

La découverte du Higgs au LHC et le CPPM

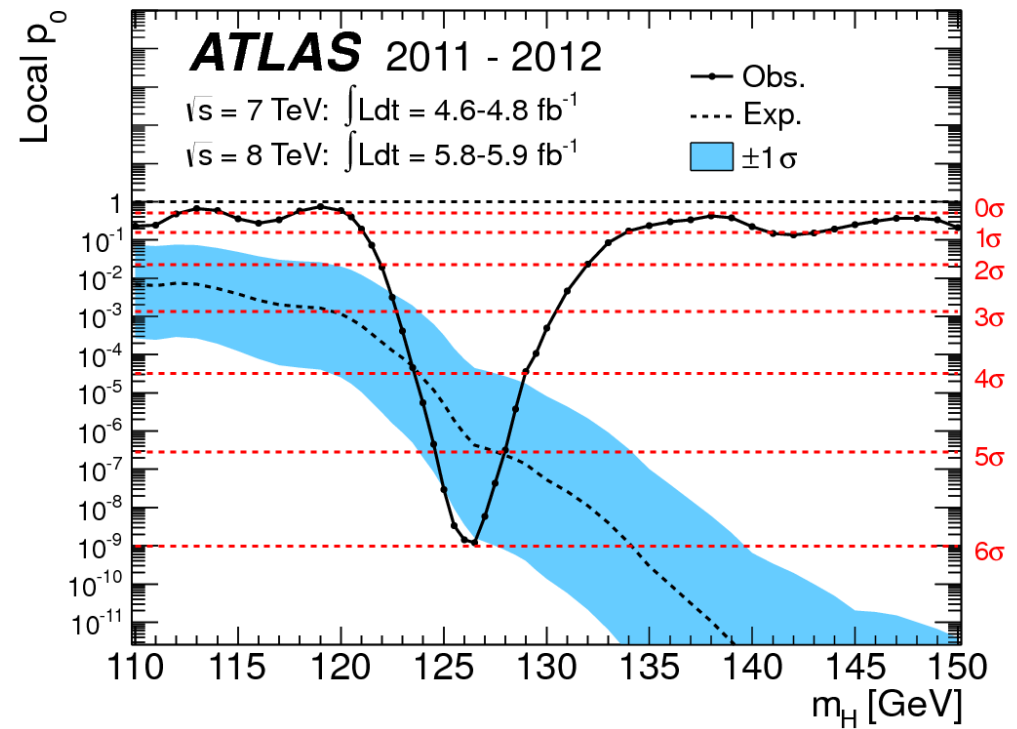
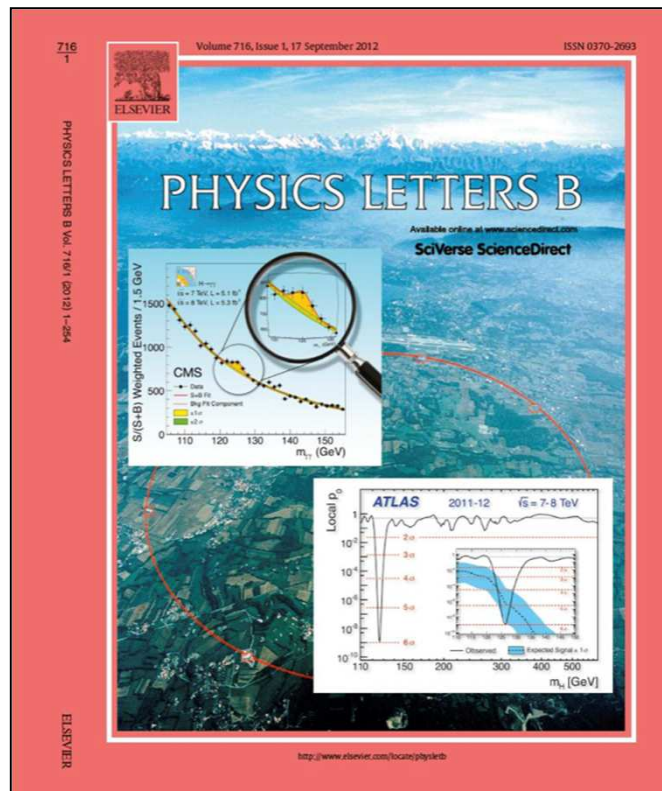


F. Hubaut

CPPM - 21 décembre 2012

Introduction

Comment sommes nous parvenus à ce résultat (expérimentalement) ?



Introduction

Comment sommes nous parvenus à ce résultat (expérimentalement) ?

❑ Aperçu des principaux ingrédients expérimentaux...

- Production du boson de Higgs → un collisionneur très performant, le LHC
- Détection des bosons de Higgs produits → un détecteur très performant, ATLAS
- Mesure des événements Higgs et rejet du bruit de fond dans les canaux ayant permis la découverte → un calorimètre électromagnétique très performant

❑ ... en sachant quoi rechercher!

- la quête du Higgs a guidé la conception, le design et les choix technologiques du LHC et des détecteurs ATLAS et CMS

Produire le Higgs: le collisionneur LHC

□ Le LHC, une usine à produire le Higgs...

- Nombre de collisions proton-proton enregistrées jusqu'à cet été (annonce de découverte):

▶ ~ 1 million de milliards (10^{15}) collisions proton-proton

- Or il faut ~10 milliards (10^{10}) de collisions entre protons pour produire 2 bosons de Higgs (si masse de 125 GeV) !!

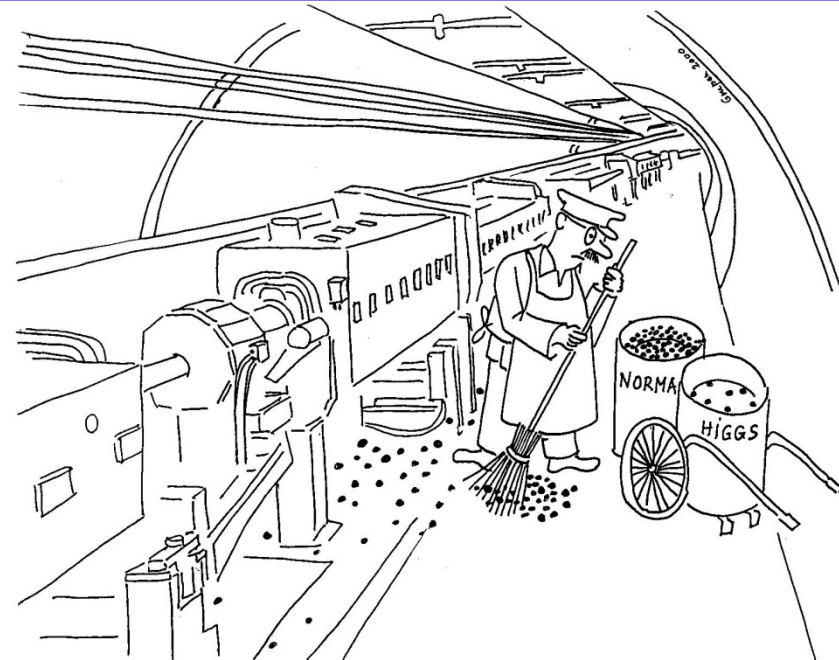
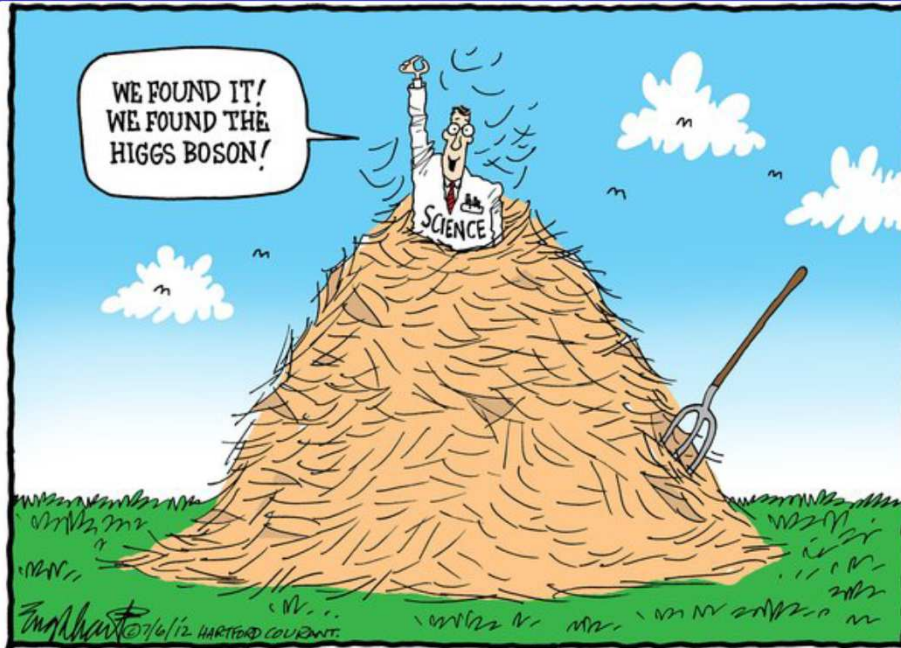
▶ en principe, ~200 000 Higgs produits (@125 GeV pour 10 fb^{-1})

