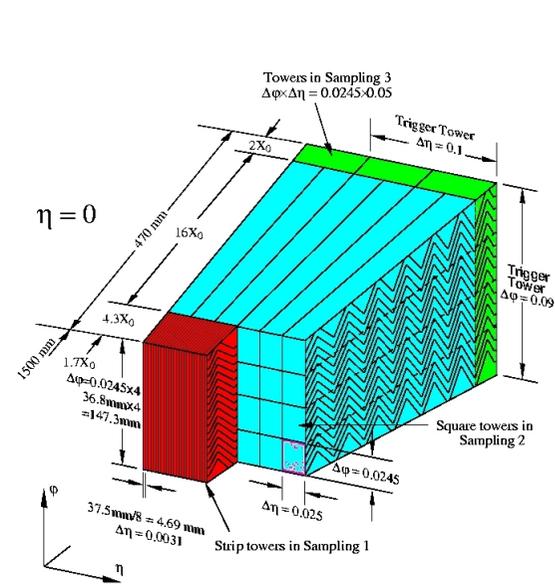
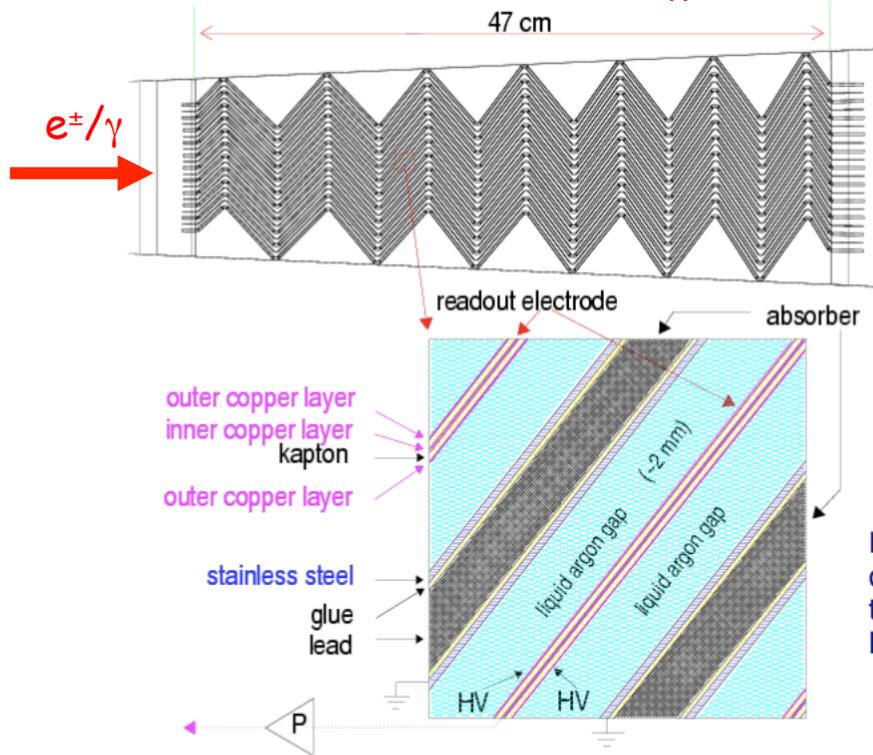
- Preshower (ES):**
- Pb-Si
 - 4 Dees
 - 4300 Si strips
 - $1.65 < |\eta| < 2.6$

M. Nessi

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{3,37\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,25\% \oplus \frac{0,108}{E_{[GeV]}}$$

Calorimètres à échantillonnage

Calorimètre électromagnétique d'ATLAS



Résolution en énergie

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{9,4\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 0,1\% \oplus \frac{0,3}{E_{[GeV]}}$$

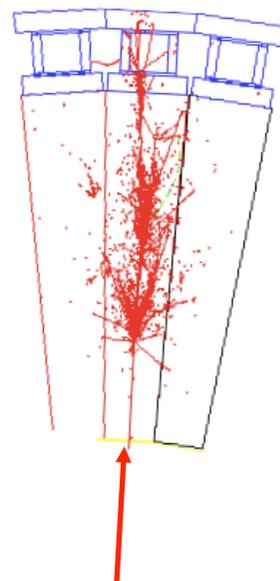
- LAr (90 K)
- Absorbeurs en Pb (1-2 mm)
- 1 GeV \Rightarrow 5 10^6 e⁻ dans LAr
- Géométrie en accordéon
- Insensible aux radiations

Calorimètres hadroniques

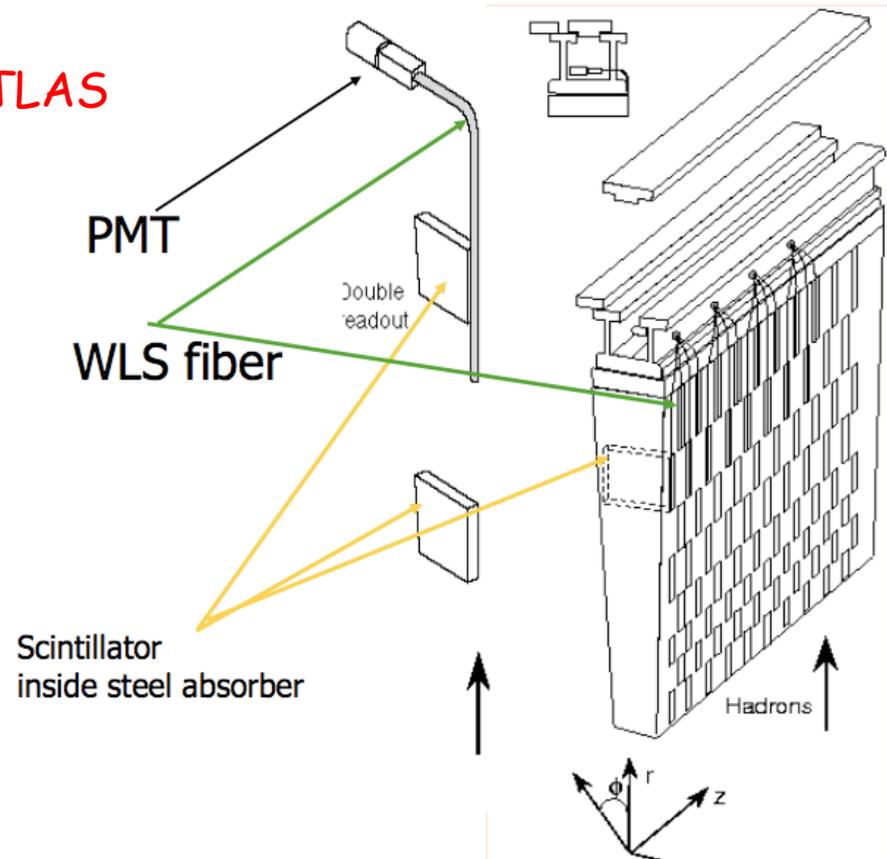
CMS



Absorbeurs en cuivre (1500 t) + scintillateurs



ATLAS



Absorbeurs acier + plaques scintillantes

Résolution en énergie :
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{65\%}{\sqrt{E_{[GeV]}}} \oplus 5\%$$

Plan

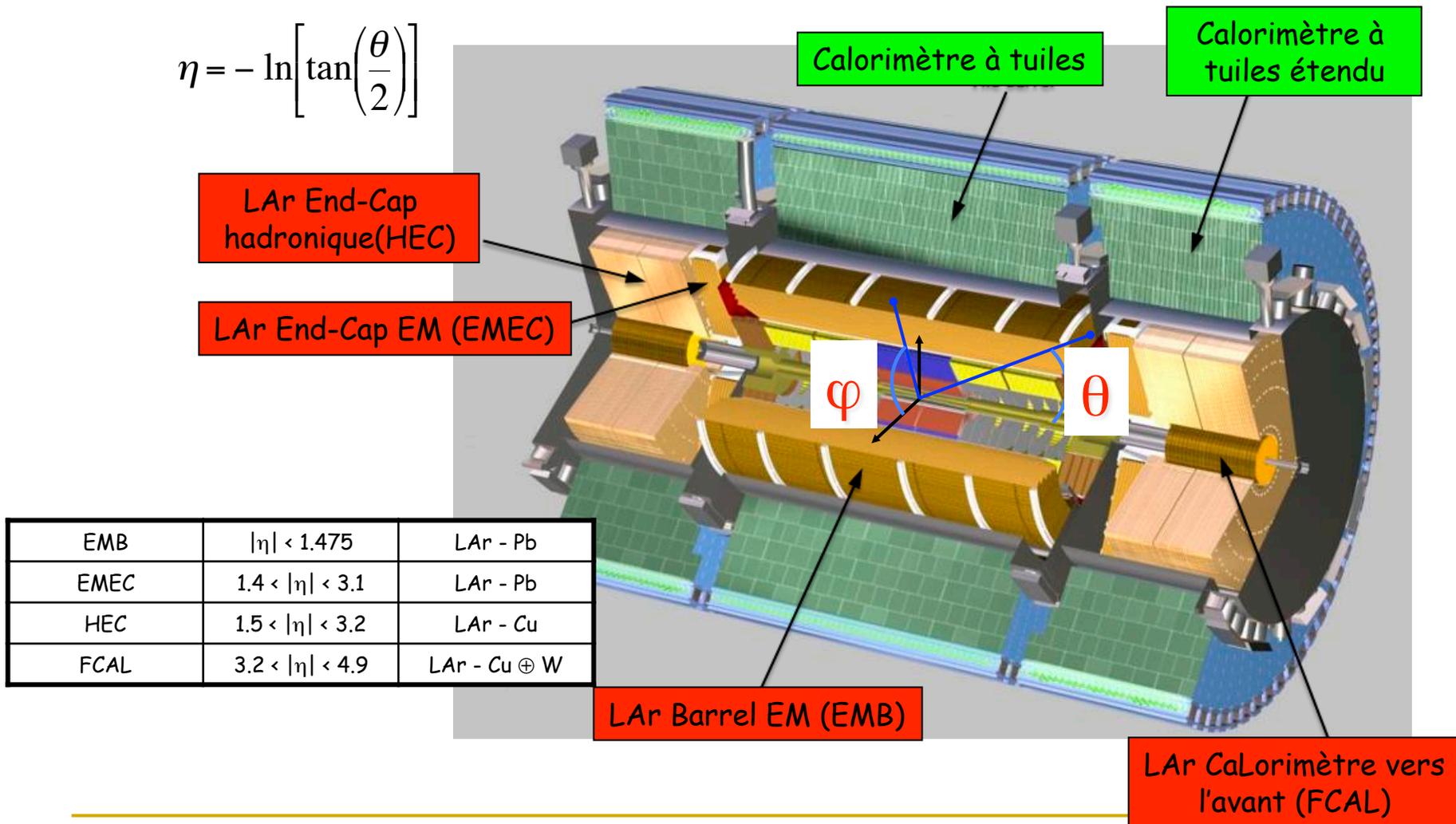
- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules

- V. **Calorimétrie**
 - 1) Généralités
 - 2) Calorimétrie électromagnétique
 - 3) Calorimétrie hadronique
 - 4) Les divers types de calorimètres
 - 5) **Exemple du calorimètre à Argon Liquide d'ATLAS**

- VI. Exemples de détecteurs de physique des hautes énergies

TileCal et Extended TileCal servent au retour de flux du solénoïde

$$\eta = - \ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$



EMB	$ \eta < 1.475$	LAr - Pb
EMEC	$1.4 < \eta < 3.1$	LAr - Pb
HEC	$1.5 < \eta < 3.2$	LAr - Cu
FCAL	$3.2 < \eta < 4.9$	LAr - Cu \oplus W

Prérequis

- Aucune bulle !
- Température du bain d'argon : 88.4 K
- Uniformité meilleure que 0.3 K
- Stabilité meilleure que 0.1 K
- Opération continue pendant 10 ou 15 ans
- Pureté meilleure que 2 ppm d'équivalent O_2



