

Détecter les particules : exemple d'ATLAS

Masterclasses 2015

N. Arnaud, N. Lorenzo-Martinez, N. Makovec, E. Scifo
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

RAPPEL : LE MODÈLE STANDARD

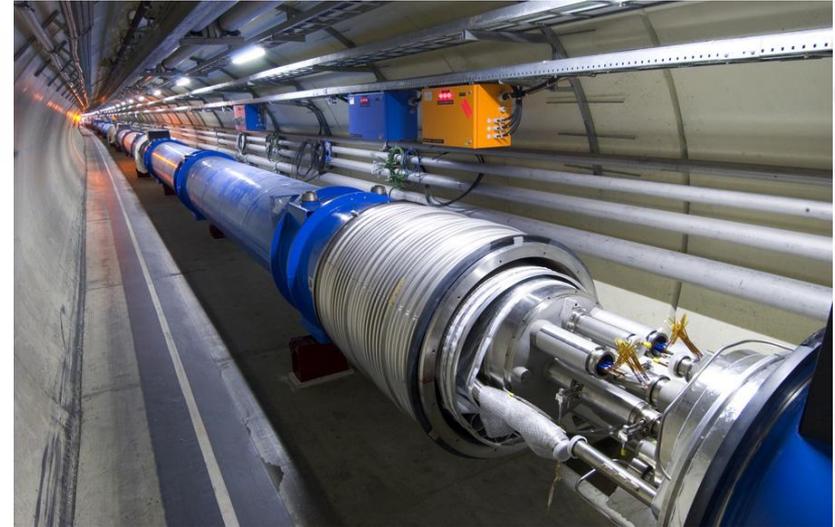
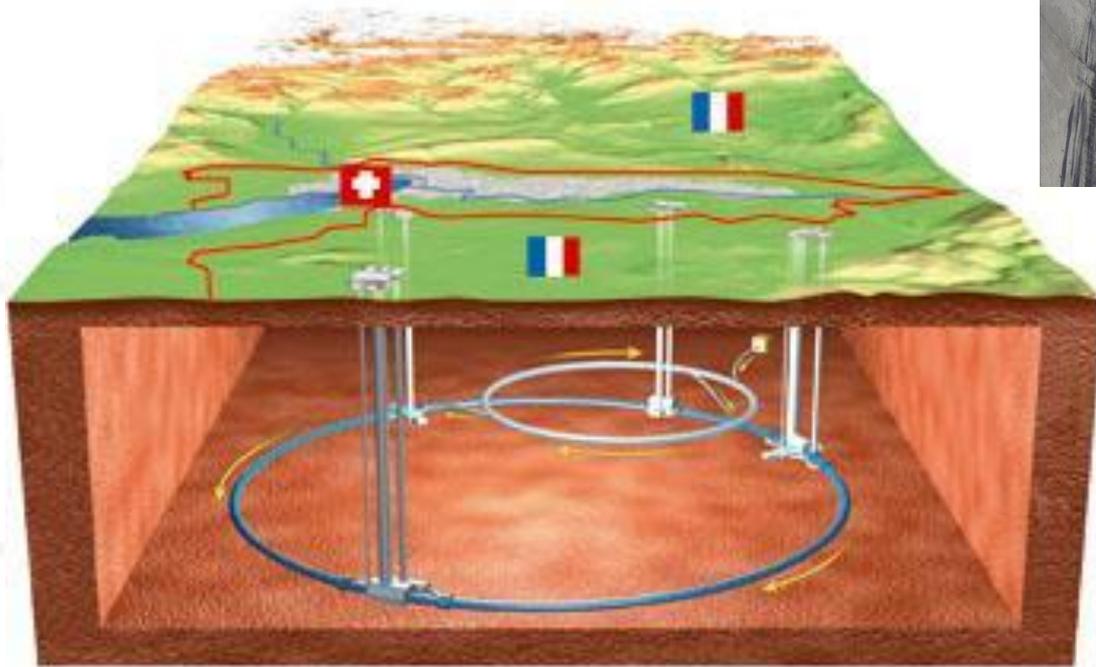
	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille
Leptons	Neutrino électronique (0)	Neutrino Muonique (0)	Neutrino Tauique (0)
	Électron (-1)	Muon (-1)	Tau (-1)
Quarks	Up (+2/3)	Charm (+2/3)	Top (+2/3)
	Down (-1/3)	Strange (-1/3)	Bottom (-1/3)

Forte : entre les constituants du noyau	Gluons (8)
Électromagnétique : entre les particules chargées	Photon
Faible : radioactivité	W, Z
Gravitation	Graviton ?

Plus : le **boson de Higgs**

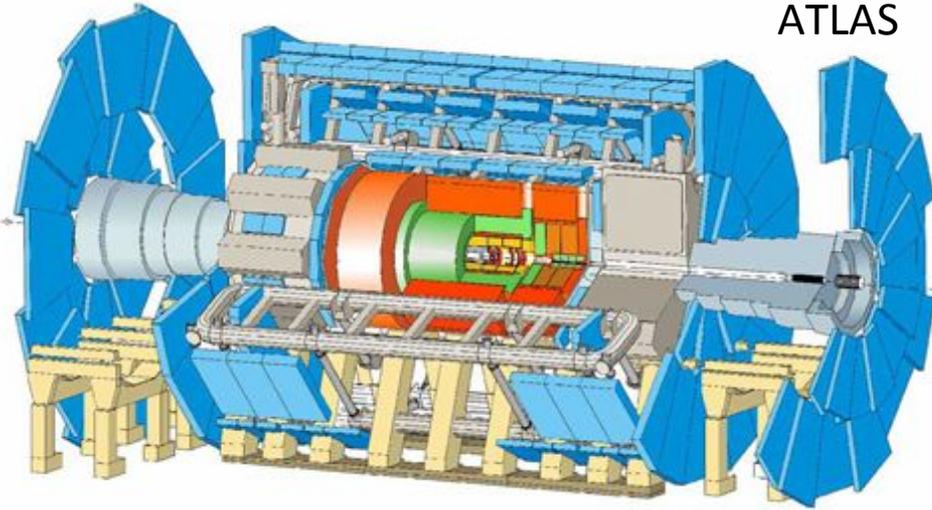
RAPPEL :

ACCÉLÉRATEUR : LE LHC

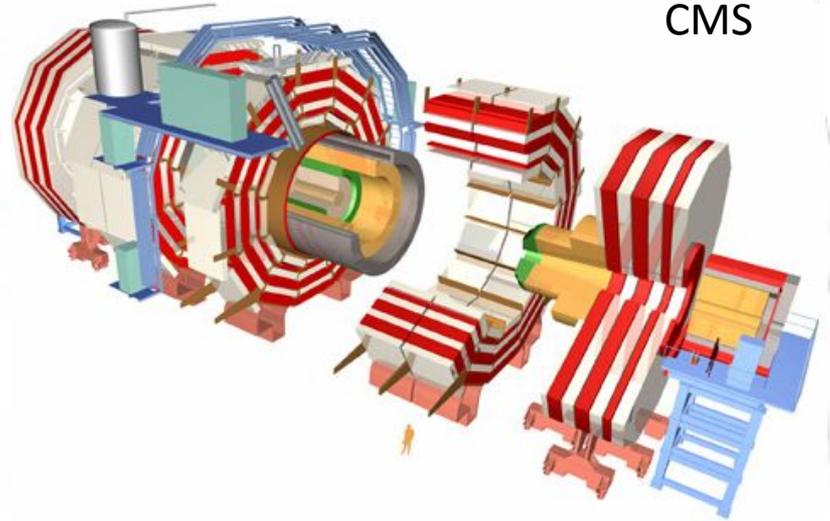


DÉTECTEURS

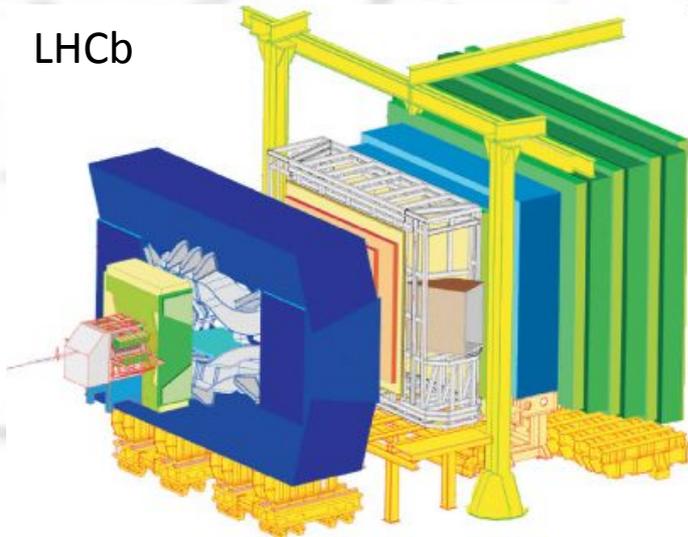
ATLAS



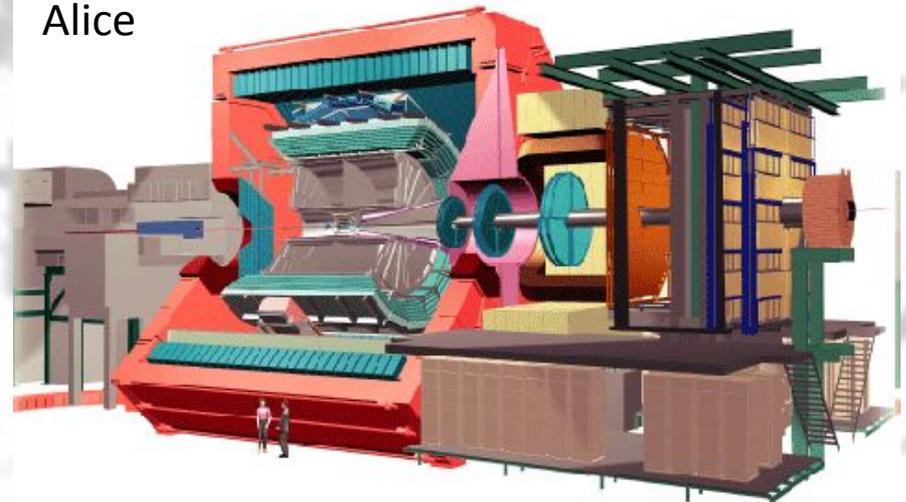
CMS



LHCb



Alice

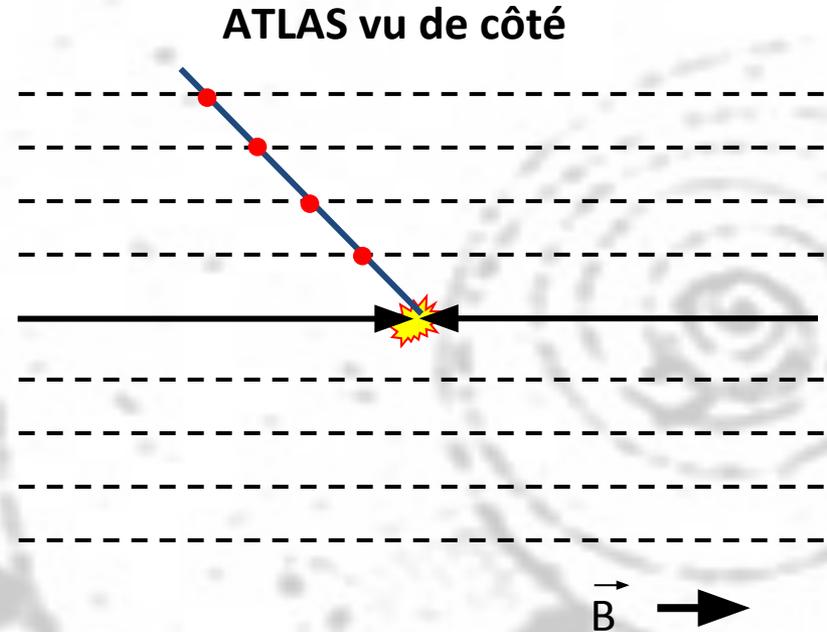
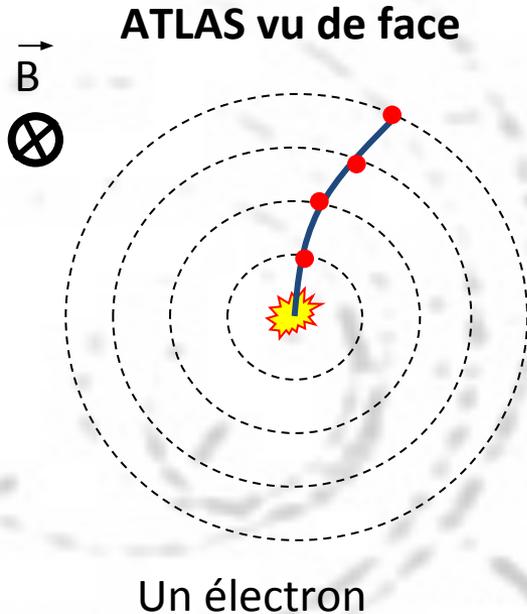


COMMENT CONSTRUIRE UN DÉTECTEUR

- Qu'est-ce qu'on veut mesurer ?
 - Toutes les particules créées
 - Trajectoire
 - Charge électrique
 - Vitesse
 - Énergie
 - Nature (électron, muon, photon ?)
- Principes de base :
 - Détecteur sans "trou" : forme cylindrique

1) MESURE DES TRAJECTOIRES ET CHARGES :

