

**Cargèse - 25 au 31 mars 2007**

**Ecole des techniques de base  
des détecteurs**

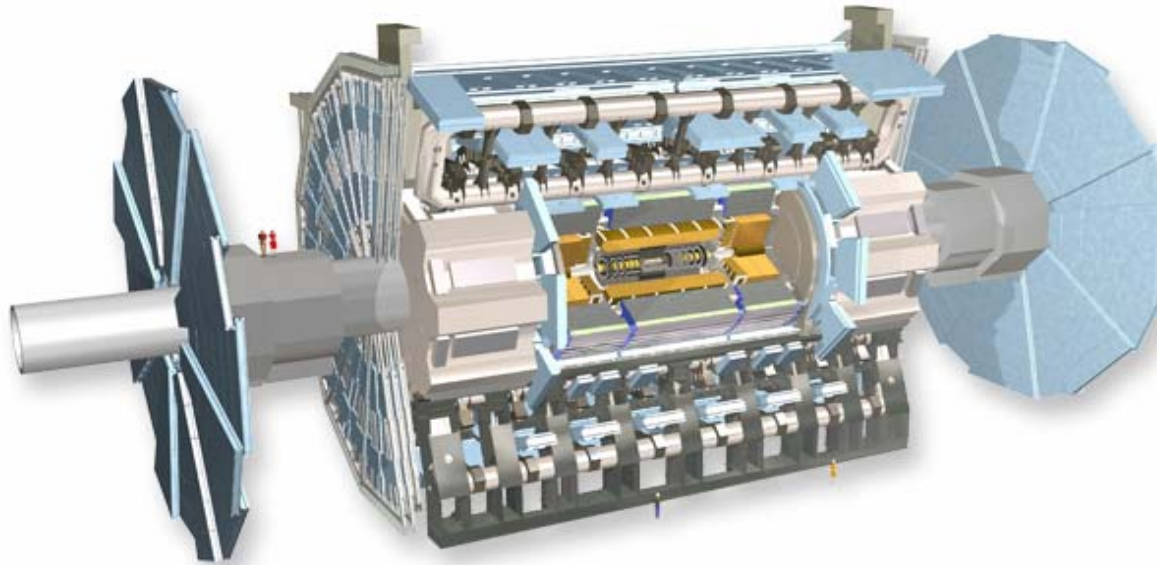
**Pascal Vincent  
Université Pierre et Marie Curie  
LPNHE, Paris**



# Un exemple d'expérience

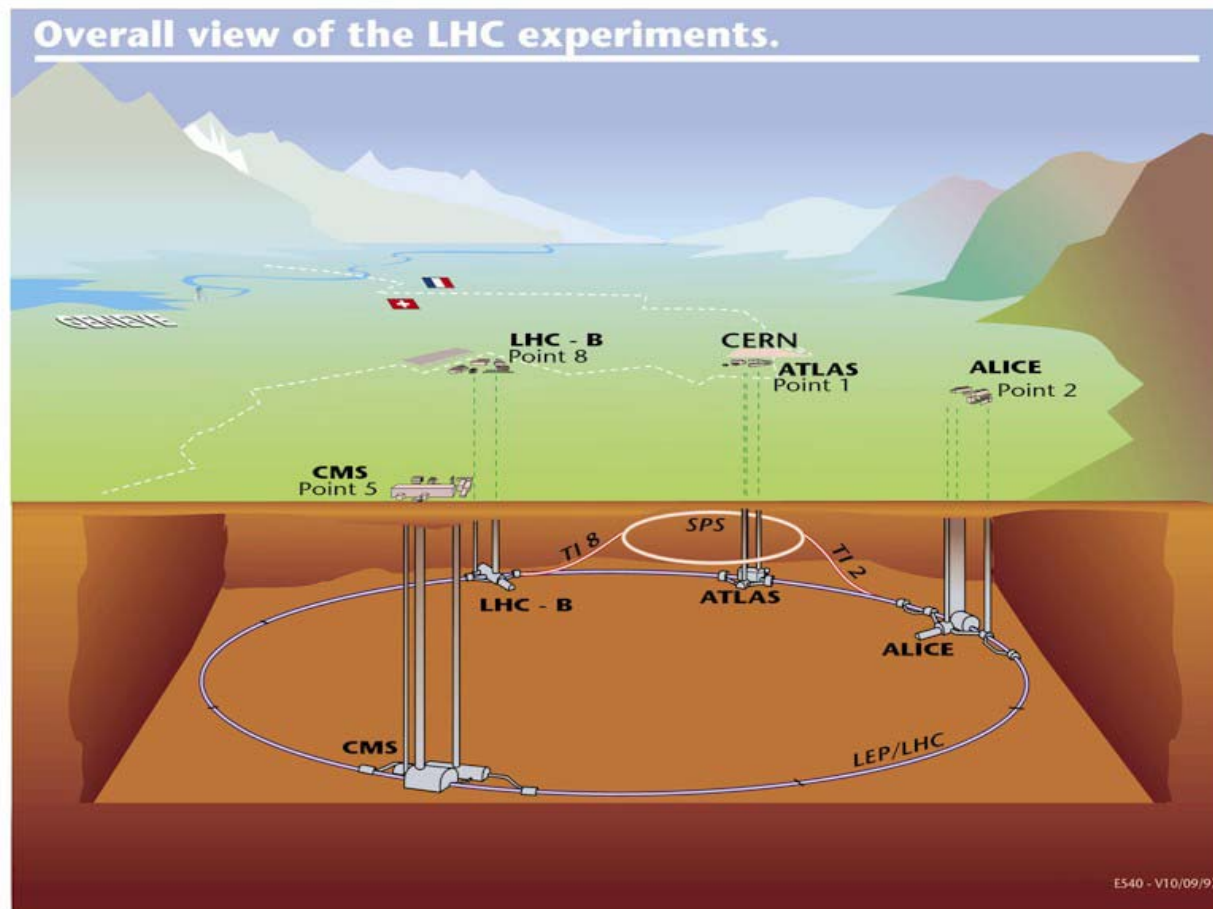


# ATLAS



@ LHC

# LHC @ CERN



2007: Large Hadron Collider @ Genève

# LHC @CERN

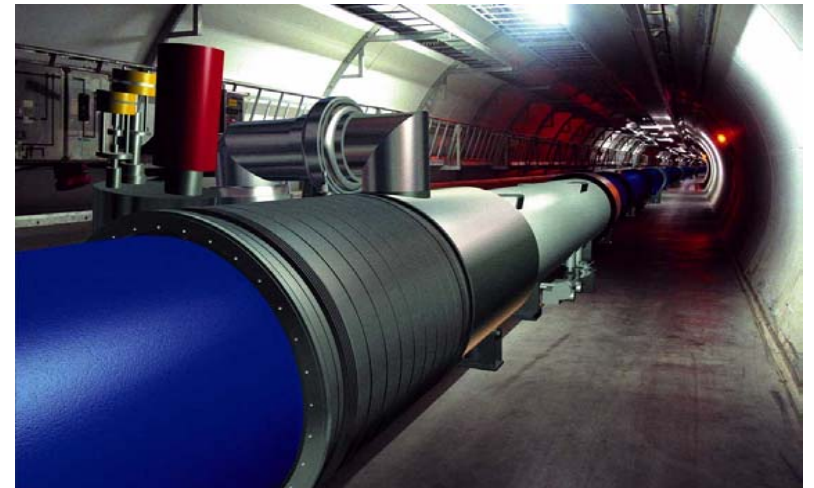


Accélérateur circulaire, pp

27 Km de circonférence

40 000 000 croisements par seconde

14 TeV d'énergie libérée dans le centre de masse.



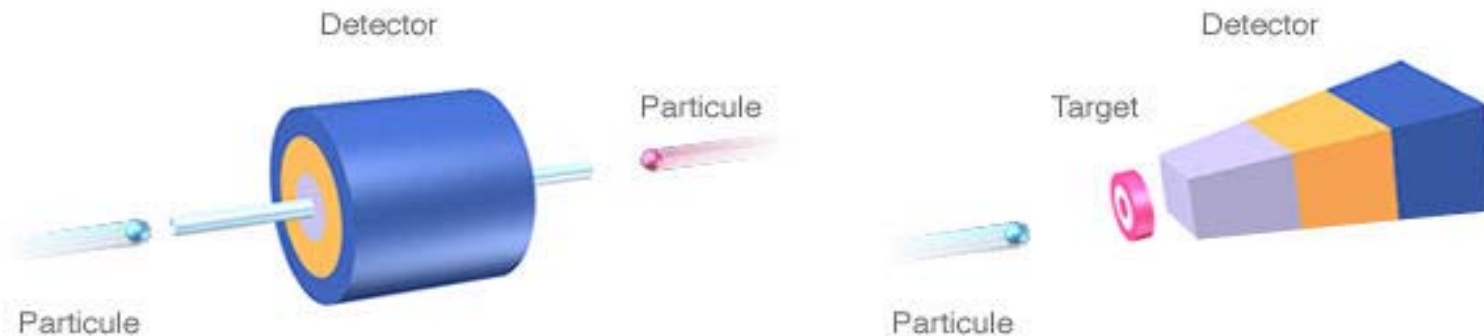
# Pourquoi un collisionneur ?