Propriétés communes à tous les cryostats

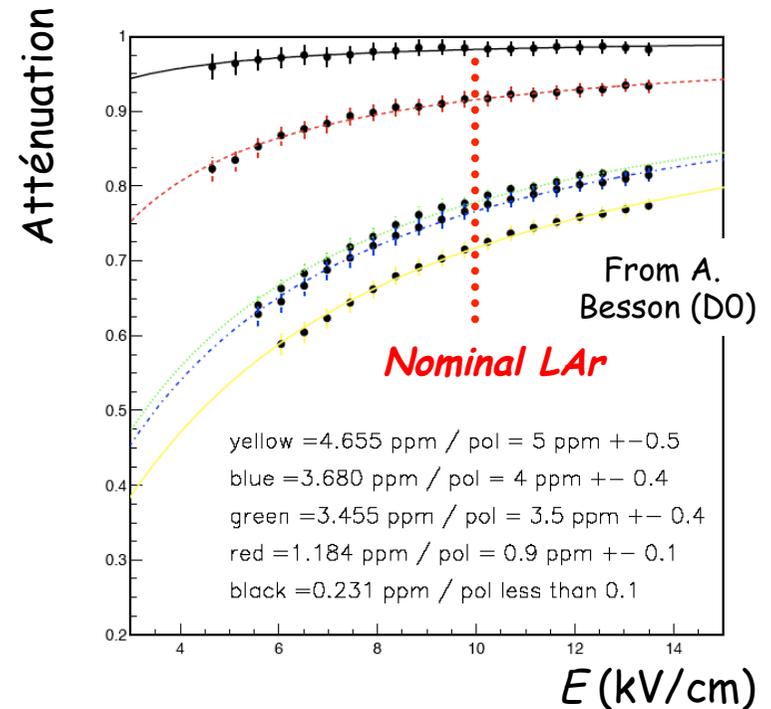
- Deux enceintes concentriques (chaude et froide)
 - L'enceinte chaude repose sur des pieds en fibre de verre-epoxy (isolation thermique et électrique)
 - Les 3 cryostats ont été testés à froid avec les détecteurs en surface au CERN avant d'être descendus dans le puit
- ⇒ 9 cycles thermiques jusqu'à maintenant

Cryostat Barrel (ou tonneau)

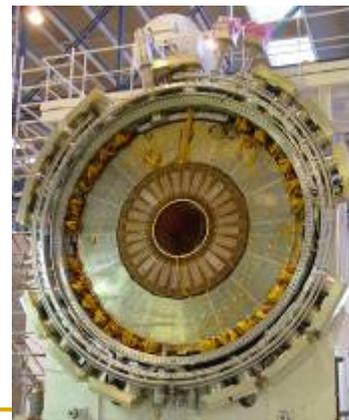
- 43 m³ de LAr
- 128000 canaux d'électronique
- Vide d'isolation partagé avec le solénoïde

Cryostat End-Cap (ou bouchon)

- 17 m³ de LAr
- 5000 canaux d'électronique
- Déplacé de 12 m pendant une ouverture d'ATLAS



Cryostat End-Cap



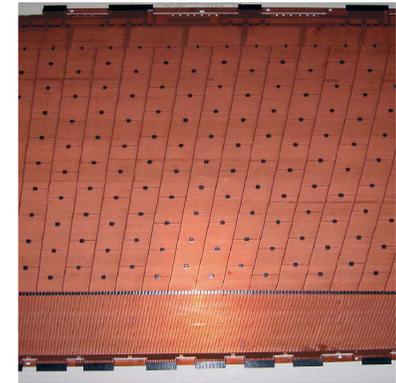
Cryostat Barrel



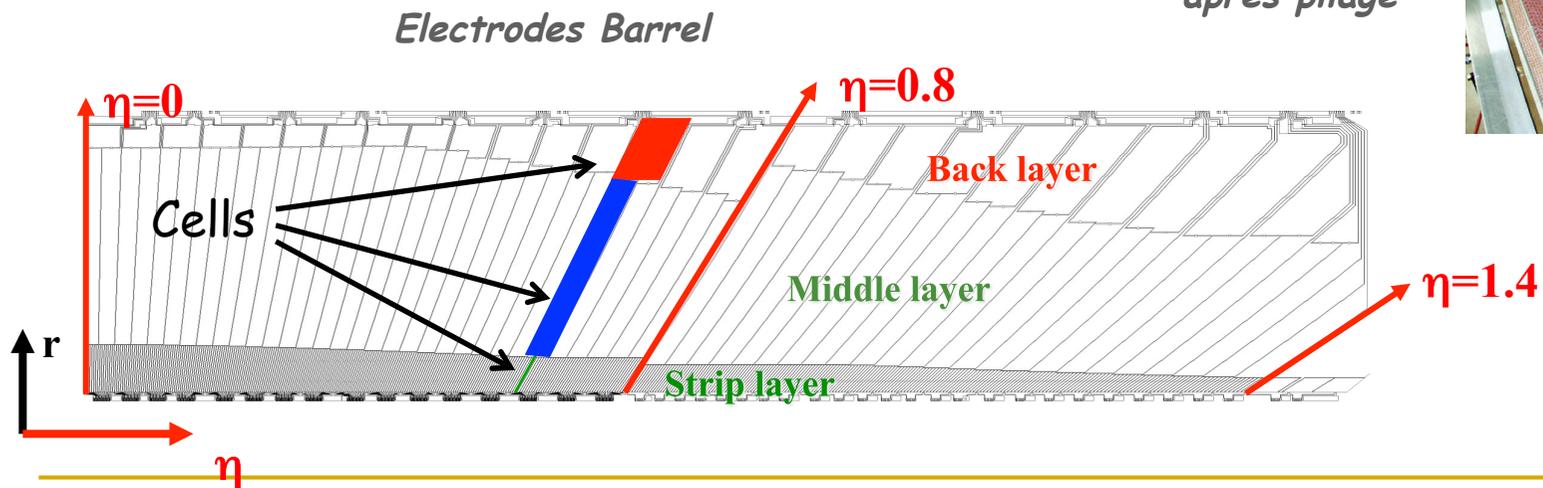
Principales propriétés

- 4 types d'électrode : 2 pour EMB et 2 pour EMEC
- les électrodes font $275 \mu\text{m}$:
 - ✓ 3 couches de Cu
 - ✓ 2 couches d'isolant (polyimide)
- les deux couches externes sont à la HT
- Le signal est lu sur l'électrode centrale
- 2 ou 3 compartiments en profondeur
- Epaisseur du gap d'argon
 - ✓ EMB : 2.1 mm de chaque côté de l'électrode (450 ns de temps de dérive pour 2000 V)
 - ✓ EMEC : de 0.9 à 3.1 mm de chaque côté de l'électrode

Electrode Barrel avant pliage



Electrode Barrel après pliage



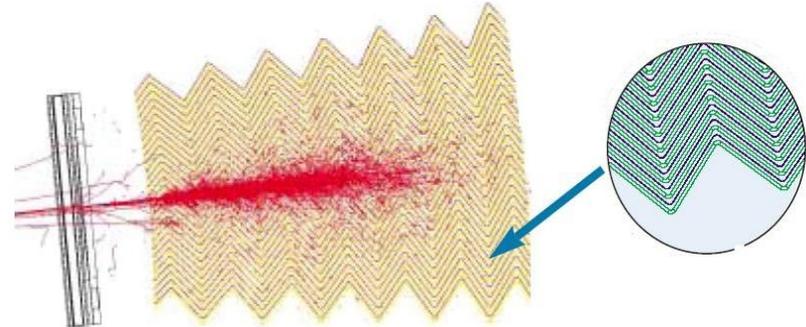
Propriétés principales

- Absorbeurs en plomb (+ mince couche d'acier)
- Bonne hermiticité (pas de crack en azimut)
- Courbure dans la direction des particules
- 1 GeV déposé donne environ $5 \cdot 10^6$ électrons
- Plusieurs compartiments en profondeur

EMB

- $|\eta| < 1.475$
- Vagues de l'accordéon parallèles à l'axe du faisceau
- Les angles des vagues changent avec le rayon pour garder constant l'épaisseur d'argon

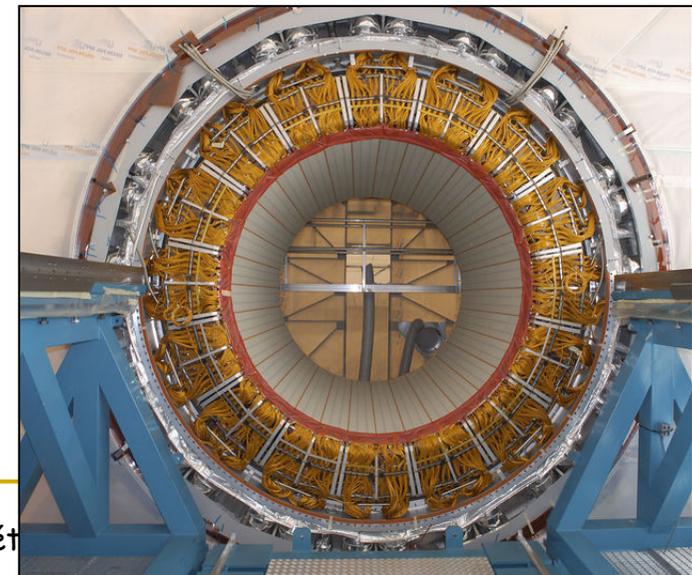
Développement de la gerbe dans l'accordéon



EMB durant l'assemblage



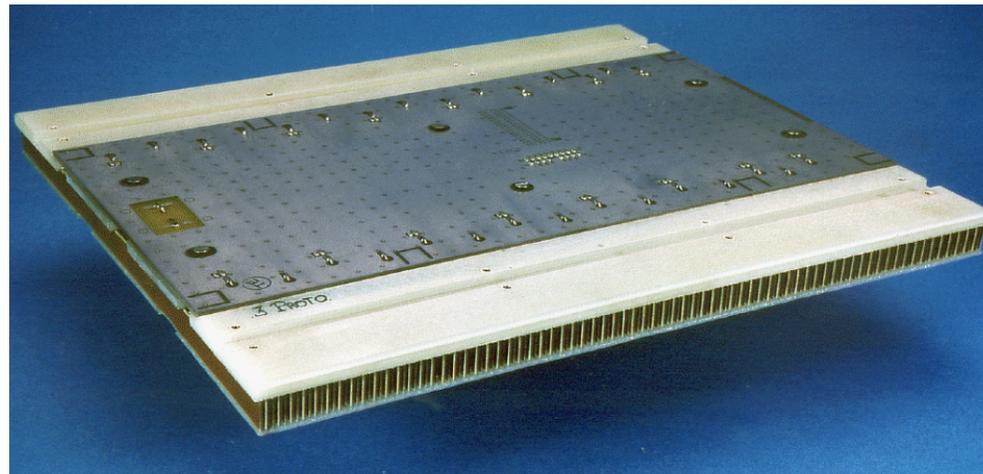
Une roue complète du EMB



Prééchantillonneur

- Nécessaire pour corriger l'énergie perdue en amont du calorimètre (principalement à basse énergie)
- Mince couche LAr instrumentée (11 mm pour EMB et 5 mm pour EMEC) devant le 1^{er} compartiment de l'accordéon
- Couverture jusqu'à $|\eta| = 1.8$

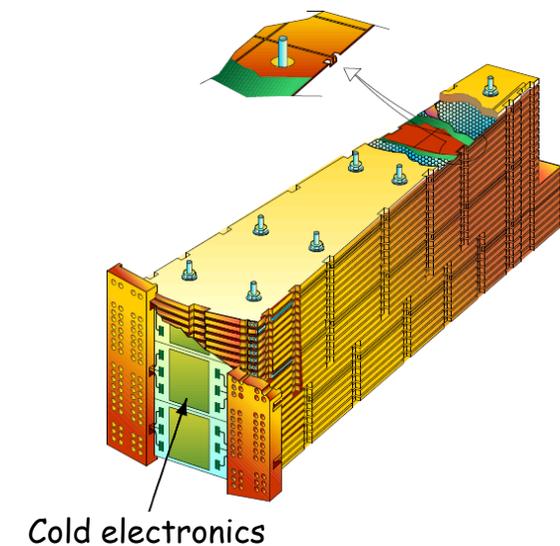
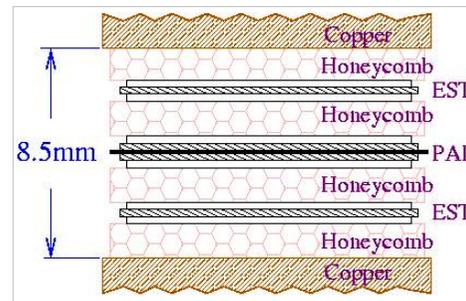
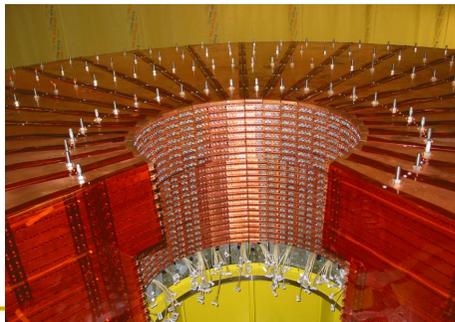
Prééchantillonneur EMB



Calorimètre hadronique End-Cap (HEC)

Propriétés principales

- Insensible aux radiations
- Absorbateurs en Cu (25/50 mm d'épaisseur) à géométrie parallèle plane (25 et 50 mm d'épaisseur)
- 2 x 2 roues (avant et arrière) de diamètre $\phi = 2$ m
- 2 x (2 x 32) modules
- $10 \lambda_I$
- 24/16 gaps pour les roues avant/arrière
- 4 compartiments longitudinaux
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ (0.2×0.2 pour $|\eta| > 2.5$)
- Electronique froide
- Transformateur électrostatique
 - ✓ Réduit les contraintes sur la HT (chaque gap consiste de 4 sous-gaps de 1.85 mm)
 - ✓ Lecture de l'électrode centrale uniquement
 - ✓ Optimisation du rapport signal/bruit