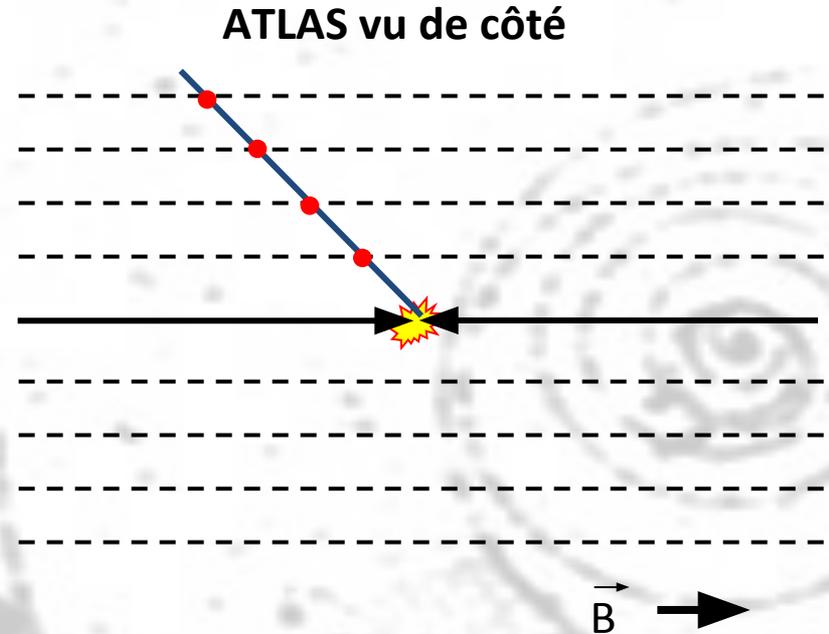
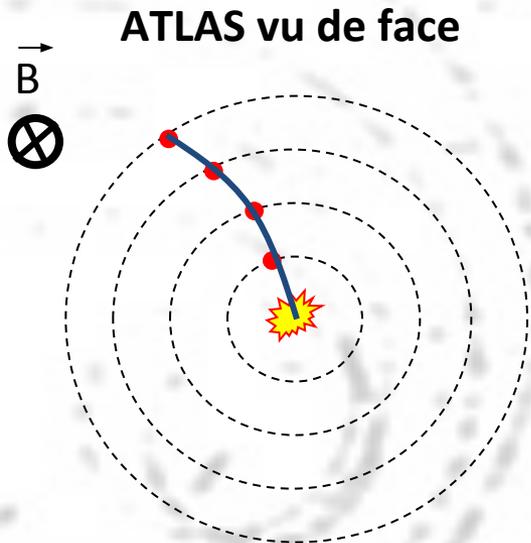
LE TRAJECTOGRAPHE



- Plusieurs "couches" permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l'aide d'un **champ magnétique** :
 - En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
 - Rayon de courbure $R=mv/qB$



LE TRAJECTOGRAPHE

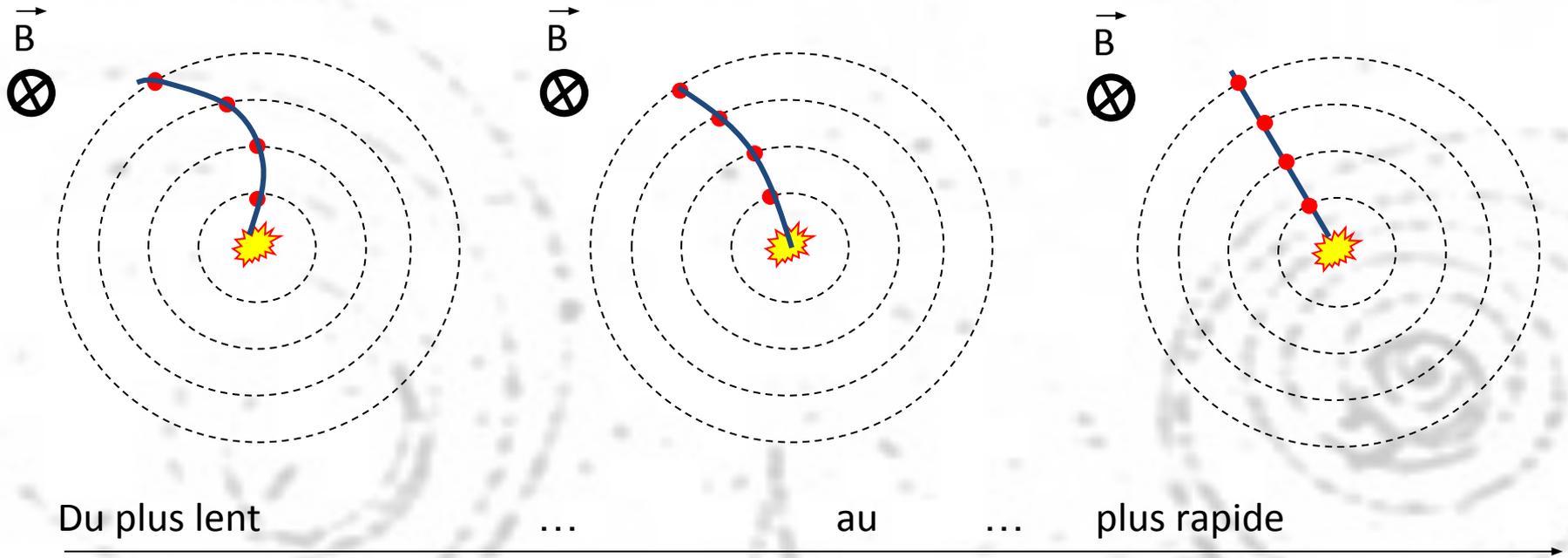


Un anti-électron=positron

- Plusieurs "couches" permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l'aide d'un **champ magnétique** :
 - En effet les particules chargées, lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
 - Rayon de courbure $R=mv/qB$



LE TRAJECTOGRAPHE

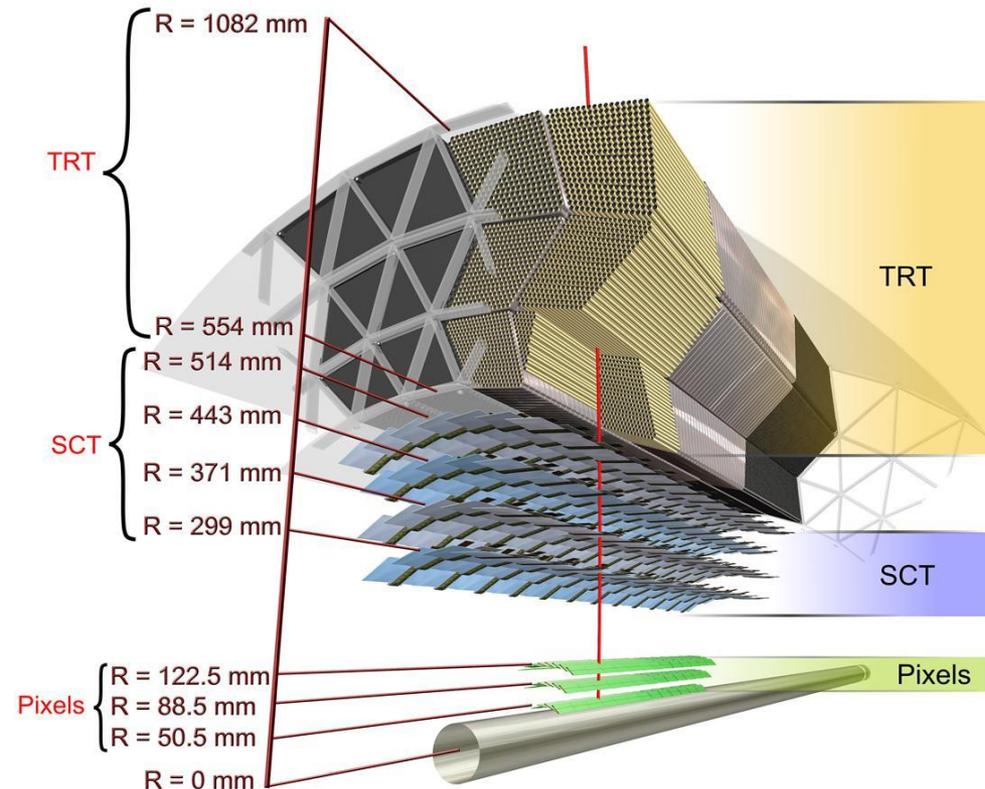


- Plusieurs “couches” permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l’aide d’un **champ magnétique** :
 - En effet les particules chargées, lorsqu’elles sont soumises à l’action d’un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de la direction du champ. *Le sens de rotation donne le signe de la charge.*
 - Rayon de courbure $R=mv/qB$



LES TRAJECTOGRAPHES D'ATLAS

Dans ATLAS détecteur de traces est divisé en trois parties



- Détecteurs pixel : constitués de **140 millions** de pixels carrés de **silicium** de **50 à 300 μm** de côté. Placé très près du faisceau pour minimiser sa taille (son coût est très élevé).

- Détecteur à bandes SCT (SemiConducteur Tracker) : il s'agit maintenant de **5 millions** de bandes de **80 μm** de largeur et de quelques centimètres de longueur disposées en cylindre.

Moins précis que pixels.

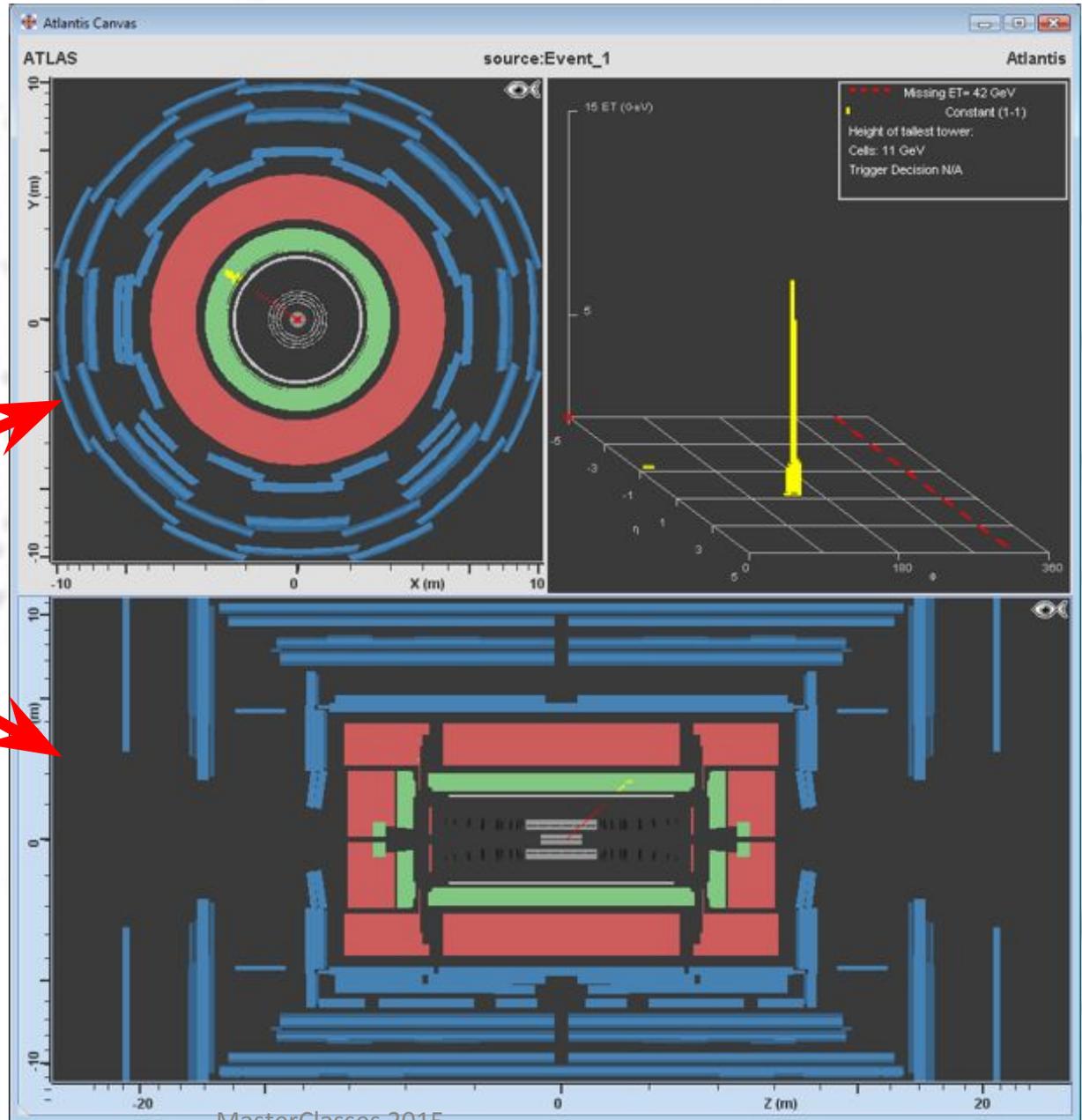
- Détecteur de radiation de transition (TRT - Transition Radiation Tracker) : composé de **400 000 tubes** de **4mm de diamètre** et de **1,44m de long**. Dans chacun de ces tubes est inséré un fil métallique. Une différence de potentiel est appliquée entre le fil et le tube, ce qui permet la génération d'un signal lors du passage d'une particule chargée.

COMMENT VOIT-ON LES TRACES DANS ATLAS ?