- dans des collisionneurs

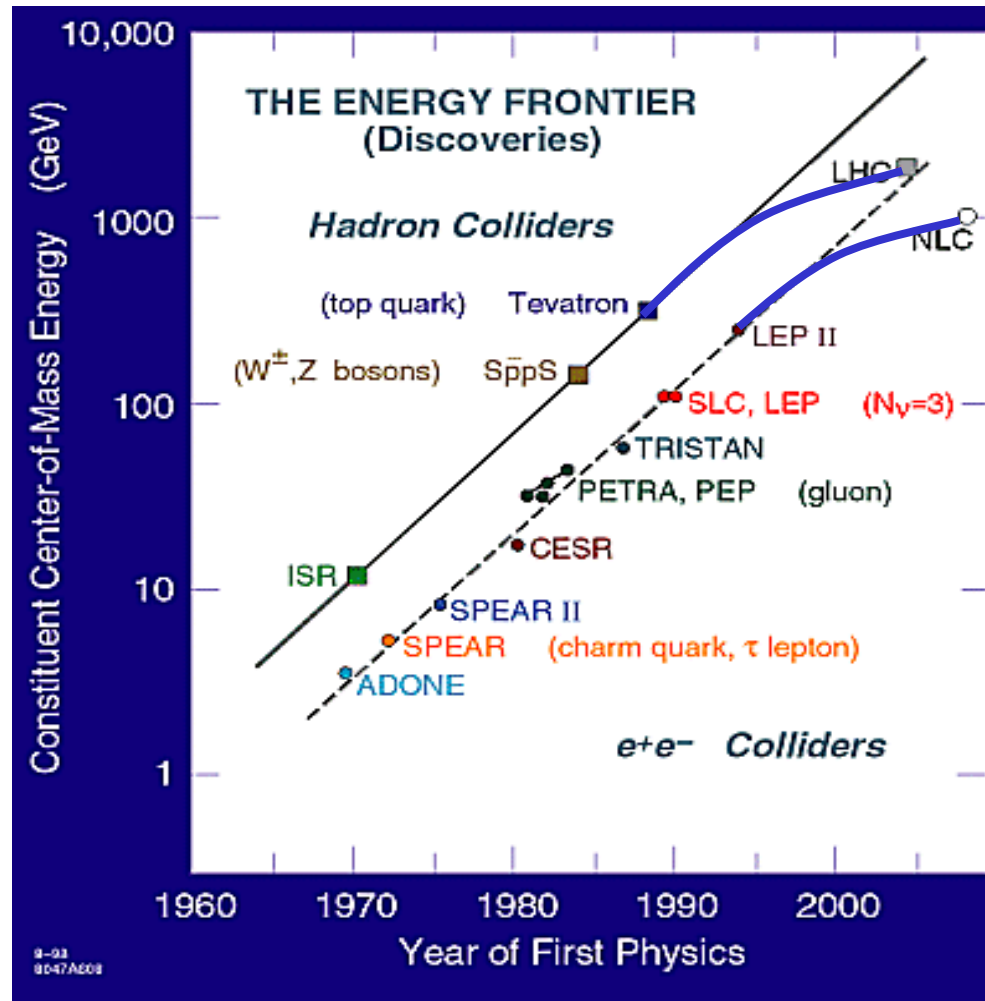
$$E_{cm} = 2\sqrt{E_1 E_2}$$

- sur des cibles fixes

$$E_{cm} = \sqrt{2E_1 m_2}$$



# Pourquoi des protons ?

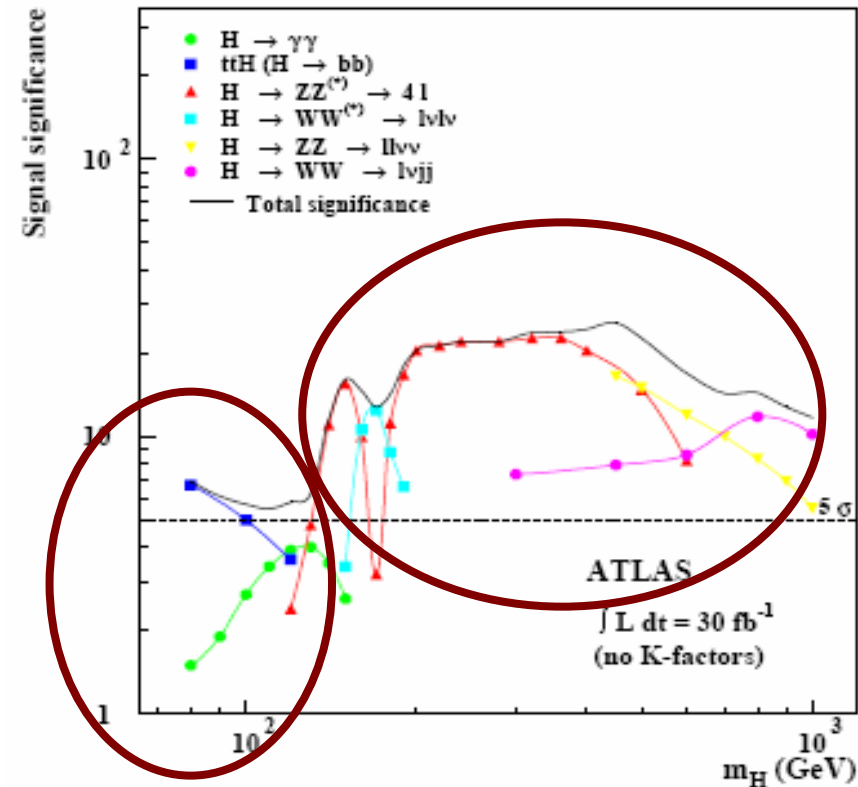


# Objectifs scientifiques

- ✓ recherche du boson de Higgs
- ✓ tests du Modèle Standard
- ✓ recherche de nouvelle physique
- ✓ recherche de la Super-Symétrie
- ✓ ...

$$H^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H^0 \rightarrow b\bar{b}$$



$$H^0 \rightarrow ZZ \rightarrow (\mu^+ \mu^-)(\mu^+ \mu^-)$$

$$\rightarrow (\mu^+ \mu^-)(e^+ e^-)$$

$$\rightarrow (e^+ e^-)(e^+ e^-)$$



# ATLAS @LHC



A Toroidal Apparatus

100 mètres sous terre

Forme cylindrique

longueur = 44 m

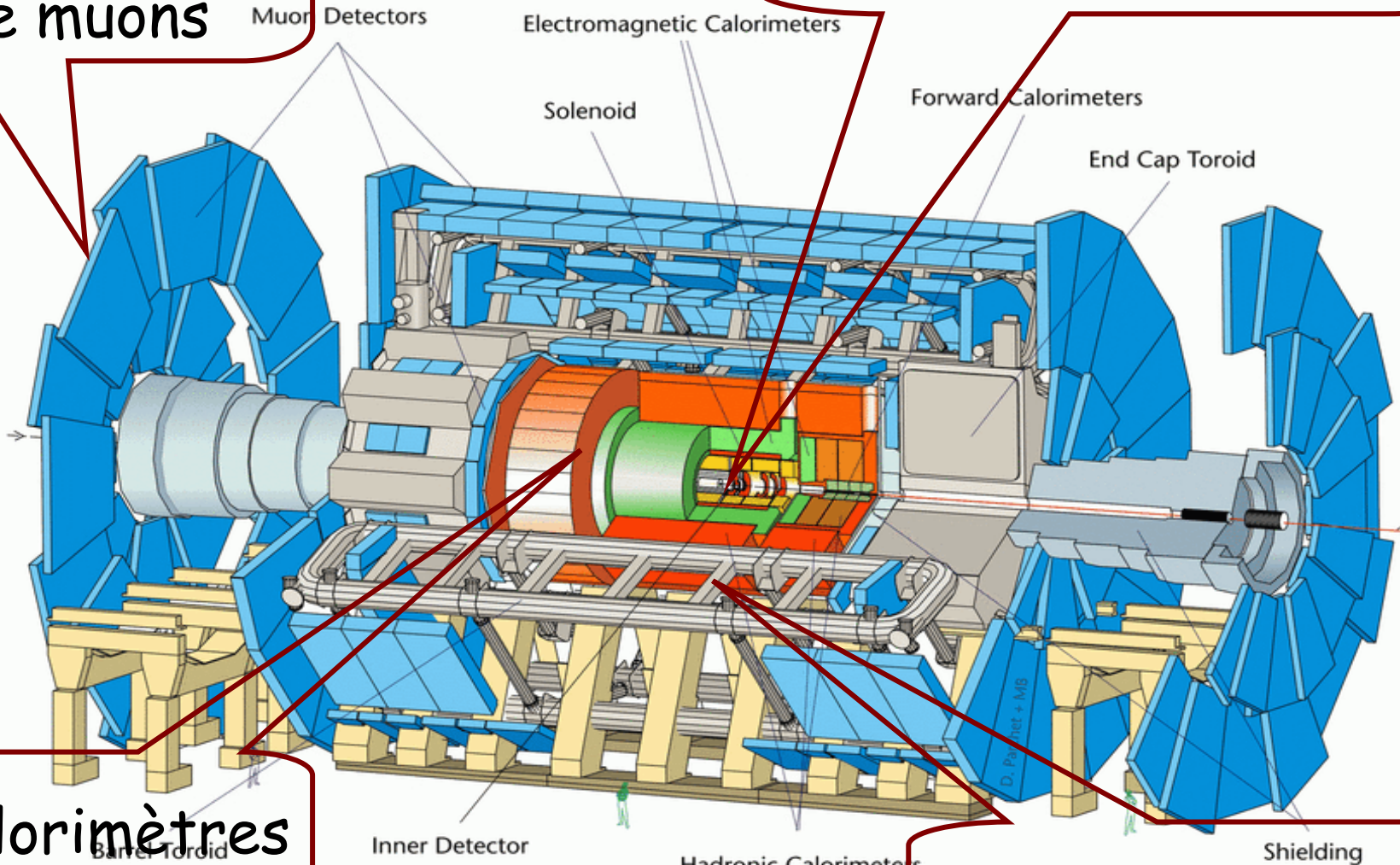
diamètre = 22 m.

7 000 tonnes ~ (14±1) A480

# ATLAS

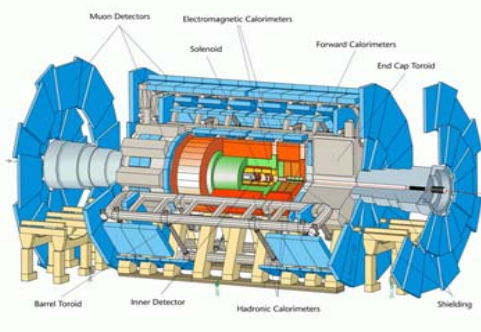
Détecteurs de muons

Détecteurs des traces

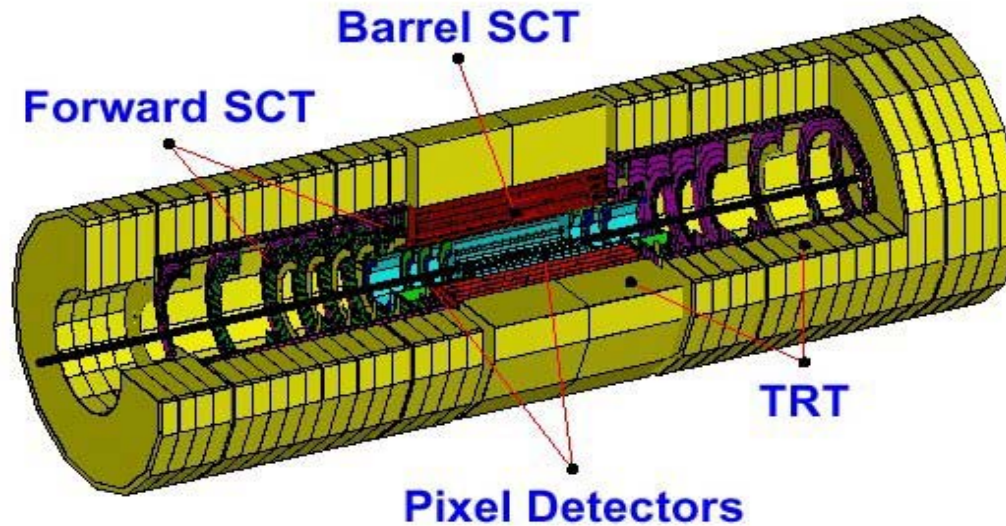


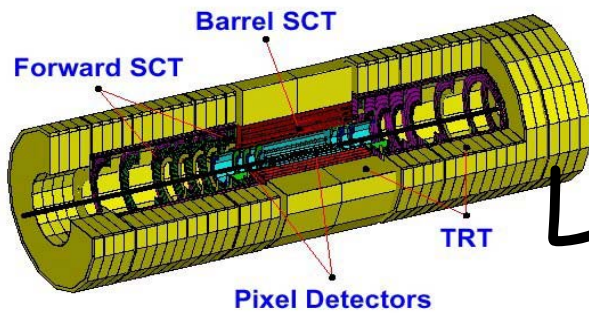
Calorimètres

Champ magnétique



# Les détecteurs internes





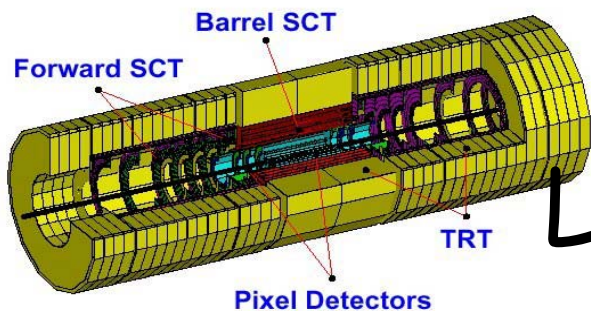
# Le détecteur interne

Dans sa conception, le détecteur interne a pour objectif :

- une bonne détection et reconstruction des trajectoires des particules chargées au plus près du vertex primaire.
- la mesure de la position des vertex primaires et reconstruire les vertex secondaires (l'étiquetage des mésons contenant le quark b).
- la mesure des impulsions et des angles polaires.
- l'identification des électrons avec une grande efficacité (supérieure à 90%) pour les distinguer des photons ou des particules hadroniques.