- On exploite les désintégrations mettant en jeu les meilleurs messagers au LHC (photons, électrons, muons) → désintégrations les plus rares

▶ ~500 $H \rightarrow \gamma\gamma$ [pour 10 fb^{-1}]: 1 événement par heure [au pic de performance du LHC en 2012]

▶ ~25 $H \rightarrow 4l$ ($l=e,\mu$) : 1 événement toutes les 20 heures

Produire le Higgs: le collisionneur LHC



- Fortes contraintes sur la sélection des événements en temps réel
- Fortes contraintes sur les ressources de stockage et de calcul → grille
- Fortes contraintes sur le design et les performances des détecteurs

➤ Forte implication du CPPM à tous les niveaux

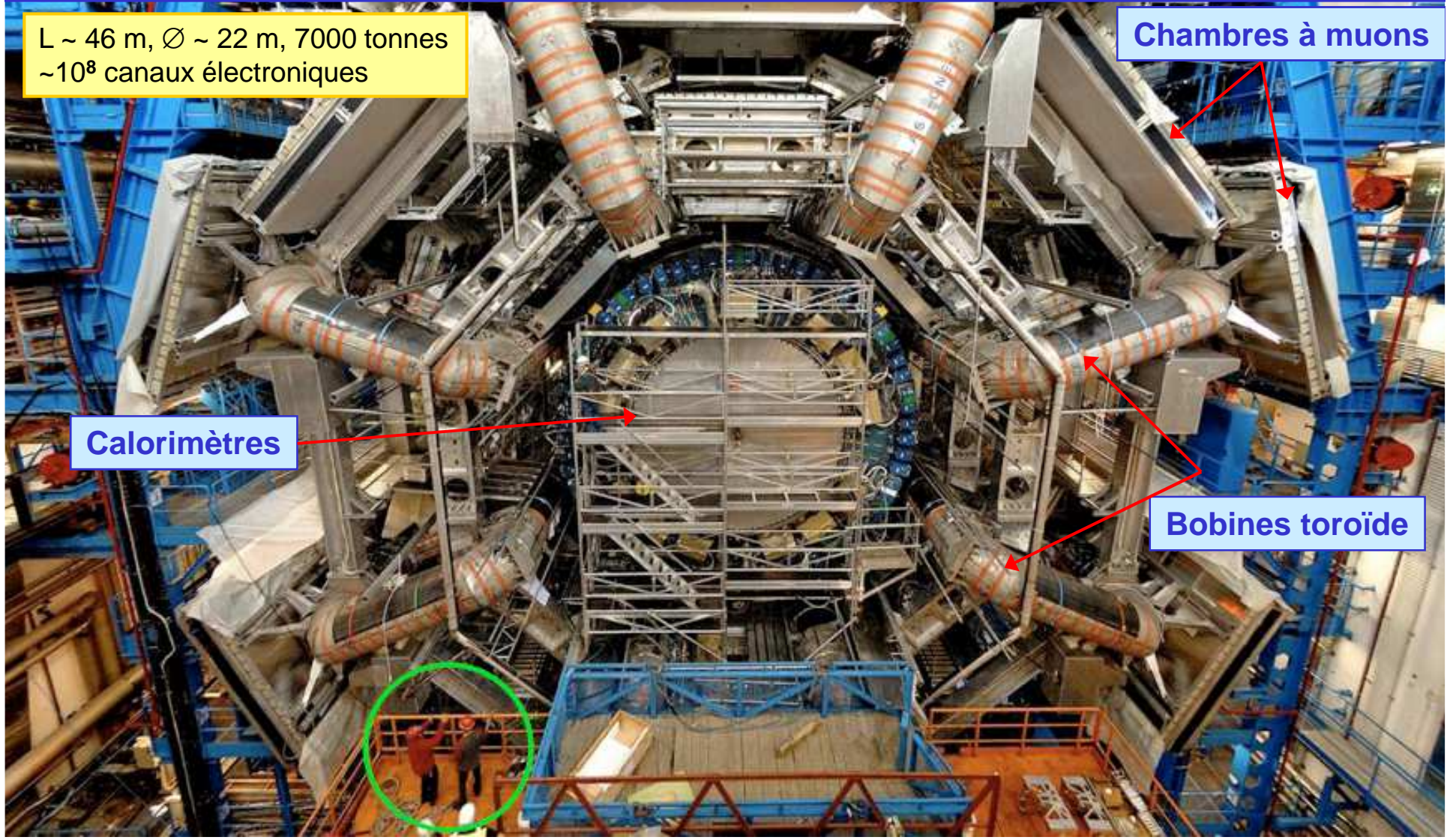
Détecter le Higgs: le détecteur ATLAS

L ~ 46 m, Ø ~ 22 m, 7000 tonnes
~10⁸ canaux électroniques

Chambres à muons

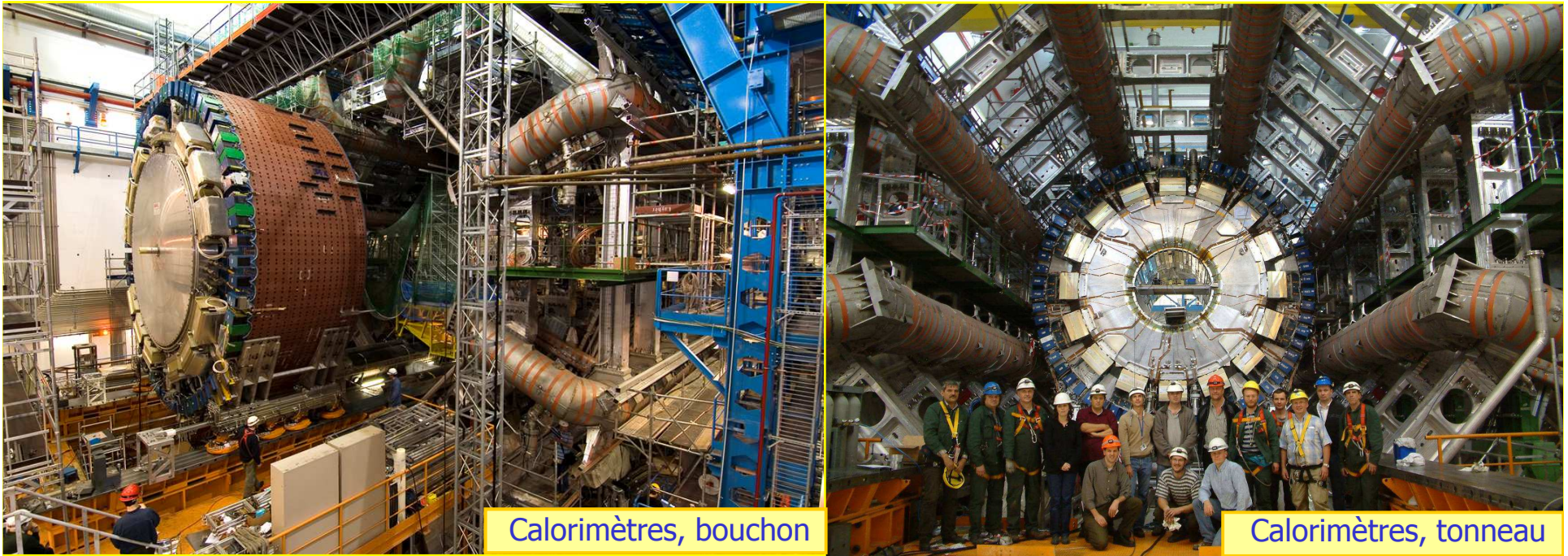
Calorimètres

Bobines toroïde



Le CPPM et la découverte du Higgs

Détecter le Higgs: le calorimètre électromagnétique d'ATLAS



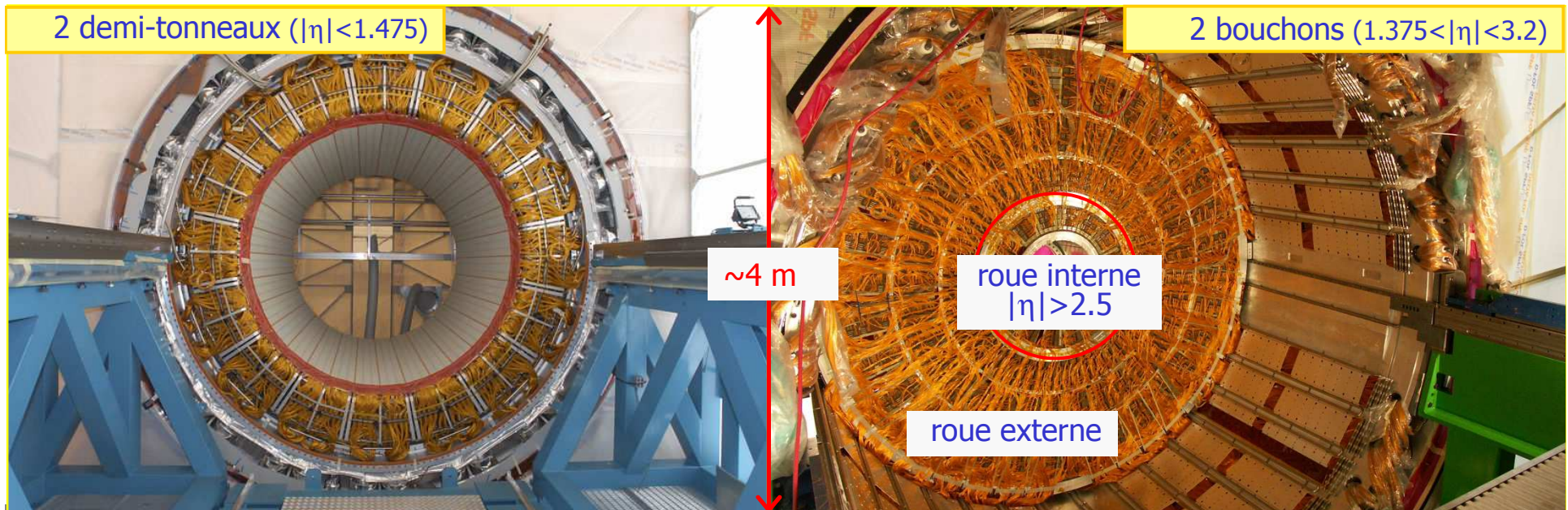
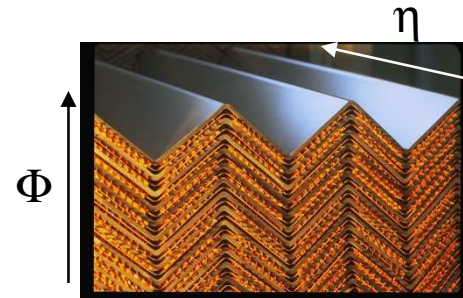
Rôles principaux du calorimètre électromagnétique

- Il stoppe les électrons et les photons...
- ... ce qui permet de les identifier et de mesurer leur énergie / direction...