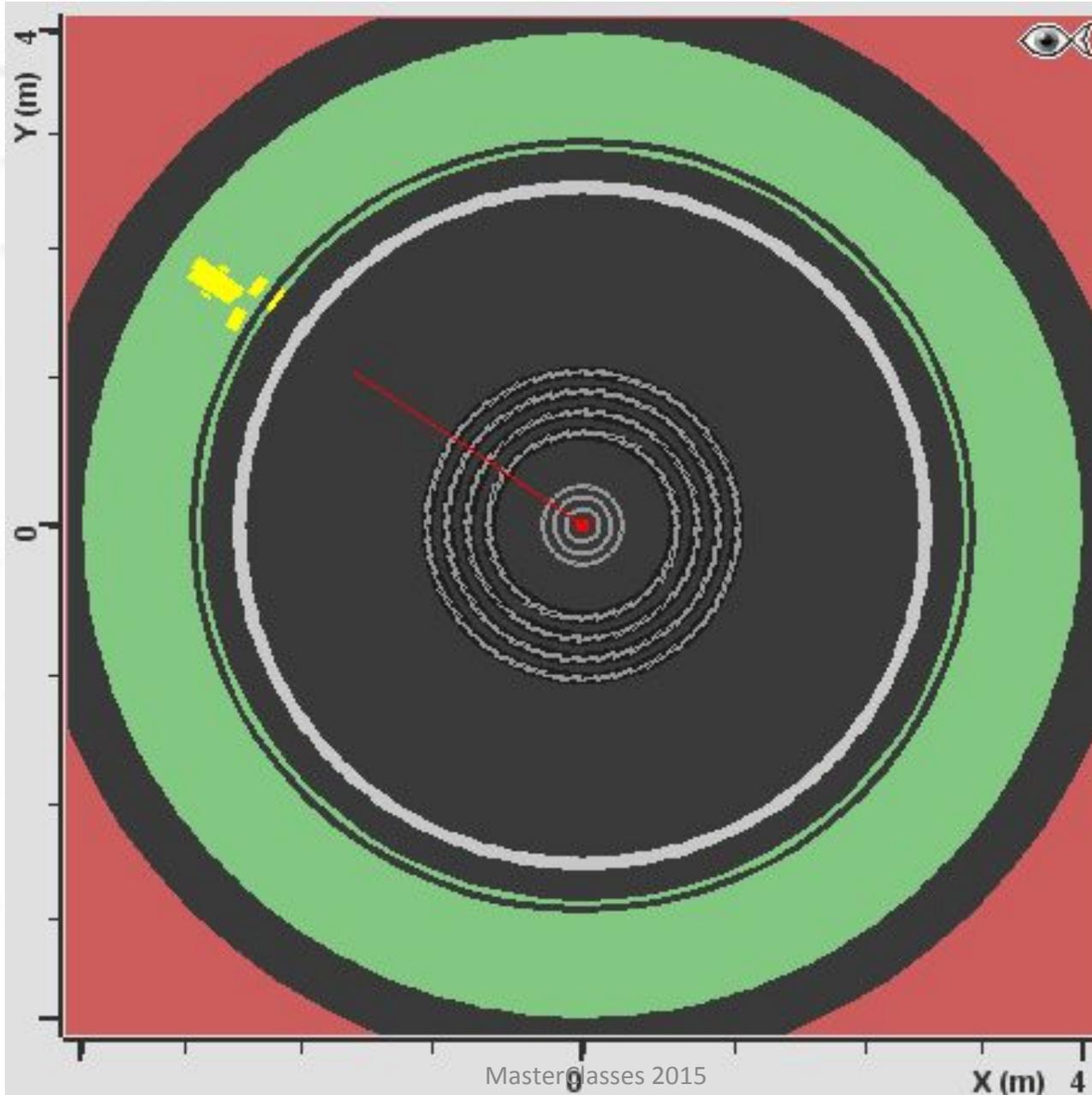
- Ce que vous allez voir sur vos écrans dans ce TP :

- Vue de face

- Vue de côté



COMMENT VOIT-ON LES TRACES DANS ATLAS ?



Structure d'un détecteur

- Structure en poupée russe
- Chaque couche a une fonction précise

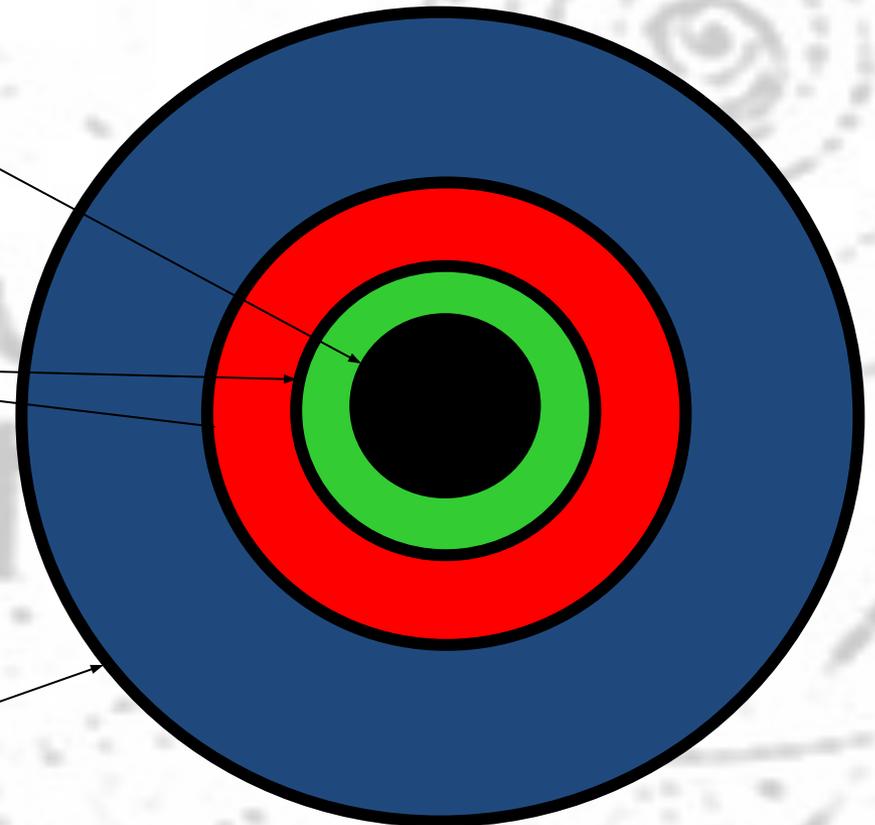
- Trajectographes

- Suivent les particules chargées

- Calorimètre(s)

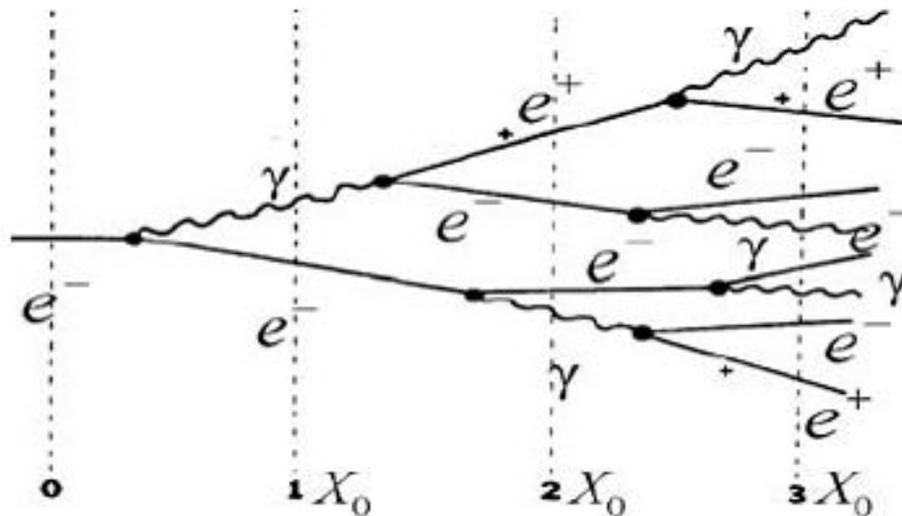
- Mesurent les énergies des particules (sauf muons et neutrinos)

- Détecteurs de muons



2) MESURE DE L'ÉNERGIE : CALORIMÈTRES

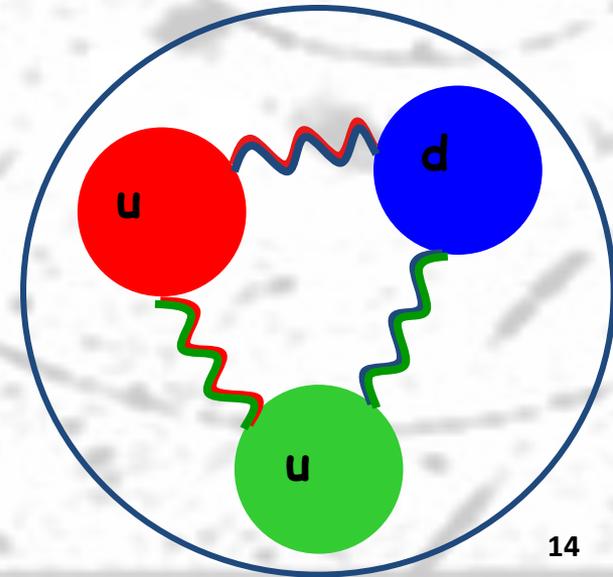
- Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière par
 - création de paires (conversion)
 - rayonnement (Bremstrahlung)



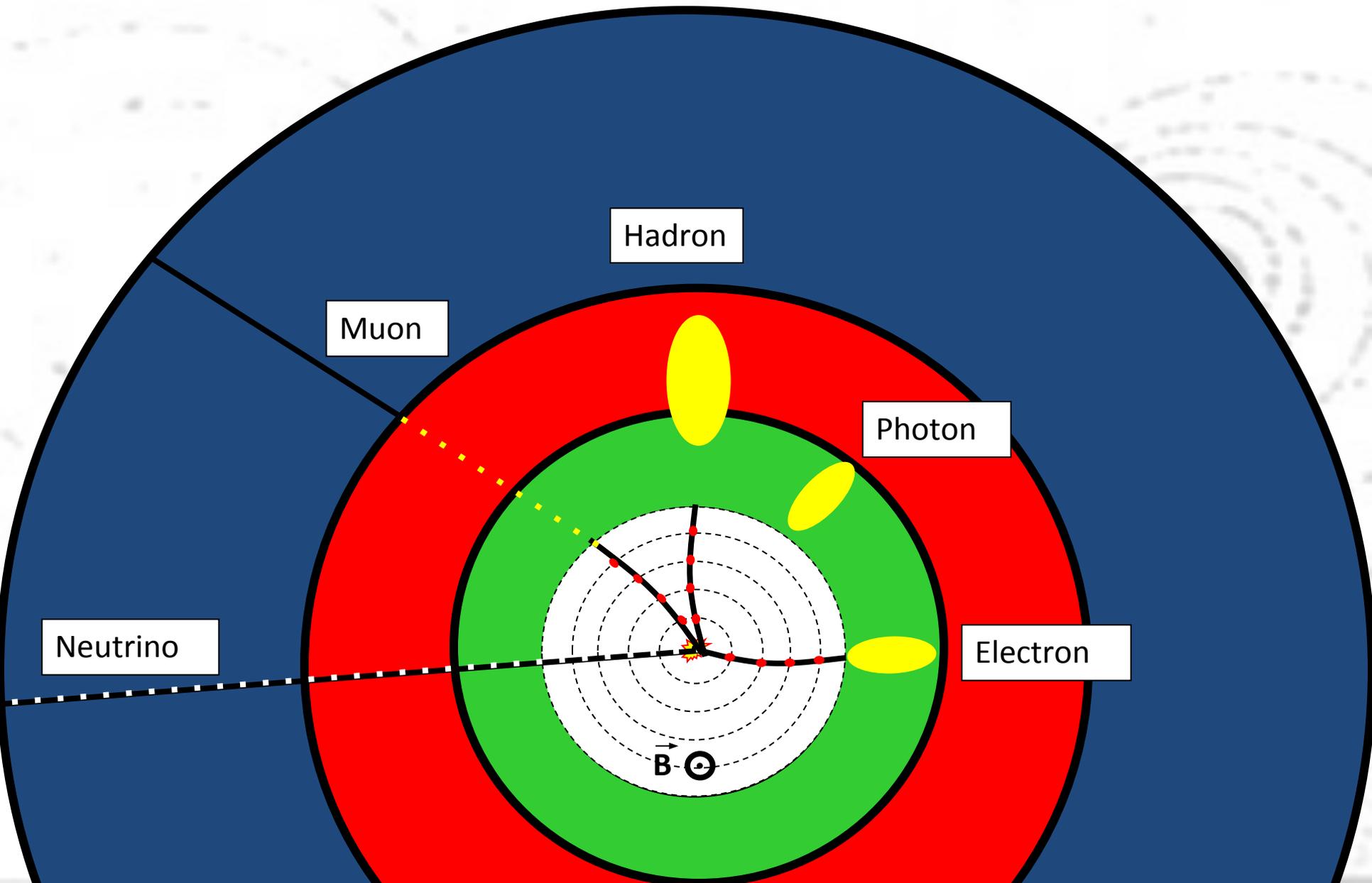
- Les particules “filles” ainsi produites vont laisser un signal dans les parties actives du calorimètre (gerbe électromagnétique)
 - par ionisation par exemple
- Nécessite la destruction de la particule initiale.