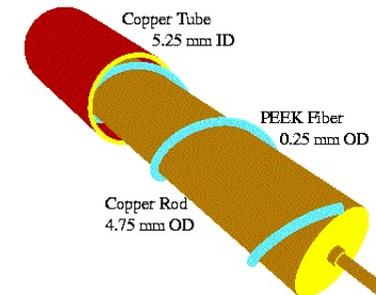


Calorimètre hadronique vers l'avant (FCAL)

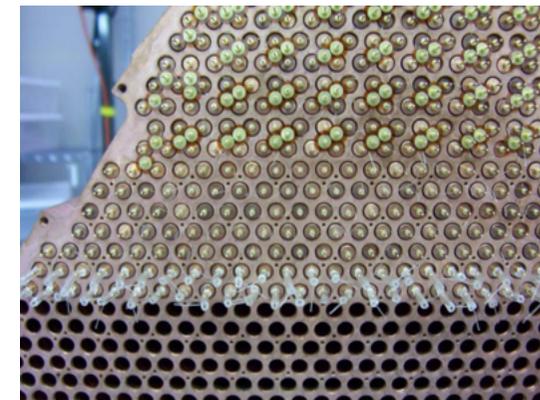
Propriétés principales

- $2.5 < |\eta| < 4.9$
- Résistant aux radiations
- Electrodes en Cu parallèles à l'axe du faisceau
- 2 x 3 roues (1 EM et 2 hadroniques)
 - ✓ Matrice Cu pour la roue EM ($28 X_0$, $2.6 \lambda_I$)
 - ✓ Matrice W pour les roues hadroniques ($3.7 \lambda_I$ chacune)
- $10 \lambda_I$ pour l'ensemble du FCAL
- Epaisseur des gaps d'argon liquide : de $250 \mu\text{m}$ (EM) à $500 \mu\text{m}$ (hadronique)
- Temps de dérive de 60 ns (65% après 25 ns)
- 3 compartiments longitudinaux
- $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$
- Pas de tracking en amont permettant une séparation électron/photon
- Nécessaire pour asymétrie avant/arrière des Z' lourds - couplages électrofaibles - SUSY

Electrode



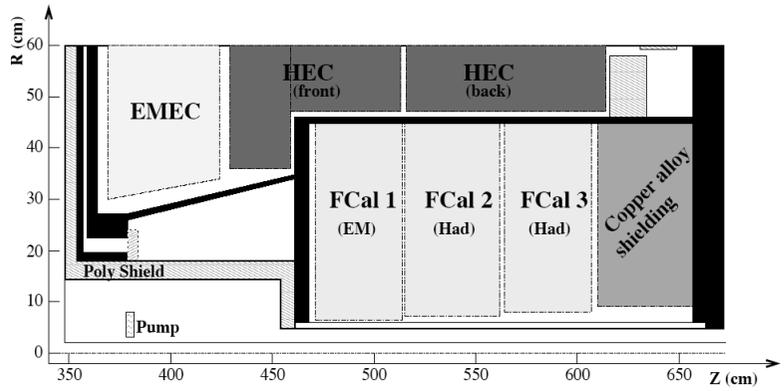
Matrice du FCAL pendant l'assemblage des électrodes



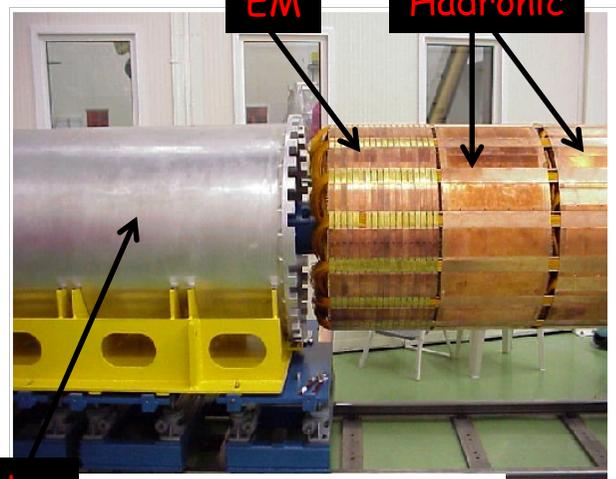
Le calorimètre d'ATLAS à LAr

Function	EM	Hadronic	Hadronic
Mass of module (kg)	2119	3826	3695
Main absorber material	Copper	Tungsten	Tungsten
LAr gap width mm	0.269	0.376	0.508
Radiation length X_0	27.6	91.3	89.2
Absorption length λ	2.66	3.68	3.60
Number of electrodes	12260	10200	8224
Number of read out channels	1008	500	254

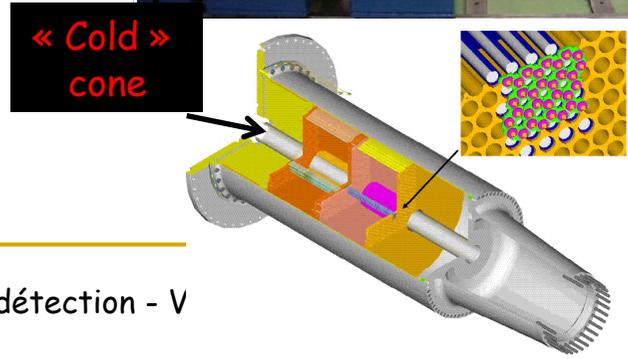
Paramètres du FCAL construit



Pendant l'assemblage



- Le HEC recouvre FCAL1 pour assurer une couverture complète
- Vérifié en faisceau test combinant EMEC, HEC et FCAL



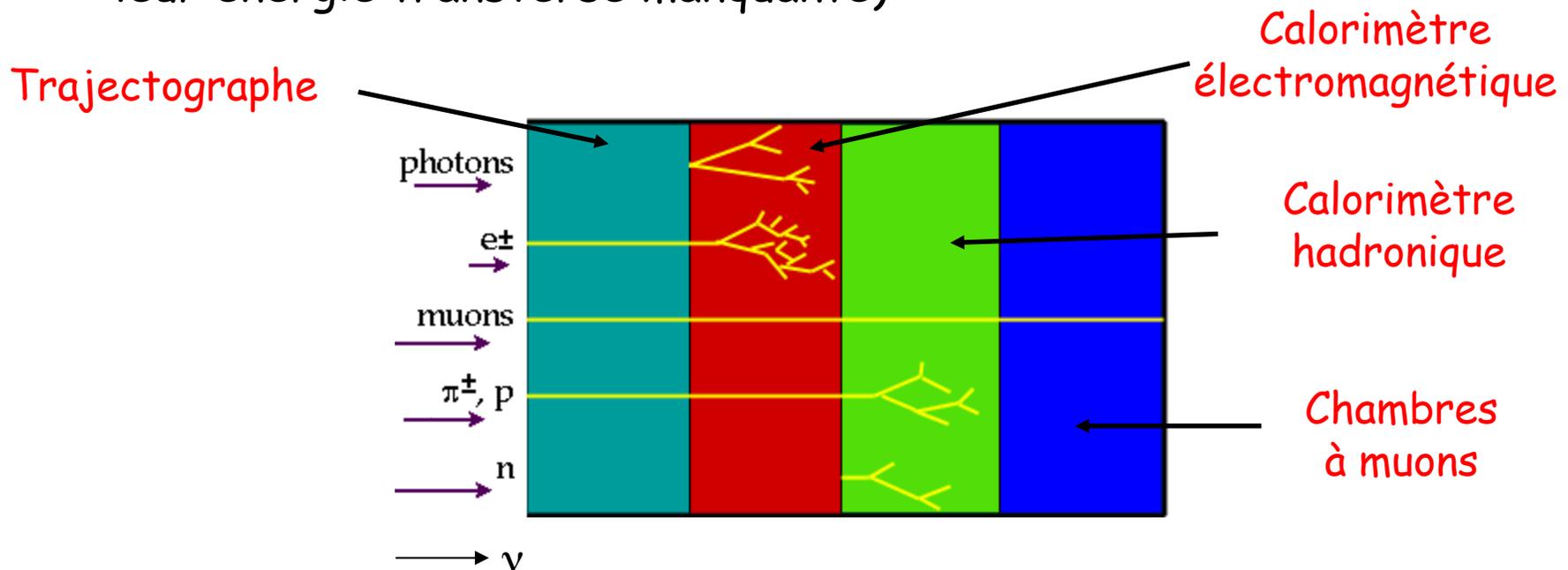
Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules
- V. Calorimétrie

- VI. Exemples de détecteurs de Physique des Hautes Energies
 - 1) **Détecteurs sur collisionneur**
 - 2) Détecteurs de neutrinos
 - 3) Autres types de détecteurs

Rappels

- Certaines mesures sont destructives, d'autres pas
- Toutes les particules ne laissent pas de trace dans les couches internes (les neutrinos n'en laissent aucune et sont détectés par leur énergie transverse manquante)



Comment faire un détecteur sur un collisionneur ?

- On vient de voir comment remplir chaque fonction (identification des particules, mesure de l'énergie, de la masse, de la charge)
- Il reste à intégrer l'ensemble des « sous-détecteurs » dans un **détecteur global**
- Principales options :
 - Position du solénoïde wrt les calorimètres
 - Forme (octogonale, cylindrique, ...)

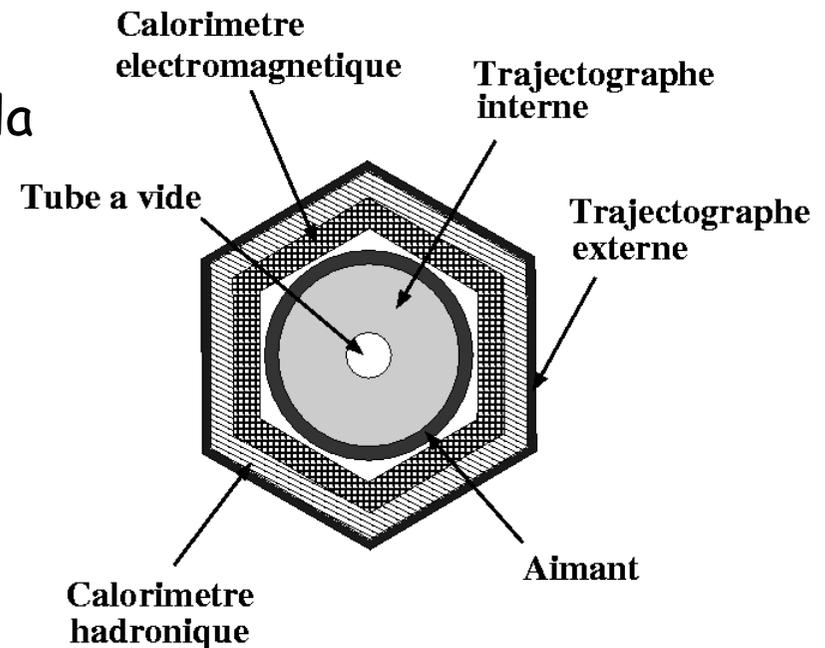
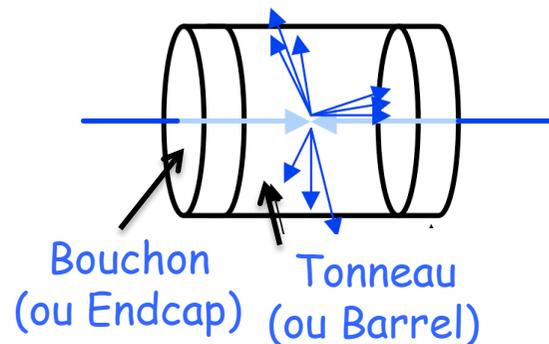


Schéma type de détecteur sur collisionneur (vue transverse)

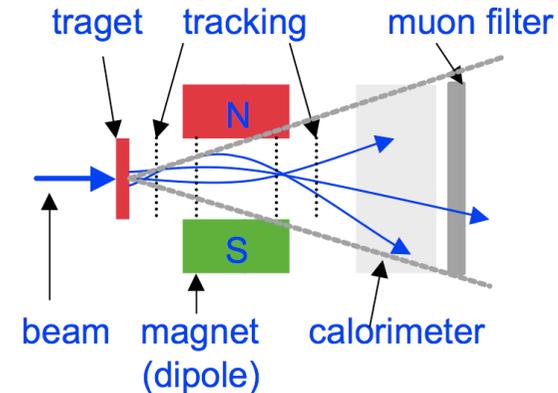
Les deux types de détecteurs

- Détecteur sur collisionneur
(4π multi purpose detector)



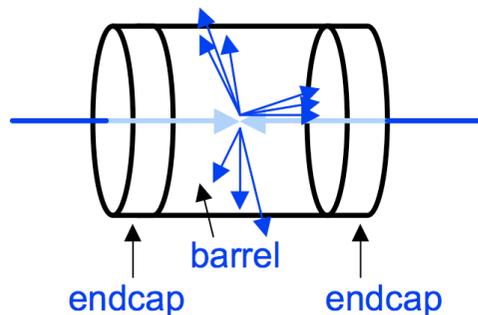
- Couverture maximale de l'acceptance
- Difficultés d'accès (maintenance)
- Exemples :
 - Expériences LEP, LHC, Tevatron, H1, Babar, ...

