

# Les détecteurs du LHC



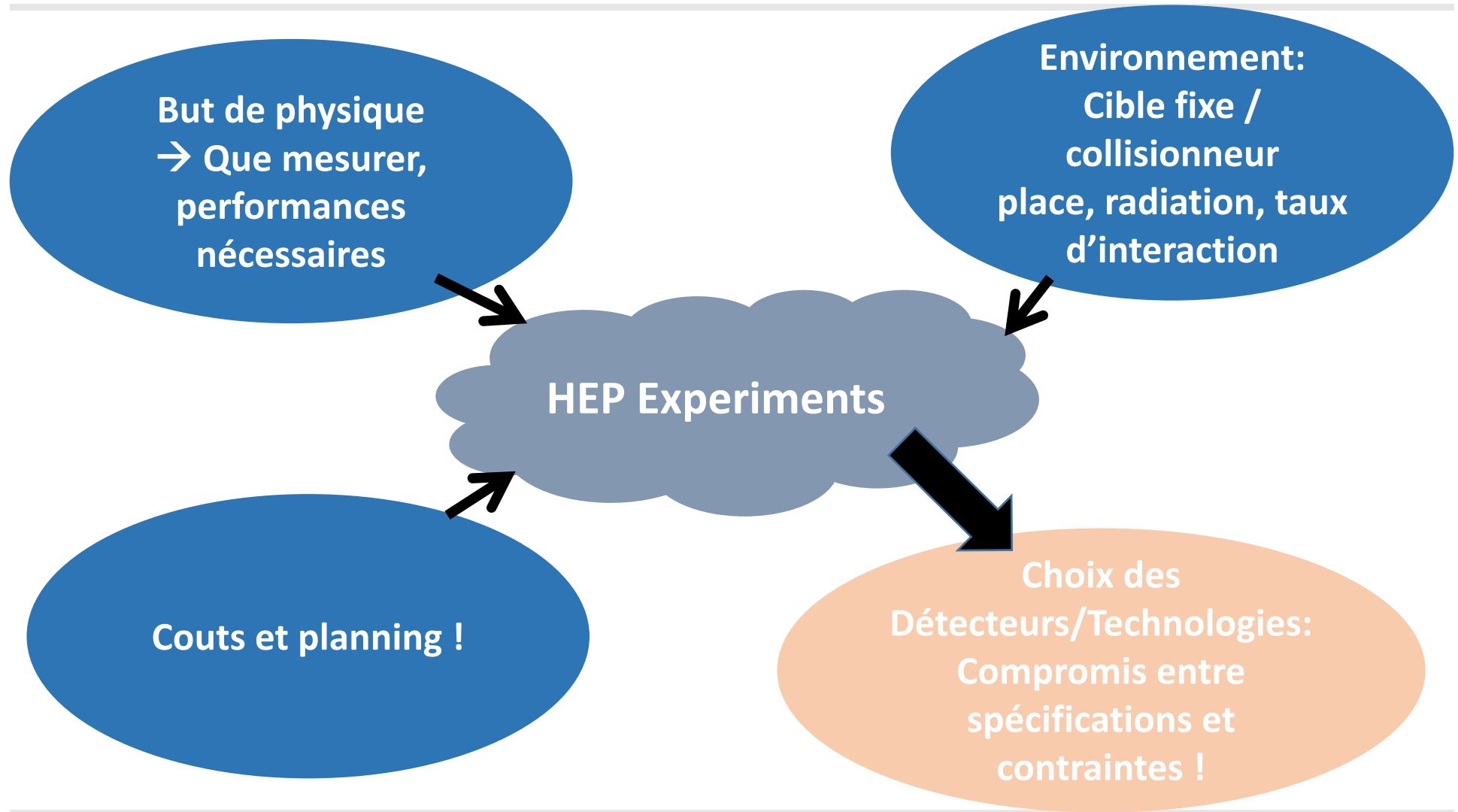
# Sommaire

---

- 1- Introductions; Rôle des détecteurs
  - 2- Géométrie et techniques utilisées pour les détecteurs
  - 3- Contraintes due à l'environnement LHC
  - 4- Les détecteurs LHC : ATLAS, CMS (LHCb, ALICE)
-

# Détecteur de physiques des hautes énergies

---



# Rôle des détecteurs (I)

---

Détecteur **idéal** doit mesurer et identifier **tous** les produits finaux de la collision:

- Leptons chargés

**électron** : particule **chargée** + interaction **électromagnétique** dans la matière → arrêté dans « peu » de matière

**muon** : particule chargée + **faible** interaction dans la matière ( $\tau \sim 10^{-6}\text{s}$ ) → traverse les détecteurs

**Tau** : particule **chargée** mais  $\tau \sim 2.10^{-17}\text{s}$ , **reconstruction à partir** des produits de désintégration (leptons chargés ou pions  $\pi^+ \pi^-$  ou  $\pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma)$ )

- **Photons**

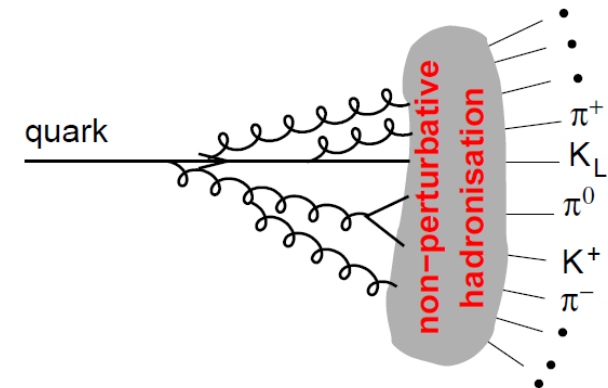
Particule **neutre** + interaction **électromagnétique** dans la matière  
→ arrêté dans « peu » de matière

# Rôle des détecteurs (I)

- Quarks et gluons pas à l'état libre hadronisation :

Hadron chargé ( $\pi$ , K, p) : **charge** +interaction

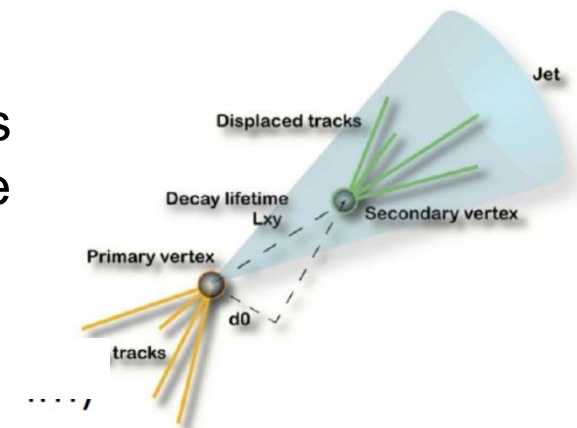
**nucléaire** : nécessite plus de matière pour arrêter les particules. Masse différente pour identification supplémentaire (LHCb, ALICE)



Hadron neutre : soit interaction **électromagnétique** ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )  
soit interaction **nucléaire** (neutron)

Quarks et gluons **reconstruit en « sommant »** toutes ces particules  
« collimées »  $\rightarrow$  jet

Quarks b ( $\rightarrow$  Mésons B) : durée de vie de l'ordre de ps  
produits de désintégration ne  
proviennent pas du  
vertex primaire

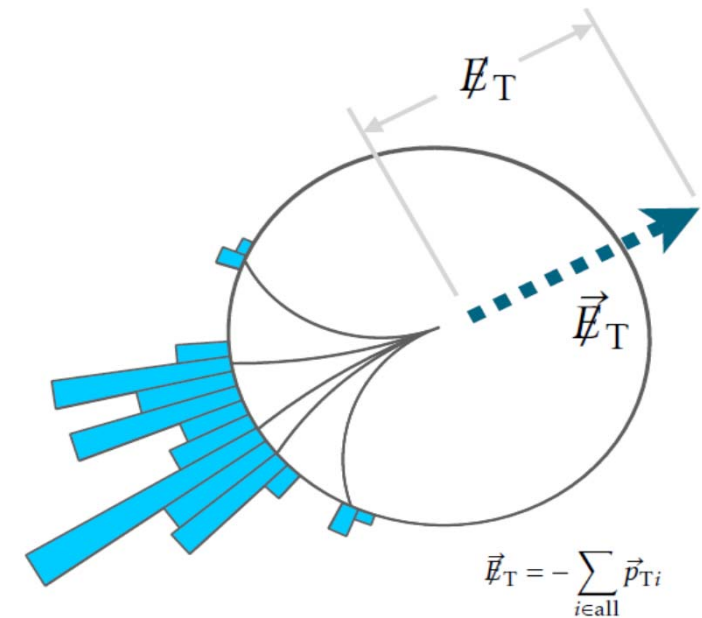


# Rôle des détecteurs (III)

Certaines particules **n'interagissent pas** (ou très peu) dans le détecteur :

- Neutrinos
- Neutrons lents
- (neutralinos /SUSY)

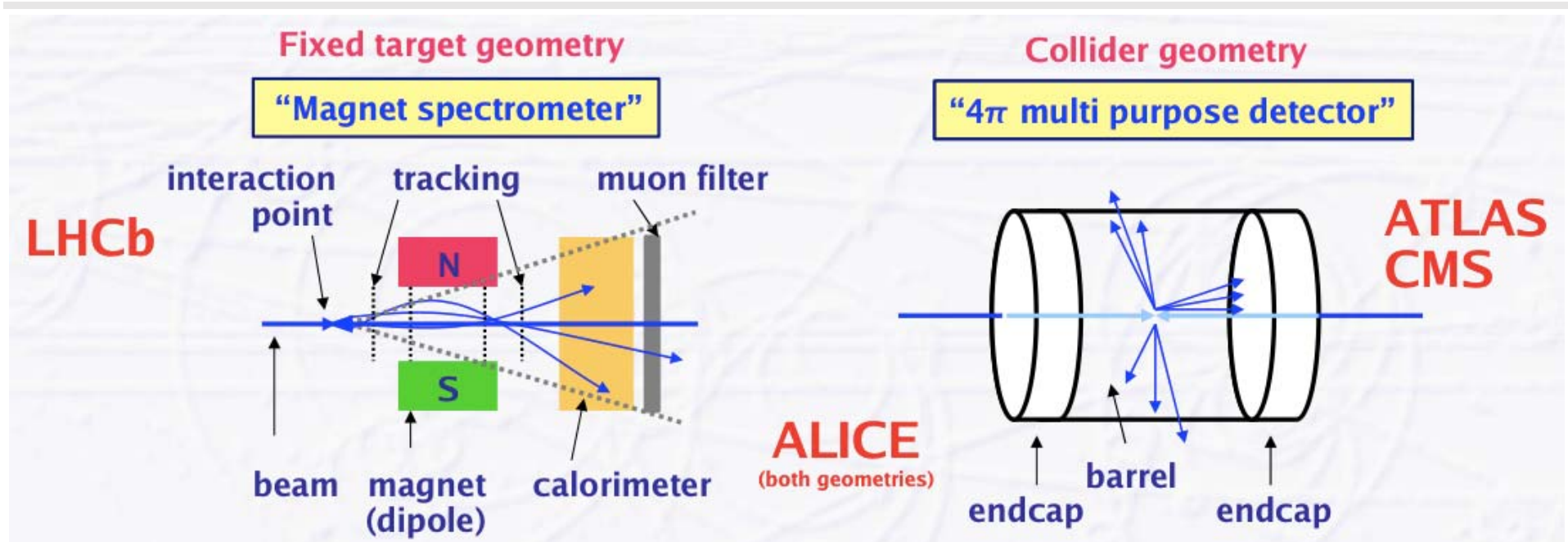
Pas de mesure individuelle possible mais  
**conservation énergie + moment dans le plan transverse**



