

Détecter les particules : exemple d'ATLAS

Masterclasses 2013

N. Arnaud, N. Lorenzo-Martinez, N. Makovec
E. Scifo

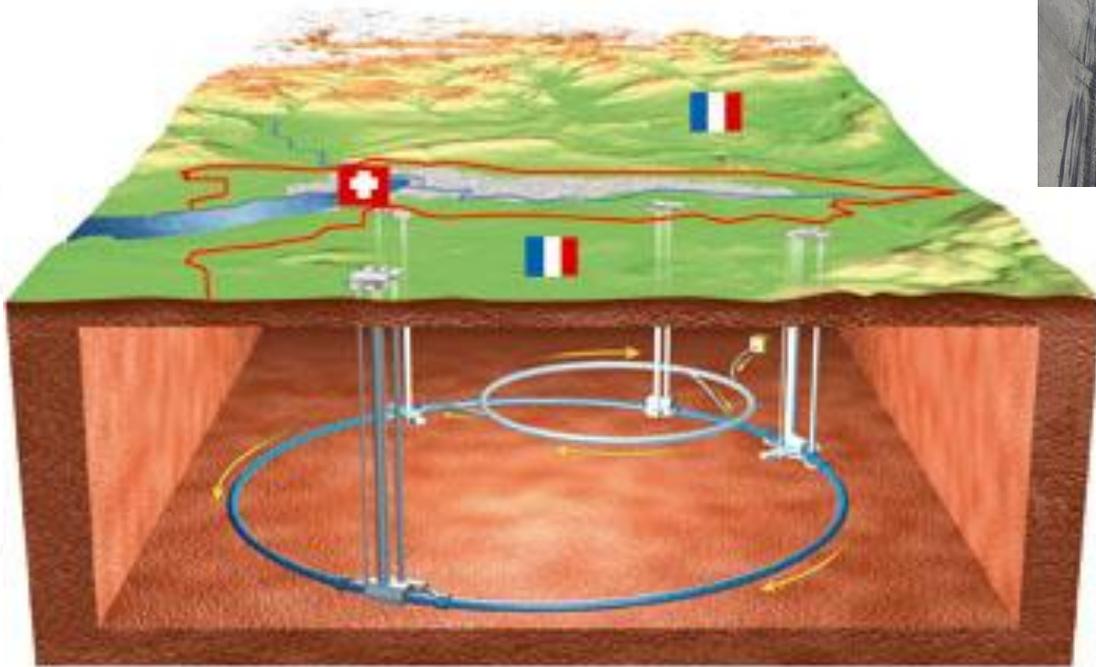
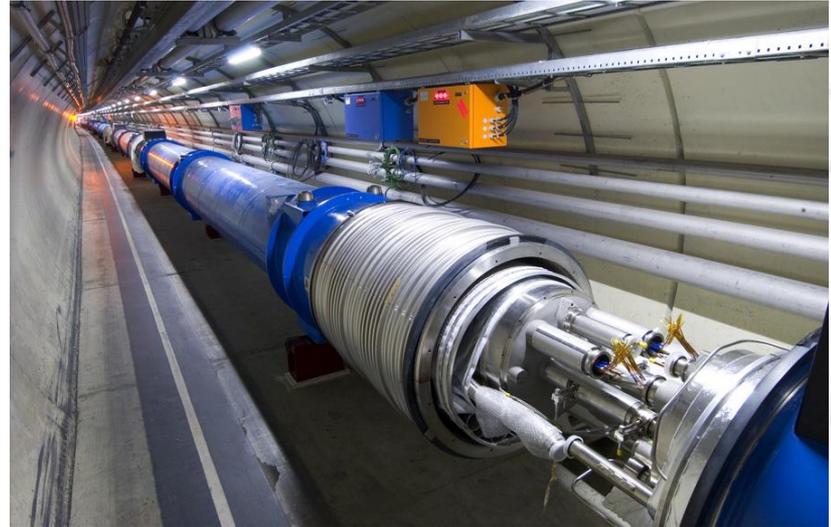
RAPPEL : LE MODÈLE STANDARD

	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 ?

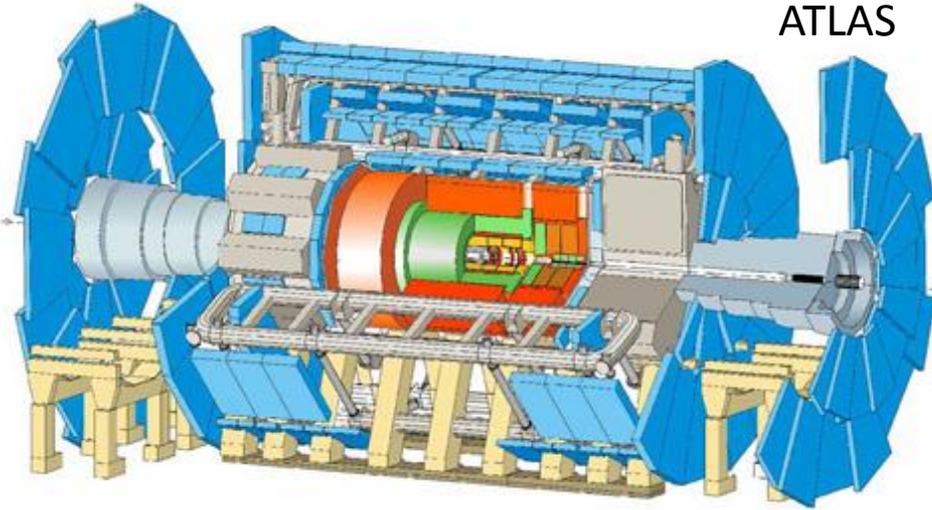
Plus : le boson de Higgs

RAPPEL : ACCÉLÉRATEUR : LE LHC

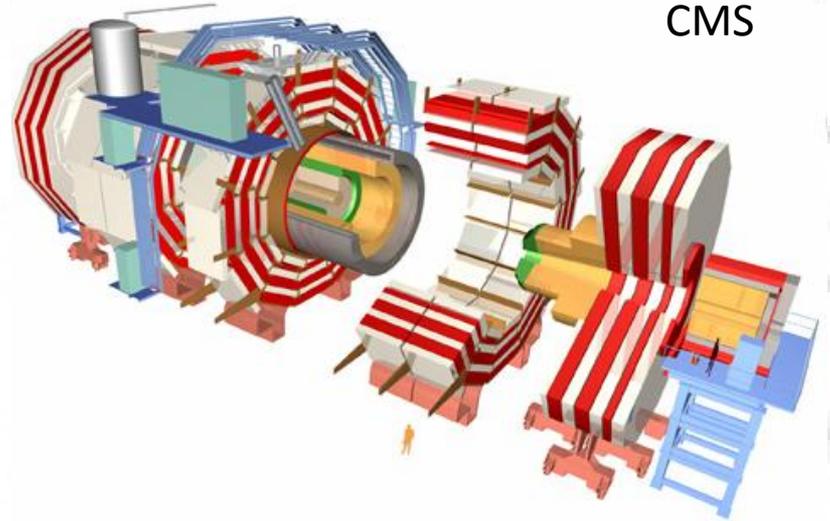


DÉTECTEURS

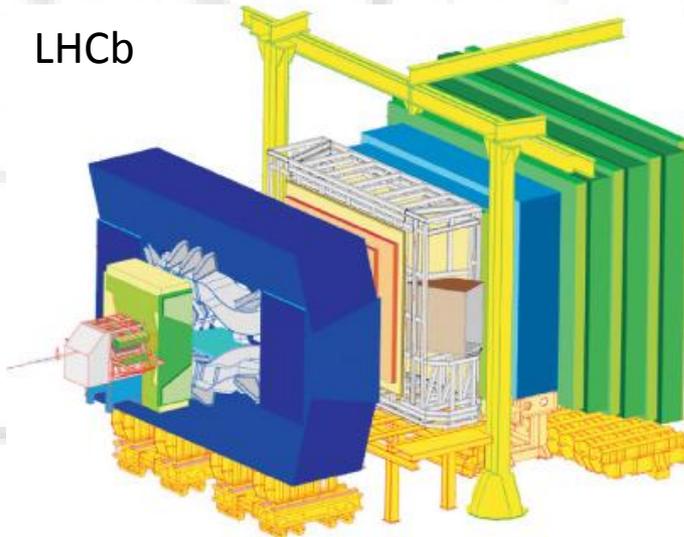
ATLAS



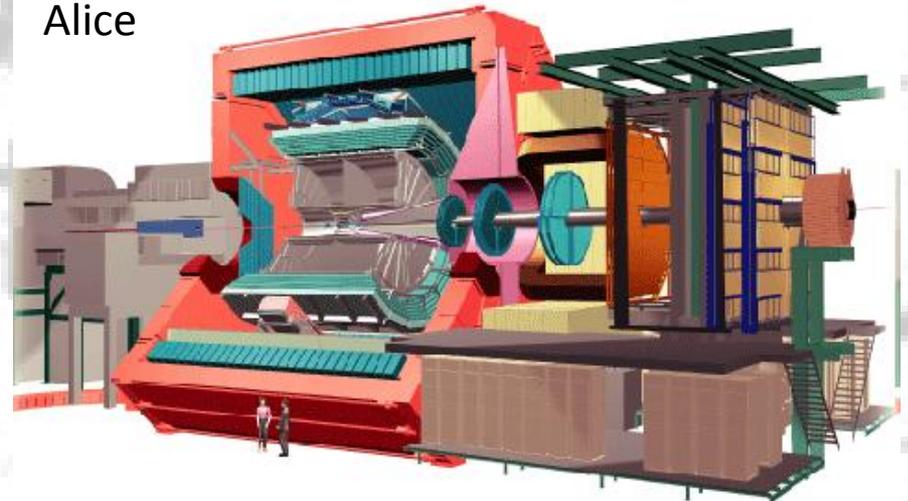
CMS



LHCb



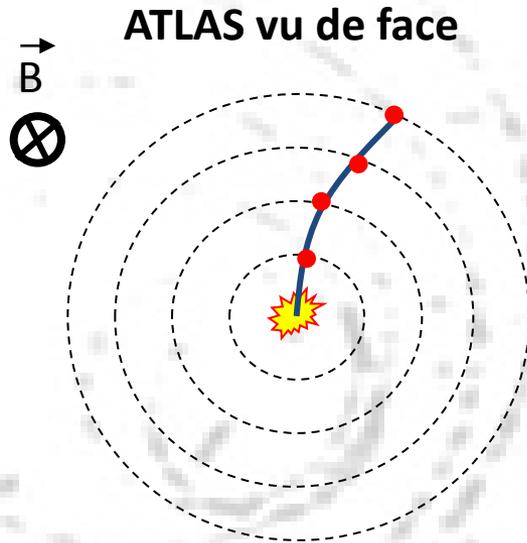
Alice



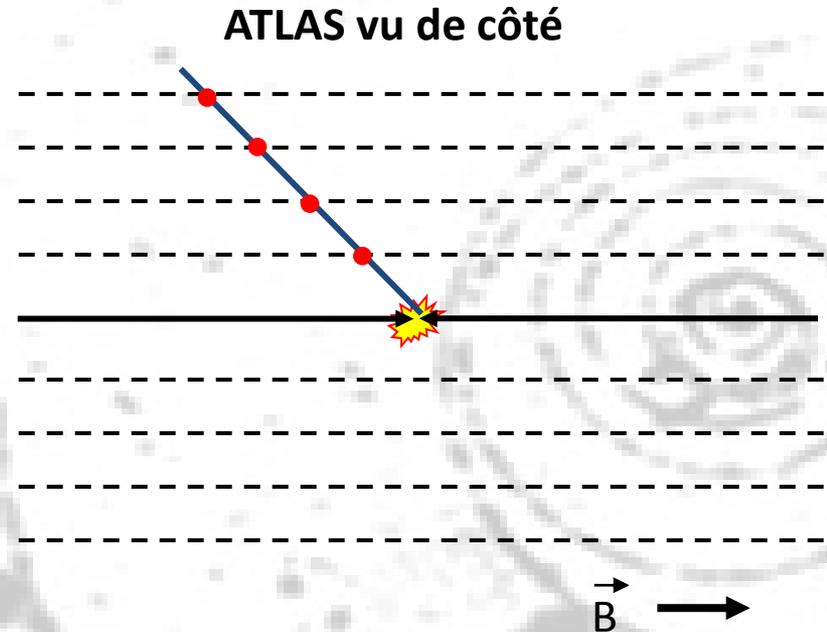
COMMENT CONSTRUIRE UN DÉTECTEUR

- Qu'est-ce qu'on veut mesurer ?
 - Toutes les particules créées
 - Trajectoire
 - Charge électrique
 - Vitesse (en fait **impulsion** $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$)
 - Énergie
 - Nature (électron, muon, photon ?)
- Principes de base :
 - Détecteur sans "trou" : forme cylindrique

