

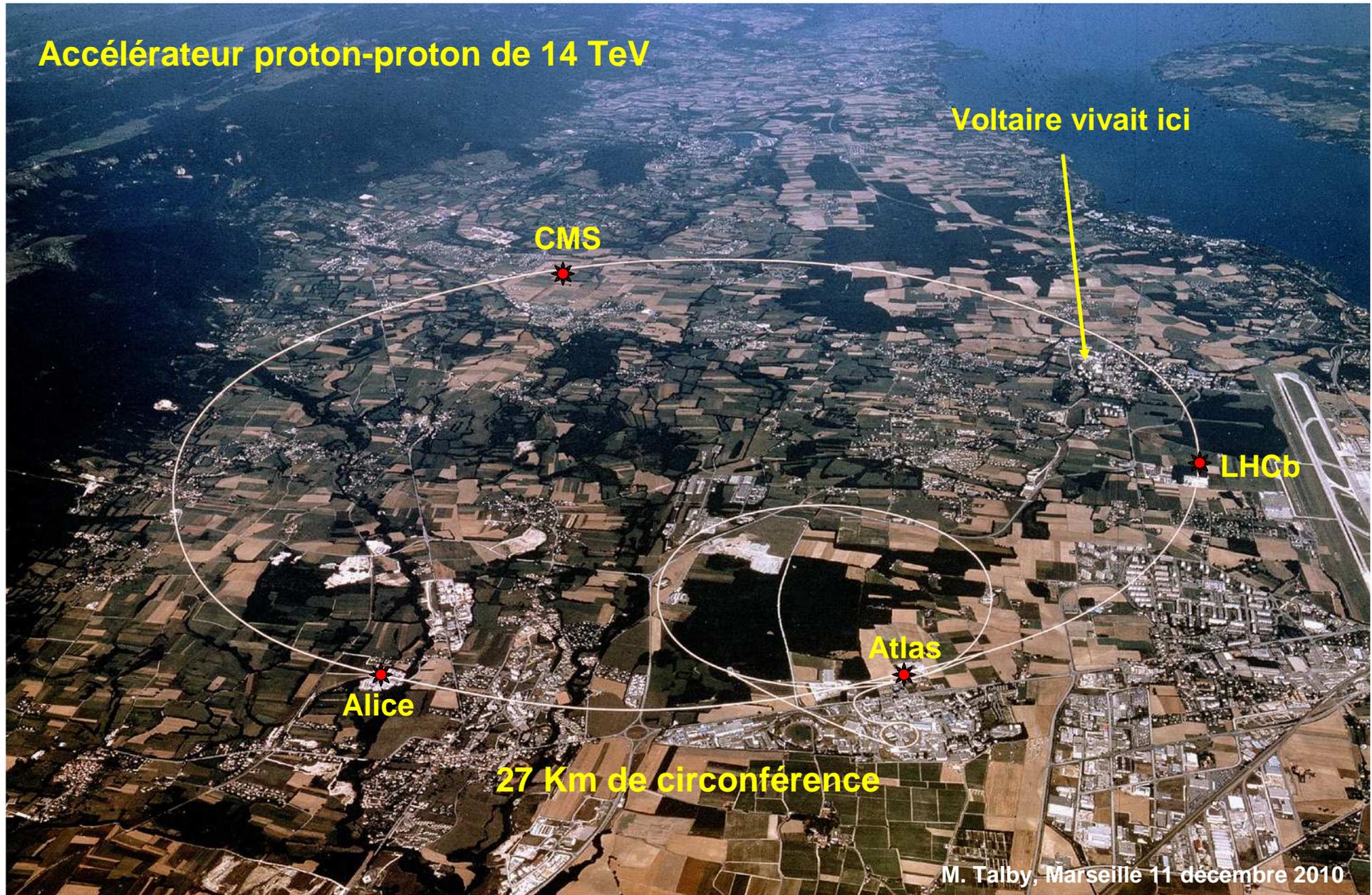


Des nouvelles du LHC

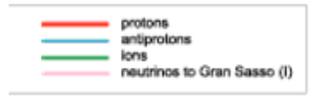
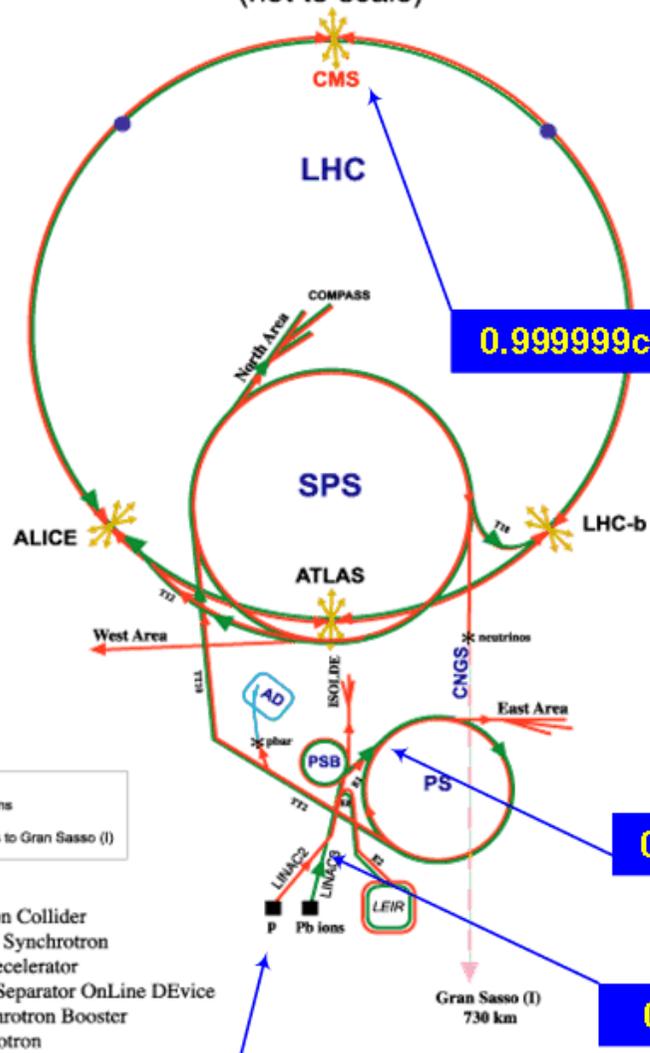
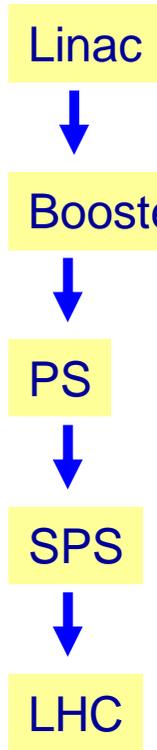
Mossadek Talby
CPPM-IN2P3/CNRS
Université de la Méditerranée

CPPM 11 décembre 2010

The Large Hadron Collider (LHC)



CERN Accelerators (not to scale)



LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: LINear ACcelerator
 LEIR: Low Energy Ion Ring
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

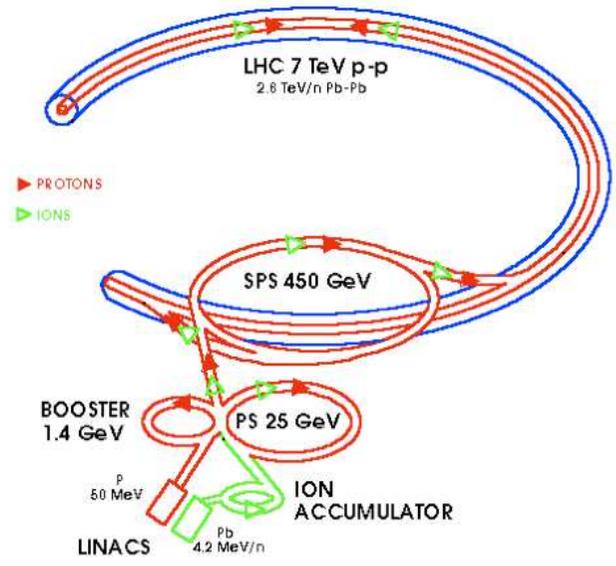
0.999999c by here

0.87c by here

0.3c by here

Start the protons out here

Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETI Div.,
 in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
 D. Manglani, PS Div. CERN, 23.05.01



Accélération par champ électrique:
 Cavités accélératrices,
 couplées à des générateurs
 radio-fréquence

Guidage par champ magnétique:

Dipôles pour guider les faisceaux.
 Quadropôles pour les focaliser.

Le LHC: un quart de siècle de travaux



| | |
|-------|---|
| 1984 | Etudes préliminaires |
| 1988 | Premier modèle d'aimant |
| 1990 | Déf. du programme R&D |
| 1994 | Approbation par le conseil du CERN |
| 96-99 | Fabrication des aimants prototypes dans l'industrie |
| 1998 | Début du génie civil |
| 2003 | Début des préparatifs dans le tunnel |
| 05-07 | Installation des aimants dans le tunnel |
| 2007 | Essai du premier secteur du LHC |
| 2008 | Premier essai avec tous les Secteurs |
| 10-30 | Exploitation du LHC pour la physique |

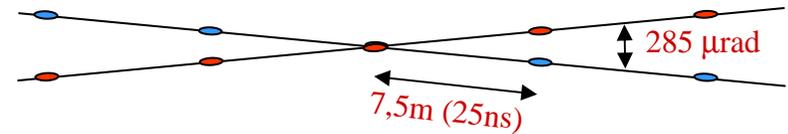
Le LHC en chiffres

- Le plus grand accélérateur au monde: **26 659 m** de circonférence
- Le plus grand système cryogénique jamais construit: **120 t** d'hélium superfluide pour maintenir les aimants dipolaires à **1,9K**
- Nombre total d'aimants: **9593** dont **1232** aimants **dipolaires**, **392** aimants **quadripolaires**, ... etc
- Champ magnétique max. dans les dipôles: **8.33 T**
- Bobines magnétiques dans les dipôles formées de **7600 Km** de câbles supraconducteurs en **Nb-Ti**.
- Nombre de cavités RF: **8** par faisceau
- Nombre de connexions électriques: **60 000**
- Nombre de soudures de conduites cryogéniques: **40 000**
- Vide dans les tubes de faisceaux (beam pipe): **10^{-13} atm**
- Puissance électrique nécessaire pour le fonctionnement du LHC: **120 MW**
→ pour un fonctionnement de **280j/an** → consommation **~ 800 GWh**
- Coût total (R&D + construction): **~ 3 milliards €**

Les paramètres faisceaux du LHC

(conception nominale)

| | |
|--------------------------------|--|
| Nominal protons energy | 7 TeV |
| Proton velocity | 99,999 999 1 % c |
| Nbr of proton bunches/beam | 2808 |
| Nbr of protons/bunch | $1,1 \times 10^{11}$ |
| RMS bunch length | 7,5cm |
| RMS bunch radius at IP | 16,6 μm |
| Stored energy/beam | 346 MJ |
| Beam current | 0,56 A |
| Bunch spacing | 25 ns |
| Bunch crossing (bc) rate | 40 MHz |
| Revolution frequency | 11 245 Hz |
| Design Luminosity | $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ |
| Nbr of inelastic collisions/s | 8×10^8 |
| Nbr of inelastic collisions/bc | 20 |



Nbr. of protons/bunch

Nbr. of bunches

Rev. frequency

$$L = \frac{N^2 k_b f}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

RMS beam radius at IP ($\sigma_{x,y} = 16 \mu\text{m}$)

Pour accélérer des protons à une vitesse proche de celle de la lumière, on a besoin d'un vide similaire à celui de l'espace intersidéral. La pression atmosphérique dans le LHC est dix fois plus faible que sur la lune.

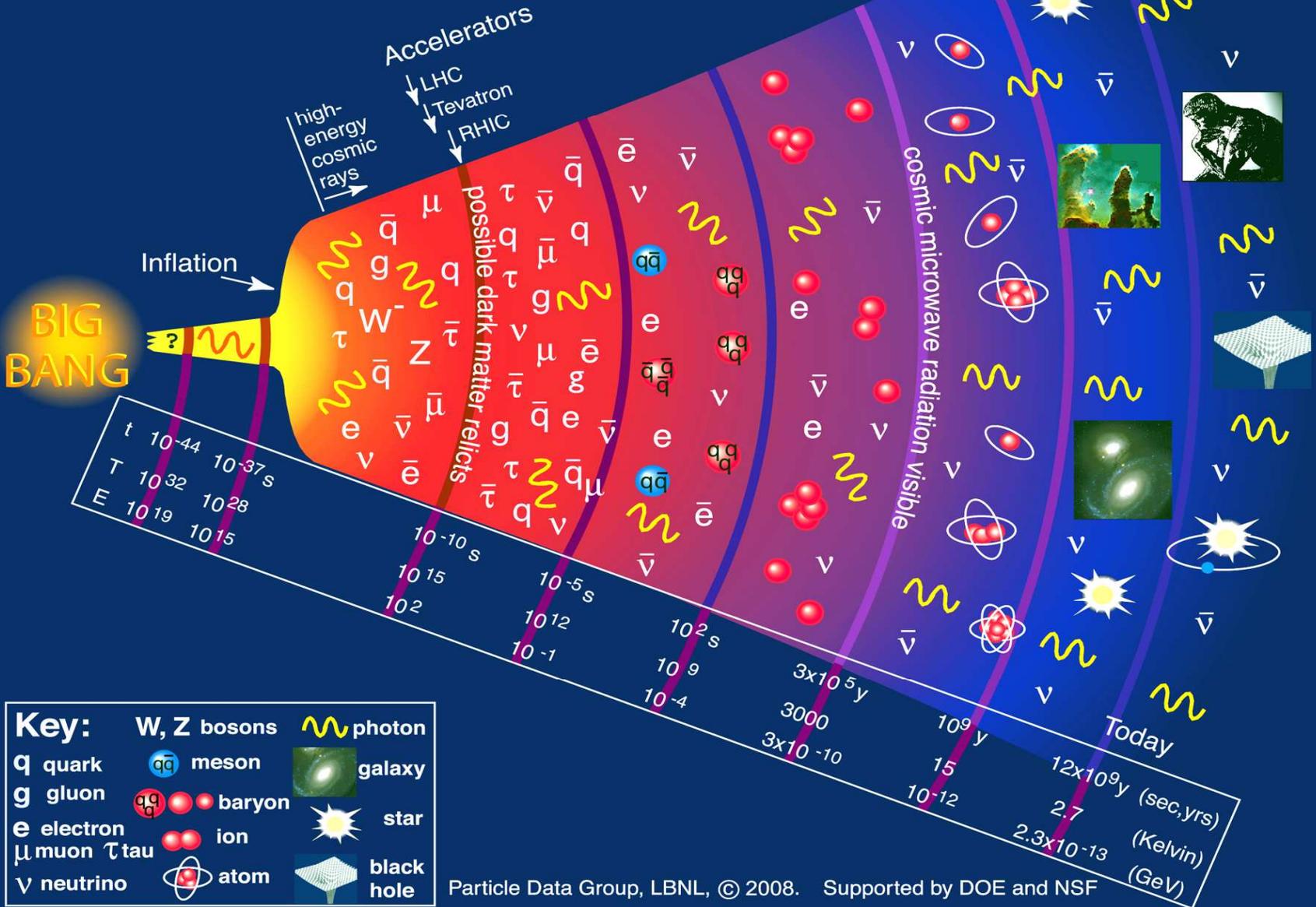
LE LHC un microscope géant

- Grâce à l'énergie très élevée des protons qui y sont accélérés, le LHC permet de sonder la matière à très petite distance ($\sim 10^{-20}$ m):
 - $\lambda = hc/E$ ($E \uparrow \rightarrow \lambda \downarrow$) : il confère aux sous constituants du proton un pouvoir de résolution très élevé.
- Il permet de créer les conditions de température et de densité d'énergie qui ont prévalu aux tout premiers instants de notre univers.
 - $E = mc^2$ ($E \uparrow \rightarrow m \uparrow$) : créer/accéder aux particules de grandes masses
 - étude de la physique des premiers instants de l'univers
 - accès aux conditions initiales qui ont gouverné son évolution ce qui permet de comprendre l'infiniment grand.

But ?

- Connaître les constituants fondamentaux (primordiaux) de l'univers.
- Comprendre les forces et les mécanismes qui gouvernent leurs interactions
- Formaliser et décrire les lois fondamentales de l'univers dans un cadre théorique unifié.

History of the Universe



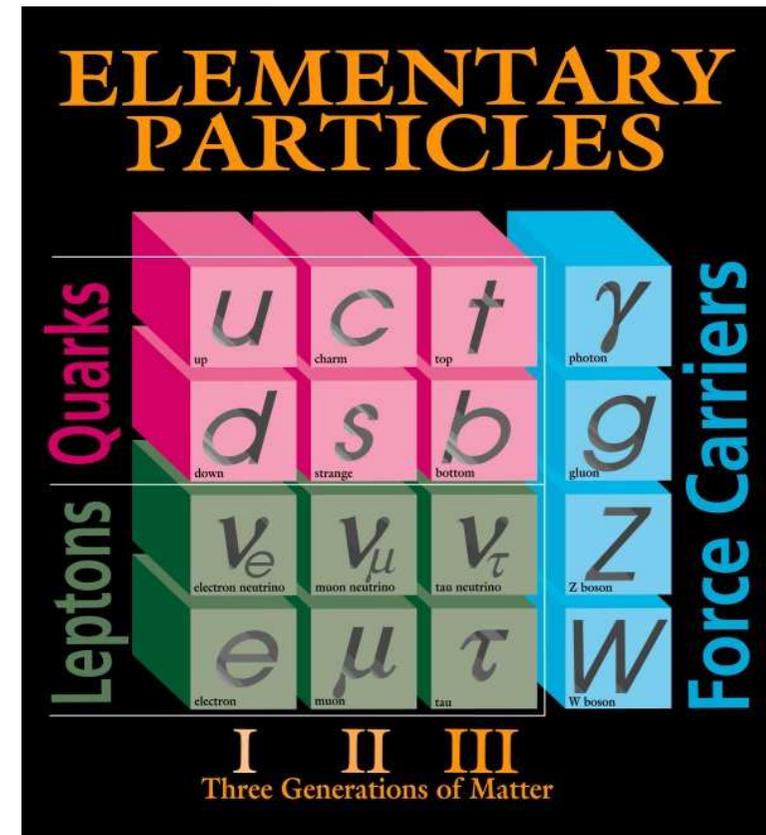
Etat actuel de nos connaissances en physique des particules

Echelle ~ 100 GeV (10^{-18}m , 10^{-10}s , 10^{15}K)

- Champ de matière (Fermions):
 - 6 leptons
 - 6 quarks
- Champ d'interaction (Bosons):
 - γ : interaction électromagnétique
 - W^\pm et Z^0 : interaction faible
 - **Gluons** : interaction forte
 - interaction gravitationnelle: **négligeable à l'échelle électrofaible.**

Remarque: Toute nos connaissances actuelles sont décrites dans le cadre d'un modèle théorique (Modèle Standard) qui a été vérifié et validé expérimentalement avec une très grande précision.

→ **Pièce manquante: le boson de Higgs**



Les insuffisances du Modèle Standard

→ Le Modèle Standard (MS) décrit bien le monde que nous scrutons à l'échelle de ~ 100 GeV (10^{-18} m, 10^{-10} s, 10^{15} K) mais ne l'explique pas.

Pourquoi 3 familles de quarks et de leptons ?, origine de la masse et de la disparité en masse entre fermions ?, origine de l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'Univers ?, Pourquoi notre univers est constitué de seulement 4% de matière « ordinaire » ?, quels sont les constituants de la matière et de l'énergie noires, interaction gravitationnelle ?, ... etc.



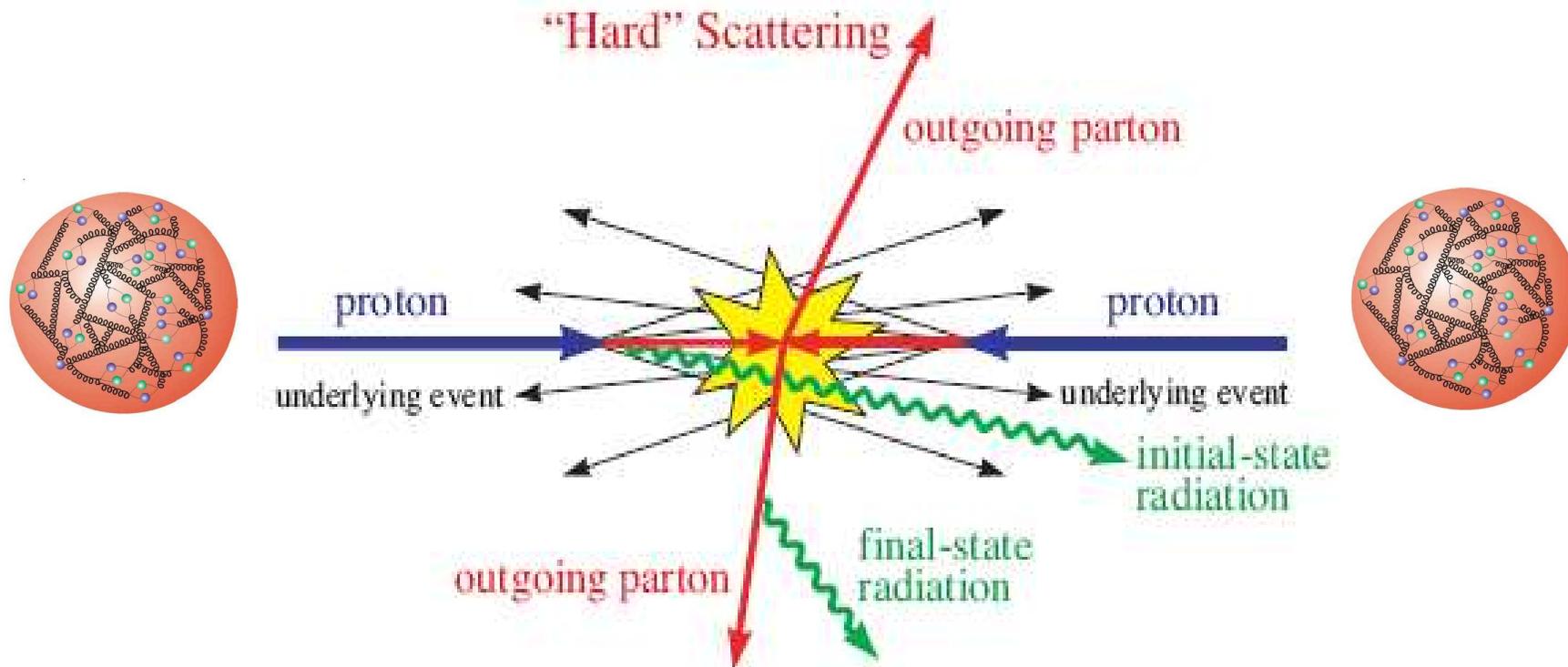
Il existe d'autre part des problèmes conceptuelles dans le MS, mais il y a aussi des indications phénoménologiques d'une physique au delà du MS.

→ MS = excellente approximation à l'échelle de ~ 100 GeV d'une théorie plus générale à découvrir à plus haute énergie → Nouvelle physique.

On s'attend à ce qu'une partie de cette nouvelle physique apparaisse à l'échelle du TeV → nécessité de construire une nouvelle machine pour explorer cette l'échelle d'énergie → LHC.

Interactions proton-proton au LHC

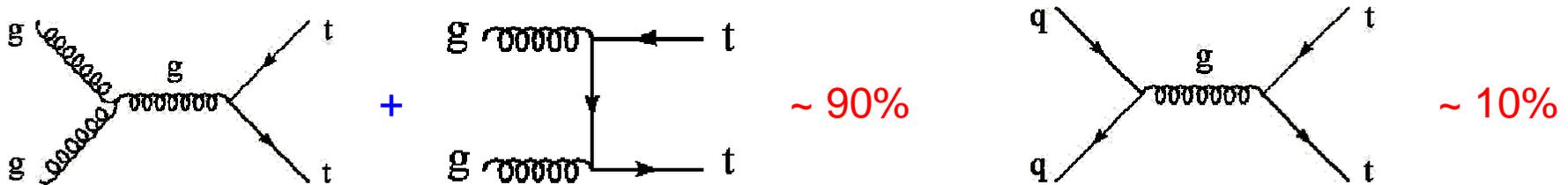
Interaction proton-proton au LHC



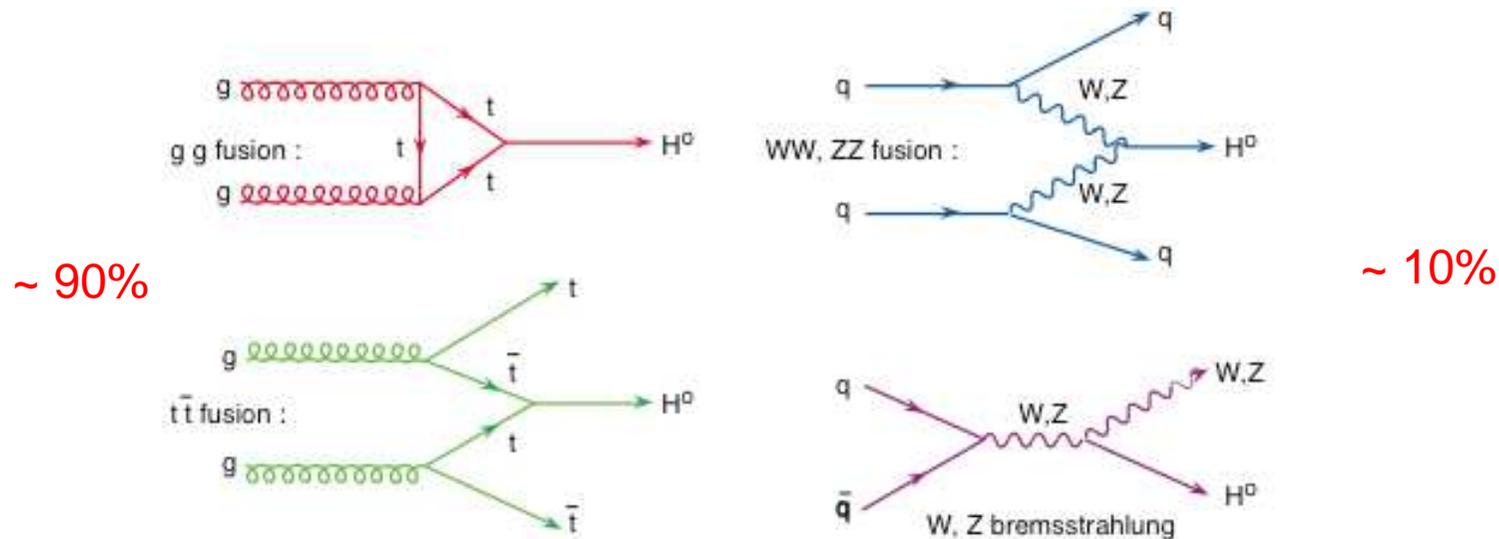
Proton: objet complexe composé de partons (quarks et gluons) décrits par des fonctions de structures (PDF): $f(x, Q^2)$

Processus de production au niveau des quarks et des gluons

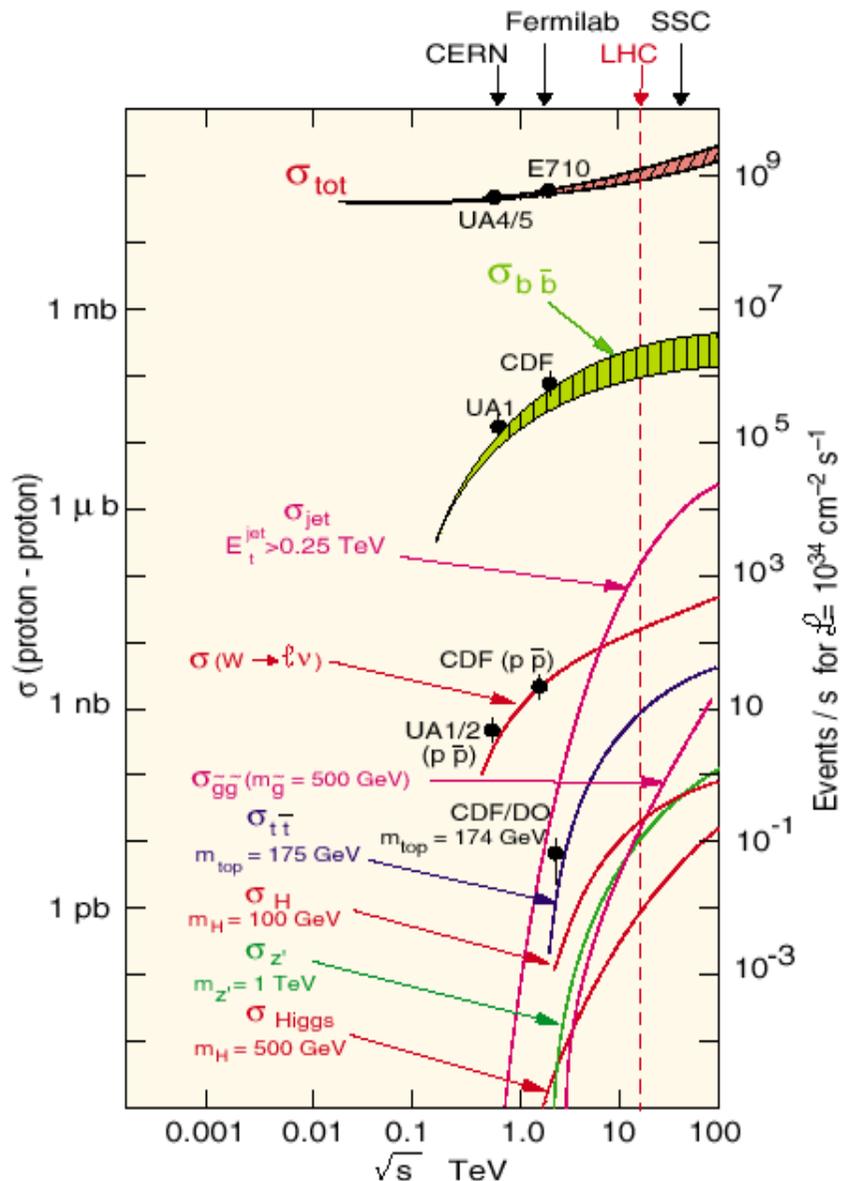
Production du quark top (interaction forte): $\sim 8/s$



Production du boson de Higgs (interactions forte et faible): $\sim 0.2/s$ pour $m_H=150$ GeV



Taux d'événements produits au LHC



Taux pour $L_{\text{int}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

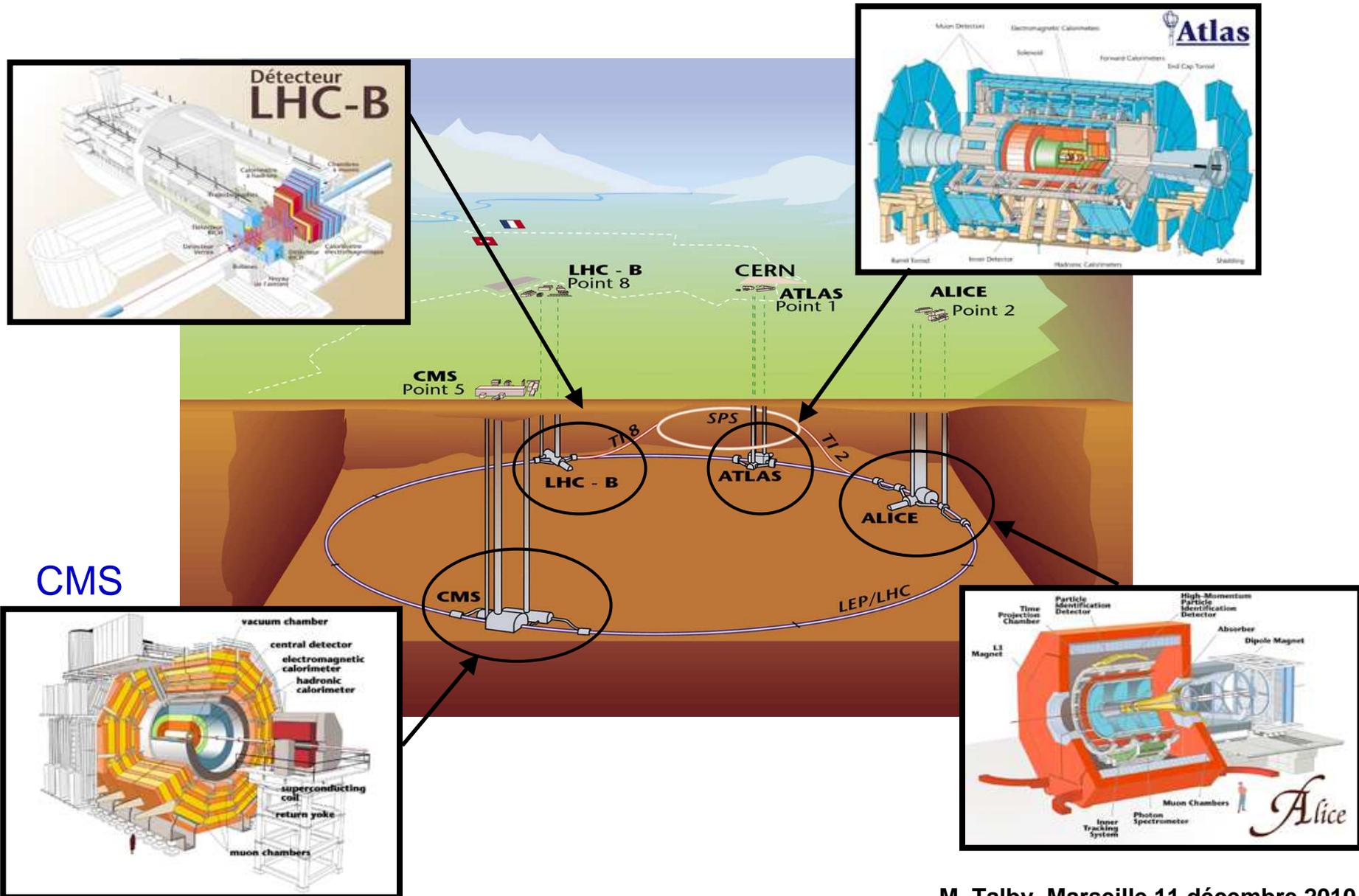
| | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| • Inelastic proton-proton reactions: | $10^9 / \text{s}$ |
| • bb pairs | $5 \cdot 10^6 / \text{s}$ |
| • tt pairs | $8 / \text{s}$ |
| • $W \rightarrow e \nu$ | $150 / \text{s}$ |
| • $Z \rightarrow e e$ | $15 / \text{s}$ |
| • Higgs (150 GeV) | $0.2 / \text{s}$ |
| • Gluino, Squarks (1 TeV) | $0.03 / \text{s}$ |

Le LHC est une usine de quark b, quark t, de bosons W et Z, ... etc
On espère aussi y découvrir le boson de Higgs et une nouvelle physique au delà du Modèle Standard.