- ... et de remonter aux possibles particules-mères (ex. $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow 4e$)

Détecter le Higgs: le calorimètre électromagnétique d'ATLAS

□ Choix d'ATLAS d'une technologie à la fois classique et novatrice

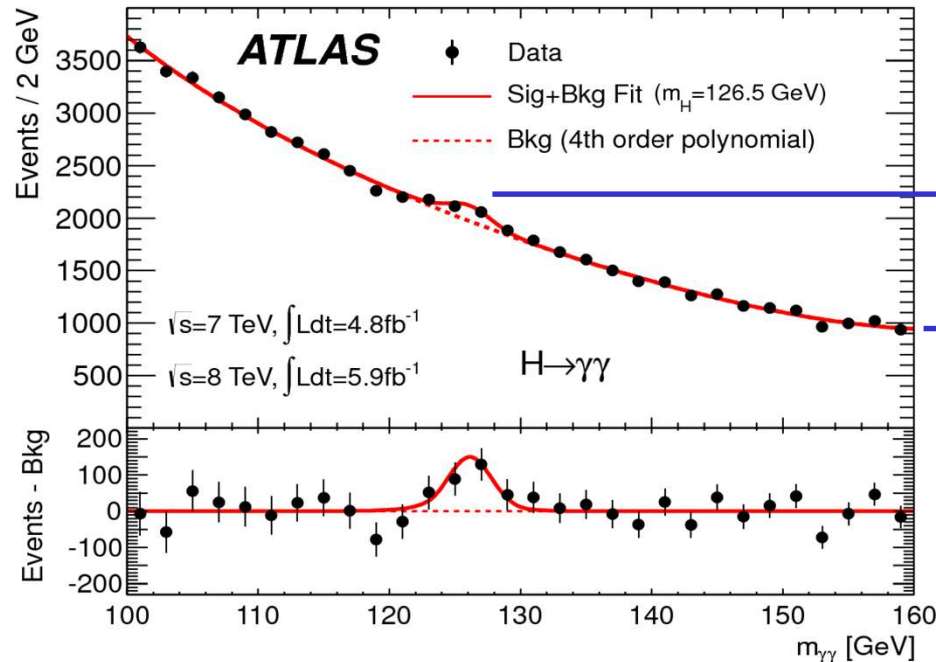
- Calorimètre à échantillonnage...
 - Milieu actif: argon liquide [comme H1 et DØ]
 - Technique éprouvée, stable, résistante aux radiations
- ... avec grande couverture angulaire et géométrie en accordéon
 - Excellente herméticité, extraction facile du signal
 - Grandes électrodes de lecture ($\sim 2 \text{ m}^2$) projectives et très granulaires



Le canal de recherche $H \rightarrow \gamma\gamma$

Masse invariante de deux candidats photons

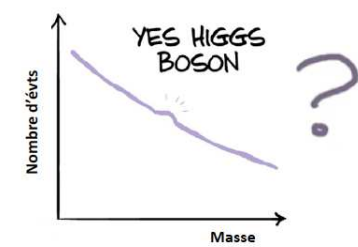
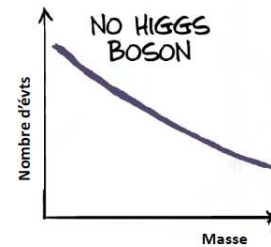
$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos\alpha)$$



→ Recherche d'un:

Pic étroit dû au signal

Au-dessus d'un large bruit de fond



Les deux aspects expérimentaux cruciaux sont:

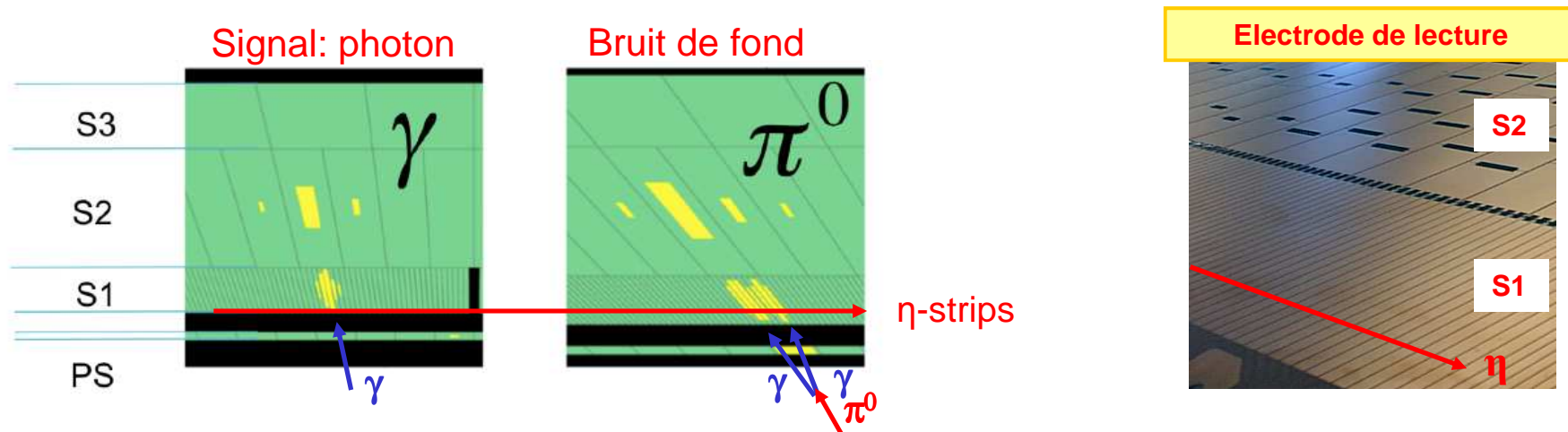
1. Une discrimination puissante entre photons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
2. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du fond irréductible)

Ils dépendent directement des performances du calorimètre électromagnétique!