1) MESURE DES TRAJECTOIRES ET CHARGES : LE TRAJECTOGRAPHE



Un électron

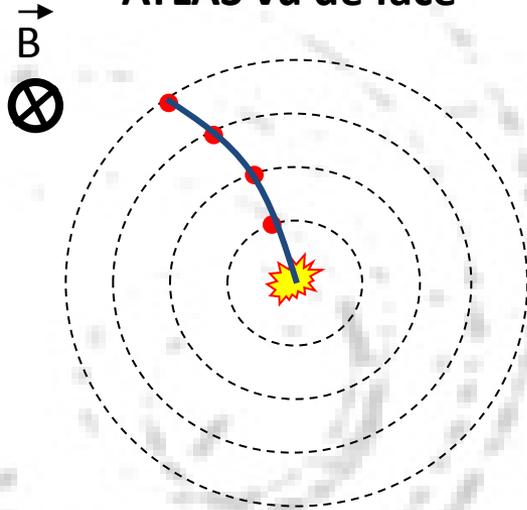


- Plusieurs "couches" permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l'aide d'un **champ magnétique** :
 - En effet les particules chargées, lorsqu'elles se déplacent dans un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale autour de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

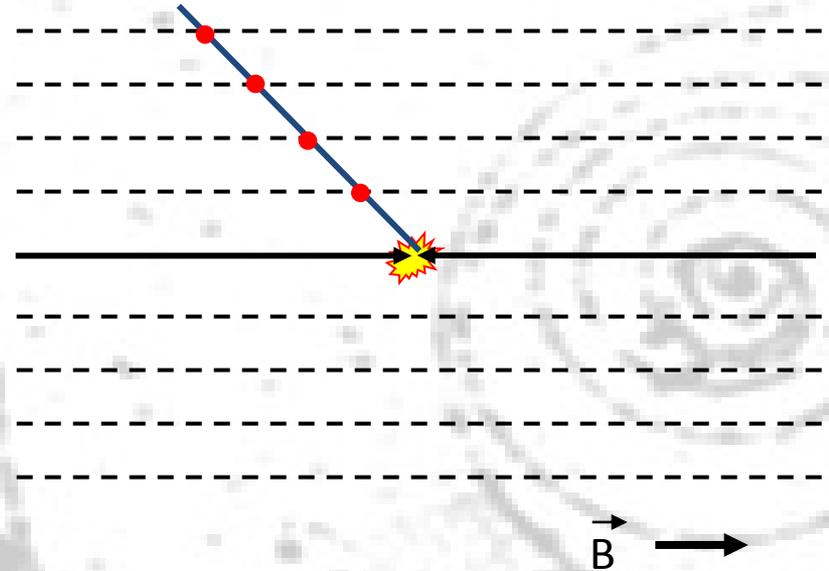


LE TRAJECTOGRAPHE

ATLAS vu de face



ATLAS vu de côté

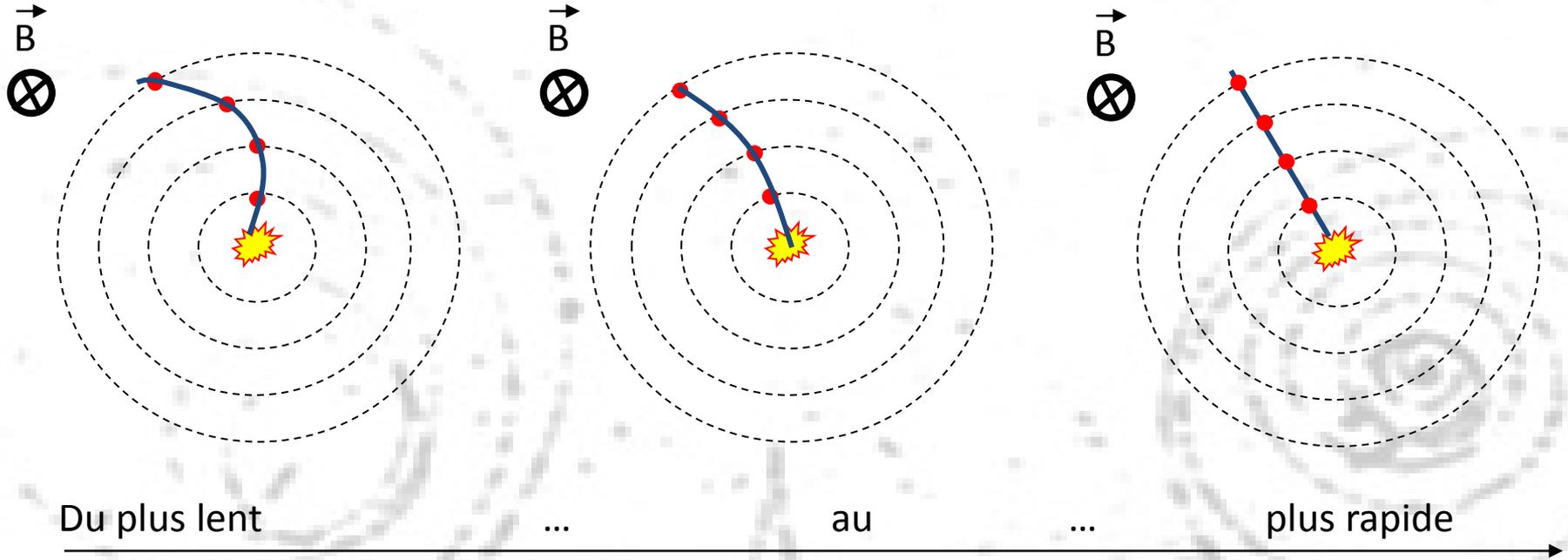


Un anti-électron=positron

- 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 $R=mv/(qB)$
- Technique valide pour les **particules chargées** uniquement



LE TRAJECTOGRAPHE

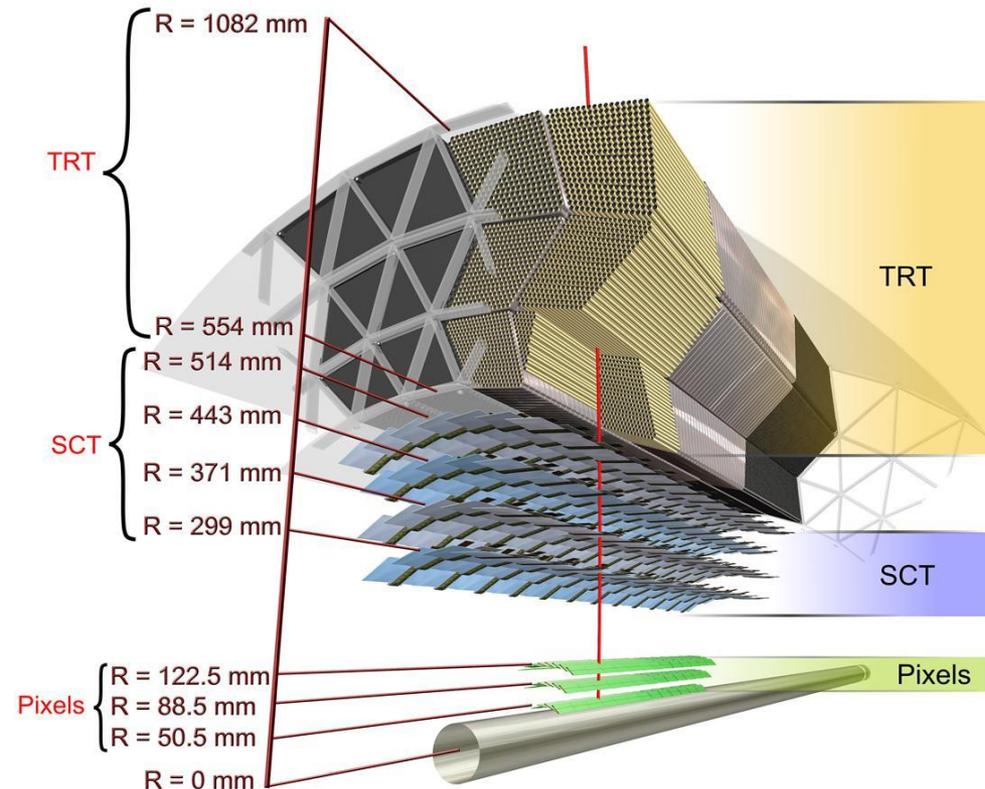


- Plusieurs “couches” permettent de suivre la trajectoire
- On peut, dans le même temps, mesurer vitesse et charge électrique à l’aide d’un **champ magnétique** :
 - En effet les particules chargées, lorsqu’elles sont soumises à l’action d’un champ magnétique, ont une trajectoire en forme de spirale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



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.

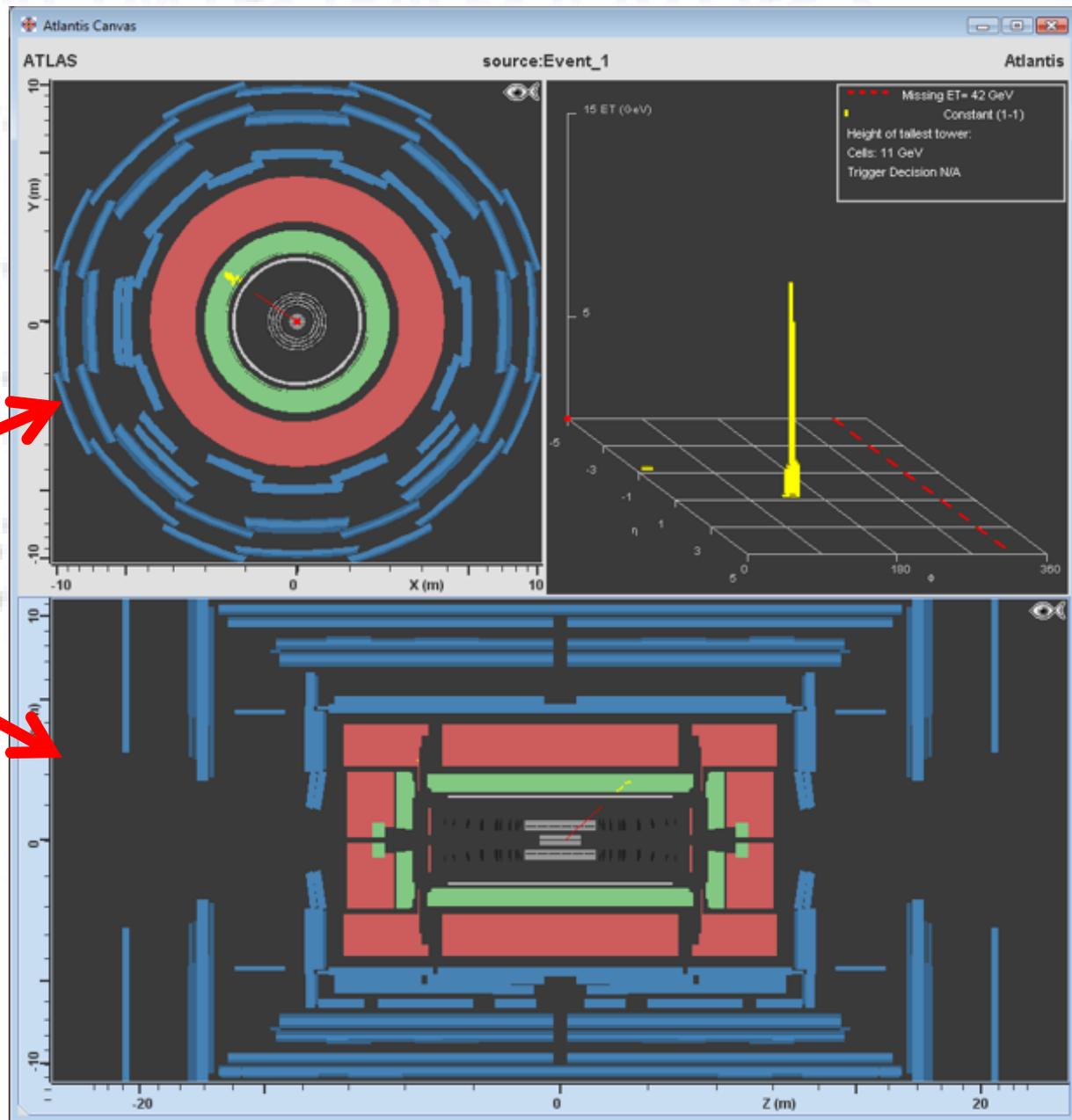
• Détecteur de radiation de transition (TRT - Transition Radiation Tracker) : composé de **400 000 tubes** de **4mm de diamètre** et de **1,44m de long**. Dans chacun de ces tubes est inséré un fil métallique. Une différence de potentiel est appliquée entre le fil et le tube, ce qui permet la génération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

COMMENT VOIT-ON LES TRACES À ATLAS ?