- Détecteur sur cible fixe
(spectromètre magnétique)



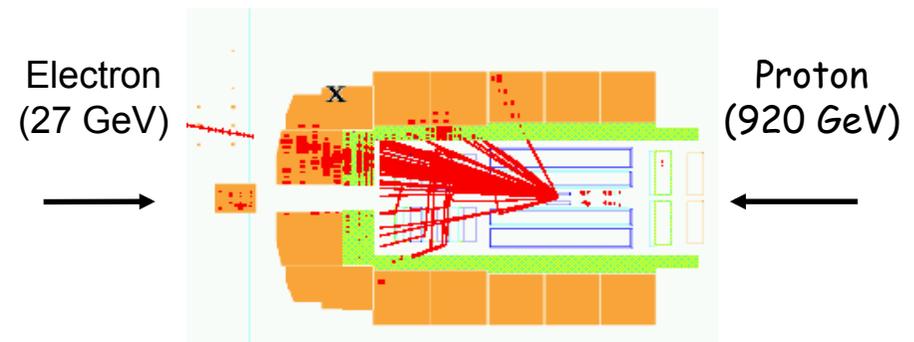
- Couverture partielle de l'angle solide
- Accès beaucoup plus simple
- Exemples :
 - NA49, LHCb

- **Détecteurs symétriques** : le référentiel du centre de masse est au repos dans le laboratoire



- Exemples :
 - Particules identiques (à la charge près) d'énergie identique : LEP, LHC, Tevatron

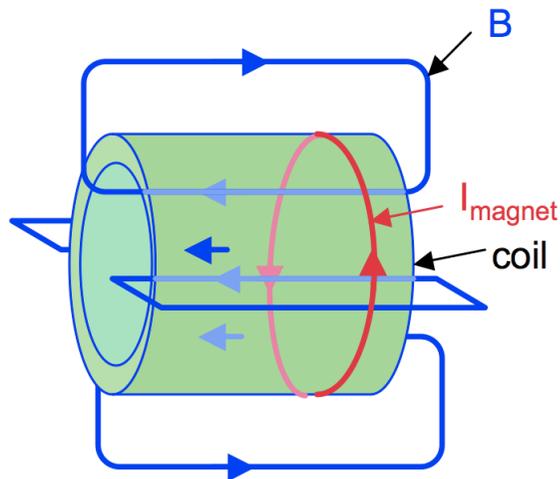
- **Détecteurs asymétriques** : le référentiel du centre de masse est en mouvement dans le laboratoire



- Exemples :
 - Particules identiques d'énergie différentes : Babar
 - Particules différentes : H1

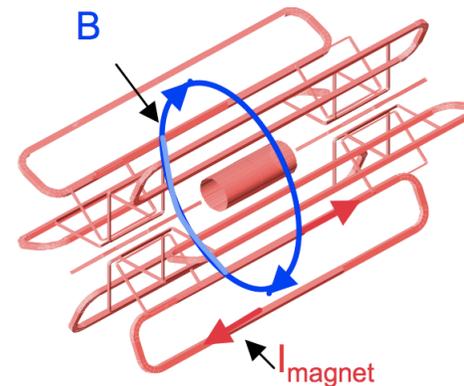
Les diverses configurations de systèmes magnétiques sur collisionneur

- **Champ solénoïdal**



- B élevé à l'intérieur
- Exemples :
 - DELPHI (SC - 1,2 T)
 - L3 (NC - 0,5 T)
 - CMS (SC - 4 T)

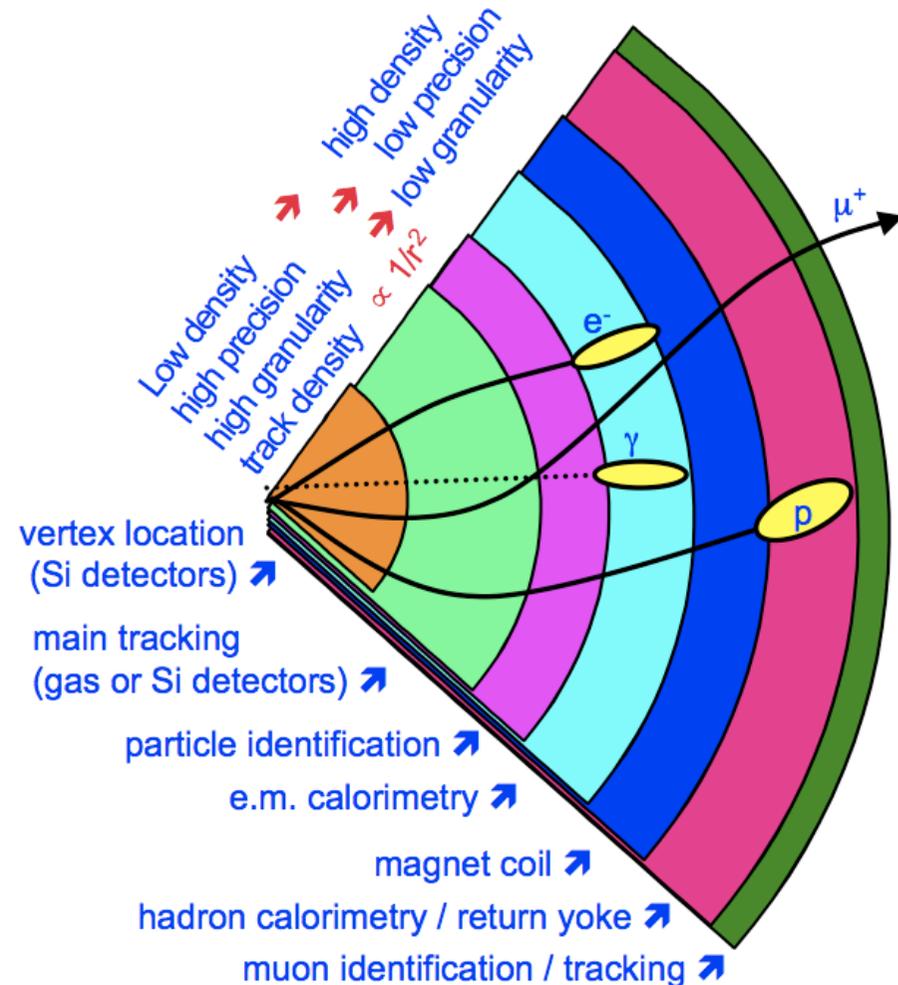
- Combinaison d'un **champ solénoïdal** et d'un **champ toroïdal**



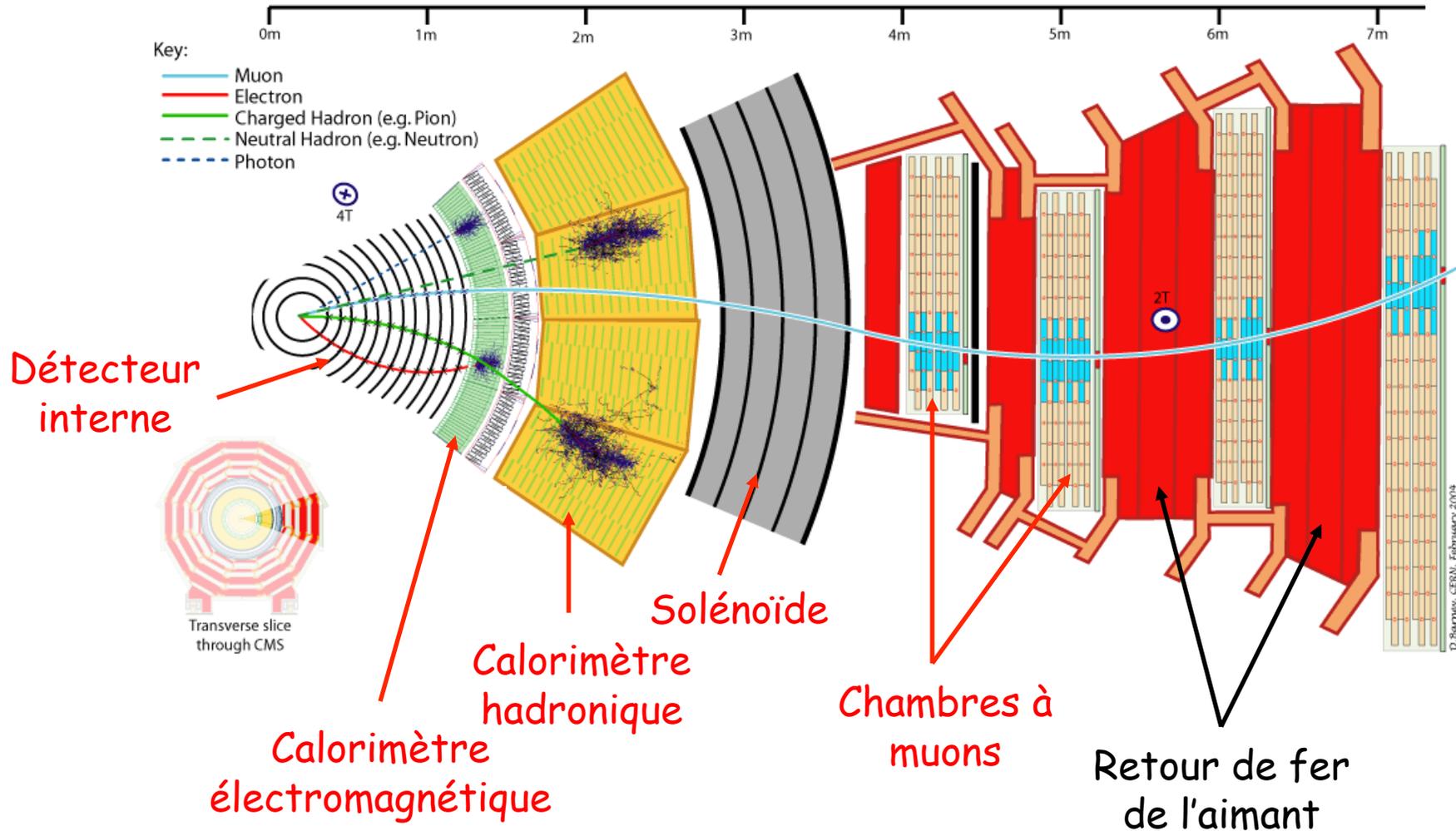
- Le champ peut être plus faible à l'intérieur car un champ extérieur courbe les muons
- Exemple :
 - D0 (SC - 2 T \oplus 2 T)
 - ATLAS (SC - 2 T \oplus 0,6 T)

Les détecteurs LHC

- Les détecteurs généralistes du LHC (ATLAS et CMS) nécessitent un tracking performant pour les muons
 - Les spectromètres à muons sont de dimensions inégales
 - Très bonne résolution spatiale