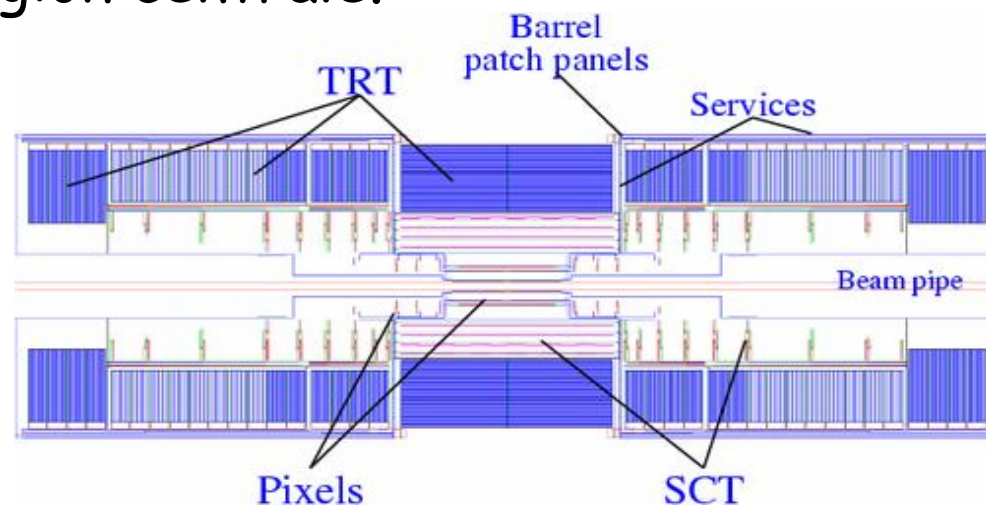
Il doit satisfaire les trois contraintes :

- une granularité la plus fine possible.
- une faible épaisseur
- une bonne résistance aux rayonnements.

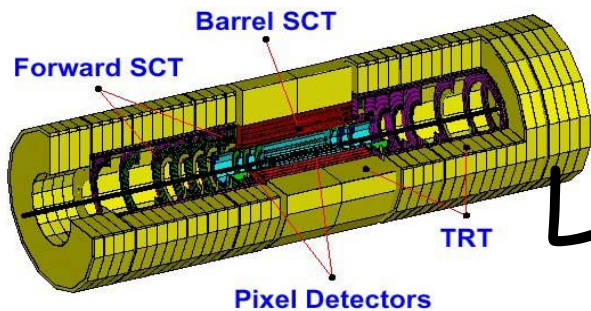


# Le détecteur interne

cylindrique de 7 m de longueur et de 2,3 m de diamètre et couvre la région centrale.



Il est placé dans un solénoïde supraconducteur qui crée un champ magnétique axial de 2 Tesla.



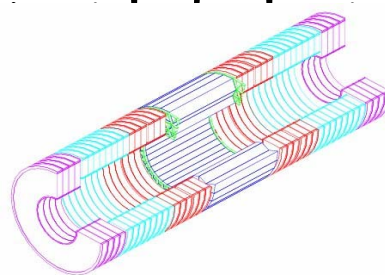
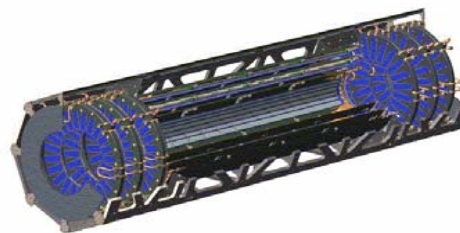
# Le détecteur interne

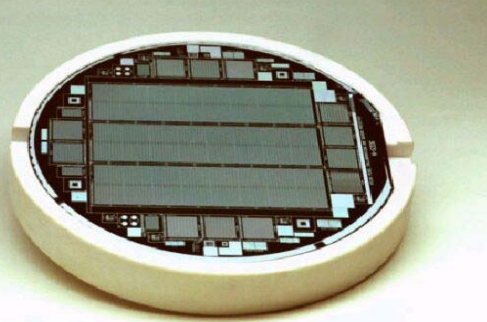
Il est décomposé en 3 sous détecteurs :

Le détecteur pixélisé

Un détecteur à micropistes de silicium (SCT)

Un détecteur à rayonnement transitionnel (TRT)





# Détecteur pixélisé



Il est installé le plus près de l'axe des faisceaux (4 cm, 11 cm et 14 cm de l'axe) et est constitué de 140 millions de capteurs qui sont réparties sur trois couches cylindriques et six disques sur les parties avant.

Les capteurs consistent en des cellules de lecture « pixels » ( $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ ) déposées sur un substrat de silicium de  $250 \mu\text{m}$  d'épaisseur.

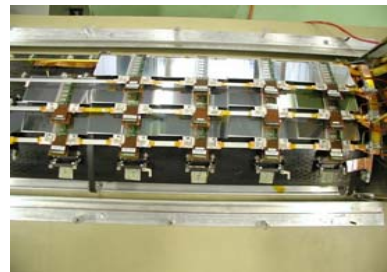
bonne résolution sur la position ( $14 \mu\text{m}$  dans le plan perpendiculaire aux faisceaux et de  $87 \mu\text{m}$  dans la direction des faisceaux).

détermine la position des vertex secondaires : étude des particules de courte durée de vie, comme le lepton  $\tau$  et les hadrons contenant des quarks  $b$  ou  $c$ .

Le fort taux de rayonnement au voisinage du point de collision limiteront sa durée de vie à quelques années.

# Le détecteur de traces à semi-conducteur

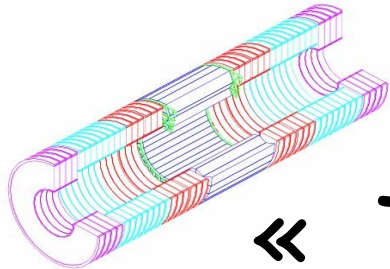
Le SCT est constitué de micro-pistes en silicium ( $80\ \mu\text{m} \times 18\ \text{mm}$ ) qui sont réparties sur **4 cylindres** situés à des rayons de 30 cm, 37.3 cm, 44.7 cm et 52 cm et aussi sur **18 disques** semi-conducteur.



Le SCT contribue à la **mesure de l'impulsion** des particules chargées, du paramètre d'impact et de la position du vertex.

**Résolution spatiale** de  $16\ \mu\text{m}$  est obtenue dans le plan  $(R, \Phi)$  et de  $580\ \mu\text{m}$  dans la direction du faisceau.





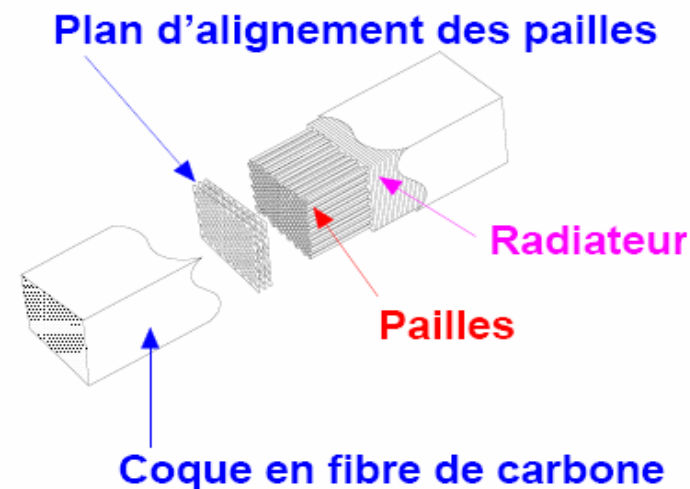
# « Transition Radiation Tracker »

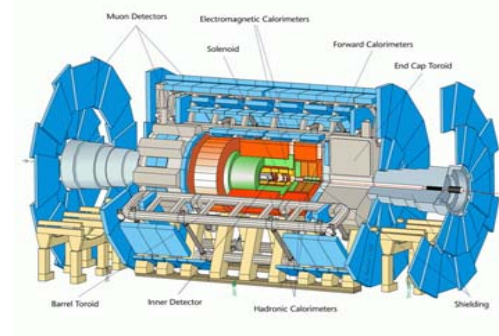
Ce détecteur est composé de 64 couches de **tubes à dérive** de 4 mm de diamètre et de longueur maximale de 148 cm. Grâce à ses 420000 capteurs chaque trace est reconstituée à partir 36 points et conduit à une résolution spatiale de 170  $\mu\text{m}$ .

Les pailles sont recouvertes d'une matière (polypropylène polyéthylène) qui permet de **générer un rayonnement (X) de transition** due à la variation de l'indice du milieu que traverse la particule

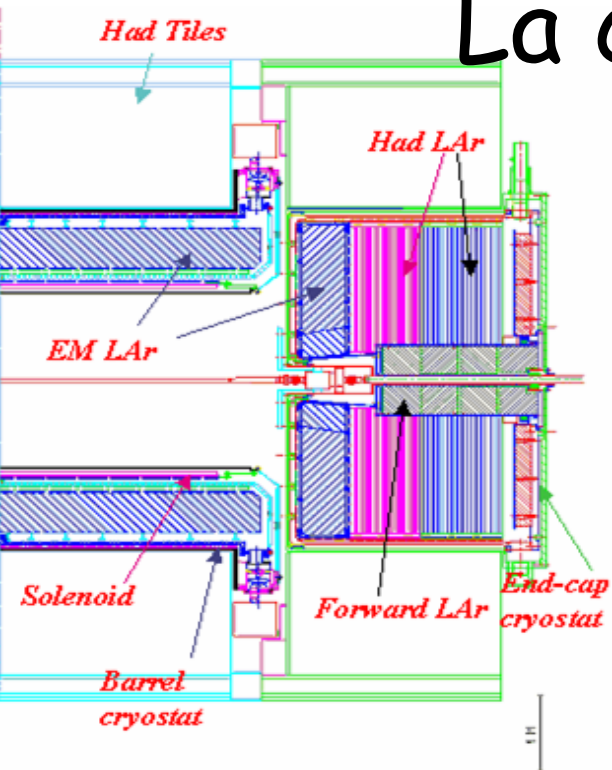
Son rôle :

il permet de reconstruire la trajectoire des particules chargées et participe également à **l'identification des photons convertis** et à la **séparation entre les électrons et les hadrons**.