$H \rightarrow \gamma\gamma$: identification des photons

1. Une discrimination puissante entre photons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)

→ Choix d'ATLAS d'une grande segmentation latérale du 1^{er} compartiment du calorimètre électromagnétique



→ Forte segmentation transverse et longitudinale du calorimètre (175 000 canaux de lecture) = élément clé pour la réduction du bruit de fond (physique+empilement)

Résultat sur les données: → Mission accomplie: bruit de fond réductible largement en dessous du bruit de fond irréductible

H → γγ : résolution en masse

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos\alpha)$$

2. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du fond irréductible)

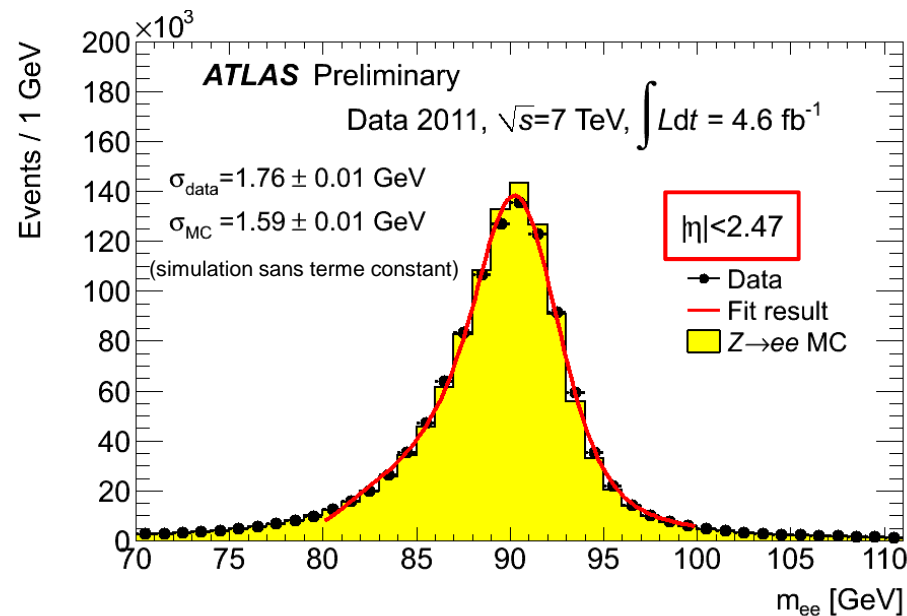
→ Mesures précises de l'énergie et position des photons

$$\sigma_E/E = a/\sqrt{E} \oplus c \oplus n/E$$

→ Des années de construction rigoureuse et de tests pour y parvenir

$$a \sim 10\% \sqrt{\text{GeV}}$$

$$c < 1\%$$



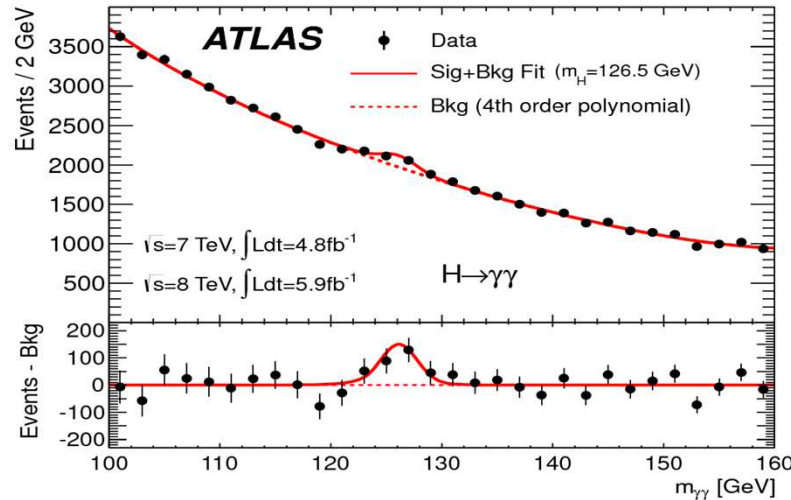
➤ Pic en masse du boson Z se désintégrant en 2 électrons

→ Résolution mesurée en accord avec les attentes et spécifications

H → γγ : résultats

(juillet 2012)

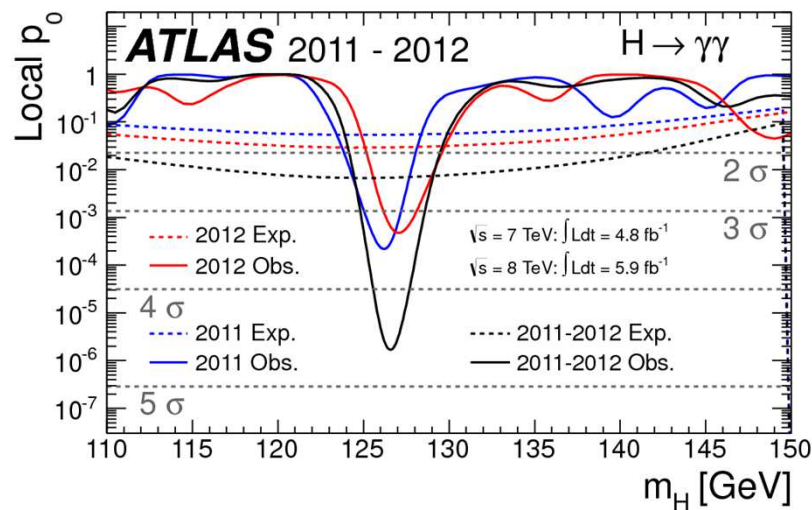
[Résultats mis à jour en décembre 2012]



➤ 59039 événements di-photons sélectionnés dans fenêtre en masse 100-160 GeV

➤ **Présence d'un excès d'événements autour de $m_{\gamma\gamma} \sim 126$ GeV**

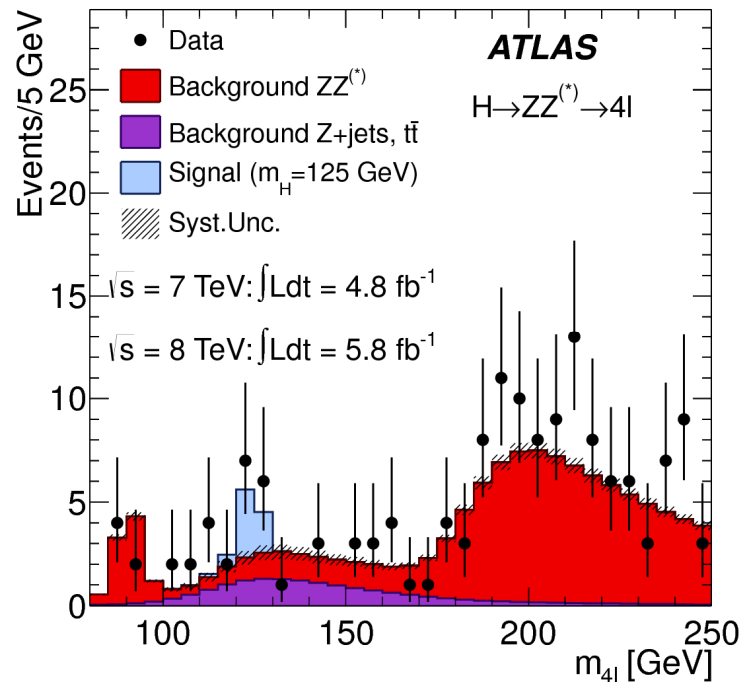
[peut être rendu encore plus visible par traitement statistique]