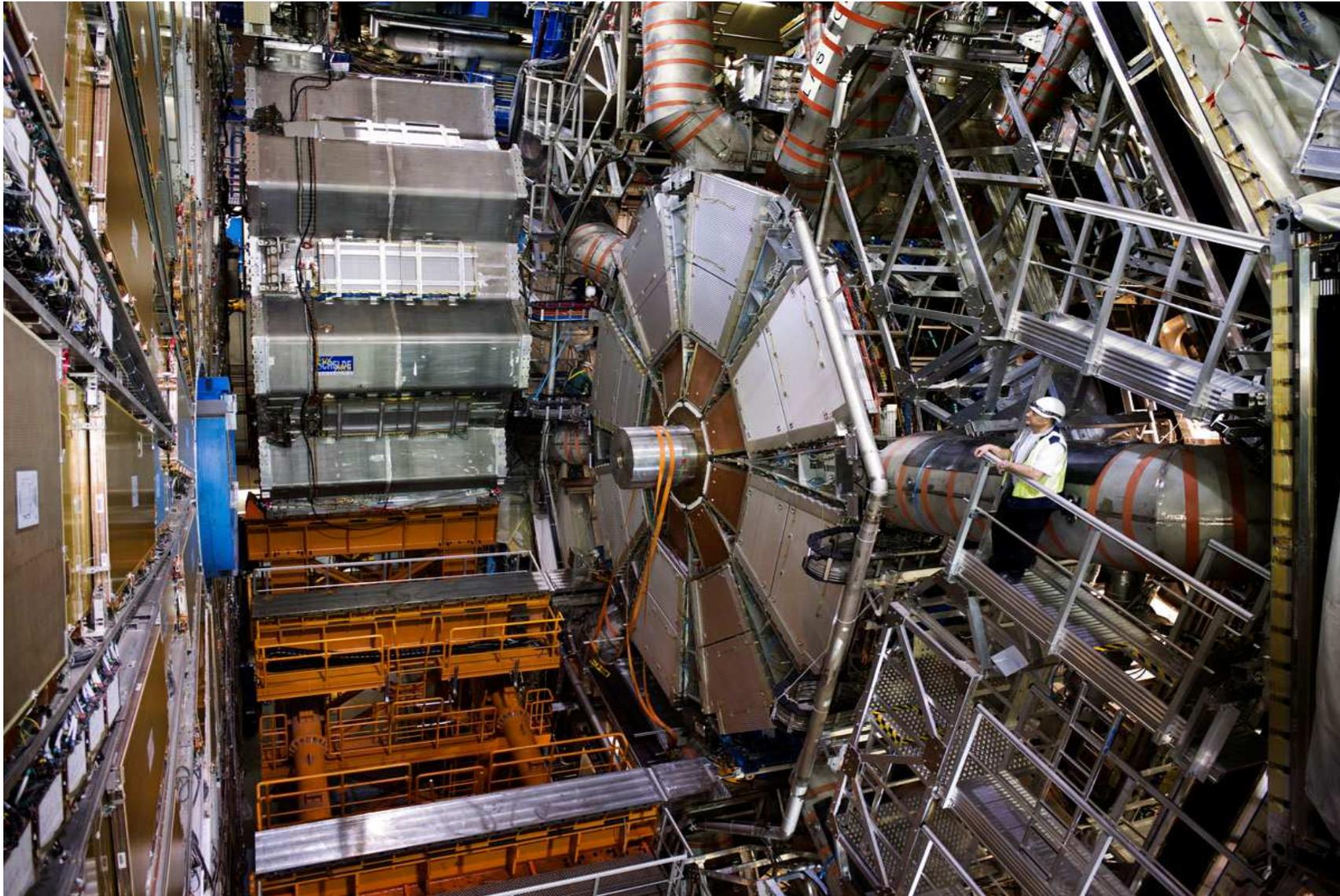
Contraintes sur les détecteurs

- Croisement entre paquets de protons toutes les 25 ns:
 - détecteurs rapides et possédant une excellente résolution en temps
- À $L_{\text{int}}=10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, on aura à chaque croisement de paquets ~ 20 collisions inélastiques produisant en moyenne ~ 1500 particules chargées et environ autant de particules neutres:
 - les détecteurs doivent avoir une excellente granularité spatiale, pour réduire les effets d'empilement → grand nombre de canaux d'électronique
- Les processus intéressants (très rares) sont noyés dans un immense bruit de fond physique (collisions inélastiques courantes: fond hadronique multi-jets):
 - les détecteurs doivent posséder une excellente capacité d'identification de tous les types de particules issues de la collision et toutes les signatures possibles (e , μ , τ , ν , γ , jets, b-jets, ...), et une rejection en ligne de l'ordre de 10^7 .
- Les détecteurs de traces chargées doivent contenir très peu de matière, afin de réduire les diffusions multiples et les interactions nucléaires avec la matière du dét.
- Les mesures doivent durer plusieurs années:
 - les détecteurs internes doivent être résistants aux radiations:
flux de neutrons ($r = 4\text{cm}$) $\sim 10^{17}\text{cm}^{-2}$ en 10 ans

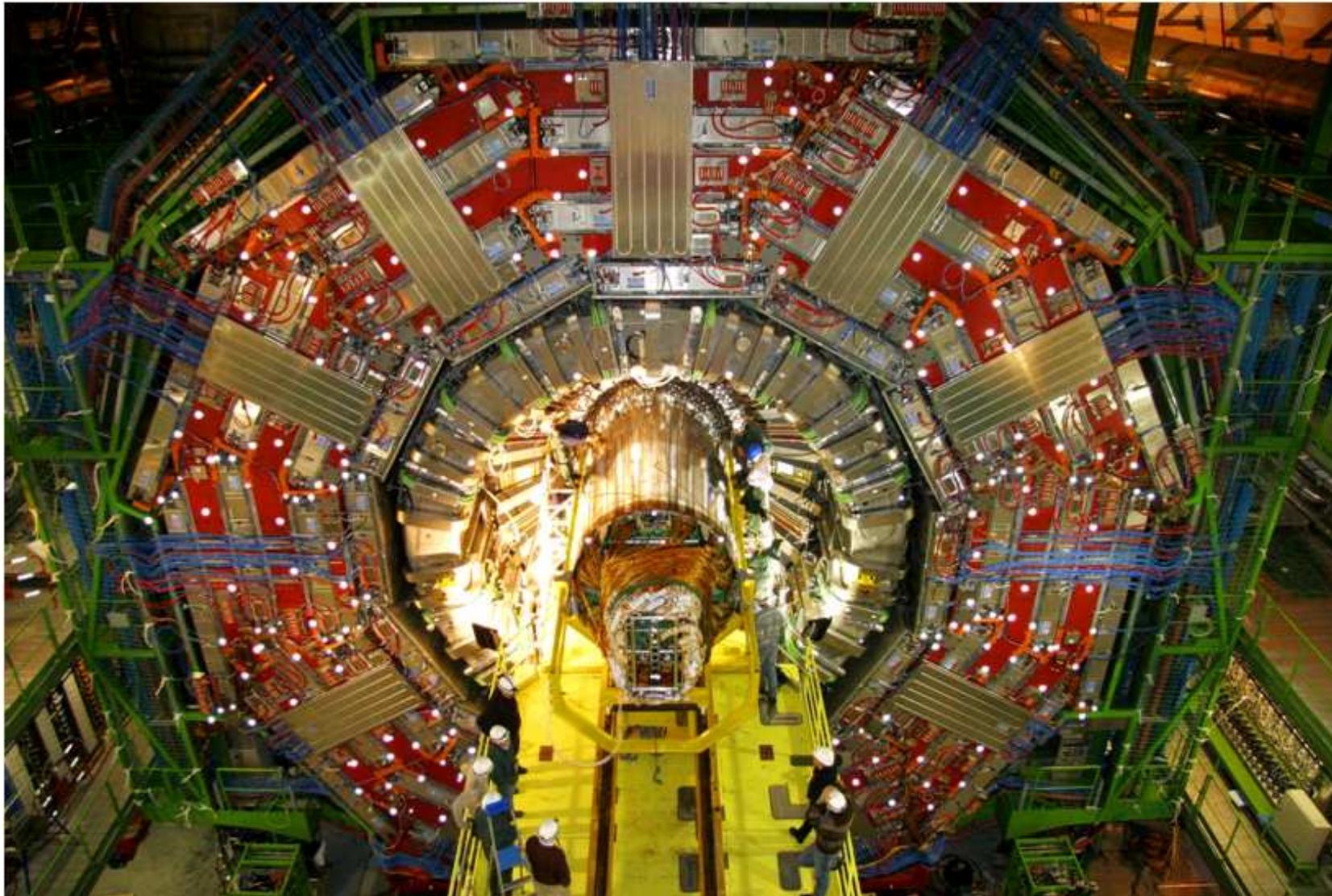
Les expériences



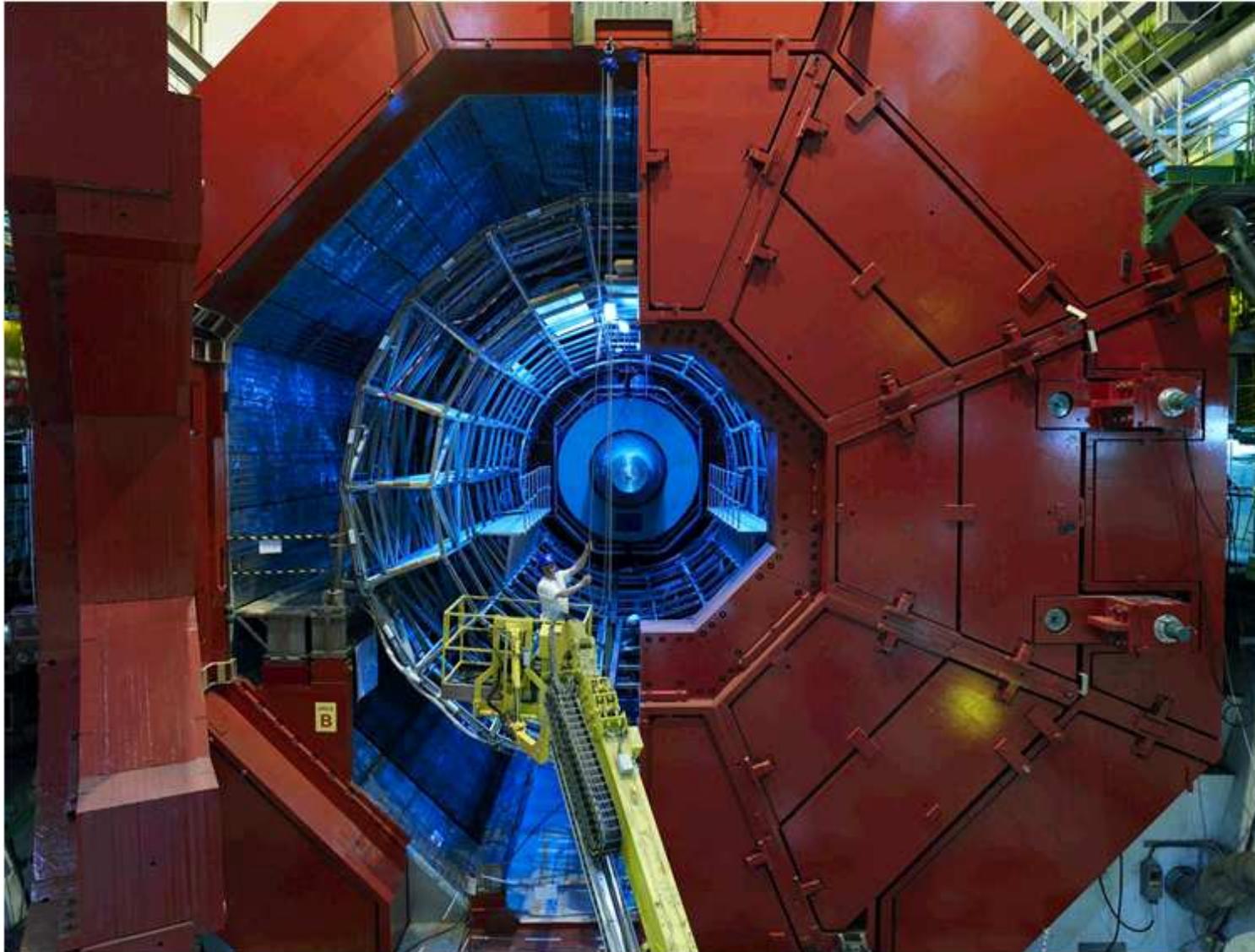
Détecteur ATLAS



Détecteur CMS



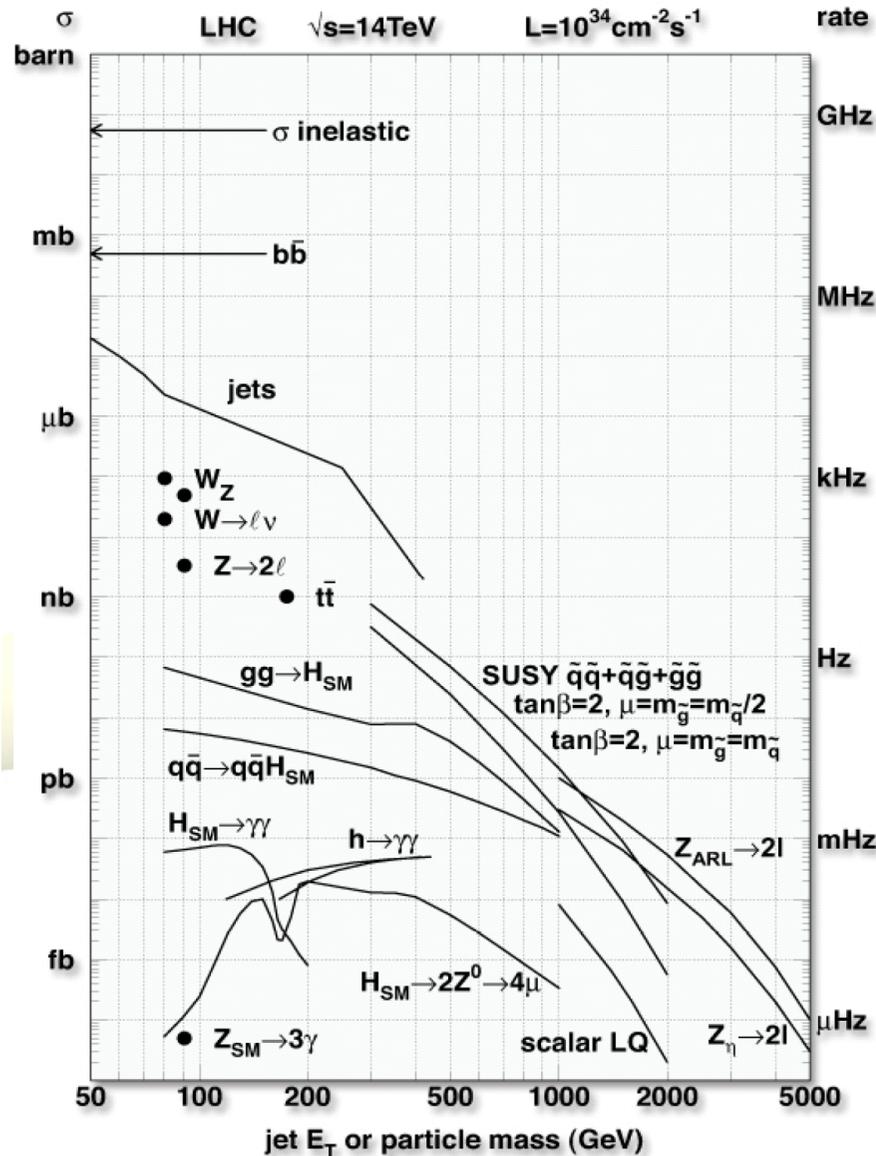
Détecteur ALICE



Détecteur LHCb



Taux d'événements produits dans les collisions protons-protons



$$L_{\text{inst}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}, \sqrt{S} = 14 \text{ TeV}$$

Taux d'événements: **~ 1GHz**

Taille moyenne d'un événement: **1.5 Mo**

→ **~ 1.5 Po/sec**

Abordable: **300 Mo/s (~6 Po/an)**

→ Taux d'acceptation: **200 Hz**

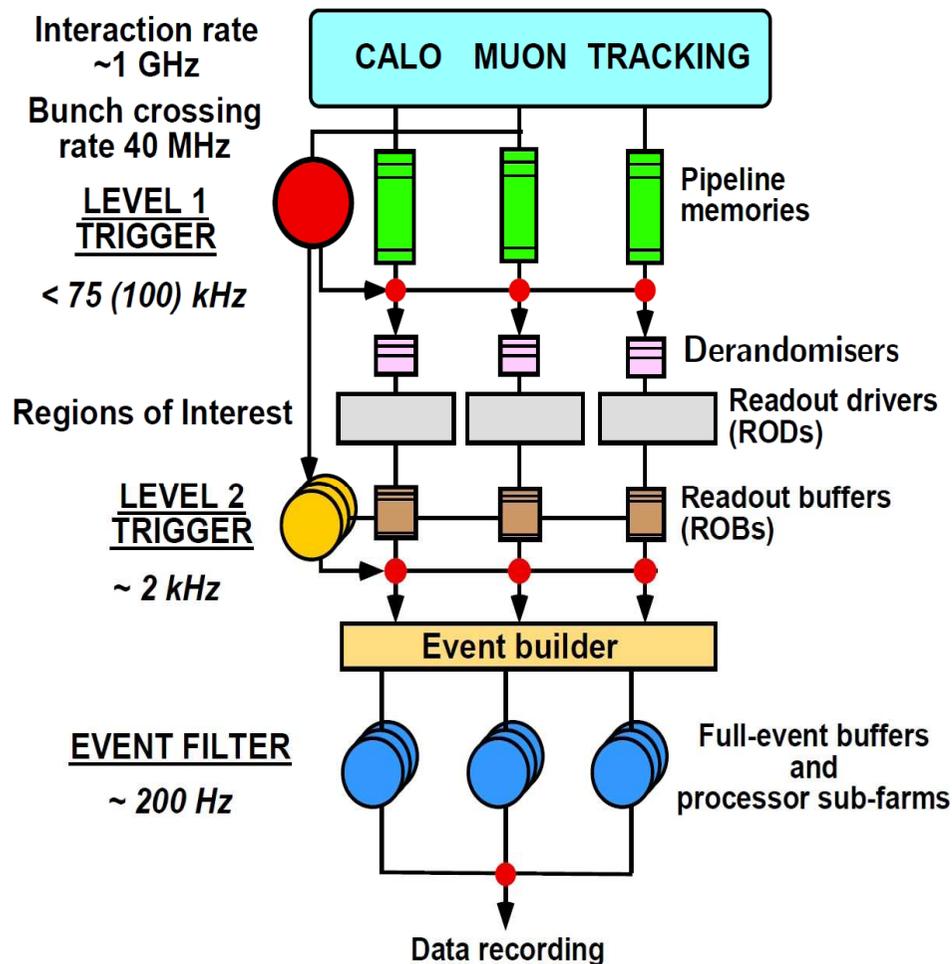
→ Rejection en ligne: **99,999997% !**

Un puissant filtre en ligne est donc nécessaire.

1 Po = 10^{15} octets \equiv une pile de CD haute de plus d'un kilomètre.

Systeme de déclanchement (Trigger) d'ATLAS

Le système de trigger d'ATLAS est basé sur un filtre à trois niveaux conçu pour réduire le taux de données de **~1.5 PetaOctets/sec** à **~200 MegaOctets/sec** d'événements physique intéressants.



Niveau 1 (hardware) décision basée sur les données du calorimètre et des chambres à muons (TGC) avec une granularité grossière.

Temps de latence: 2.5 μs

Niveau 2 (software) utilise les « Regions of Interest (RoI) identifiées par le niveau1 avec une granularité complète de tous les détecteurs.

Temps de latence: 10 ms

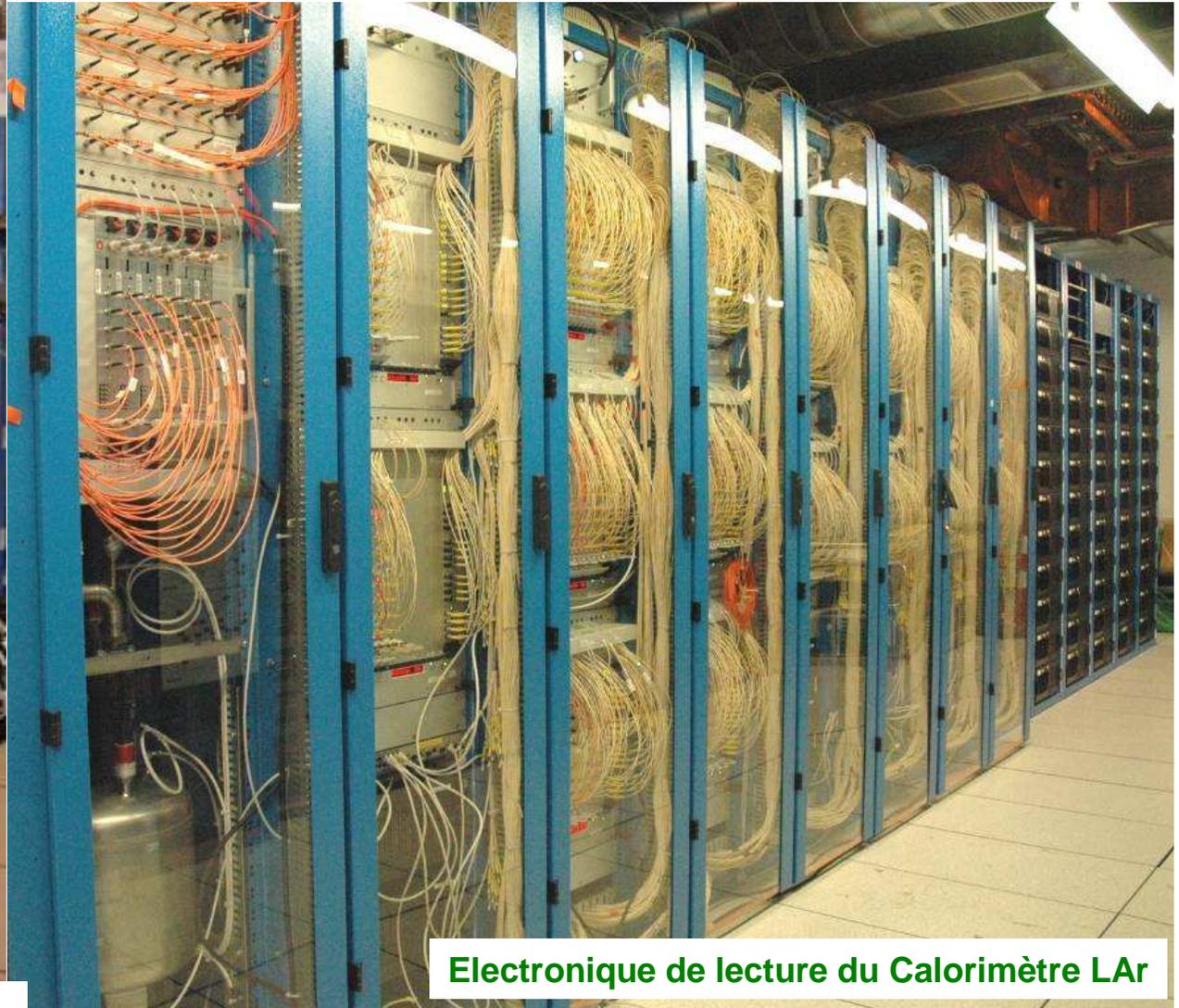
Event Filter (software) a accès à toutes les informations et reconstruit complètement l'événement.

Temps de latence: 1-2 s

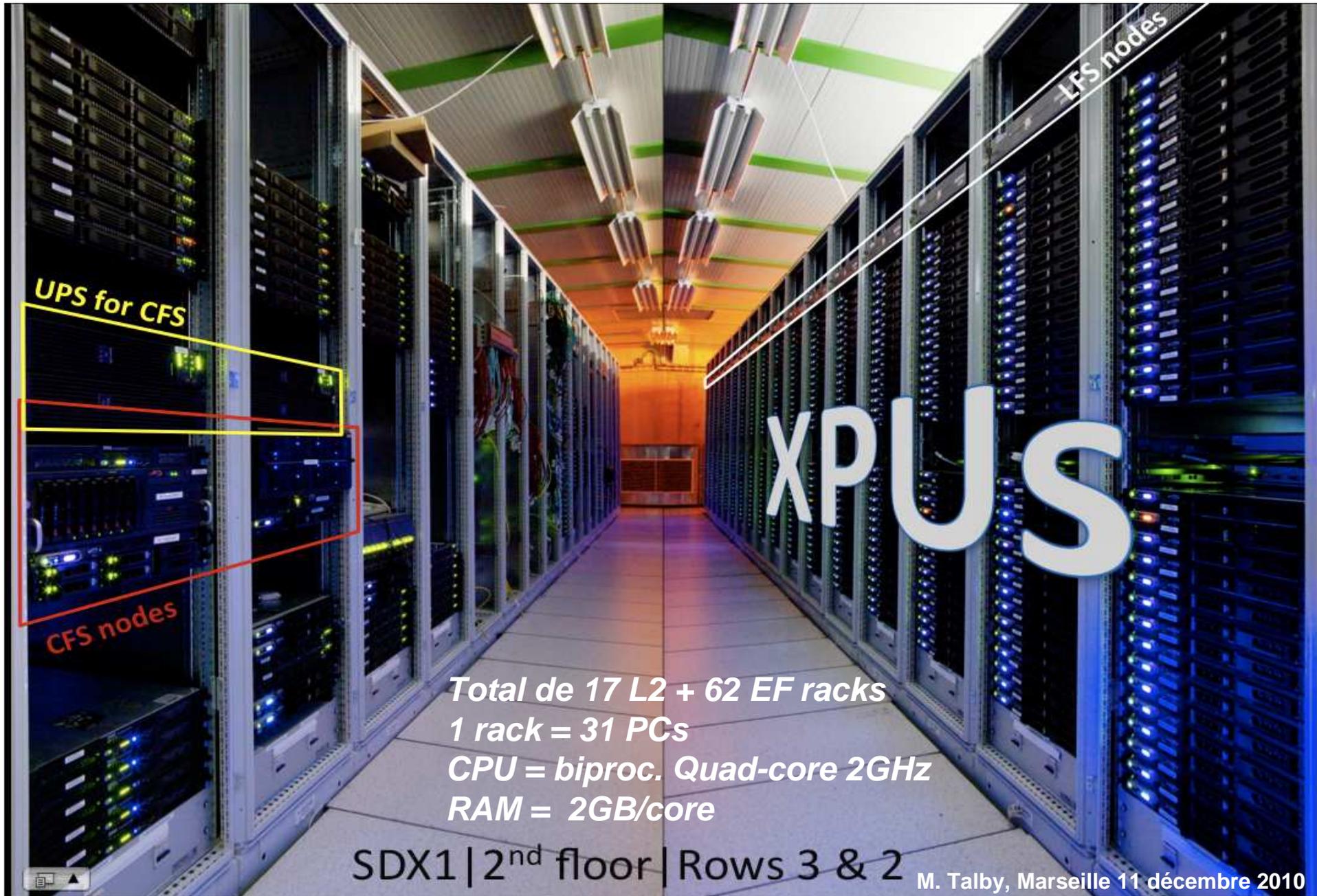


Electronique du trigger de niveau 1

Un total de 300 racks d'électronique de lecture est de déclenchement au niveau du détecteur dans les counting rooms de l'expérience ATLAS.



Electronique de lecture du Calorimètre LAr



LFS nodes

UPS for CFS

CFS nodes

XPU S

Total de 17 L2 + 62 EF racks
1 rack = 31 PCs
CPU = biproc. Quad-core 2GHz
RAM = 2GB/core

SDX1 | 2nd floor | Rows 3 & 2

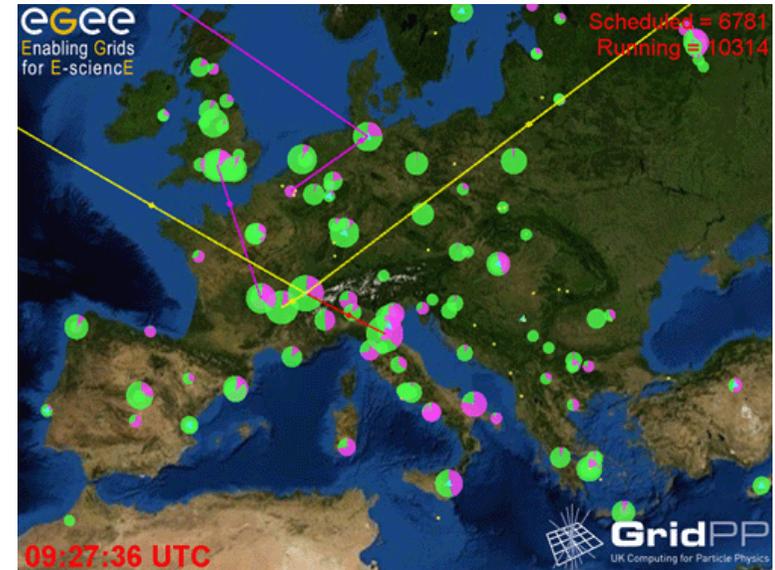
M. Talby, Marseille 11 décembre 2010



Grille mondiale de calcul une nouvelle révolution après celle du Web

15 Po/an de données seront collectées par les expériences au LHC, soit l'équivalent de 15 millions de CDs ! Pour traiter toutes ces données, 70 000 processeurs informatiques actuels sont nécessaires.

- La grille mondiale de calcul (WLCG), concept initié et développé par les physiciens des particules au CERN, est une nouvelle infrastructure qui offre un accès transparent à des ressources réparties sur toute la planète pour le calcul et le stockage des données.
- Elle est hiérarchisée en structure par niveau: Tier-0, Tier-1 et Tier-2 (e.g. CPPM) centers.
- Elle permet de disposer d'une grande puissance de calcul et une grande capacité de stockage au niveau mondial pour l'analyse des données au LHC.
- Chaque chercheur peut utiliser via les réseaux à très haut débit ces ressources considérables, au moyen d'une interface simplifiée : son propre ordinateur.



M. Talby, Marseille 11 décembre 2010

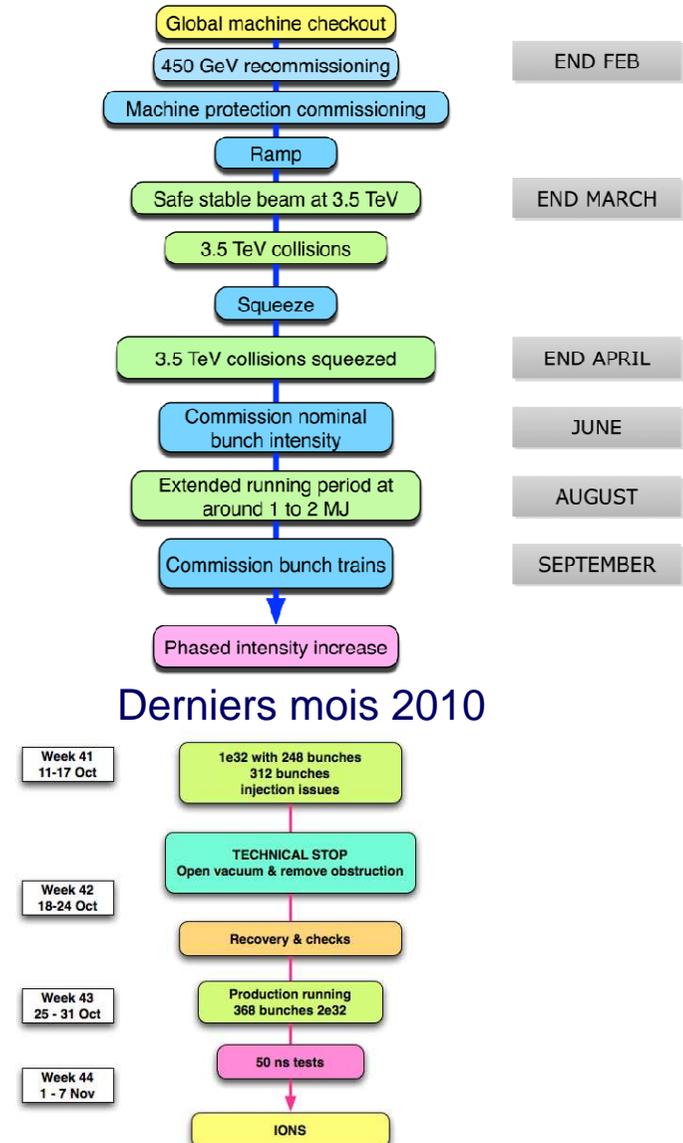
Des nouvelles du LHC

Fin mars 2010 début des premières collisions protons-protons à 7 TeV



Les paramètres du LHC en 2010

| | |
|--------------------------------|---|
| Nominal protons energy | 3.5 TeV |
| Proton velocity | 99,999996 % c |
| Nbr of proton bunches/beam | 368 |
| Nbr of protons/bunch | $1,1 \times 10^{11}$ |
| RMS bunch length | 7,5cm |
| RMS bunch radius at IP | 16,6 μm |
| Stored energy/beam | 25 MJ |
| Beam current | 73.4 mA |
| Bunch spacing | 150 ns |
| Bunch crossing (bc) rate | 6.7 MHz |
| Revolution frequency | 11 245 Hz |
| Peak Luminosity | $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ |
| Nbr of inelastic collisions/s | 8×10^6 |
| Nbr of inelastic collisions/bc | ~2 |



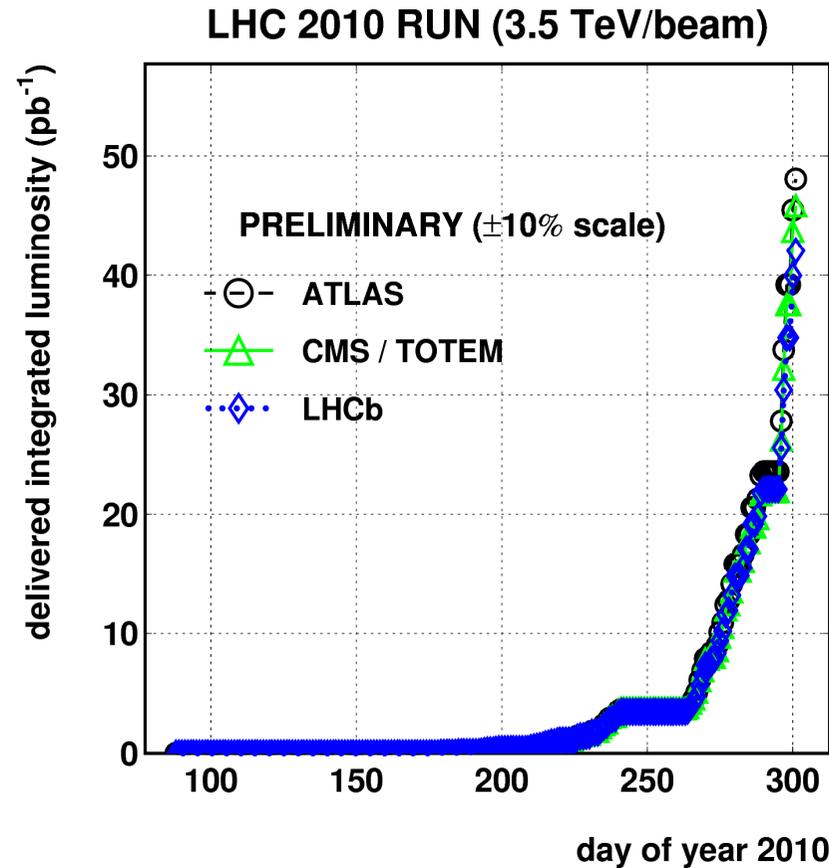
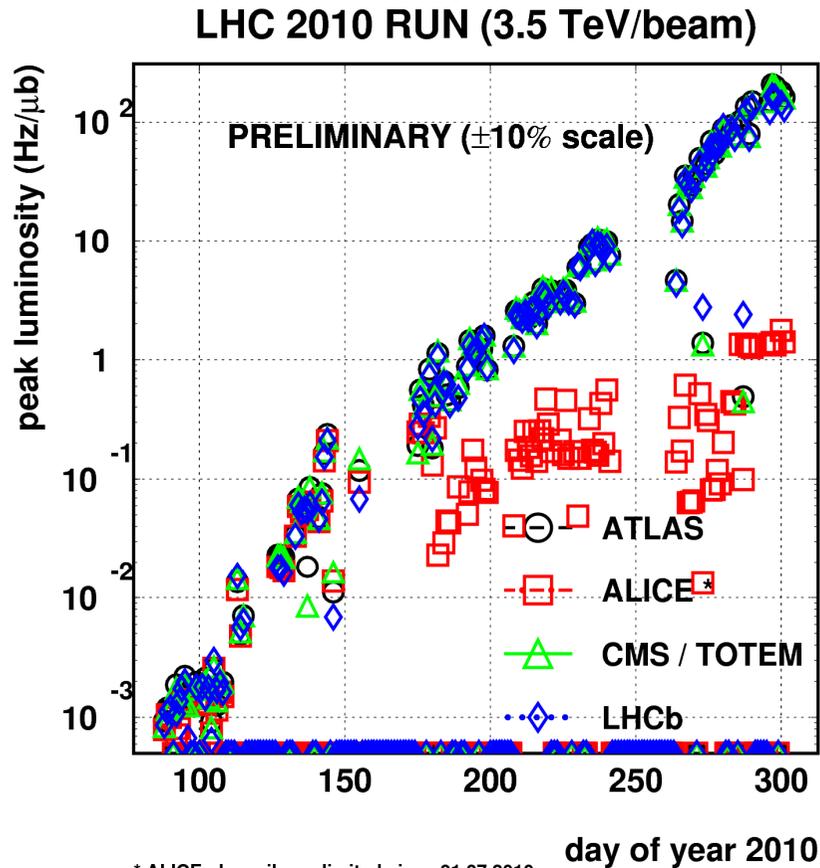
Performances du LHC en 2010 pour les collisions proton-proton

5 order de grandeurs en ~200 jours

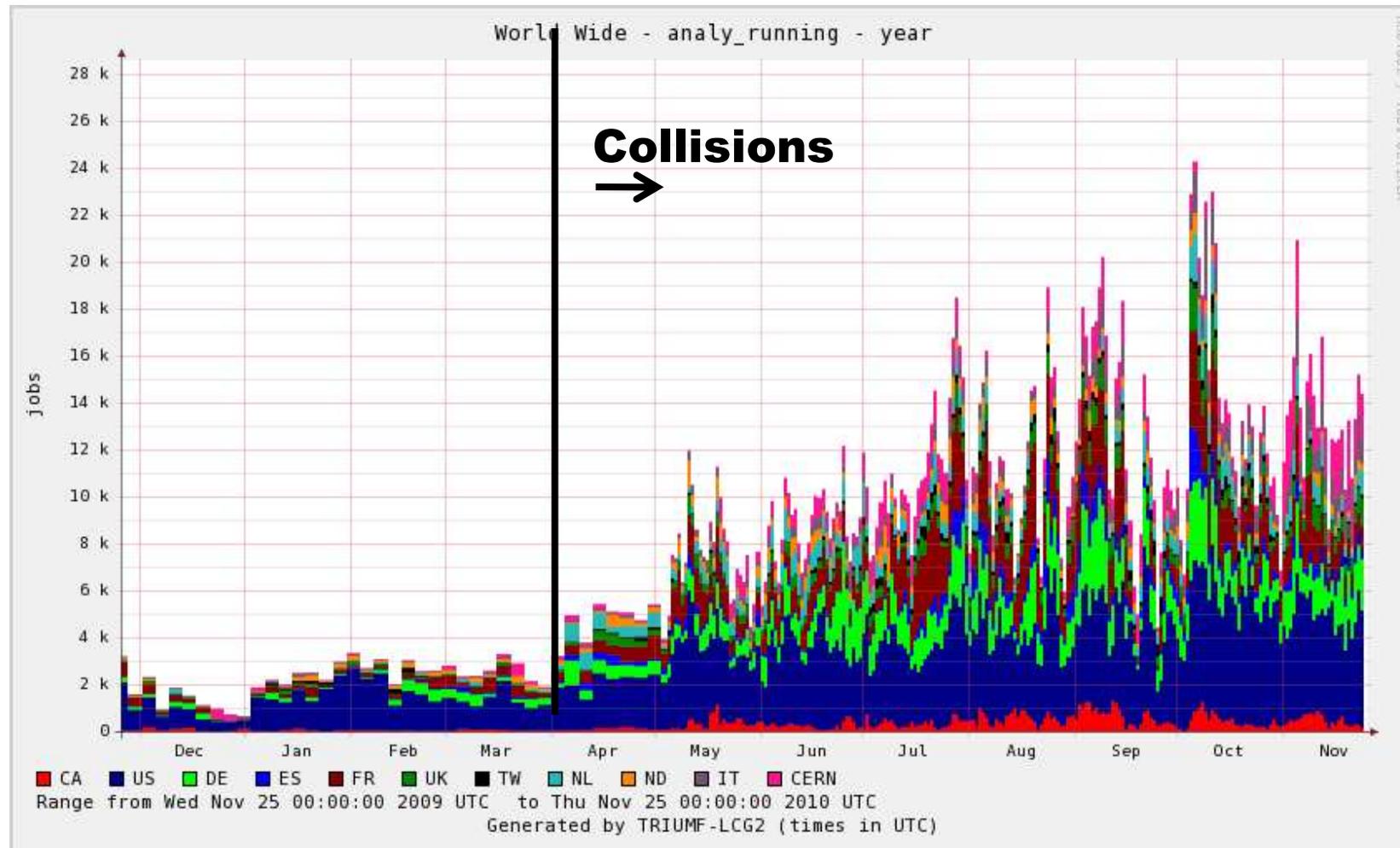
~50 pb⁻¹ délivrés dont la moitié en 1 semaine !

2010/10/29 15.18

2010/10/29 15.16



Analyse des données au niveau mondial

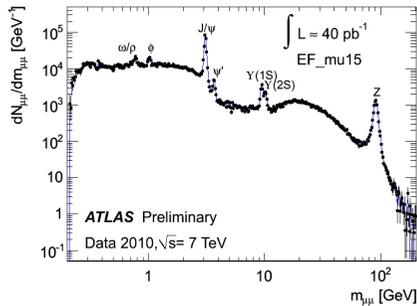
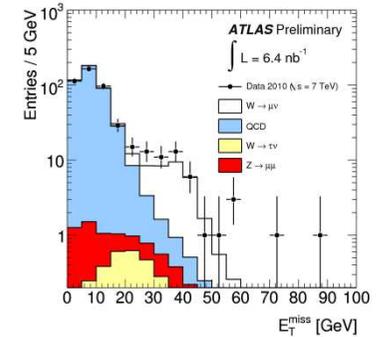
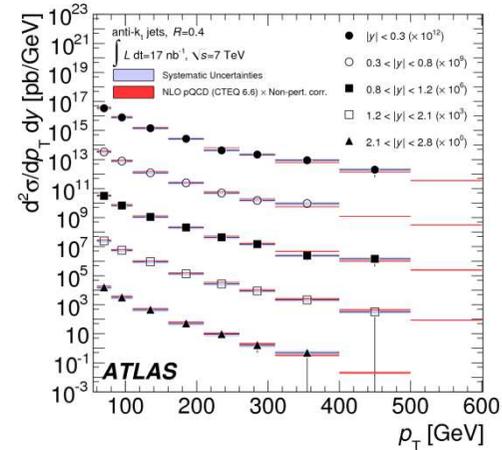
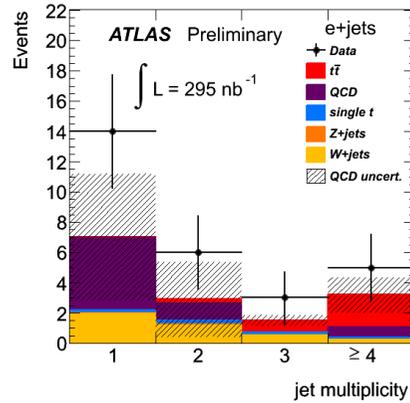
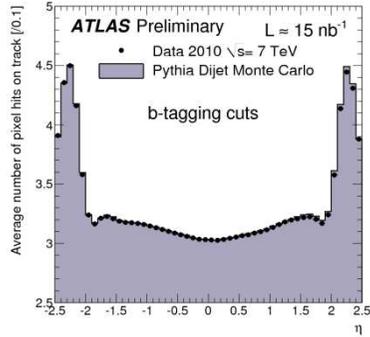


Plus de 1000 utilisateurs durant les 8 derniers mois: des Millions de programmes d'analyse sont exécutés chaque semaine sur des centaines de sites.