→ Difficile à mesurer avec précision car dépend de toutes les autres mesures

Toute énergie non mesurée (particule dans un « crack », partie détecteur défectueuse) → grande énergie manquante .... comme un signal de possible de nouvelle physique

# Géométrie des détecteurs



Analyse des produits de désintégrations dans un faible angle /faisceau  
Détecteurs similaires à cible fixe, perpendiculaire au faisceau  
→ Spectromètre, dipôle magnétique

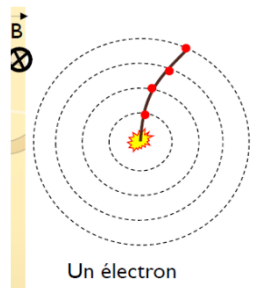
Particules à détecter sur tout l'angle solide ( $4\pi$ ). Détecteurs arrangés autour du faisceau avec structure oignons  
Barrel : cylindre central  
Endcap : Bouchons jusqu'à petit  $\theta$   
Champ magnétique : solénoïde ou toroïde

# Techniques utilisées

**Particule chargée** : Déviation dans un champ magnétique, mesure non destructive (ou presque !) de **charge et moment**

Lorentz force :  $p(\text{GeV}) = 0.3 B(\text{T}) R(\text{m})$

**Moment (p)**



→ Champ magnétique et détecteur très segmentés donnant un signal lors du passage du particule chargée (ionisation / excitation → e-/ions, e-h)

**Mesure d'énergie** : Techniques calorimétriques\* utilisées en **arrêtant les particules** dans un milieu dense et en mesurant **un signal proportionnel à l'énergie déposée** soit dans ce même milieu (calorimètre homogène) ou dans un autre milieu avec alternance absorbeur/signal (calorimètre à échantillonnage)

Matériaux différents pour stopper ( $e^\pm, \gamma$ ) ou hadrons

Pb, cristaux

Fe, Cu, W

Signal liquide noble (Ar) , gaz, Si, cristal

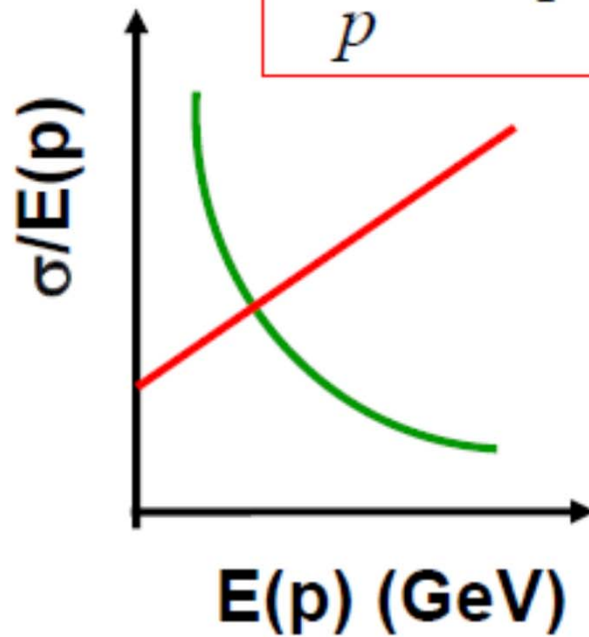
\* Calorimétrie au sens de la chimie → bolomètre dans notre domaine