➤ p_0 = probabilité que ce que l'on observe soit compatible avec uniquement du bruit de fond (i.e. sans signal) pour une hypothèse de masse de Higgs donnée → Minimum à 126.5 GeV: proba que ce que l'on observe soit une fluctuation statistique du bruit de fond = **0.0002%**

Le canal de recherche $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$

Masse invariante de 4 candidats leptons (électrons/muons) :



❑ **Problématique similaire au canal de recherche en 2 photons...**

- Réduire le bruit de fond au maximum → discrimination entre électrons et jets
- observer un pic de signal au-dessus du bruit de fond → résolution en masse

❑ **... avec des spécificités**

- Signal beaucoup plus faible (20 fois moins que $H \rightarrow \gamma\gamma$) → besoin d'une efficacité (acceptance) de détection maximale

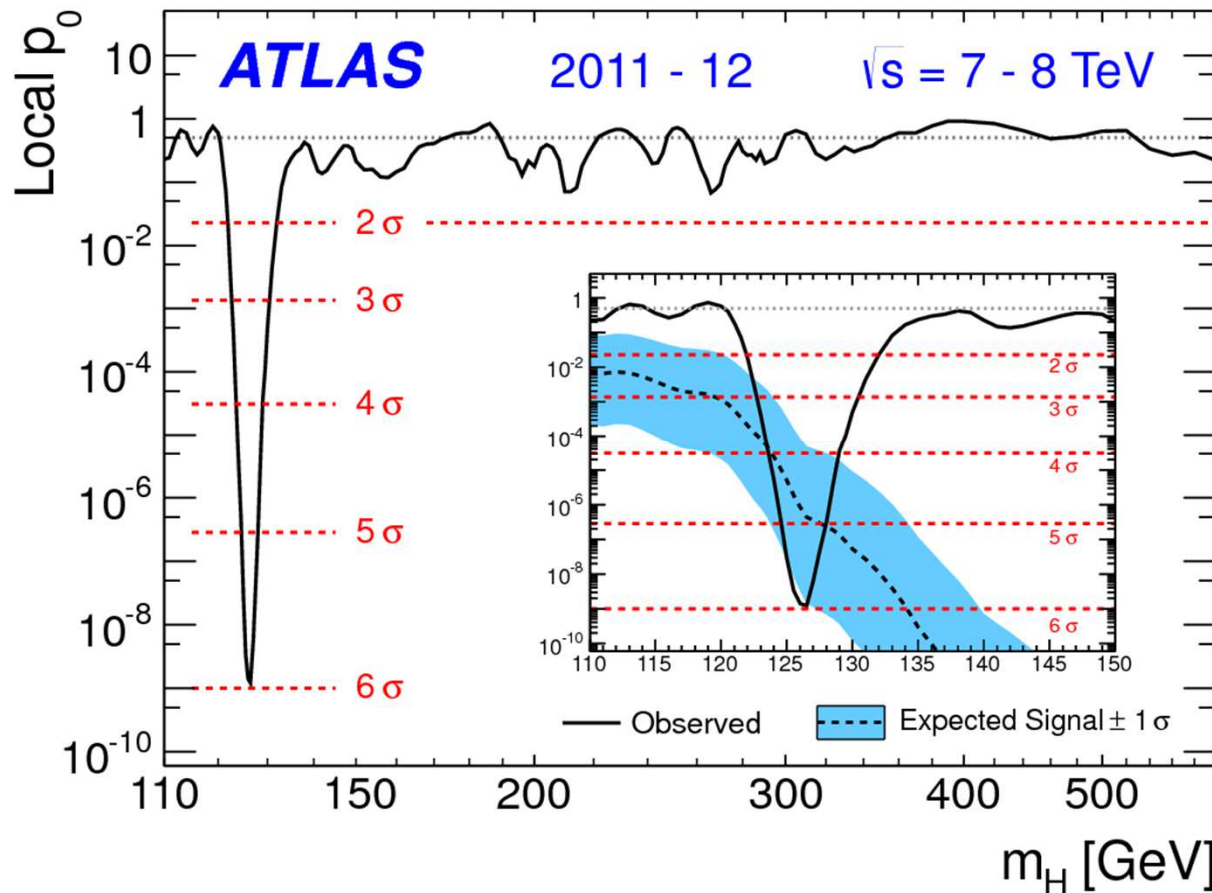
→ **Présence d'un excès d'événements autour de $m_{4l} \sim 125$ GeV**

- Probabilité de 0.018% que cela soit dû au bruit de fond
- Compatible avec l'excès observé dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Résultats combinés

(juillet 2012)

[Résultats mis à jour en décembre 2012]



Proba que l'excès à 126 GeV soit une fluctuation statistique du bruit de fond: **0.00000017%**

→ Découverte d'une nouvelle particule !!

Séminaire du 4 juillet 2012 au CERN

3 juillet, 18H00



3 juillet, 22H00



4 juillet, 07H00



4 juillet, 09H00



Séminaire du 4 juillet 2012 au CERN



Le rôle du CPPM

□ Le CPPM, un rôle de premier plan depuis ~20 ans dans la calorimétrie d'ATLAS - maîtrise d'oeuvre des parties "bouchons"

- ~ la moitié des événements $H \rightarrow \gamma\gamma$ ($4e$) ont un photon (électron) dans les bouchons
- Spécifications imposées par la recherche du Higgs sont plus difficiles à atteindre dans les bouchons: géométrie plus complexe → technologie plus compliquée, construction plus délicate, reconstruction en énergie plus difficile

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)

- Un vaste programme de recherche et développement
- Une phase de conception et de validation
- Une construction rigoureuse et des tests permanents
- La certification et l'analyse des données

Implication forte depuis ~20 ans

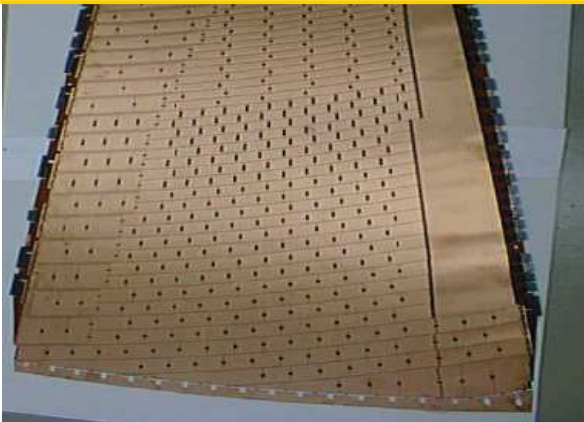
- à tous les niveaux
- par tous les services du CPPM

Le rôle du CPPM: construction

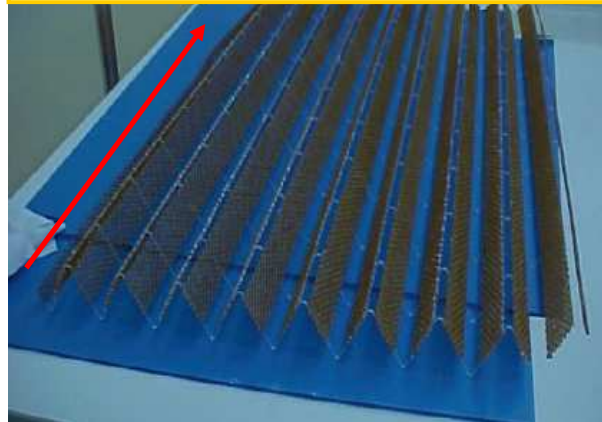
Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)

Grandes électrodes de lecture
(~2 m²) granulaires



Épaisseur des filets (→d'argon)
variant entre 3.1 et 0.9 mm (petit!!)



Angles de pliage variant
radialement entre 60 et 120°



- Conception des électrodes de lecture, suivi de fabrication et de pliage (difficile!)
- Fabrication des espaceurs (« filets ») → épaisseur d'argon liquide sous contrôle
- Design des absorbeurs, suivi de fabrication et de pliage

Le rôle du CPPM: assemblage

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



- Assemblage dans salle blanche au CPPM
- Mesures de contrôle permanentes → mesures géométriques (e.g. mesures de flèches), tests de tenue à la haute-tension, ...