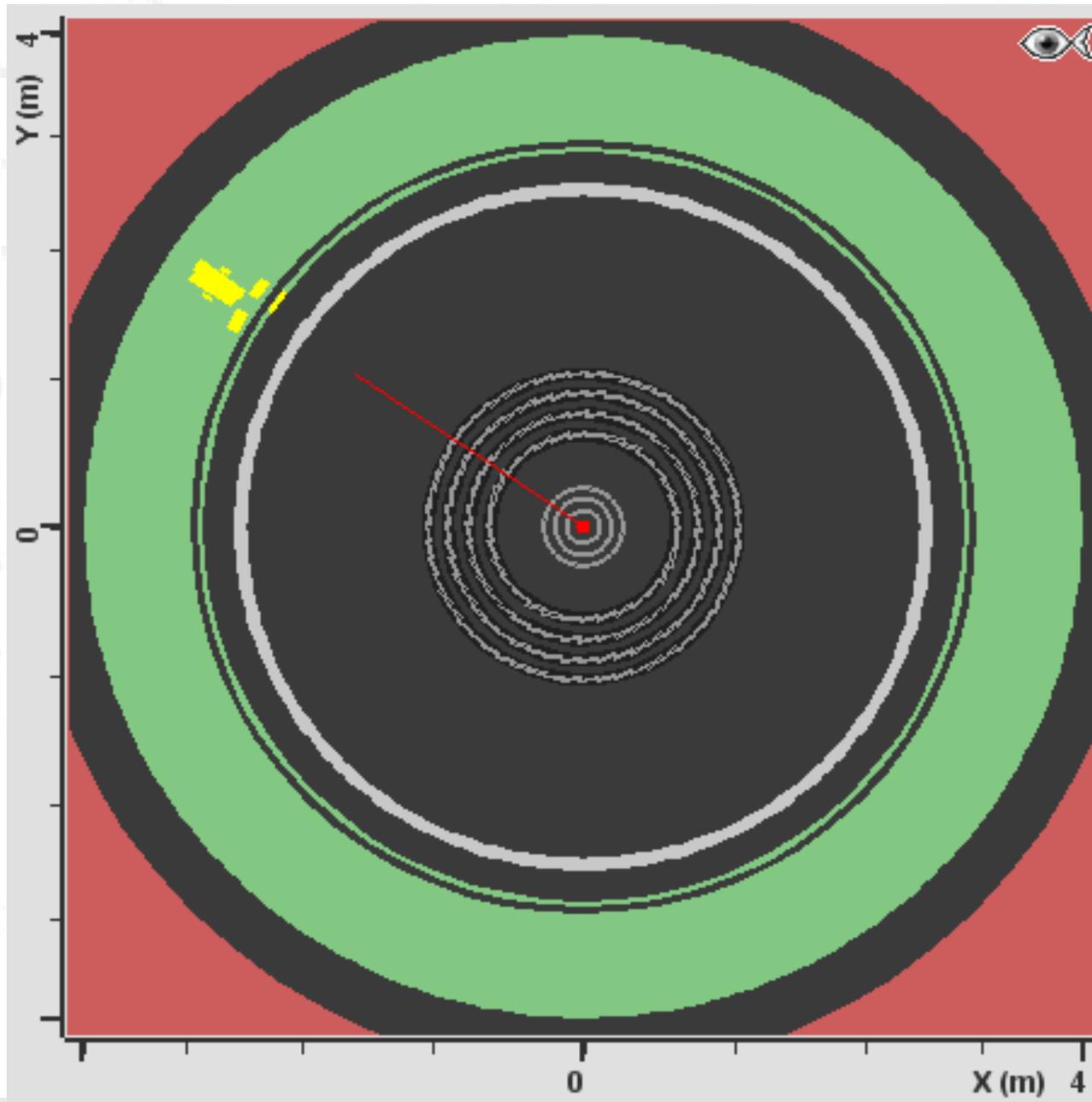
- Ce que vous allez voir sur vos écrans dans ce TP :

- Vue de face

- Vue de côté

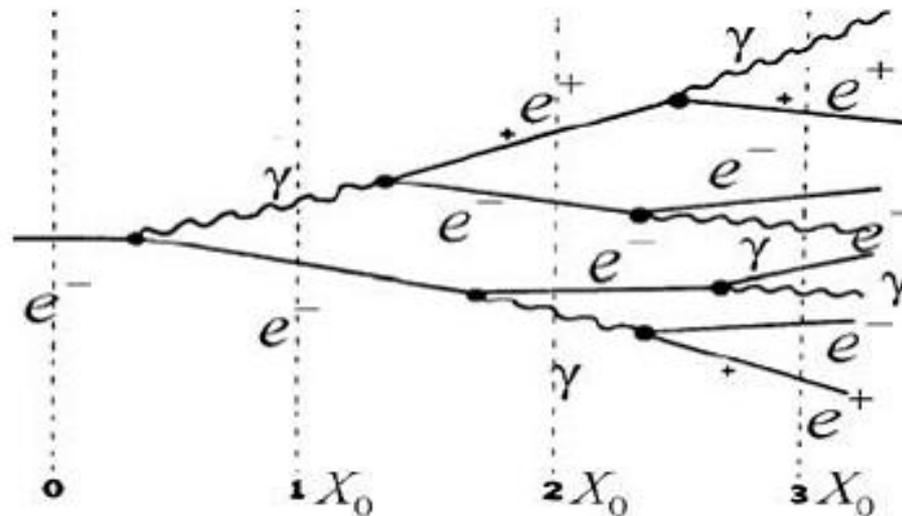


COMMENT VOIT-ON LES TRACES DANS ATLAS ?



2) MESURE DE L'ÉNERGIE : CALORIMÈTRES

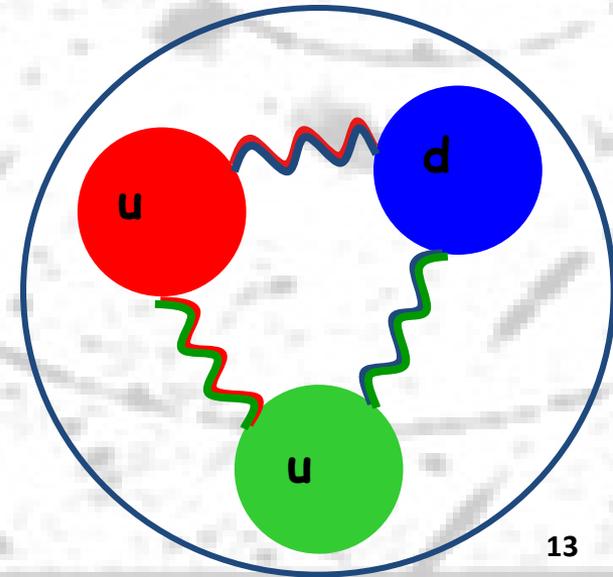
- Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière par
 - création de paires (conversion)
 - rayonnement (Bremstrahlung)



- 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.

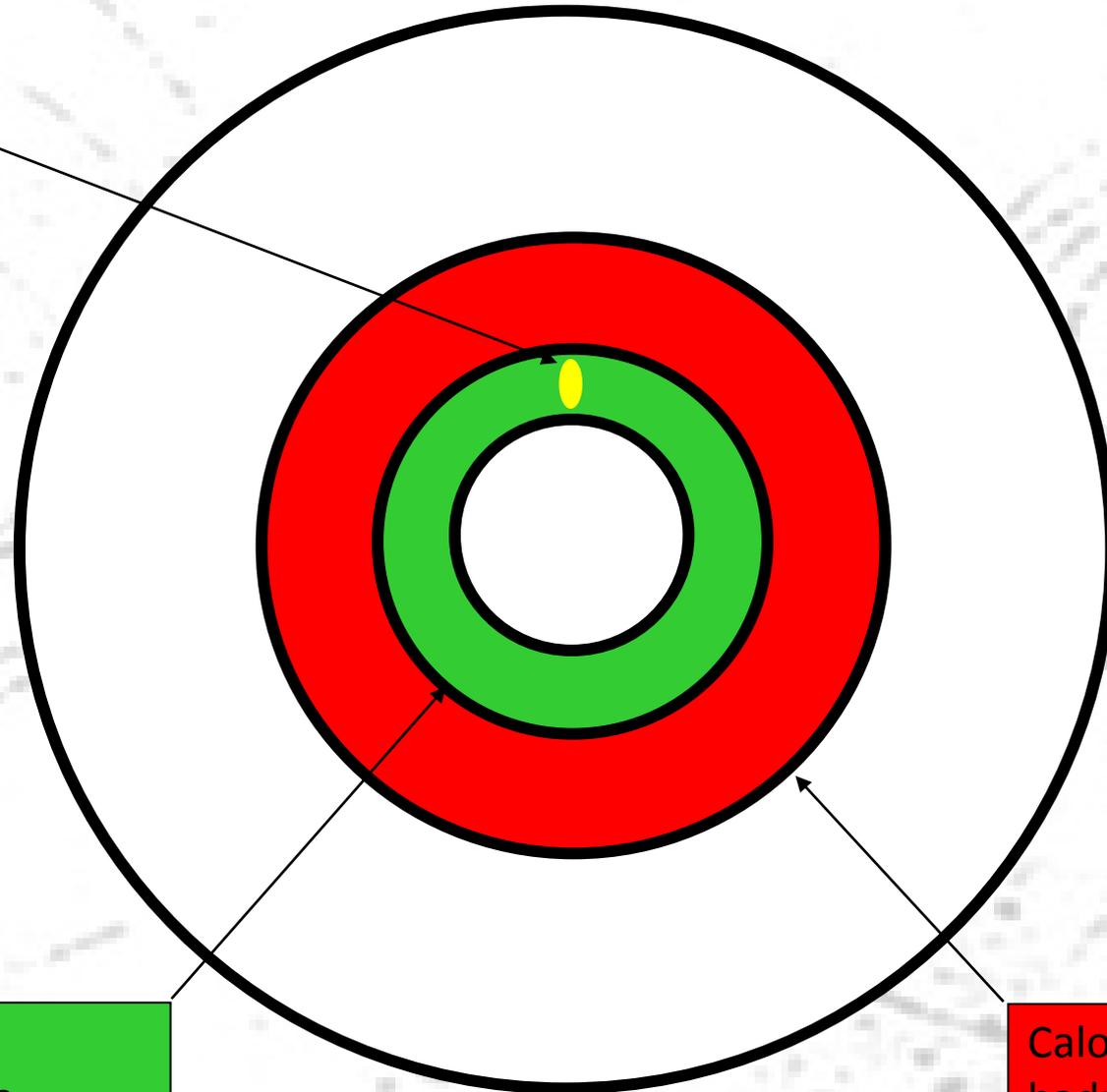
FONCTIONNEMENT D'UN CALORIMÈTRE

- 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: proton)
 - Ces particules interagissent moins
 - il faut plus de matière pour les arrêter