# E vs p

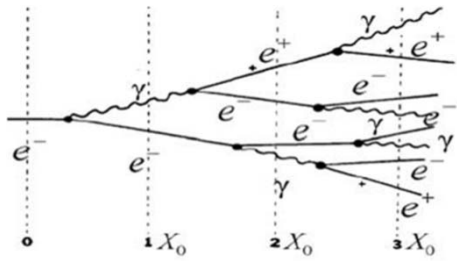
Analyse  
magnétique

$$\frac{\sigma(p)}{p} = ap \oplus b$$

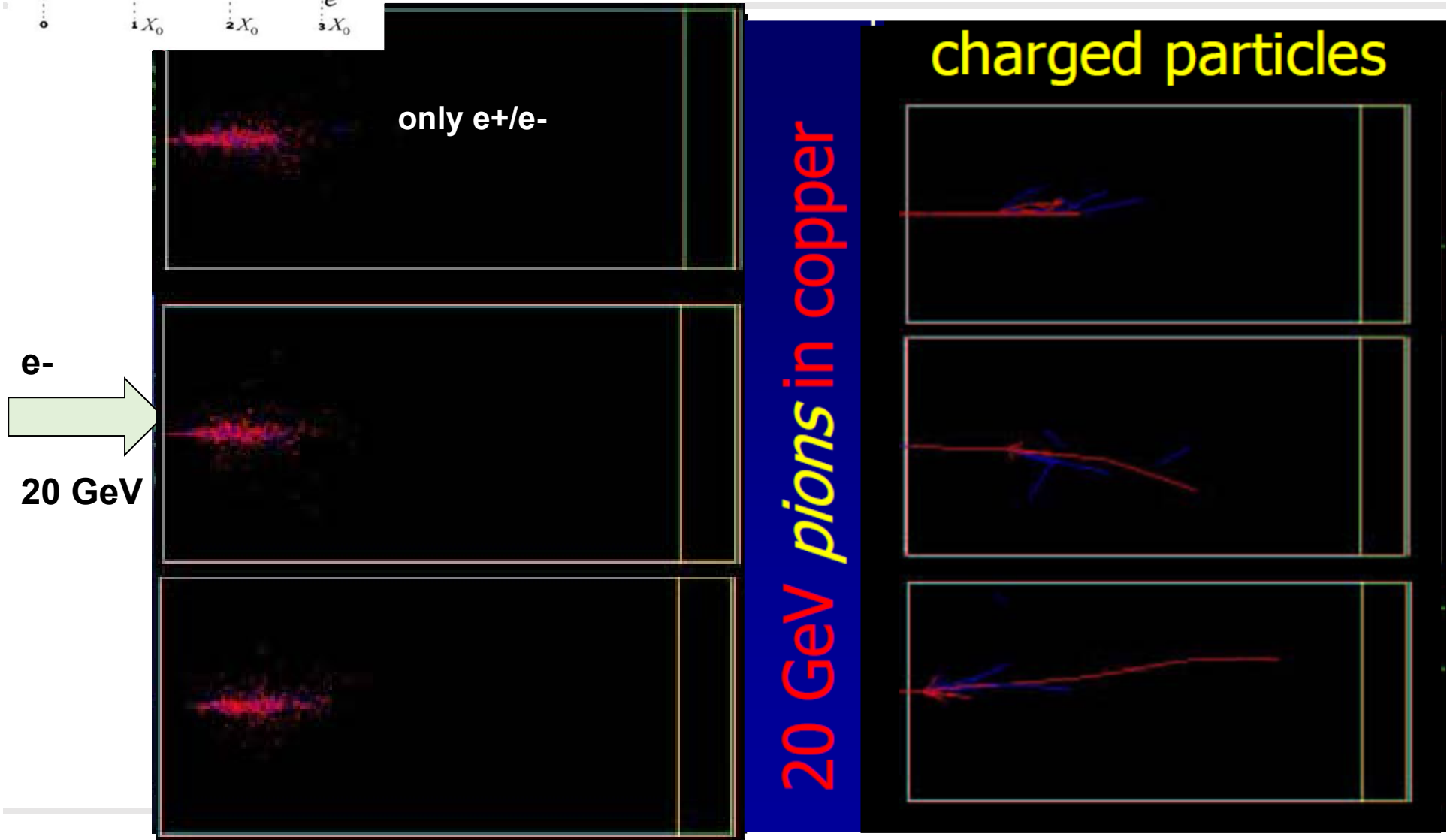


$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{a}{\sqrt{E}}$$

Calorimètre



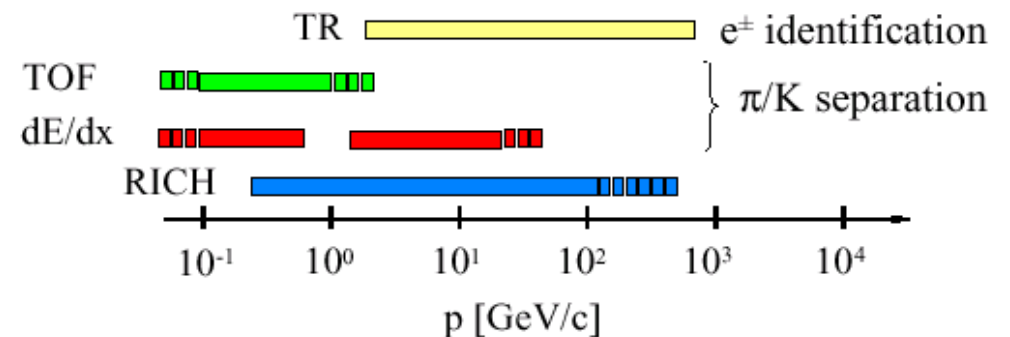
# Gerbes électromagnétiques/hadroniques



# Techniques utilisées

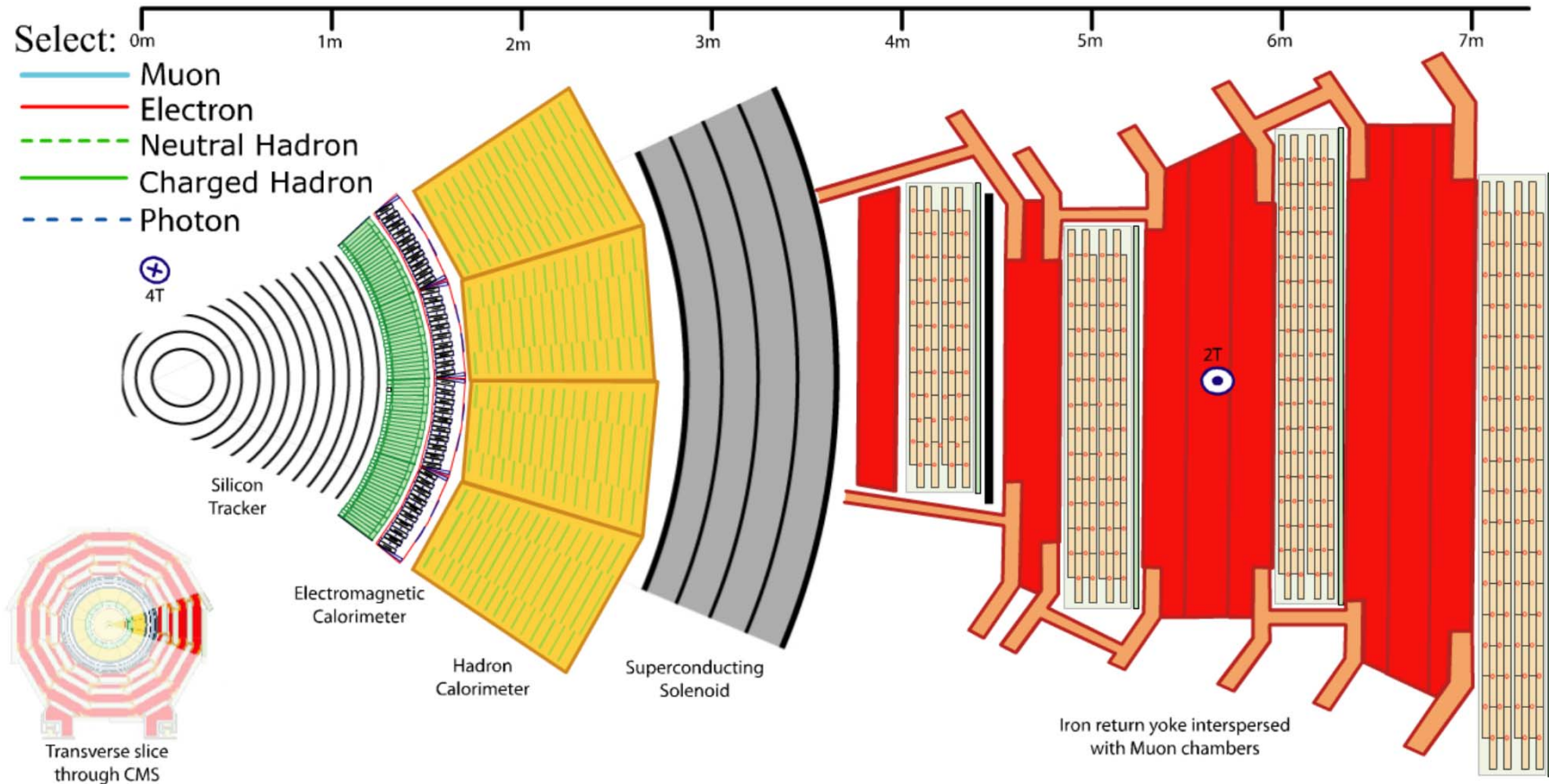
**Identification de particule** : utilisation d'interaction dans la matière qui dépendent de  $\gamma=E/m$  ou  $\beta=v/c$  (combinée avec mesure de  $p$ )

- rayonnement de transition (  $\gamma > 1000$  séparation  $e^-/\pi$ , 0.5 GeV-140 GeV)
- effet Cerenkov : séparation  $\pi/K/p$
- Mesure de temps de vol  $\pi/K/p$
- Perte d'énergie par ionisation

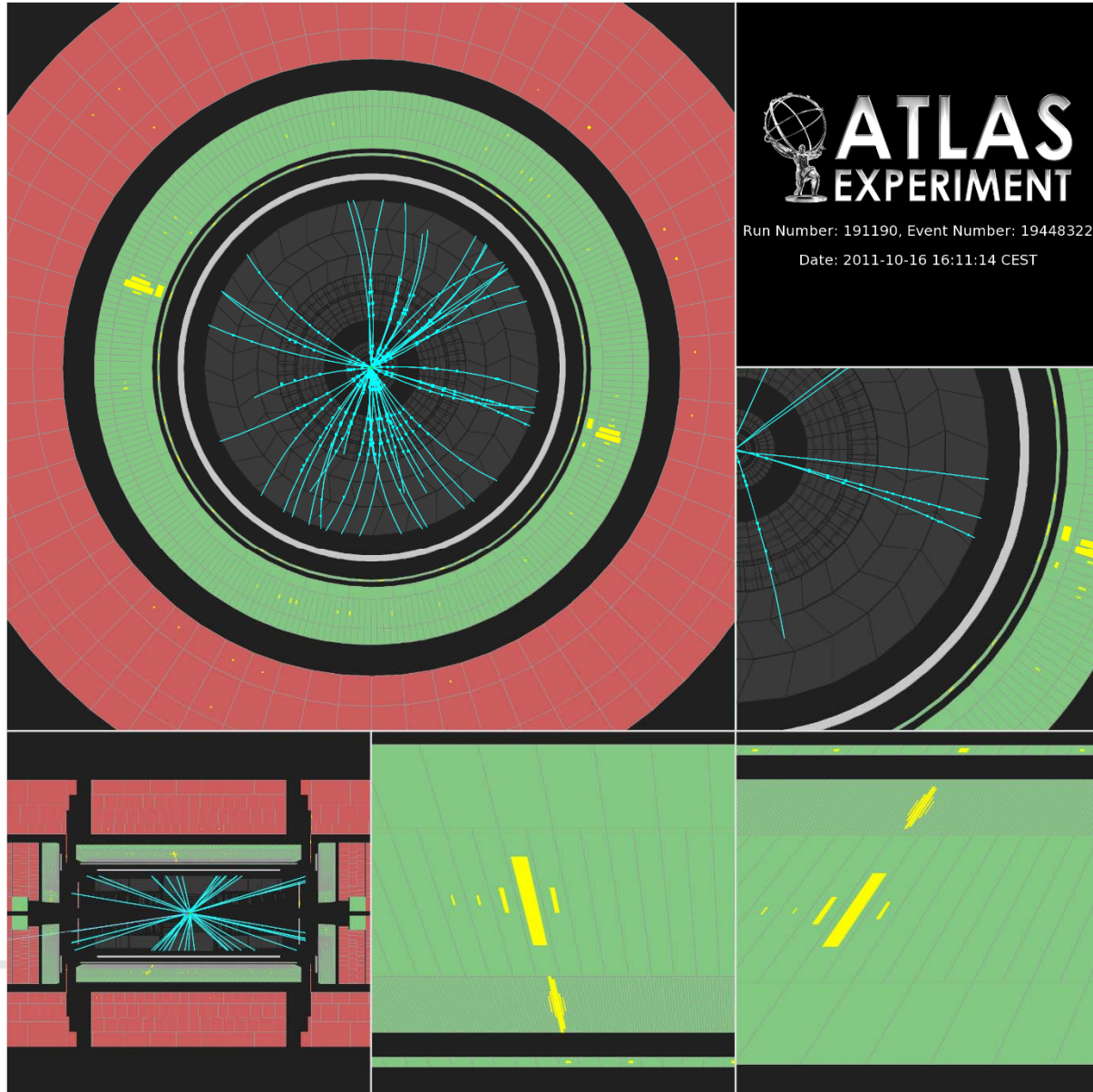


Utilisation des formes des dépôts d'énergie dans les calorimètres (e vs jet)

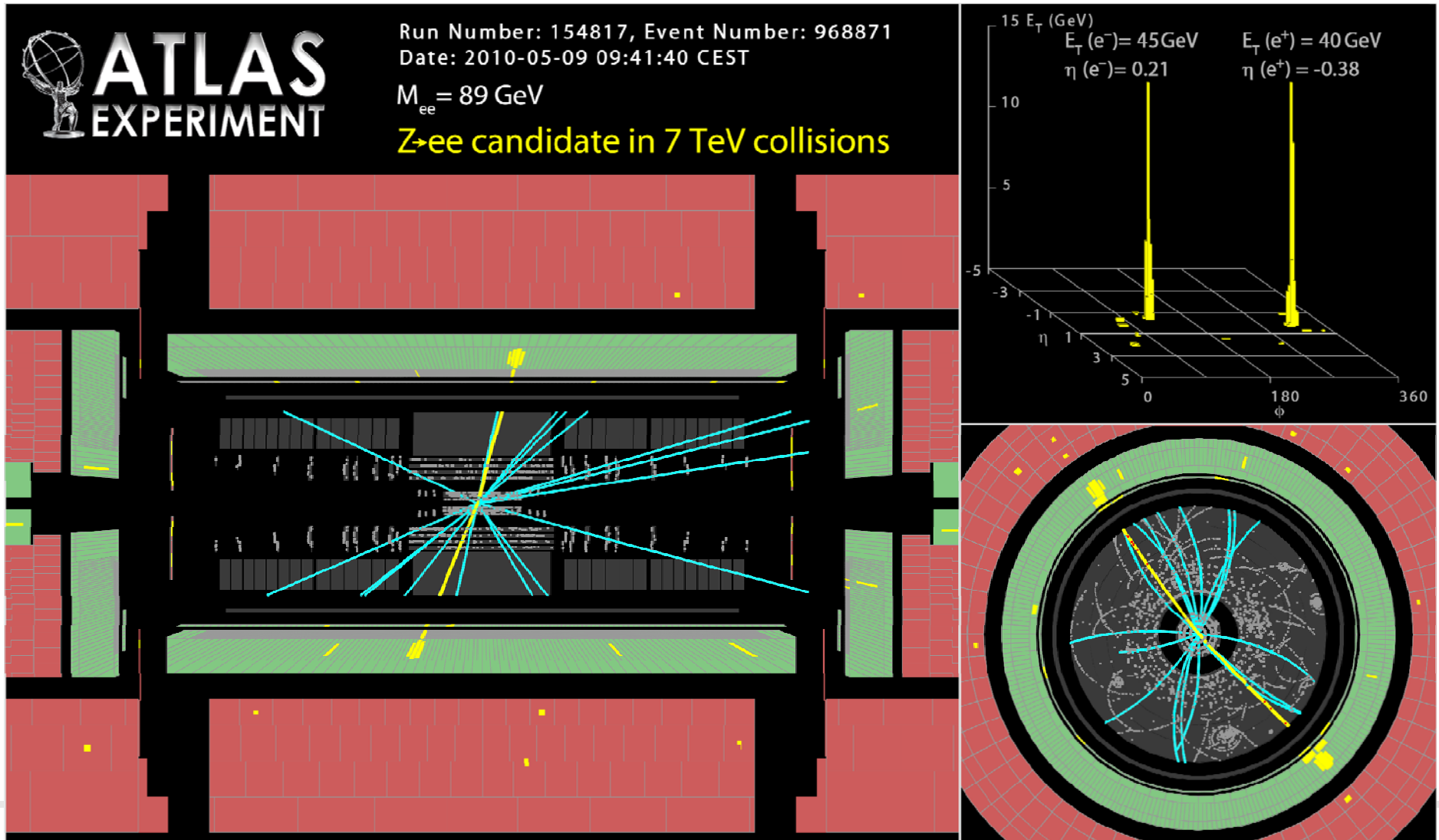
# Interaction/identification des particules dans CMS