Stratégie avec les premières données du LHC

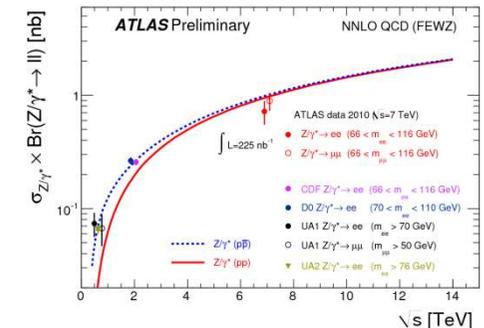
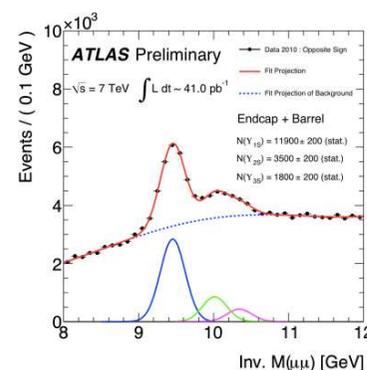
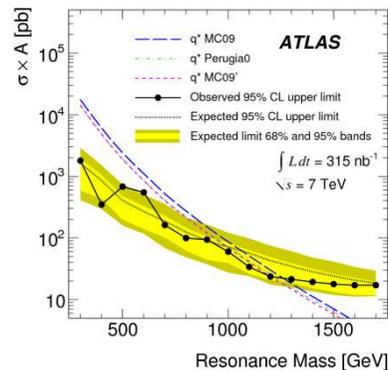
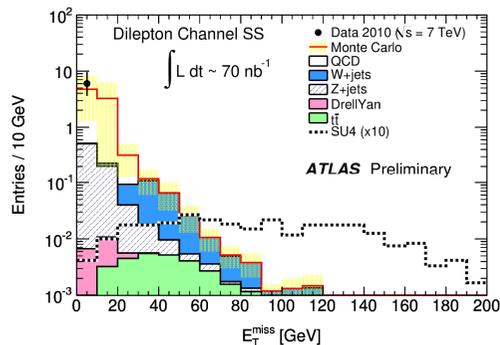
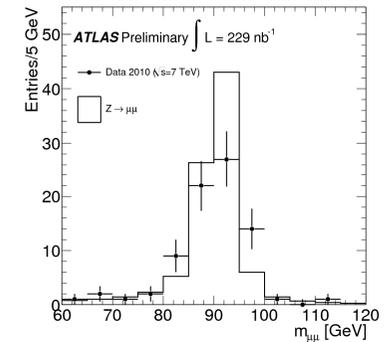
- Qualification/calibration du détecteur et des triggers in situ avec la physique standard:
→ utiliser les particules connues et bien mesurées comme chandelles standard.
- “Redécouvrir” le Modèle Standard (MS) et le mesurer à $\sqrt{s} = 7$ TeV (puis à 14 TeV):
→ mesurer tous les paramètres connus du MS: les particules et les observables physiques.
- Valider et ajuster les outils software (les générateurs MC) et les outils d'identification (électron, muon, tau, jets de différentes saveurs, énergie manquante, ...) avec la physique standard.
- Mesurer les sections efficaces des principaux bruits de fond physique affectant la recherche du/des boson(s) de Higgs et les différents canaux de nouvelles physiques (W/Z+jets, tt+jets, fond hadronique multijets,...).
- Recherche du boson de Higgs et d'une nouvelle physique au delà du MS (plusieurs modèles théoriques seront testés).

Résultats physiques et études de performances

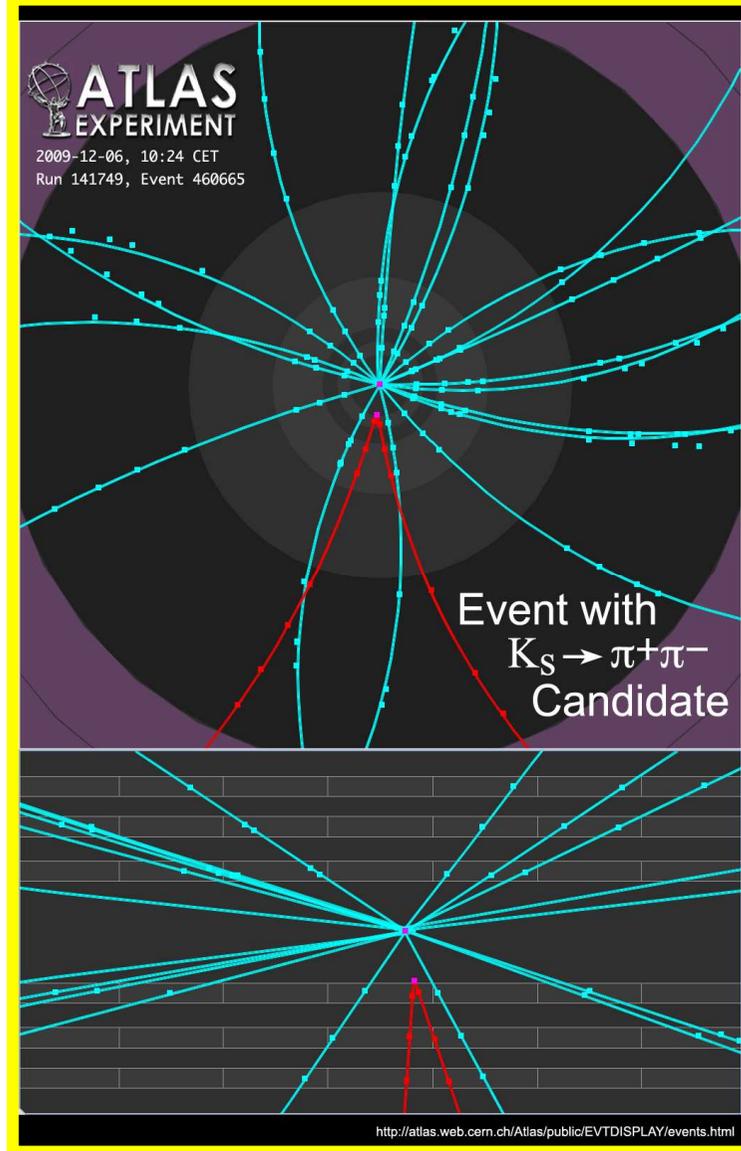
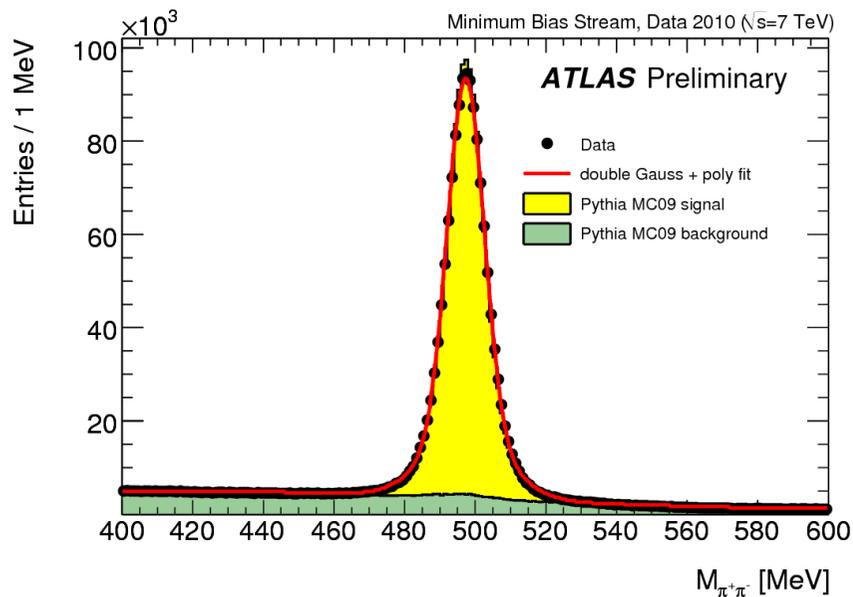
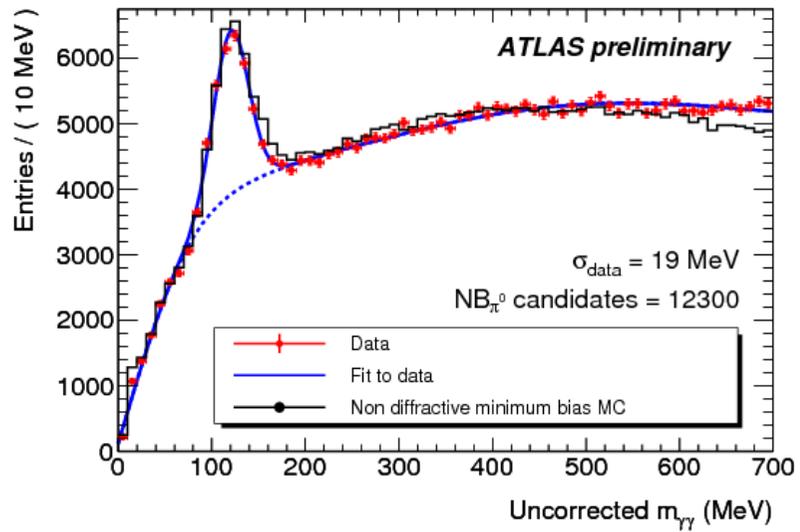


Des résultats physiques excitants avec seulement quelques mois de prise de données:

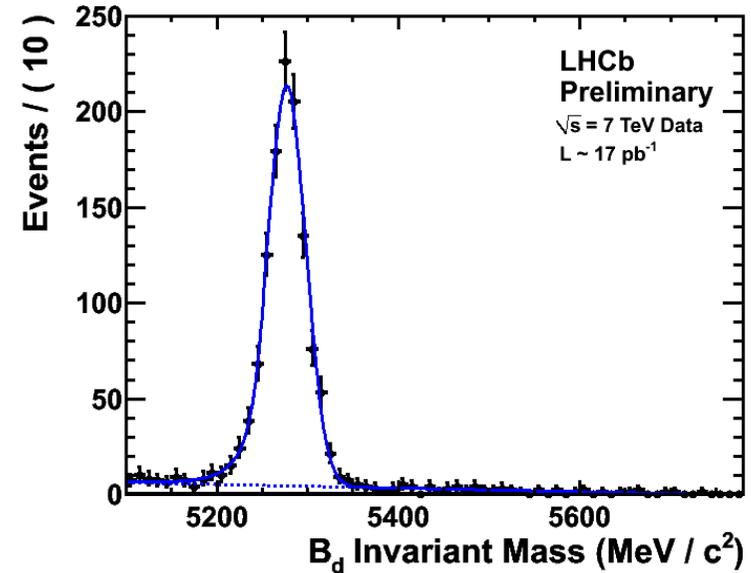
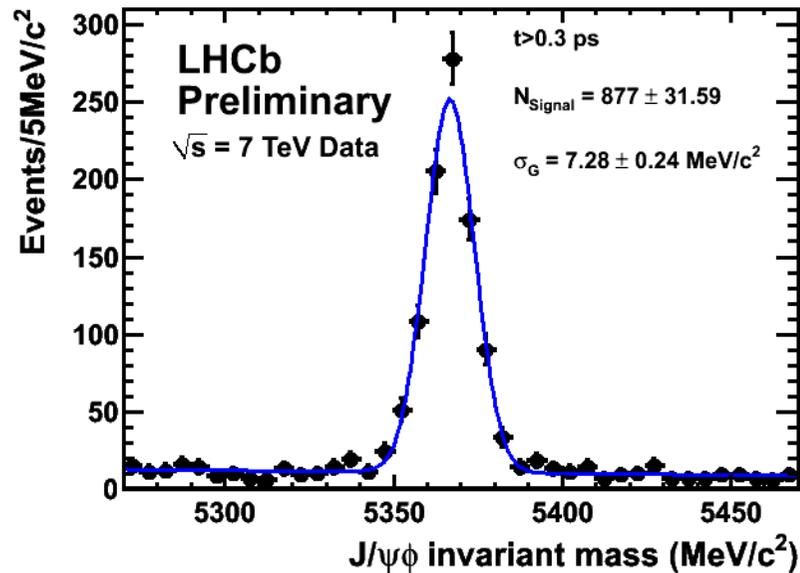
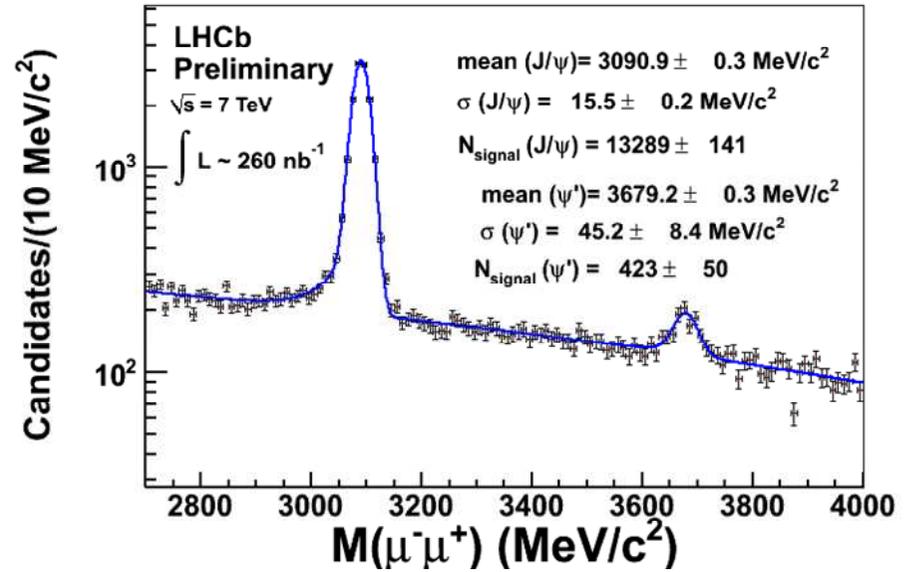
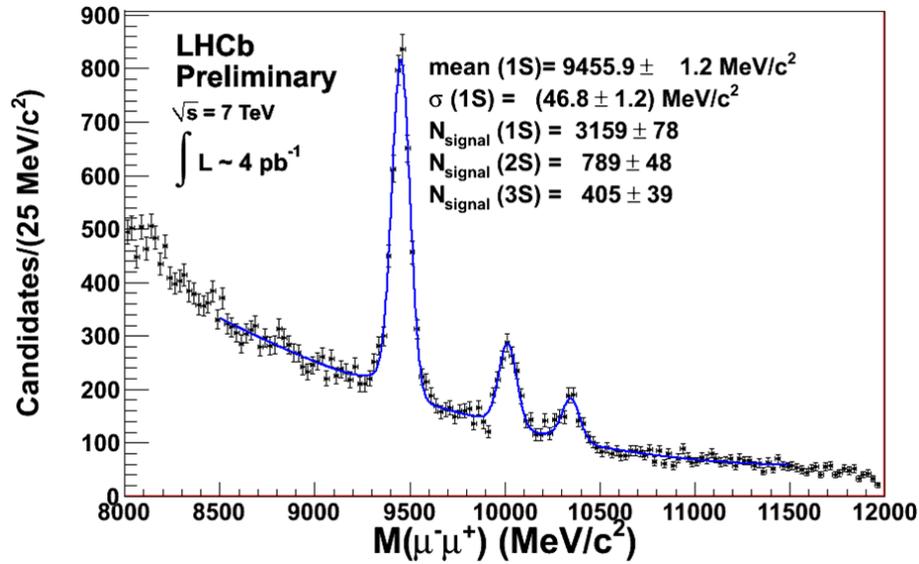
- Physique du Modèle Standard (MS):
 - Jets, W/Z, quark top
- Recherche de la physique au-delà du MS



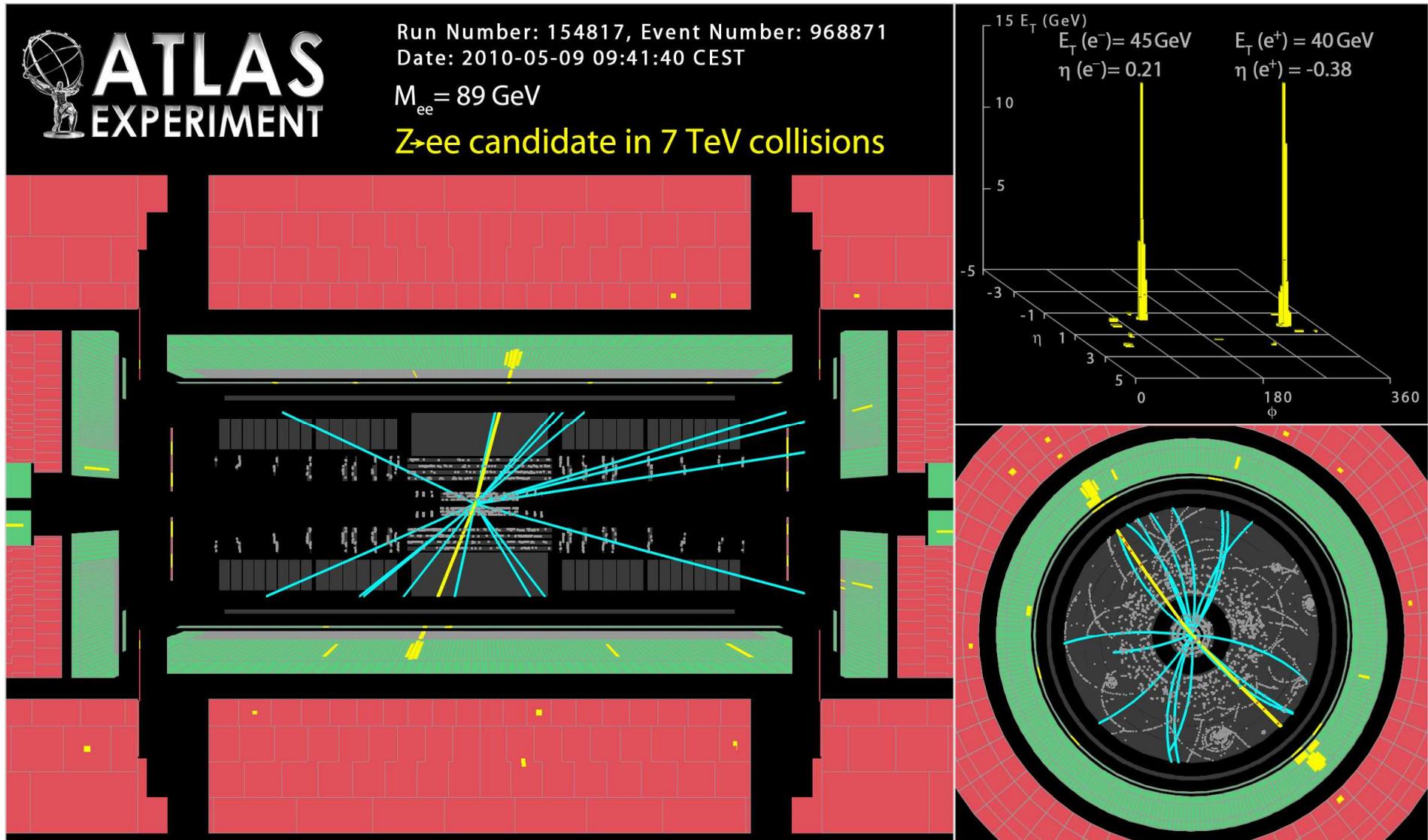
Reconstruction de quelques particules hadroniques de faibles masses



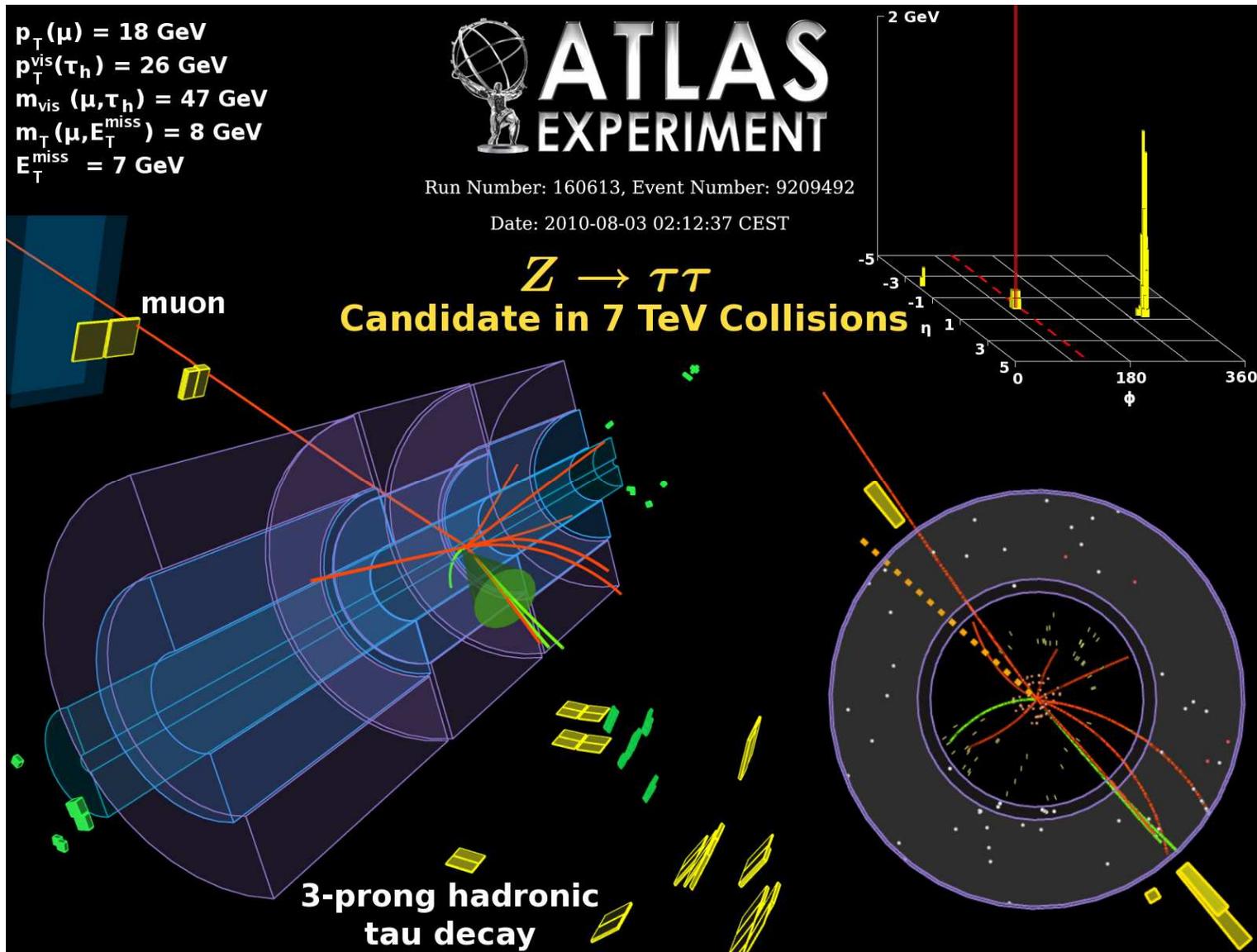
Reconstruction de quelques particules hadroniques de masses élevées



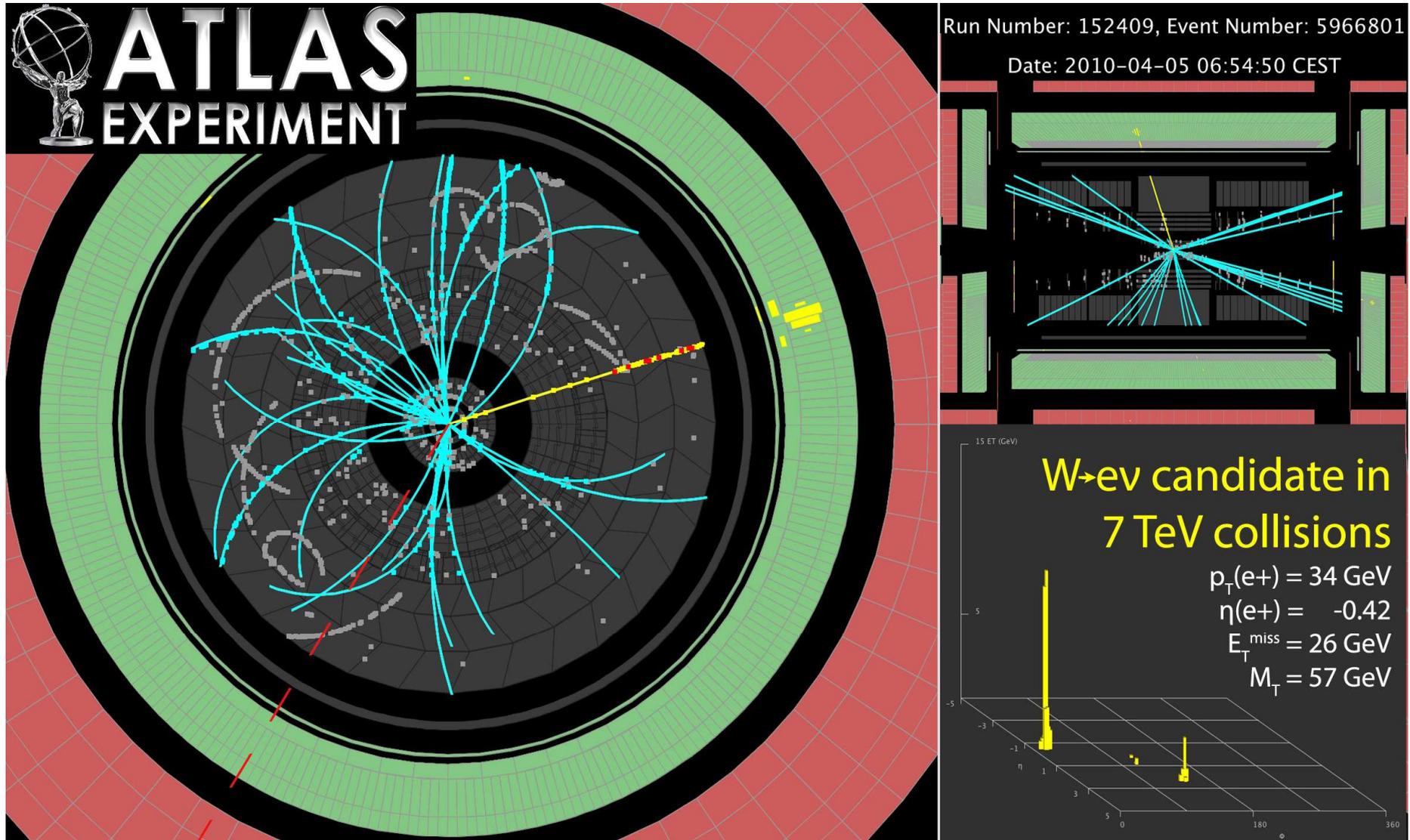
Événement candidat $Z \rightarrow e^+e^-$



Evénement candidat $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$



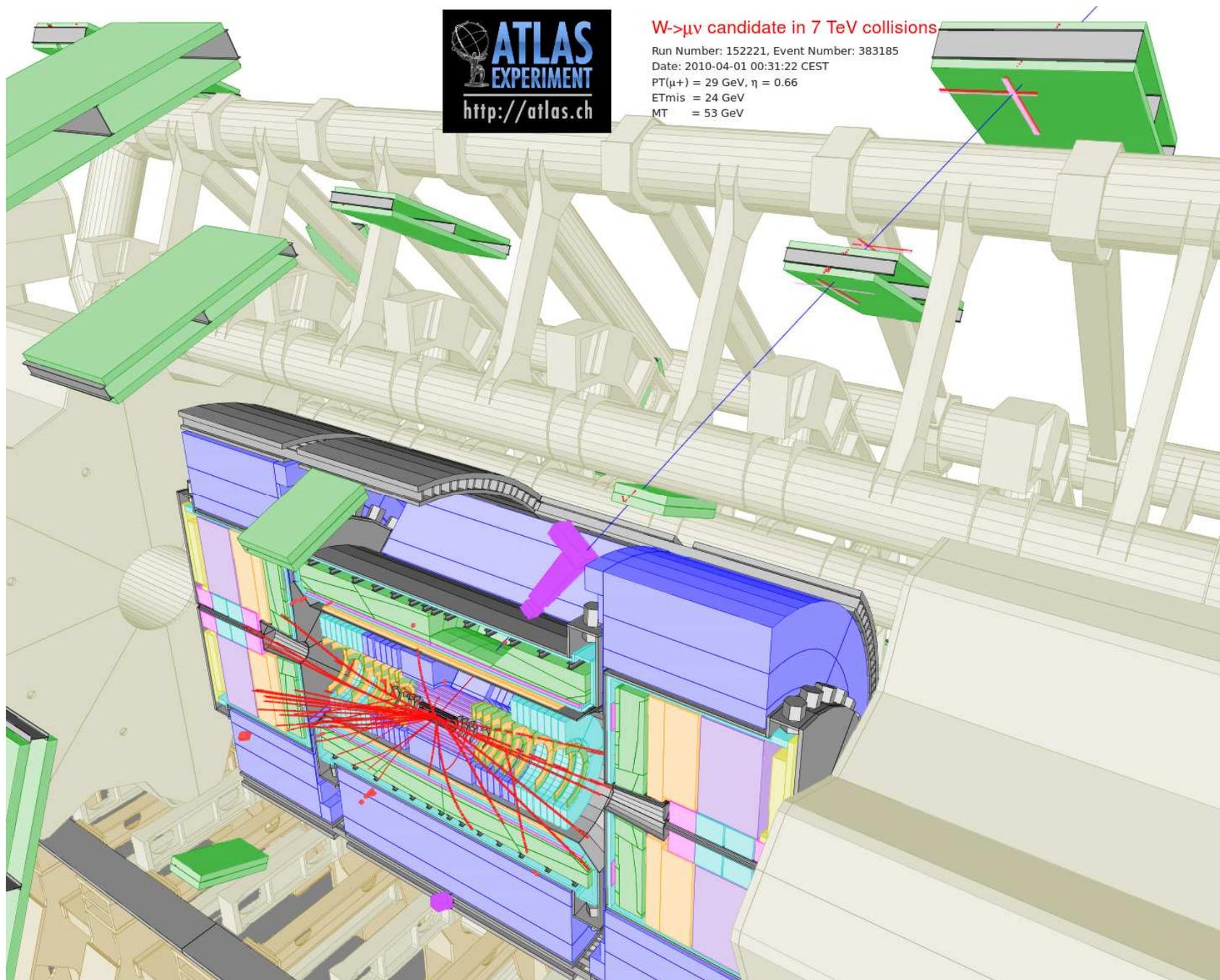
Événement candidat $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$



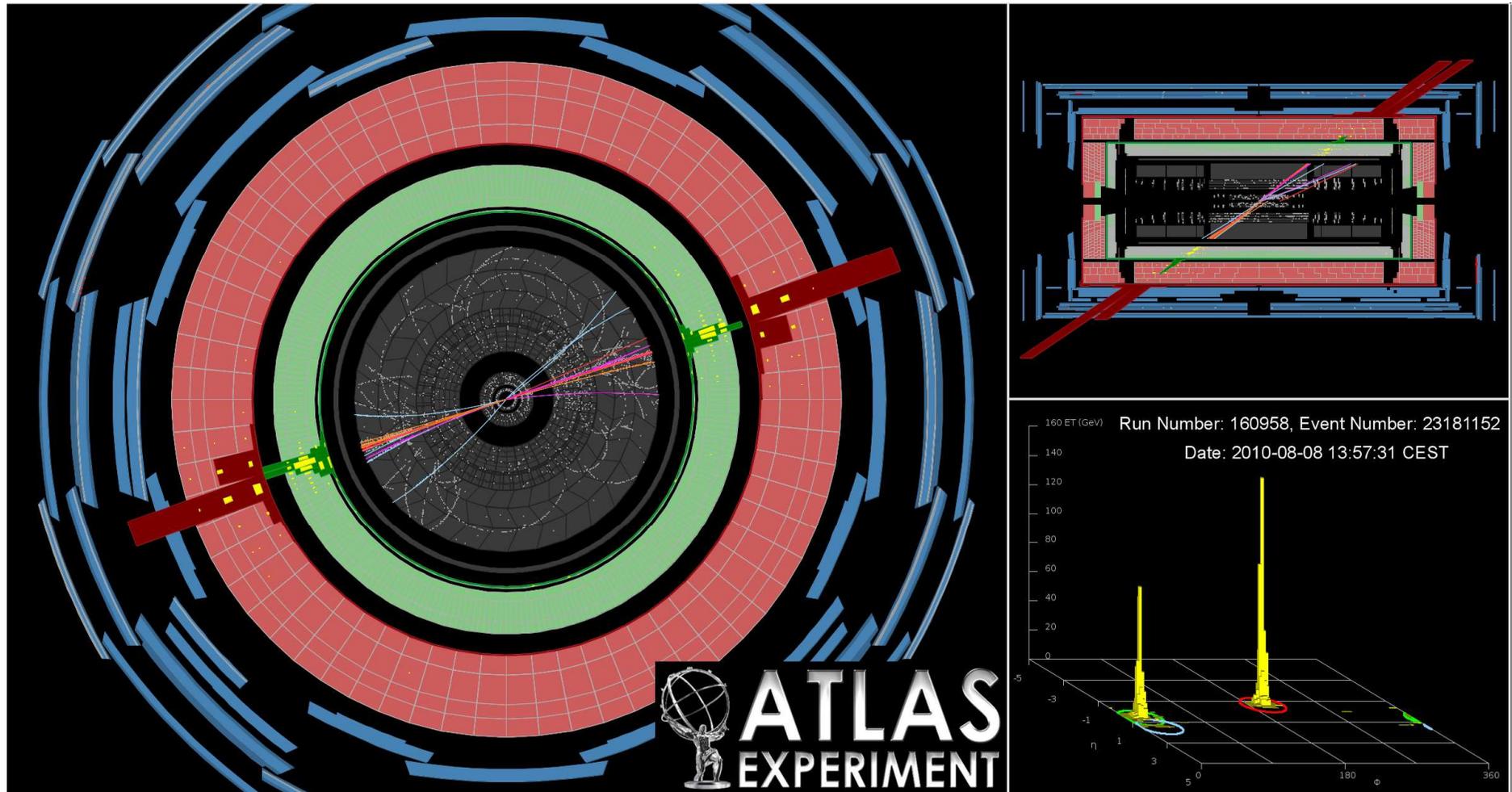


W-> $\mu\nu$ candidate in 7 TeV collisions

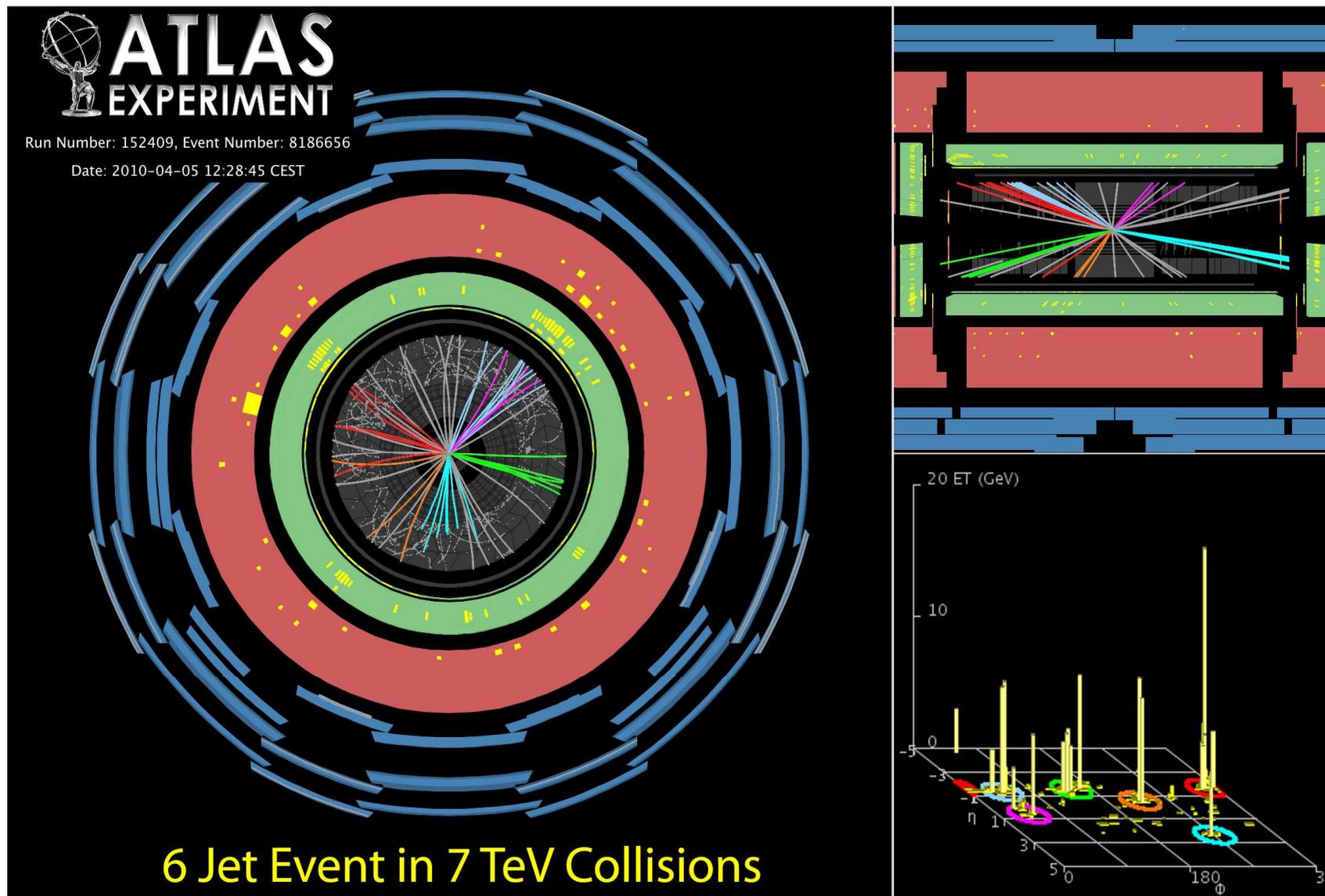
Run Number: 152221, Event Number: 383185
Date: 2010-04-01 00:31:22 CEST
PT(μ^+) = 29 GeV, $\eta = 0.66$
ET_{miss} = 24 GeV
MT = 53 GeV