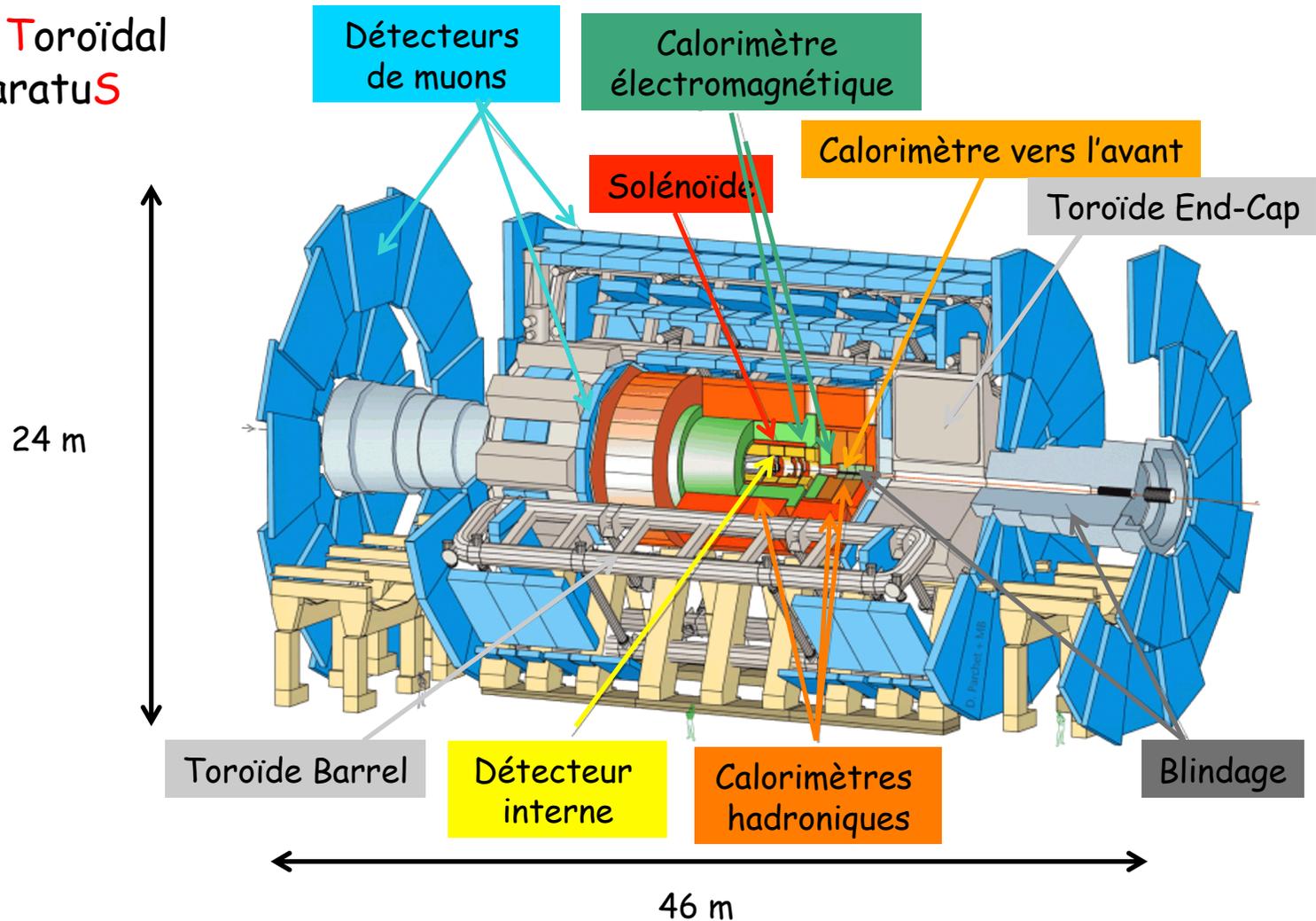
Une série d'évènements dans CMS



ATLAS

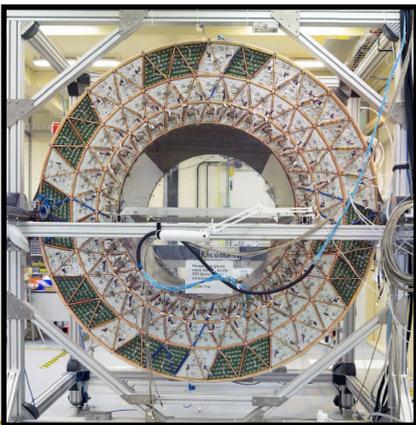
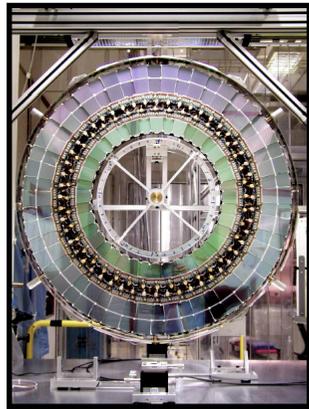
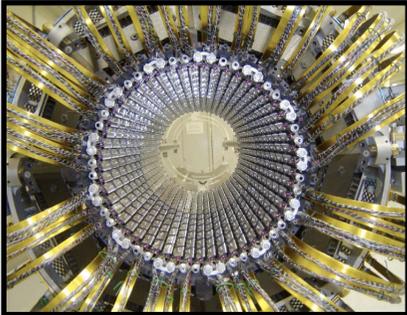
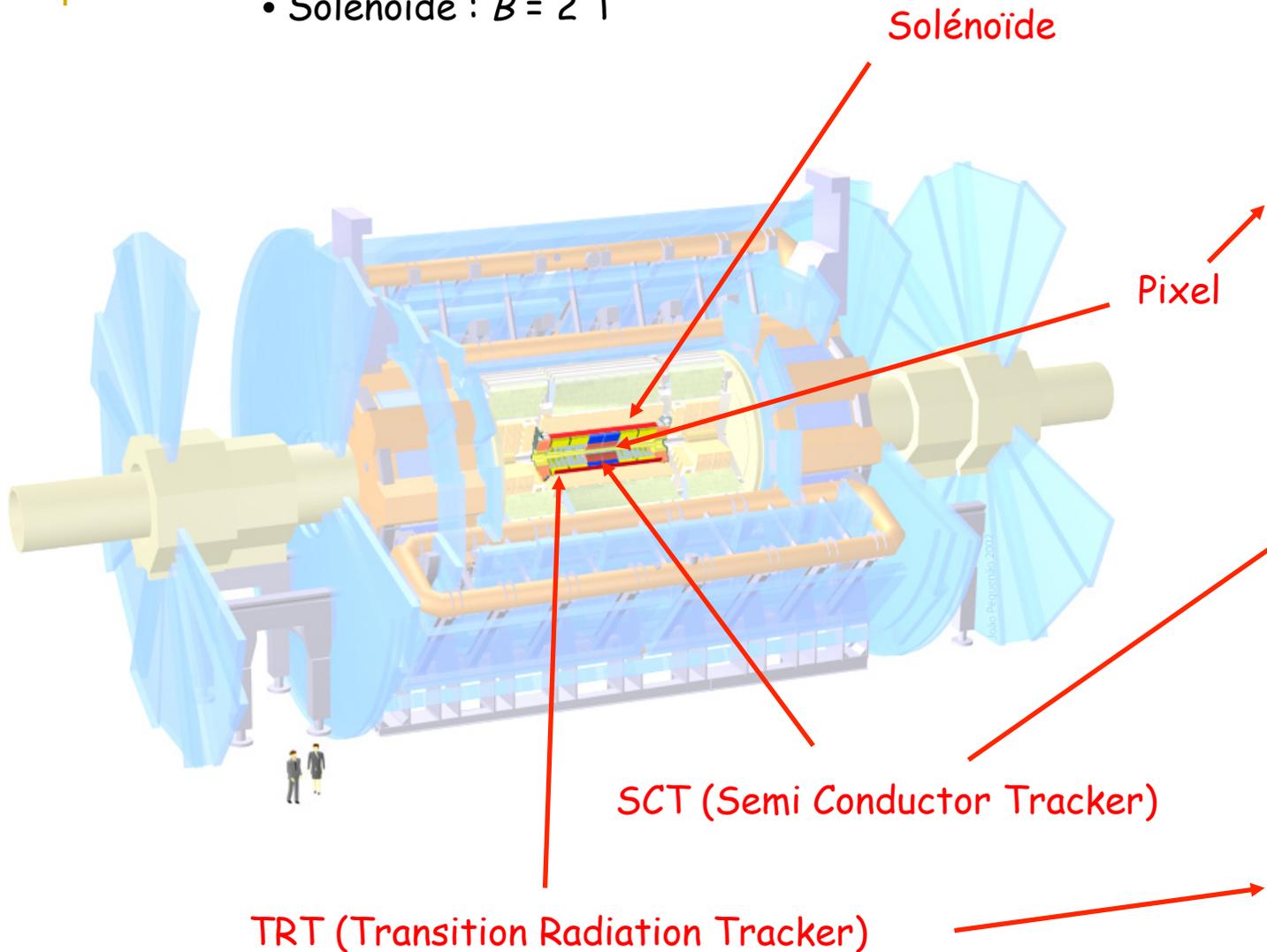
- Détecteur : $L \times l = 44 \text{ m} \times 22 \text{ m} - 7000 \text{ t}$
- Caverne : $L \times l \times h = 53 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 35 \text{ m}$

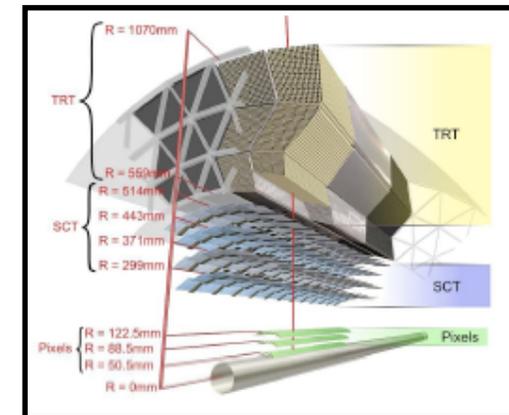
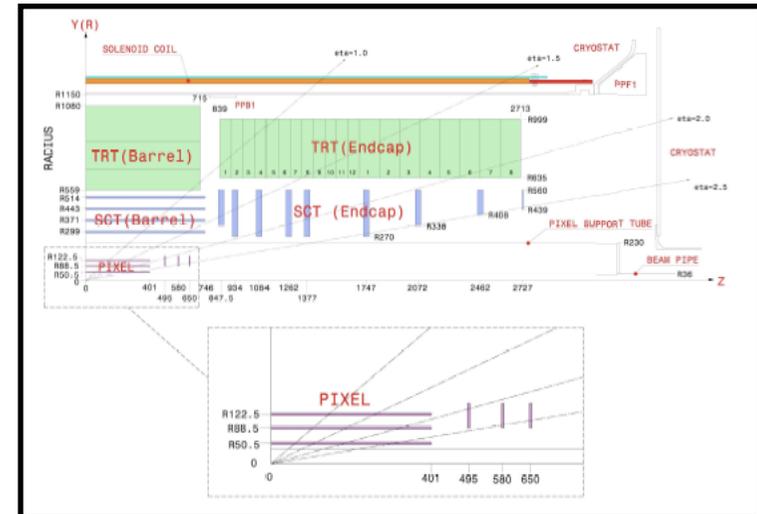
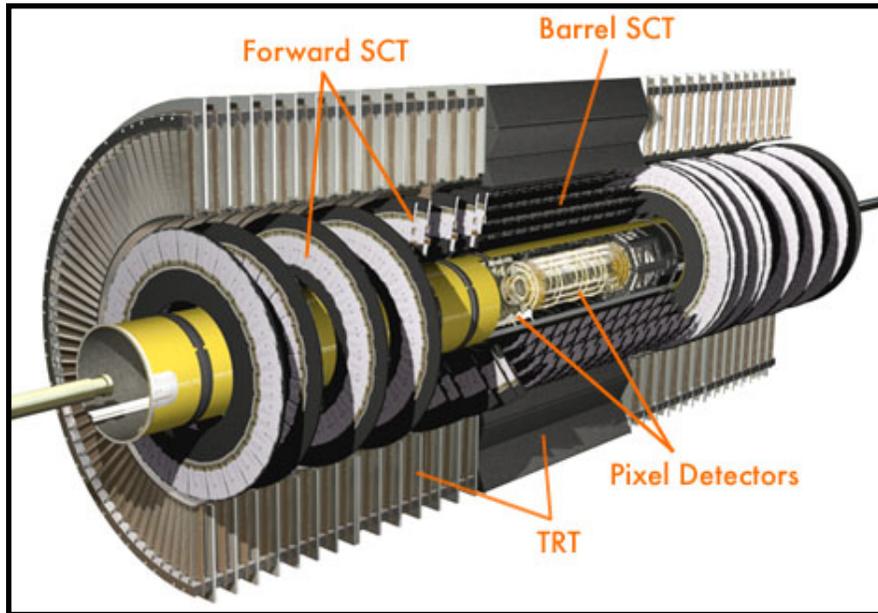
ATLAS = A Toroidal
LHC Apparatus