FONCTIONNEMENT D'UN CALORIMÈTRE

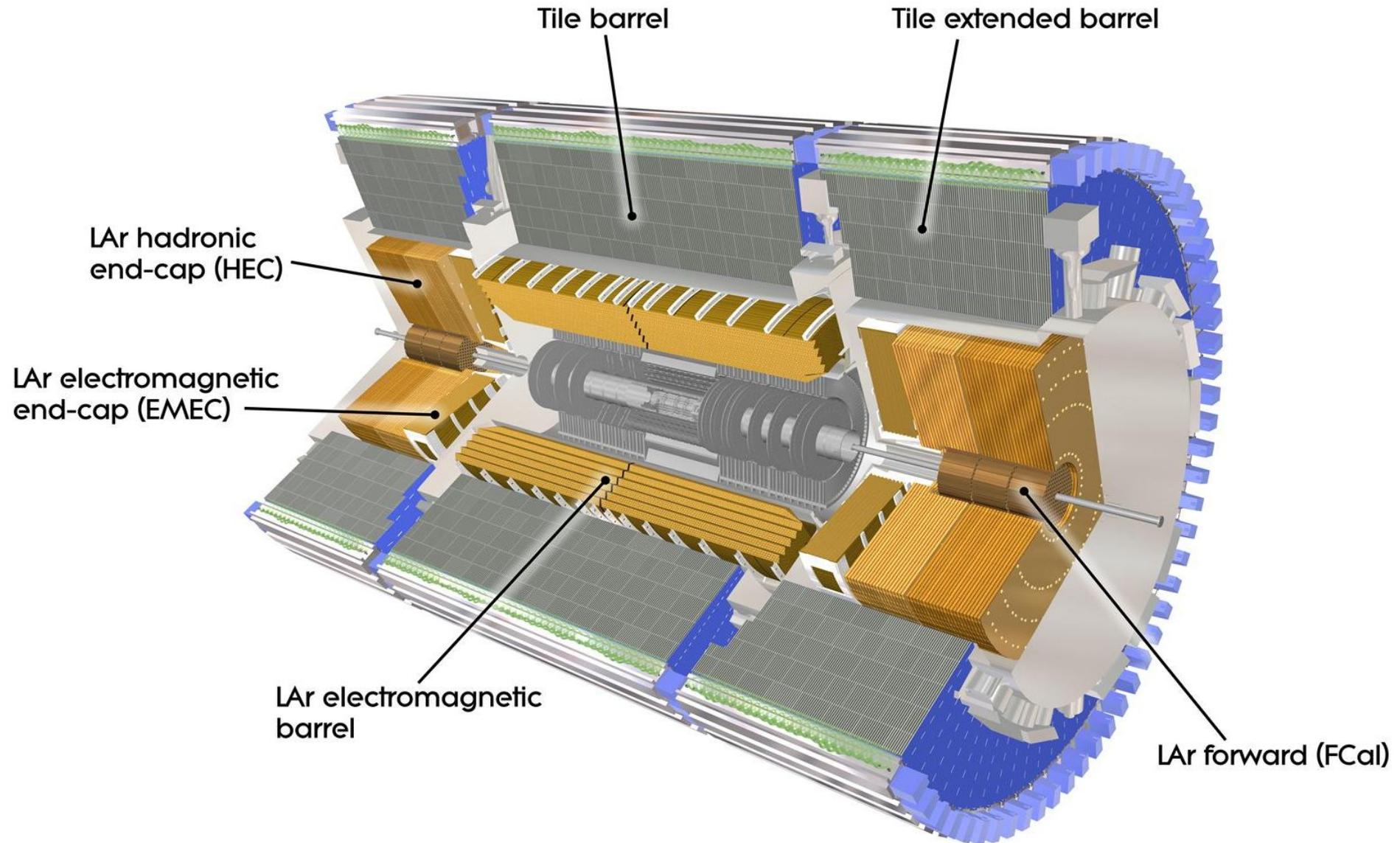
- Les particules interagissant avec les calorimètres peuvent être classées en 2 catégories :
 - Particules électromagnétiques:
 - électrons et photons
 - Ces particules interagissent beaucoup → peu de matière suffit pour les arrêter
 - Les hadrons:
 - Hadrons: particules composites formées de quarks (ex: pion, kaon, proton)
 - Ces particules interagissent moins
 - il faut plus de matière pour les arrêter



DÉTECTION DES PARTICULES

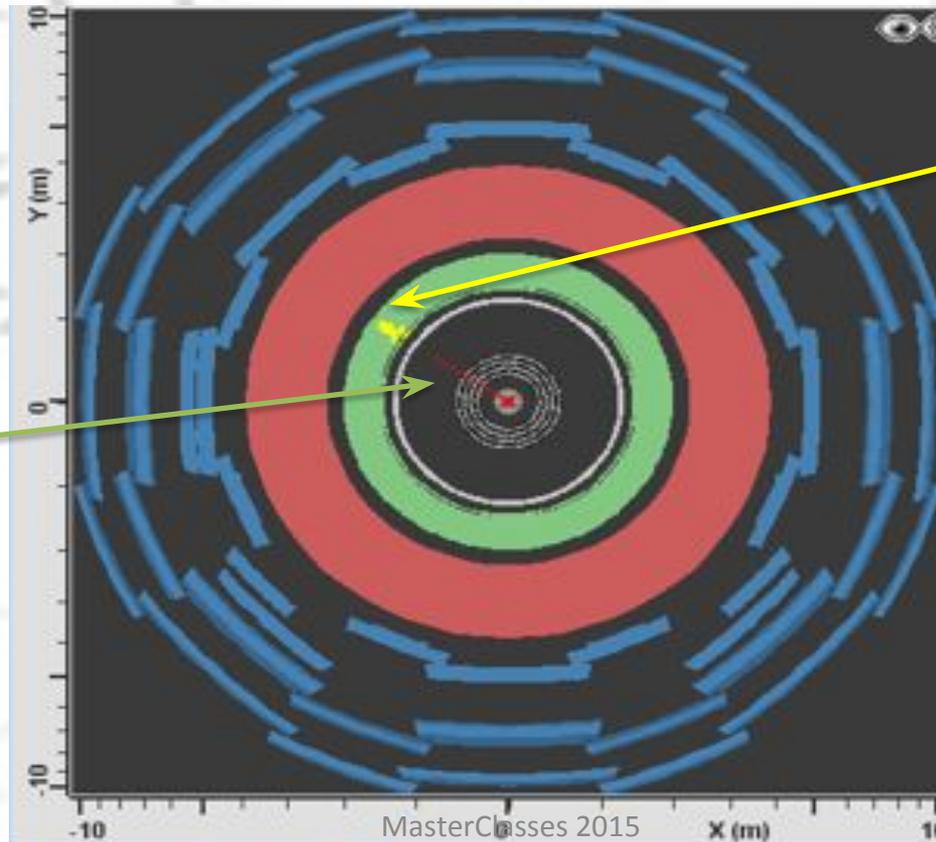


LES CALORIMÈTRES D'ATLAS



COMMENT VOIT-ON UN ÉLECTRON DANS ATLAS ?

- Électron =
 - particule chargées → visible dans le trajectographe
 - Particule électromagnétique → dépôt d'énergie dans le calorimètre électromagnétique

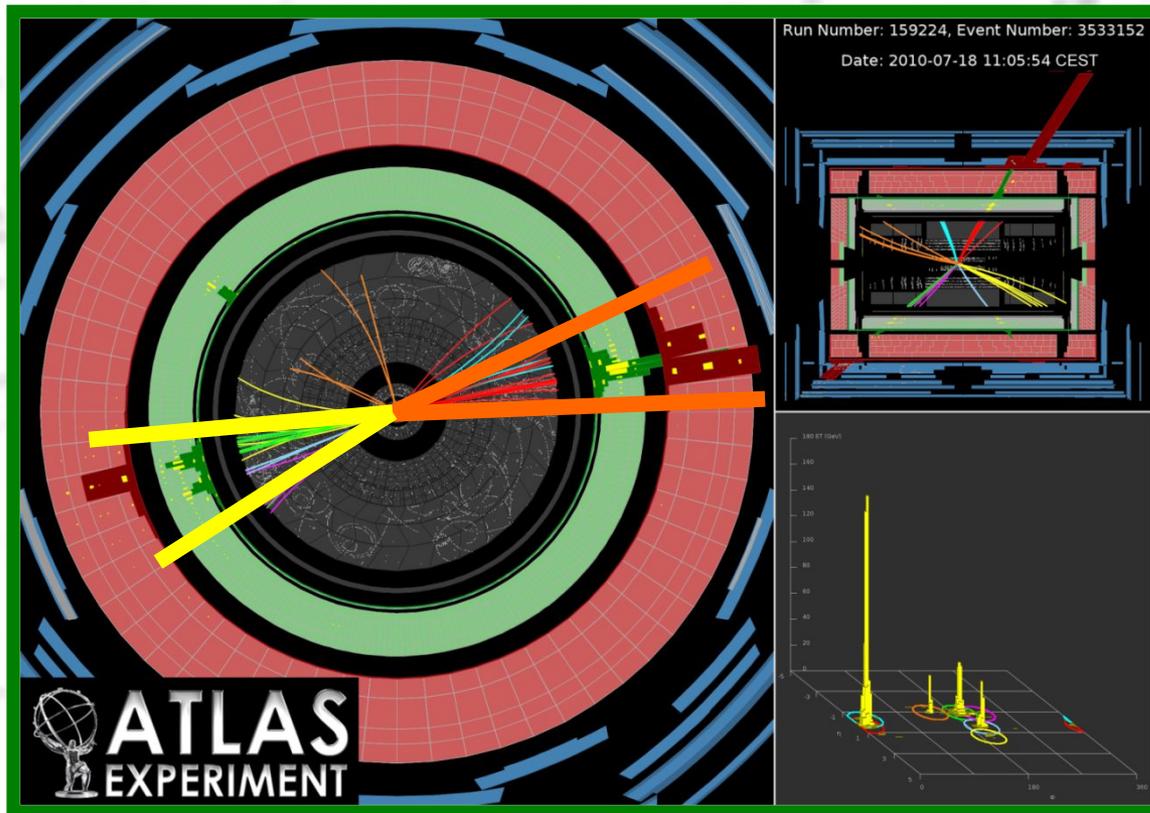


Une seule trace visible dans le détecteur aligné avec l'énergie mesurée dans le calorimètre

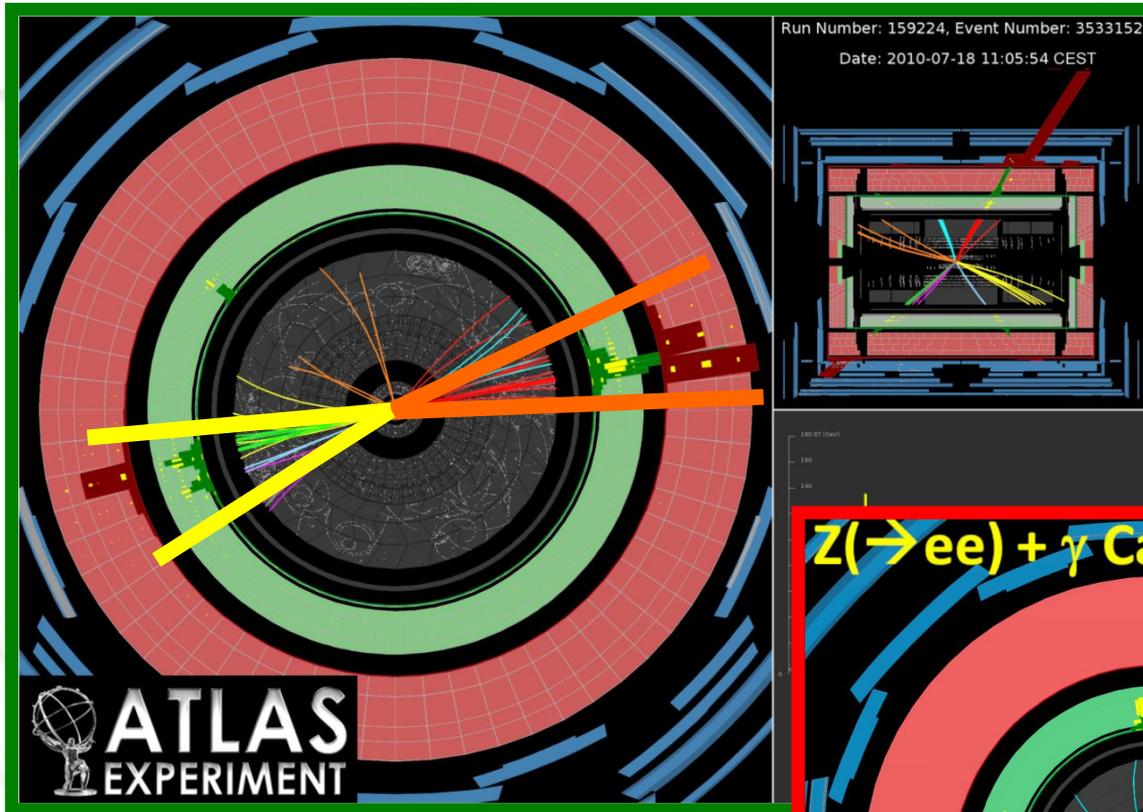
Dépôt d'énergie dans le calorimètre électromagnétique

COMMENT VOIT-ON UN QUARK DANS ATLAS ?

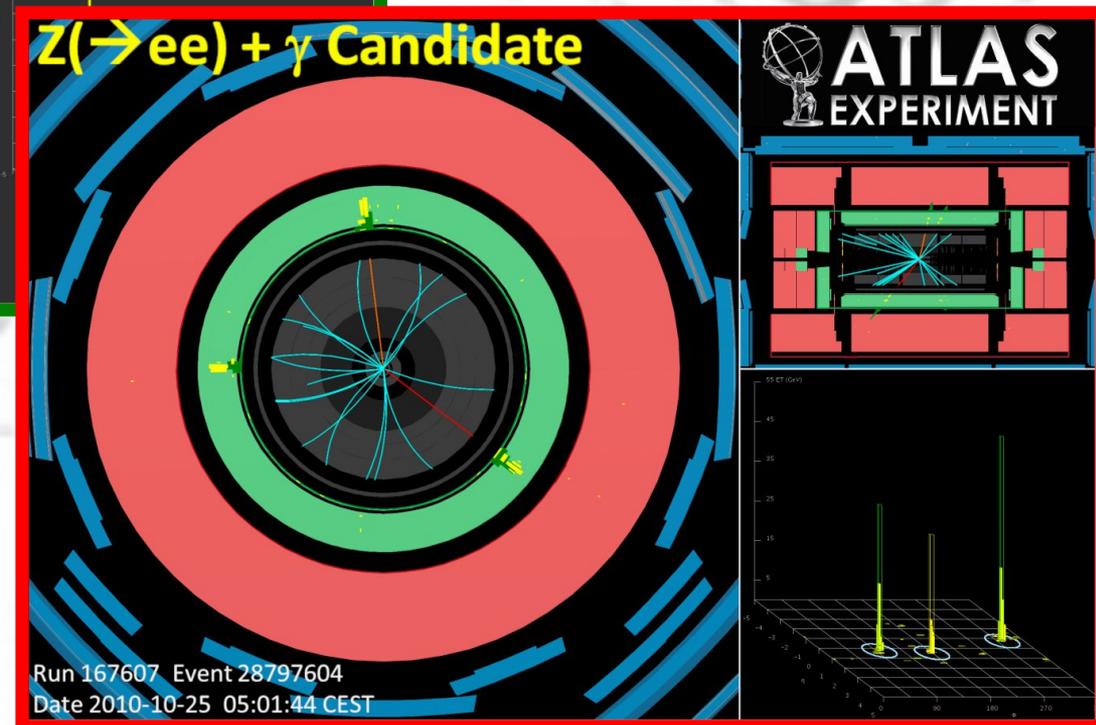
- Un quark "libre" (isolé) n'existe pas (propriété de l'interaction forte : confinement)
- Expérimentalement, on voit des **jets** = flot de particules dans la même direction :
 - Beaucoup de traces concentrées dans un cône
 - Dépôt d'énergie dans les calorimètres (électromagnétique et hadronique)



COMMENT VOIT-ON UN QUARK DANS ATLAS ?