# La calorimétrie d'ATLAS



# Le calorimètre électromagnétique

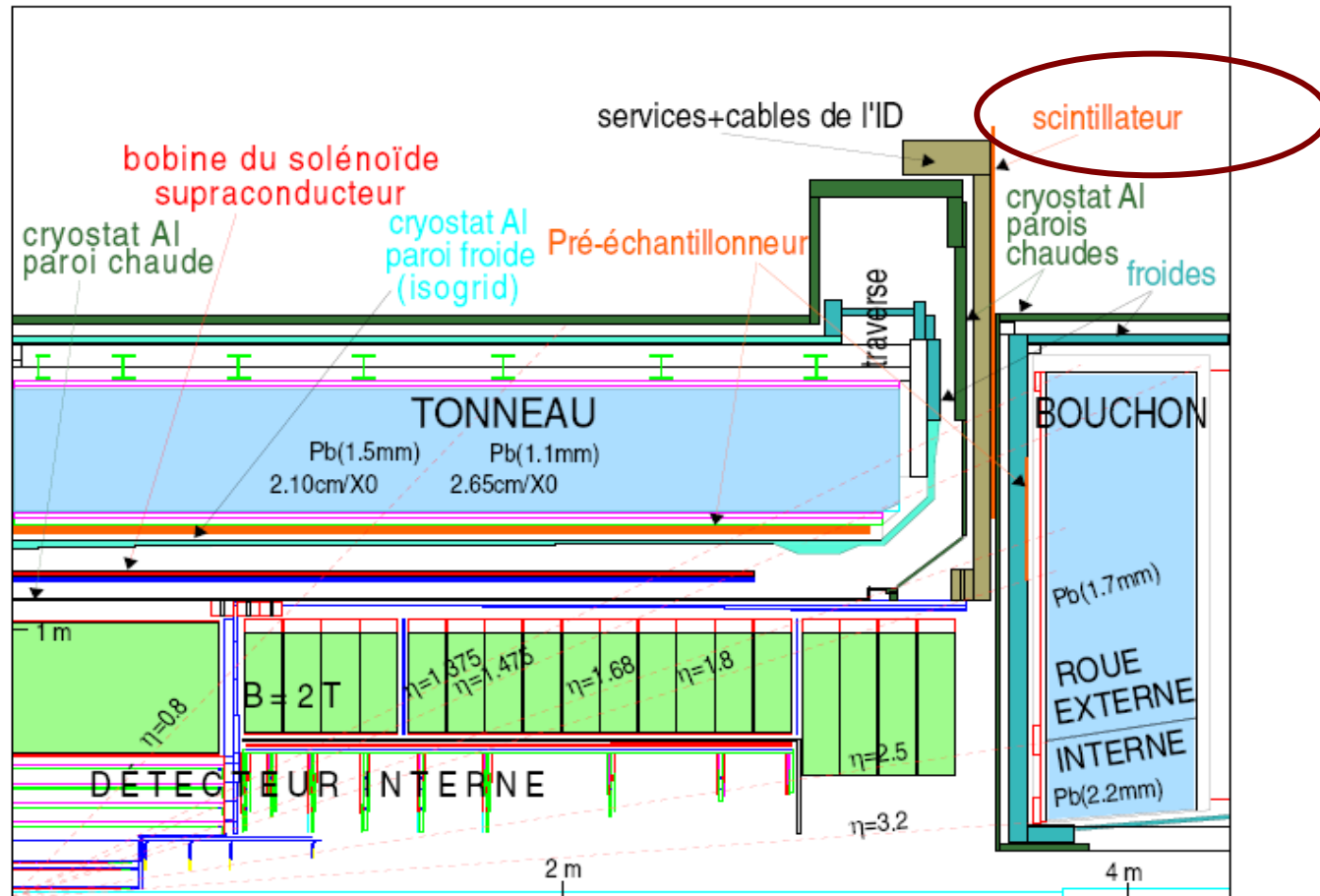
Il s'agit d'un détecteur à échantillonnage composé d'une succession de plaques absorbantes en plomb et de couches actives d'argon liquide.

avantages :

- ↗ résistance aux radiations ( $10^{14}$  neutrons/ $cm^2$ ).
- ↗ une bonne stabilité en fonction du temps.
- ↗ une bonne uniformité.
- ↗ une herméticité presque totale et facile à réaliser.

Le calorimètre EM est constitué de trois éléments, la partie centrale (le tonneau) et les deux parties avants (les bouchons)

# Le calorimètre électromagnétique





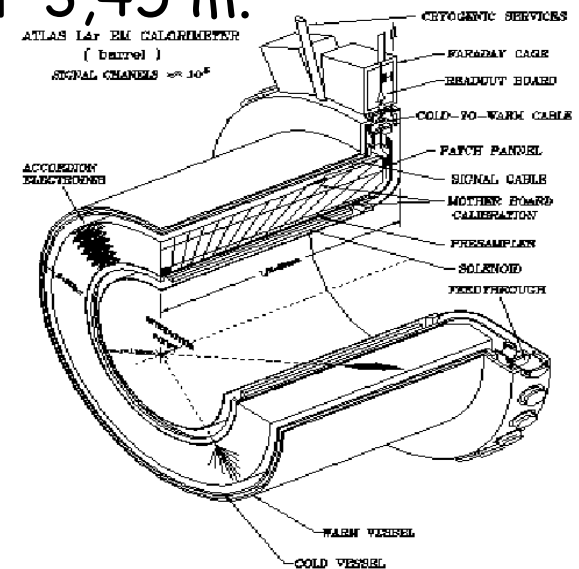
# La partie centrale du EM

Le tonneau (barrel) se trouve entre les rayons  $R=1,50$  m et  $R=1,97$  m.

Il est contenu dans un cryostat de 1,15 m de rayon interne, de 2,26 m de rayon externe et de demi-longueur 3,45 m.

Le cryostat maintient l'argon liquide à une température de 89,3 K, sous une pression de 1,25 atmosphère.

Il est constitué de deux demi-tonneaux sont identiques (passage des câbles).





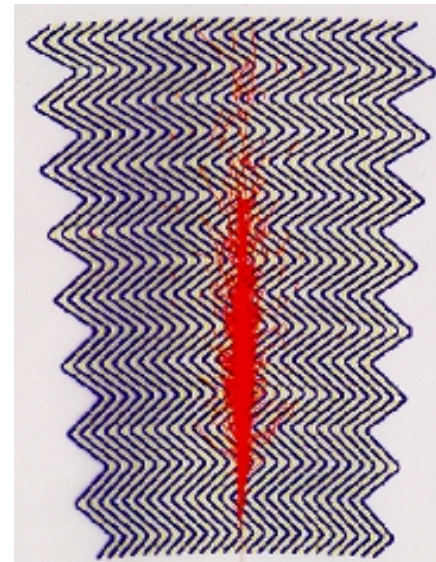
module

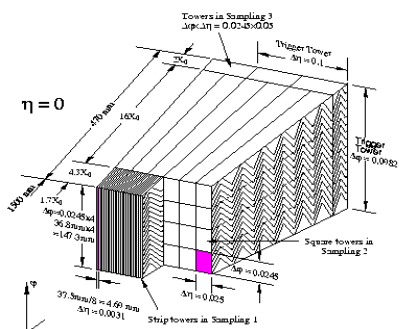
# La partie centrale du EM

Chaque demi-tonneau se compose de **16 modules**, et chaque module est formé à partir de 64 absorbeurs et de 64 électrodes. Un module couvre un angle de 22,5 degrés en  $\varphi$ .

Une cellule élémentaire de détection est faite à partir d'une plaque d'absorbeurs, d'électrode et de deux gaps remplis d'argon liquide (**granularité des voies de lecture en  $\varphi$** ).

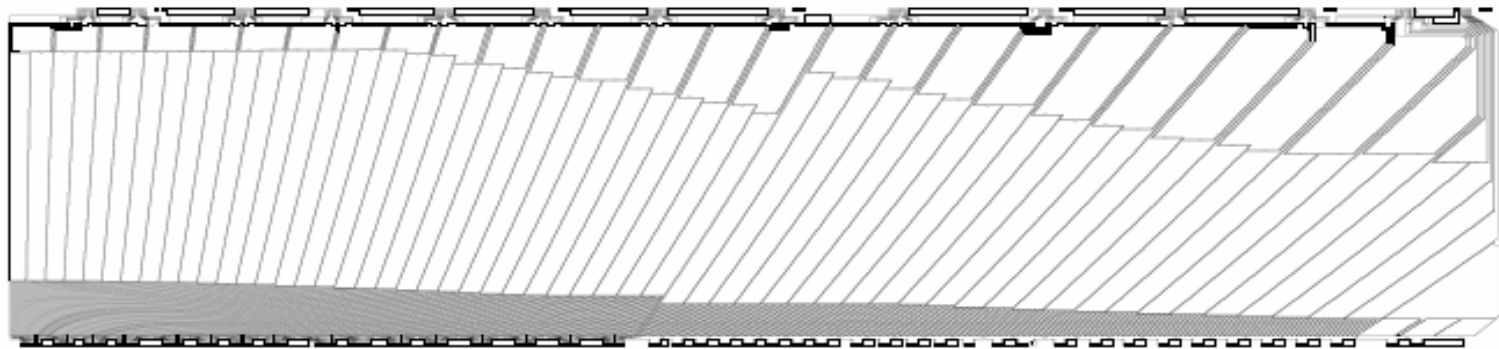
Pour maintenir une bonne **herméticité azimutale** en réduisant le temps de transfert des signaux vers les préamplificateurs, le calorimètre EM est muni d'une **géométrie en accordéon**, cette dernière étant réalisée en pliant les électrodes et les absorbeurs par rapport à la direction des particules incidentes.





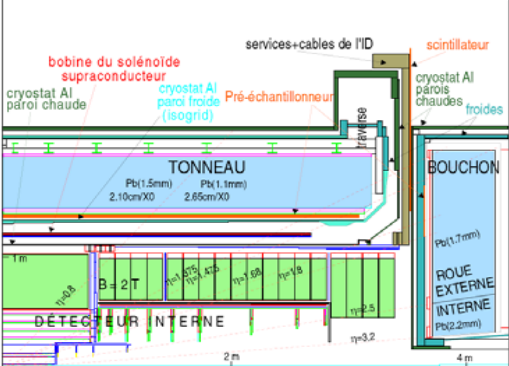
# La partie centrale du EM

En profondeur le calorimètre EM est divisé en 3 compartiments (109 568 voies de lecture). L'énergie des gerbes est principalement déposée dans le premier et le deuxième compartiment. Le troisième : gerbes de très haute énergie.