Le rôle du CPPM: câblage/électronique

Ingédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



Dominique Sauvage - IN MEMORIAM

- Electronique « froide » et frontale de lecture et d'étalonnage
- Electronique « chaude » de lecture
- Comme pour la partie mécanique, gros travail de R&D du service électronique

Le rôle du CPPM: assemblage et câblage au CERN

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



- ➔ Intégration des modules au CERN, câblage [2003-2005]
- ➔ Mesures de contrôle permanentes

Le rôle du CPPM: assemblage et câblage au CERN

Ingrédients pour la recherche du Higgs

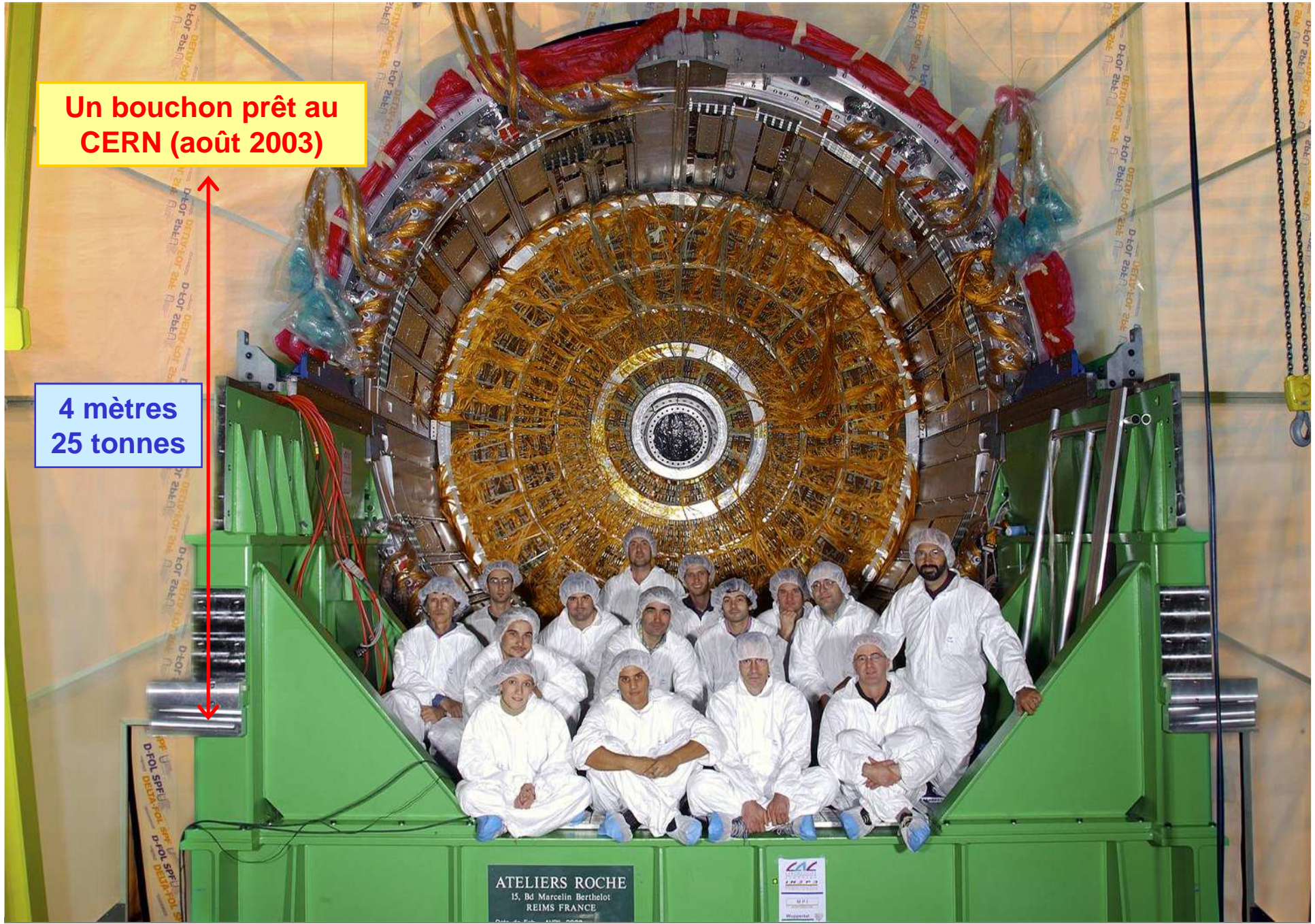
1. **Acceptance (surface) de détection maximale**
2. **Discrimination entre photons/électrons et jets** (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. **Une excellente résolution en masse** (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



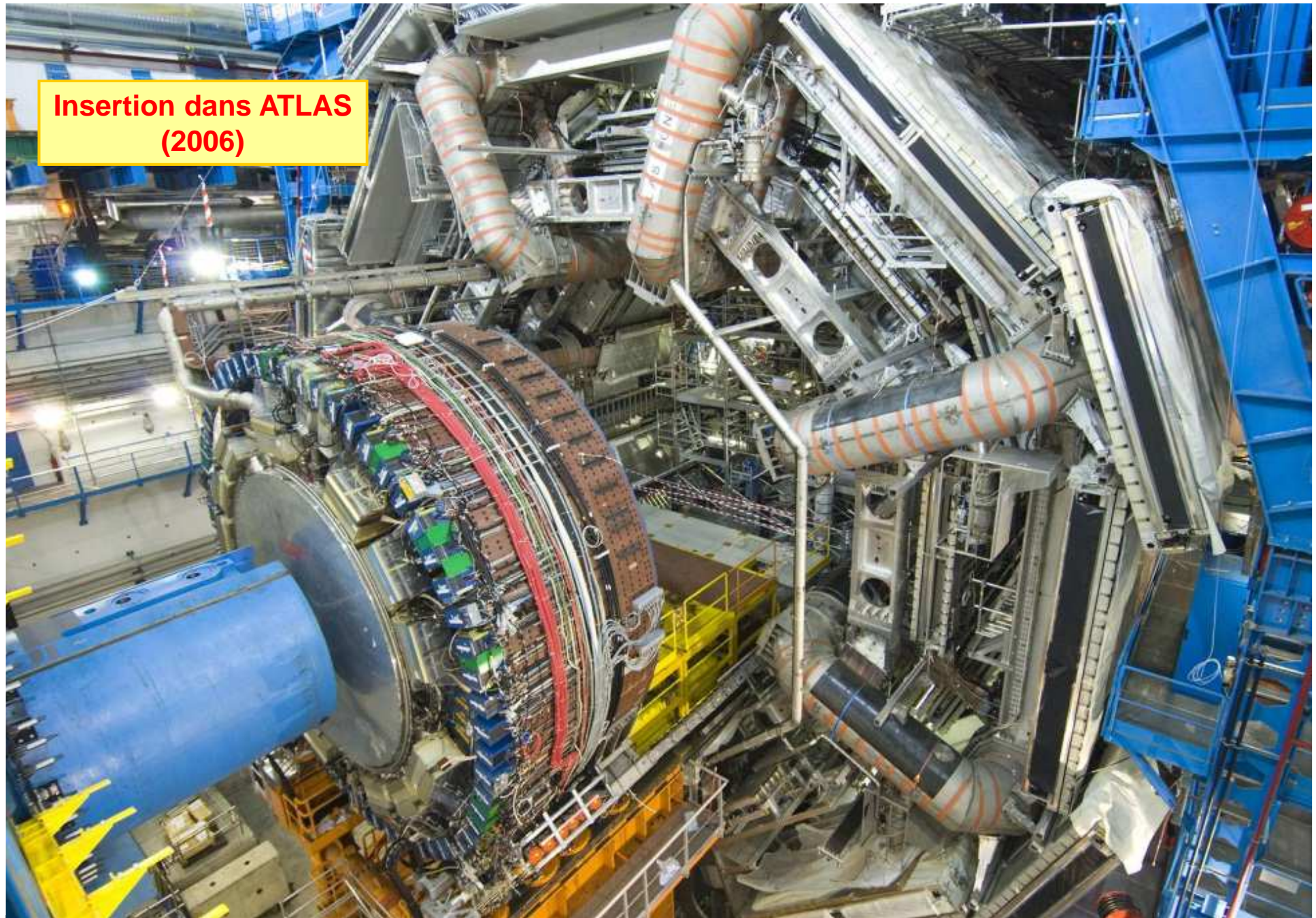
- ➔ Intégration des modules au CERN, câblage [2003-2005]
- ➔ Mesures de contrôle permanentes