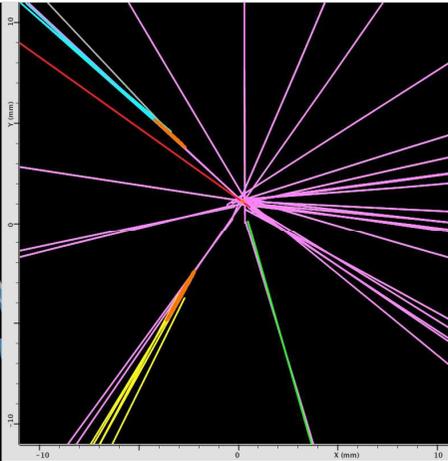
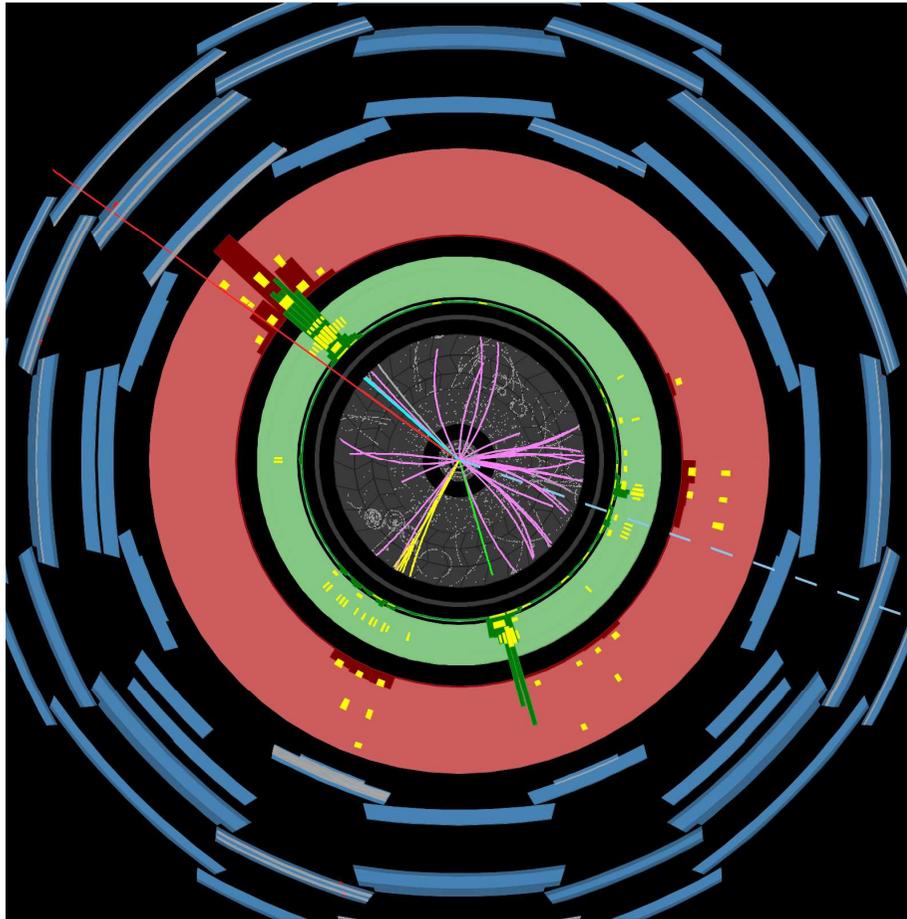


Evénement di-jets de masse $M_{jj}=1.9$ TeV



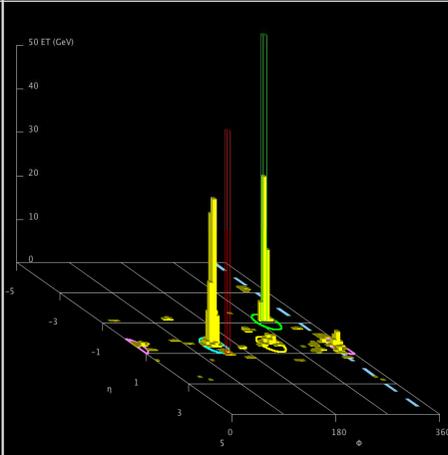
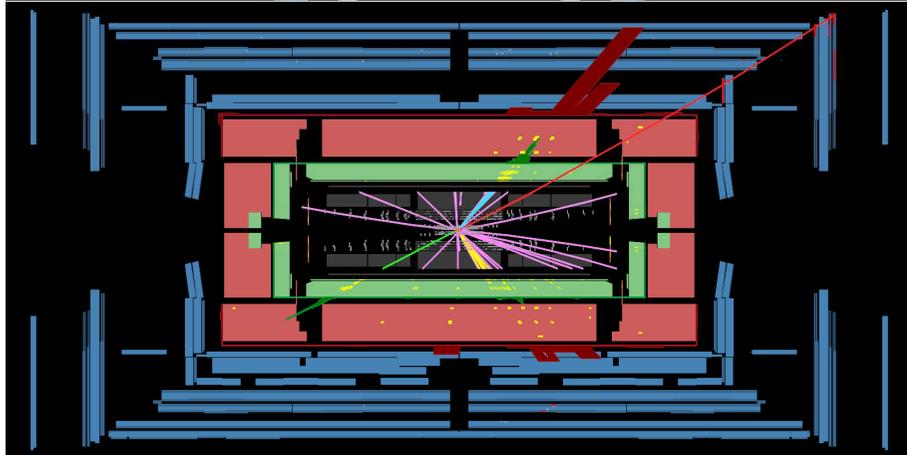
Evénement 6-jets






ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 160958, Event Number: 9038972
 Date: 2010-08-08 11:01:12 BST

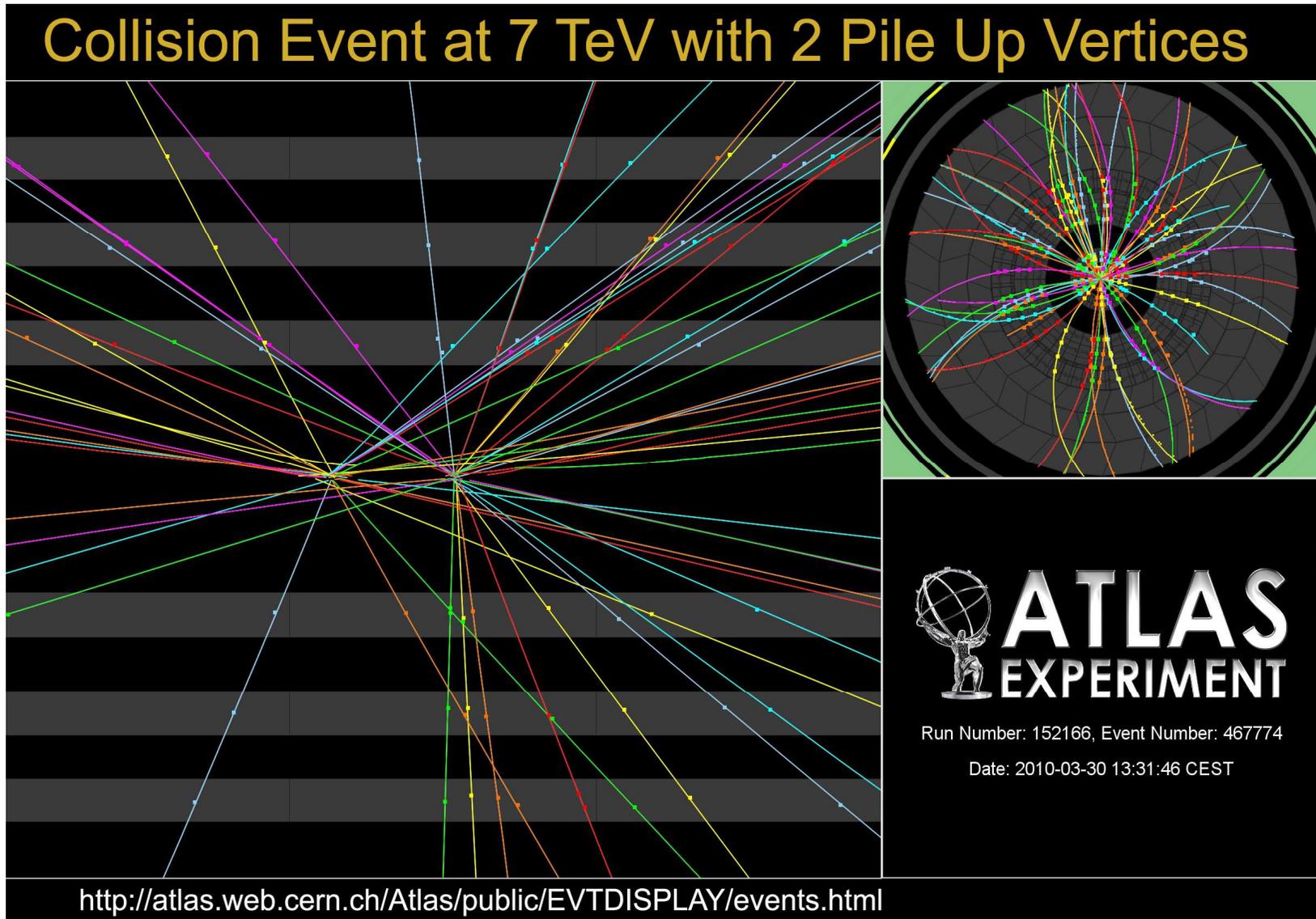


Événement contenant une paire de quarks top candidats se désintégrant en bosons W et quarks b avec un des bosons W se désintégrant en électron neutrino et l'autre en anti-muon neutrino.

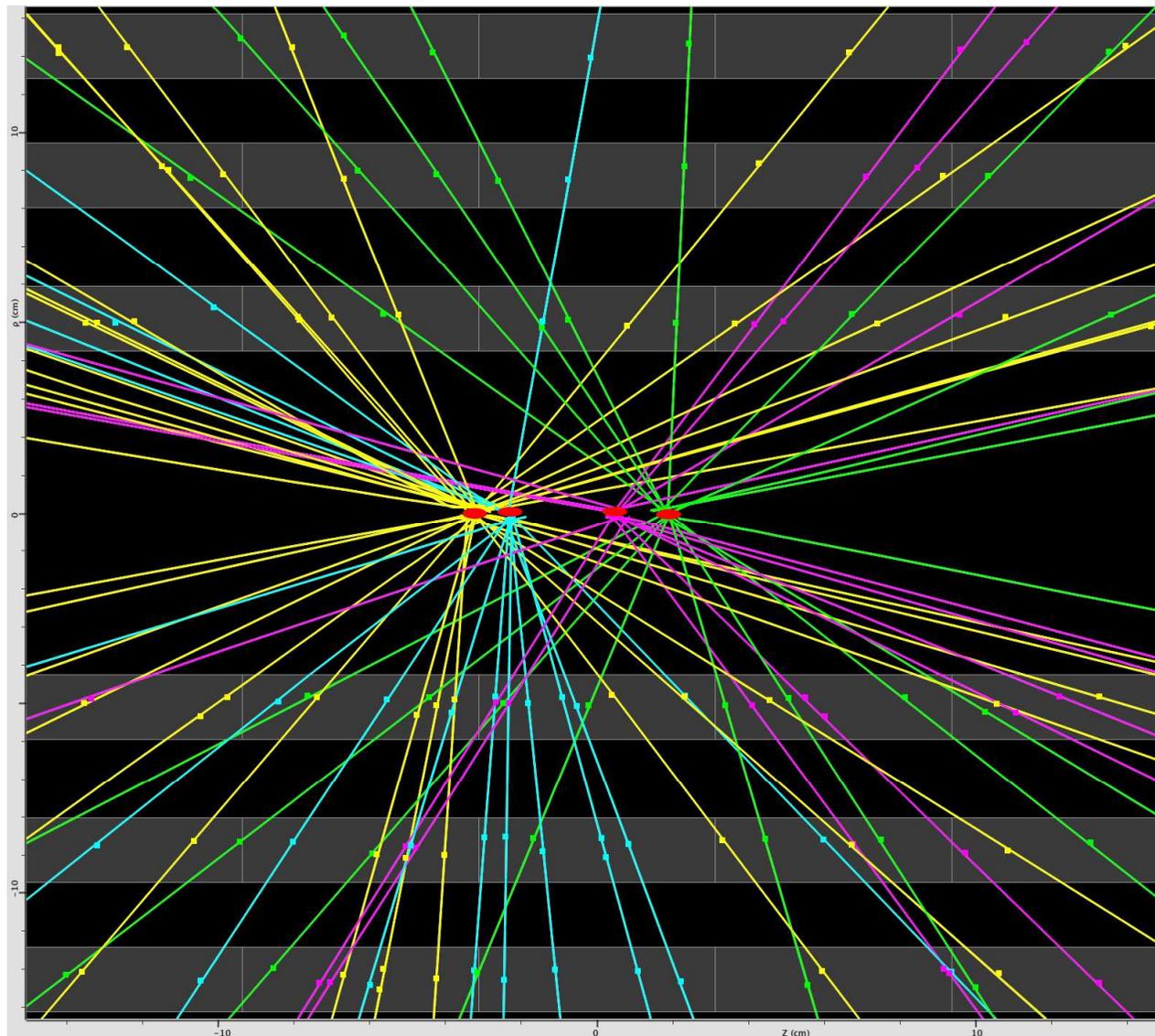
On observe clairement deux jets issus de quarks b

Event display of a top pair $e\mu$ dilepton candidate with two b-tagged jets. The electron is shown by the green track pointing to a calorimeter cluster, the muon by the long red track intersecting the muon chambers, and the missing ET direction by the dotted line on the XY view. The secondary vertices of the two b-tagged jets are indicated by the orange ellipses on the zoomed vertex region view.

Événement avec deux collisions simultanées



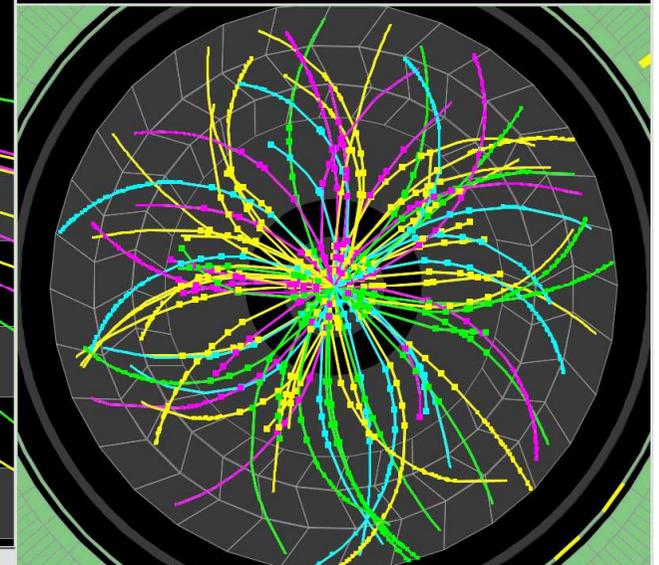
Événement avec quatre collisions simultanées



Run Number: 153565, Event Number: 4487360

Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

**Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions**



M. Talby, Marseille 11 décembre 2010

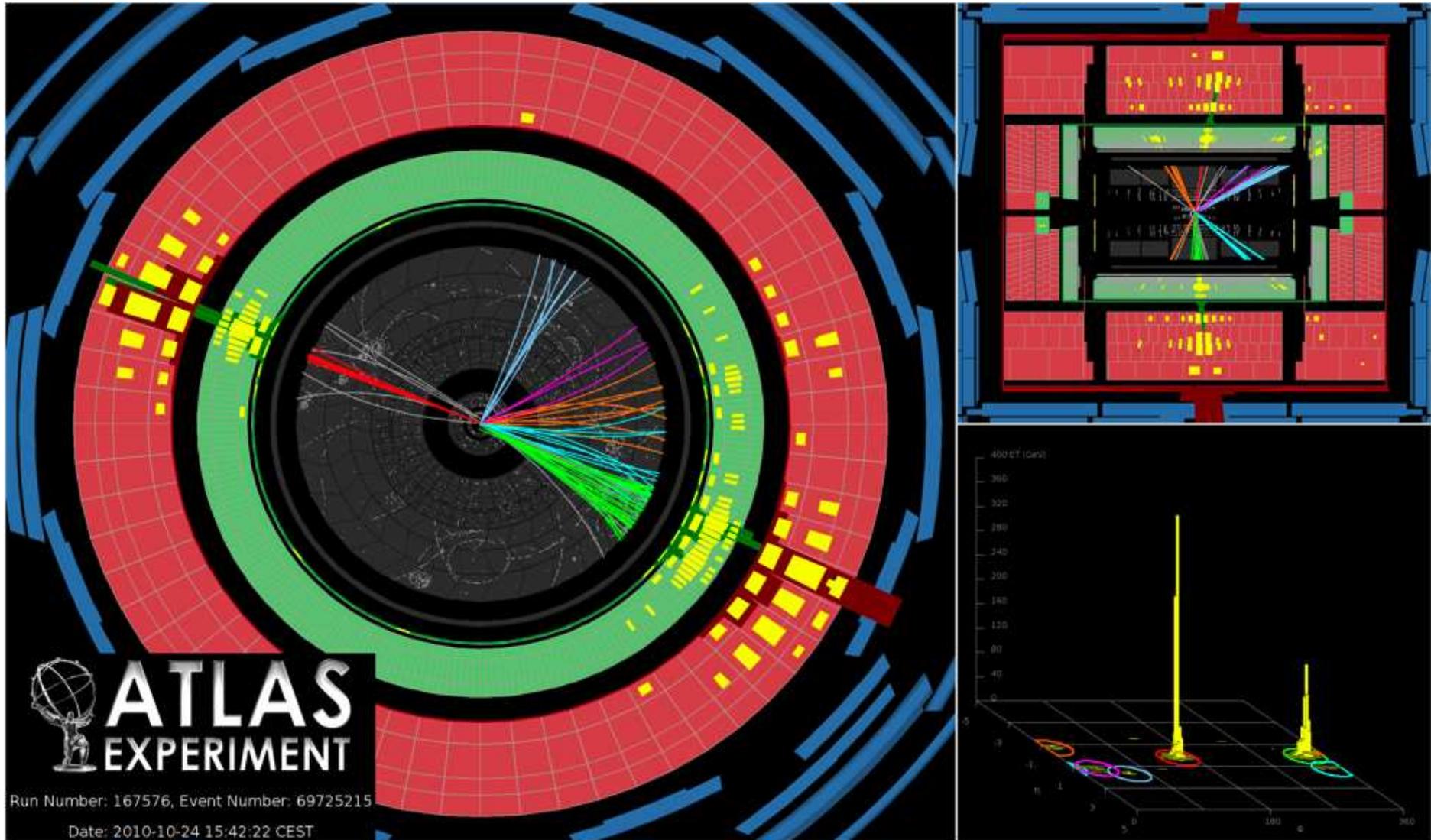
Collisions des ions lourds (Pb-Pb) au LHC

- L'exploitation du LHC avec des ions de plomb $_{82}\text{Pb}$ a démarré le 7 novembre et s'est terminée le 6 décembre 2010.
- Les faisceaux d'ions de plomb accélérés à une énergie de **287 TeV** (82×3.5 TeV) ont été mis en collision au centre des détecteur ALICE, ATLAS et CMS à une énergie au centre de masse de $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV par nucléon.

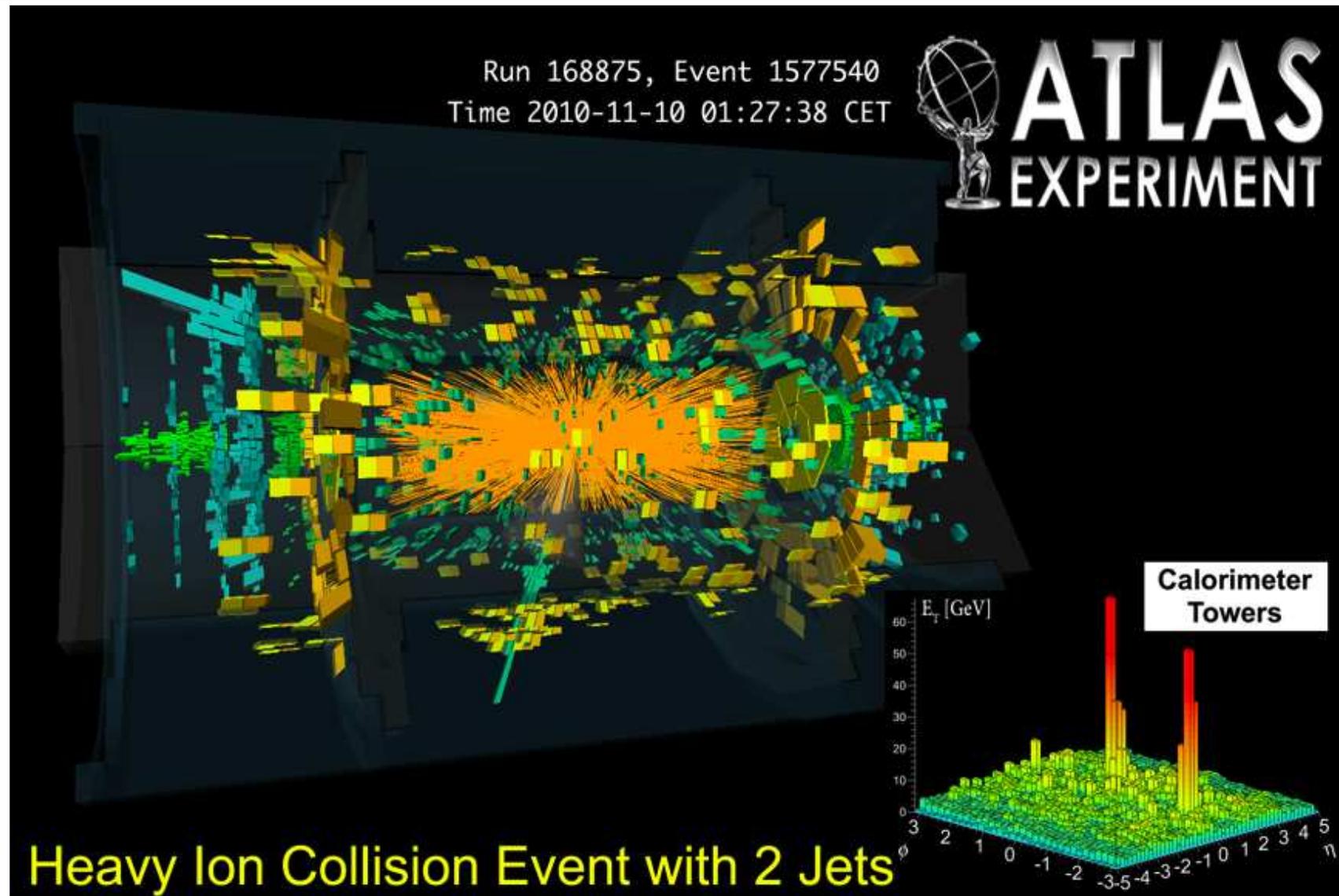
But:

- produire un état de la matière très dense et très chaud ($> 2 \times 10^{18}$ Kelvin) correspondant à un plasma de quarks et gluons i.e. les premières gouttelettes de matière de l'Univers primordial.
 - Etudier ce plasma de quarks et gluons permettra de comprendre l'évolution de l'Univers primordial, et la nature de la force forte, qui lie les quarks et les gluons pour former les hadrons: protons, neutrons ... etc
- Un des outils privilégiés pour la mise en évidence et l'étude du comportement du plasma de quarks et gluons est le phénomène d'**étouffement des jets** (**Jet quenching**) qui n'a jamais été observé de façon directe.
 - Les premières collisions Pb-Pb au LHC ont permis de mettre en évidence ce phénomène de façon spectaculaire.

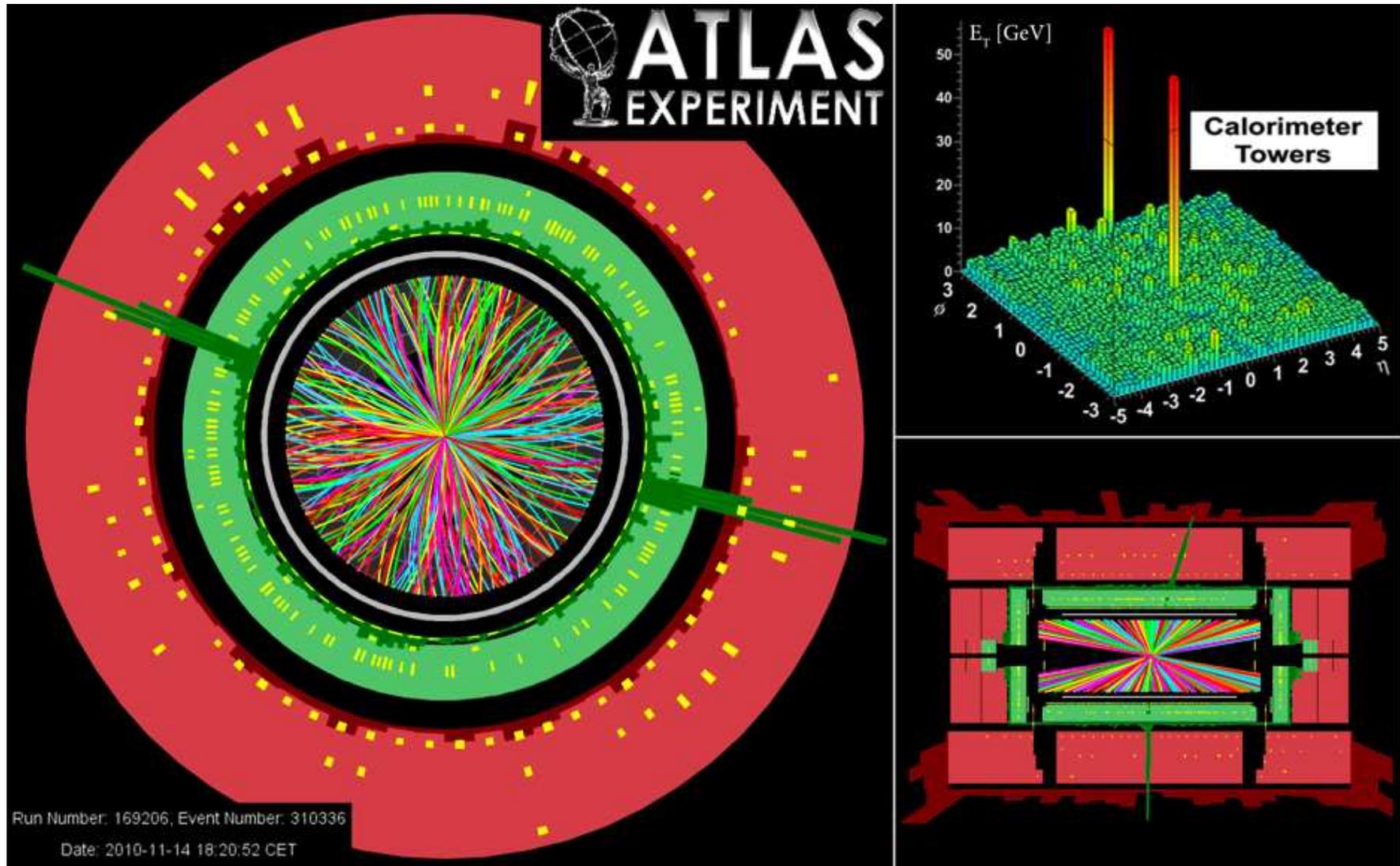
Production d'événements di-jets dans les interactions protons-protons



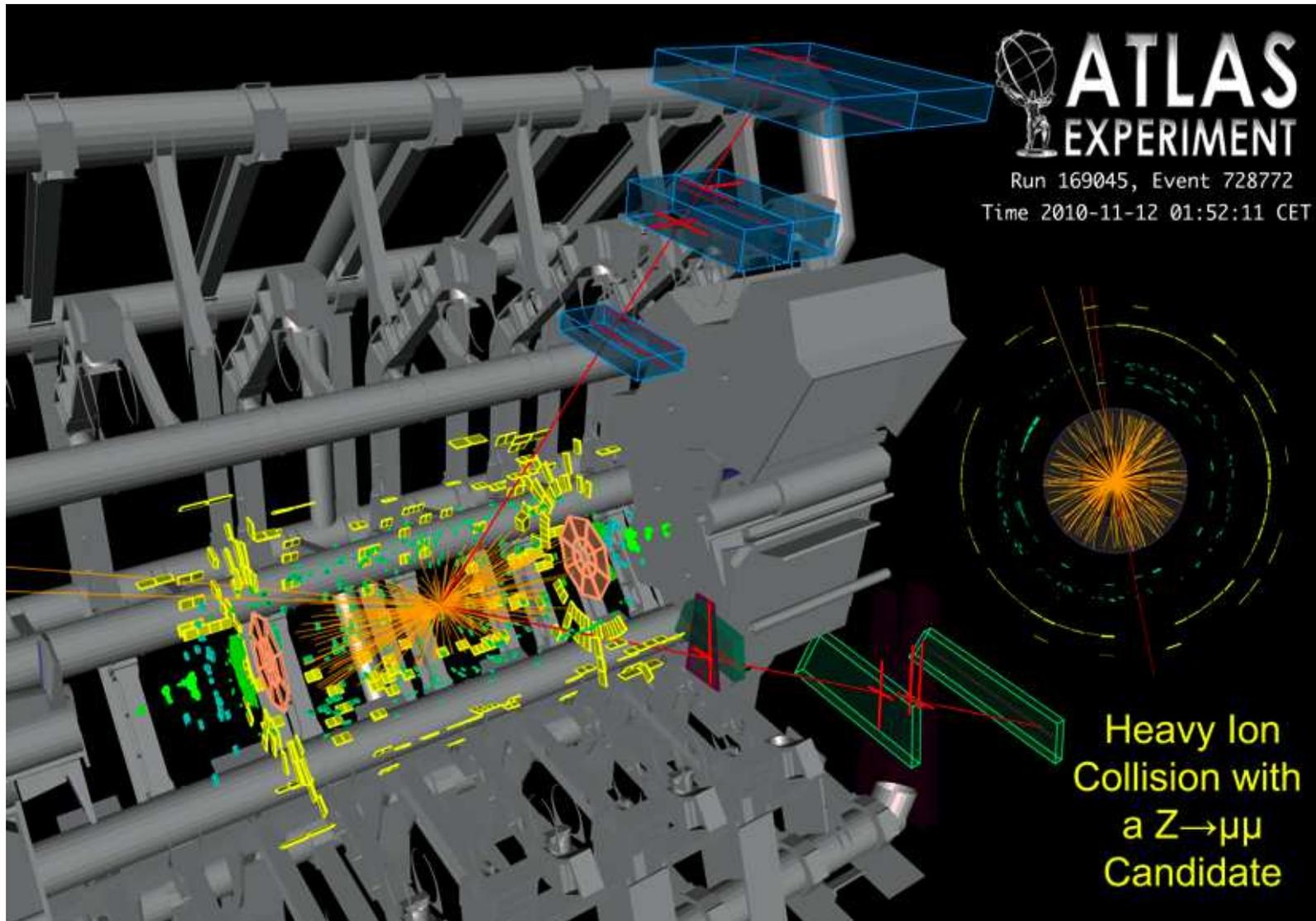
Production d'événements di-jets dans les interactions Pb-Pb



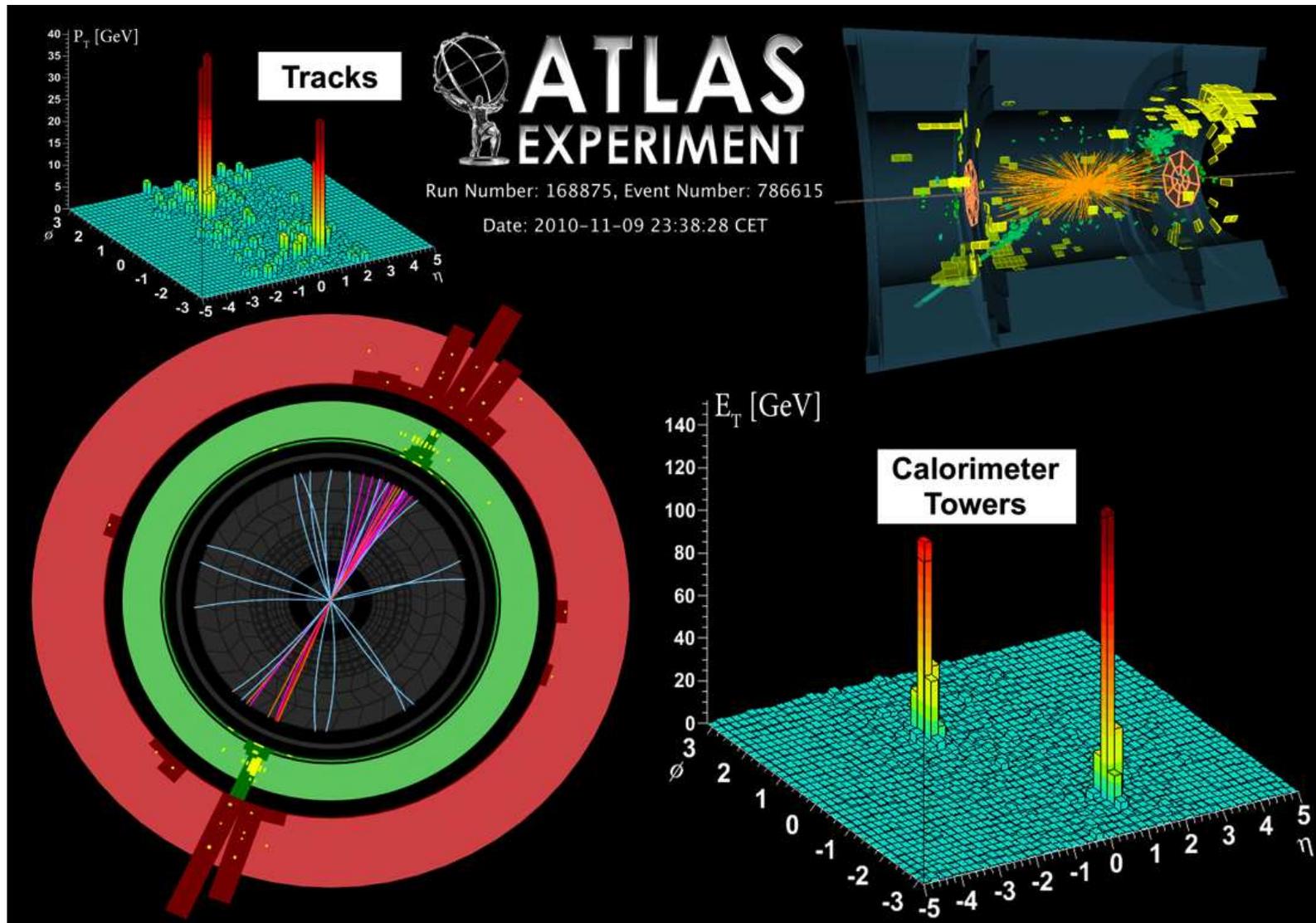
Production d'un boson $Z \rightarrow e^+e^-$ dans les interactions Pb-Pb



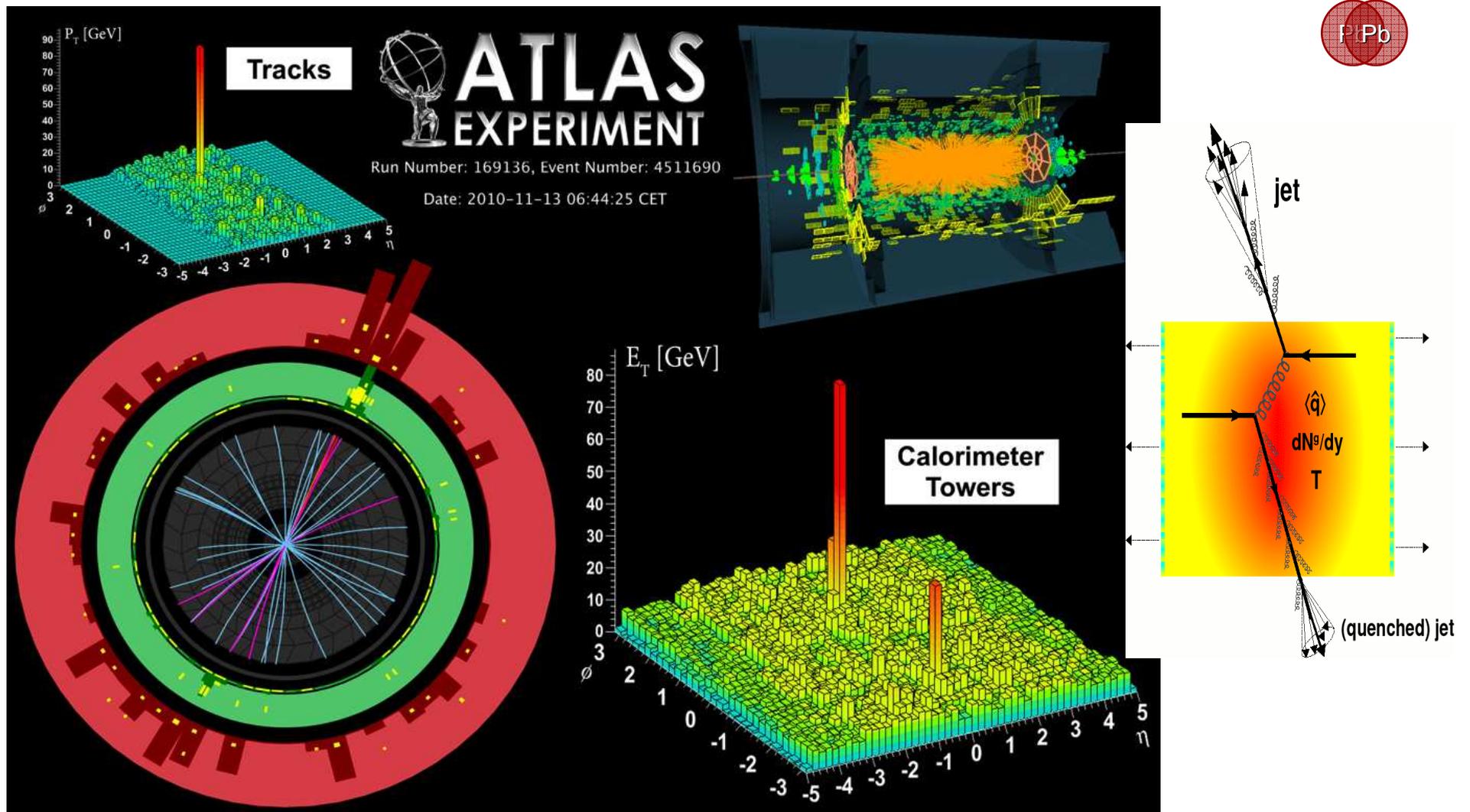
Production d'un boson $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ dans les interactions Pb-Pb