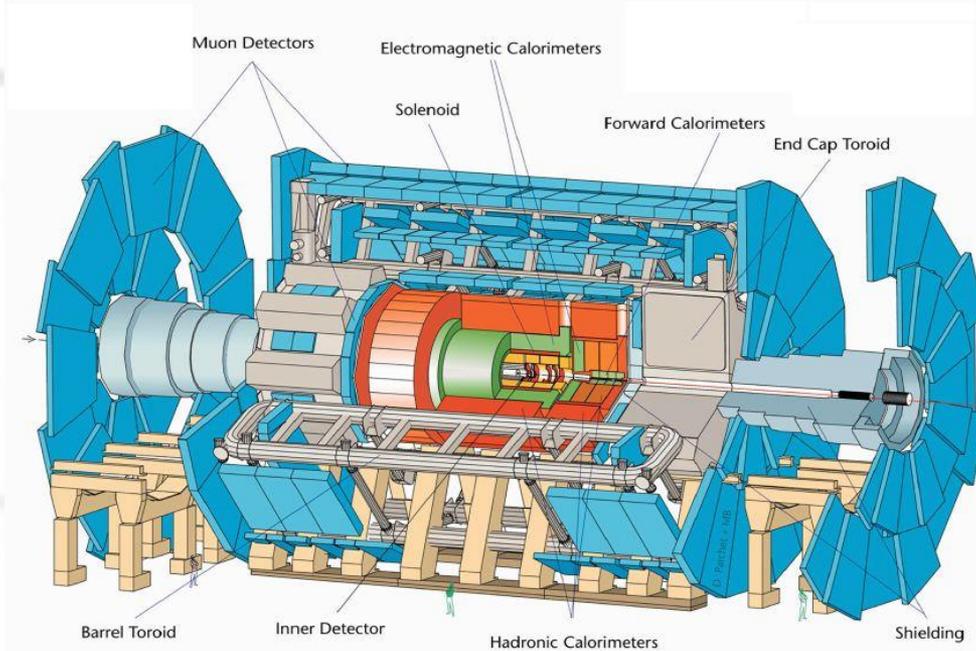
Un événement avec jets



Un événement sans jet

DÉTECTER LES MUONS

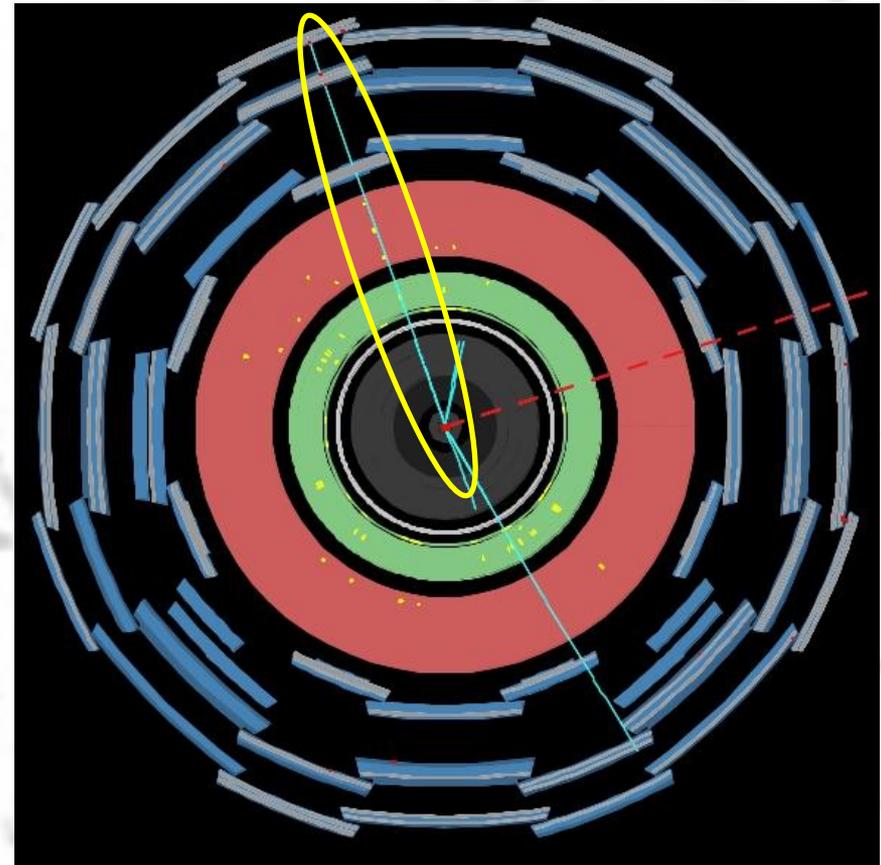
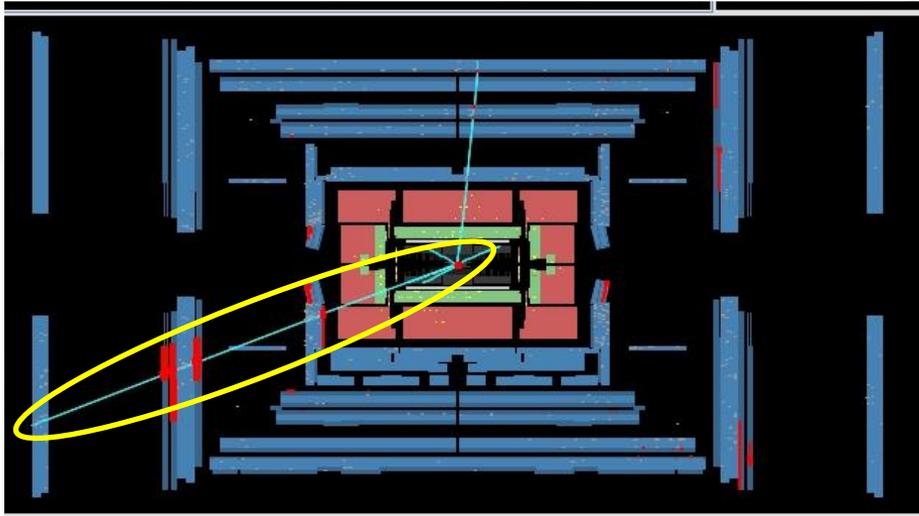
- Rappel : les muons sont des particules semblables à l'électron, en plus massifs.
- Ils sont importants car ils font souvent partie des signatures des événements intéressants.
- Ce sont des particules chargées, **on les voit dans le détecteur de traces**
- Mais **ne s'arrêtent dans aucun des deux calorimètres**
- → On construit des chambres à muons qui mesurent de façon très précise la vitesse et la trajectoire de ces particules (précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu !!) dans la **partie extérieure du détecteur**.



Système à muon en bleu

COMMENT VOIT-ON UN MUON DANS ATLAS ?

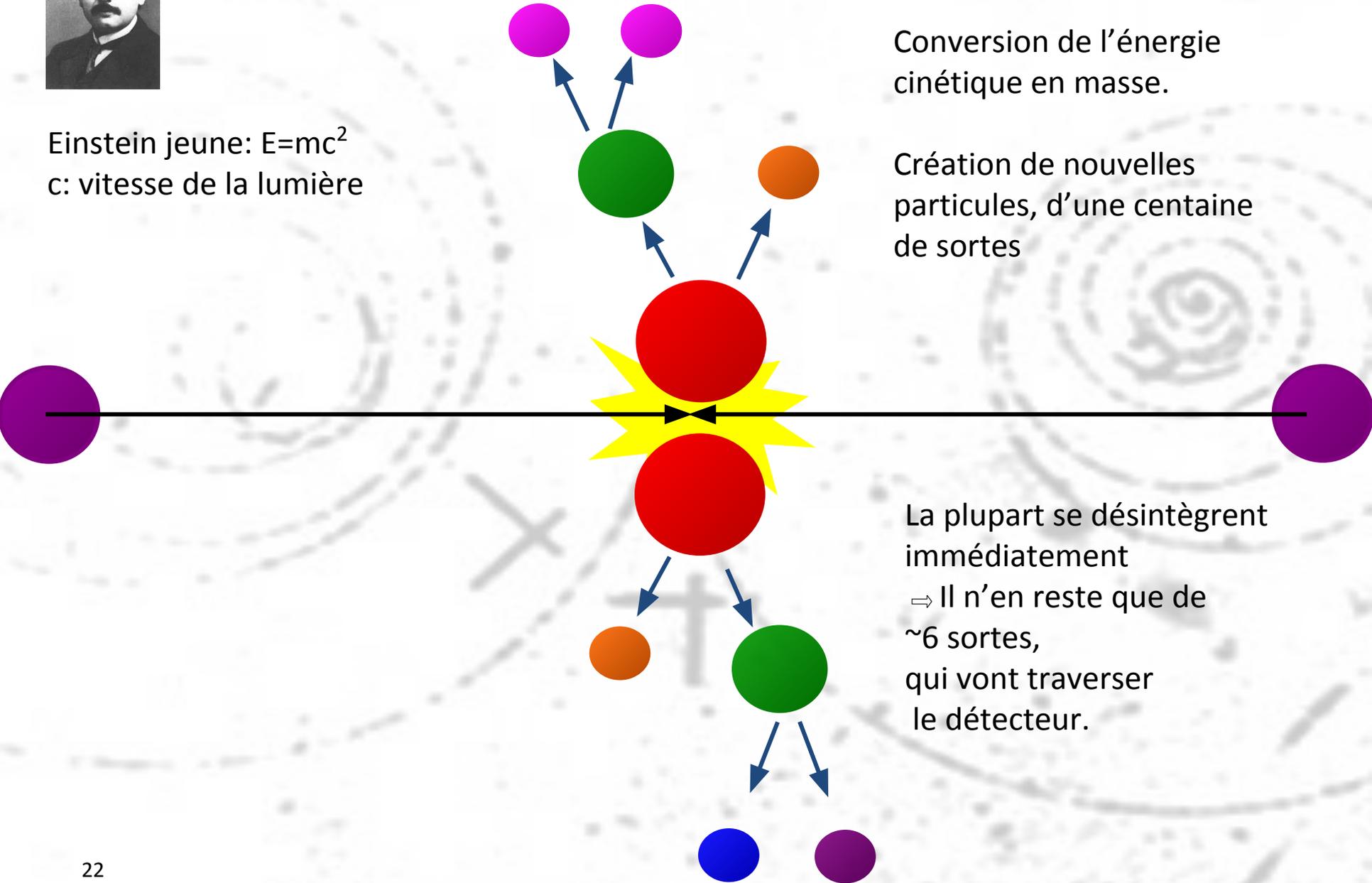
- De longues traces qui traversent tout le détecteur





COLLISION DE PROTONS

Einstein jeune: $E=mc^2$
c: vitesse de la lumière



Conversion de l'énergie cinétique en masse.

Création de nouvelles particules, d'une centaine de sortes

La plupart se désintègrent immédiatement
⇒ Il n'en reste que de
~6 sortes,
qui vont traverser le détecteur.

$$E=mc^2$$



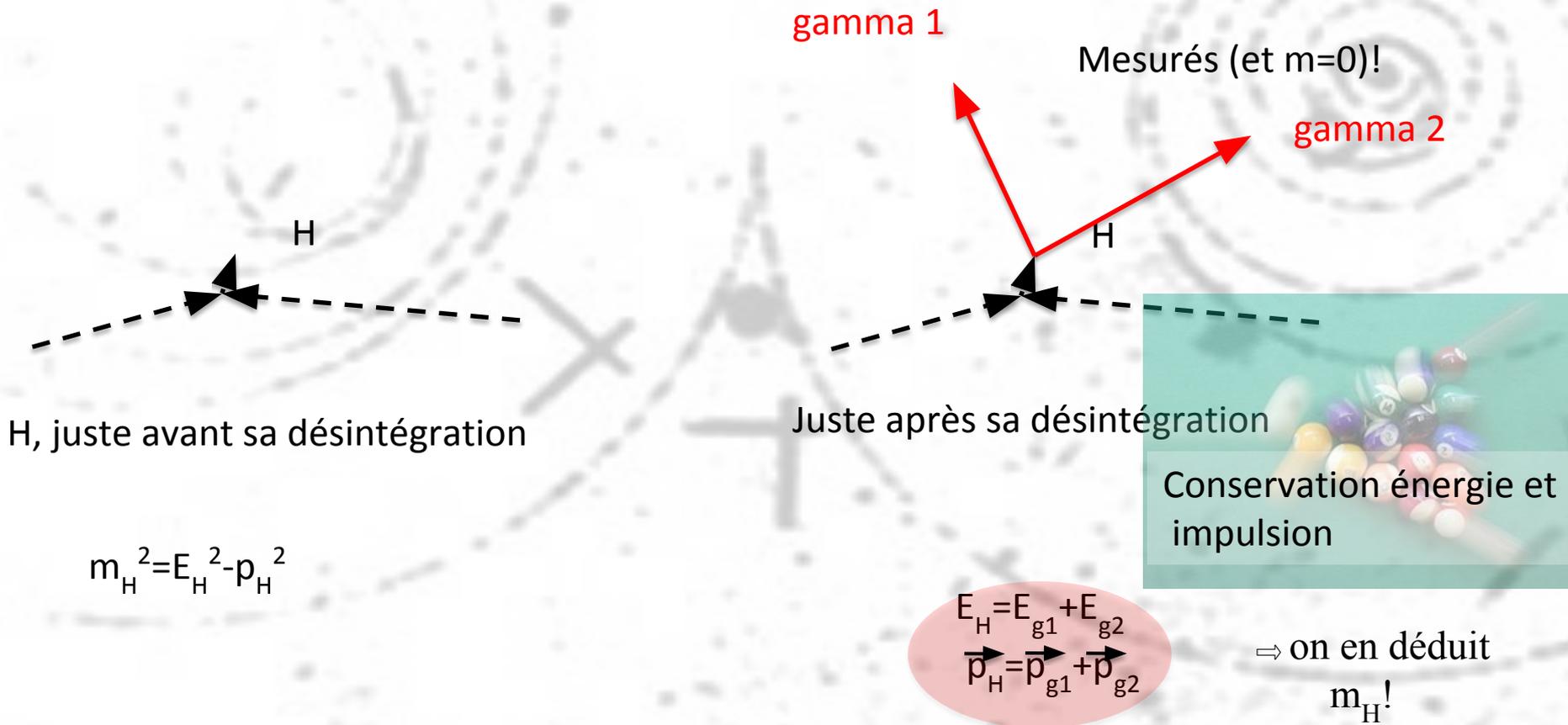
Einstein en 1905

En fait, la formule complète est $E^2=p^2c^2+m^2c^4$

p est l'impulsion, mv en mécanique classique

En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

$$E^2=p^2+m^2$$



10^{14} collisions

FINALEMENT...