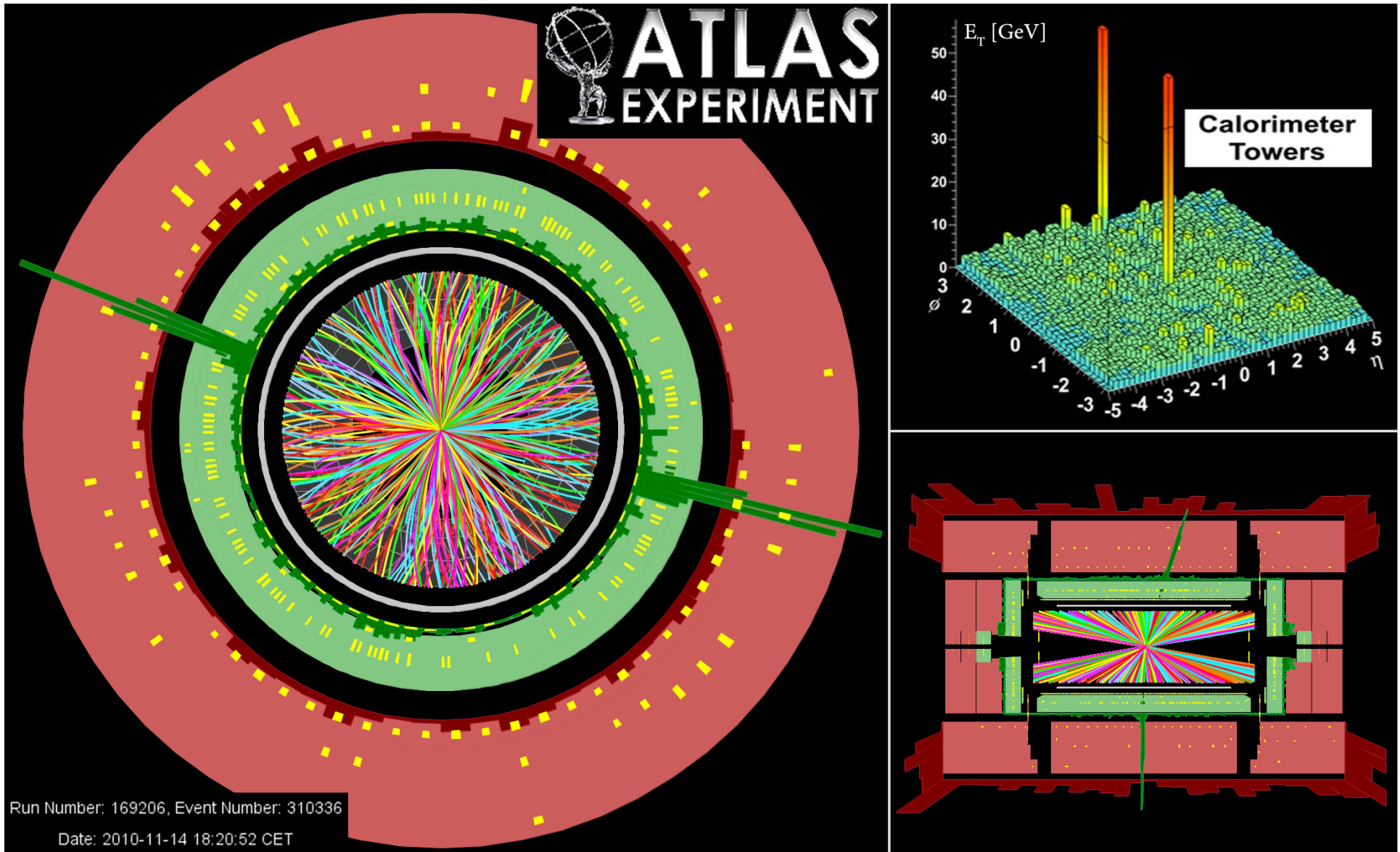
# $H \rightarrow \gamma\gamma$ in proton-proton collisions 8 TeV



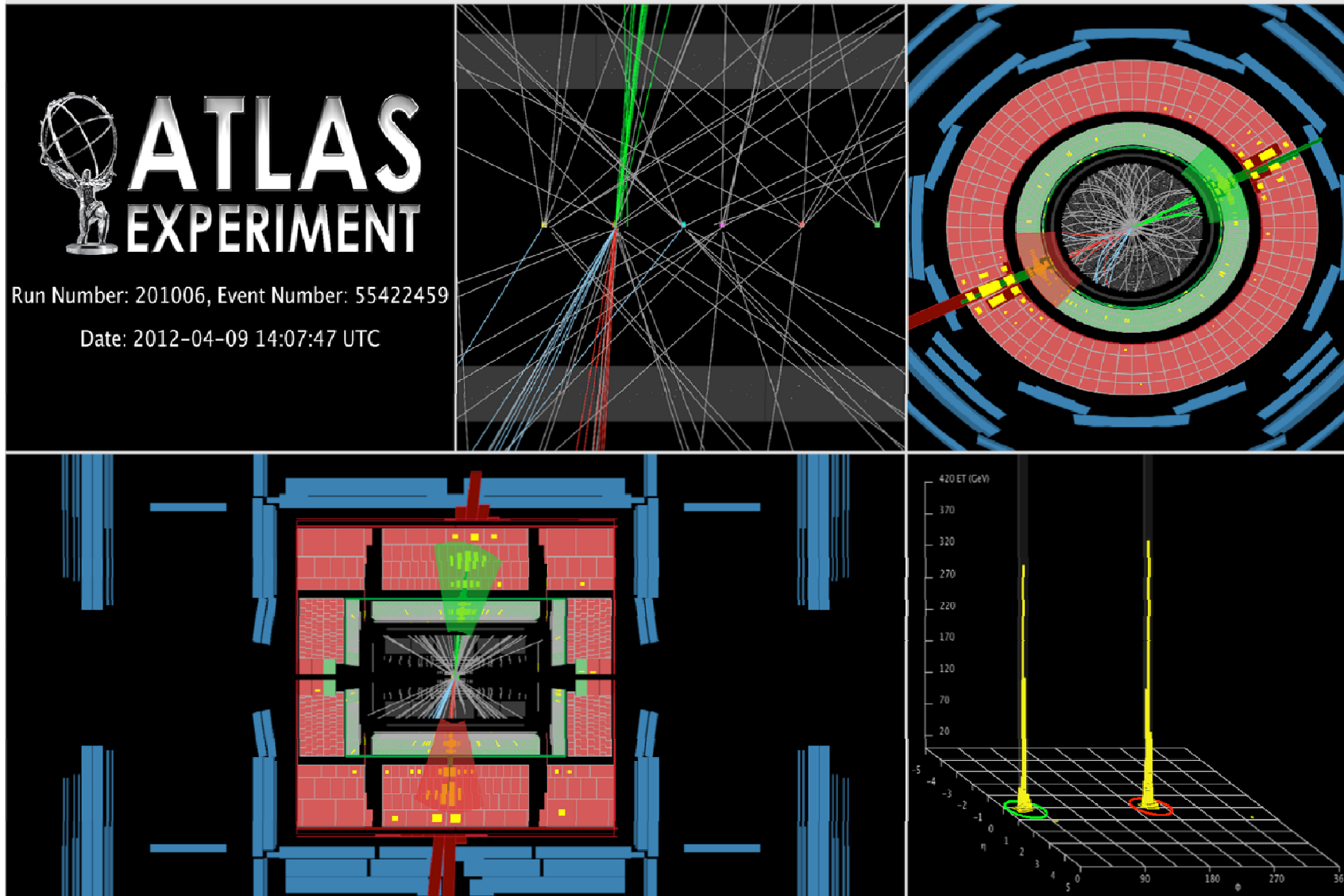
# $Z \rightarrow e^+e^-$ dans des collisions Proton-Proton