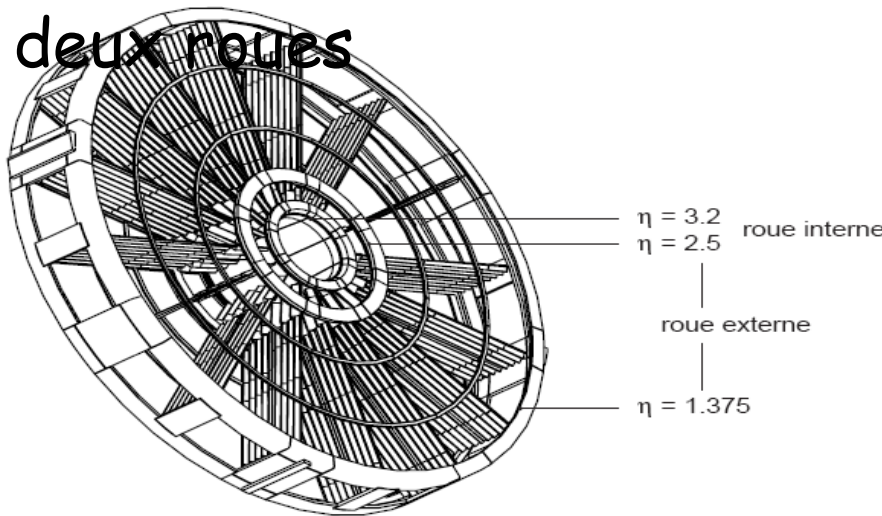
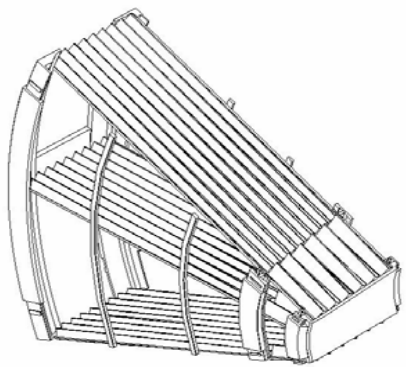
Le premier compartiment qui est caractérisé par une granularité très fine suivant  $\eta$  est situé à l'avant du détecteur. Il sert par exemple à la séparation  $\gamma/\pi^0$ .

Les deux derniers compartiments sont lus par la face arrière du détecteur et ont une granularité en  $\eta$  moins fine que celle du premier (réduire le nombre de voies).

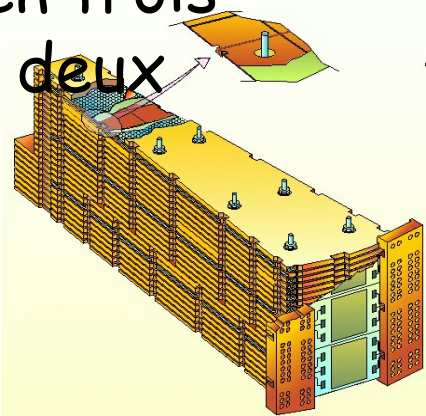


# les bouchons

Chaque bouchon est composé de deux roues concentriques.



En profondeur, les bouchons sont divisés en trois compartiments dans la roue externe et en deux compartiments dans la roue interne.





# Performances requises

L'observation du bosons de Higgs dans les canaux  $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$  et  $H^0 \rightarrow Z^0 Z^{0(*)} \rightarrow 4e^\pm$  dépendent de la résolution en énergie :

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

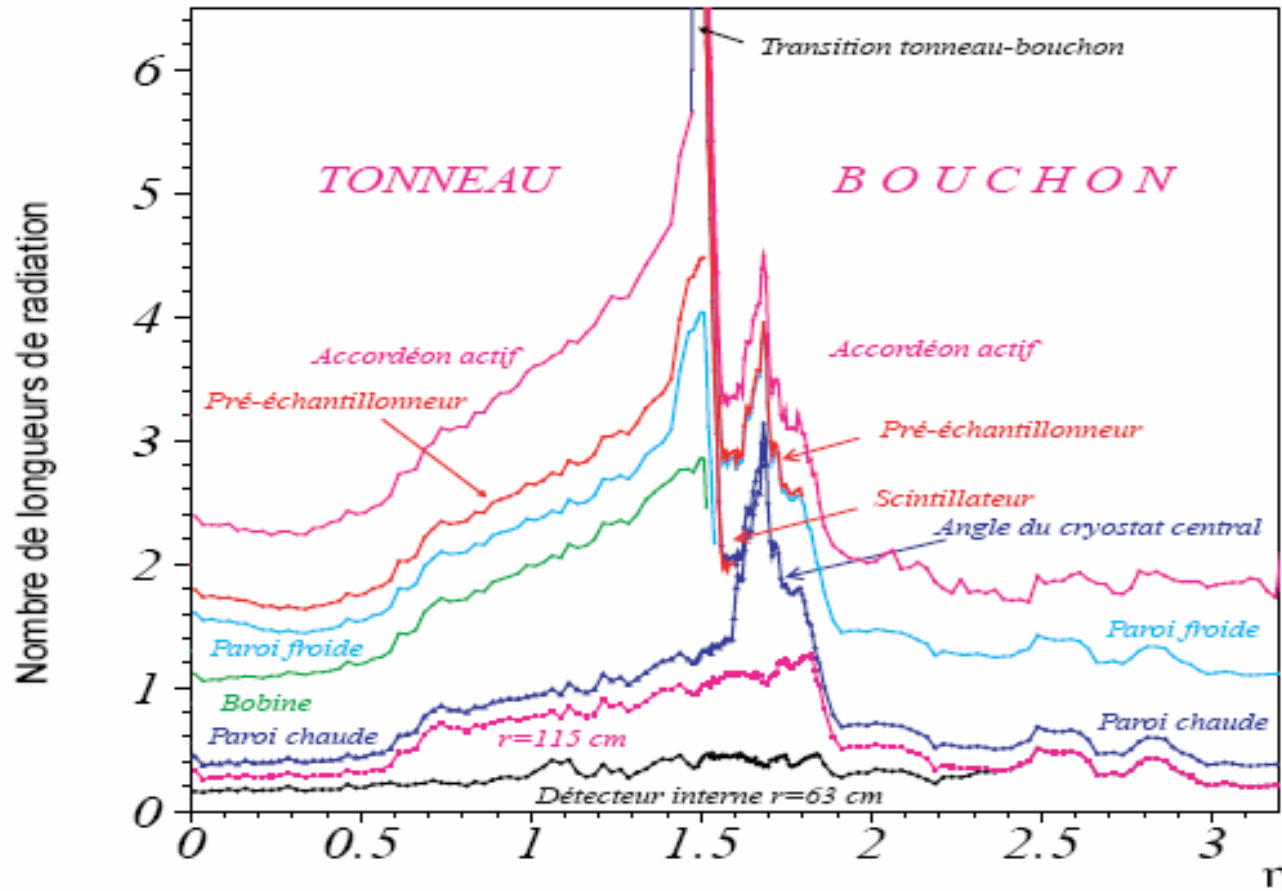
*a* est le terme d'échantillonnage de l'ordre de 9 à 10%

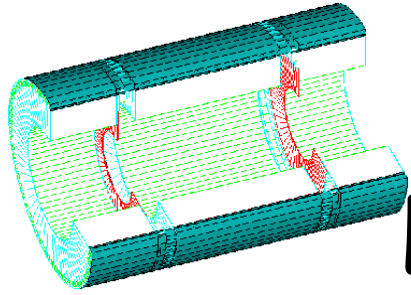
*b* est le terme de bruit (électronique, d'empilement d'événements)

*c* est le terme dit constant :

- 1. l'herméticité du détecteur (pas de fuite au bilan calorimétrique)
- 2. l'uniformité (calibration)
- 3. l'homogénéité de la structure mécanique (épaisseur)
- 4. effets dus à la matière en amont du calorimètre EM

# Distribution de la matière en amont des calorimètres





# Le calorimètre hadronique

Principaux objectifs sont :

- la reconstruction des jets hadroniques et la détermination de leur énergie.
- l'identification des particules.
- le déclenchement de l'acquisition en association avec le calorimètre électromagnétique

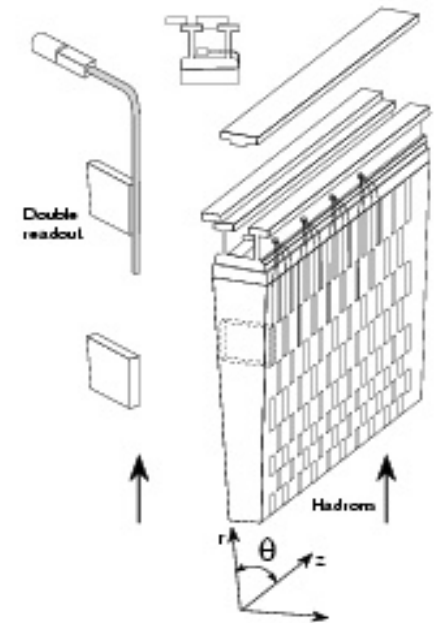
Il est constitué d'un **calorimètre central** dit à « tuiles scintillantes » et de **deux bouchons à argon liquide**.

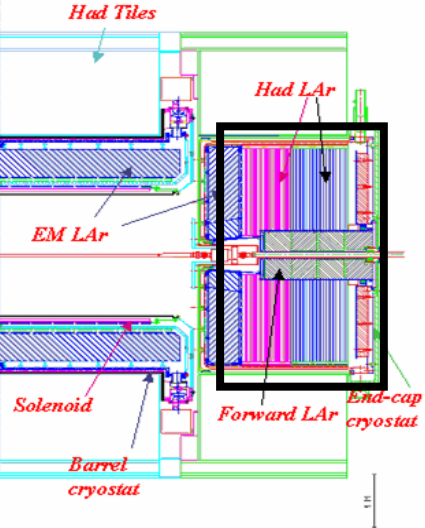
# le calorimètre à tuiles scintillantes

Ce calorimètre utilise du **fer** (plaques de 14 mm d'épaisseur) comme milieu absorbeur, et des **tuiles scintillantes** (plaques de scintillateur d'épaisseur 3 mm) comme milieu actif.

Ces plaques sont disposées **perpendiculairement** à l'axe des faisceaux et sont **alternées** en profondeur suivant l'axe z.

La lecture des signaux est faite à l'aide de deux fibres à « décalage de longueur d'onde » qui sont lues par des photomultiplicateurs situés à l'arrière du détecteur.

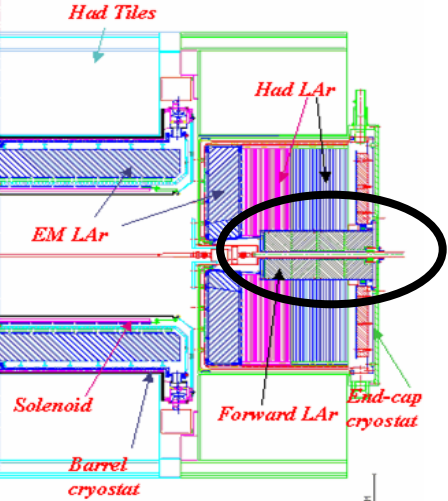




# Les bouchons du HCAL

Le taux de rayonnement est plus fort dans les régions avant du calorimètre hadronique. Cela impose l'utilisation de l'argon liquide comme milieu actif.