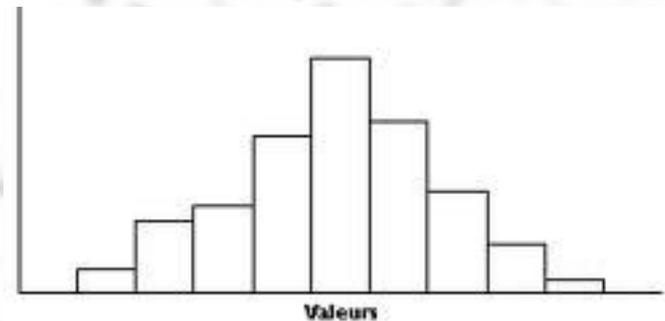
Tri rapide et grossier

10^9 événements sur disque

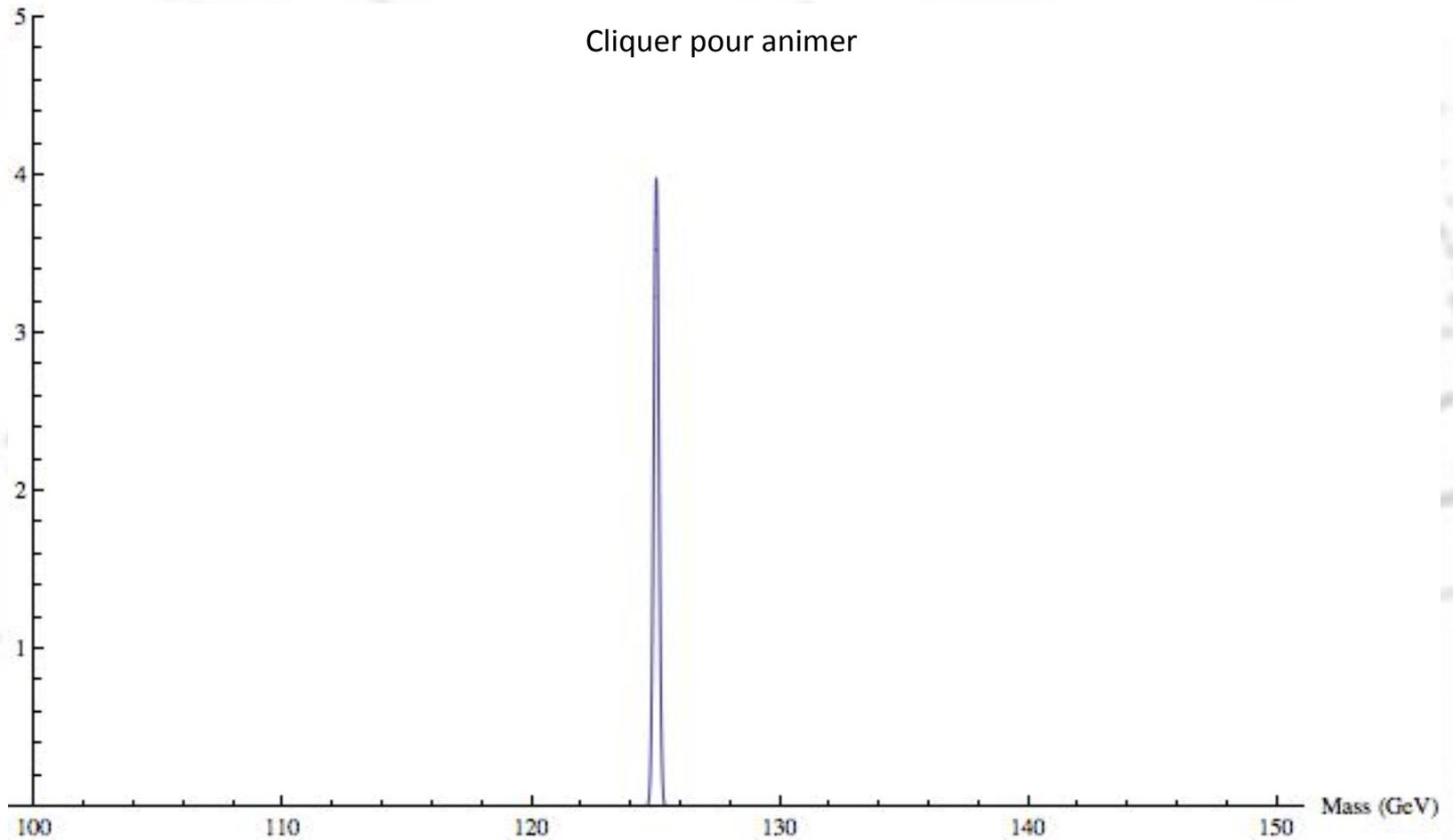
Tri précis

10^5 événements à 2 gamma

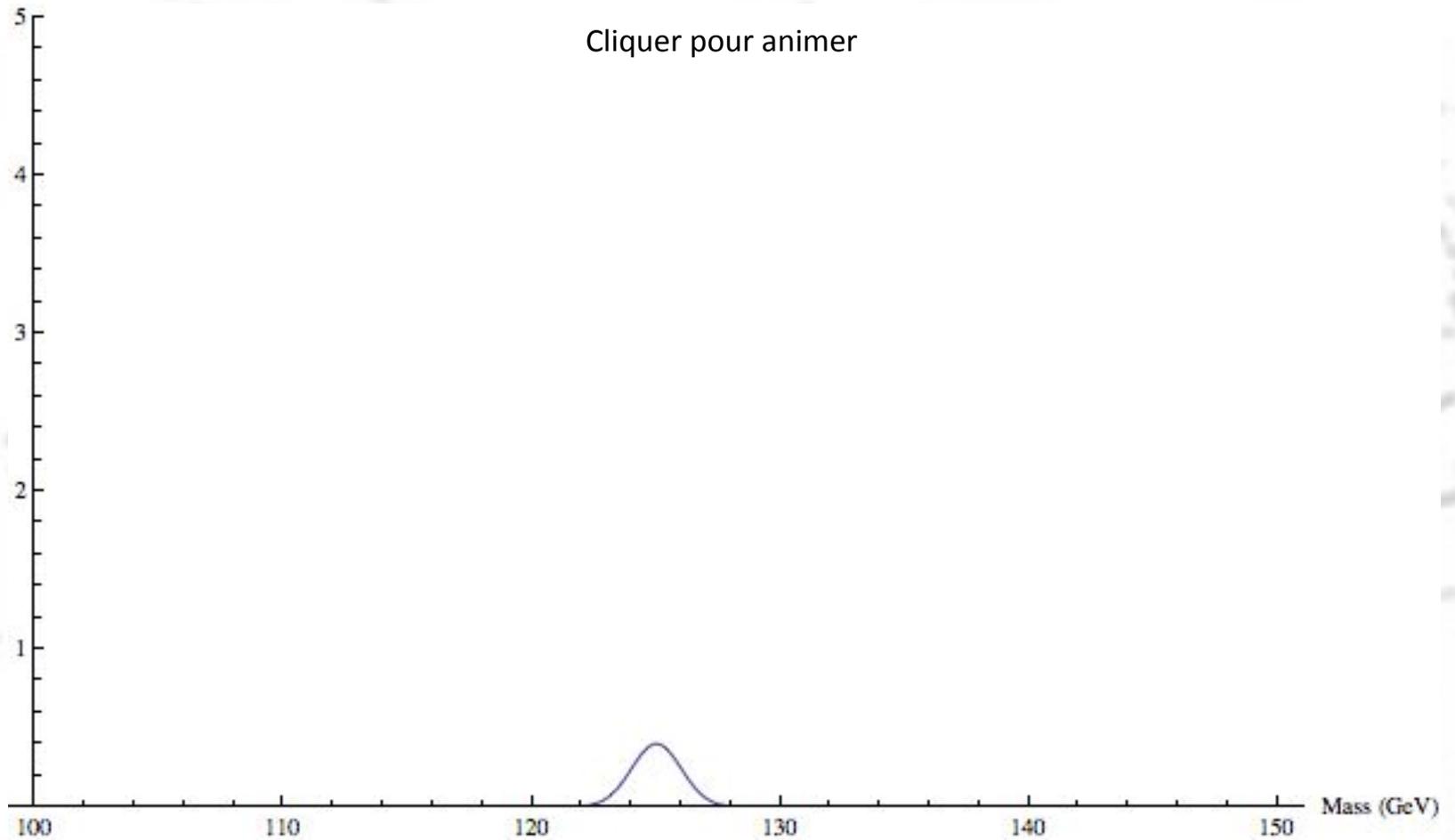
Calcul de la masse
→ histogramme



Effet de la précision du détecteur

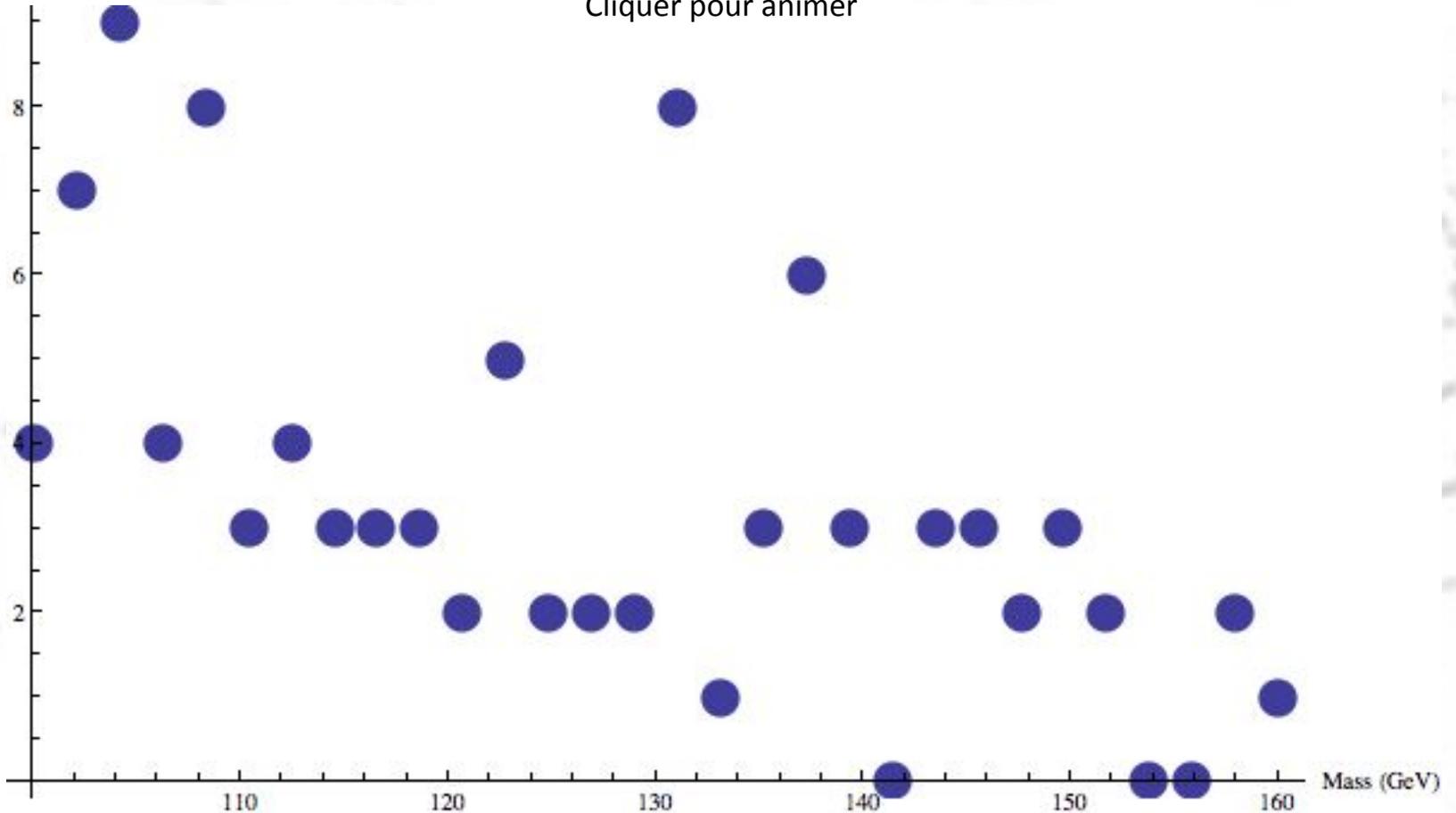


Effet du bruit de fond



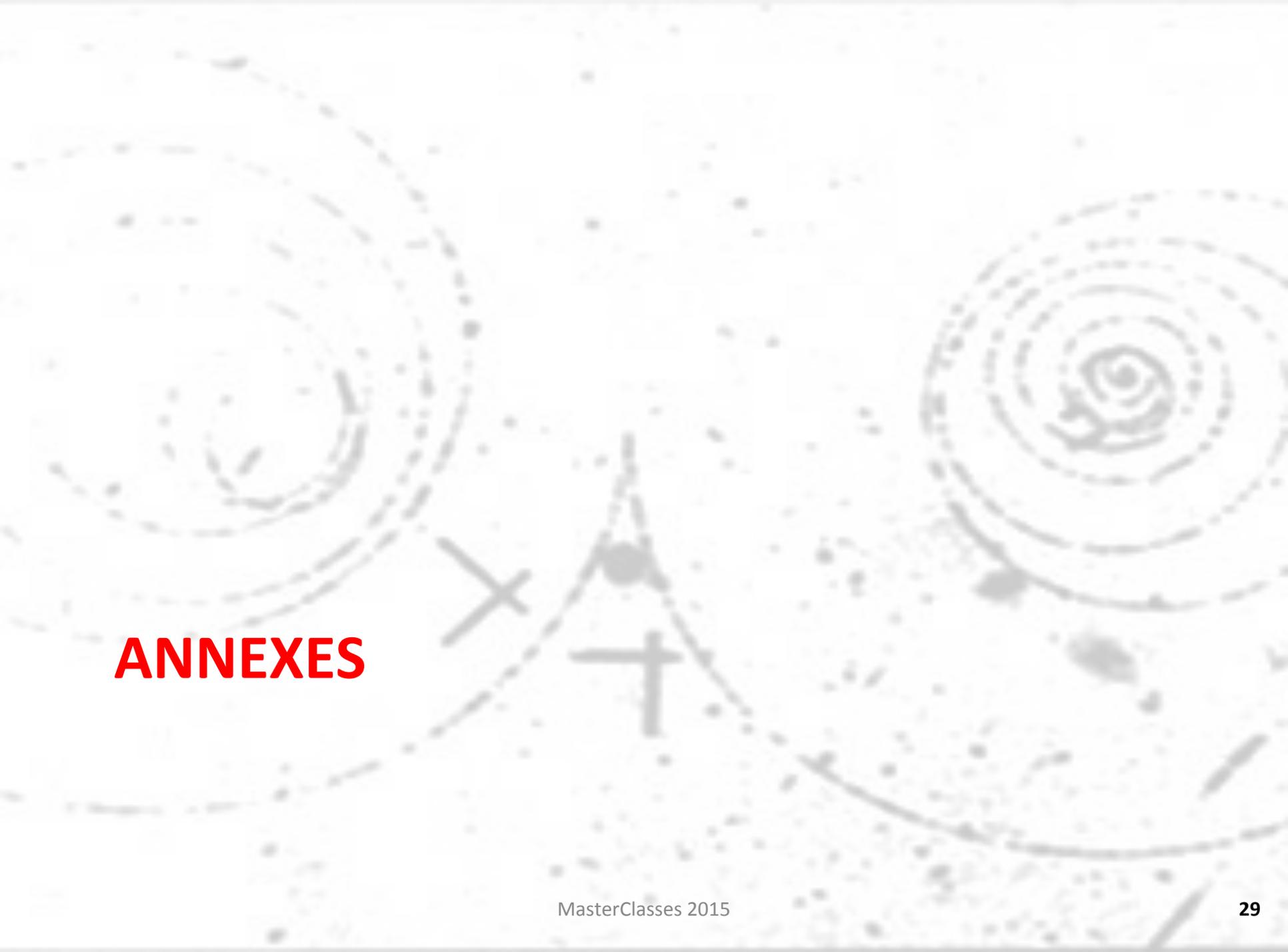
Effet de la statistique

Cliquer pour animer



CONCLUSION

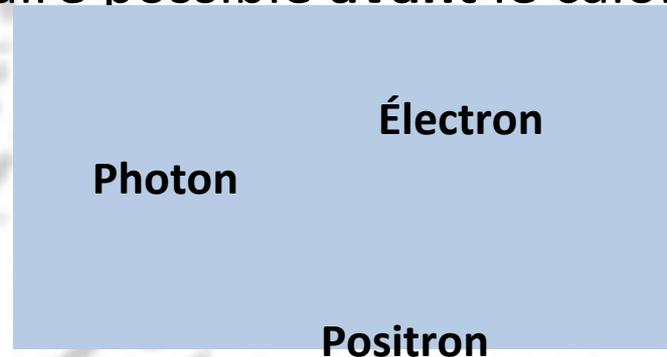
- A vous de jouer !

The background features a faint, light-colored constellation pattern. It includes several spiral shapes, some resembling galaxies or nebulae, and a central star-like symbol. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on geometric and organic forms.

ANNEXES

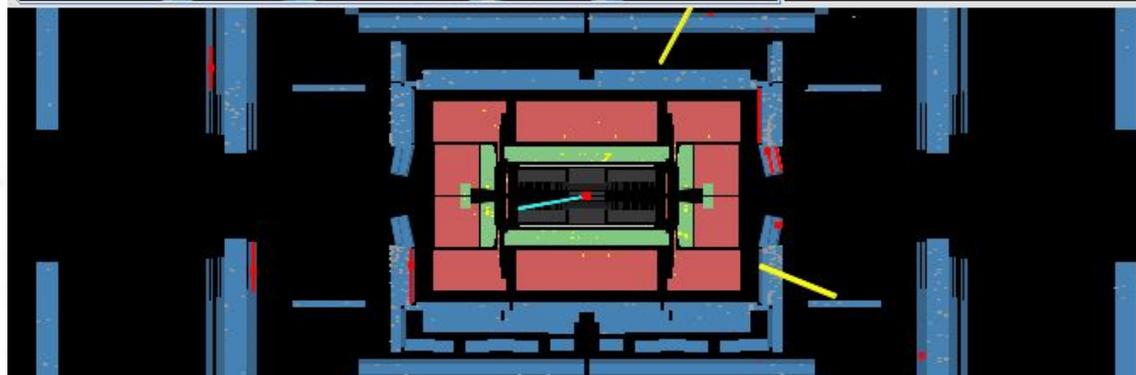
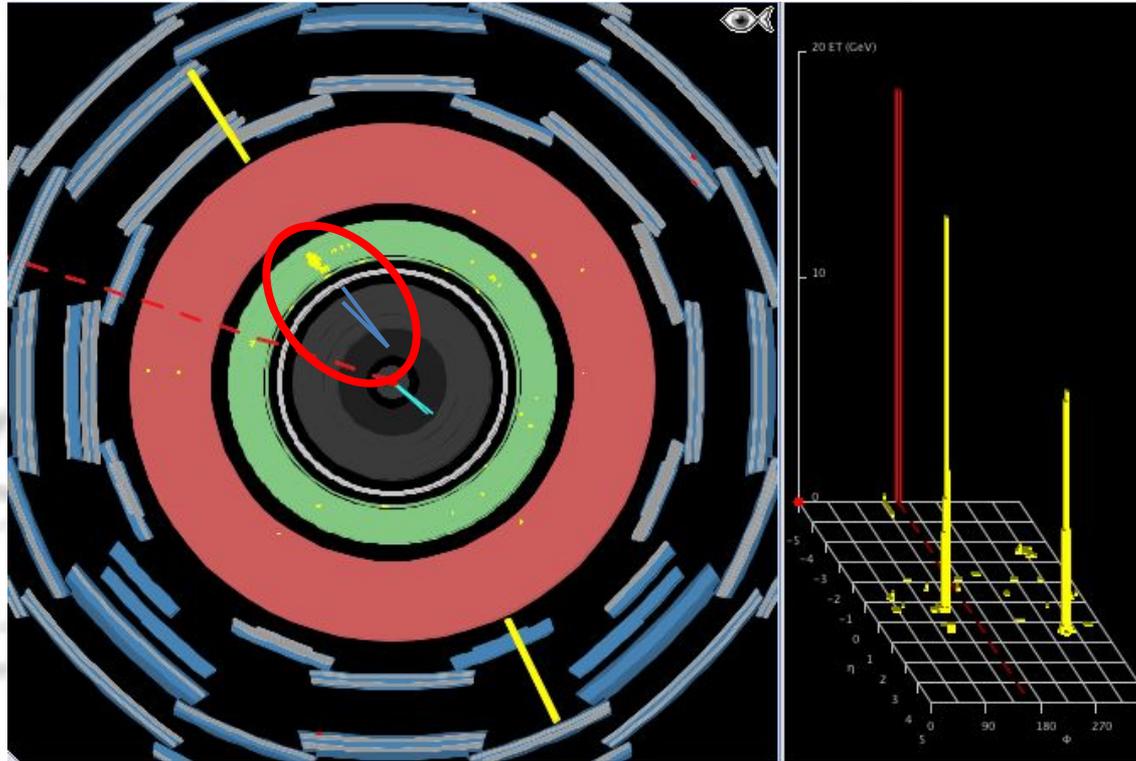
CONVERSION DE PHOTON