# $Z \rightarrow e^+e^-$ dans des collisions Pb-Pb

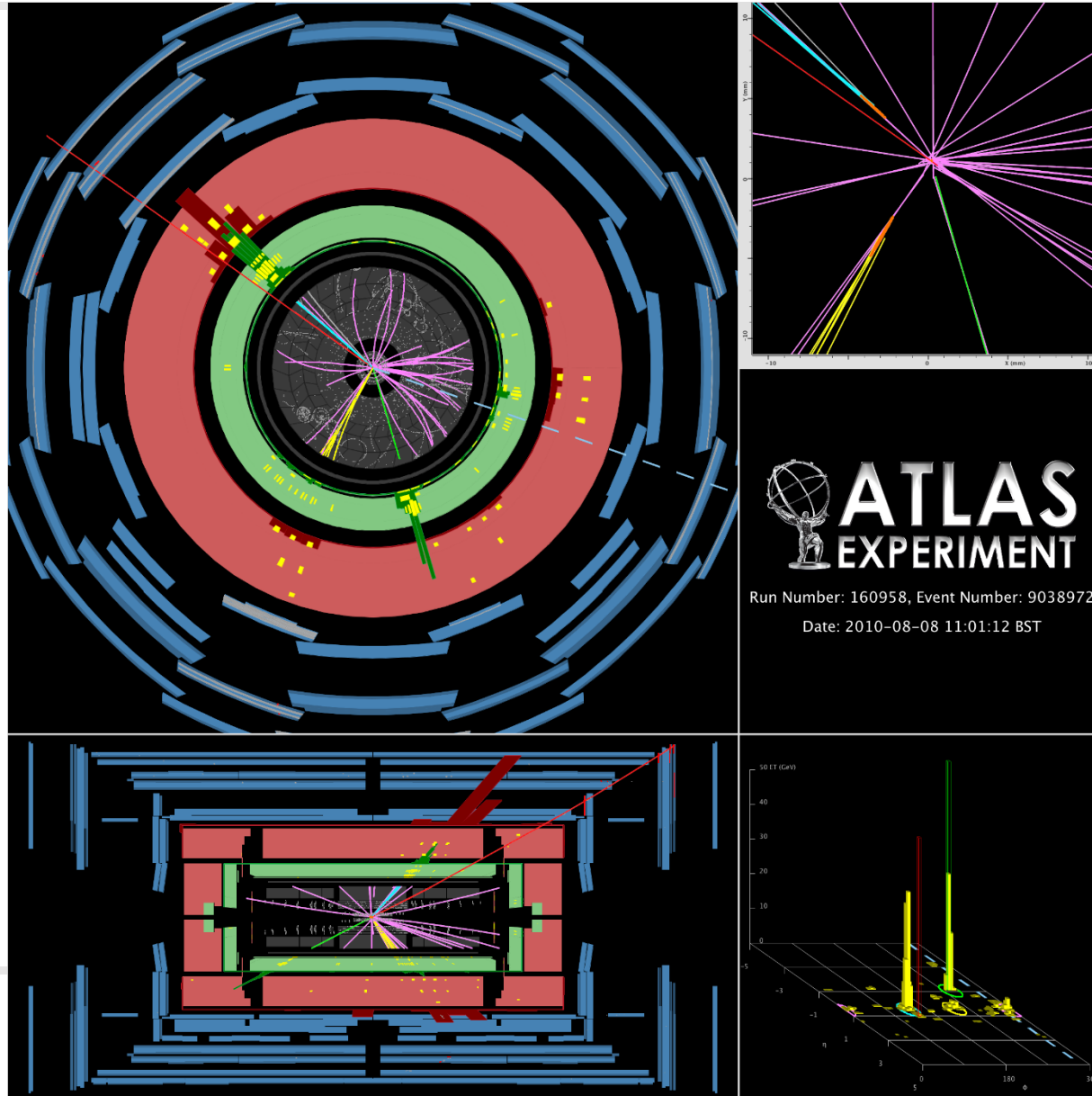


# Production d'une paire de jets (quark ou gluon)

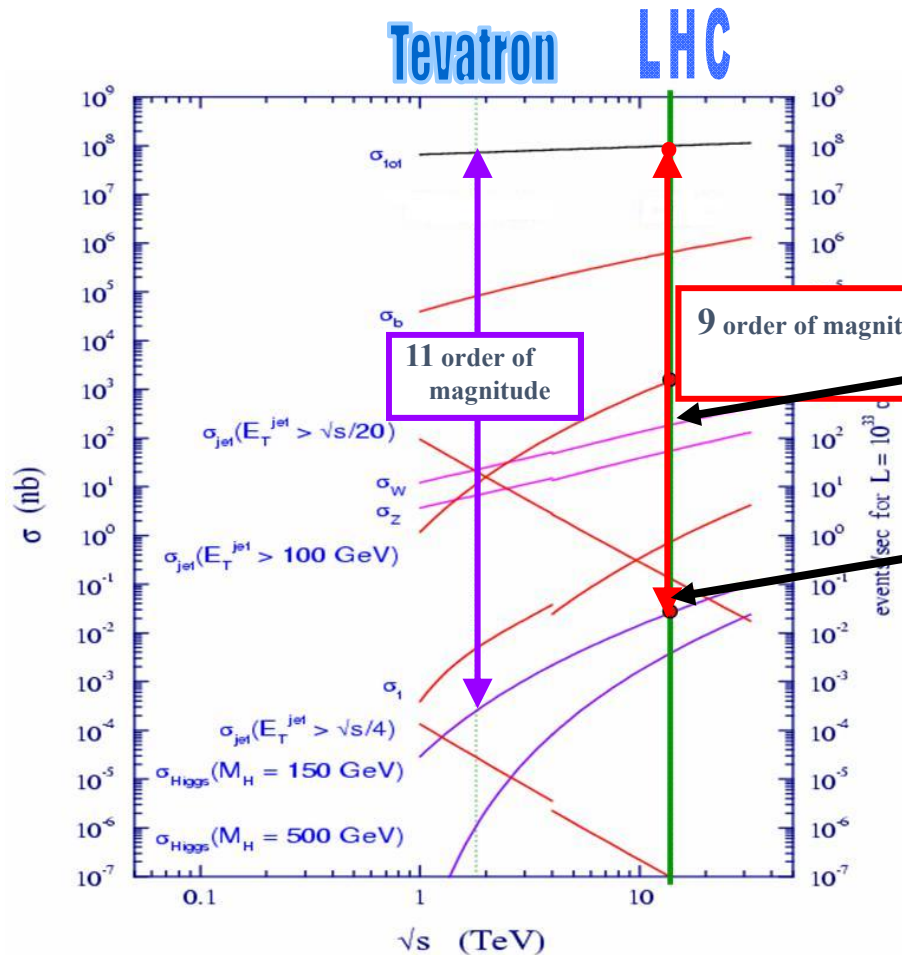




# Désintégration d'une pair top-antitop : $e\mu b\bar{b}$



# Contraintes expérimentales au LHC



Interaction proton-proton (QCD)

→ Grand section efficace et très grand taux d'interaction à chaque collision

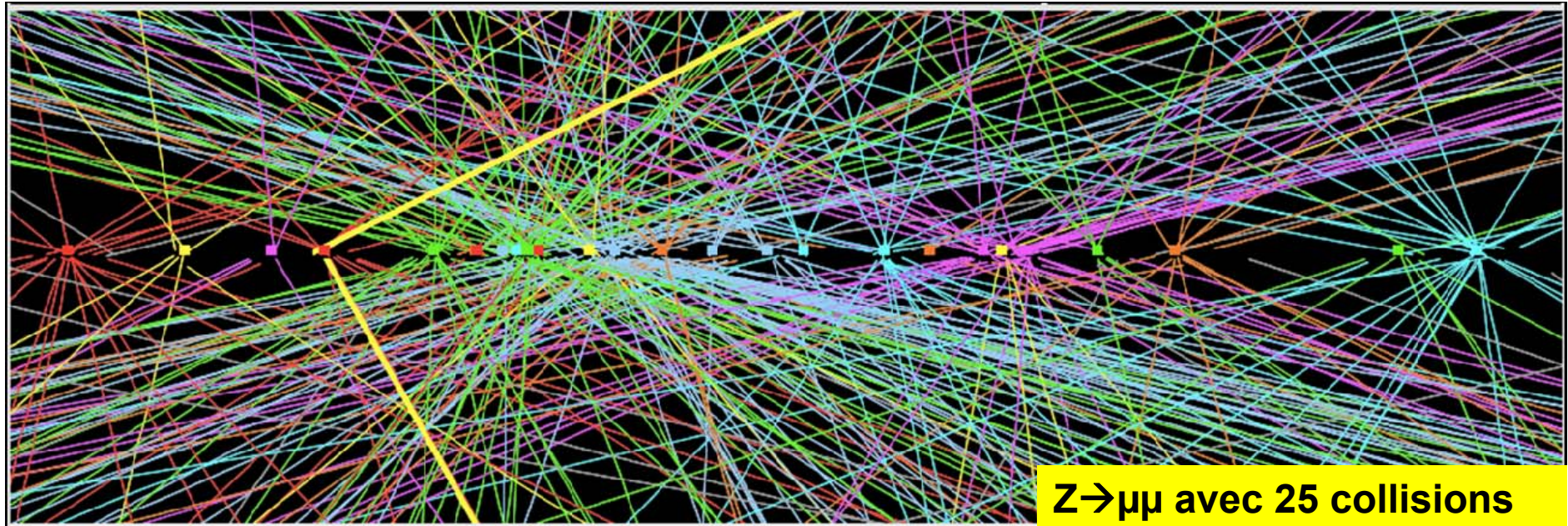
→ Processus « intéressants » du MS : ~6 ordres de grandeur inférieur

→ Higgs : 9 ordres de grandeur (Nouvelle physique ?)

→ Recherche de phénomènes rares parmi un grand nombre d'évènement (→ Trigger)

→ Evènements superposés à chaque interaction (pile-up)

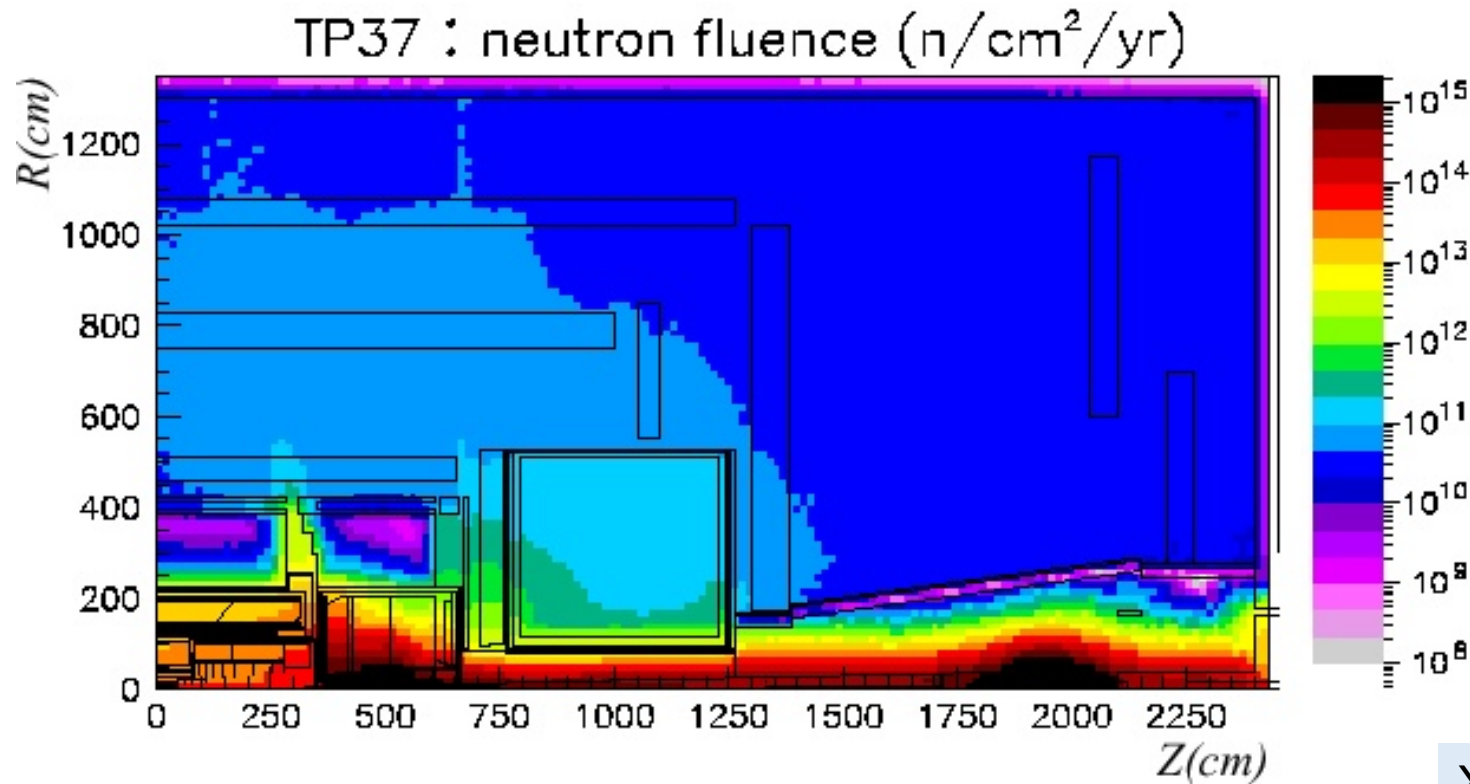
# Pile-up



~10 cm

- Besoin de détecteurs rapides pour minimiser les superposition des collisions précédentes (toutes les 25 ou 50 ns)
- Besoin d'un détecteur précis et très segmenté pour minimiser l'impact du pile-up (→ bcp de voies d'électroniques)
- Collisions à 40 MHz avec taille d'évènement de l'ordre de 1 Mb
- Impossible de tout enregistrer sélection le plus tôt en ligne (trigger)
- On garde ~300 Hz (qqs Pb) / 40 MHz de collisions