Un bouchon prêt au CERN (août 2003)

**4 mètres
25 tonnes**



Le CPPM et la découverte du Higgs



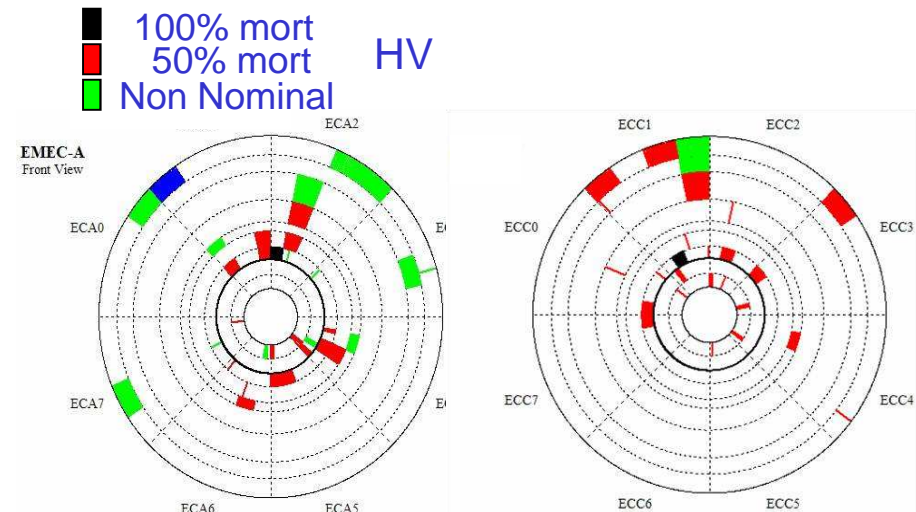
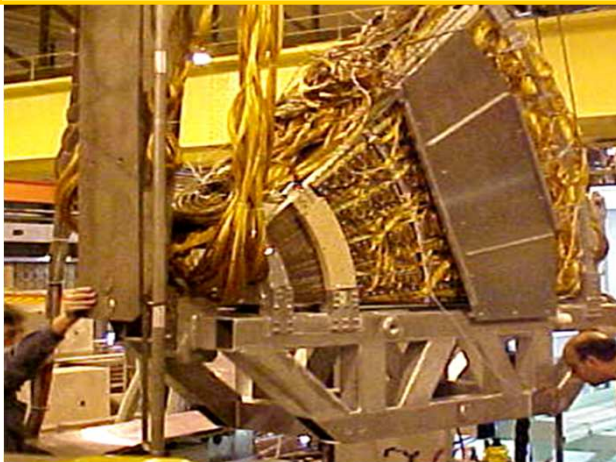
**Insertion dans ATLAS
(2006)**

Le rôle du CPPM: certification

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)

Insertion d'1 module bouchon dans son cryostat de test



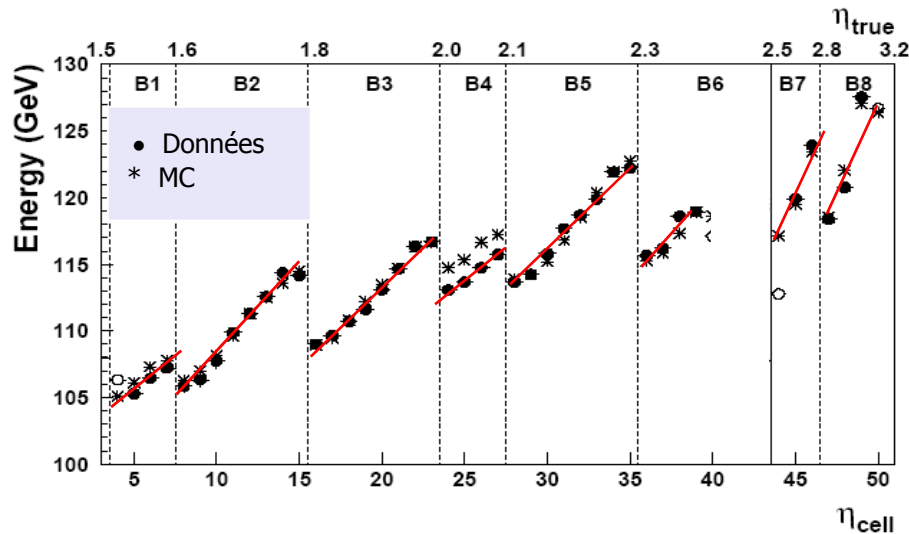
Nb de problèmes HV ~ 5% → correction validée

- Des tests permanents (à chaud et à froid): mesure des données du calorimètre lors des tests en faisceau, avec les muons cosmiques, mise en oeuvre *in situ* [+ développement de l'acquisition des données et traitement → service info et temps réel]
- Bon fonctionnement du calorimètre et certification de la qualité des données enregistrées

Le rôle du CPPM: certification

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



Exemple d'analyse menée au CPPM pour optimiser la résolution en énergie

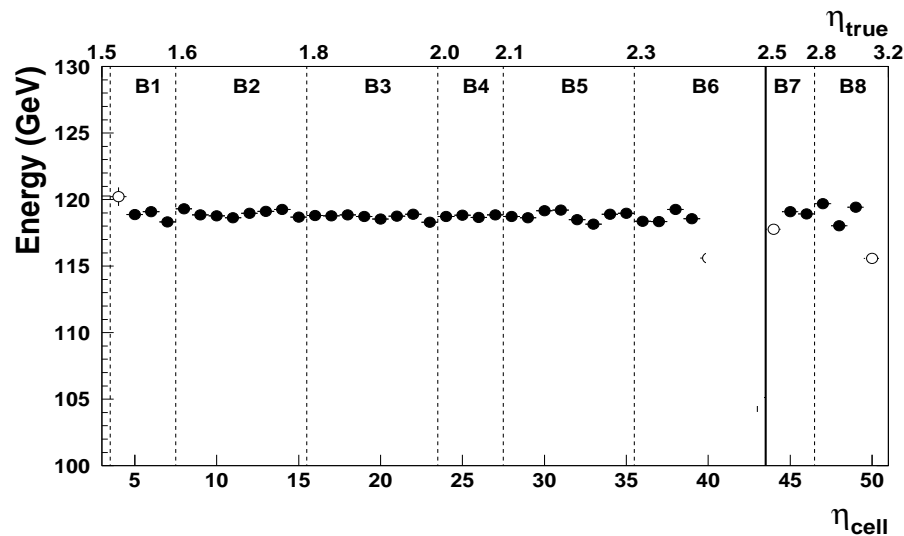
Importance des tests sous faisceau pour affiner les simulations numériques et les méthodes d'étalonnage en énergie

- Des tests permanents (à chaud et à froid): mesure des données du calorimètre lors des tests en faisceau, avec les muons cosmiques, mise en oeuvre *in situ* [+ développement de l'acquisition des données et traitement → service info et temps réel]
- Bon fonctionnement du calorimètre et certification de la qualité des données enregistrées