LES CALORIMÈTRES

Electron
ou photon

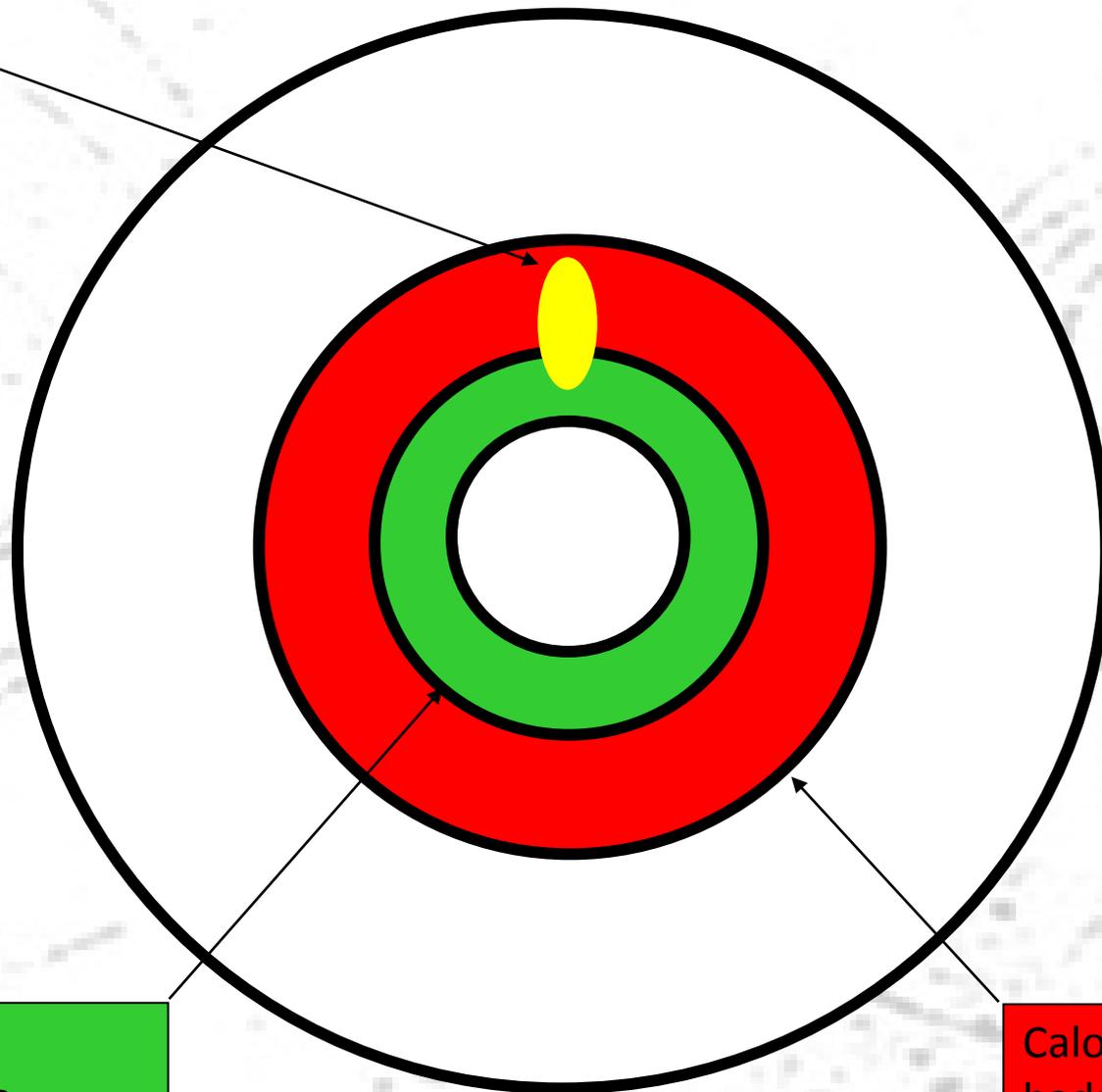


Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

LES CALORIMÈTRES

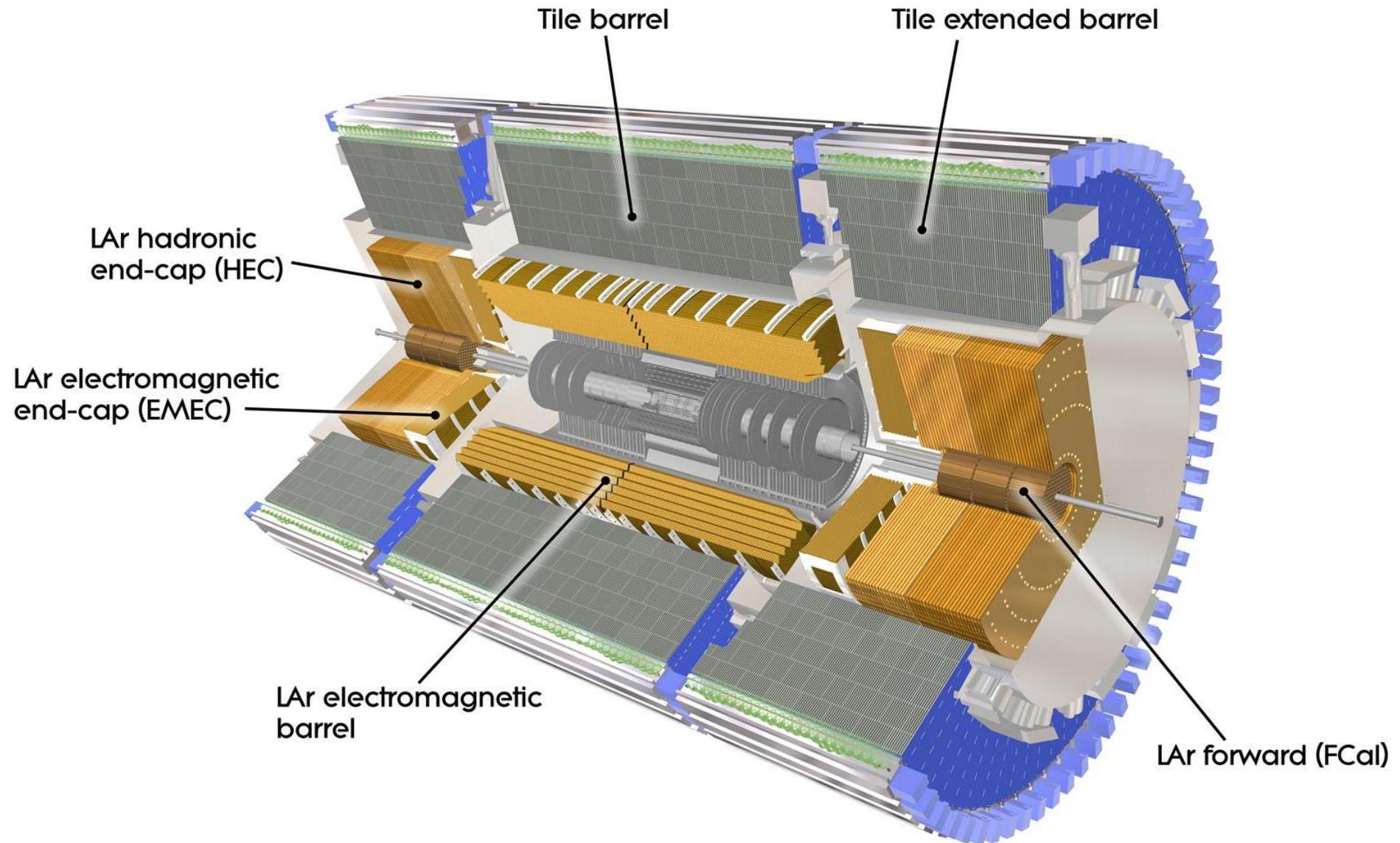
Hadron



Calorimètre
électromagnétique

Calorimètre
hadronique

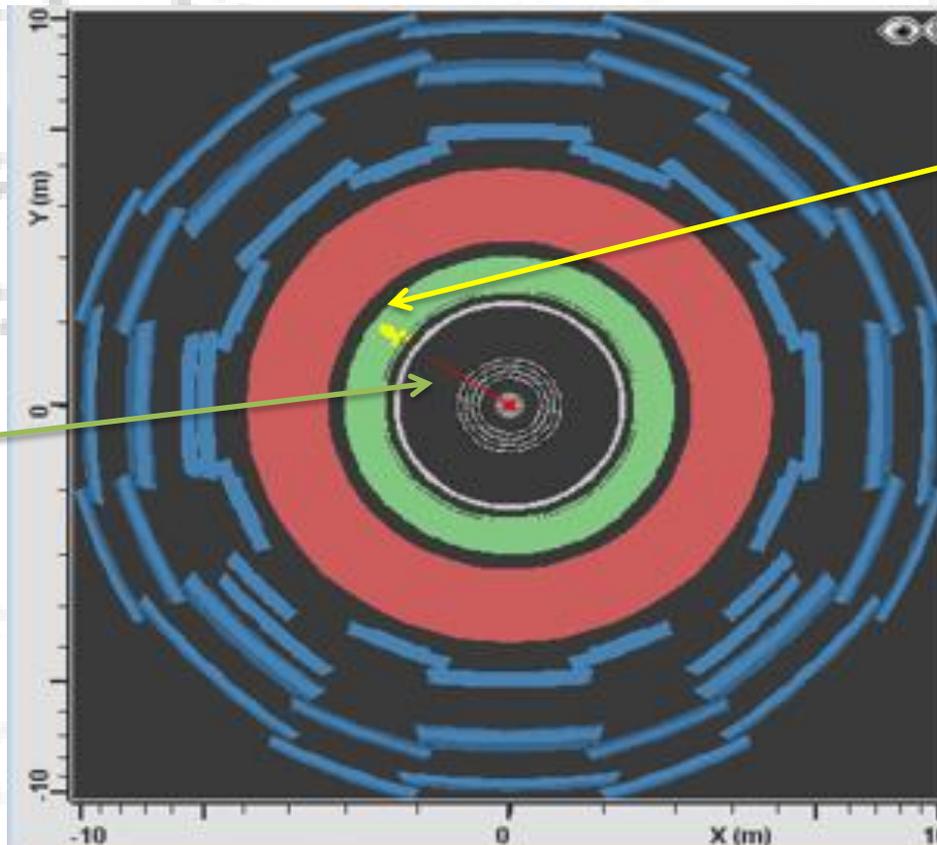
LES CALORIMÈTRES D'ATLAS



COMMENT VOIT-ON UN ÉLECTRON DANS ATLAS?

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

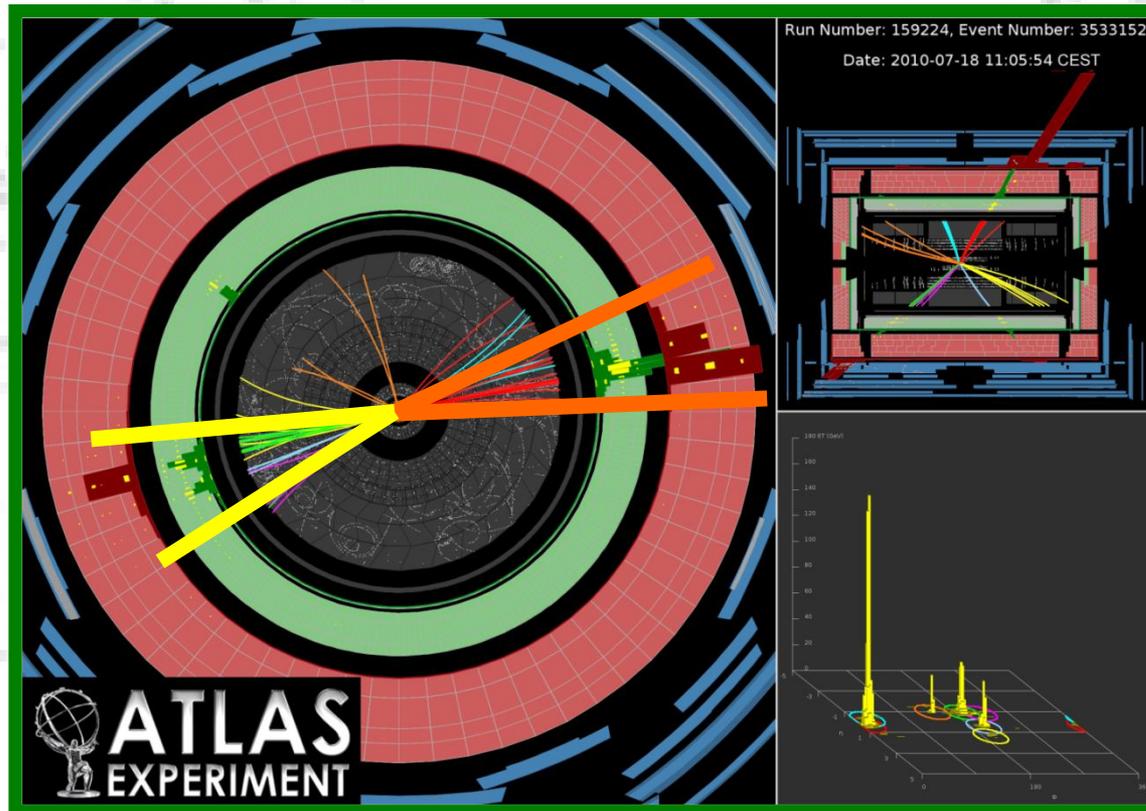
Une seule trace visible dans le détecteur aligné avec l'énergie mesurée dans le calorimètre



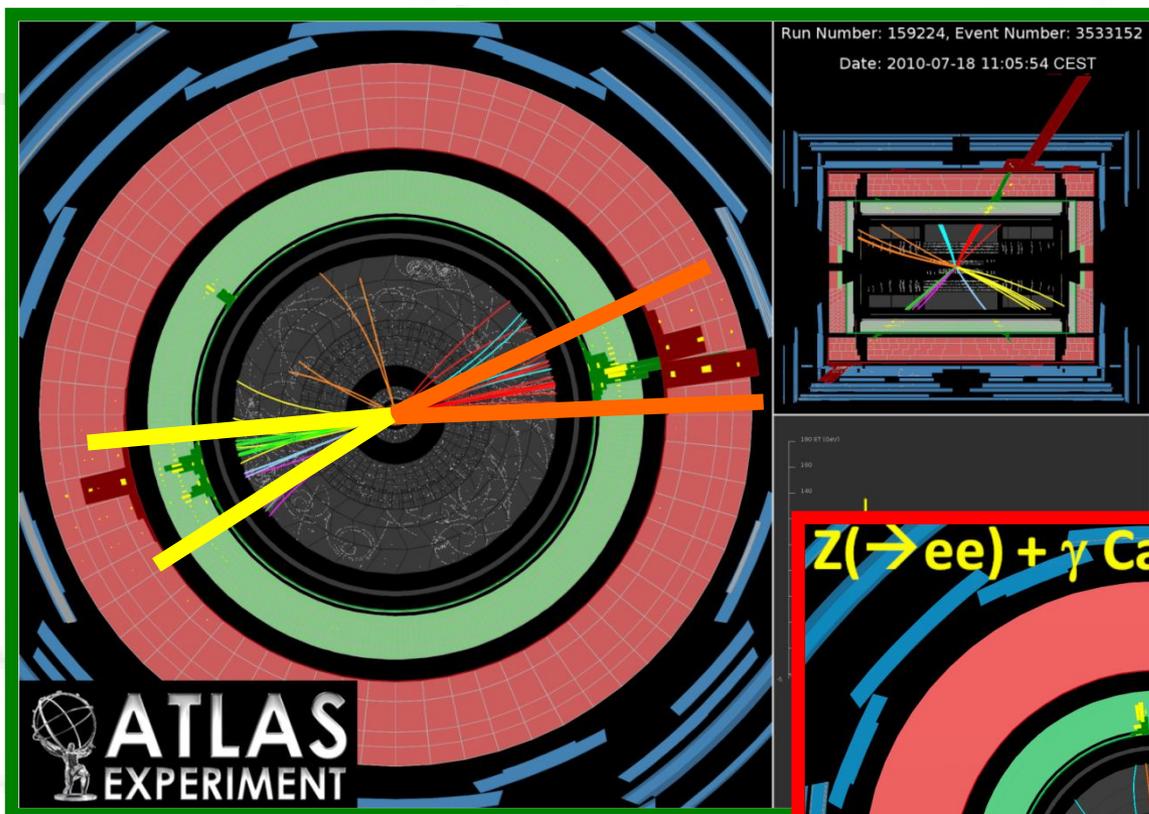
Dépôt d'énergie dans le calorimètre électromagnétique