# Niveaux de radiations



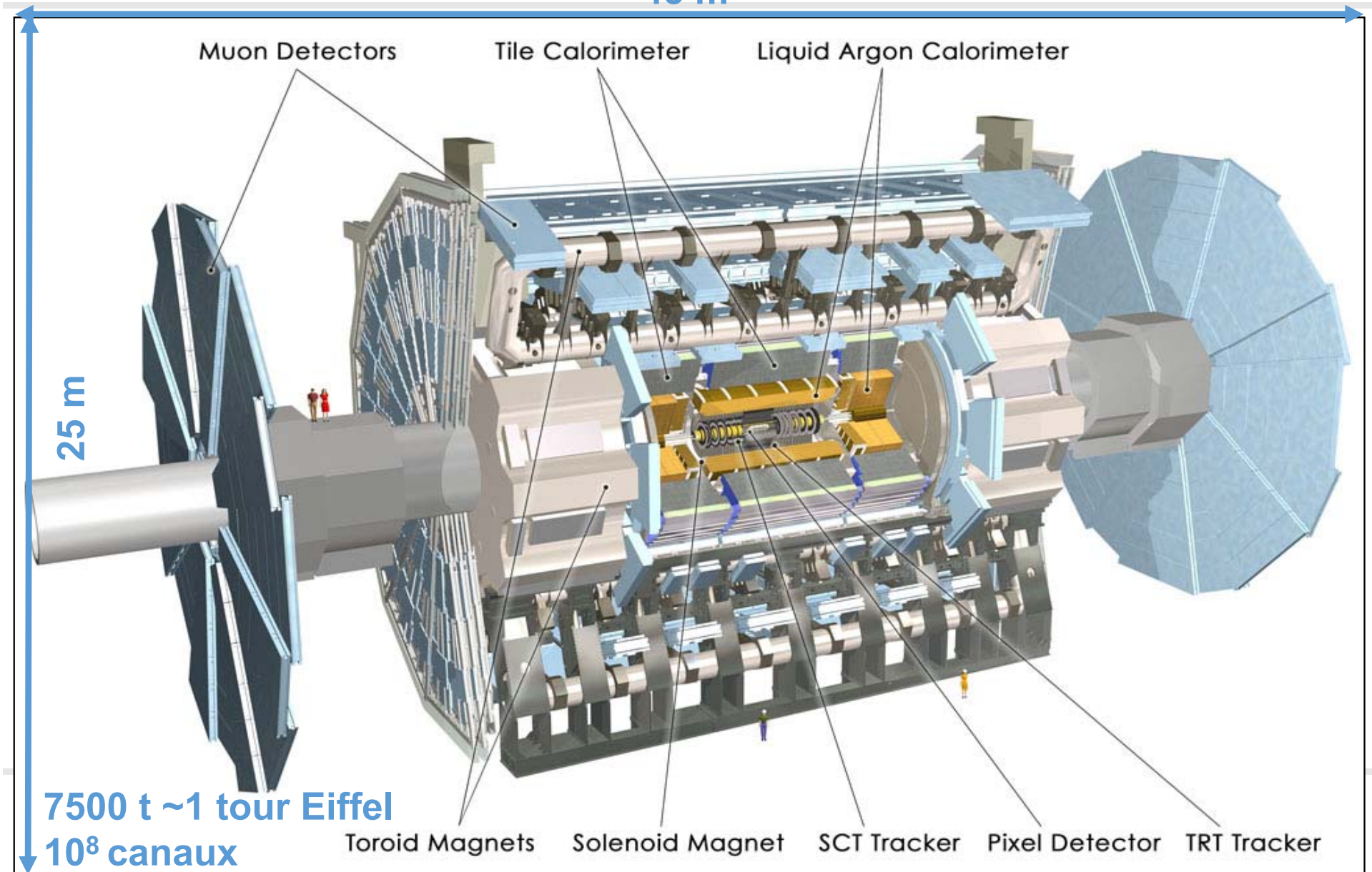
A  $r=11$  cm, photons flux of 30 MRad !  
1 gray = 100 Rad  $\sim 6.24 \cdot 10^{12}$  MeV/kg energie déposée (1J/kg)

X rays and  $\gamma$  :  
1 rad = 10 mSv  
Public  $< 1$  mSv / an

Contraintes importantes sur les detector et technologies + électronique utilisables :  
vieillessement dans les detectors gazeux, pollution dans détecteurs liquides, perte de lumière dans les cristaux (transparence) (scintillation/cerenkov) , déplacement d'atome les détecteurs solides

# Le détecteur ATLAS : 1990 (R&D) à 2006

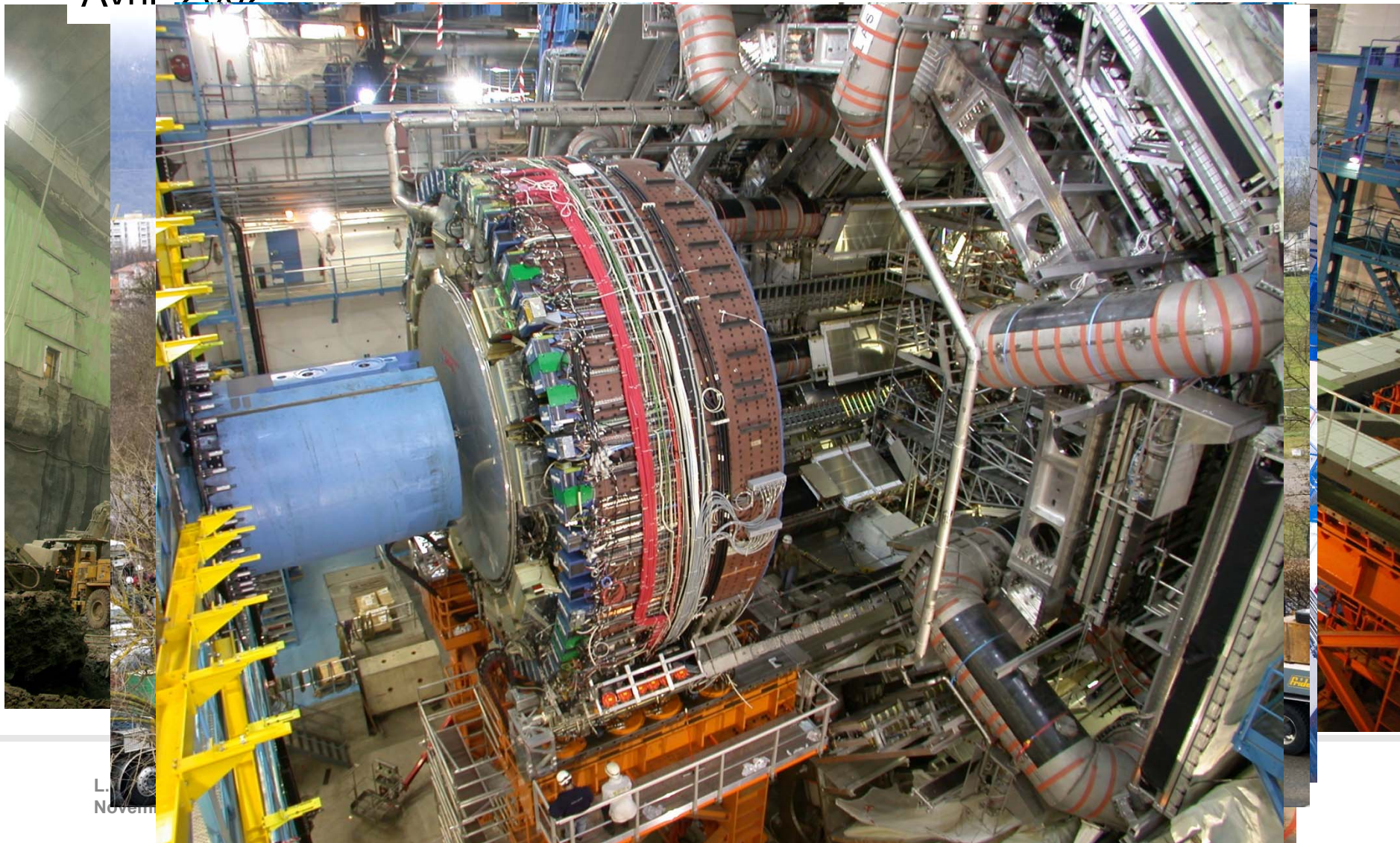
45 m



# Le détecteur ATLAS : Installation 2002 à 2006

Avril 2002

Septembre 2004





- |                |              |
|----------------|--------------|
| Argentina      | Morocco      |
| Armenia        | Netherlands  |
| Australia      | Norway       |
| Austria        | Poland       |
| Azerbaijan     | Portugal     |
| Belarus        | Romania      |
| Brazil         | Russia       |
| Canada         | Serbia       |
| Chile          | Slovakia     |
| China          | Slovenia     |
| Colombia       | South Africa |
| Czech Republic | Spain        |
| Denmark        | Sweden       |
| France         | Switzerland  |
| Georgia        | Taiwan       |
| Germany        | Turkey       |
| Greece         | UK           |
| Israel         | USA          |
| Italy          | CERN         |
| Japan          | JINR         |

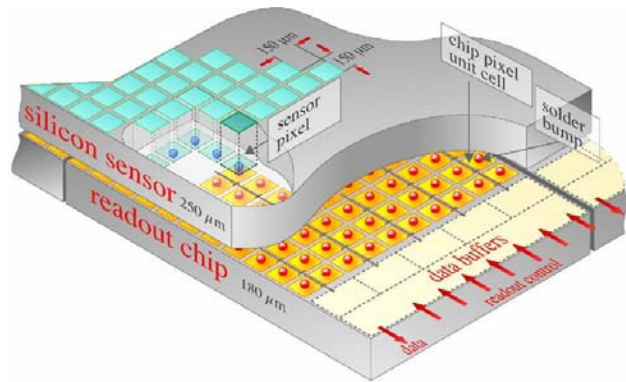
**178 laboratoires dans 38 pays**  
**2900 participants**  
**~1000 étudiants en thèses**

# ATLA Collaboration

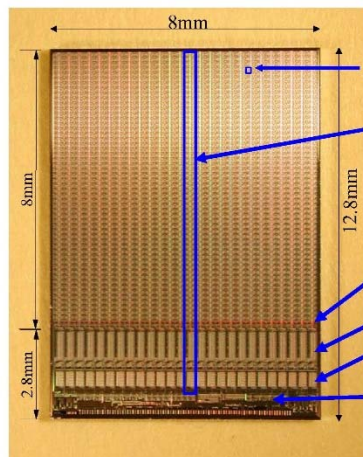


# Détecteurs de trace (solides)

Détecteur à pixels  
(~un appareil photo)



→ « strips » à plus grand rayon



## PSI43

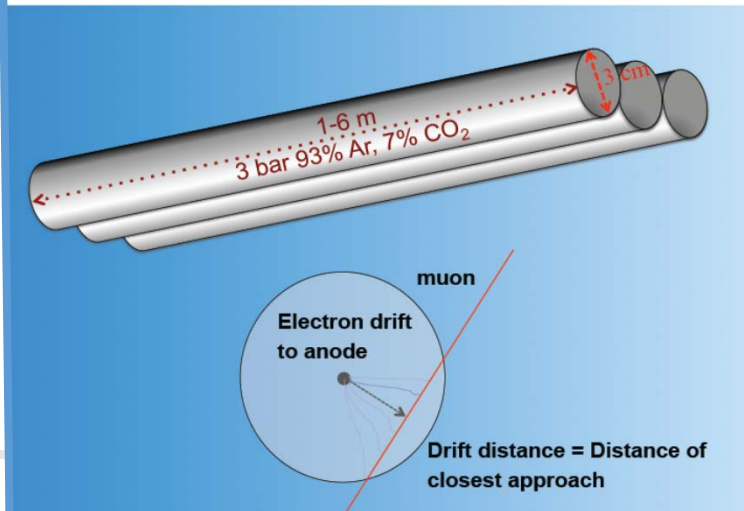
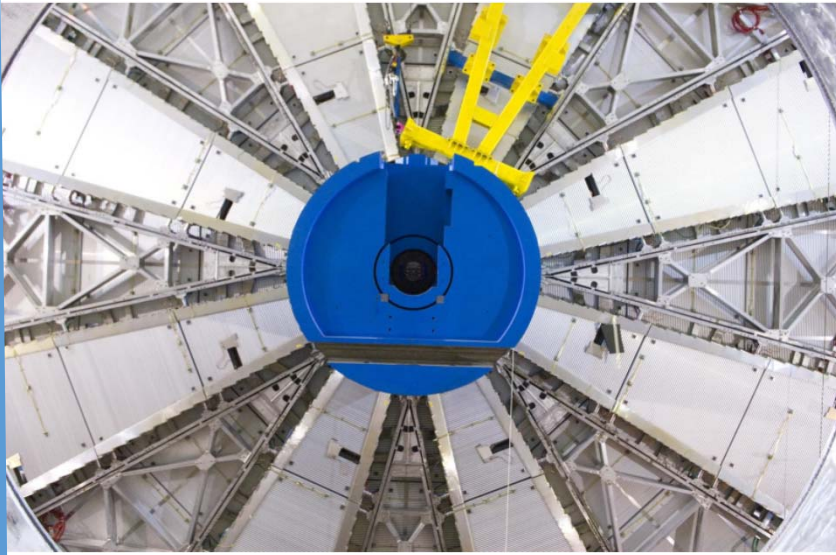
- 150 μm x 150 μm pixel
- 52x53 pixels in 26 double columns
- 345 k transistors
- Periphery: 78 k transistors
- Pixel-column interface
- Data buffers (4x24 capacitors)
- Timestamp buffers (8x8 bits)
- I2C, DACs, regulators, counters, readout, wirebonds
- 6 k transistors