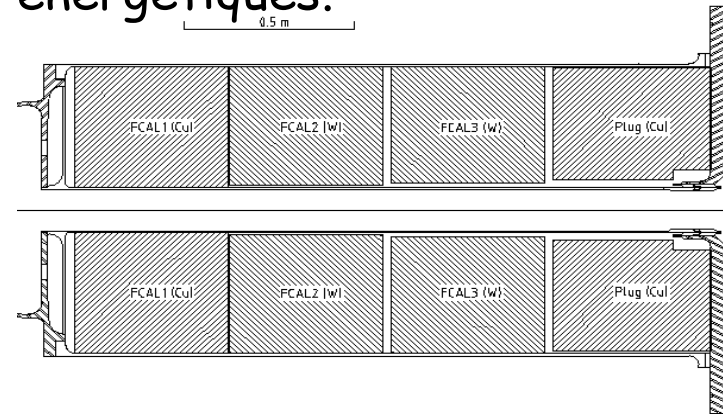
Dans ces régions, deux types de calorimètres hadroniques à argon liquide sont à considérer : le bouchon et le calorimètre avant.



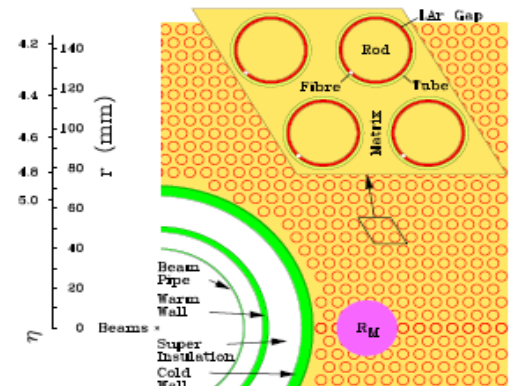
# Le calorimètres avant

Il doit être particulièrement résistant aux radiations, les jets de particules dans cette région du détecteur sont extrêmement énergétiques.

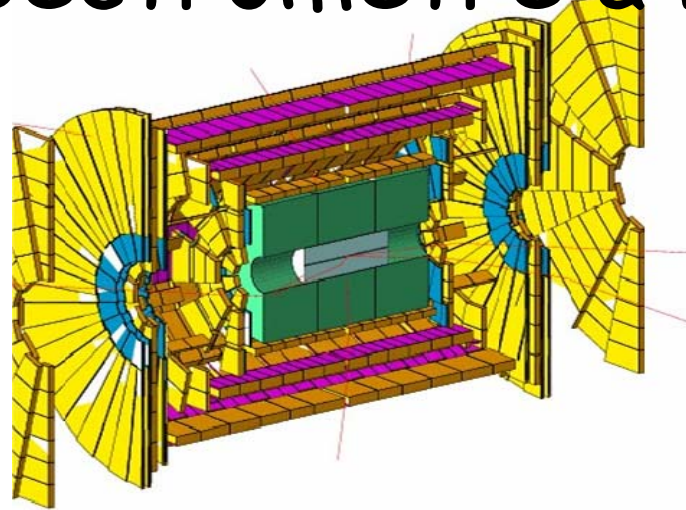
Une matrice en cuivre a été choisie pour le premier module, le tungstène pour les deux suivants (~ 14 g/cm<sup>3</sup>). La matrice absorbante est percée de trous cylindriques où sont glissés de fins tubes de tungstène, définissant ainsi un gap très fin d'argon liquide.



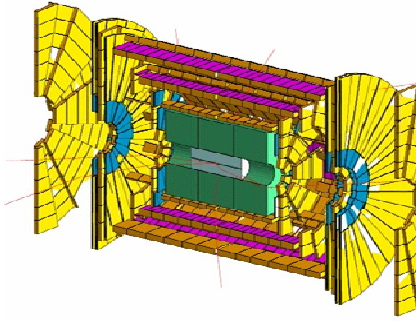
Un quatrième module non instrumenté est placé tout à l'arrière, et sert de protection contre les queues de gerbes hadroniques pour le détecteur de muons situé juste derrière.



# Le spectromètre à muons



# Le spectromètres à muons



le rôle et objectifs du spectromètre à muons est :

- de reconstruire la trajectoire des  $\mu^\pm$  avec efficacité,
- de mesurer l'impulsion avec une très bonne résolution,
- de posséder une bonne herméticité et acceptance,
- de déclencher l'acquisition pour des événements muons.

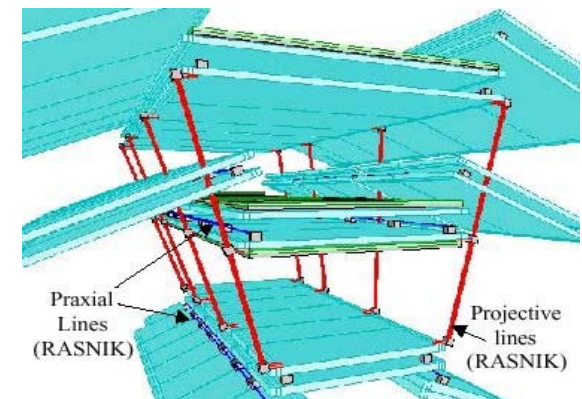
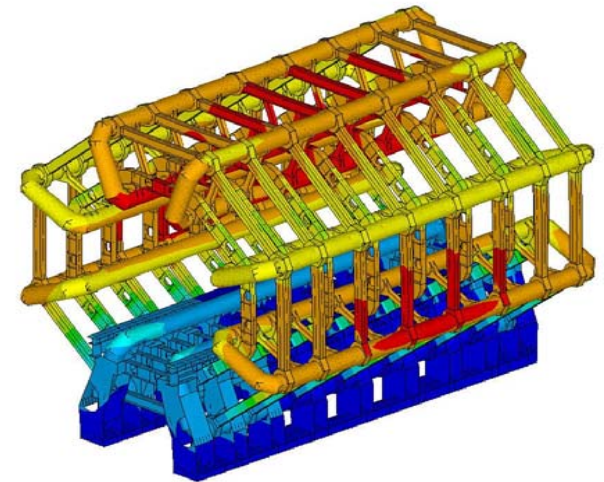


# Le spectromètres à muons

Un **aimant toroïdal** qui génère un champ magnétique assurant la déflexion des muons condition nécessaire pour mesurer précisément leur impulsion.

La configuration des aimants est telle que le champ magnétique produit, d'une valeur moyenne de 0.4 Tesla, est dans la plupart des cas orthogonal à la trajectoire initiale des muons.

**Des chambres à fils proportionnelles** qui détectent le passage de la particule.



# La dure vie des détecteurs au LHC

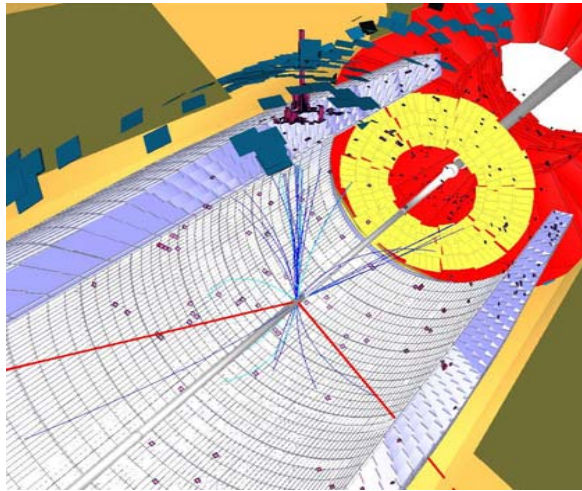
# L'empilement au LHC

Pile-up  $\Rightarrow$  collisions multiples par croisement

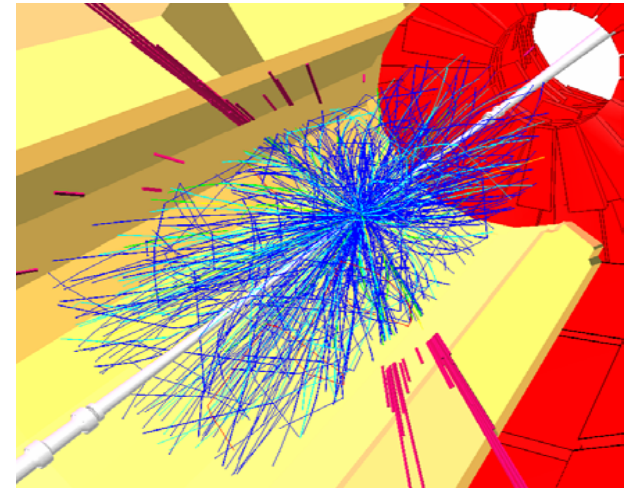
Basse luminosité  $2 \cdot 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \Rightarrow 4$  événements par croisement

Haute luminosité  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \Rightarrow 20$  événements par croisement

LHC++  $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \Rightarrow 200$  événements par croisement