- Particule neutre de nature électromagnétique → seul sous-détecteur qui les voit : calorimètre électromagnétique
- SAUF que :
 - Création de paire possible **avant** le calorimètre



- Dans ce cas, on n'a plus un photon mais un électron + un positron = **2 traces de charge opposée très proches** (qui ne partent pas du centre) **et généralement 1 dépôt aligné avec les traces dans le calorimètre électromagnétique** (voire 2 dépôts très proches également).

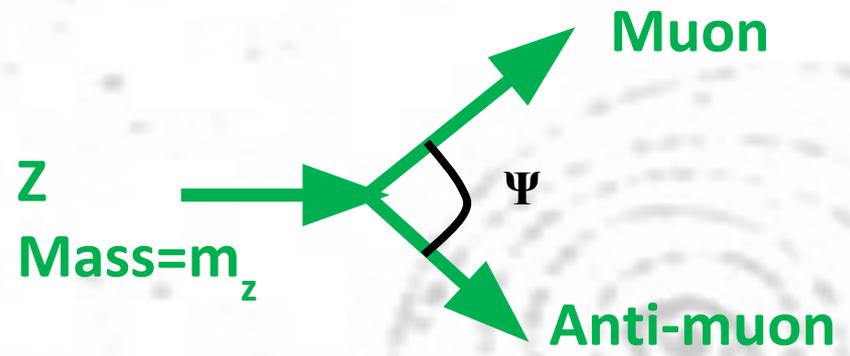
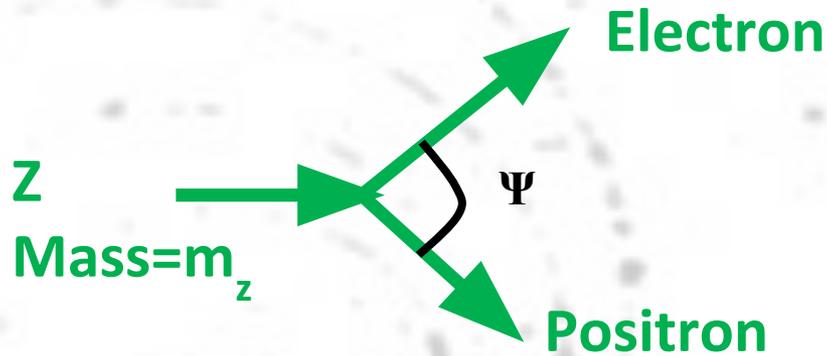
COMMENT VOIT-ON UN PHOTON CONVERTI DANS ATLAS



ET LES AUTRES PARTICULES ?

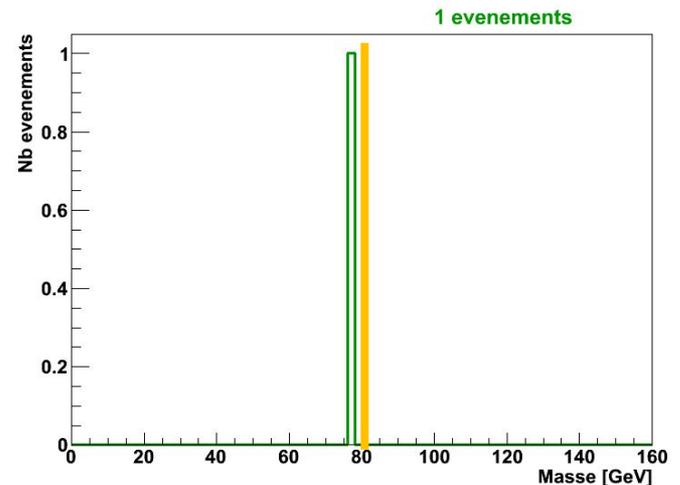
- On sait qu'il existe aussi les particules W, Z et le boson de Higgs, mais on n'en a pas parlé jusqu'à maintenant : comment les détecte-t-on ?
- Ces particules ont une **durée de vie très courte** : elles se désintègrent avant de traverser le détecteur
- Par contre, on peut voir **leurs produits de désintégration.**