## CMS tracker

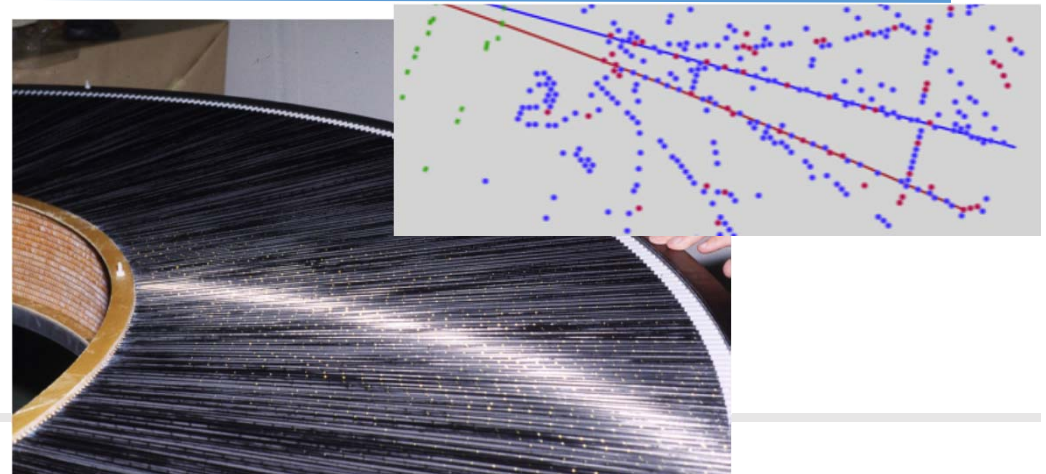
- full silicon tracker
- 210 m<sup>2</sup> of silicon
- 10.7 M channels



# Détecteurs de trace (gazeux) : grands R + $\mu$



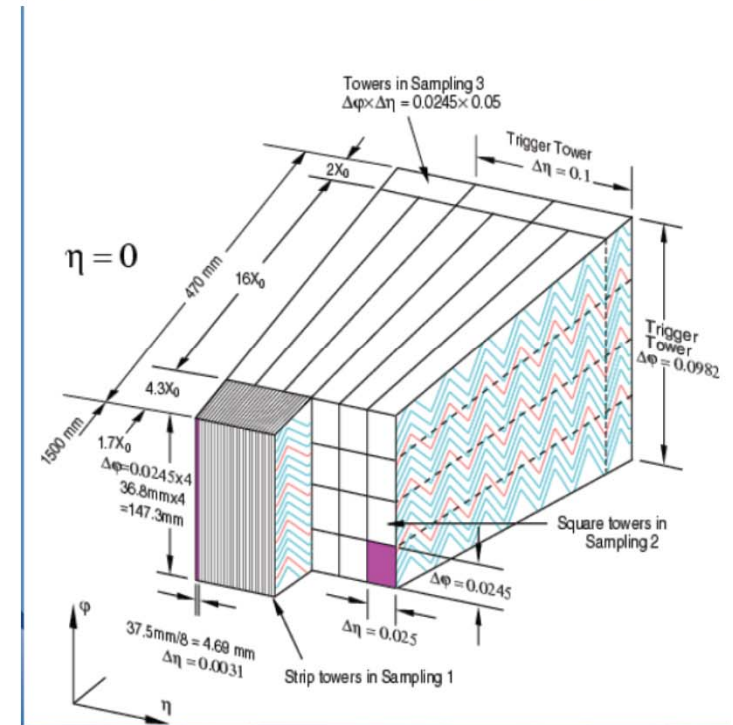
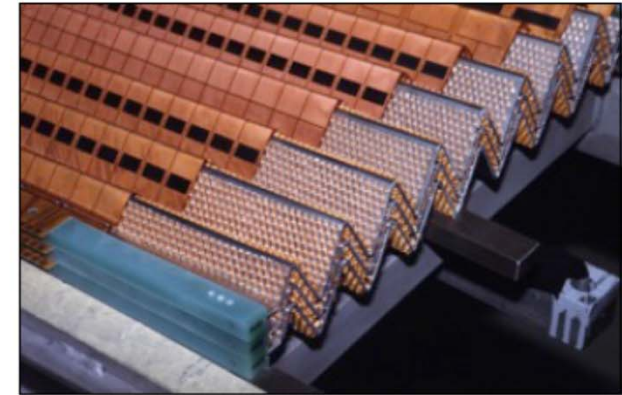
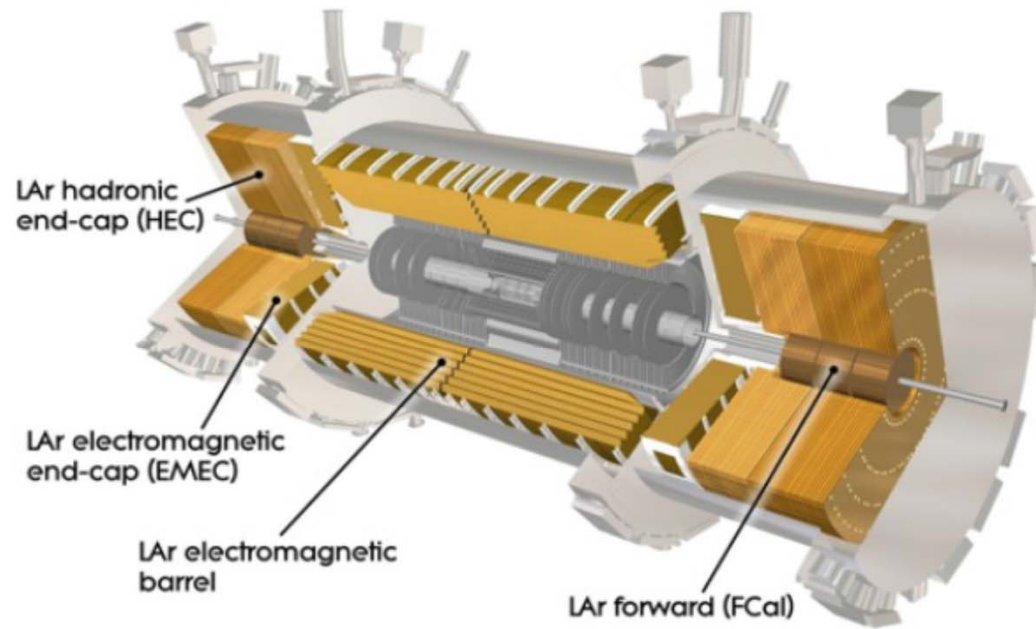
**ATLAS : spectromètre  $\mu$**



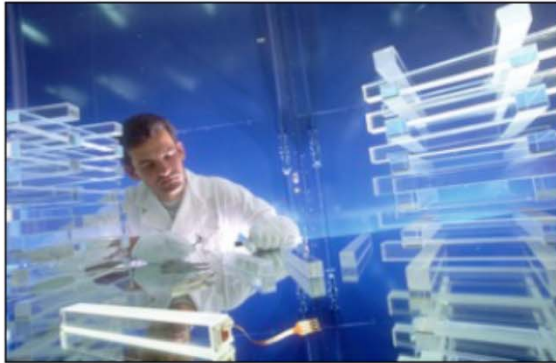
**ATLAS : TRT (R~1m)**

# Calorimètres

Example:  
ATLAS Liquid Argon Calorimeter

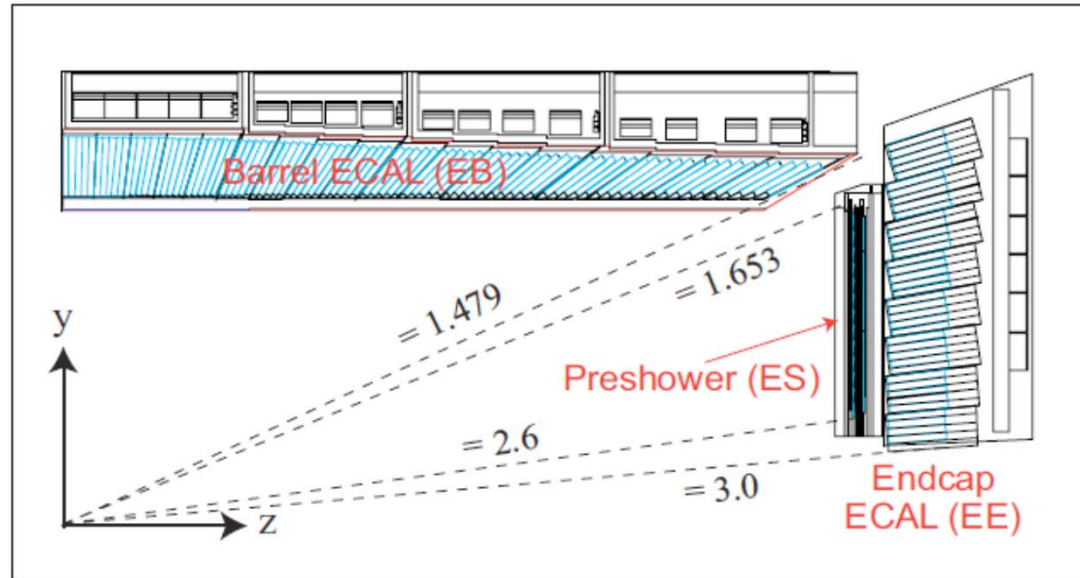
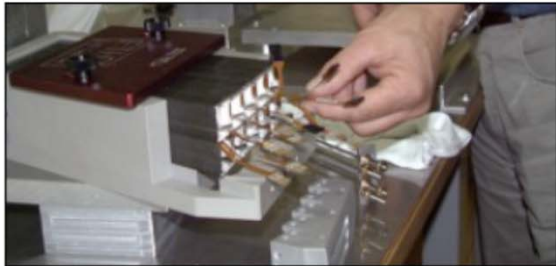