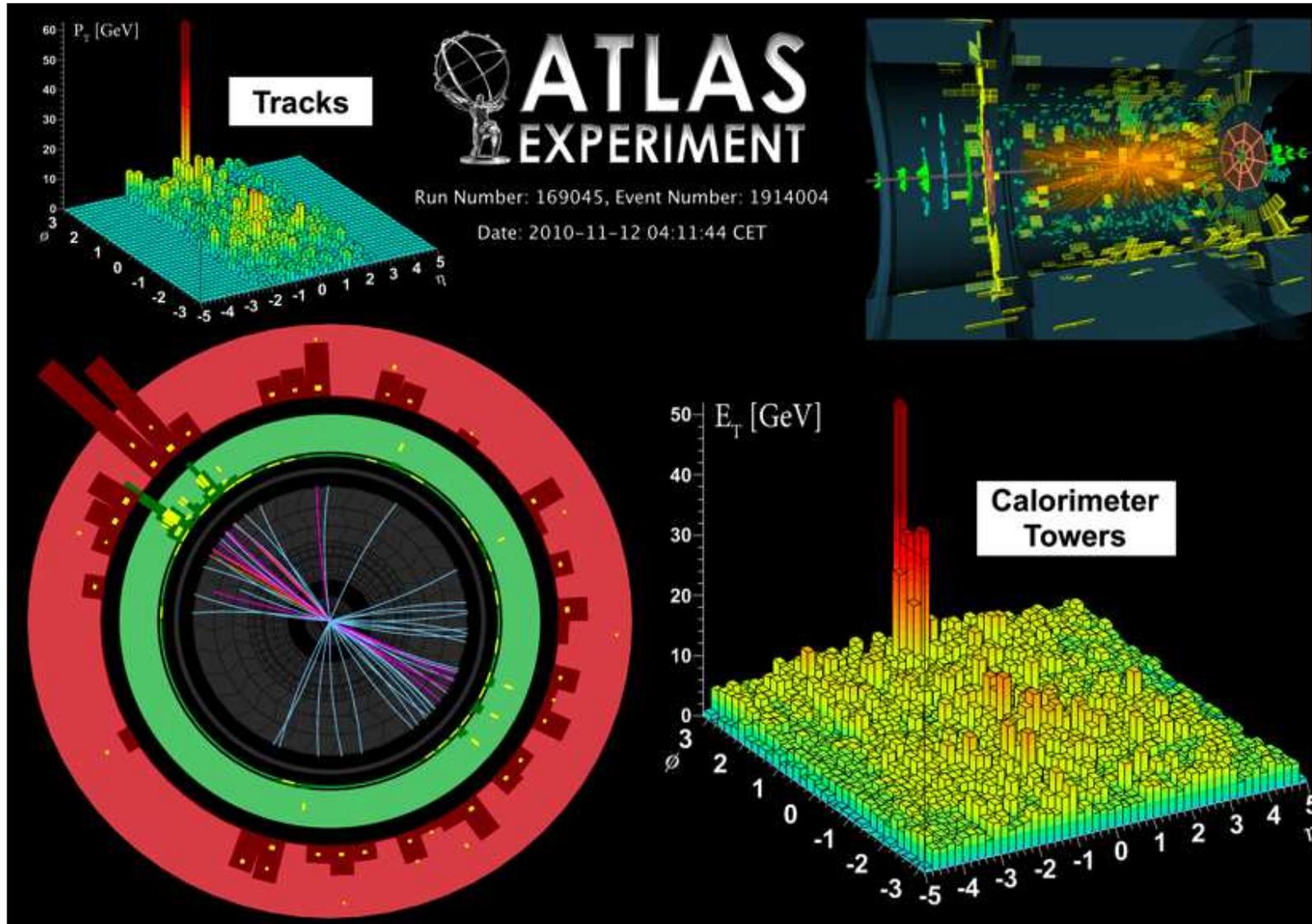
Production d'événements di-jets périphériques symétriques dans les interactions Pb-Pb



Production d'événements di-jets semi-centraux asymétriques dans les interactions Pb-Pb

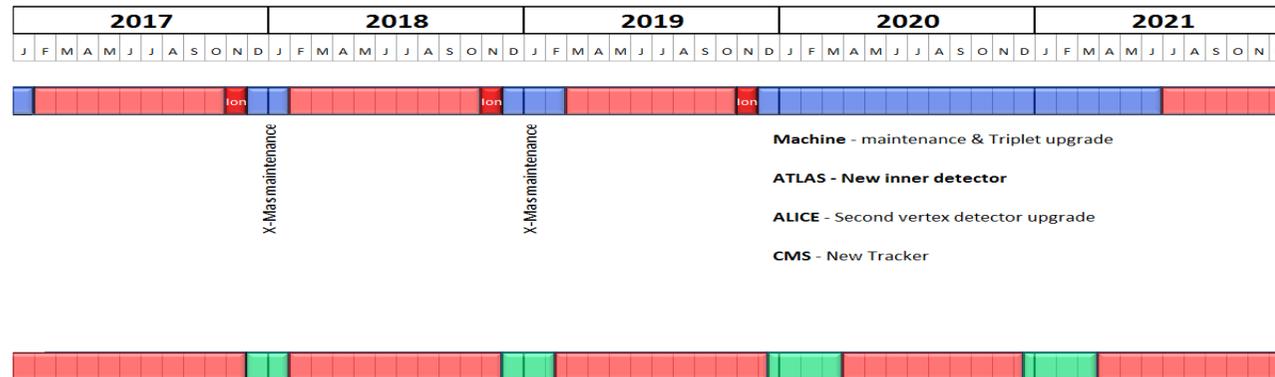
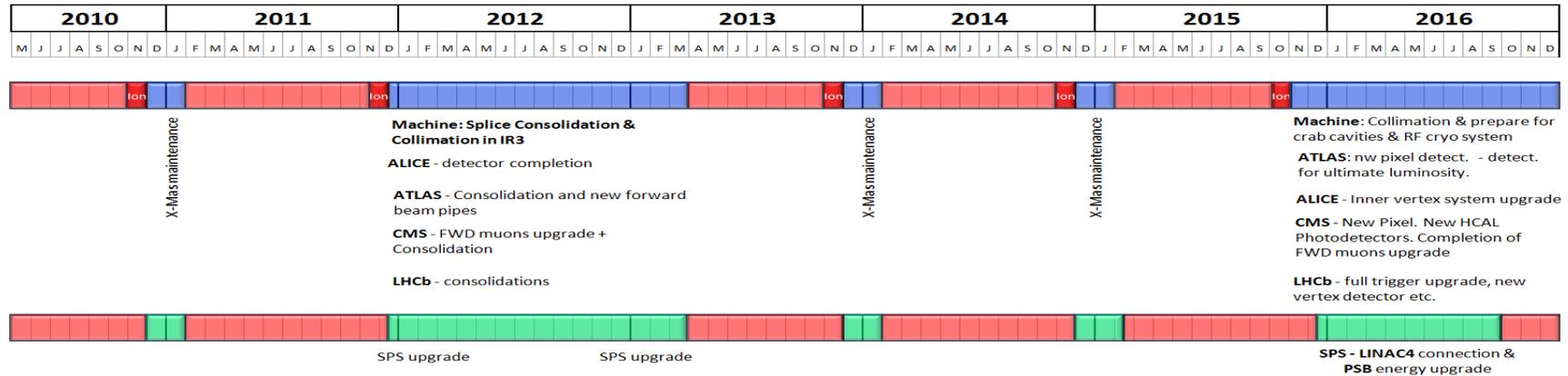


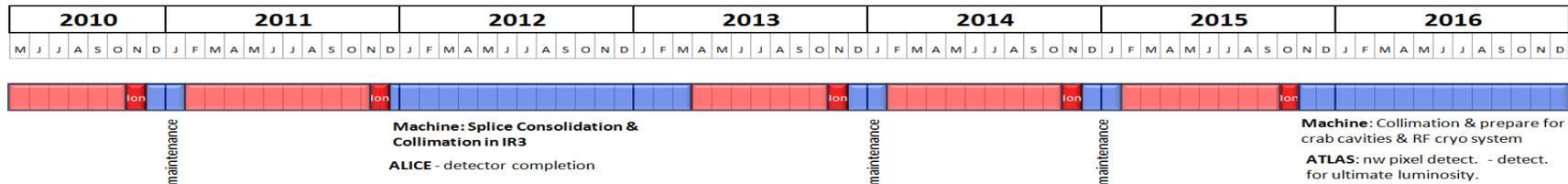
Production d'événements di-jets centraux et plus asymétriques dans les interactions Pb-Pb



Le programme du LHC dans les années à venir

Un programme futur riche et prometteur

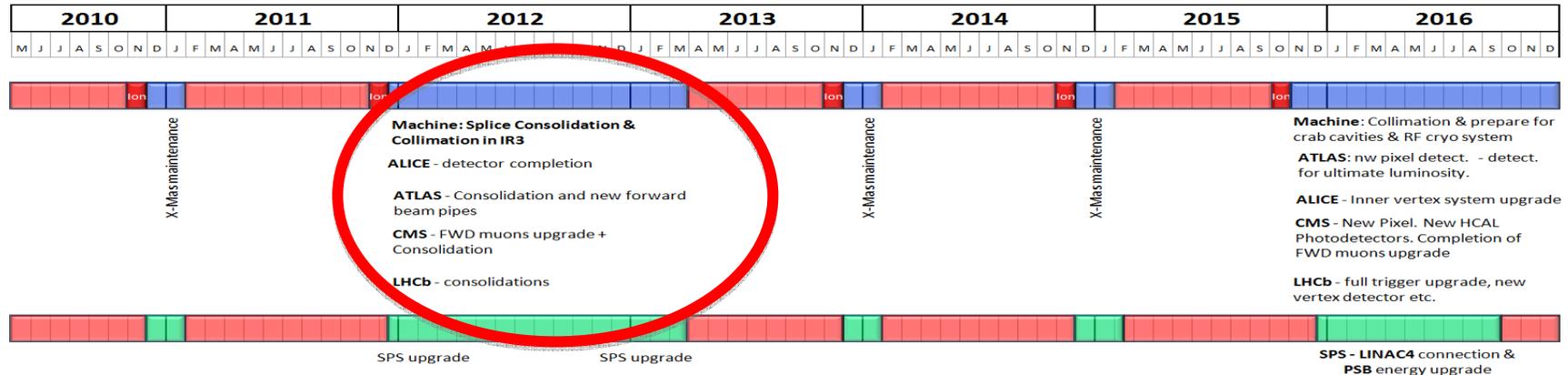




- Chaque année 4 semaines de fonctionnement en mode ions lourds
- Arrêt annuel (Xmas shutdown) de 8 à 9 semaines
- 15 mois d'arrêt en 2012/2013 → LHC à l'énergie nominale
- 15 mois d'arrêt en 2016 → 1^{ère} phase de mise à niveau (détecteurs/accélérateur)
- 19 mois d'arrêt en 2020 → 2^{ème} phase de mise à niveau (détecteurs/accélérateur)
- ~60 mois de prise de données en mode pp en 10 ans



Période 2012-2013



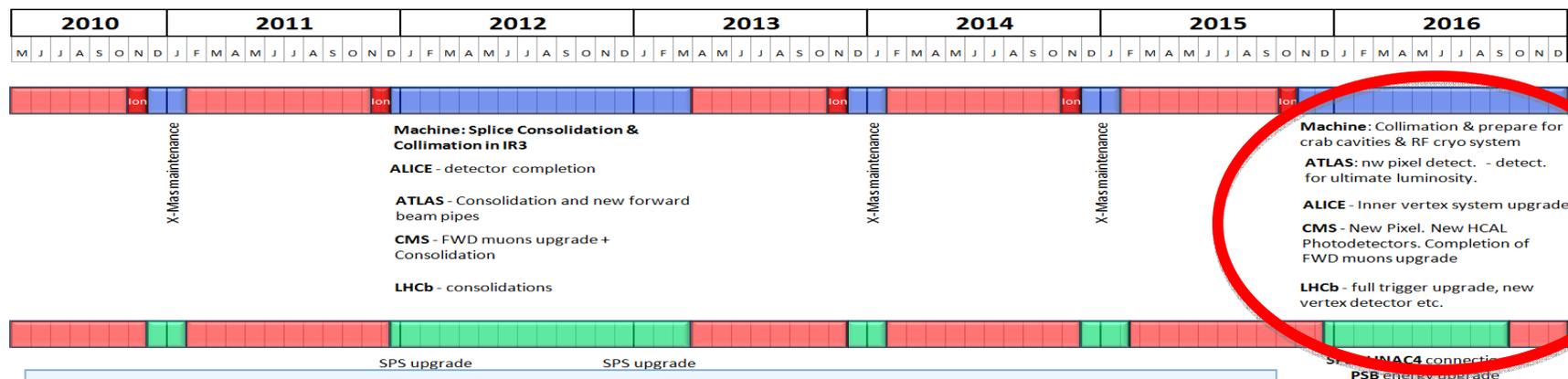
Planning pour 2012-2013:

- Objectif principal : réparer les raccords entre aimants dipôlaire pour pouvoir atteindre l'énergie (14 TeV) et la luminosité (10^{34}) nominales.
- Avant l'arrêt: améliorer les performances actuelles du LHC en 2011 pour atteindre une luminosité instantanée supérieure à $5 \cdot 10^{32}$ et fonctionner éventuellement à une énergie de 8 à 9 TeV.
- Etendre le fonctionnement du LHC à 2012.

Des discussions sont actuellement en cours entre les expériences, les ingénieurs responsables du collisionneur et la direction du CERN sur le meilleur scénario possible en termes de quantité de données à récolter et des résultats de physique qui pourront être atteints par les expériences.

→ Les décisions sur le meilleur scénario pour la période 2012-2013 seront prises début 2011.

Arrêt en 2016



- Motivation principale: préparer le LHC et les expériences à faire face à 3 années de fonctionnement au maximum de leurs potentiel:
 - $L_{int}^p > 70 \text{ fb}^{-1} / \text{an}$: $\sim 3 \cdot 10^6$ Higgs de $120 \text{ GeV}/c^2$ produits/an
- Mise en service du LINAC4 + divers consolidations/mises à niveau
- Mises à niveau des détecteurs pour faire face à une luminosité intégrée de $L_{inst}^p \sim 2 \cdot 10^{34}$ (plus de 40 collisions/croisement) .

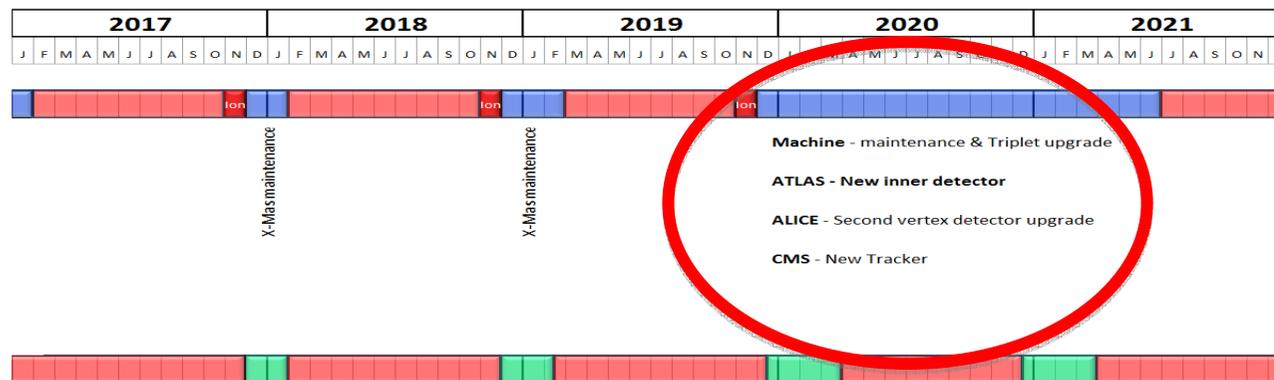
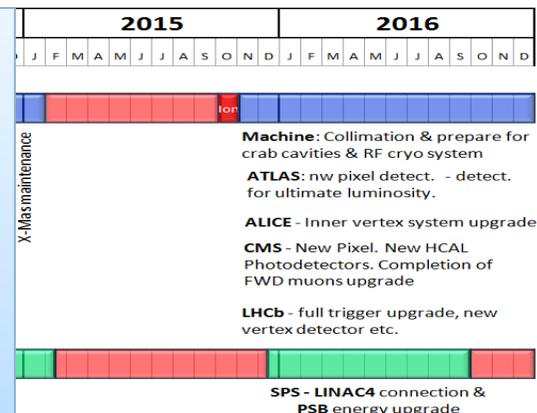


Arrêt en 2020

- Motivation principale: préparer le LHC et les expériences pour une Luminosité de $L_{int}=5 \cdot 10^{34}$ (>200 collisions/croisement).
→ 10 ans additionnels de prise de données: $\sim 3000 \text{ fb}^{-1}$

ATLAS:

- Nouveau trajectographe
- Système d'acquisition des données et de filtrage complètement rénové.



Conclusions et perspectives

- L'exploitation du collisionneur LHC a commencé fin mars 2010 avec les premières collisions proton-proton à une énergie au CM de 7 TeV et une luminosité qui s'est améliorée au fil des mois pour atteindre les objectifs fixés pour cette année ($2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Elle s'est poursuivie avec les premières collisions d'ions lourds (Pb-Pb) avec une énergie au CM de 2.76 TeV par paire de nucléons.
- Les données recueillies par les 4 expériences ont permis de mesurer les performances des détecteurs et de qualifier leurs systèmes d'acquisition, leurs chaînes de reconstruction des processus physiques ainsi que les outils d'analyse des données à travers les études des premiers signaux de physique du Modèle Standard (MS) de la physique des particules.
- L'analyse des données de collisions Pb-Pb en un temps record a permis d'observer le phénomène d'étouffement des jets (jets quenching) qui signal la formation lors des collisions d'un plasma de quarks et gluons. Elle a permis aussi d'observer pour la première fois la production du boson Z dans les collisions d'ions lourds.
- Cette étape importante est une remarquable réussite. Elle s'est soldée par plusieurs (> 25) publications scientifiques et d'autres en cours de préparation et permet d'envisager l'année 2011 avec beaucoup d'optimisme. La quantité de données qui sera produite en 2011 permettra d'améliorer nos connaissances de la physique du MS et d'analyser en profondeur le phénomène de quenching avec les jets et d'autres outils et d'étudier les propriétés du plasma primordial de la matière. Elle permettra aussi de déployer un important et vaste programme d'analyse physique pour étendre l'intervalle de masse dans la recherche du boson de Higgs et de lever le voile sur toute nouvelle physique au-delà du MS.

Conclusions et perspectives (suite)

- Un arrêt (16 mois) est prévu à la fin 2011 ou la fin 2012 pour préparer la machine à une nouvelle phase de prise de données et d'analyse de physique avec une énergie au CM de 14 TeV. La luminosité nominale de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ sera probablement atteinte en 2014 ou 2015. Cette phase durera jusqu'en 2016 et permettra d'explorer la totalité de l'intervalle de masse du boson de Higgs et donc de mettre en évidence son existence ou son absence. Elle permettra aussi d'explorer une large gamme de nouvelles physiques prédites ou non par des modèles théoriques au-delà du MS.
- Les autres phases d'arrêt en 2016 et 2020 permettront de préparer le LHC et les expériences à faire face à plusieurs années de fonctionnement au maximum de leurs potentiels à haute luminosité.
- Le programme de physique au LHC continuera jusqu'en 2030 avec probablement une ou deux périodes d'arrêt pour améliorer les performances de la machine et des détecteurs. La durée et les investissements qui seront réalisés durant cette phase seront guidés par les résultats obtenus dans les phases précédentes.

Le mot de la fin

En l'espace de huit mois environ, on a pu retrouver dans les mesures et les publications des expériences LHC pratiquement tous les résultats de la physique de ces cinquante dernières années. C'est en soi une prouesse remarquable, mais ce n'est pas tout. Des résultats relevant de la nouvelle physique ont également été publiés. Tout cela s'avère particulièrement prometteur pour 2011.

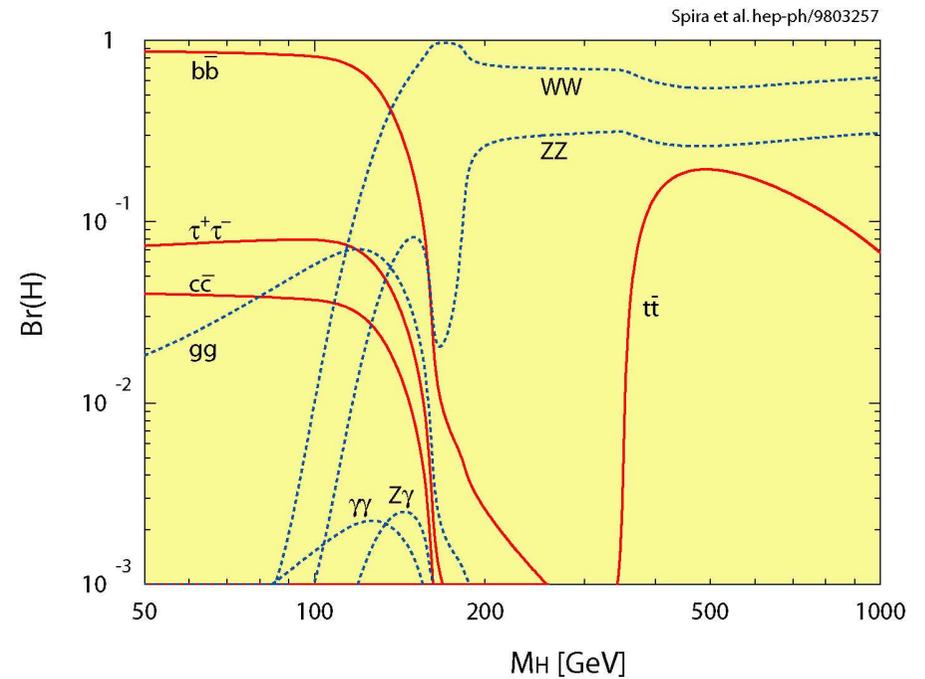
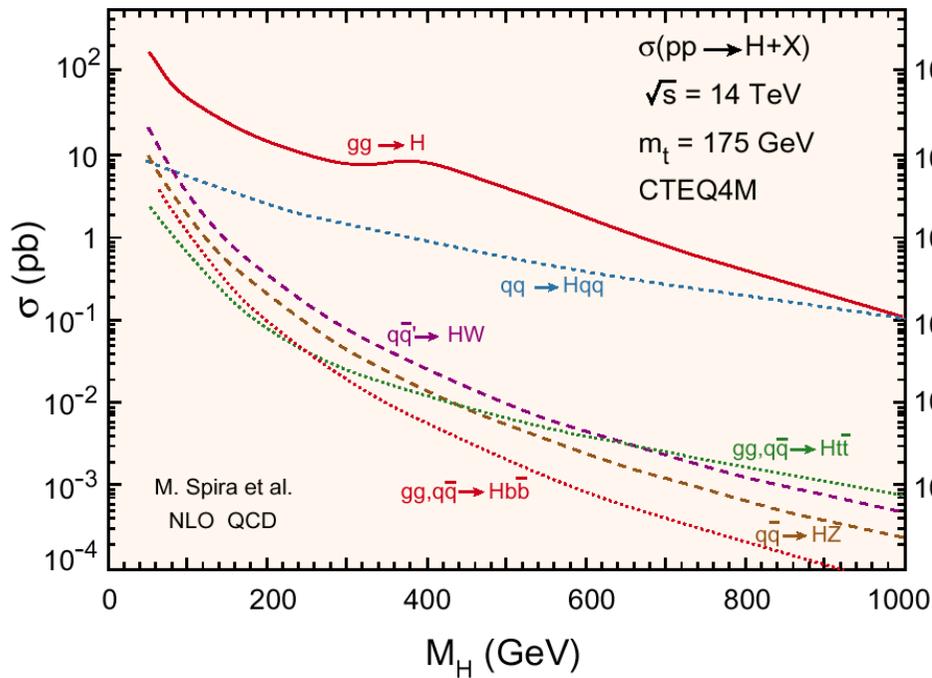
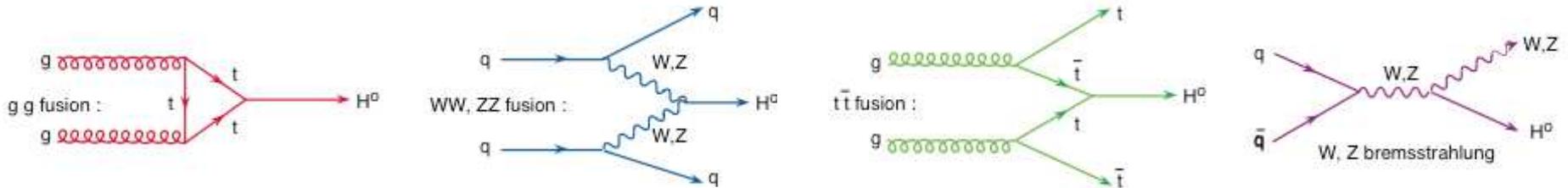
La réussite du programme LHC cette année revêt une importance capitale, non seulement pour la physique des particules, mais également pour la science en général. Grâce au LHC, on parle beaucoup plus de science qu'on ne le faisait depuis bien longtemps. On a même entendu un présentateur de télévision employer en anglais l'expression « hadron collider of people » pour décrire un important rassemblement de personnes. Cela peut paraître anodin, mais cela signifie que la science que nous étudions suscite de l'intérêt, si bien que lorsque nous avons quelque chose d'important à dire, les gens nous écoutent. La couverture médiatique dont nous avons fait l'objet a pour l'essentiel été très positive et relativement exacte.

Le CERN étant un laboratoire de science fondamentale, il est important que le public comprenne et apprécie la valeur de la science fondamentale. Mais nous devons également garder à l'esprit que sans science fondamentale, il n'y aurait pas de science appliquée. C'est pourquoi il importe de célébrer le succès du programme du CERN.

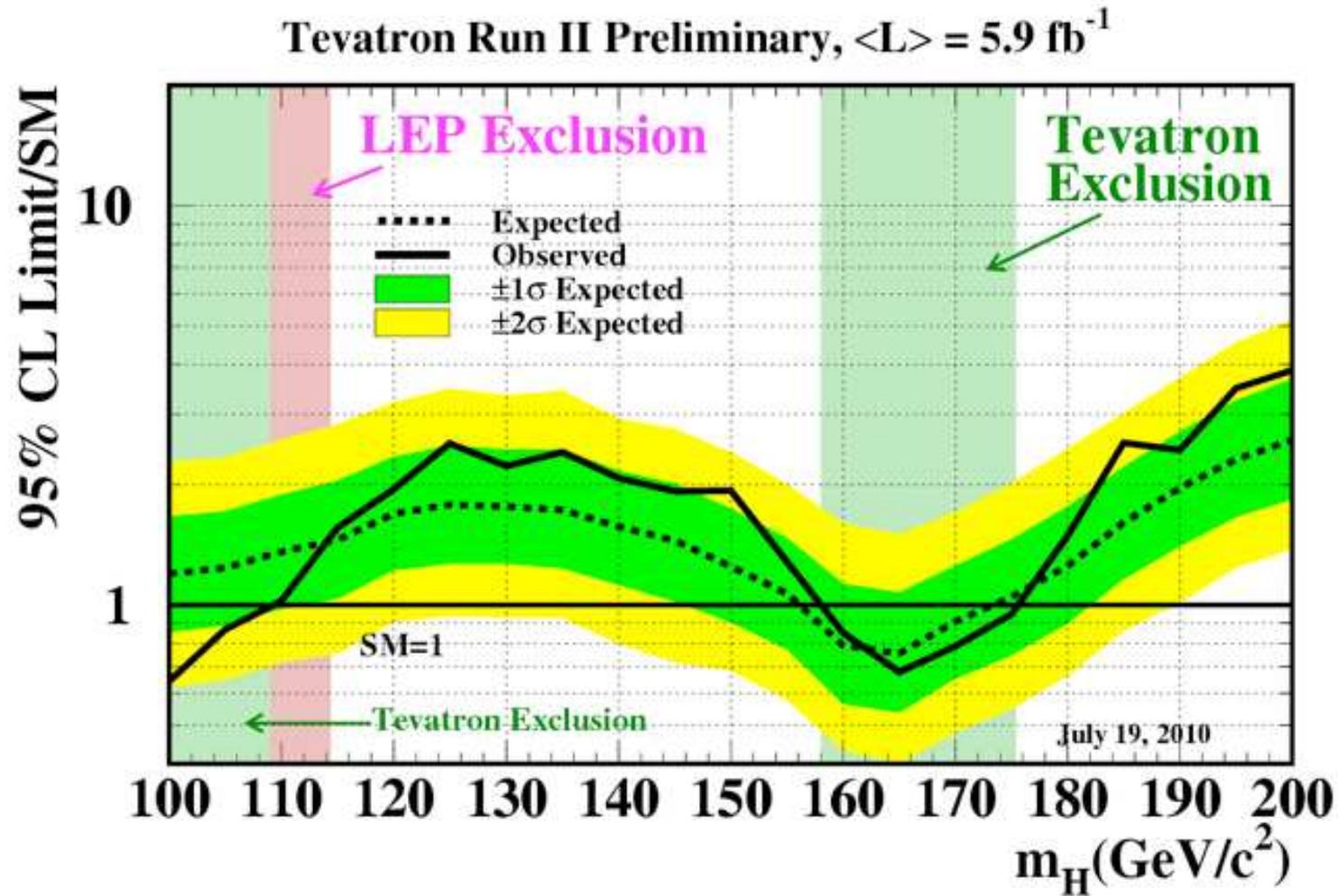
*Sergio Bertolucci et Steve Myers
CERN, 7 décembre 2010*

Informations additionnelles

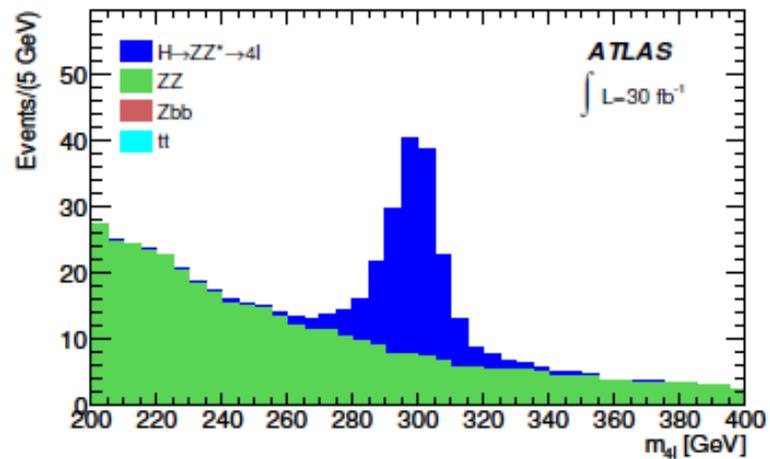
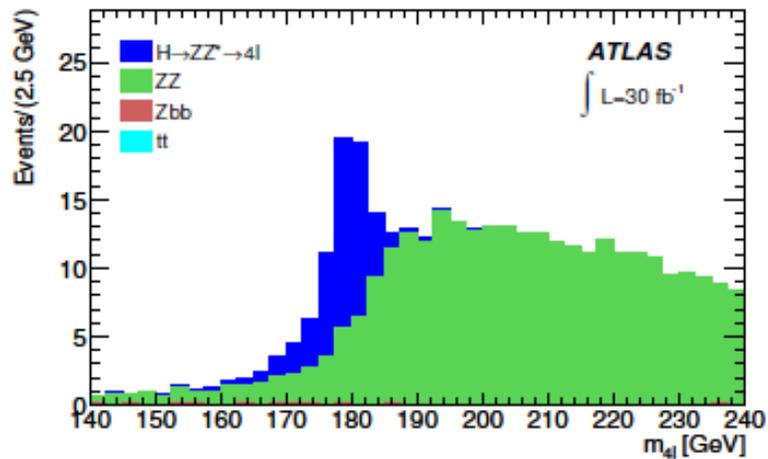
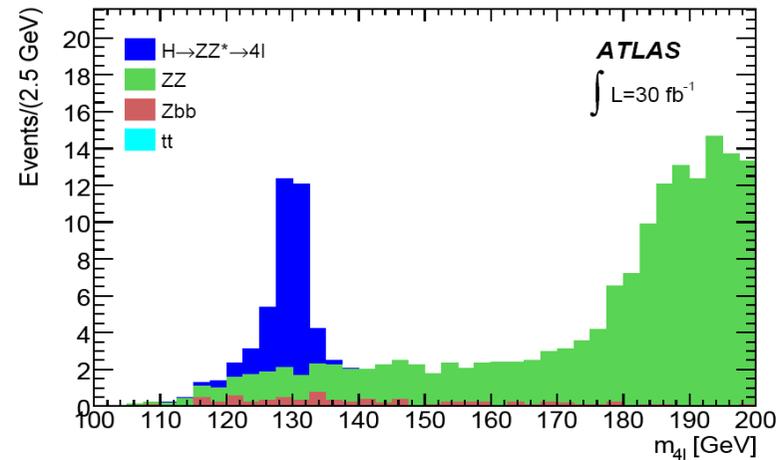
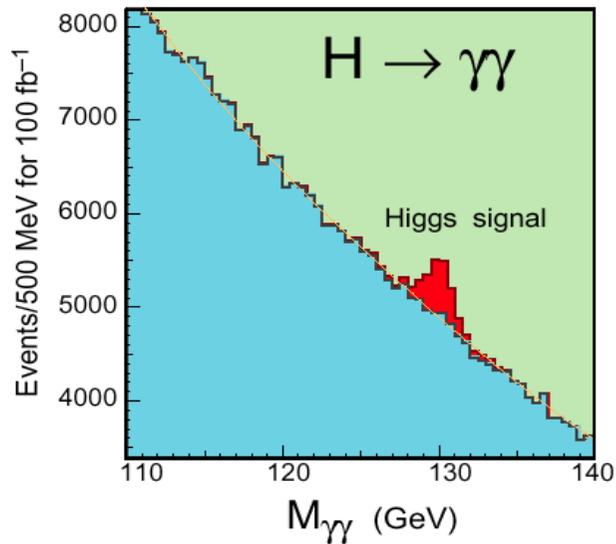
Recherche du Higgs standard au LHC



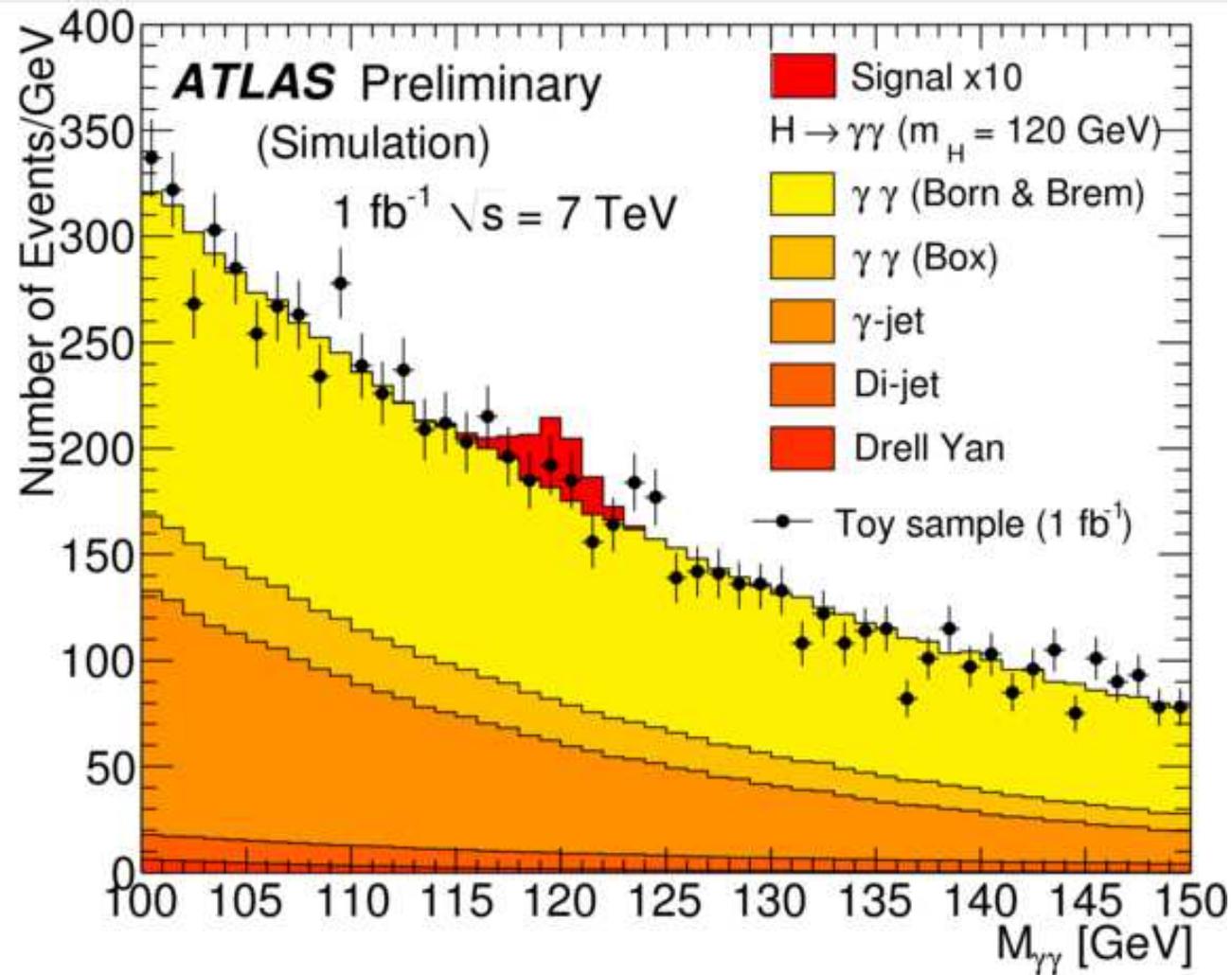
Intervalles d'exclusion de la masse du Higgs



Recherche du boson de Higgs au LHC



Recherche du boson de Higgs au LHC



Résumé du potentiel de découverte du Higgs au LHC

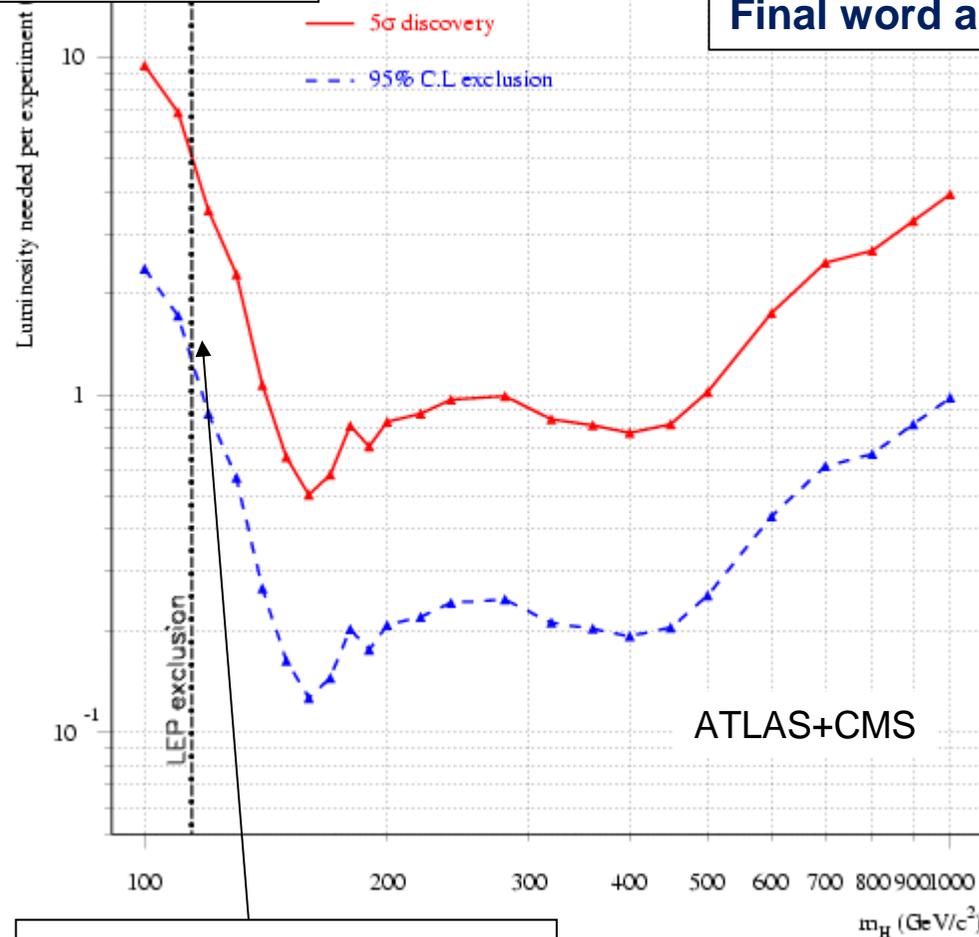
∫Ldt nécessaire
par expérience
(fb⁻¹)

Avec

1 fb⁻¹: exclusion à 95% C.L.

5 fb⁻¹: découverte à 5σ sur tout l'intervalle de masse

Final word about Higgs mechanism by end 2015 ?