COMMENT VOIT-ON UN QUARK DANS ATLAS

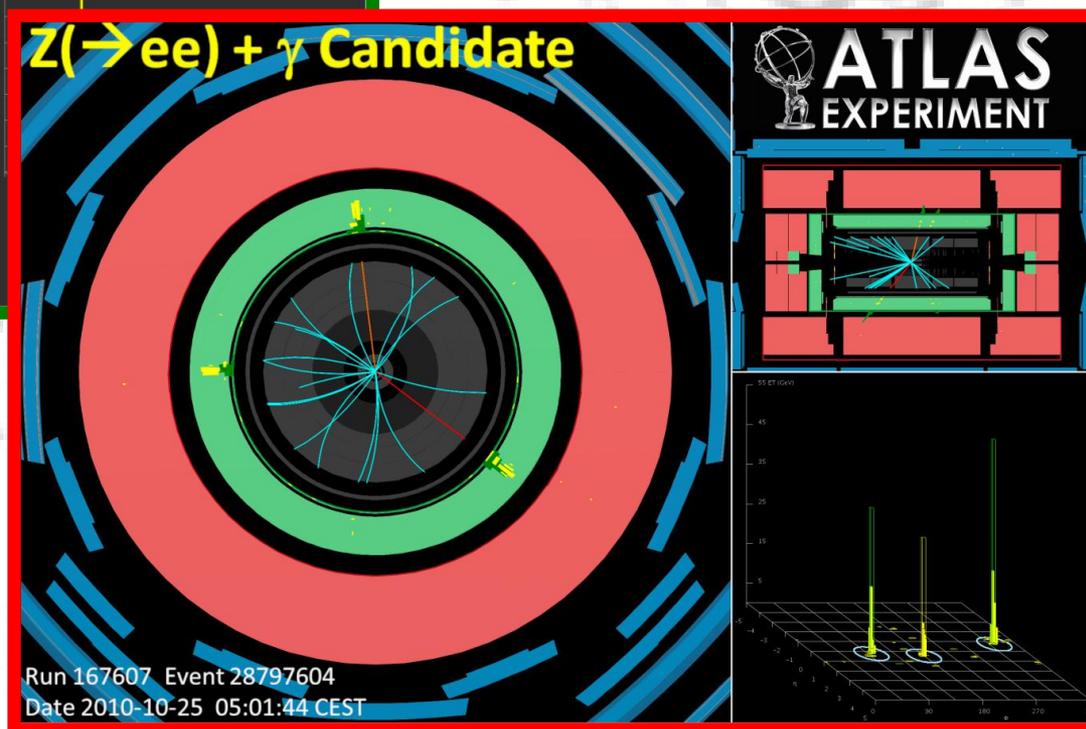
- Un quark "libre" (isolé) n'existe pas (propriété de l'interaction forte : confinement)
- Expérimentalement, on voit des **jets** = flot de particules dans la même direction :
 - Beaucoup de traces concentrées dans un cône
 - Dépôt d'énergie dans les calorimètres (électromagnétique et hadronique)



COMMENT VOIT-ON UN QUARK DANS ATLAS



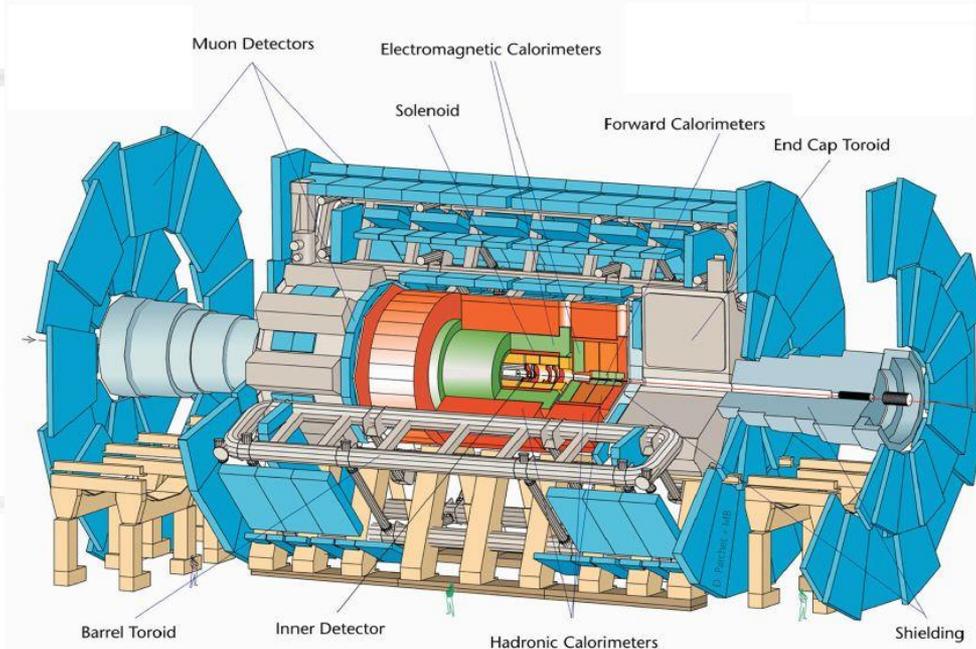
Un événement avec jets



Un événement sans jet

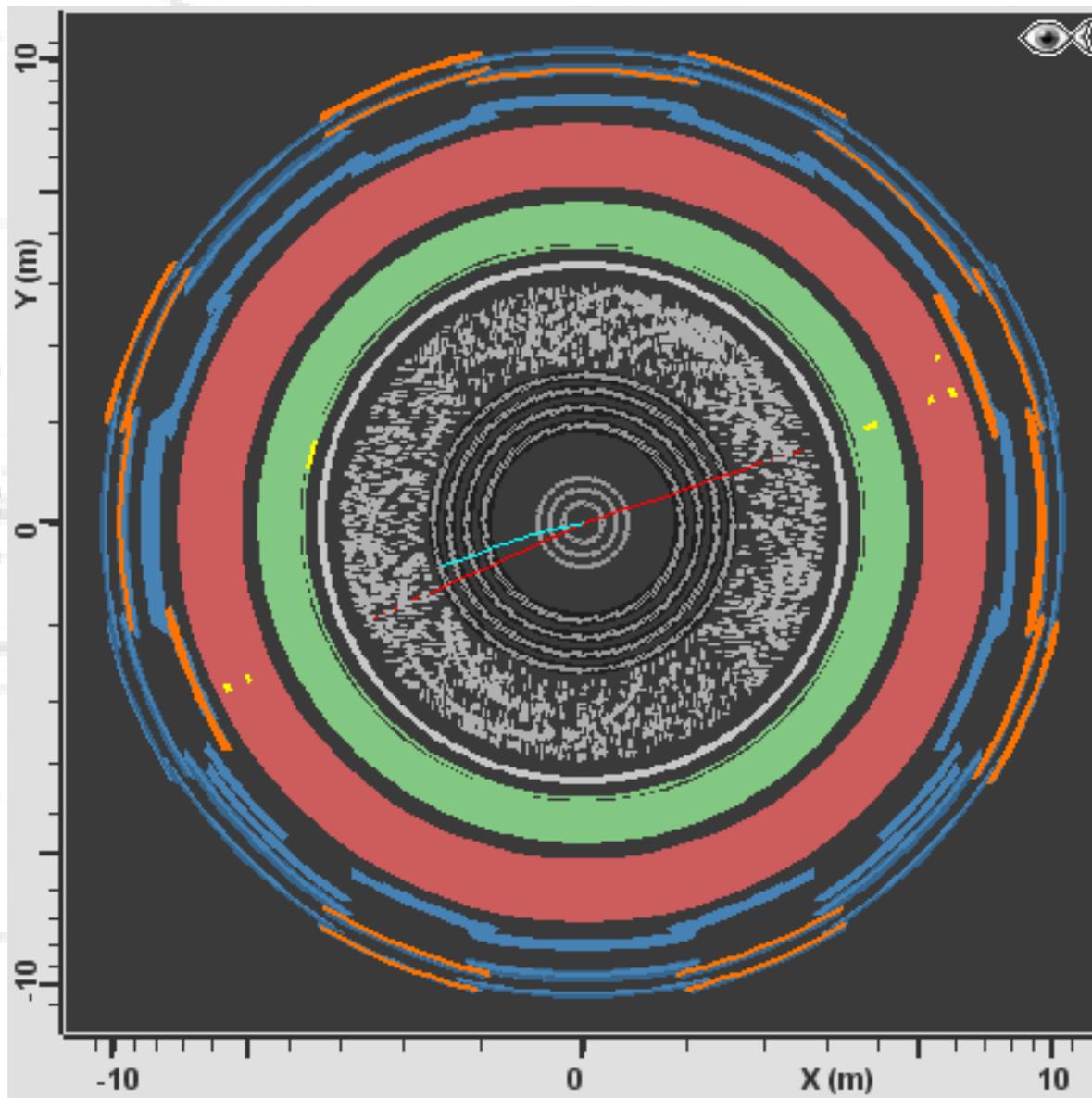
DÉTECTER LES MUONS

- Rappel : les muons sont des particules semblables à l'électron, en plus massifs.
- 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**.