# Calorimètres



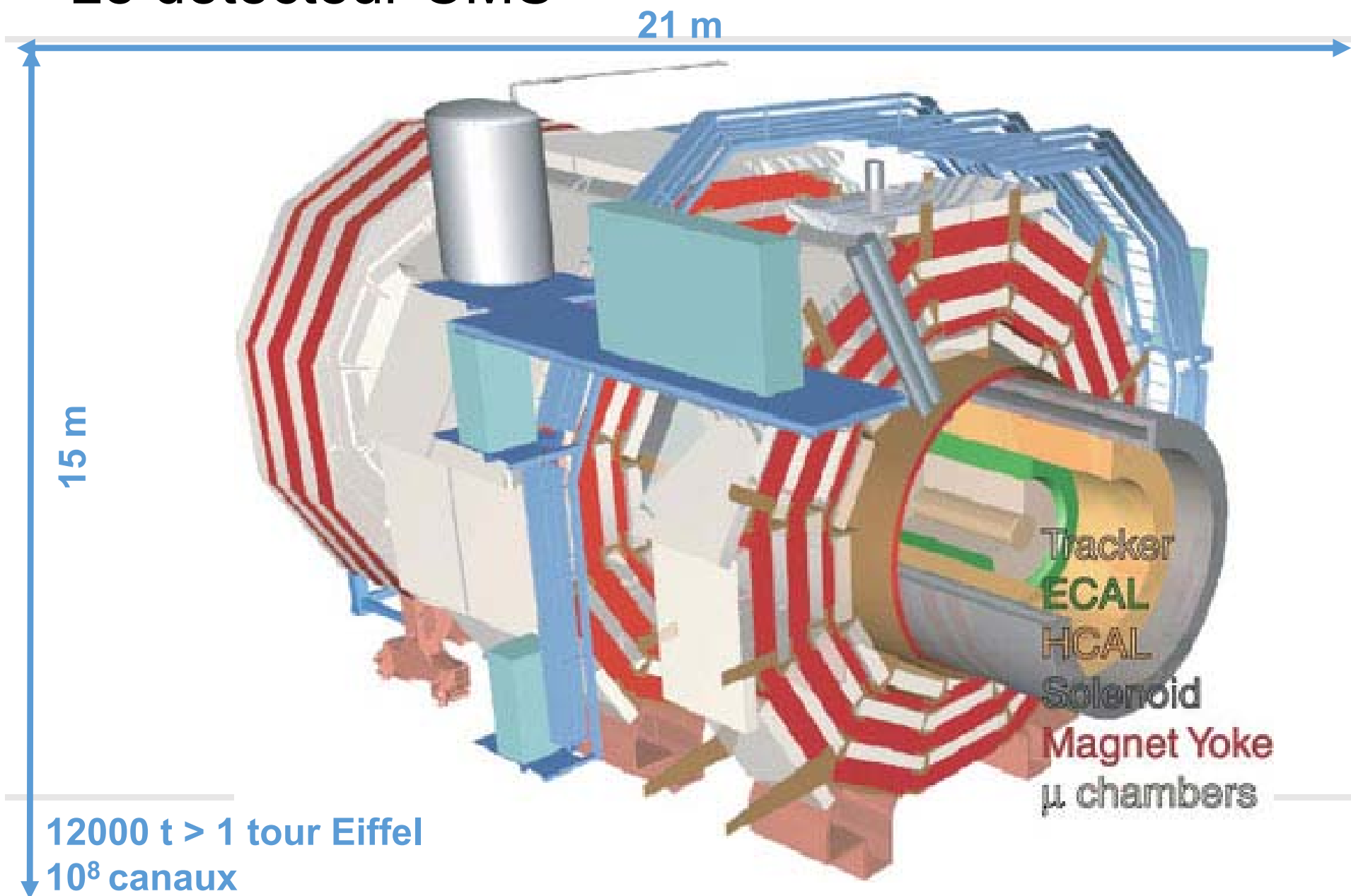
Scintillator :  $\text{PbWO}_4$  [Lead Tungsten]  
Photosensor : APDs [Avalanche Photodiodes]

Number of crystals:  $\sim 70000$   
Light output: 4.5 photons/MeV

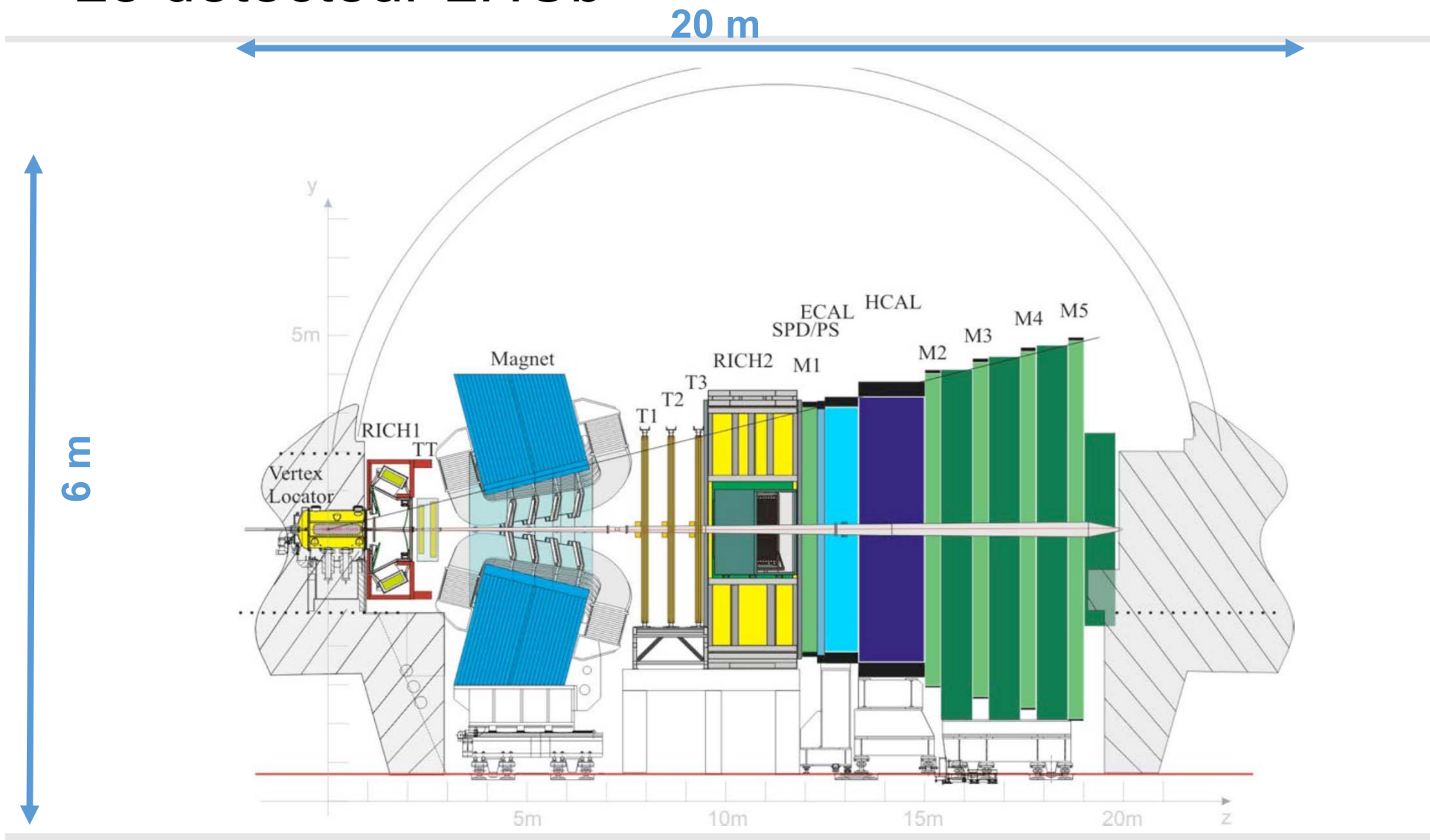


Densité :  $8.3 \text{ g/cm}^3$  (Pb  $11 \text{ g/cm}^3$ ). Cristal développé pour CMS calo

# Le détecteur CMS

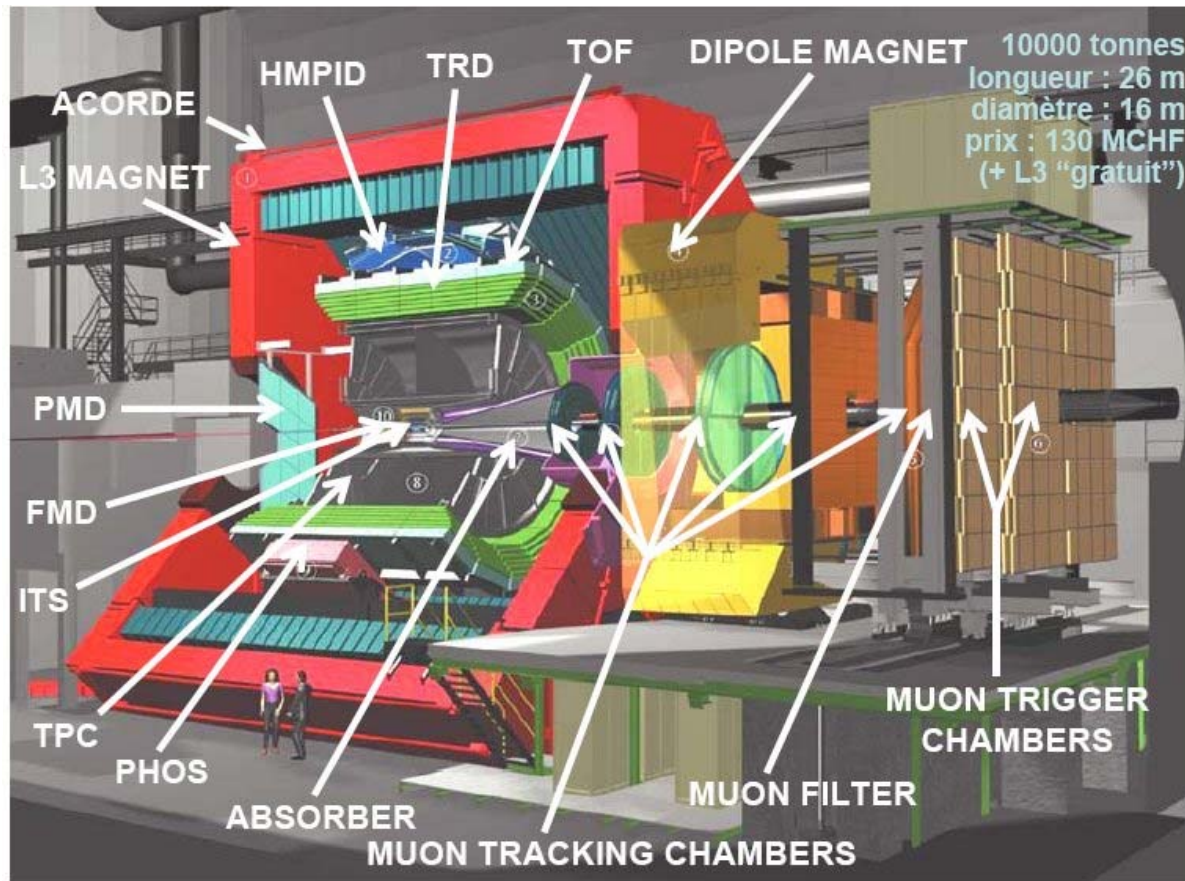


# Le détecteur LHCb



# ALICE

RICH TRD detector TOF  $\mu$  spectrometer



TPC :  $dE/dx$

EM calo (PHOS  
EMcal)