Exemple d'ATLAS : détecteur interne

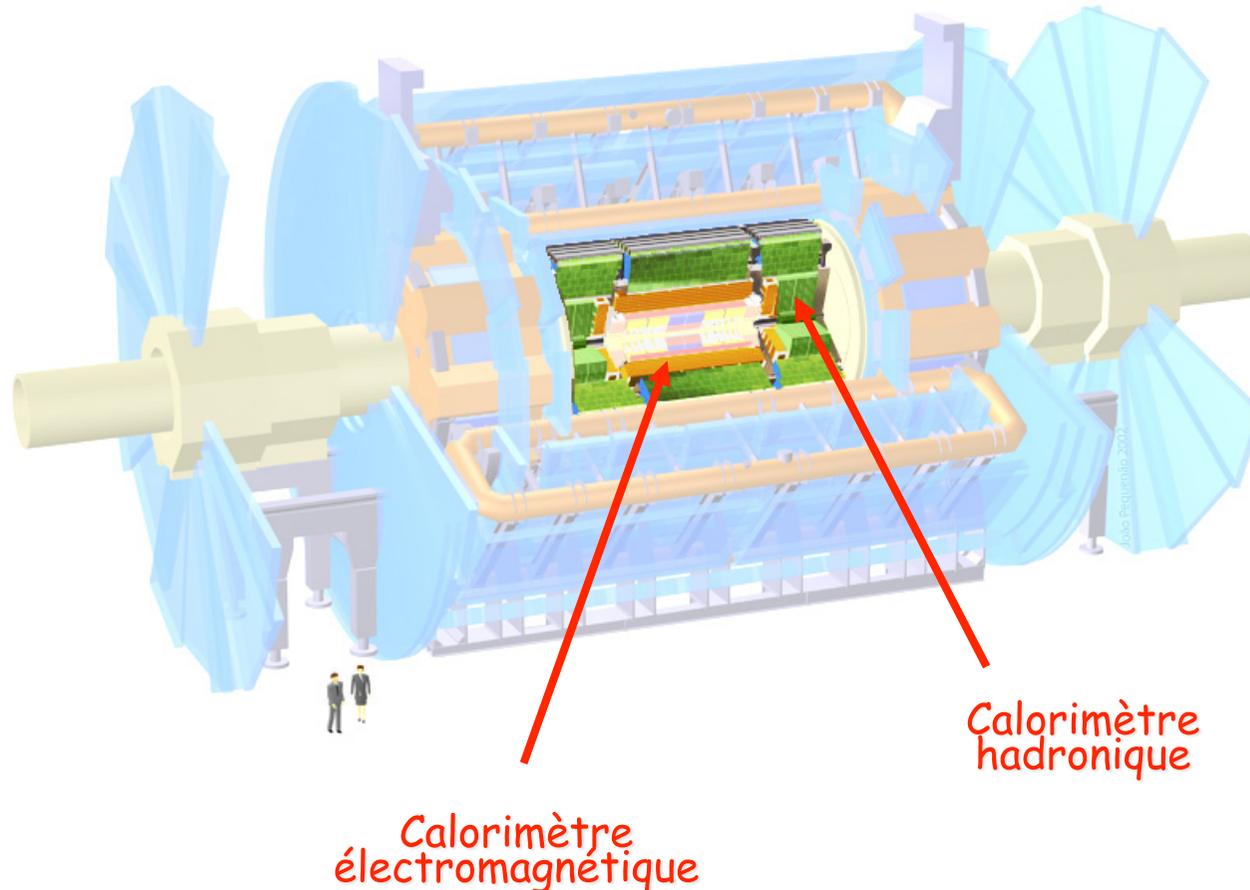
- Tracking ($|\eta| < 2.5$)
- Solénoïde : $B = 2\text{ T}$



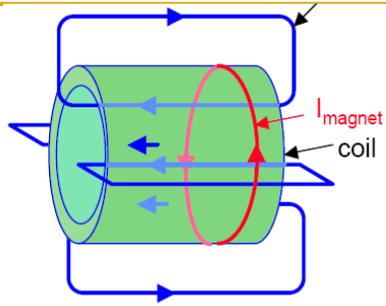


- Pixels $7 \cdot 10^7$ canaux
- Silicon Tracker (SCT) $6 \cdot 10^6$ canaux
- Transition Radiation Tracker (TRT) $4 \cdot 10^5$ canaux

- Grande couverture ($|\eta| < 4.9$)
 - ✓ EM: Pb-LAr \oplus Cu-LAr
 - ✓ Hadronique: Fibres scintillantes + Cu/W-LAr

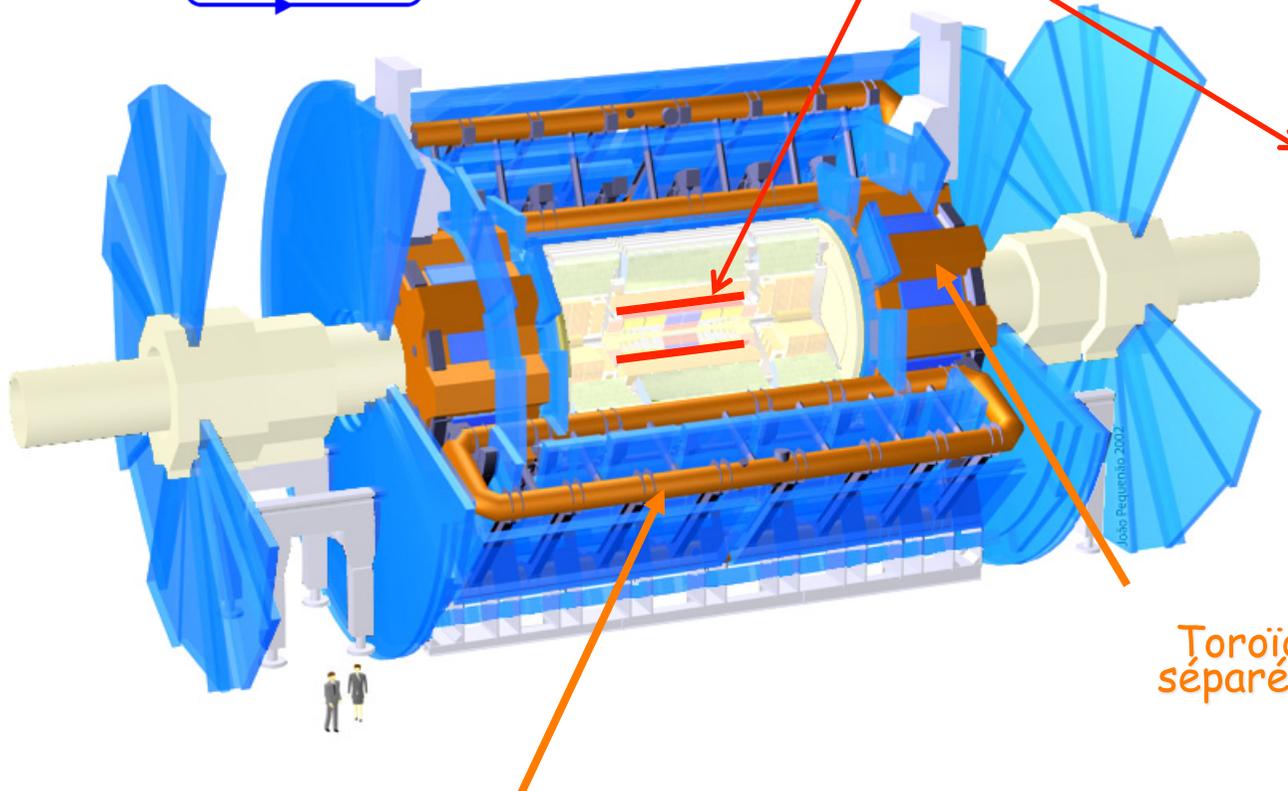


Plusieurs calorimètres à échantillonnage sont disposés autour de l'axe du faisceau



Solénoïde

- 2T avec 38 MJ d'énergie stockée
- Intégré dans l'enveloppe du calorimètre EM



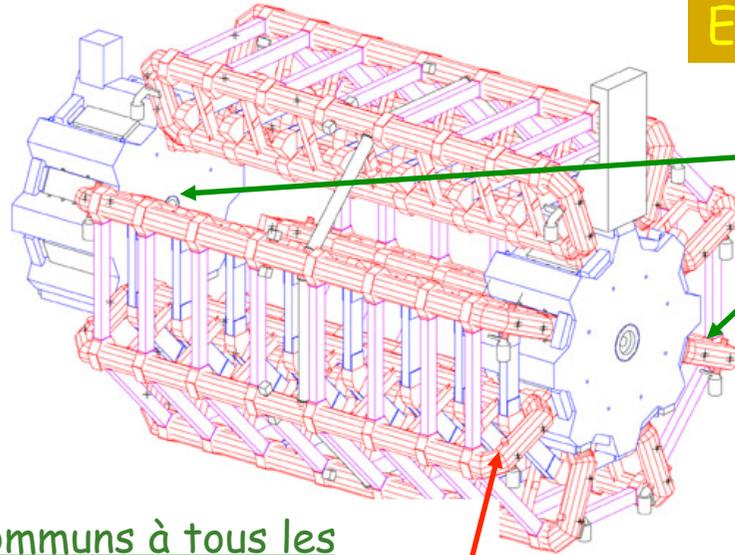
Toroïde End-Cap (2 x 8 bobines séparées dans un même cryostat)

Toroïde Barrel (8 bobines séparées)

Contraintes sur la résolution du p_T des muons

- $\sigma(p_T)/p_T < 3\%$ pour $10 < p_T < 250 \text{ GeV}/c$ et pour $|\eta| < 2.7$
- $\sigma(p_T)/p_T = 10\%$ pour $p_T \approx 1 \text{ TeV}/c$

Exemple d'ATLAS : système magnétique



Paramètres du toroïde End-Cap

Longueur : 5.0 m

Diamètre externe : 10.7 m

2 x 8 bobines

Energie stockée : 2 x 0.25 GJ

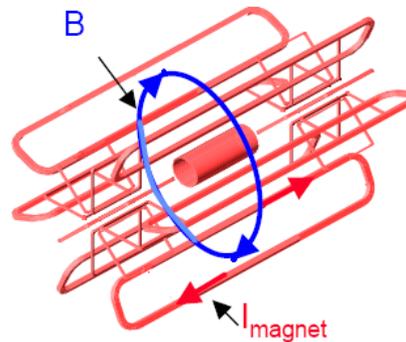
Paramètres communs à tous les toroïdes

Supraconducteur à 4 T

Champ vu par les particules : 0.6-1.5 T

Courant nominal : 20.5 kA

Point de fonctionnement : 4.7 K



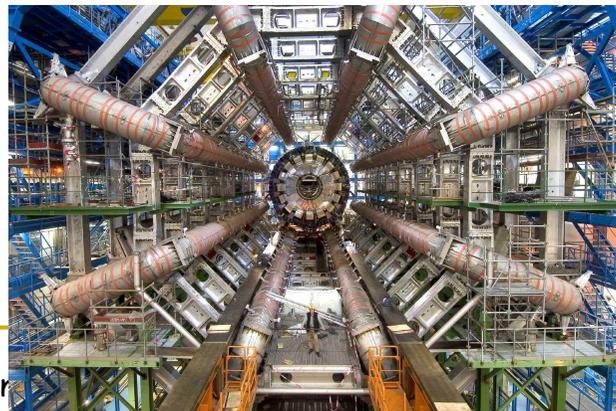
Paramètres du toroïde Barrel

Longueur : 25.3 m

Diamètre externe : 20.1 m

8 bobines

Energie stockée : 1.08 GJ

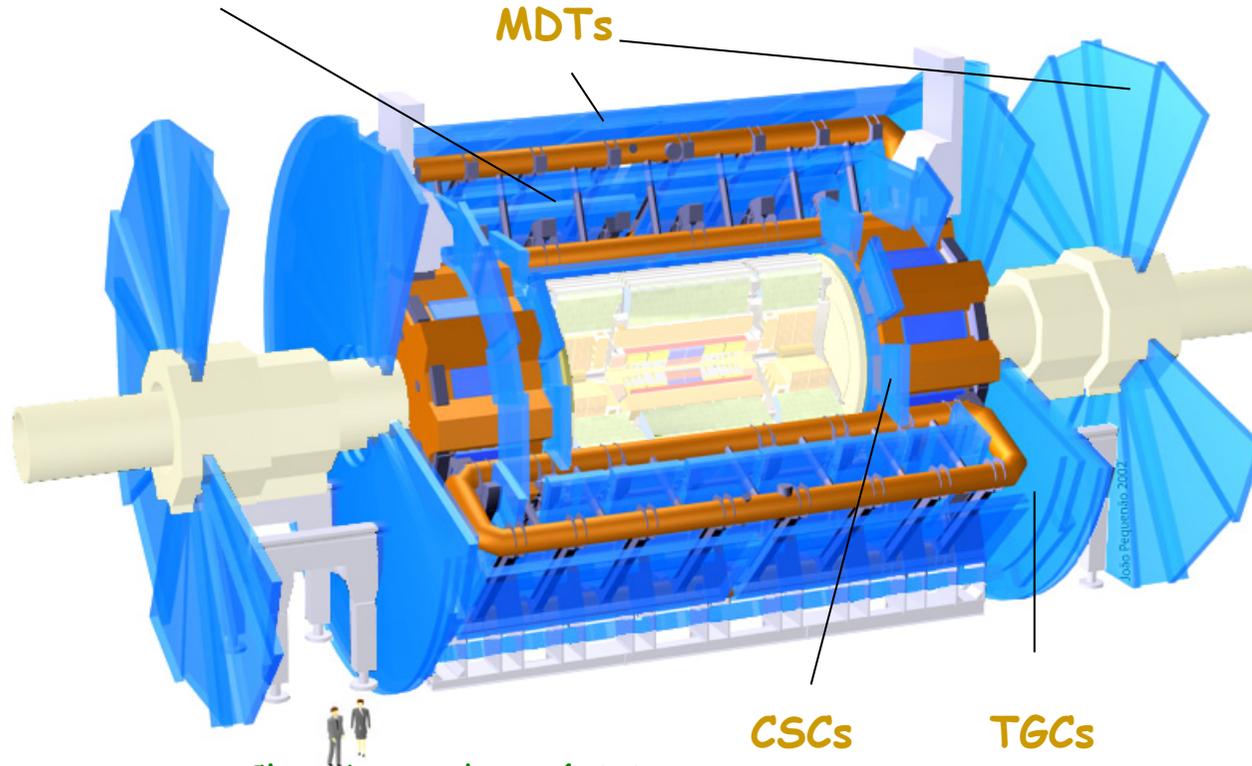


Chambres de déclenchement

- Resistive Plate Chambers (RPC) dans le Barrel
 - ✓ $|\eta| < 1.05$, 556 chambres, 374000 canaux
- Thin Gap Chambers (TGC) dans les End-Caps
 - ✓ $1.05 < |\eta| < 2.4$, 3588 chambres, 318000 canaux