La région la plus difficile

Supersymétrie

Symétrie entre fermions et bosons:

Particule de spin s → partenaire supersymétrique avec spin $s-1/2$

- Unification de la description des fermions et des bosons et donc des champs de matière et d'interaction.
- Permet de résoudre les problèmes du Modèle Standard SM (non naturalité).

| SM Particles | SUSY Particles | |
|-----------------------------|-----------------|--|
| quarks: q | q | squarks: \tilde{q} |
| leptons: l | l | sleptons: \tilde{l} |
| gluons: g | g | gluino: \tilde{g} |
| charged weak boson: W^\pm | W^\pm | Wino: \tilde{W}^\pm |
| Higgs: H^0 | H^\pm | charged higgsino: \tilde{H}^\pm |
| | h^0, A^0, H^0 | neutral higgsino: \tilde{h}^0, \tilde{A}^0 |
| neutral weak boson: Z^0 | Z^0 | Zino: \tilde{Z}^0 |
| photon: γ | γ | photino: $\tilde{\gamma}$ |

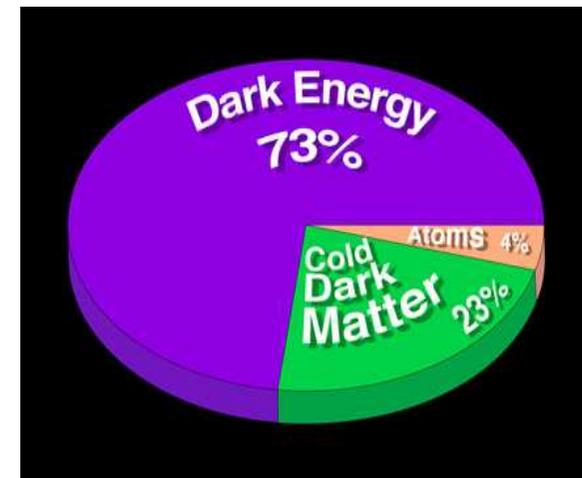
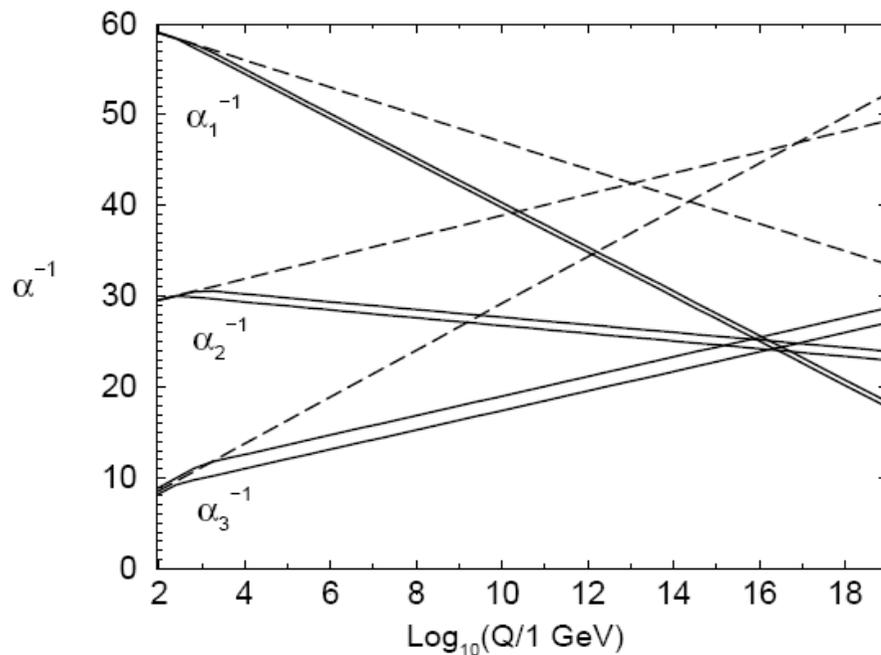
} $\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$ chargino

} \tilde{H}^0 higgsino

} $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$ neutralino

Supersymétrie

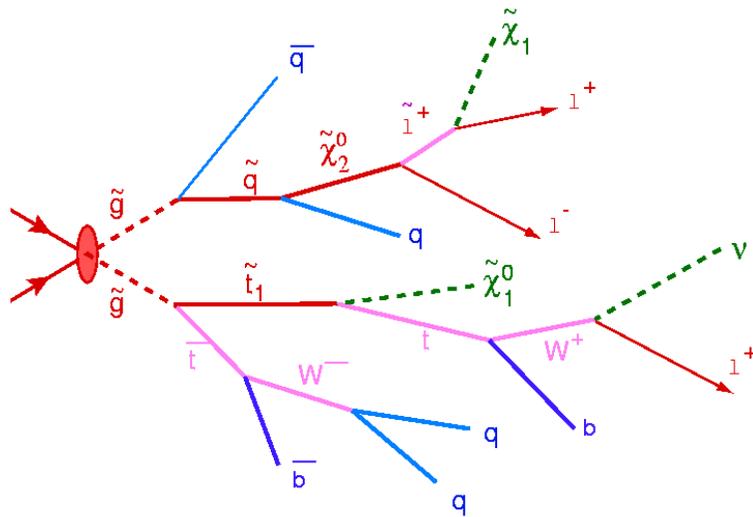
- Permet d'introduire la gravitation (modèle mSUGRA)
- Permet l'unification des constantes de couplage
- La particule supersymétrique la plus légère (**LSP**) candidate naturelle pour la matière noire non baryonique



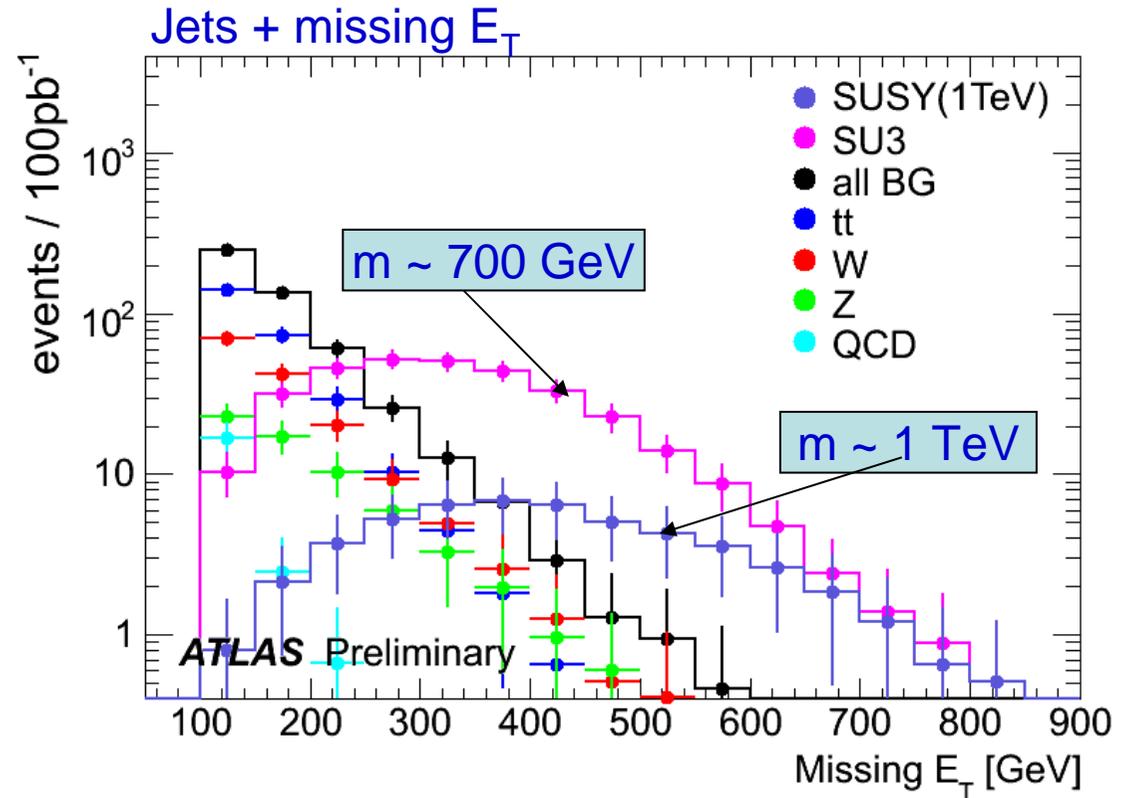
Recherche de la supersymétrie

Grande section efficace de production
 Pour $m_{\text{squark, gluino}} \sim 1 \text{ TeV}$ le taux de
 Production de $\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{g}$ est de
 $\sim 1 \text{ evt par jour à } L=10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

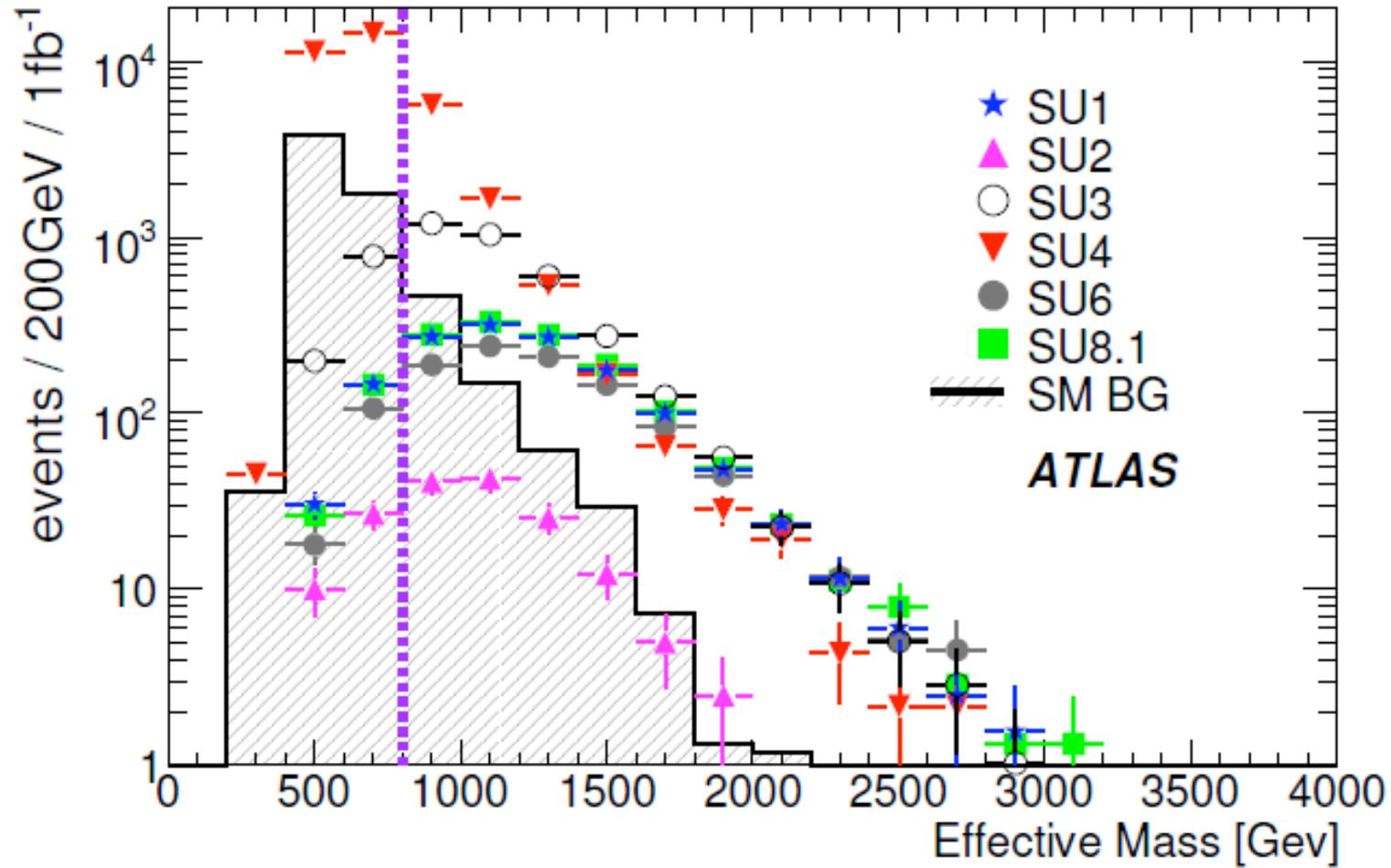
Si les masses des particules supersymétriques est a l'échelle du TeV, on devrait les observer rapidement au LHC.



Etat final spectaculaire:
 3 leptons isolés + 2 jets b + 4 jets
 + Energie manquante.

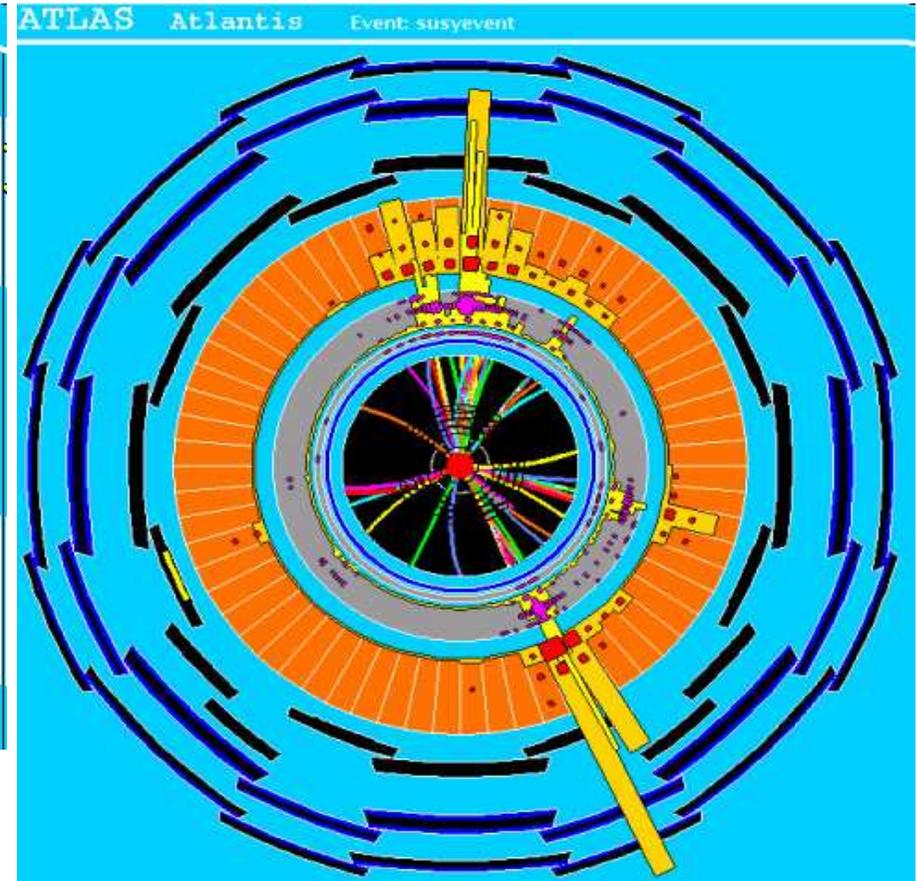
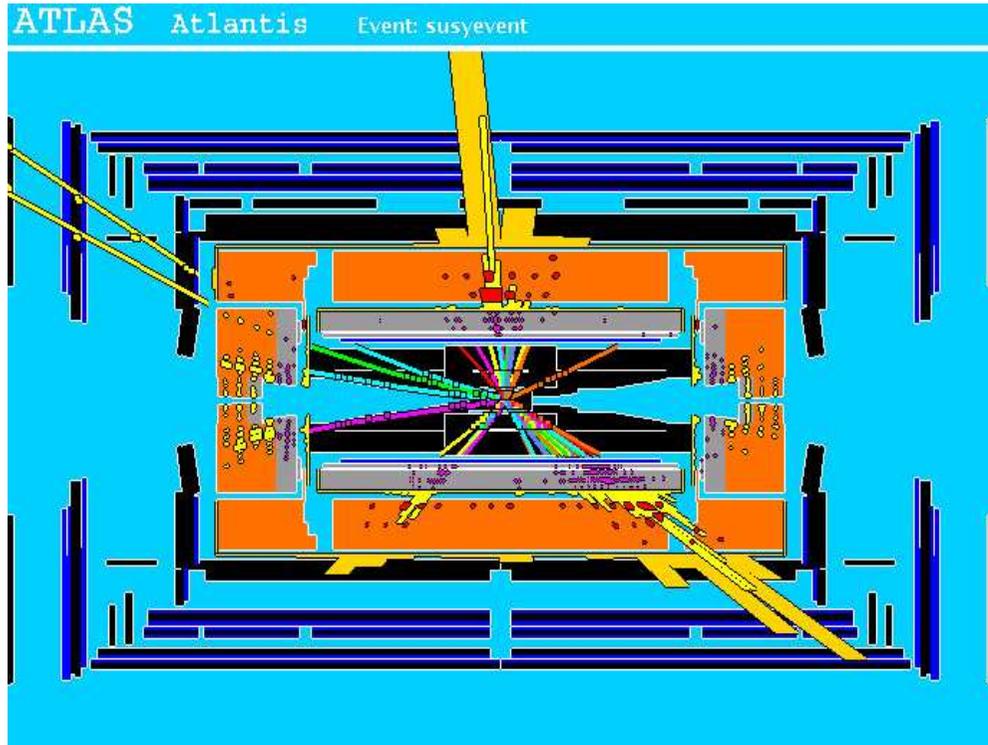


Recherche de la supersymétrie: 4 jets + Missing E_T



$$M_{\text{eff}} \equiv \sum_{i=1}^4 p_T^{\text{jet},i} + \sum_{i=1} p_T^{\text{lep},i} + E_T^{\text{miss}}$$

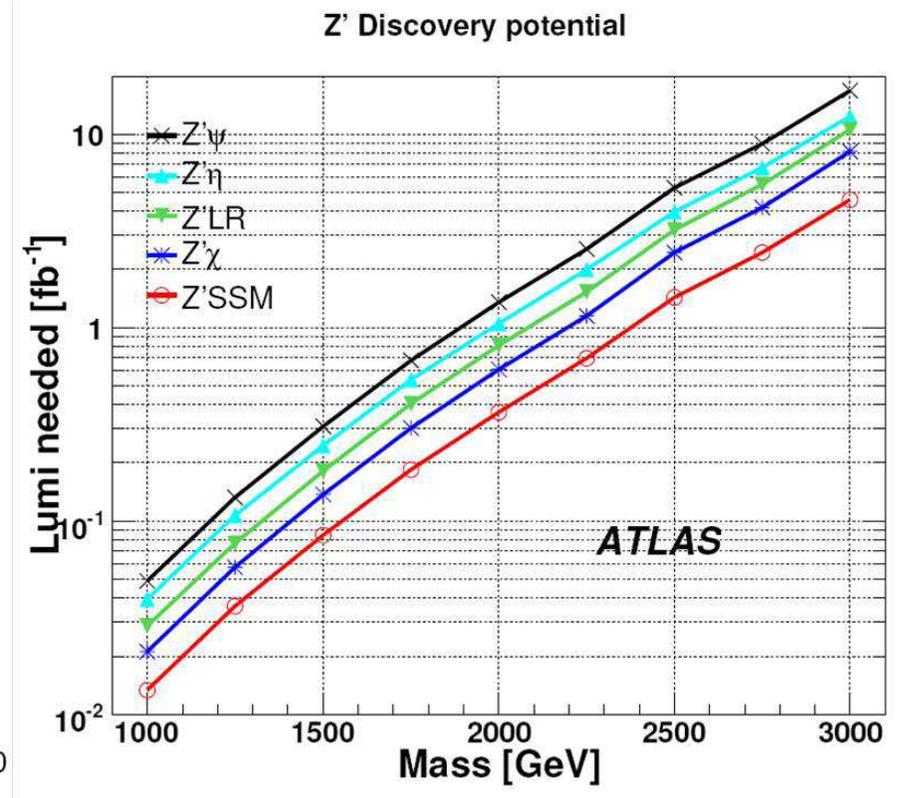
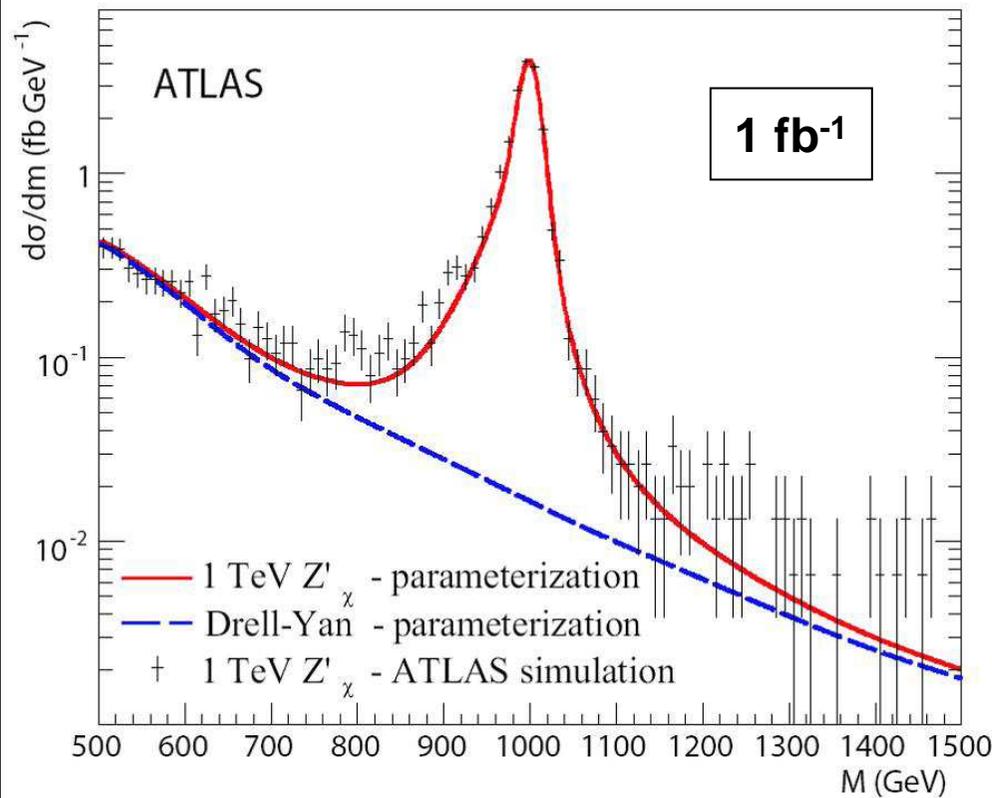
Reconstruction d'un événement supersymétrique dans le détecteur



Evénement contenant:

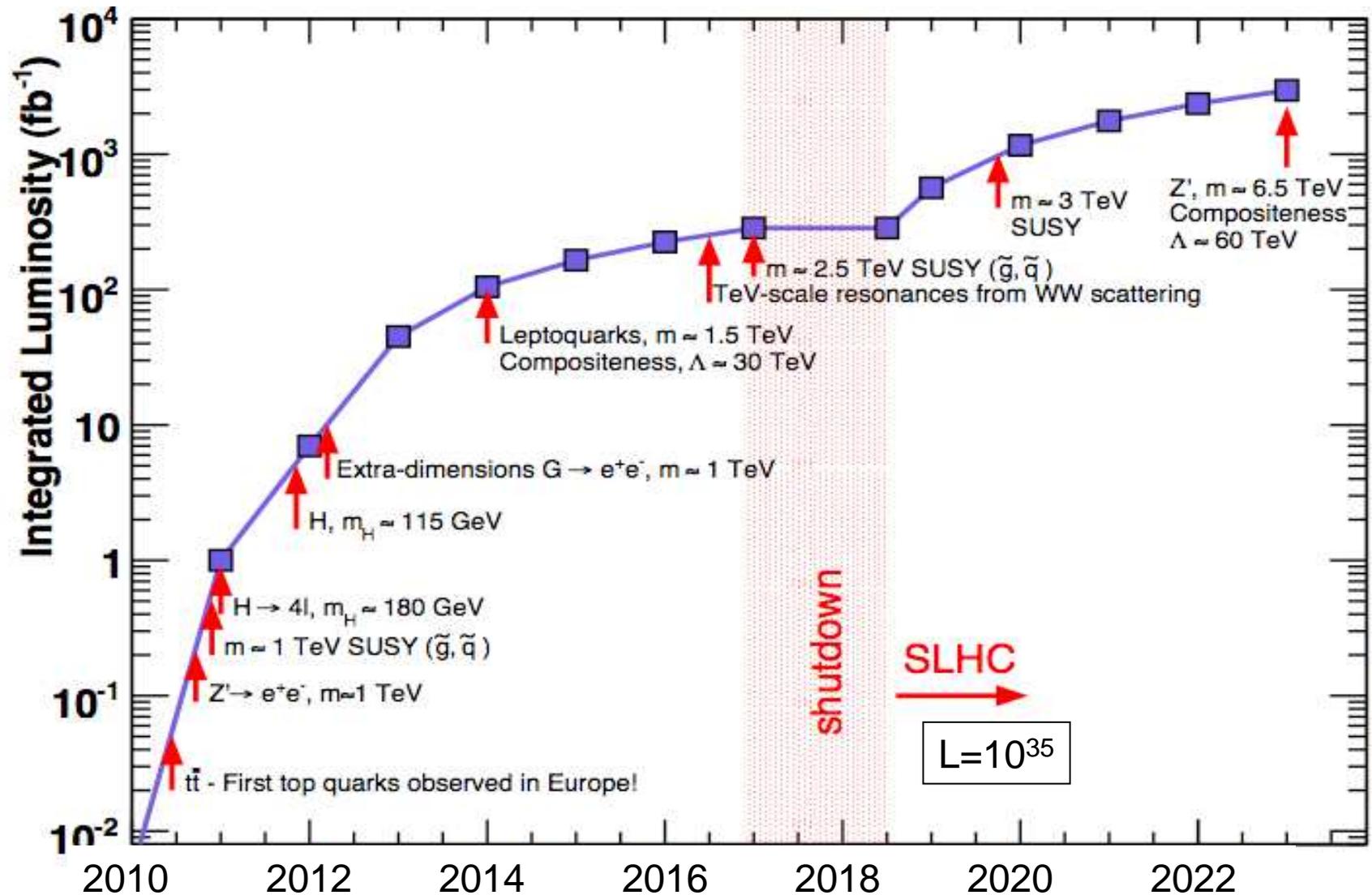
- 6 jets
- 2 muons de même signe
- Energie manquante transverse

Recherche de résonances de grande masse $Z' \rightarrow l^+l^-$



- Faible bruit de fond Drell-Yan à grande masse.
- Avec **100 pb⁻¹** possibilité de découverte jusqu'à une masse de **1.5 TeV** (limite actuelle au Tevatron est de 1 TeV @95% CL.
- Avec **300 fb⁻¹** possibilité de découverte jusqu'à **5 TeV**.

Potentiel de découverte du LHC en fonction du temps



Le collisionneur LHC

Salle de contrôle du LHC

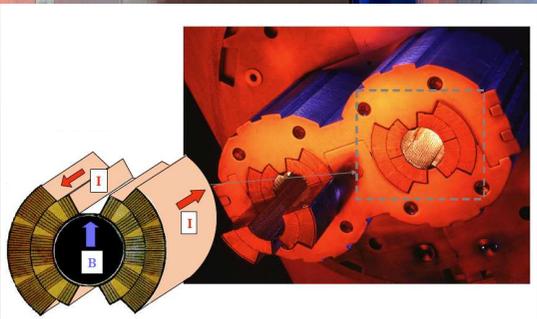
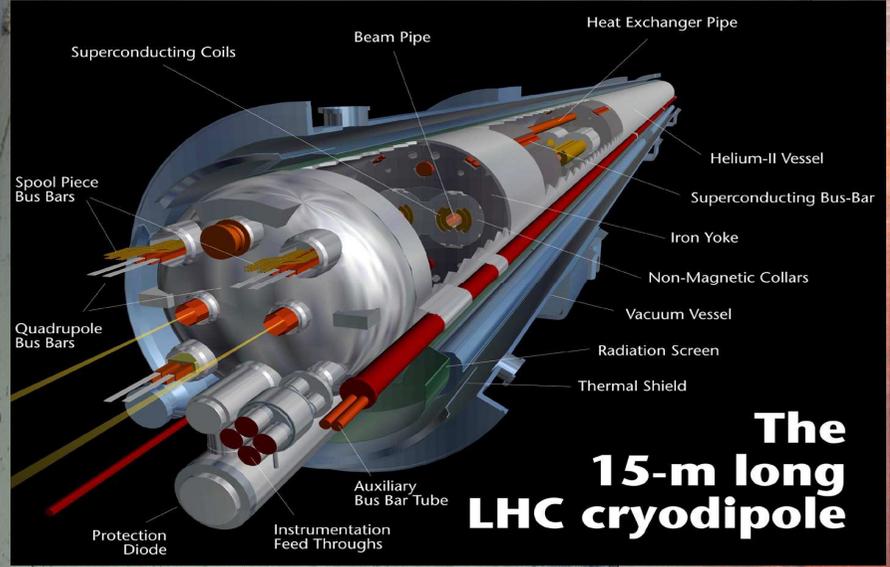
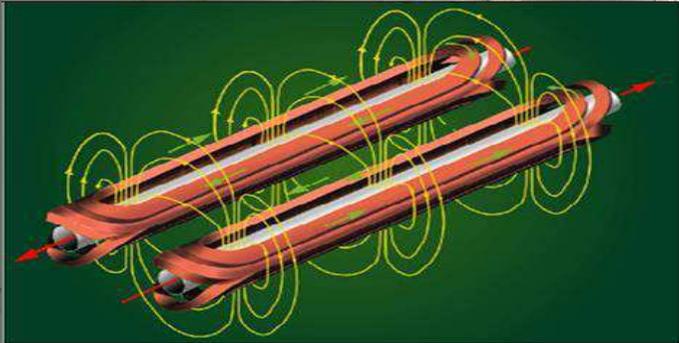
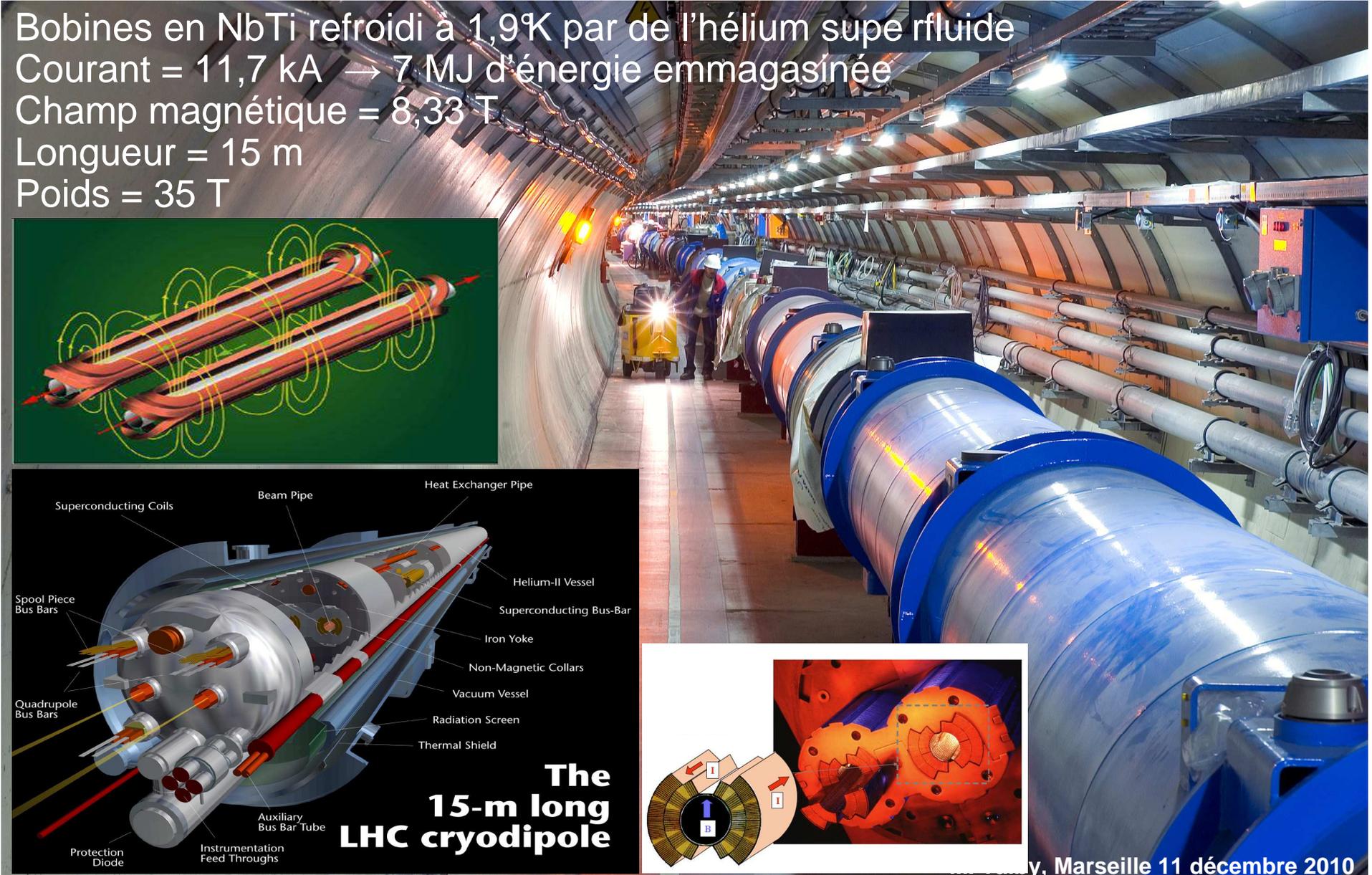
Premier faisceau circulant dans le LHC



M. Talby, Marseille 11 décembre 2010

1232 dipôles magnétiques supraconducteurs

Bobines en NbTi refroidi à 1,9 K par de l'hélium superfluide
Courant = 11,7 kA → 7 MJ d'énergie emmagasinée
Champ magnétique = 8,33 T
Longueur = 15 m
Poids = 35 T



... des quadripôles magnétiques

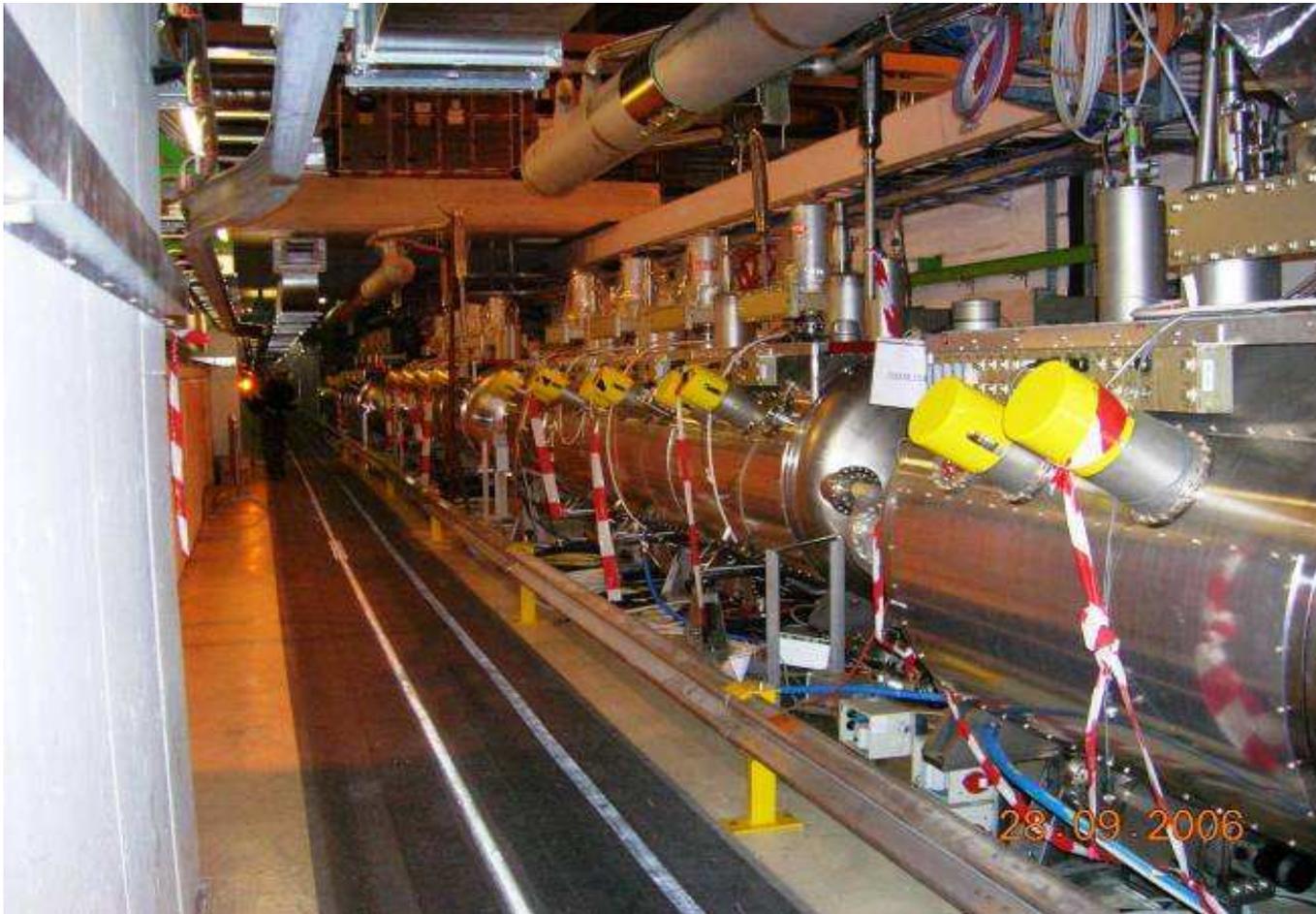


... des cavités RF d'accélération

Le LHC utilise **8** cavités supraconductrices par faisceau fonctionnant à **4,5°K**

Champ d'accélération: **5 MV/m** à **400 MHz**.

Perte d'énergie par rayonnement synchrotron (à **7 TeV**): **6,7 KeV** par tour.



Production et accélération des protons au LHC

- Des atomes d'hydrogène sont extraits d'une bouteille d'hydrogène ordinaire. On obtient des protons en arrachant à des atomes d'hydrogène leur électron en orbite.
- Les protons passent du Linac2 dans l'injecteur du Synchrotron à protons (PS Booster, PSB) à une énergie de 50 MeV. Le PSB les accélère à 1,4 GeV.
- Le faisceau est ensuite injecté dans le Synchrotron à protons (PS), où son énergie est portée à 25 GeV. Puis les protons sont envoyés dans le Supersynchrotron à protons (SPS), où ils sont accélérés à 450 GeV.
- Enfin, ils sont transférés dans le LHC (dans le sens des aiguilles d'une montre et inversement, avec un temps de remplissage de 4 min 20 s par anneau), où ils sont accélérés pendant 20 minutes pour être portés à l'énergie nominale de 7 TeV.
- En conditions d'exploitation normales, les faisceaux circulent pendant plusieurs heures dans les tubes du LHC.

Comment sont produits les ions de Plomb au LHC ?