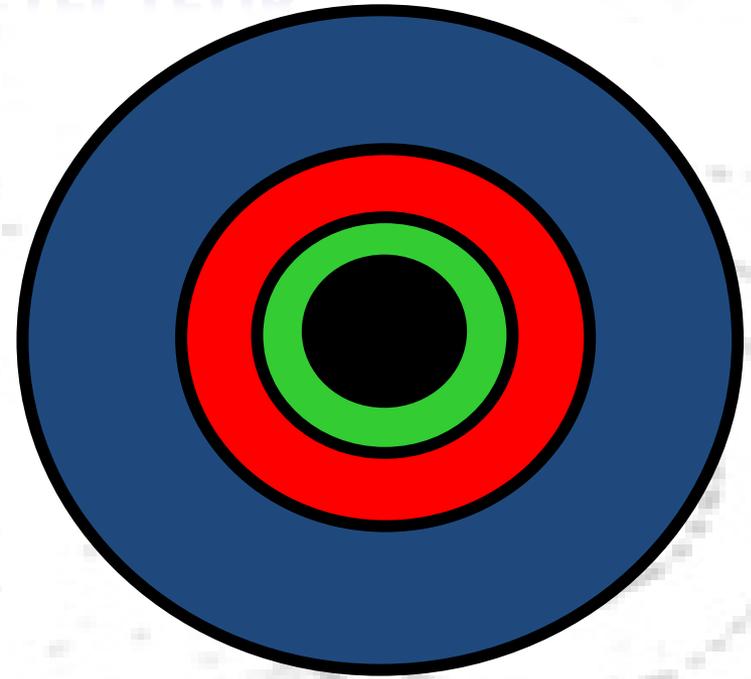
Système à muon en bleu

EXEMPLE



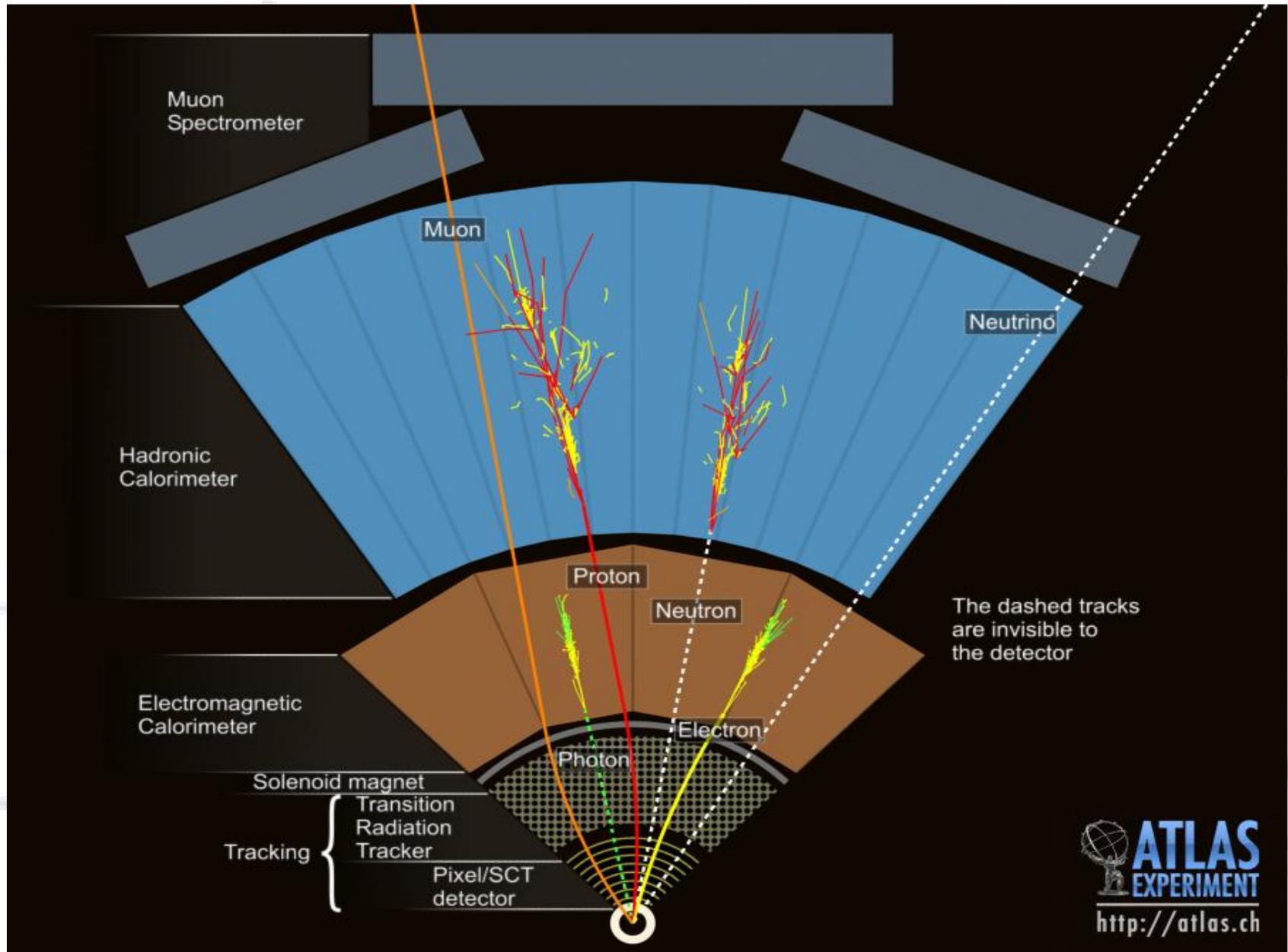
STRUCTURE GÉNÉRALE D'UN DÉTECTEUR

- 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 électromagnétique	Calorimètre hadronique	Détecteur de muons
Photon				
Électron				
Quark/Gluon → Jets				
Muons				
Neutrinos				

RÉSUMÉ... VOIR L'APPLLET JAVA



"DEVINER" LES NEUTRINOS

- Les neutrinos
 - Sont neutres : pas de trace dans le trajectographe
 - Interagissent très peu avec la matière : pas de signal dans les calorimètres ni les détecteurs de muons
- Ils traversent donc tout le détecteur sans laisser de signal : ils sont invisibles directement pour nous.
- Cependant des méthodes indirectes existent pour essayer de savoir si un événement contient un neutrino.

CONSERVATION DE L'IMPULSION

- Impulsion ou quantité de mouvement : $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
- Conservée dans les réactions entre particules :

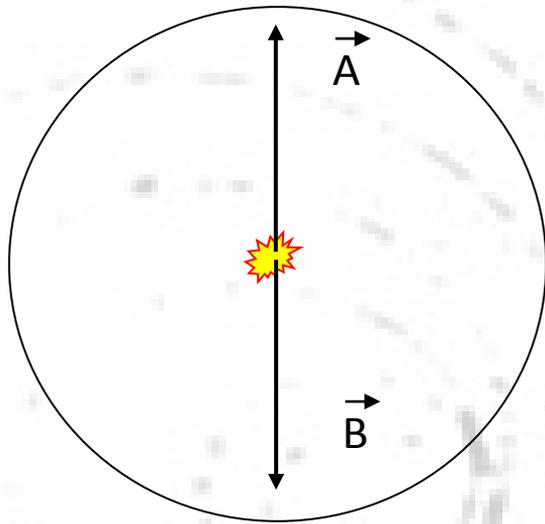
Exemple : Réaction : $1+2 \rightarrow a+b$

Conservation de l'impulsion

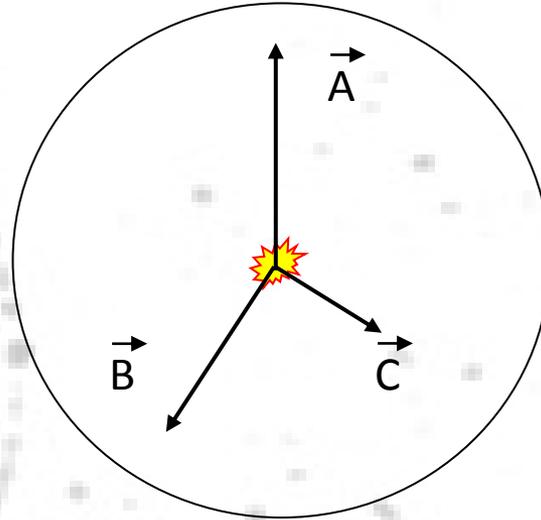
$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_a + \vec{p}_b$$

- Problème au LHC : on connaît seulement l'impulsion des protons, mais ce ne sont pas les protons qui régissent, ce sont leurs constituants dont on ignore l'impulsion
- Parade : les constituants ne bougent pas dans le plan **perpendiculaire** au faisceau \rightarrow **impulsion transverse** initiale nulle

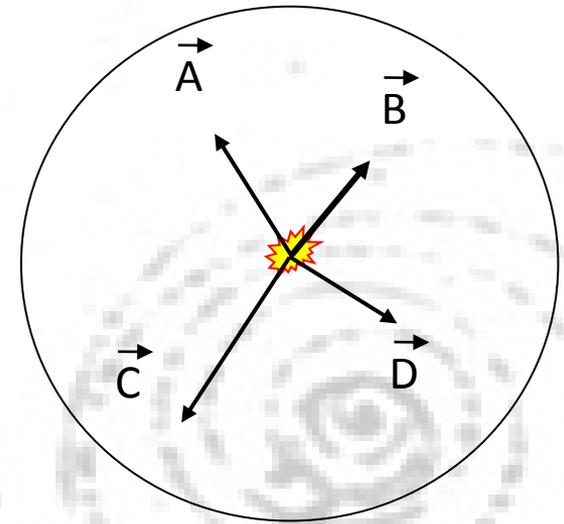
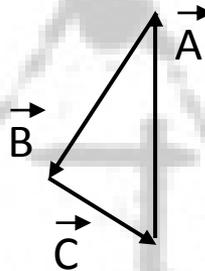
L'ÉNERGIE TRANSVERSE MANQUANTE



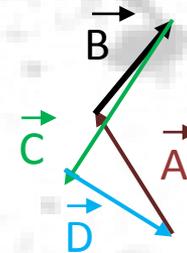
$$\vec{A} + \vec{B} = 0$$



$$\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} = 0$$

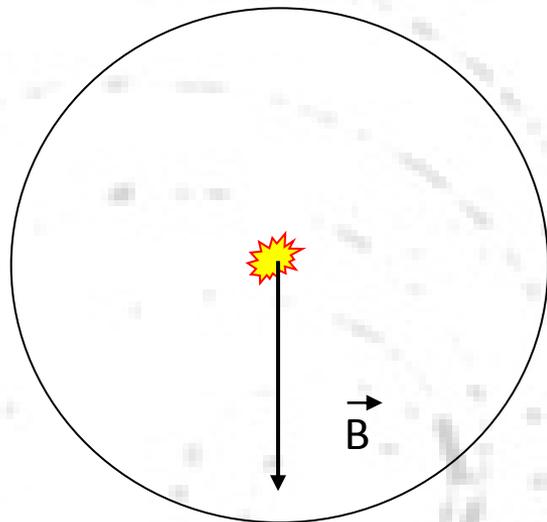


$$\vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = 0$$

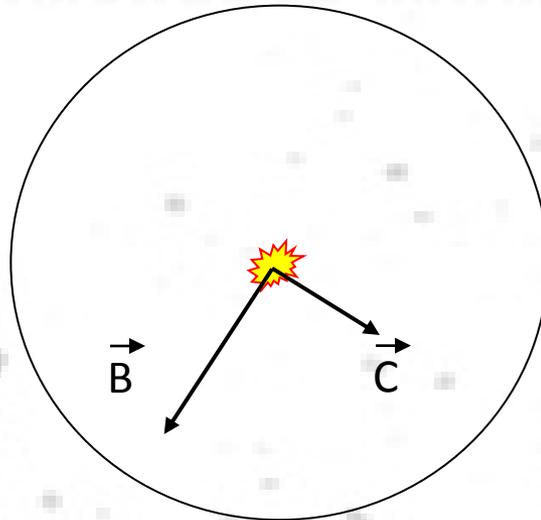


- En général, on ne sait pas quelle fraction de l'énergie du proton est utilisée donc on ne peut pas utiliser la conservation de l'énergie
- Cependant, dans le plan perpendiculaire aux faisceaux (le plan transverse), il n'y a pas de mouvement : **conservation de l'impulsion dans le plan transverse** au faisceau

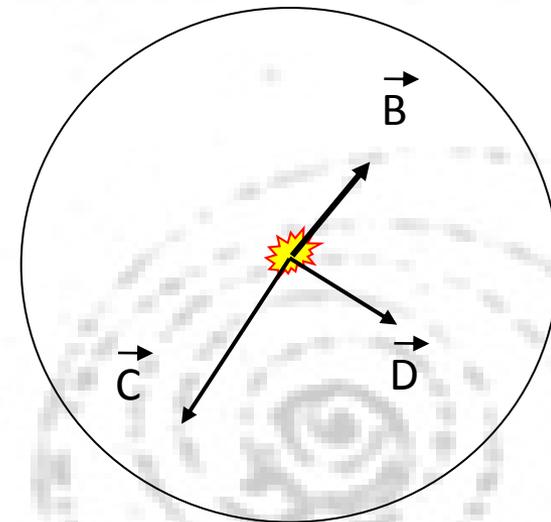
L'ÉNERGIE TRANSVERSE MANQUANTE



$$\vec{B} \neq 0$$



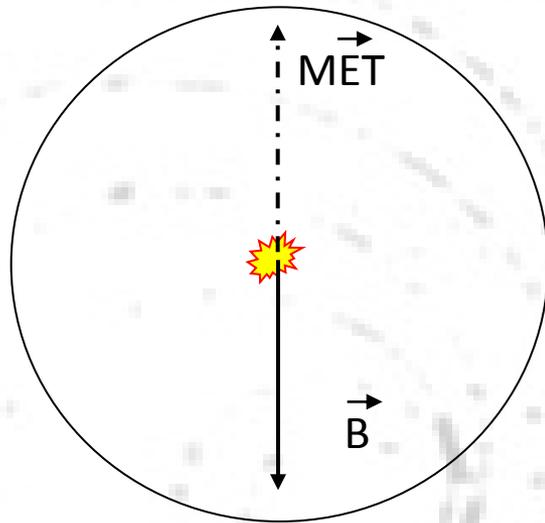
$$\vec{B} + \vec{C} \neq 0$$



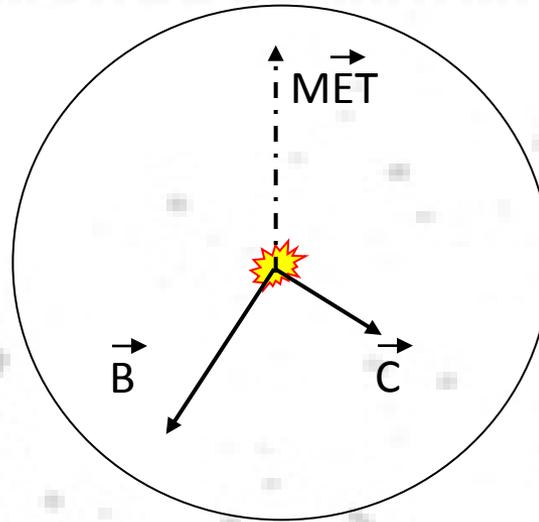
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} \neq 0$$

- Si la particule A est un neutrino l'impulsion dans le plan transverse au faisceau ne semble plus être conservée