SIGNAL

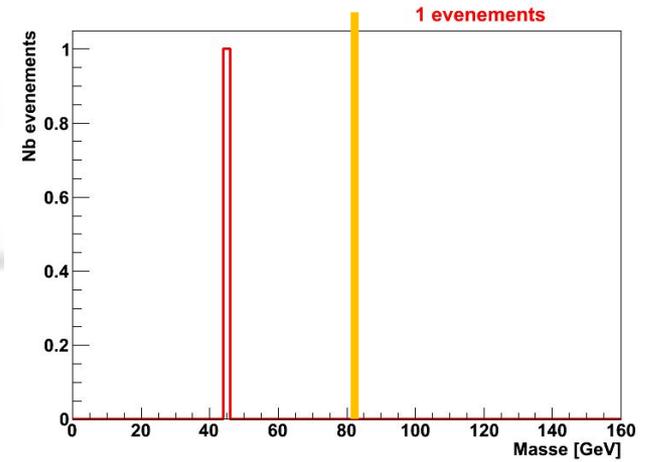
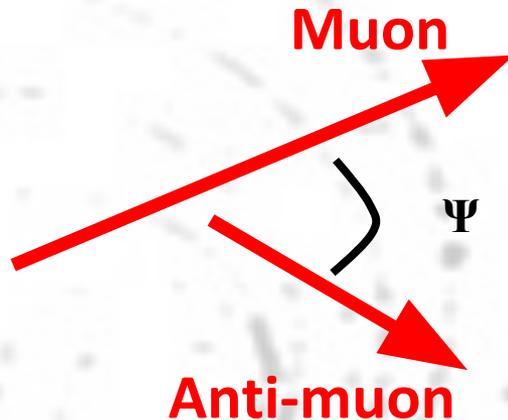


$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{(E_{e^-} + E_{e^+})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$

- Énergie et quantité de mouvement ($p=mv$) des produits finaux sont connus puisque mesurés par ATLAS
→ On peut retrouver $m_0^{(Z)}$



BRUIT DE FOND



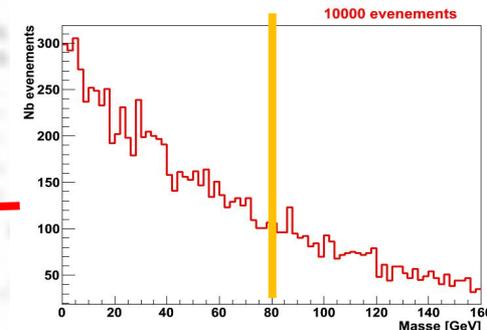
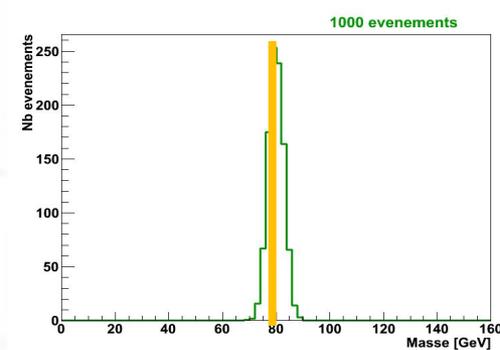
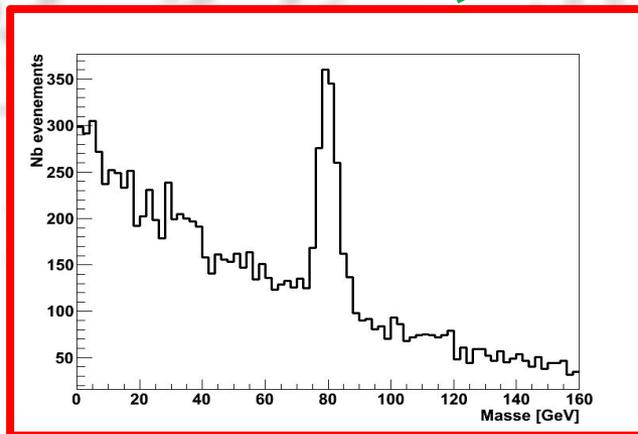
- Un muon et un anti-muon qui ne viennent pas d'un Z

→ La quantité $\sqrt{\left(\frac{(E_{e^-} + E_{e^+})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$ égale à la masse du Z

SIGNAL ET BRUIT DE FOND ENSEMBLE (CAS RÉEL)

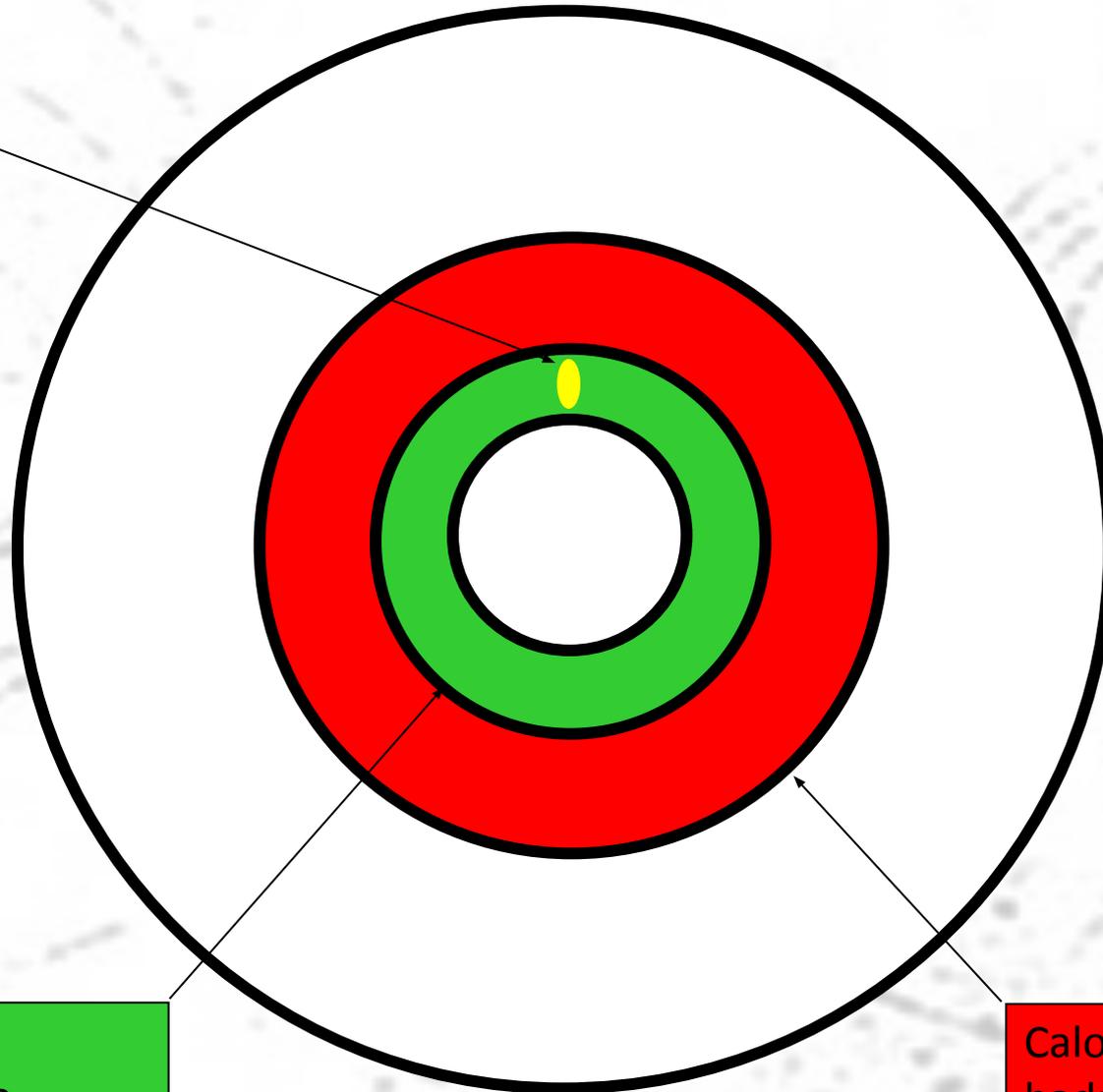
- On va sélectionner des événements qui “ressemblent” au Z
- Mais certains seront du bruit de fond
- L’histogramme total pourra ressembler à :

Total:



LES CALORIMÈTRES

Electron
ou photon

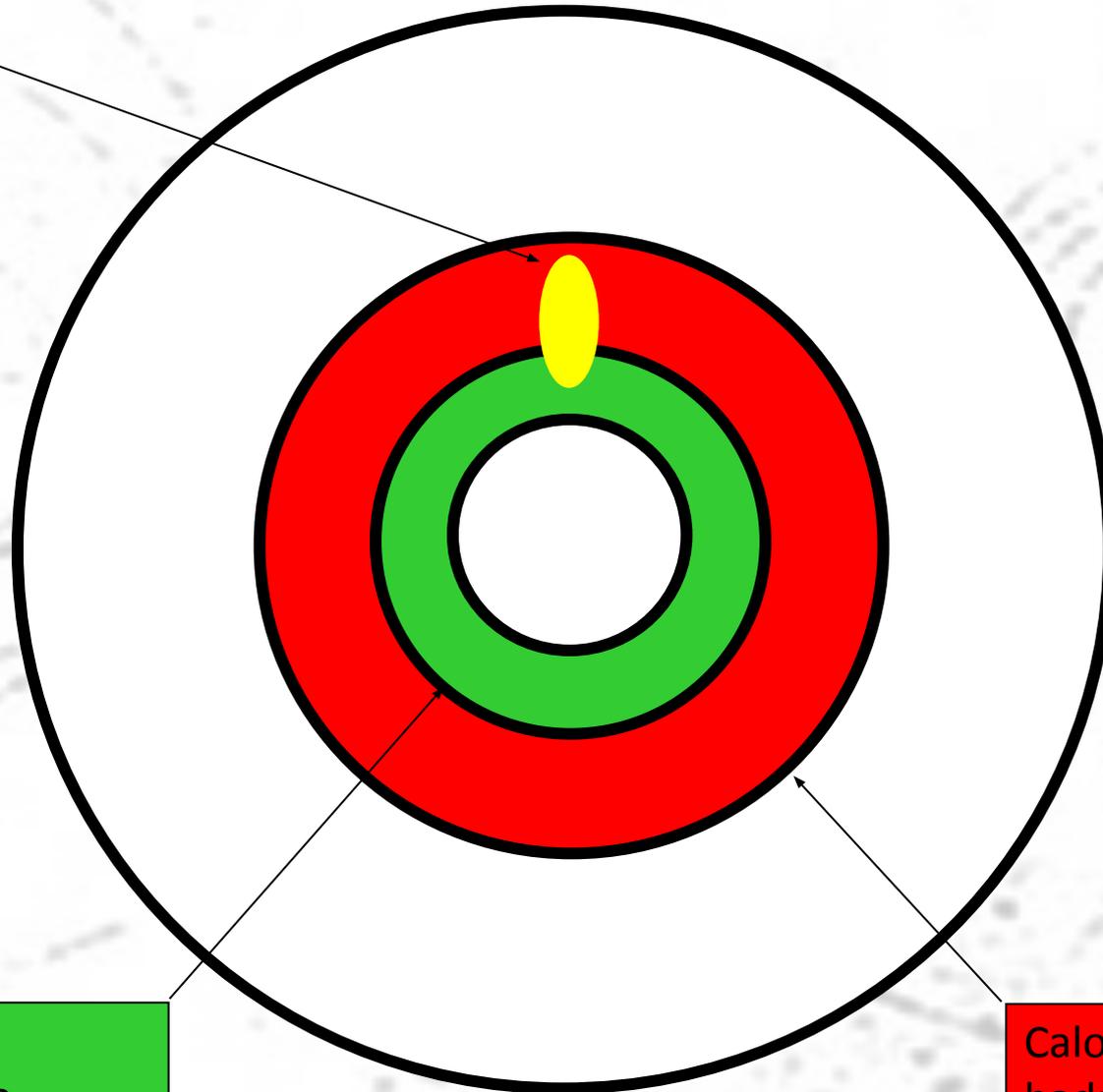


Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

LES CALORIMÈTRES

Hadron

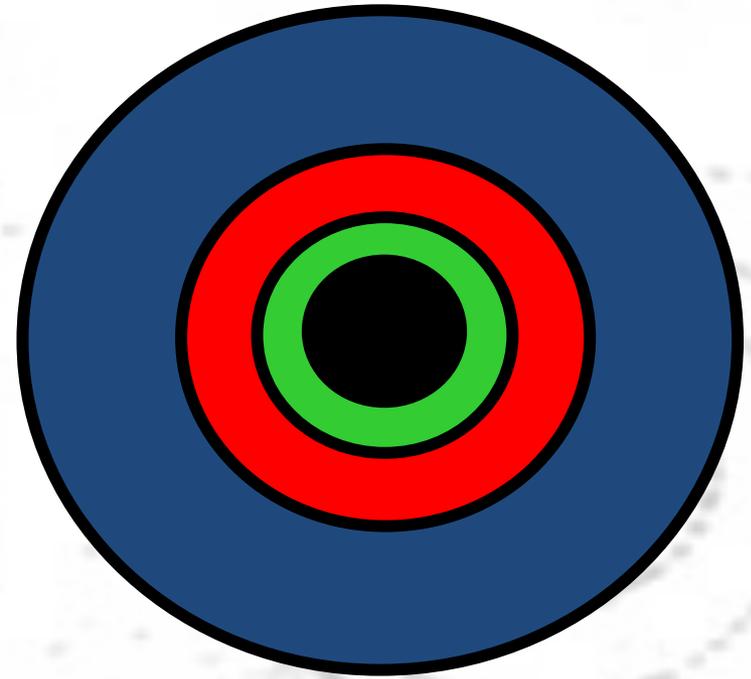


Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

STRUCTURE GÉNÉRALE D'UN DÉTECTEUR

- Structure en poupée russe
- Chaque couche a une fonction précise
 - **Trajectographe(s)**
 - Sui(ven)t les particules chargées
 - **Calorimètre(s)**
 - Mesure(nt) les énergies des particules (sauf muons et neutrinos)
 - Après le trajectographe car nécessite de détruire la particule initiale
 - **Détecteurs de muons**
 - A l'extérieur pour arrêter les muons qui ont beaucoup d'énergie
- Identification des particules en combinant les informations de tous les sous-systèmes



Particule Stable	Détecteur de traces	Calorimètre électro-magnétique	Calorimètre hadronique	Détecteur de muons
Photon	Red	Green	Orange	Red
Électron	Green	Green	Orange	Red
Quark/Gluon → Jets	Green	Orange	Green	Red
Muons	Green	Red	Red	Green
Neutrinos	Red	Red	Red	Red

RÉSUMÉ... VOIR L'APPLLET JAVA