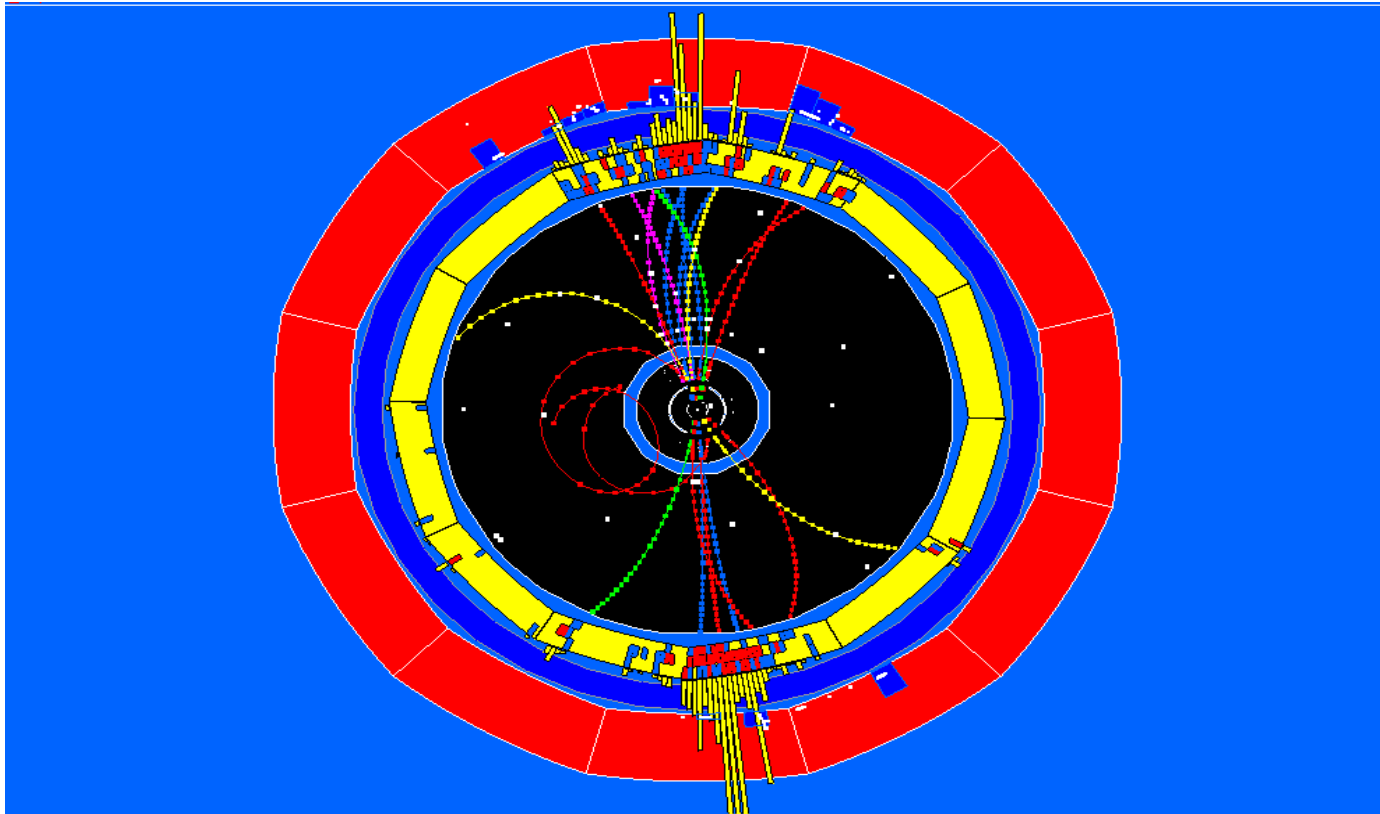
SUSY



SUSY + empilement ( $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

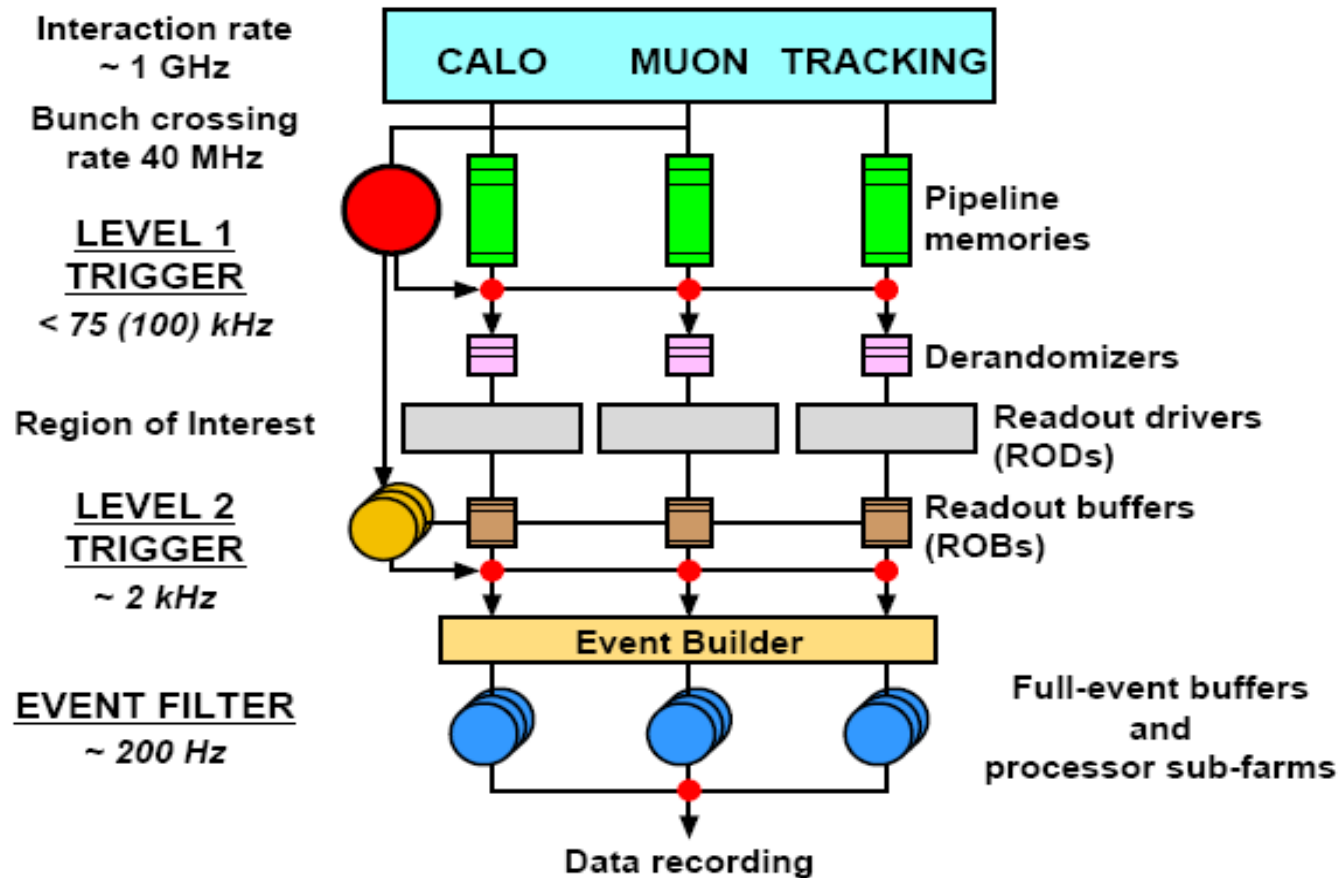
# La vie au LEP ...

ALEPH



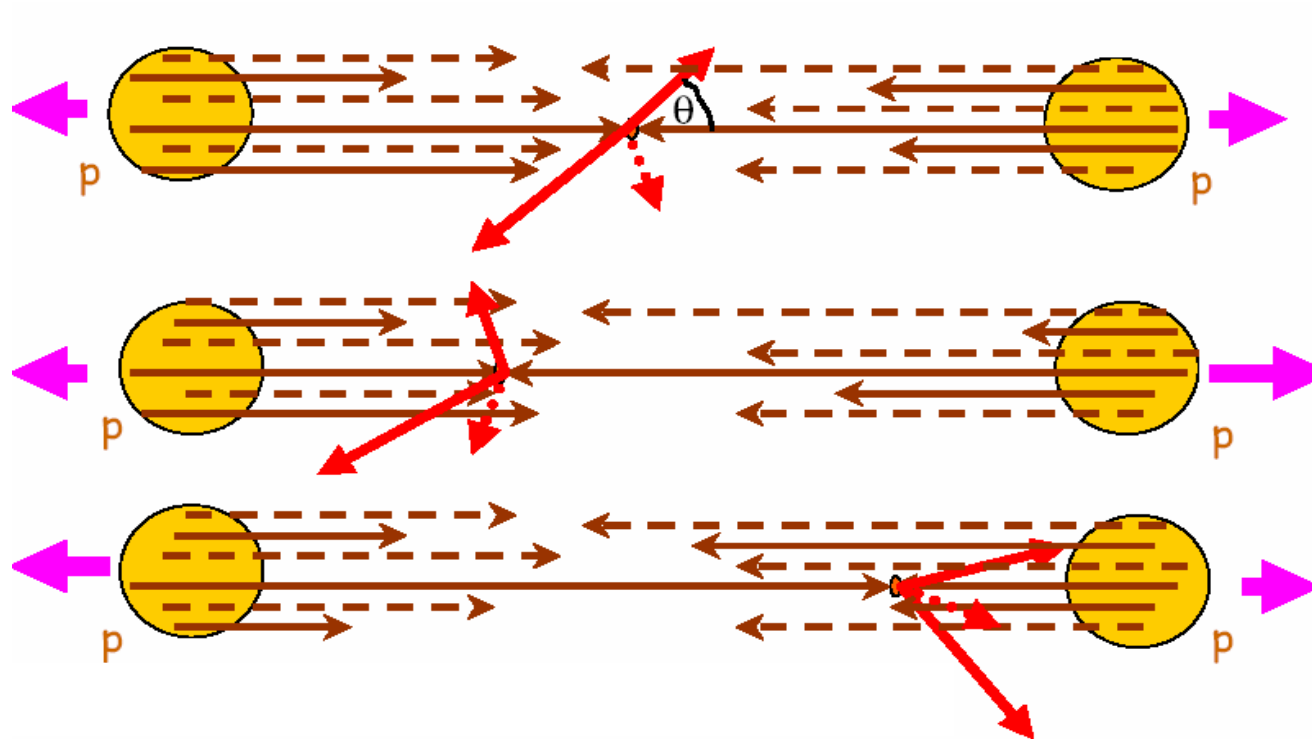
$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow qq \rightarrow \text{hadrons}$

# Le système de déclenchement



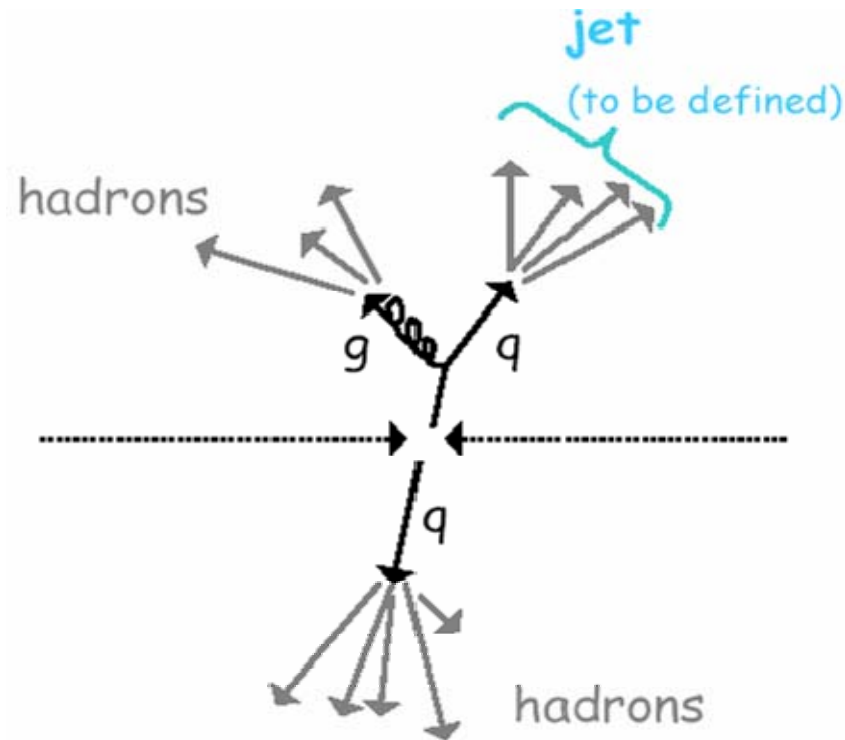
# La dure vie du physicien au LHC

# Une cinématique complexe



L'état initial pas toujours bien déterminé

et il y a des jets de particules ...