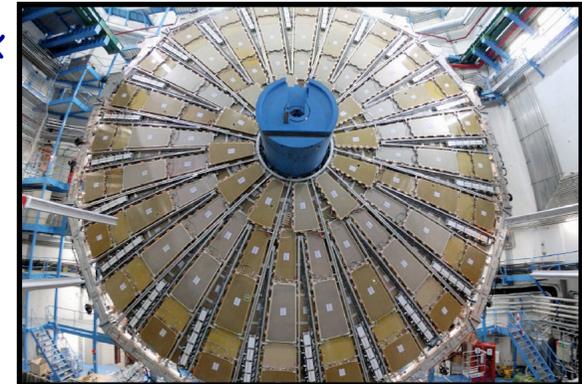
RPCs

MDTs



CSCs

TGCs



Grande roue TGC

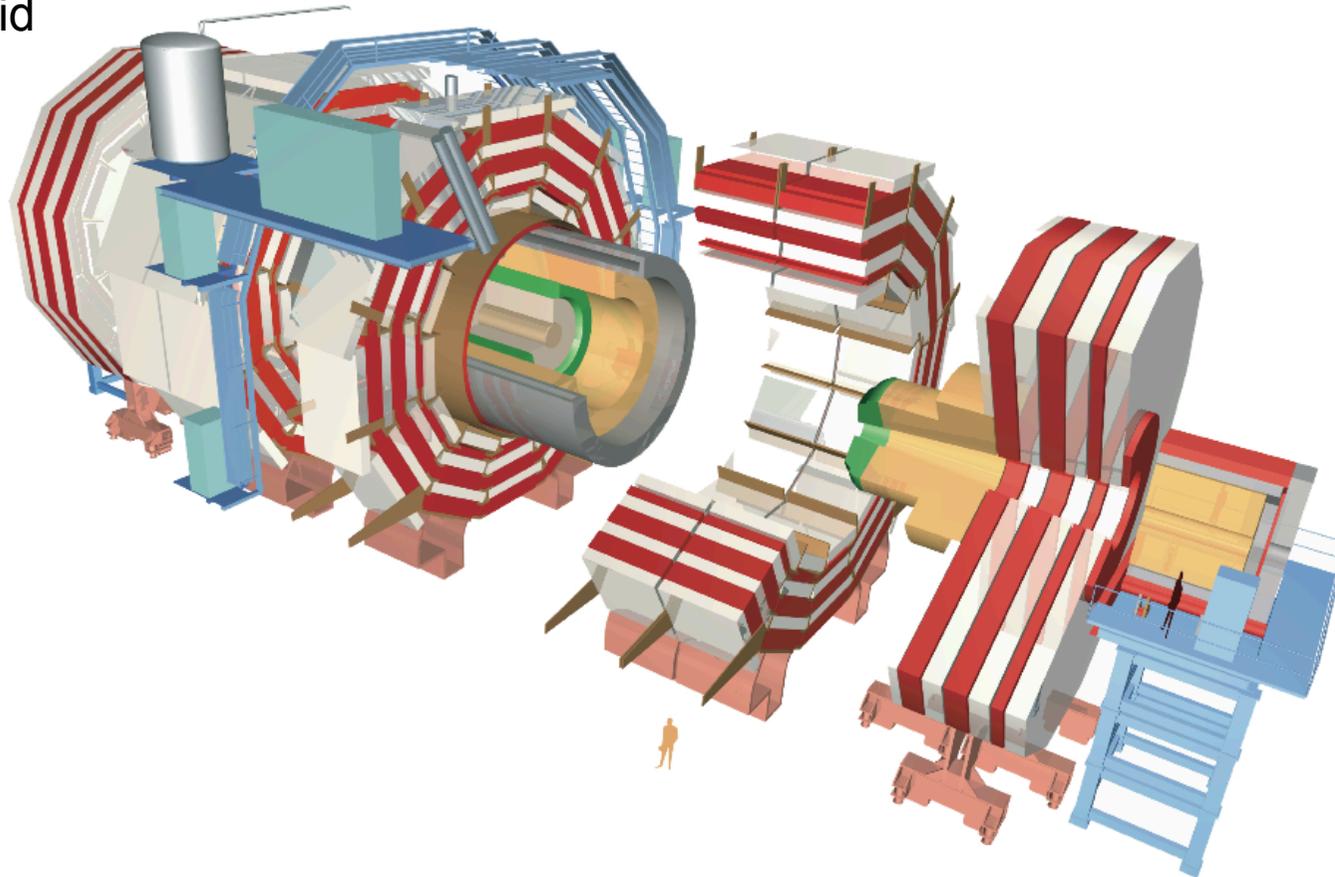
Chambres de précision

- Monitored Drift Tubes (MDT) dans le Barrel et les End-Caps
 - ✓ $|\eta| < 2.0$, 1172 chambres, 354000 channels
- Cathode Strip Chambers (CSC) à grande rapidité pour les End-Caps
 - ✓ $2.0 < |\eta| < 2.7$, 32 chambres, 31000 canaux

CMS

« Compact » car $L \times l = 22 \text{ m} \times 15 \text{ m}$
wrt ATLAS ($44 \text{ m} \times 22 \text{ m}$) - 14500 t

CMS ≡ Compact
Muon Solenoid



ATLAS

CMS

Détecteur Interne	Silicium (pixels+strips) et rayonnement de transition (TRT)	Silicium (pixels+strips)
Calorimètre électromagnétique	Calorimètre à échantillonnage (Pb + LAr)	Calorimètre homogène (PbWO ₄)
Calorimètre hadronique	Calorimètres à échantillonnage (fer + tuiles scintillantes dans la partie centrale, Cu et W + LAr vers l'avant)	Calorimètres à échantillonnage (acier et Cu + tuiles scintillantes)
Détecteur à muons	Chambres à muons à l'extérieur du calorimètre hadronique	Chambres à muons dans le retour de flux du solénoïde
Système magnétique	Solénoïde de 2 T, toroïde à air d'environ 2 T	Solénoïde de 4 T

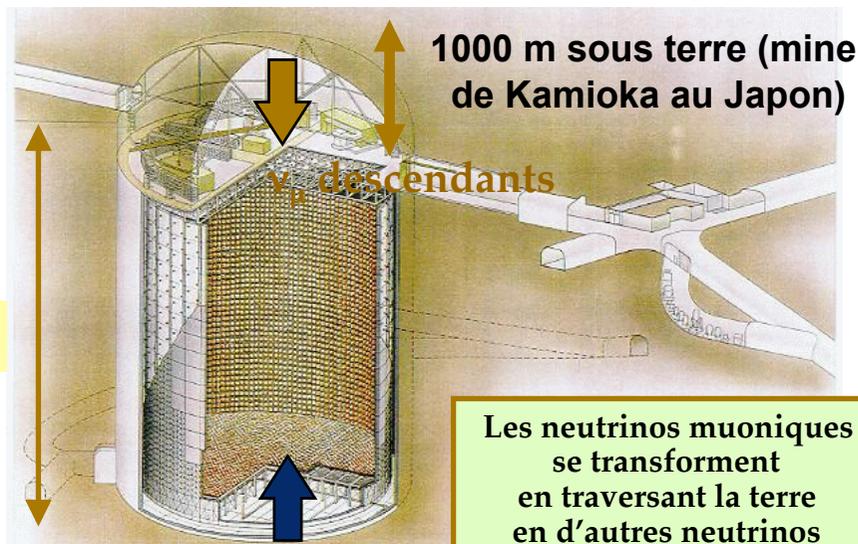
Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules
- V. Calorimétrie

- VI. Exemples de détecteurs de Physique des Hautes Energies
 - 1) Détecteurs sur collisionneur
 - 2) **Détecteurs de neutrinos**
 - 3) Autres types de détecteurs

SuperKamiokande

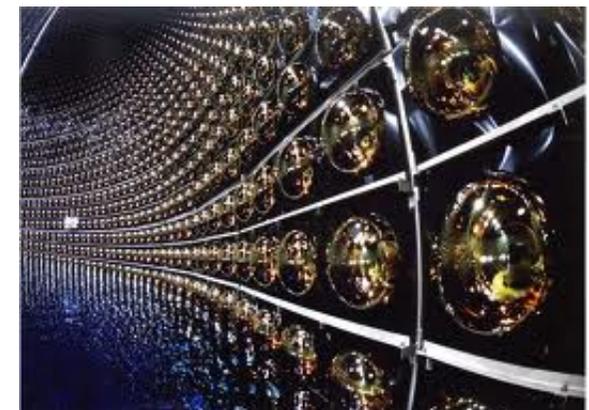
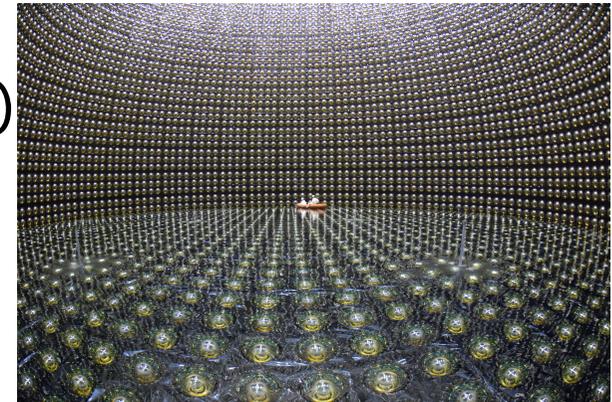
- Détecteur de neutrinos (solaires ou d'un faisceau issu d'un accélérateur) qui vont interagir avec un noyau d'oxygène (50000 t d'eau pure)
- 11200 photomultiplicateurs (diamètre 45 cm)



ν_{μ} ascendants

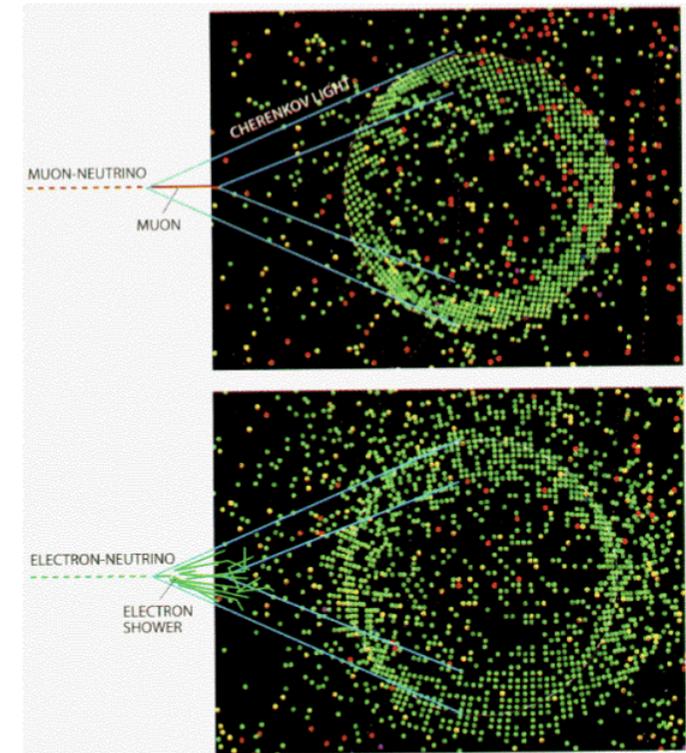
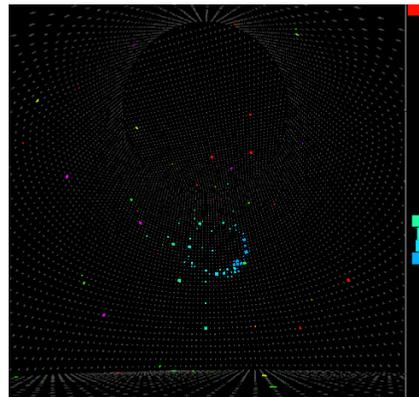
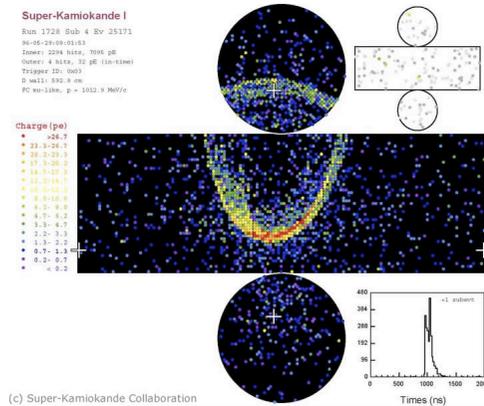
39 m