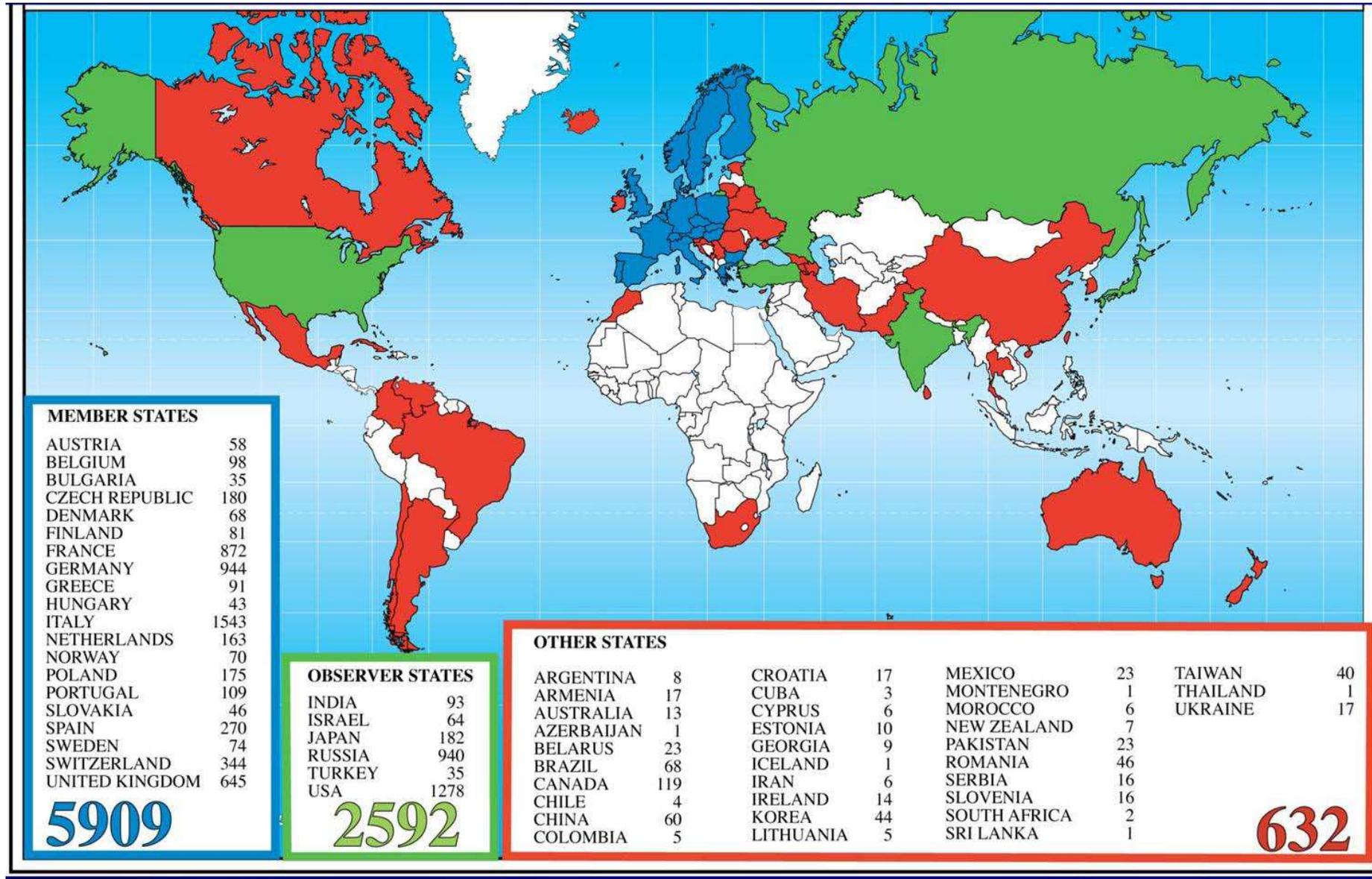
- Les ions plomb sont produits à partir d'un échantillon de plomb d'une extrême pureté chauffé à une température d'environ 500°C.
- Les ions ainsi produits portent des charges très variables, avec un maximum aux environs de Pb_{29+} . Ces ions sont sélectionnés puis accélérés à une énergie de 4,2 MeV/u (énergie par nucléon), avant de passer au travers d'une feuille de carbone qui les « épluche » et les transforme pour la plupart en Pb_{54+} .
- Une fois accumulés, les ions Pb_{54+} sont accélérés à 72 MeV/u dans le LEIR (Anneau d'ions de basse énergie), puis transférés dans le PS. Celui-ci accélère le faisceau pour le porter à 5,9 GeV/u et l'envoie dans le SPS, après lui avoir fait traverser une seconde feuille qui l'« épluche » totalement, produisant des Pb_{82+} .
- Le SPS porte le faisceau à 177 GeV/u, puis l'injecte dans le LHC, qui l'accélère à 2,76 TeV/u.



Les expériences au LHC

- **ALICE** : collaboration internationale de 1500 membres (104 instituts, 31 pays)
 - Taille du détecteur: 26 m de long, 16 m de large et 16 m de haut
 - Poids: 10000 tonnes
 - Coût (matériel): 115 MCHF
- **ATLAS** : collaboration internationale de 2800 membres (169 instituts, 37 pays)
 - Taille du détecteur: 46 m de long, 25 m de large et 25 m de haut
 - Poids: 7000 tonnes
 - coût (matériel): 540 MCHF
- **CMS** : collaboration internationale de 2000 membres (181 instituts, 38 pays)
 - Taille du détecteur: 21 m de long, 15 m de large, 15 m de haut
 - Poids: 12500 tonnes
 - Coût (matériel): 500 MCHF
- **LHCb**: collaboration internationale de 650 membres (47 instituts, 14 pays)
 - Taille du détecteur: 21 m de long, 13 m de large, 10 m de haut
 - Poids: 5600 tonnes
 - Coût (matériel): 75 MCHF

Chaque jour plus de 9000 chercheurs et ingénieurs du monde entier contribuent au LHC



ATLAS Collaboration

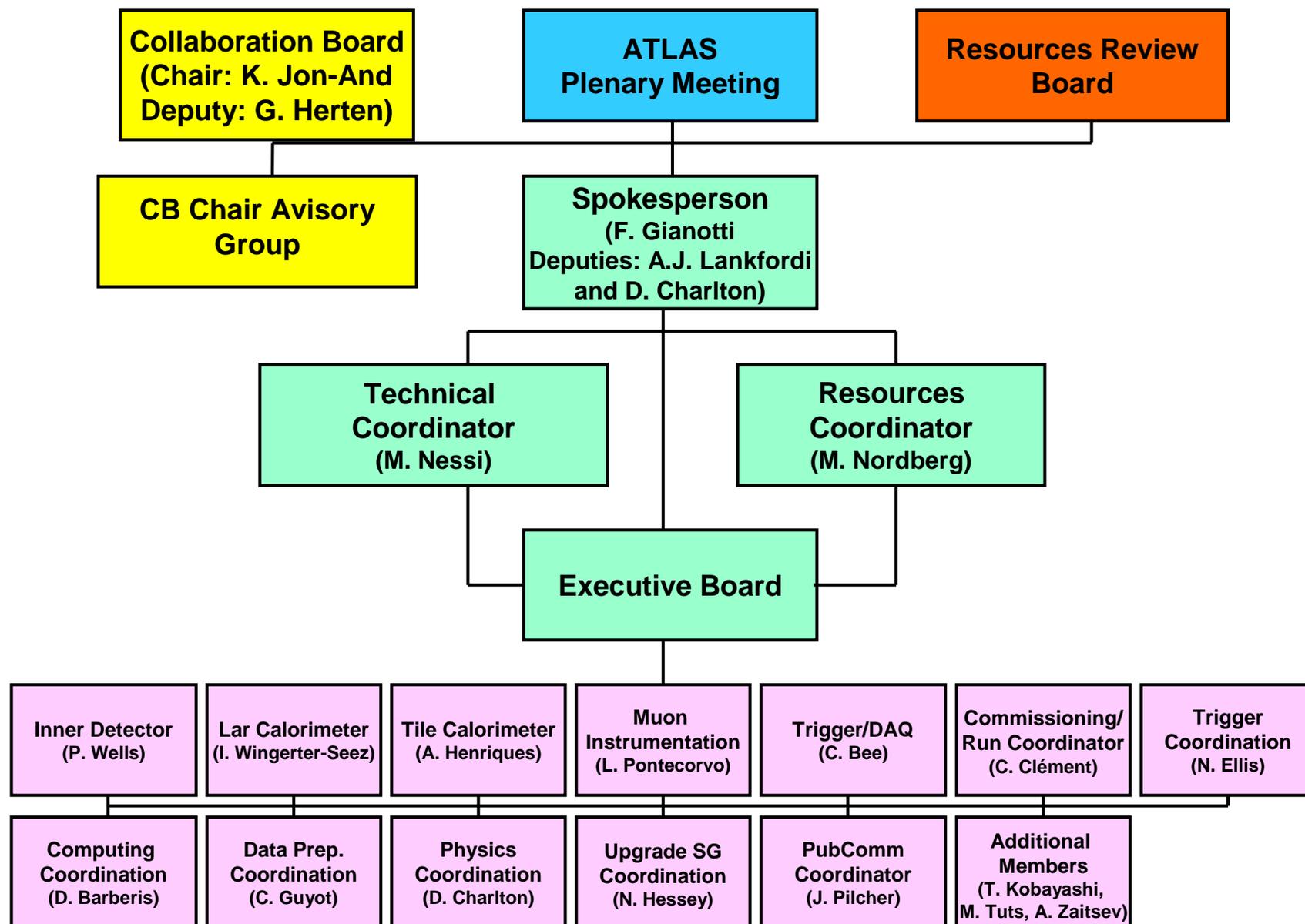
(Status April 2009)

37 Countries
169 Institutions
2800 Scientific participants total
(1850 with a PhD, for M&O share)



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, [LAPP Anecy](#), Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brazil Cluster, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, [Clermont-Ferrand](#), Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, UT Dallas, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, Göttingen, [LPSC Grenoble](#), Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, [CPPM Marseille](#), Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, RUPHE Morocco, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Olomouc, Oregon, [LAL Orsay](#), Osaka, Oslo, Oxford, [Paris VI and VII](#), Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, [IRFU-CEA](#), Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Würzburg, Yale, Yerevan

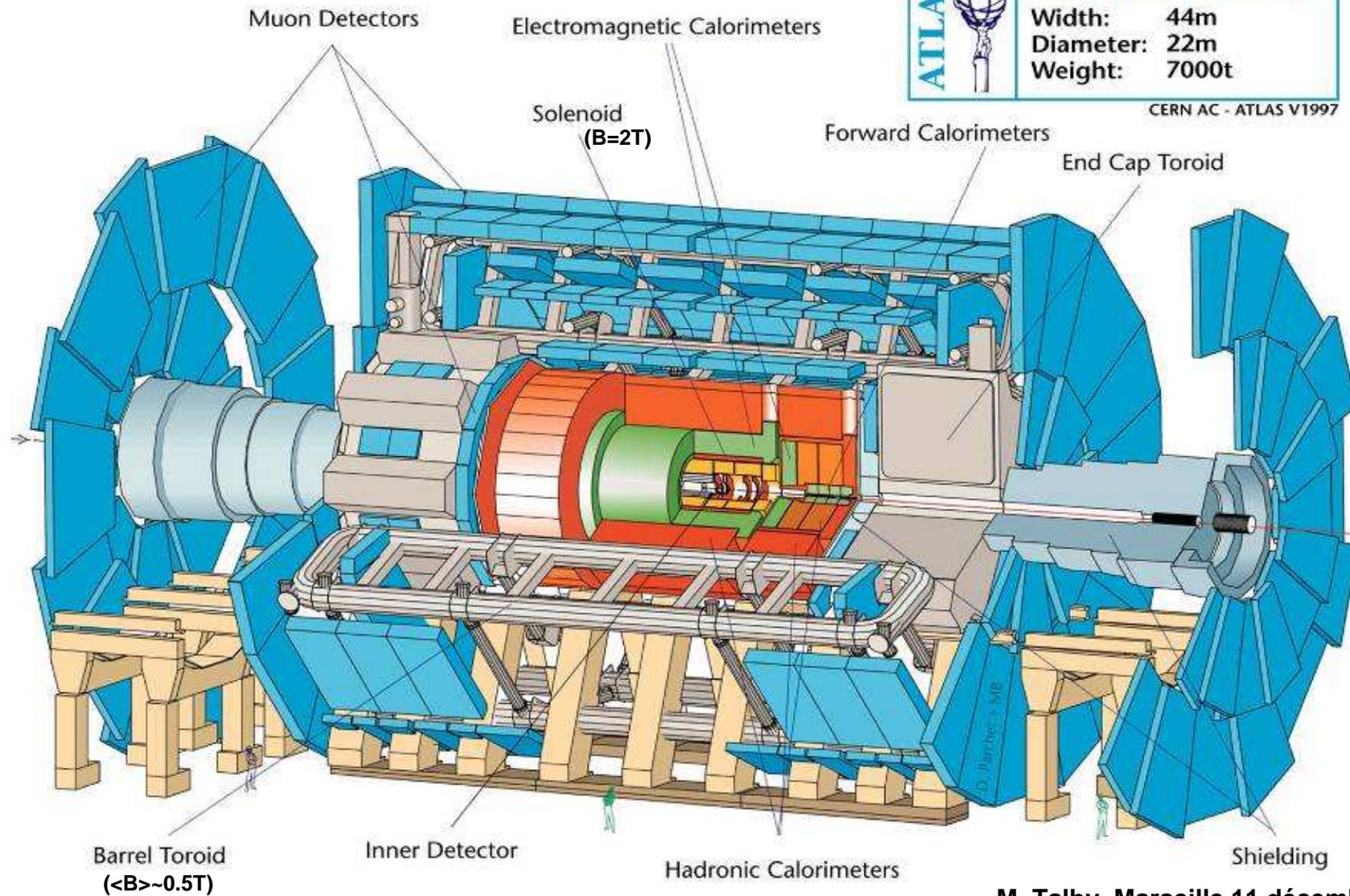
ATLAS organization - March 2009



Les détecteurs au LHC

Expérience ATLAS

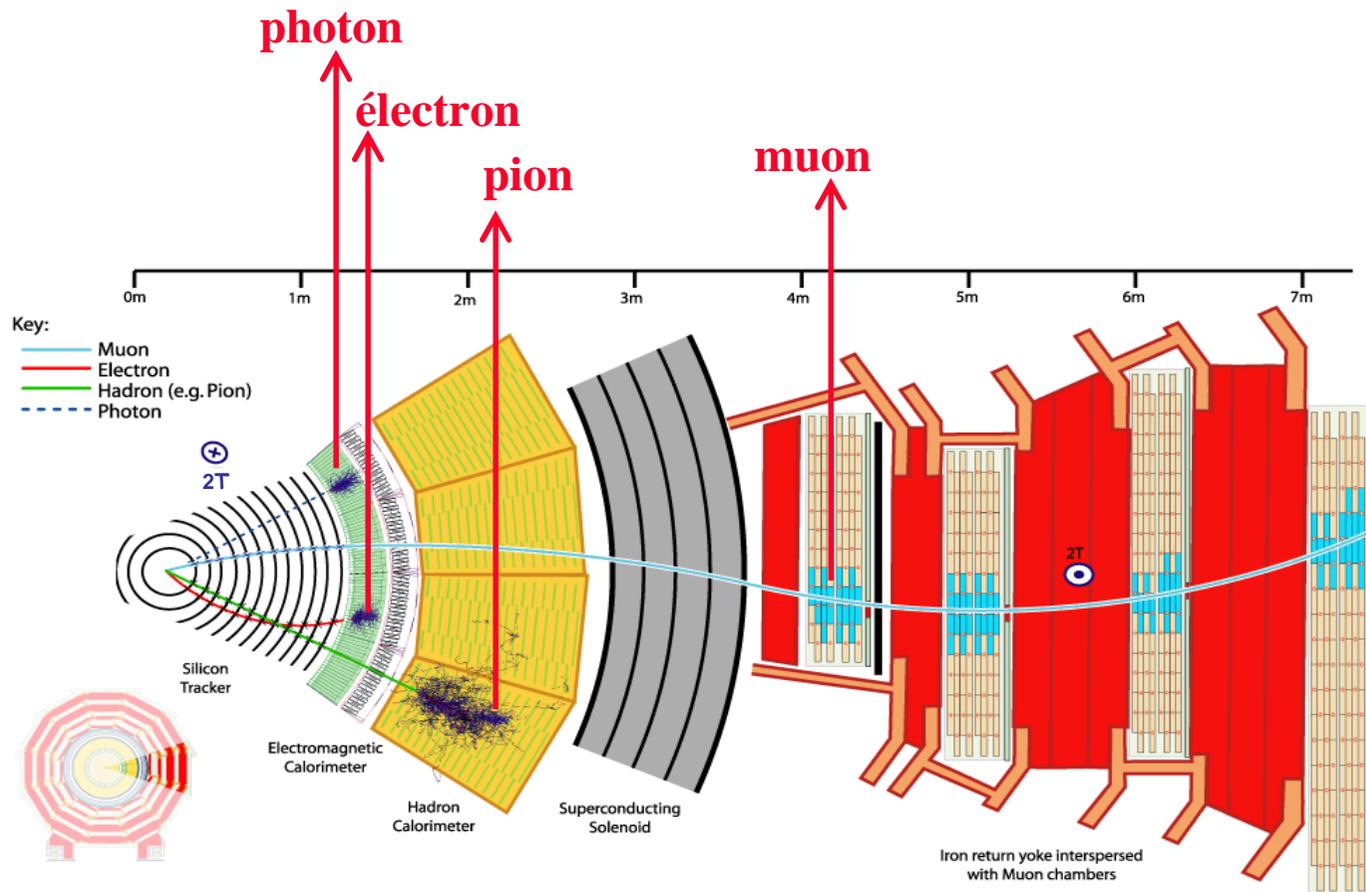
Volume : 20000m³



| | | | |
|-------|---|--------------------------|-------|
| ATLAS |  | Detector characteristics | |
| | | Width: | 44m |
| | | Diameter: | 22m |
| | | Weight: | 7000t |

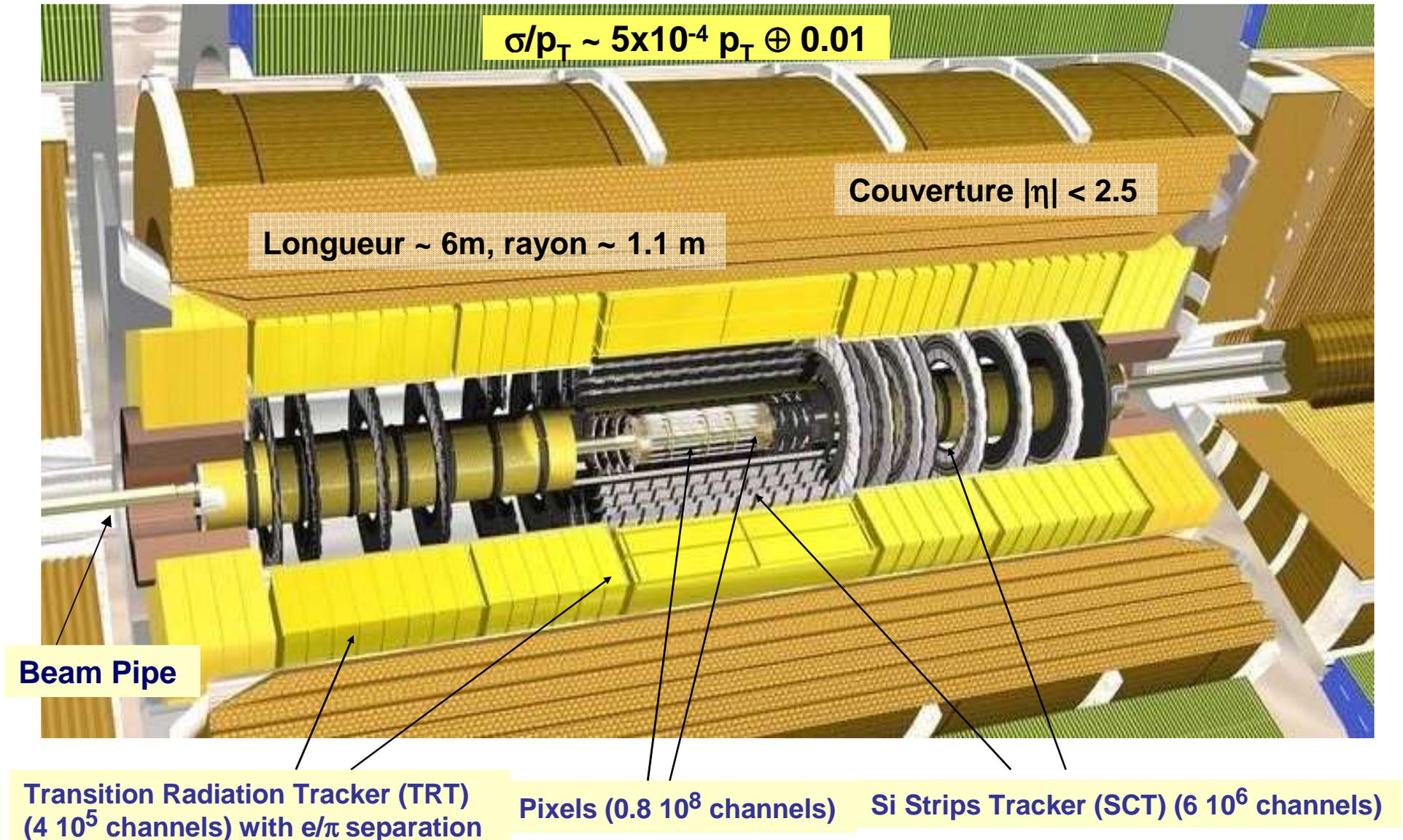
CERN AC - ATLAS V1997

Détection des particules

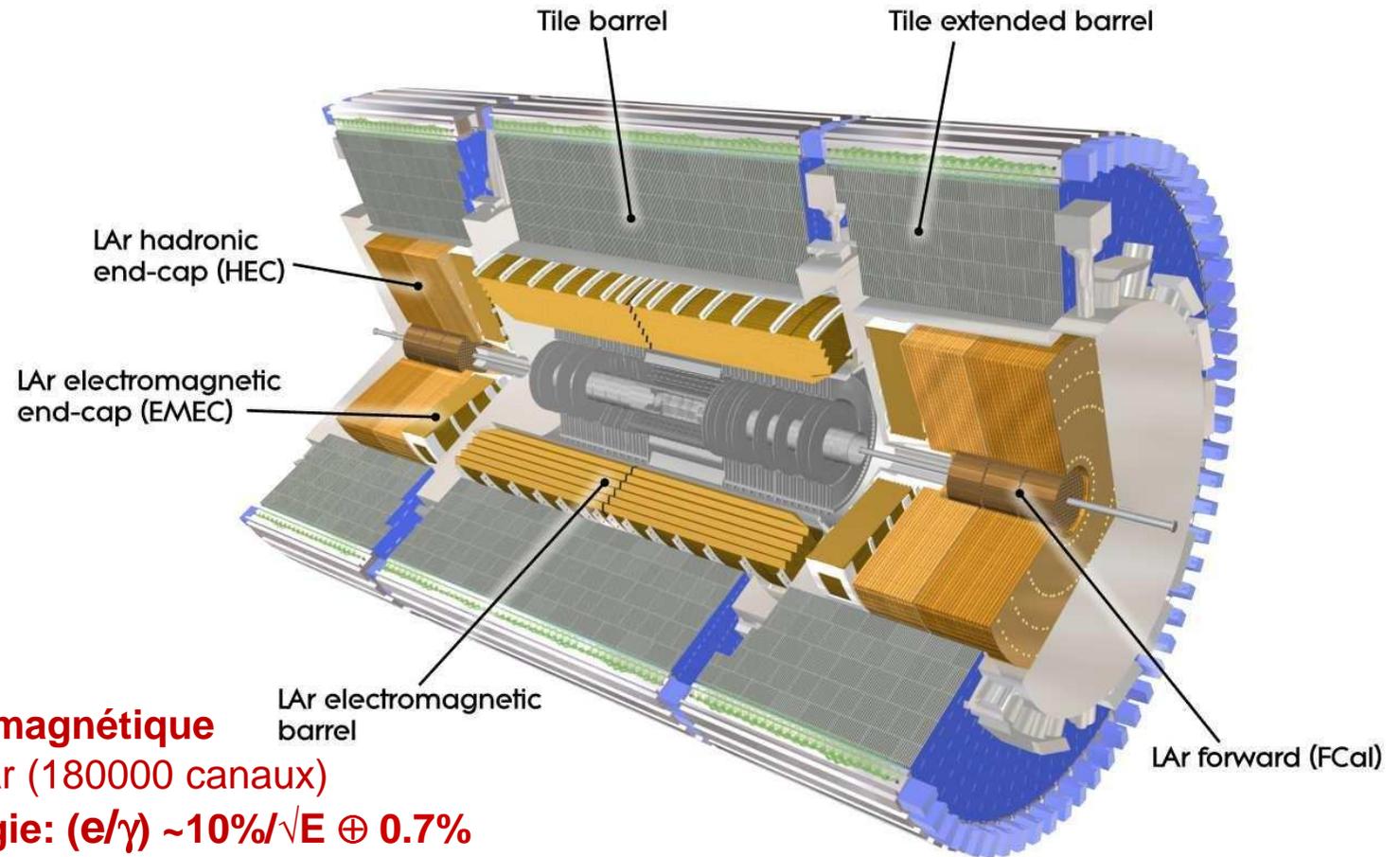


Détecteur hermétique → ce qui reste pour faire la conservation de l'énergie est attribué aux **neutrinos** ...

Les détecteurs de traces chargées d'ATLAS



Les Calorimètres



Cryostat Barrel:
solenoid + LAr EM
Cryostats End-cap:
LAr EMEC + HEC + FCal

Calorimètre électromagnétique
Barrel, EMEC: Pb-LAr (180000 canaux)
Résolution en énergie: $(e/\gamma) \sim 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

Calorimètre hadronique
Barrel: Iron-Tile, HEC/FCal: Cu/W-LAr (~20000 canaux)
Résolution en énergie (pion): $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

Trigger pour e/γ , jets, missing E_T (niveau 1)

Couverture: $|\eta| < 2.5, 5$

Toroid supraconducteur

Barrel:

8 bobines

Longueur: 25.3 m

Diamètre ext.: 20.1 m

Poids total: 830 t

Masse froide (4.7K): 370 t

56 km Al/NbTi/Cu

Courant Nomi.: 20.5 kA

Energie stockée: 1.08 GJ

<Champ. mag.>: 0.5T

End-Cap:

2x8 bobines

Longueur axiale: 5.0 m

Diamètre ext.: 10.7 m

Poids: 2x240 t

Masse froide (4.7K): 2x160 t

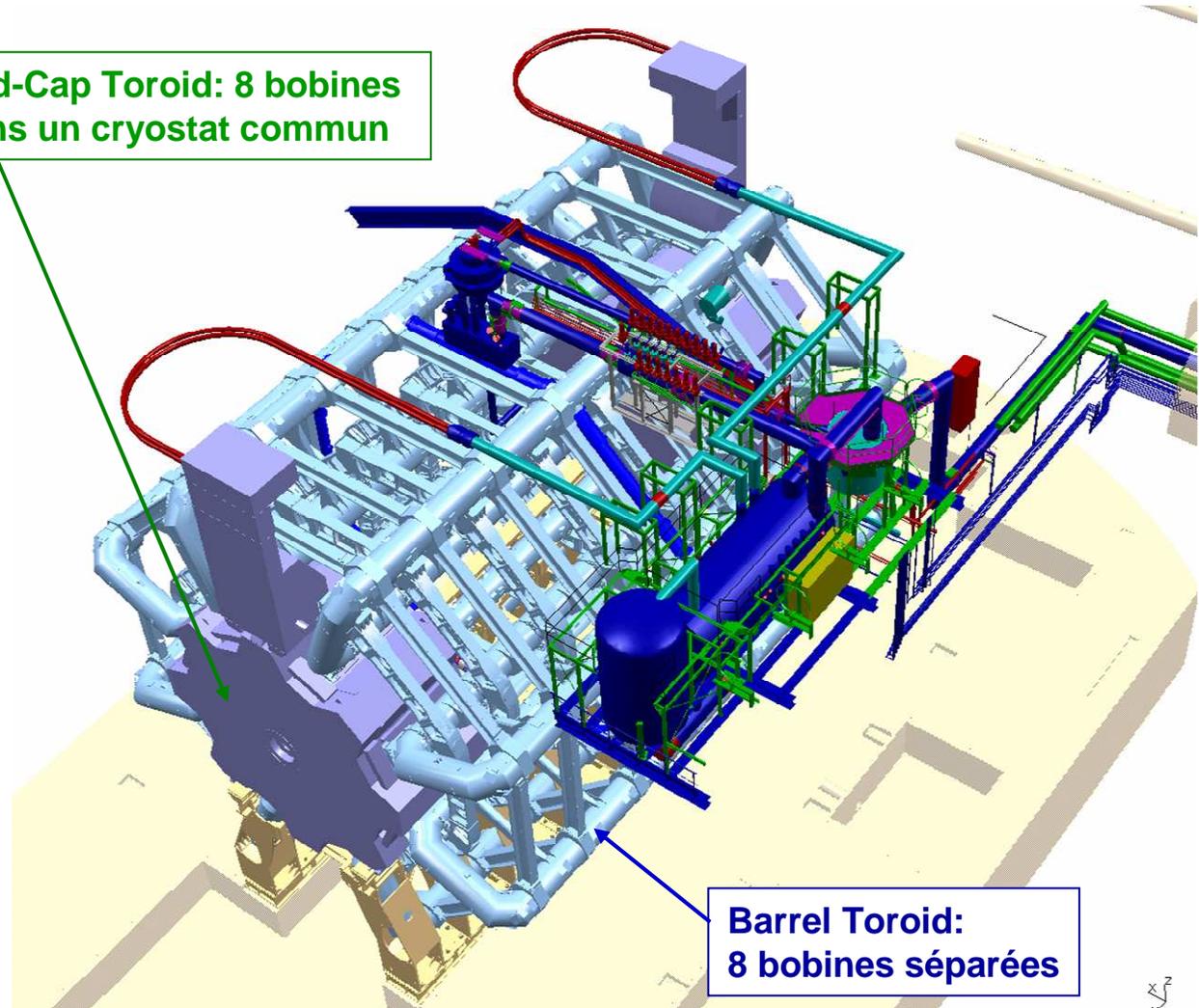
2x13 km Al/NbTi/Cu

Courant Nomi.: 20.5 kA

Energie stockée: 2x0.25 GJ

<Champ. mag.>: 0.5T

End-Cap Toroid: 8 bobines
dans un cryostat commun



Barrel Toroid:
8 bobines séparées

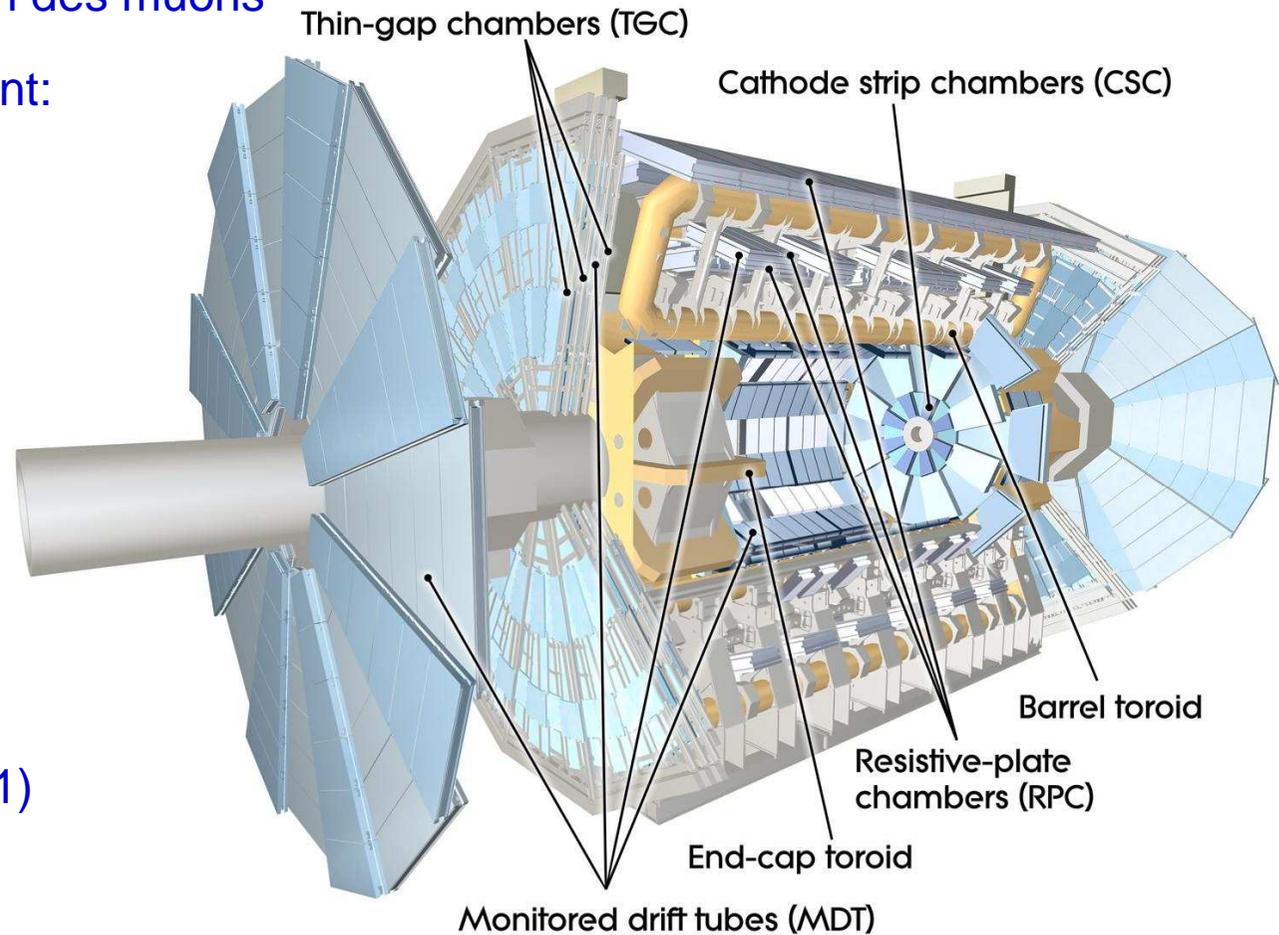
Détecteurs à muons

Détecteurs de précision (MDT+CSC):
~1200 pour la reconstruction des muons

Chambres de déclenchement:
~600 RPC et ~3600 TGC

Canaux d'électronique:
Barrel: 7×10^5
End-Cap: 3.2×10^5

$\sigma(p_T)/p_T \sim 7\%$ à 1 TeV
Couverture: $|\eta| < 2.7$
Trigger pour muon (niveau 1)



Caverne du détecteur ATLAS

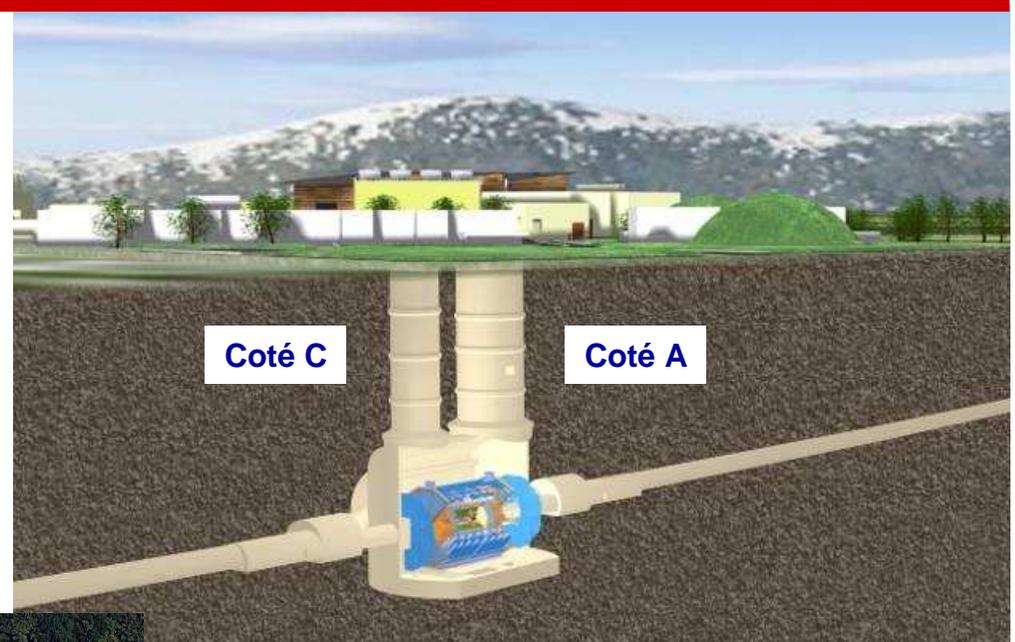
Dimensions:

Profondeur ~ 100m

Longueur = 55 m

Largeur = 32 m

Hauteur = 35 m

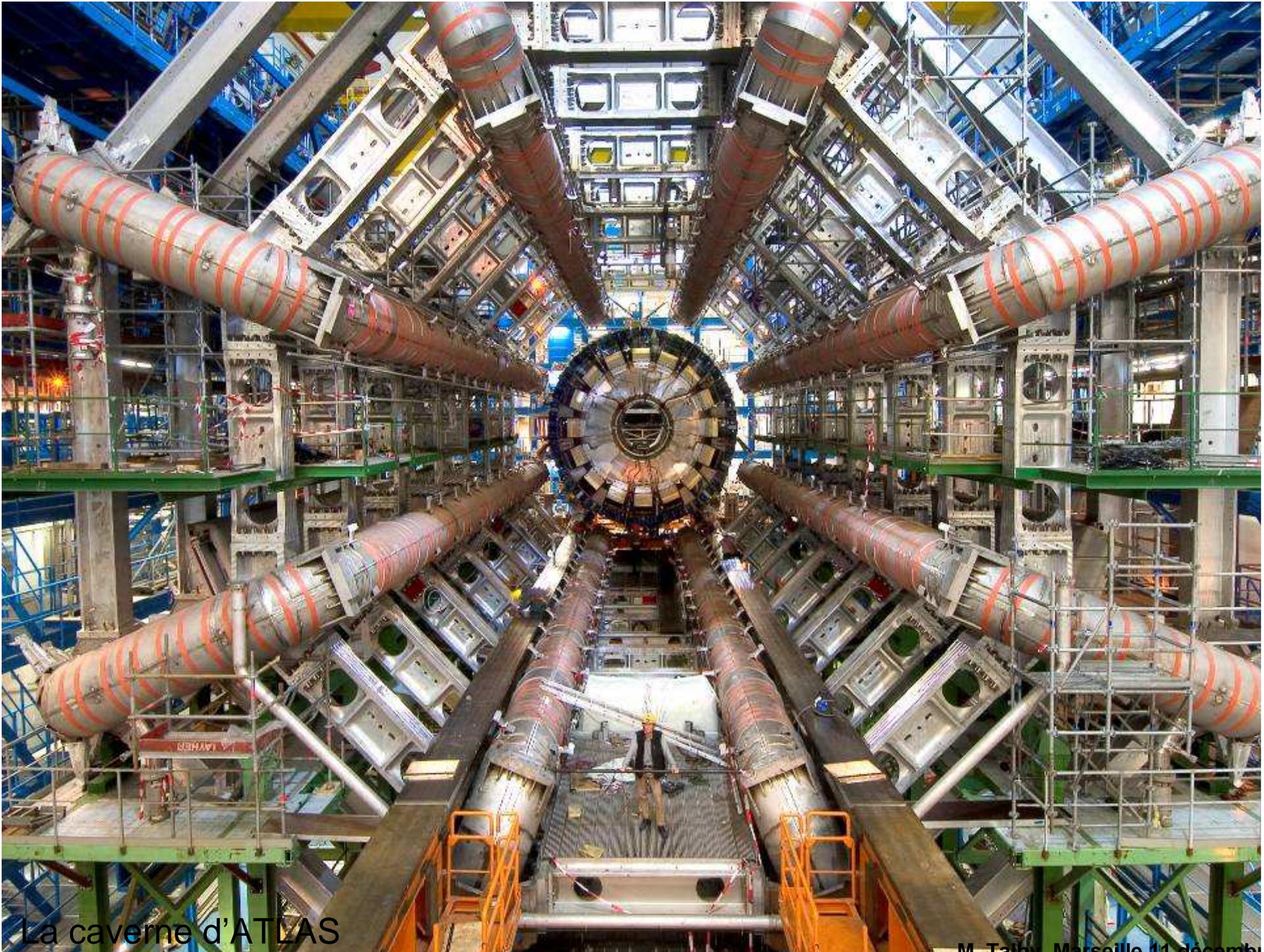


Entrée principale du CERN



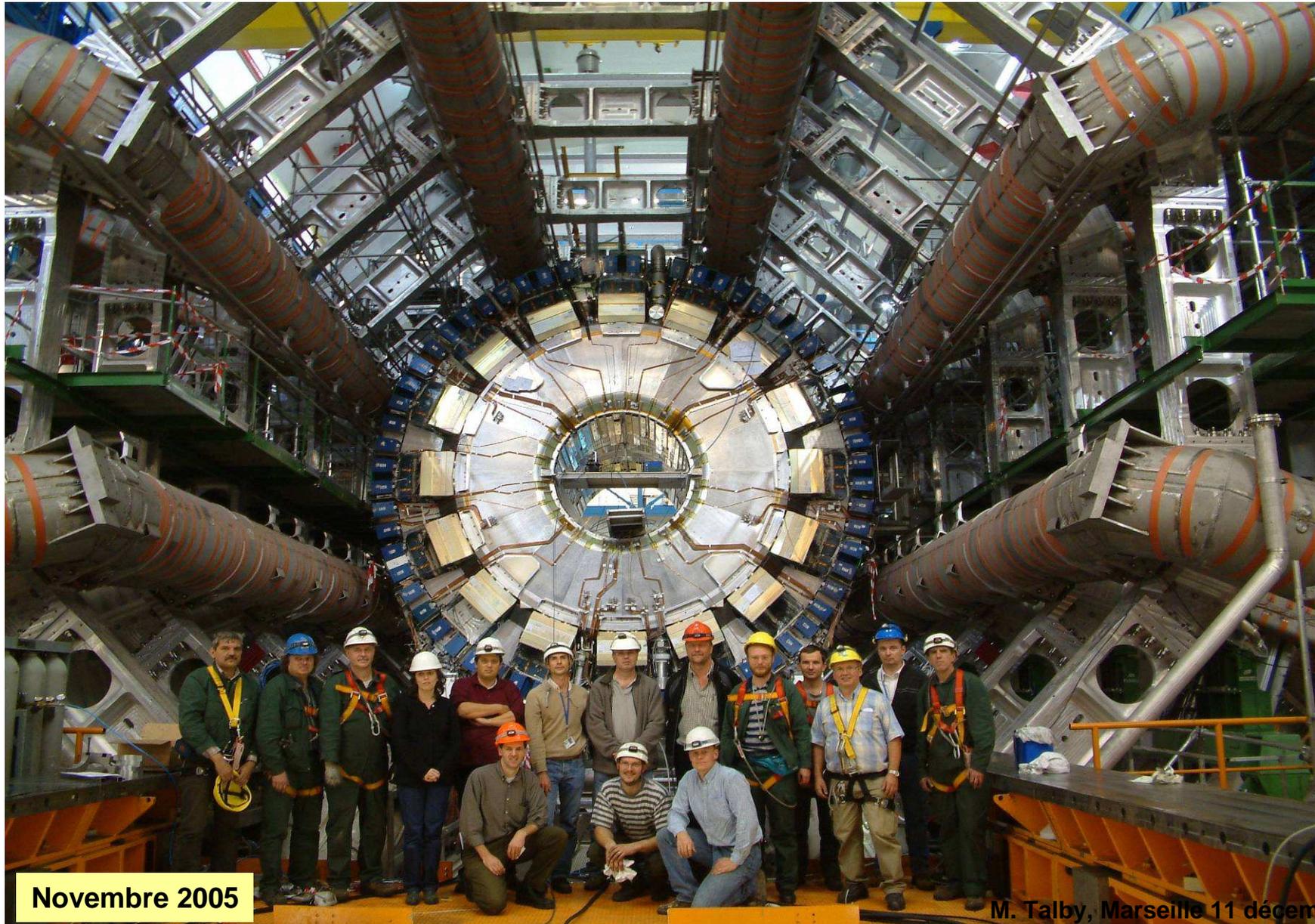
Bâtiment principal ATLAS

Salle de contrôle ATLAS



La caveme d'ATLAS

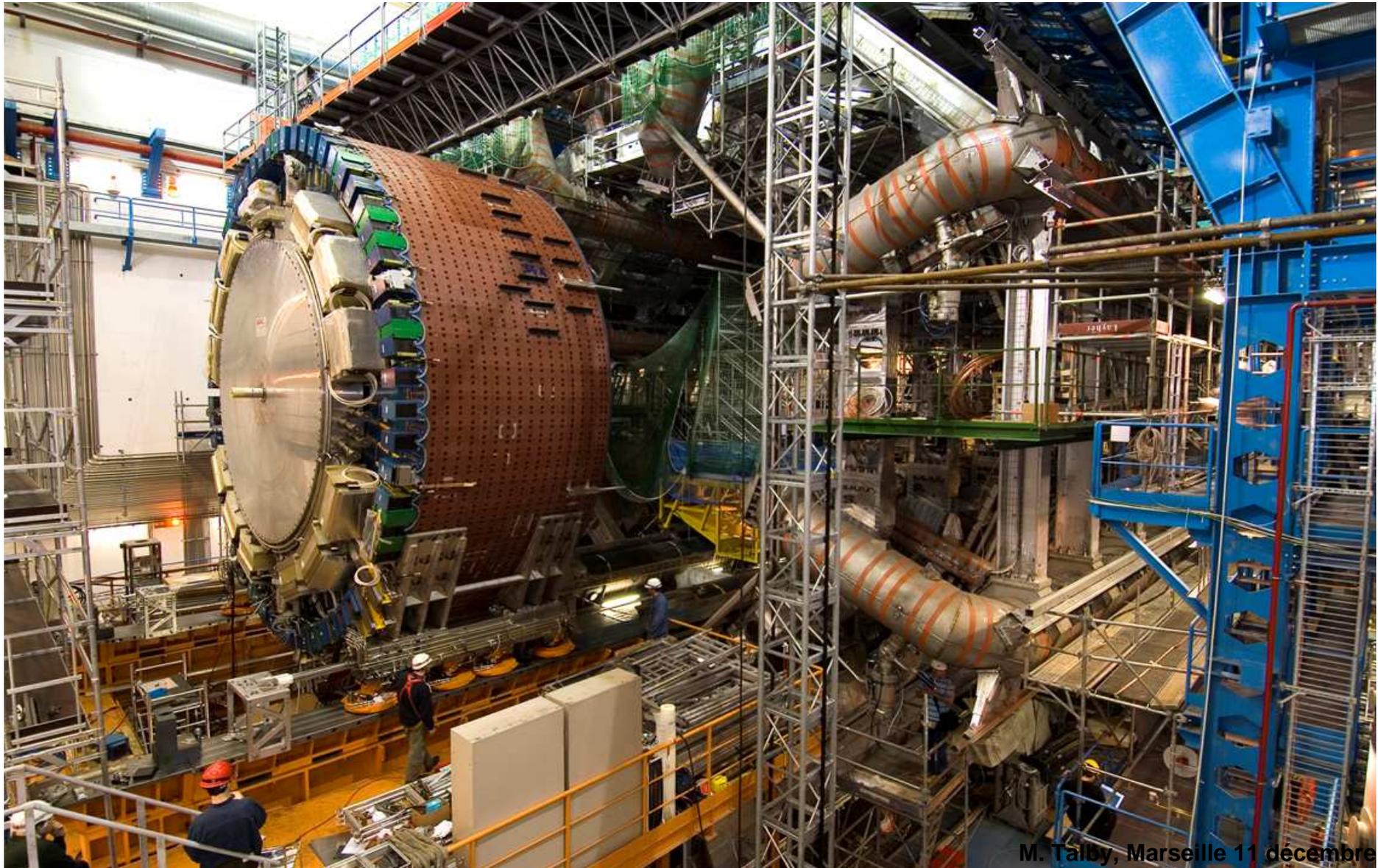
Calorimètres barrel (ECAL + Hadronique)



Novembre 2005

M. Talby, Marseille 11 décembre

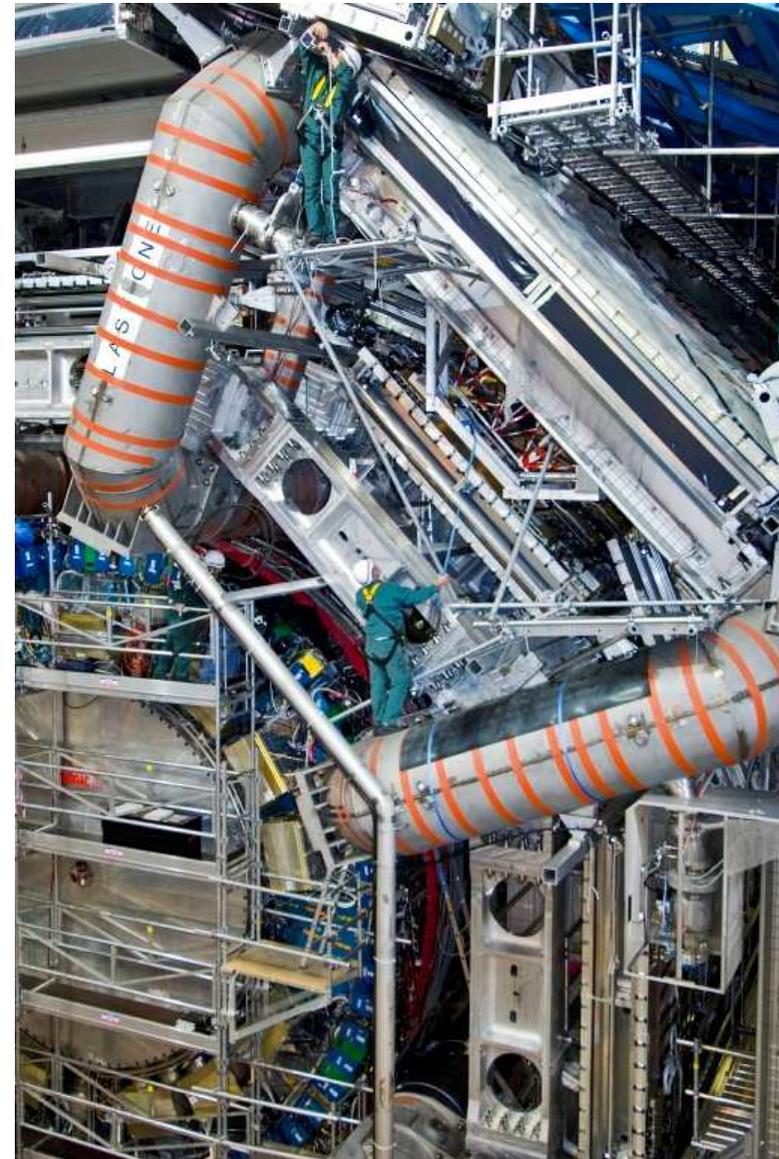
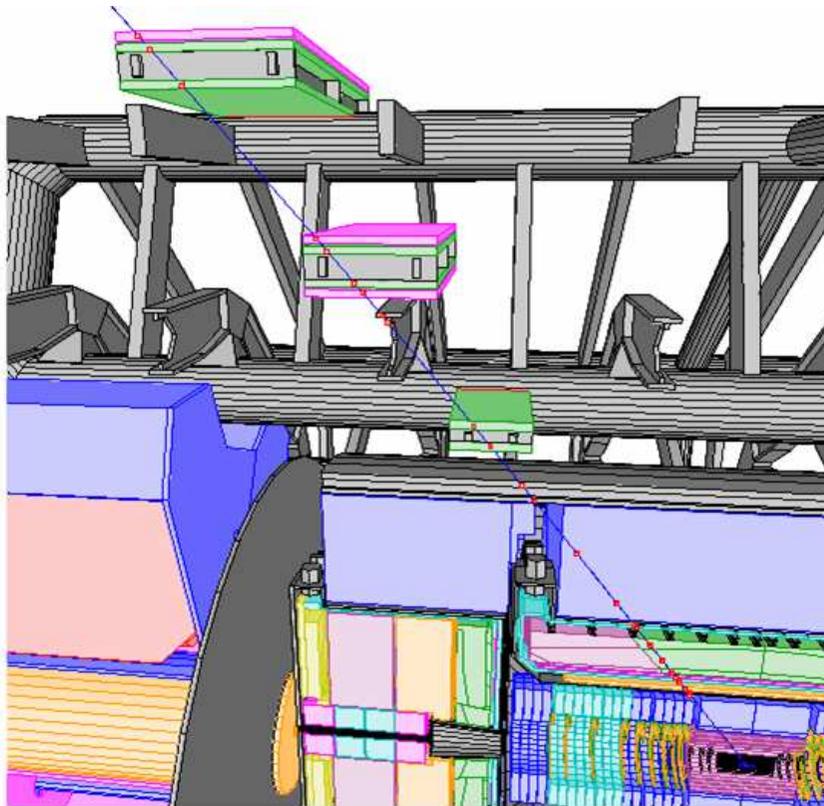
Calorimètre End-cap (LAr EM, LAr HAD, LAr avant, dans le même cryostat, entouré par HAD Fe/Scintillator Tilecal)



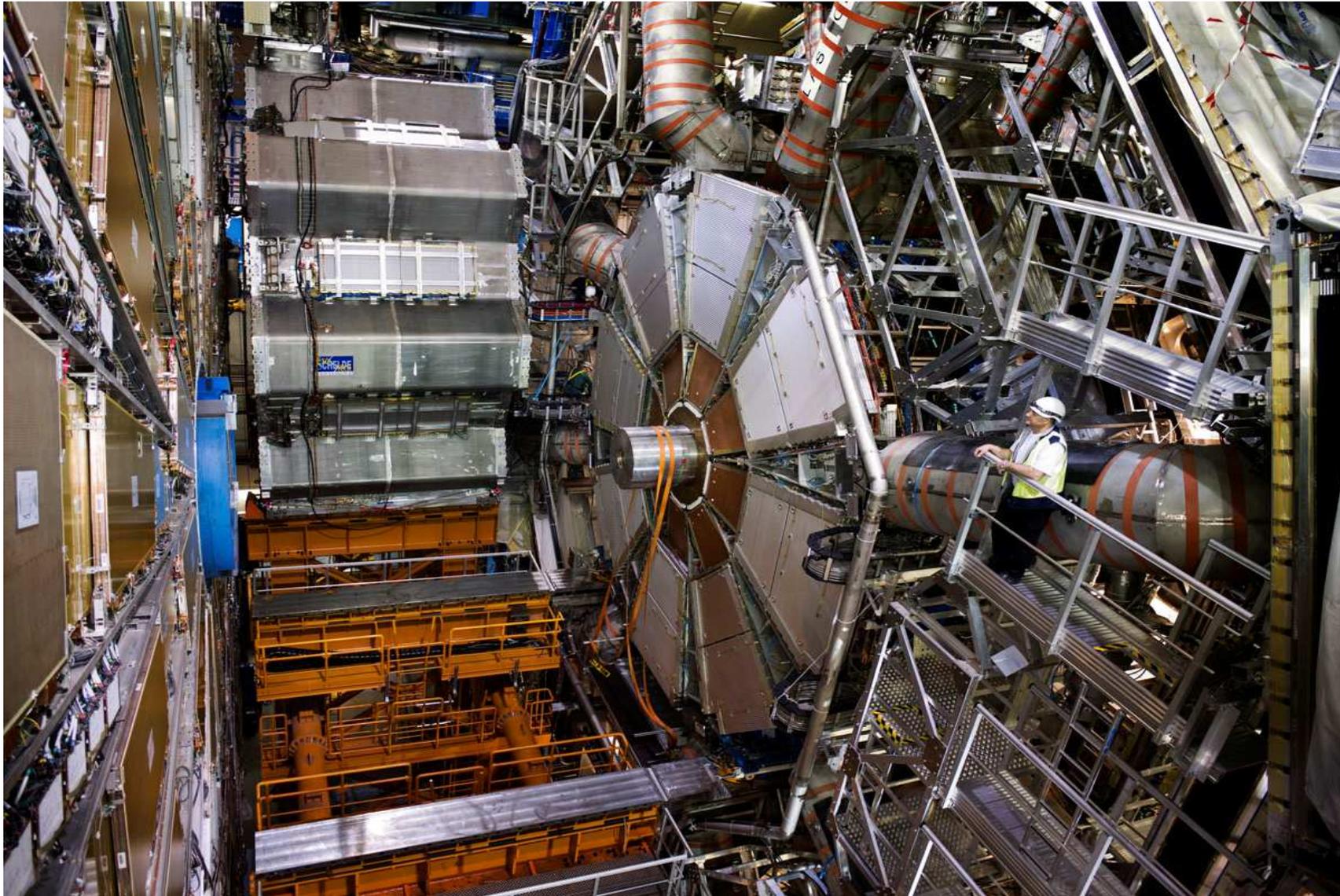
Installation du détecteur à Pixels (juin 2007)



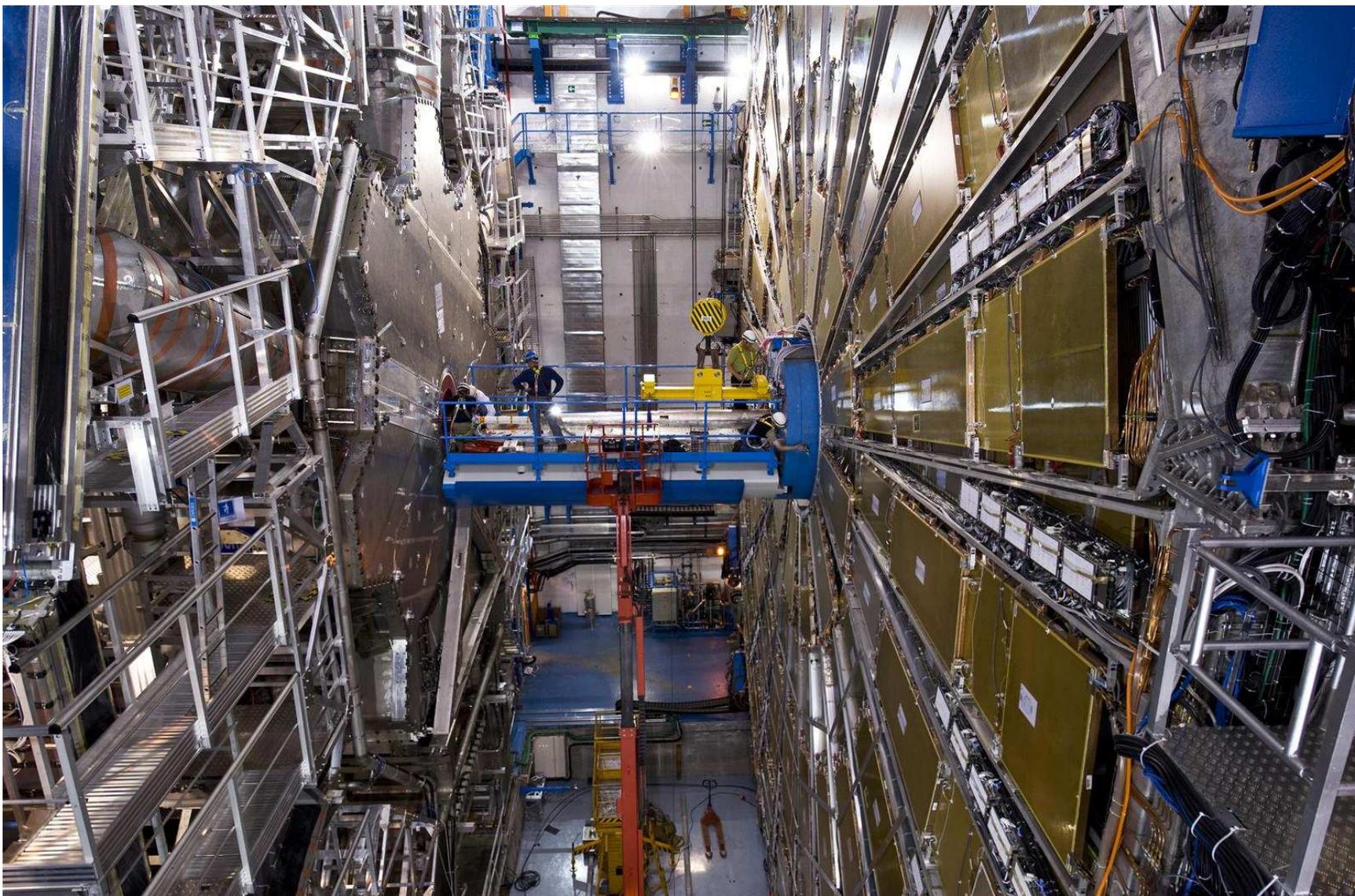
Les détecteurs à muons



Installation du toroïde end-cap (avril 2008)



Fermeture du tube à faisceaux du LHC (juin 2008)



La salle de contrôle d'ATLAS



*Effervescence dans la salle de contrôle d'ATLAS
lors du premier faisceau au LHC*

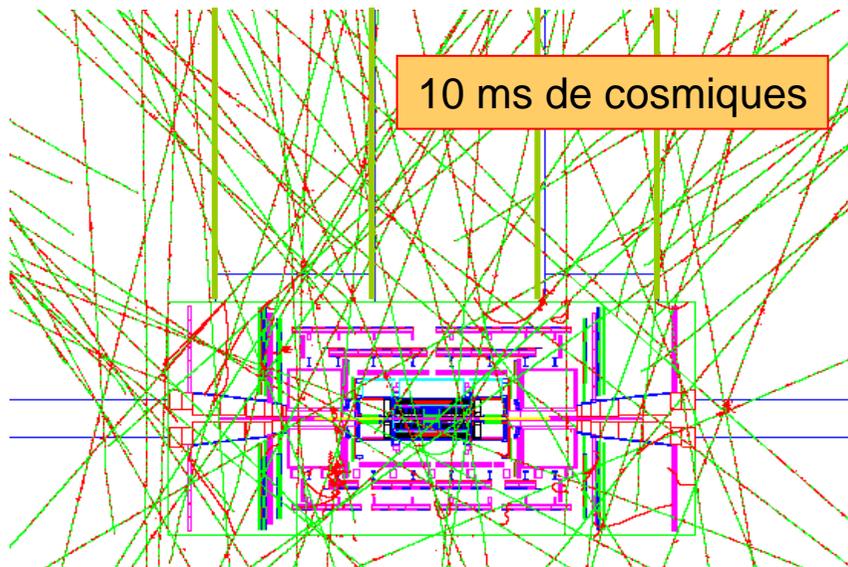
Avant le démarrage du LHC

- **Control-Qualité** strict du détecteur pendant la phase de construction pour atteindre les spécifications et les précisions nécessaires pour la physique.
- Série de **tests sur faisceau** (15 ans d'activité qui a culminé avec le test combiné en 2004) pour comprendre et calibrer (une partie) du détecteur et valider/ajuster les outils software.
- **Simulations** réalistes du détecteur tel qu'il a été construit et installé en incluant les effets de non alignements, les non uniformités des matériaux, canaux morts, ... etc)
→ tests et validations des stratégies de calibration/alignement.
- **Qualification** du détecteur avec les rayons cosmiques.

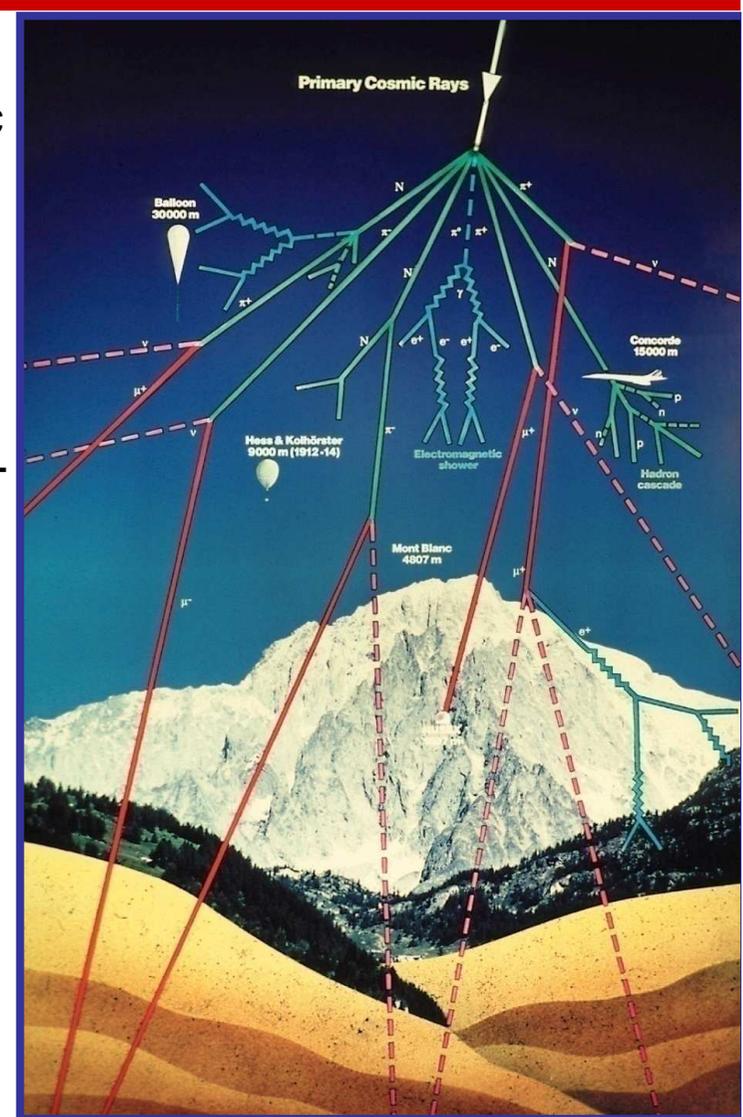
Qualification du détecteur avec les rayons cosmiques

Très utile car permet de:

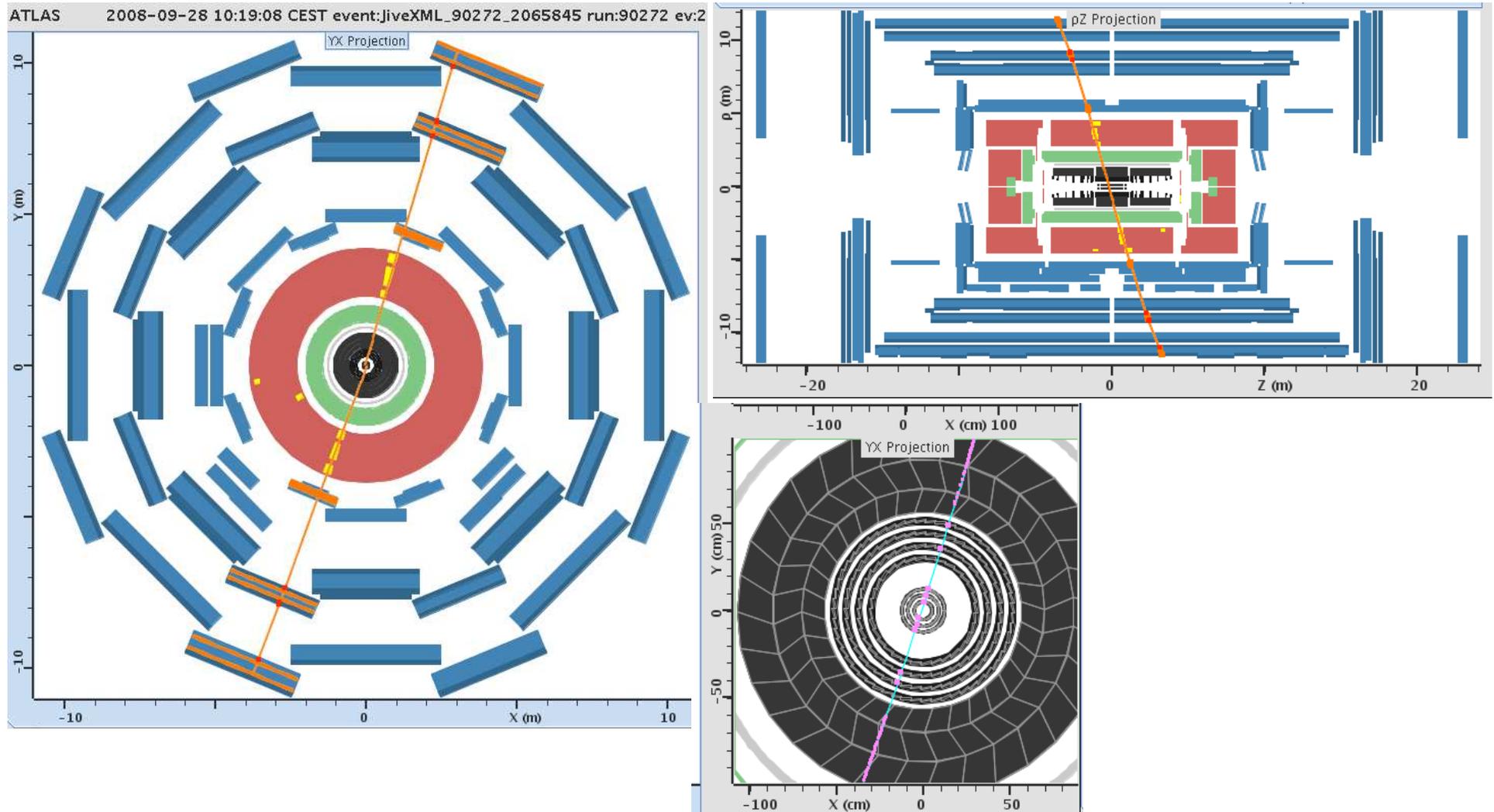
- tester le détecteur dans sa configuration finale avec les dernières versions des systèmes de trigger, d'acquisition, de monitoring, de reconstruction et d'analyse → « debugger » et fixer les problèmes
- réaliser les premières études de calibrations et d'alignement.
- gagner une expérience in situ et globale du fonctionnement du détecteur avant les premières collisions.



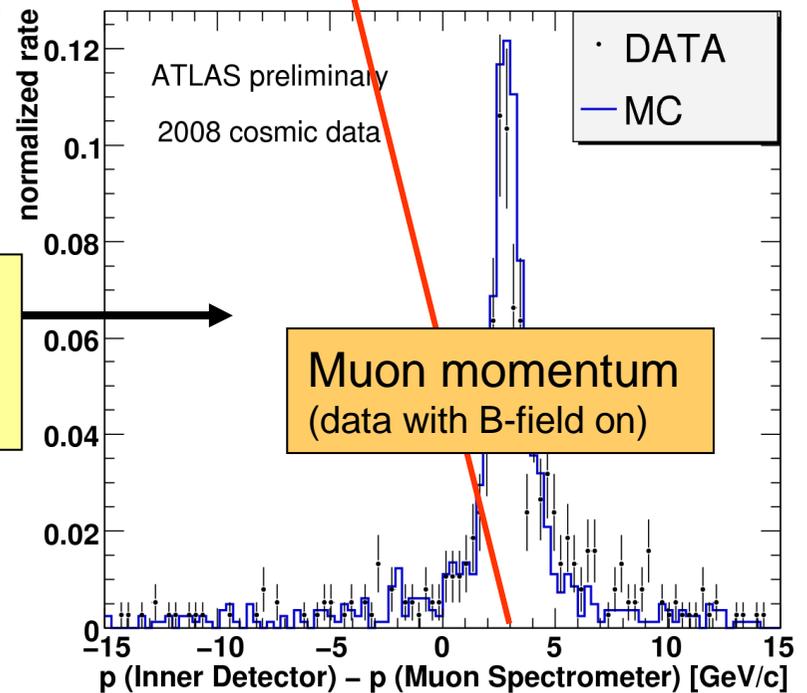
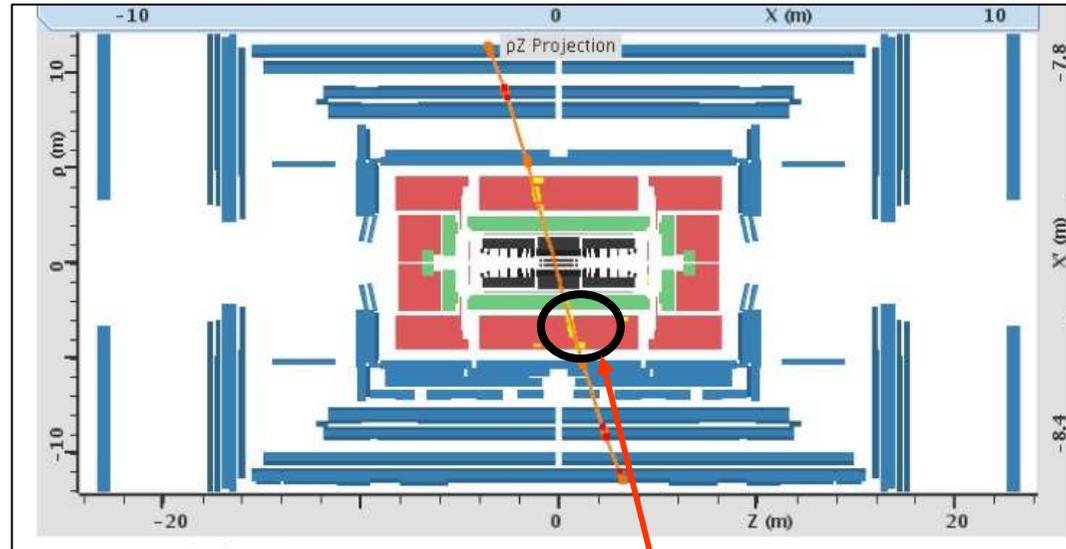
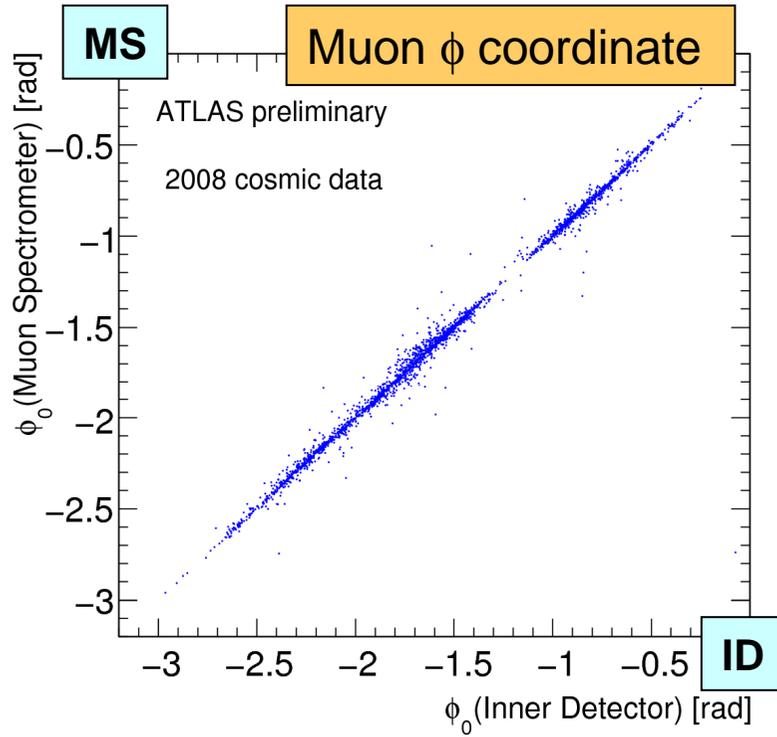
Taux de cosmiques dans ATLAS: 0.5-100 Hz
(dépend de la taille du sous-détecteur et de sa position)



Reconstruction d'un événement cosmique dans ATLAS



Corrélation entre le détecteur interne et Spectromètre à muons



Différence entre l'impulsion du muon mesurée dans le ID et dans le Spectromètre à muon (~ 3 GeV de perte d'énergie dans le calorimètre)

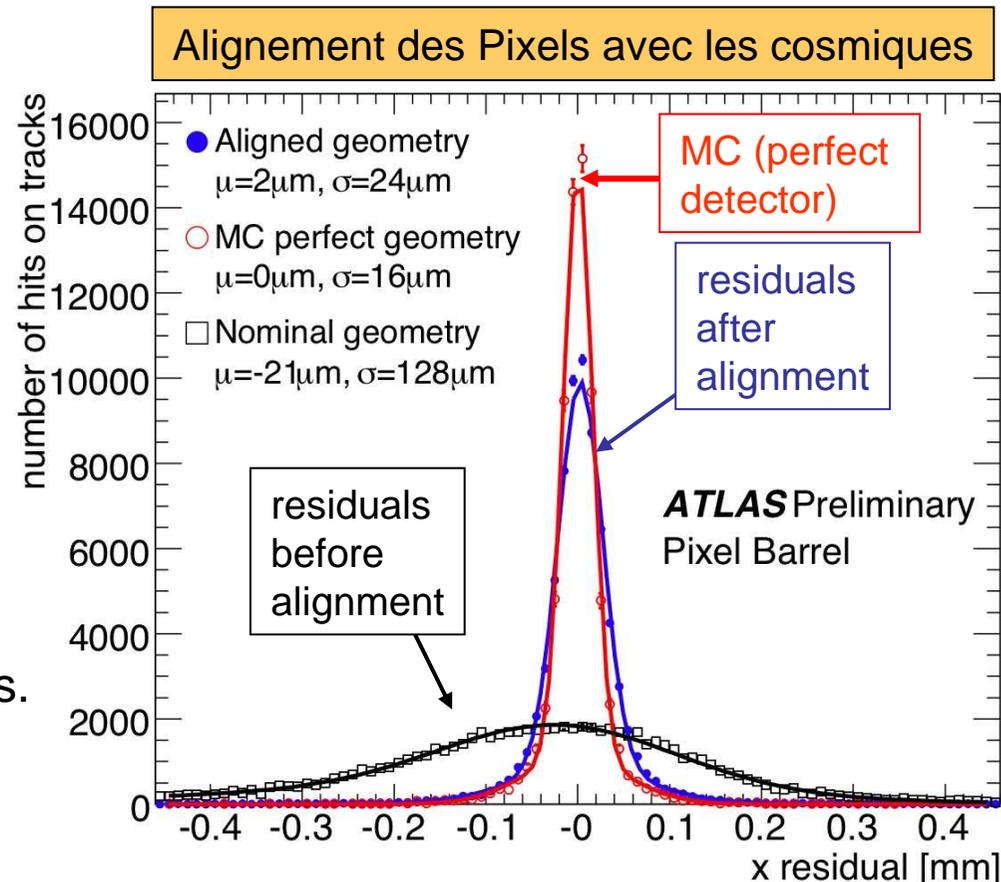
Alignement des détecteurs Pixels et SCT avec les cosmiques

Les positions (“**alignement**”) des modules des détecteurs Pixels et SCT doivent être connues avec une précision de **quelques microns** pour une reconstruction précise des paramètres d’une trace.

L’**alignement** du détecteur est réalisé en utilisant des traces et une procédure itérative qui minimise globalement les résidus des hits.

~ **36000 degré de liberté**:
6000 modules x 6 inconnues
(3 coord. position + 3 angles/module)

Résidus: distance entre la trace ajustée et les hits dans les couches individuelles.



Achieved in best illuminated modules: ~ 24 μm