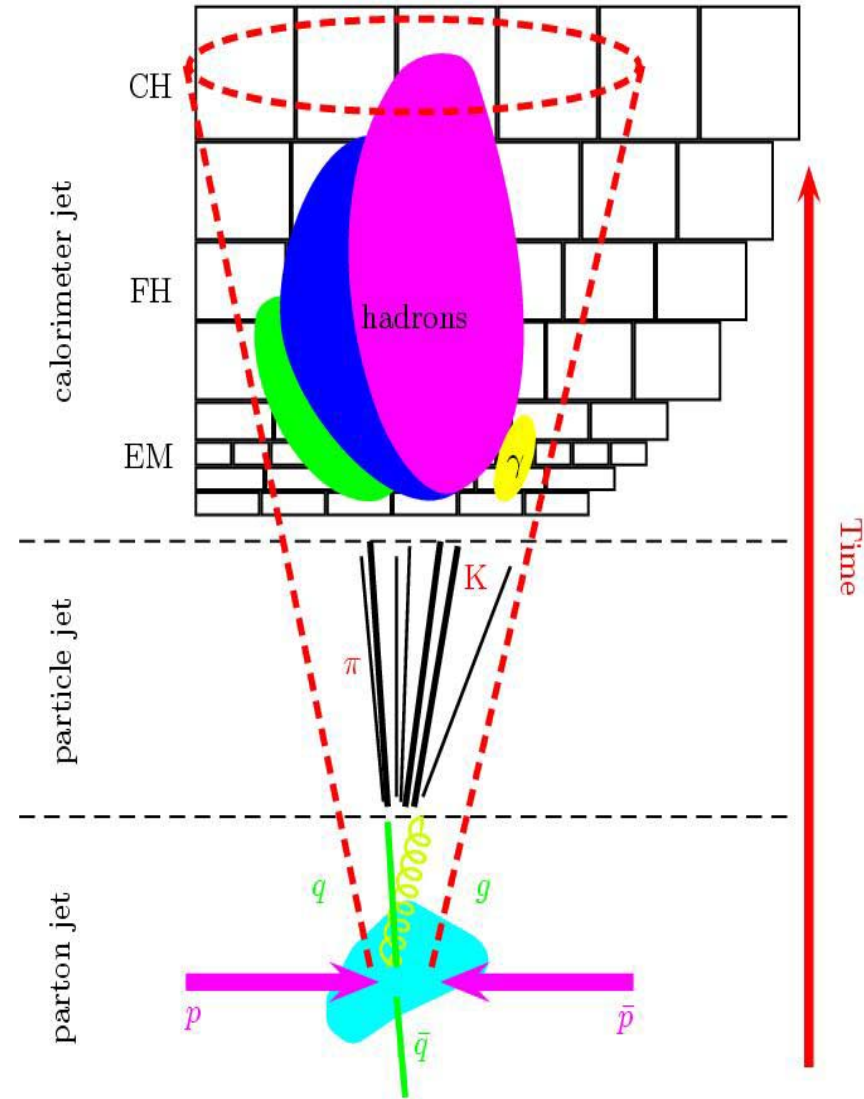
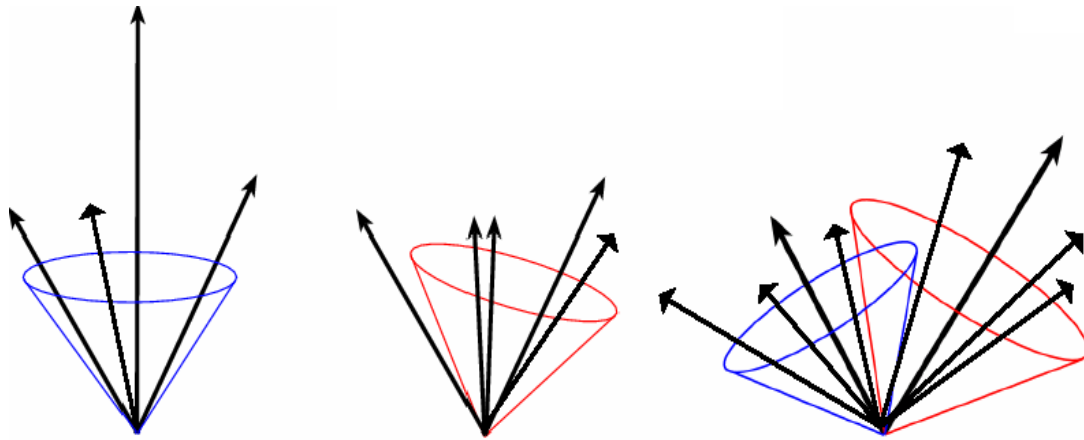


Hadronization: non-perturbative

⇒ need models!

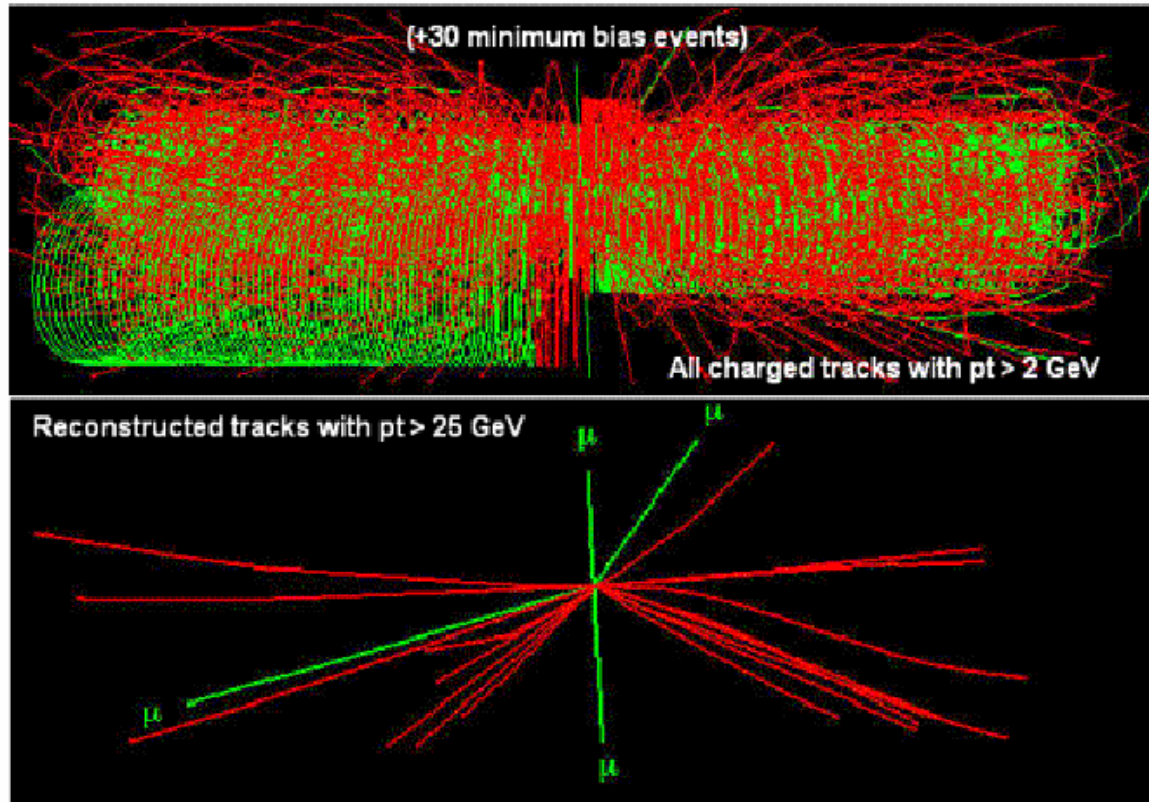


... et qui se recouvrent ...



# ... beaucoup de jet ...

simulation d'un événement  $gg \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^- \mu^+\mu^-$



1 désintégration d'un Higgs en 4 muons pour  $10^{13}$  événements.  
1 000 particules chargées par événement ( $p < 0.5$  GeV)

Tout cela est bien complexe ...

=> nécessité d'outils de simulation  
pour comprendre les phénomènes  
physiques et la réponse du détecteur

# Les générateurs ...

pourquoi utiliser des générateurs?

- ↗ permet d'effectuer des études théoriques et expérimentales de physique multi particule complexe
- ↗ véhicule pour disséminer des idées entre théoriciens et expérimentateurs

ils sont utilisés pour:

- ↗ prédire des taux et topologies d'événements  
=> permet d'estimer la faisabilité
- ↗ simuler les bruits de fond possibles  
=> permet d'optimiser les stratégies d'analyse
- ↗ étudier les caractéristiques requises des détecteurs  
=> permet d'optimiser la conception des détecteurs/triggers
- ↗ étudier les imperfections des détecteurs  
=> permet d'évaluer les corrections d'acceptance

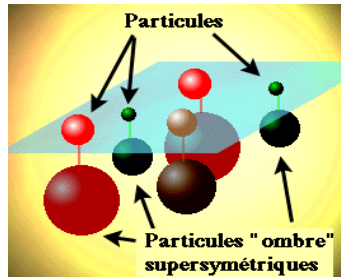
## ... les simulateurs

Il permet de simuler avec précision le passage de particules au travers la matière. Il inclut:

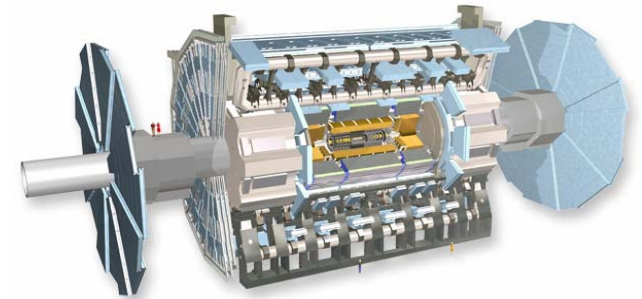
- ↗ description de la géométrie du système
- ↗ description des matériaux utilisés
- ↗ la génération des événements primaires
- ↗ le suivi des particules au travers des matériaux et des champs électromagnétiques
- ↗ les processus physiques gouvernant les interactions des particules
- ↗ la réponse des composantes sensibles des détecteurs
- ↗ la génération des données des événements
- ↗ le stockage des événements et des traces
- ↗ la visualisation des détecteurs et des trajectoires des particules

# Méthode expérimentale

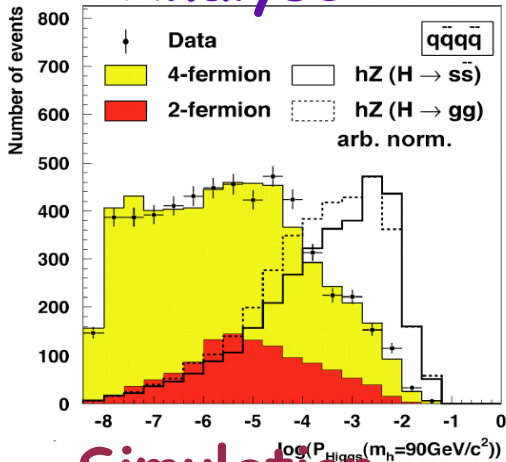
## Théorie



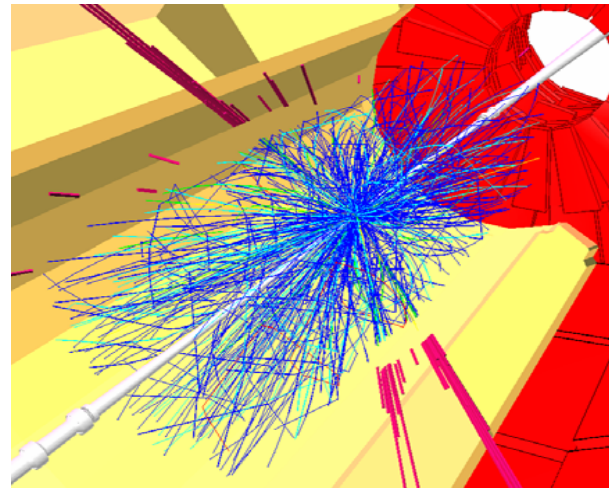
## Simulation



## Analyse



## Simulation



## Expérimentation