Super-Kamiokande



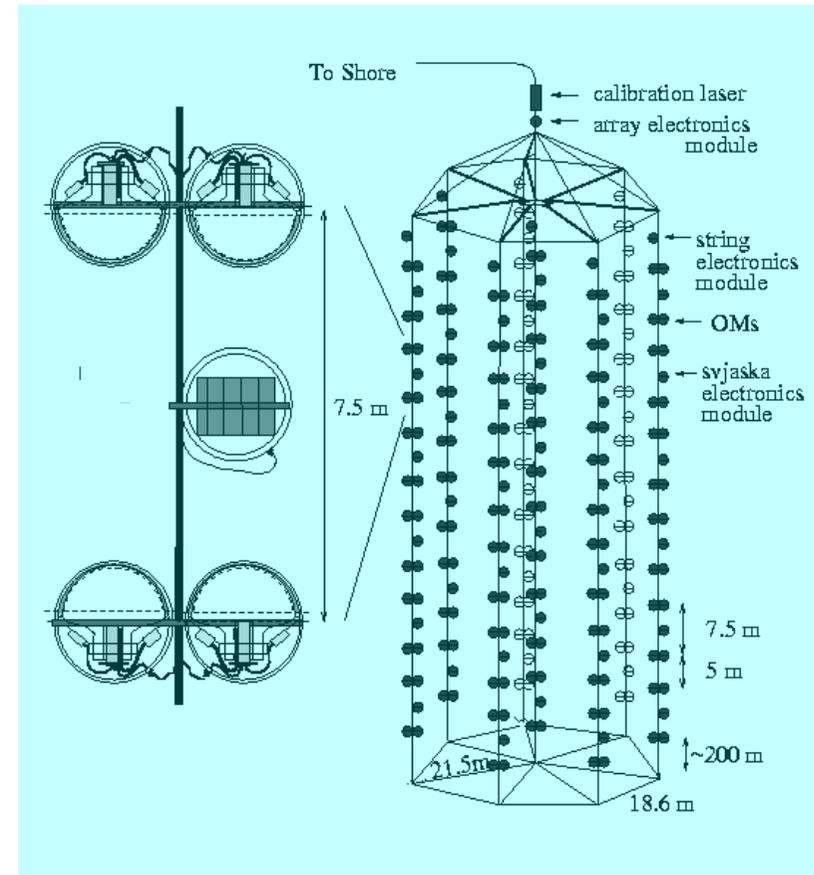
M. Nessi

- Le lepton (e^- ou μ) dépend du type de neutrino incident
 - On mesure ces propriétés par le rayonnement Cherenkov qu'il émet dans l'eau



Neutrino solaire
(12,5 MeV)

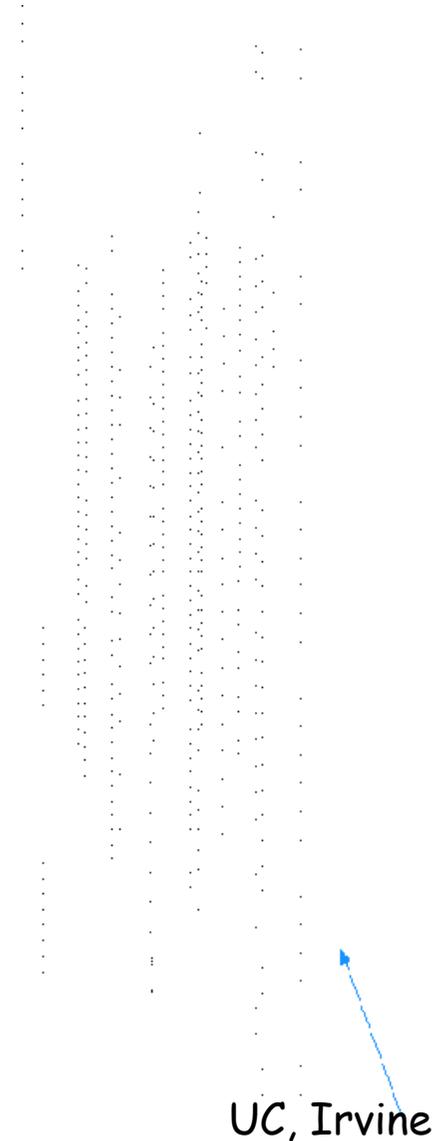
Mesure de neutrinos dans le lac Baïkal



1^{ère} expérience à laisser ses détecteurs un an en fonctionnement (depuis 1993). Installation pendant l'hiver, sur la glace

AMANDA

- **AMANDA** ≡ **A**ntartic **M**uon **A**nd **N**eutrino **D**etector **A**rray (1993-2005)
 - Détecteurs entre 800 et 1000 m
 - Collision d'un ν montant avec un proton de H_2O : création d'un muon
 - Observe la lumière Cherenkov due au muon qui zigzague à cause des bulles d'air contenues dans la glace
- **IceCube** ≡ Successeur d'AMANDA : 80 lignes de détecteur sur 1 km^3 installées entre 2005 et 2011
 - Chaque ligne comprend 60 PM orientés vers le bas, entre 1450 et 2450 m de profondeur
 - Budget : 272 M\$ (AMANDA : 1 M\$)

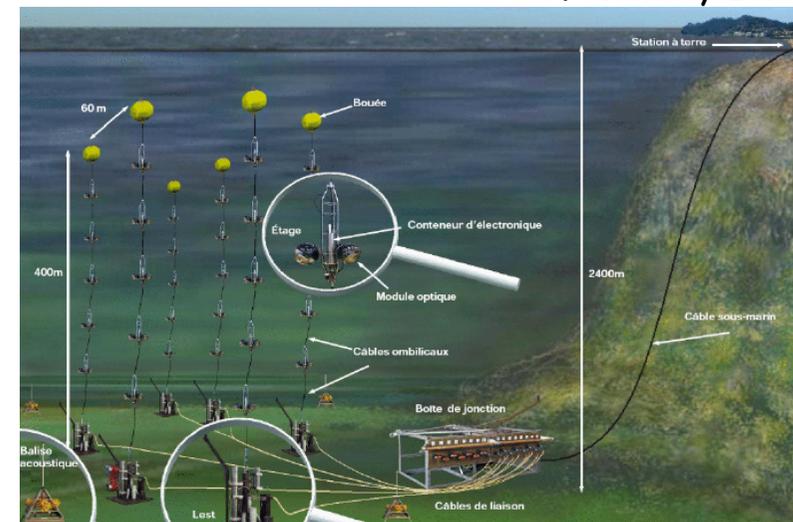
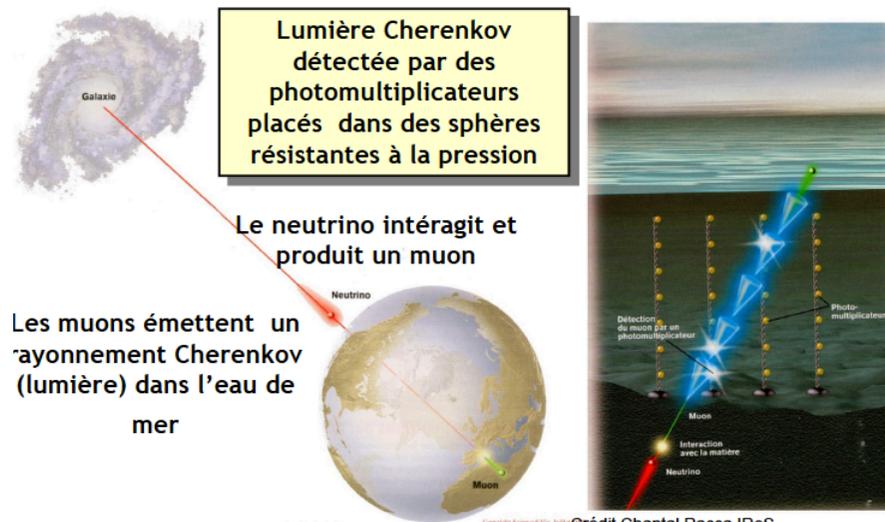


ANTARES

- **ANTARES** ≡ **A**stronomy with a **N**eutrino **T**elescope and **A**byss environmental **R**ESearch
- Détecteur occupant 200x200 m² à 2500 m au large de La Seyne sur Mer



C. Racca, IReS



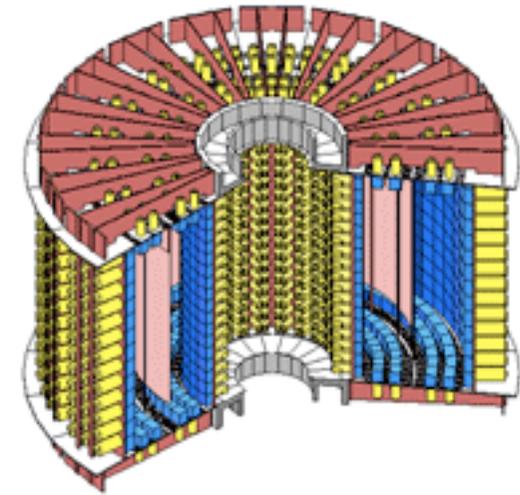
Plan

- I. Interaction particule-matière
- II. Reconstruction des traces chargées
- III. Détection des photons
- IV. Identification des particules
- V. Calorimétrie

- VI. Exemples de détecteurs de Physique des Hautes Energies
 - 1) Détecteurs sur collisionneur
 - 2) Détecteurs de neutrinos
 - 3) **Autres types de détecteurs**

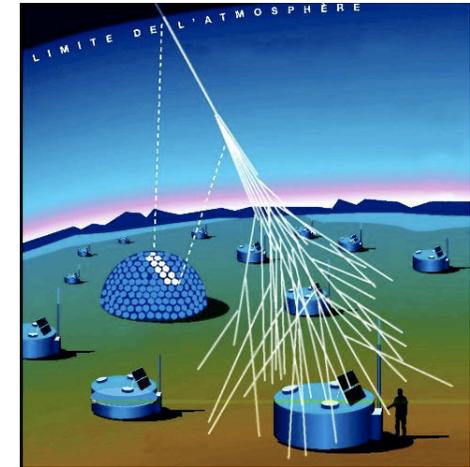
NEMO

- Neutrino Experiment with Molybdène
- Recherche une nouvelle forme de radioactivité : l'émission spontanée de 2 électrons par un noyau (double- β)
- Feuilles minces de Mo entourées de 6000 scintillateurs et 2000 compteurs Geiger pour mesurer les propriétés des électrons



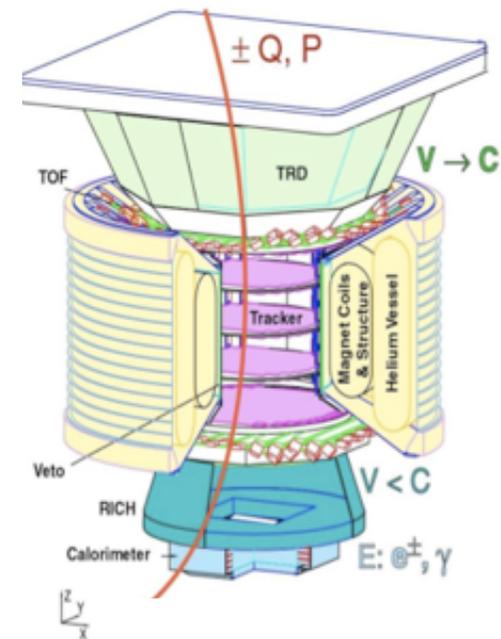
Observatoire Pierre Auger

- Détection et étude des rayons cosmiques dont les énergies sont voisines de 10^{19} eV (coupure GZK)
- L'impact au sol de ces gerbes atmosphériques est réparti sur ≈ 10 km²
- Trois **détecteurs Cherenkov** autour de chacune des 1600 cuves à eau réparties sur 3500 km²
- 4 télescopes pour mesurer la **fluorescence** des molécules de l'air (la nuit uniquement)



AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)
- Mesure du flux de cosmiques chargés en dehors de l'atmosphère
- Combine des détecteurs de toute sorte dans l'ISS (TOF, tracker, RICH, calorimètre électromagnétique)
- Prototype lancé (et récupéré) en 1998
- Lancement au printemps 2011



0.3 TeV	e^-	P	He	C	Fe	γ	γ
TRD	⋮					⋮	
TOF	'	'	γ	γ	γ	γ	
Tracker	⌒	⌒	⌒	⌒	⌒	⌒	
RICH	○	○	○	○	○	○	
ECAL	⌒	⌒	⌒	⌒	⌒	⌒	⌒

Conclusions

- La plupart du temps, on mesure dE/dx
 - Simplicité de certains détecteurs
 - Complexité et ingéniosité d'autres
- Dans tous les cas, ils sont optimisés globalement (mécanique + électronique + système d'acquisition + système de reconstruction) et s'insèrent un ensemble plus grand
 - La redondance des informations est souvent une qualité
- Leur taille augmente généralement avec l'énergie (le prix également)
- Désolé si j'ai été partial. Il a fallu faire des choix..