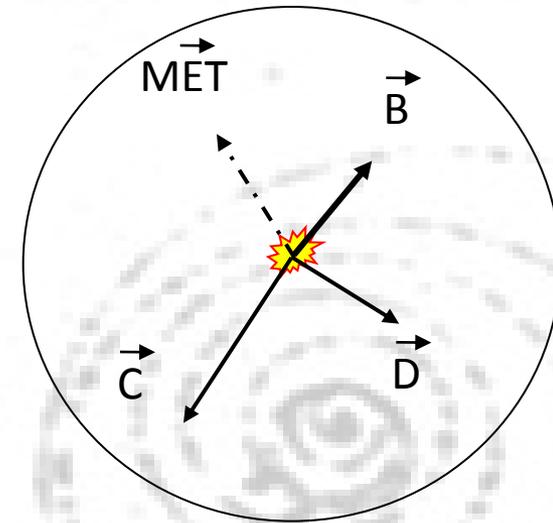
L'ÉNERGIE TRANSVERSE MANQUANTE (MET)



$$\vec{B} = -\vec{MET}$$



$$\vec{B} + \vec{C} = -\vec{MET}$$



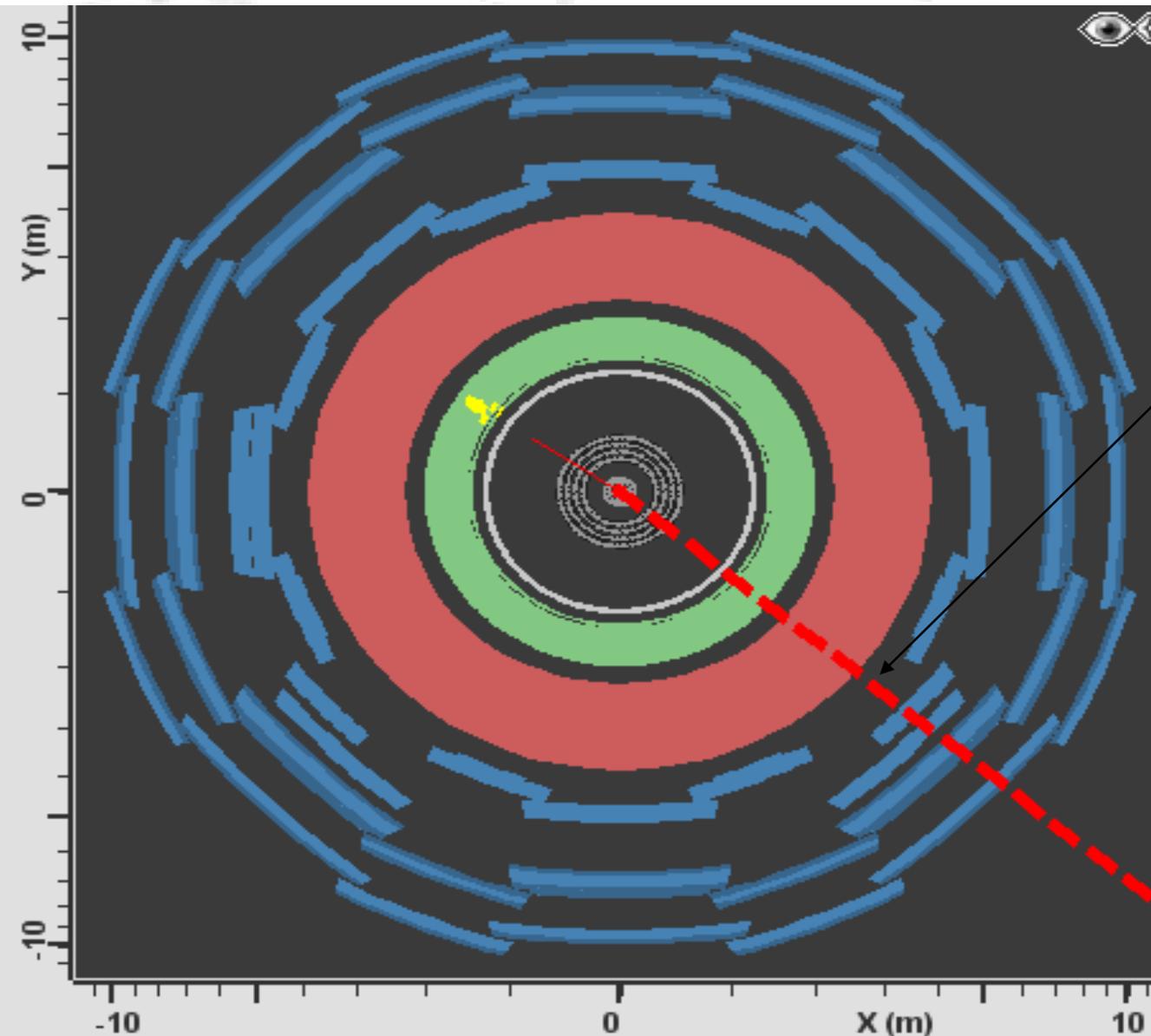
$$\vec{B} + \vec{C} + \vec{D} = -\vec{MET}$$

- La non-conservation de l'impulsion dans le plan transverse au faisceau est une indication de la présence d'un neutrino
- On définit donc l'énergie transverse manquante comme ci-dessus (ou Missing Transverse Energy)

$$\vec{MET} \neq 0 \Rightarrow \text{Présence d'un neutrino}$$

- Mais attention : il peut y avoir de la *fausse MET* due à des particules mal reconstruites.

L'ÉNERGIE TRANSVERSE MANQUANTE



Direction de l'énergie transverse manquante : peut indiquer la direction du neutrino !

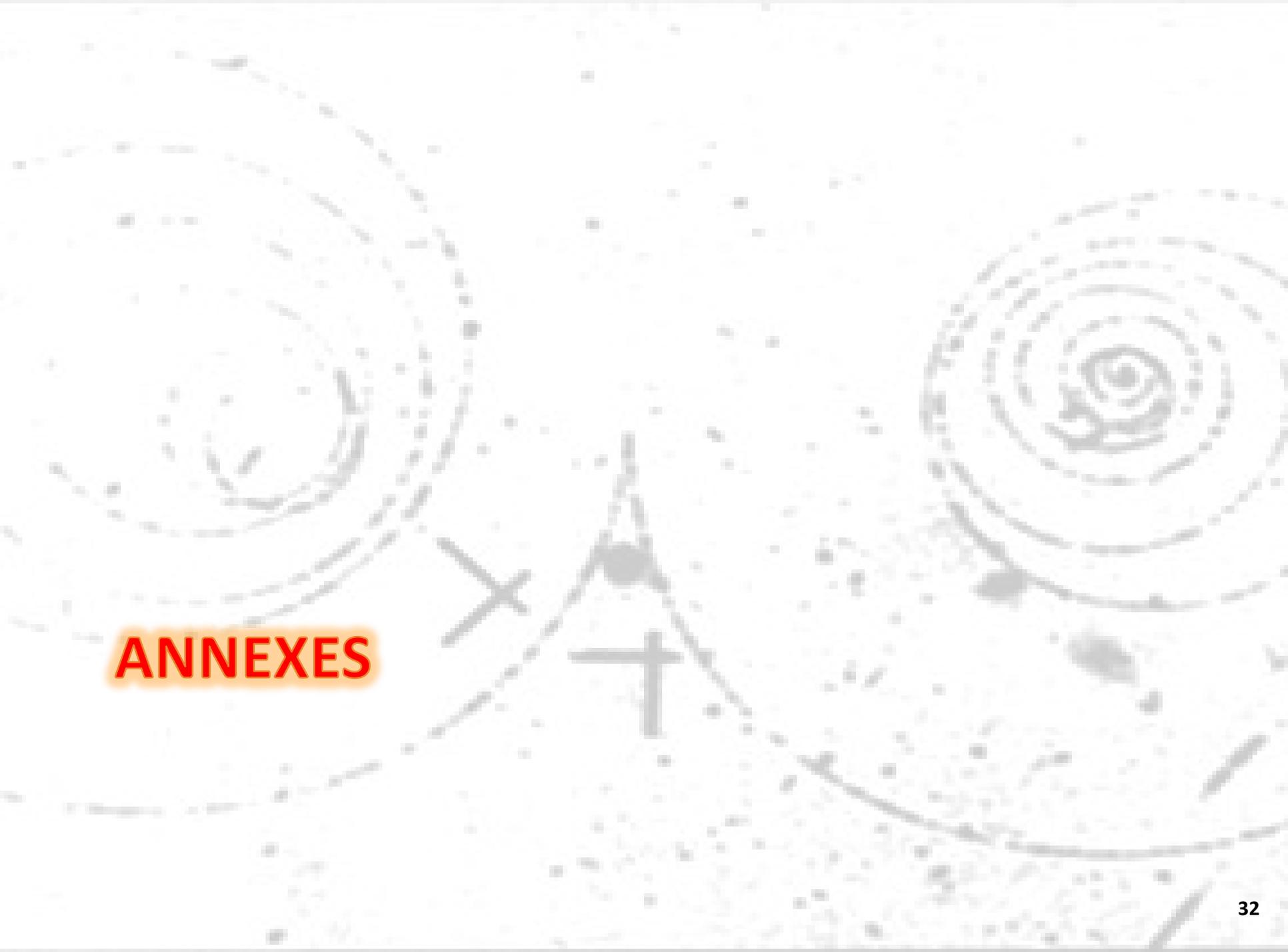
Dans cet exemple, le neutrino est dos à dos avec la particule chargée

ET LES AUTRES PARTICULES ?

- Que se passe-t-il pour les bosons W et Z par exemple ?
- Ils ont une durée de vie tellement courte qu'ils ne peuvent même pas traverser la première couche du détecteur : ils se désintègrent avant
- Mais, on connaît leurs **produits de désintégration**, ce sont eux que l'on va chercher
 - Exemple : $W \rightarrow \text{electron} + \text{neutrino}$
 $Z \rightarrow \text{electron} + \text{positron}$

CONCLUSION

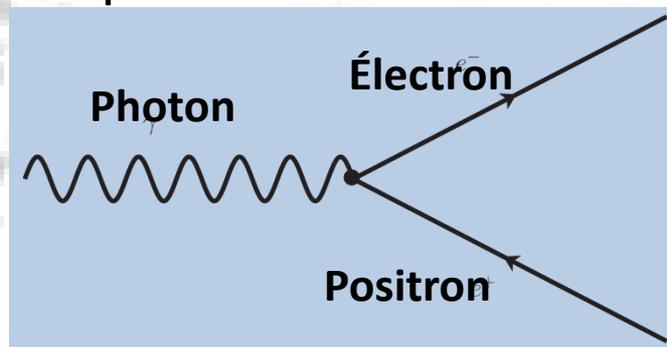
- On sait identifier directement :
 - Les photons
 - Les électrons et les positrons
 - Les muons
 - Les jets
 - Les neutrinos
- On va pouvoir retrouver toutes les autres particules grâce à leurs produits de désintégration.
- A vous de jouer !



ANNEXES

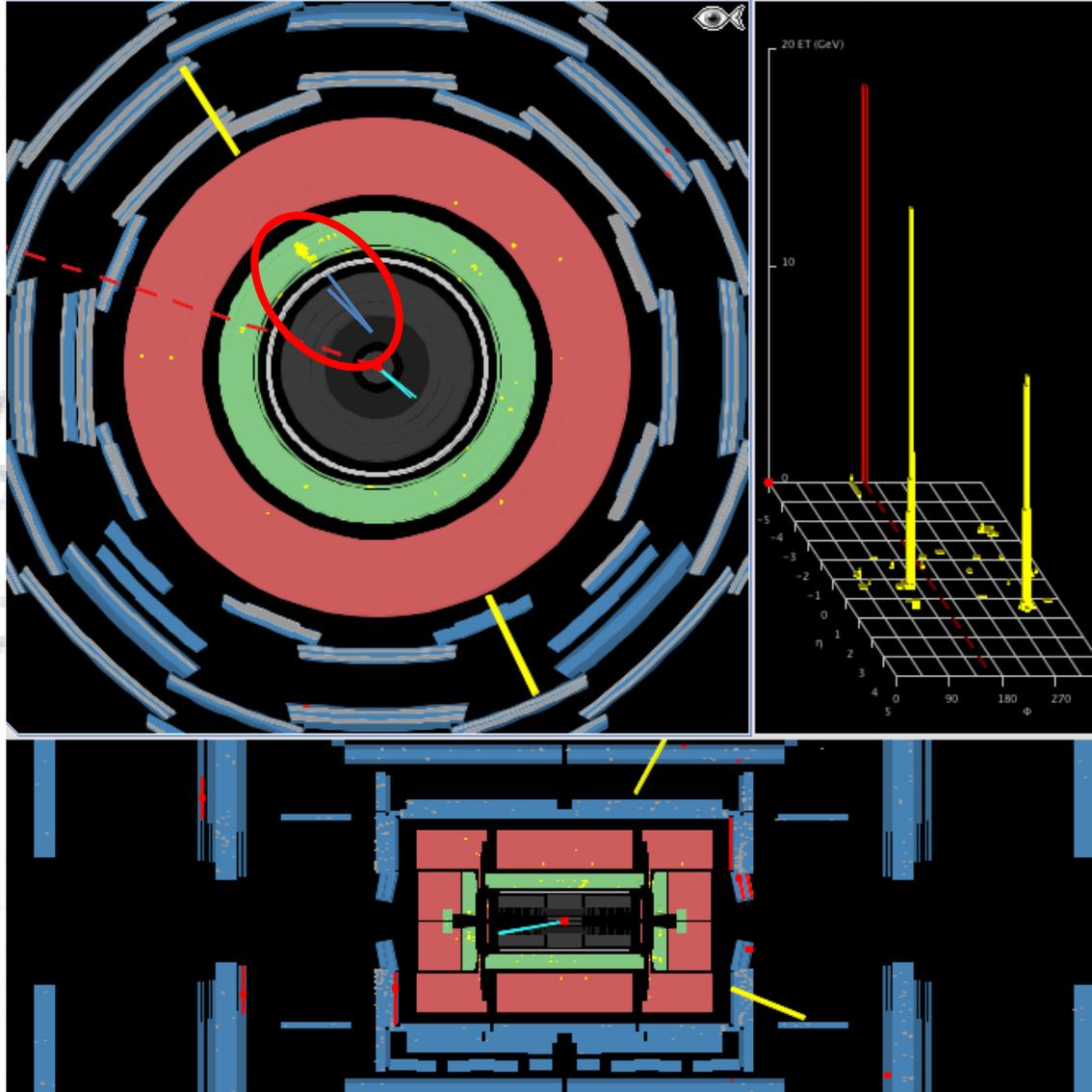
CONVERSION DE PHOTON

- 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).

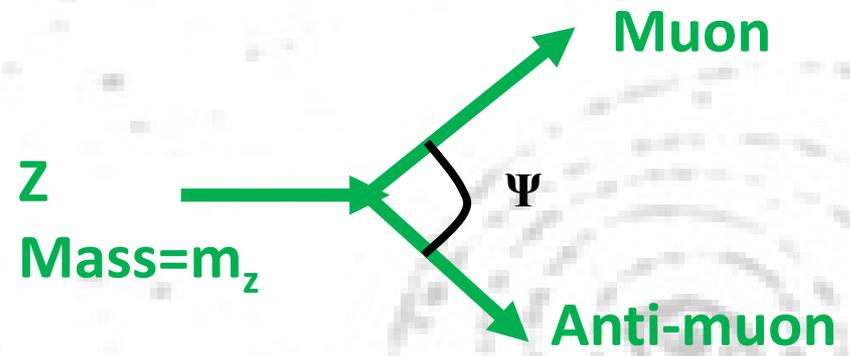
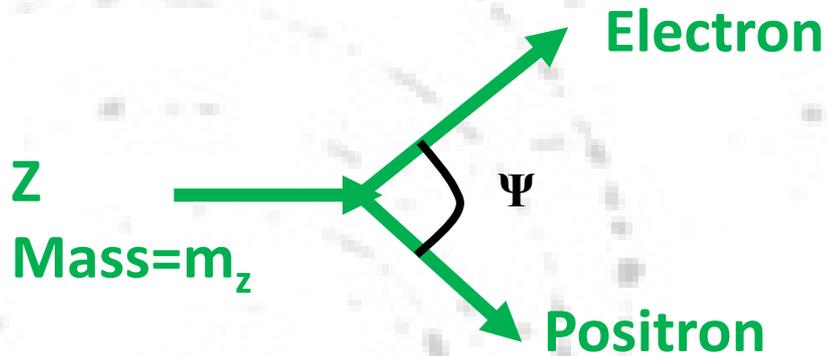
COMMENT VOIT-ON UN PHOTON CONVERTI DANS ATLAS



ET LES AUTRES PARTICULES ?

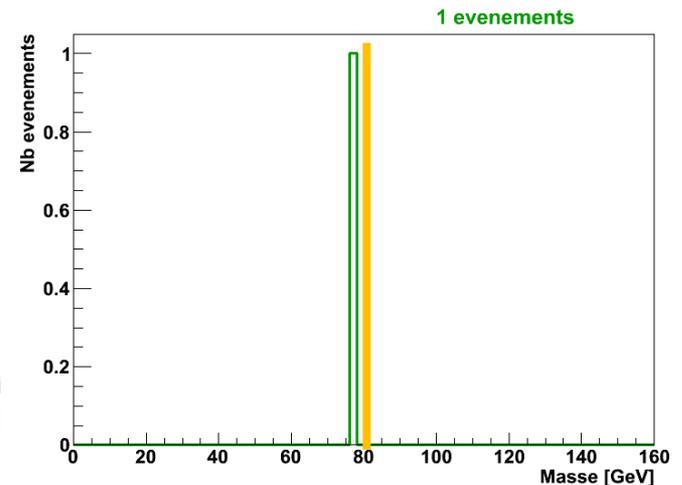
- On sait qu'il existe aussi les particules W, Z et le boson de Higgs, mais on n'en a pas parlé jusqu'à maintenant : comment les détecte-t-on ?
- Ces particules ont une **durée de vie très courte** : elles se désintègrent avant de traverser le détecteur
- Par contre, on peut voir **leurs produits de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

SIGNAL

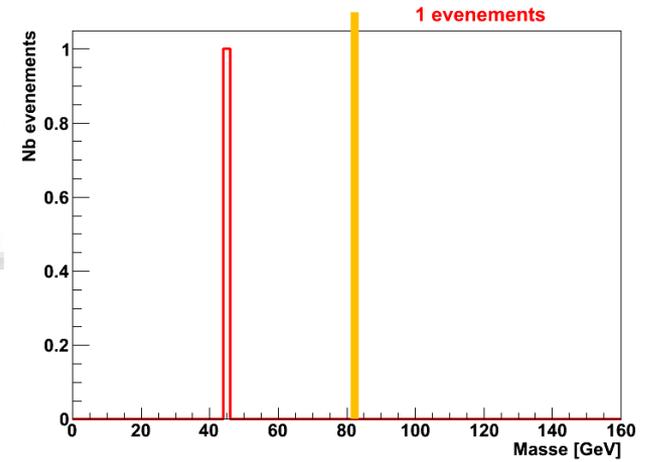
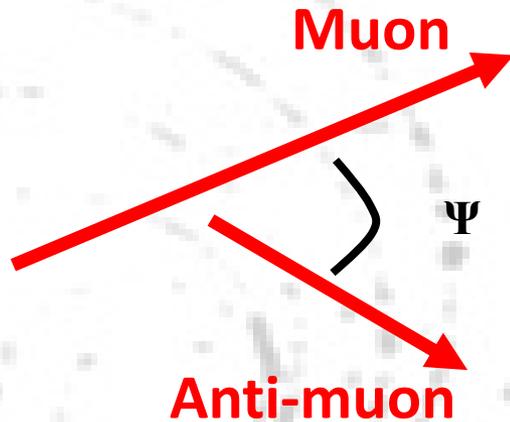


$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{(E_{e^-} + E_{e^+})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$

- 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



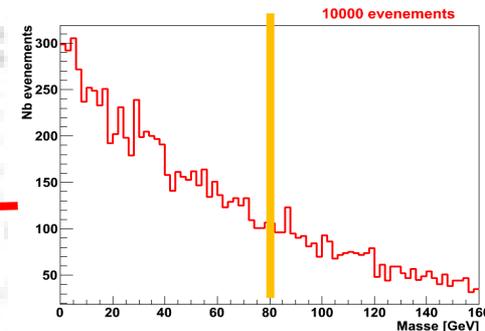
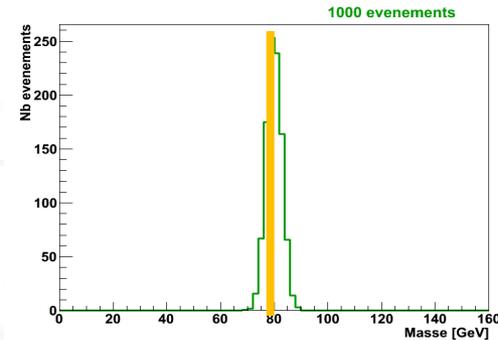
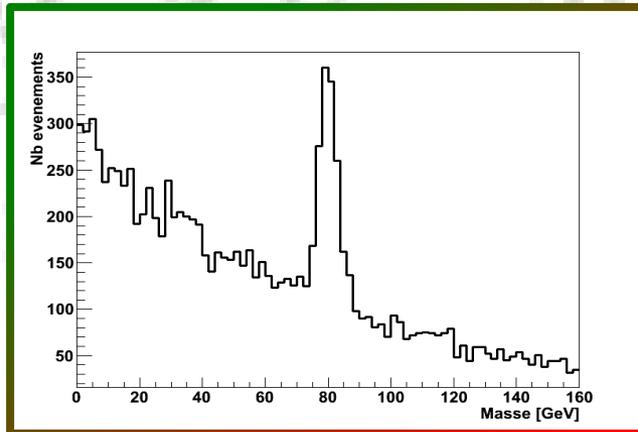
- Un muon et un anti-muon qui ne viennent pas d'un Z

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

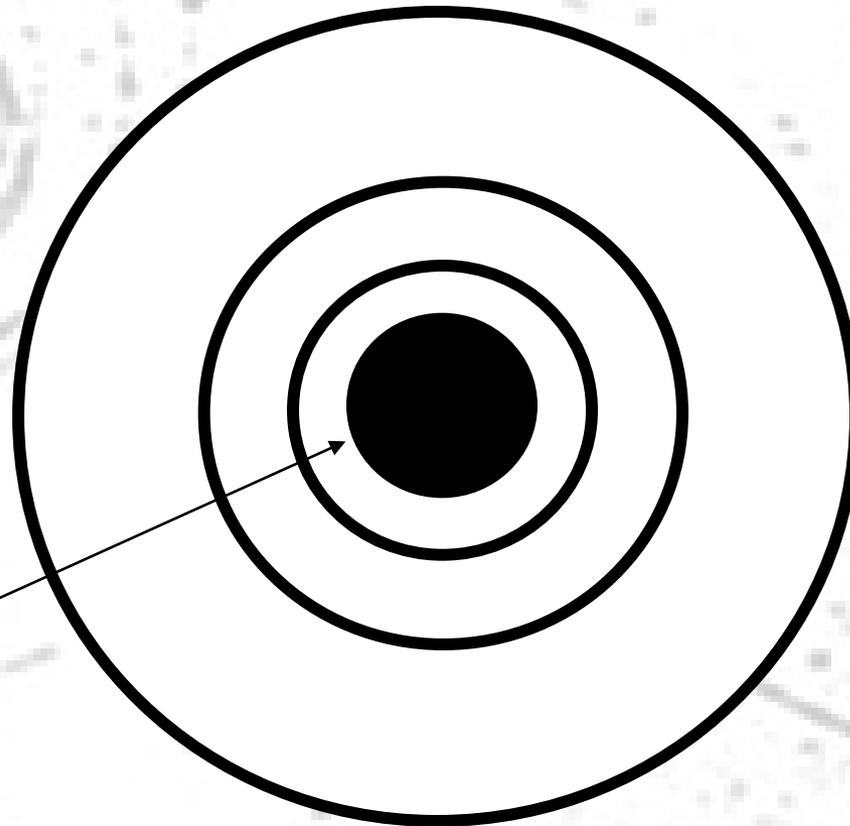
SIGNAL ET BRUIT DE FOND ENSEMBLE (CAS RÉEL)

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

Total:

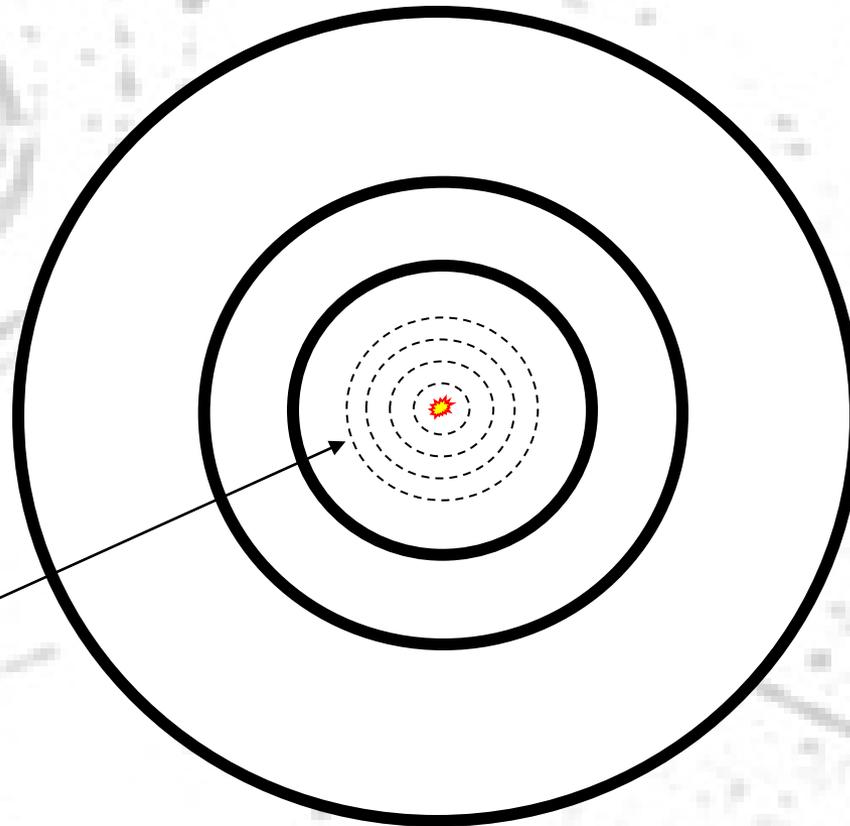


MESURE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES CHARGÉES



Le trajectographe

MESURE DE LA TRAJECTOIRE DES PARTICULES CHARGÉES



Le trajectographe