Le rôle du CPPM: certification

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



Exemple d'analyse menée au CPPM pour optimiser la résolution en énergie

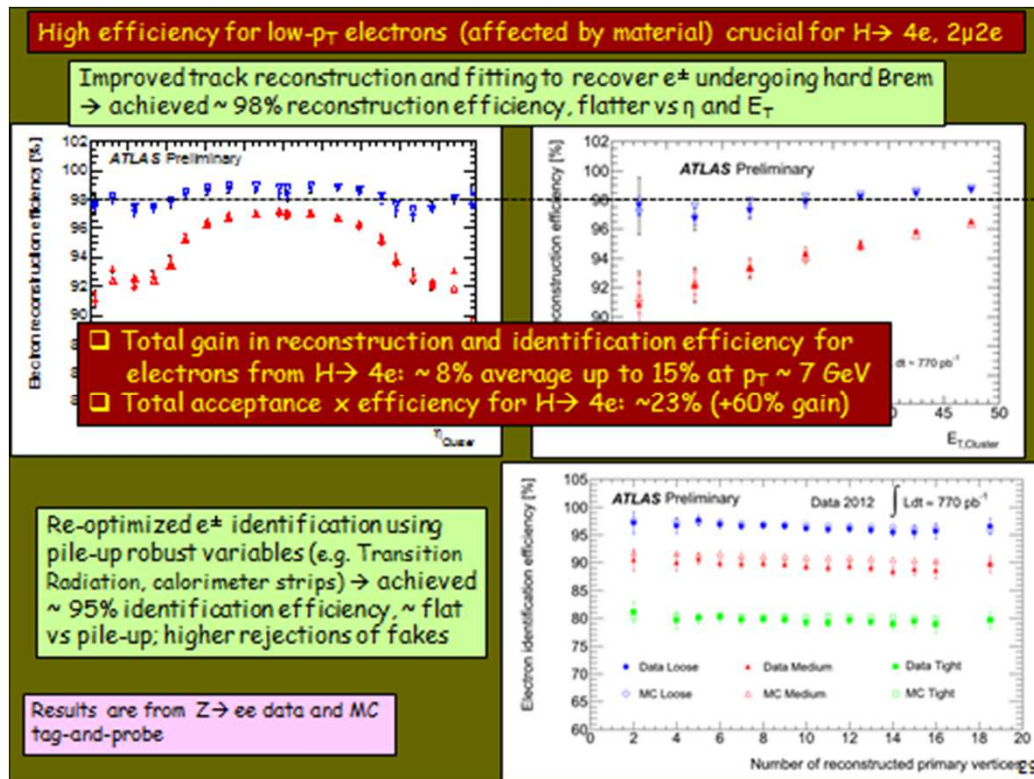
Importance des tests sous faisceau pour affiner les simulations numériques et les méthodes d'étalonnage en énergie

- Des tests permanents (à chaud et à froid): mesure des données du calorimètre lors des tests en faisceau, avec les muons cosmiques, mise en oeuvre *in situ* [+ développement de l'acquisition des données et traitement → service info et temps réel]
- Bon fonctionnement du calorimètre et certification de la qualité des données enregistrées

Le rôle du CPPM: analyses

Ingrédients pour la recherche du Higgs

1. Acceptance (surface) de détection maximale
2. Discrimination entre photons/électrons et jets (pour réduire le bruit de fond au maximum)
3. Une excellente résolution en masse (pour observer le signal au-dessus du bruit de fond)



Une des pages montrées par Fabiola lors du séminaire d'annonce de découverte du Higgs

Toutes les figures de cette page ont été réalisées par des étudiants du CPPM

Le rôle du CPPM: c'est aussi...



- Ressources informatiques, administration, finances, missions, venue de visiteurs étrangers / étudiants / post-docs, organisation de réunions, communication, ...
- Autant de compétences indispensables pour que le CPPM ait pu jouer un rôle majeur

Conclusions

❑ Événement majeur et rare cette année: découverte d'une nouvelle particule !!

- Ce succès est l'aboutissement de plus de 20 ans de conception, de mise au point et de construction du LHC et des détecteurs
- Le calorimètre électromagnétique est l'une des clés de ce succès
- Le CPPM y a largement contribué → fruit de ~20 ans de travail et expertise des techniciens, ingénieurs, administratifs et physiciens du labo. **BRAVO A TOUS.**



Perspectives

- ❑ **Événement majeur et rare cette année: découverte d'une nouvelle particule !!**
 - Est-ce le boson de Higgs? → mesures des propriétés de cette nouvelle particule



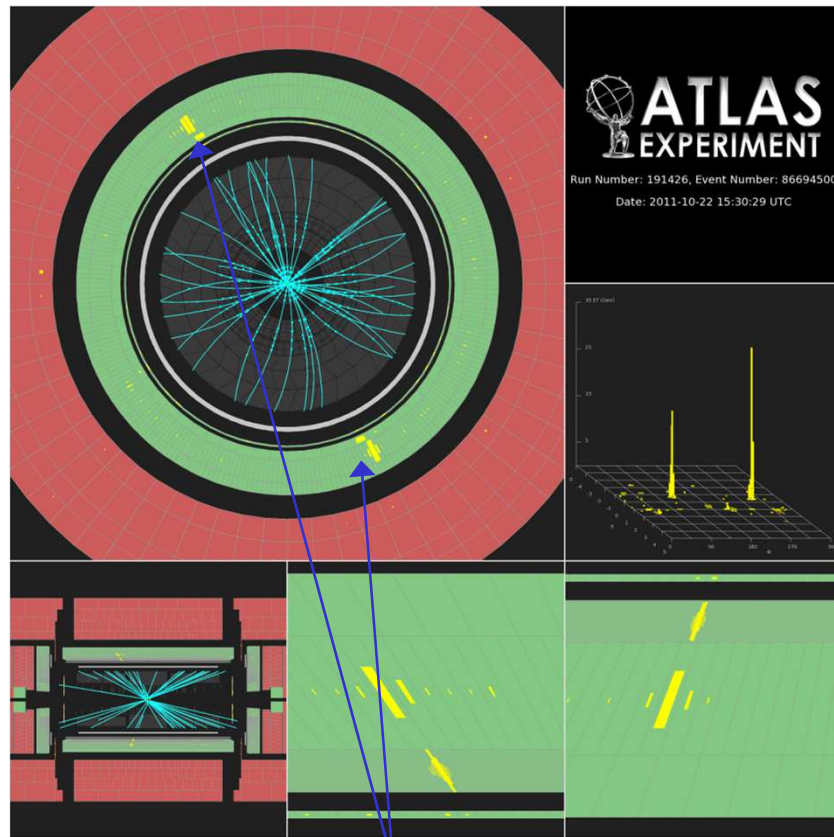
→ Recherche de la désintégration du Higgs en fermions → le CPPM est ENCORE bien placé, grâce à son rôle majeur dans le détecteur à pixels et l'étiquetage des jets de b

→ **Présentation de Laurent**

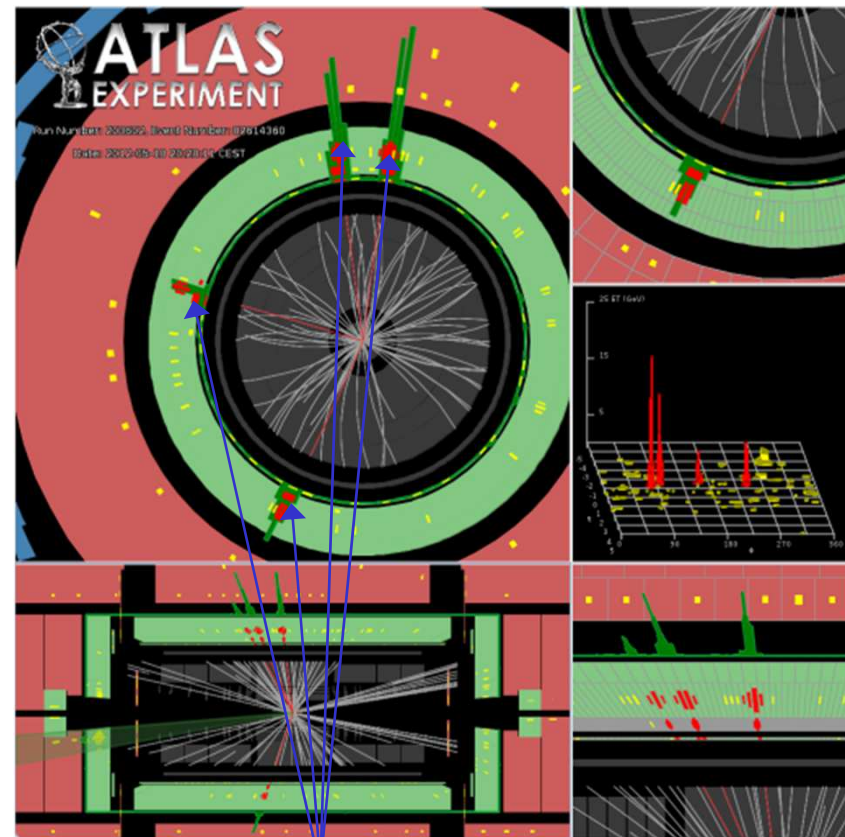
SPARES

2 candidats Higgs

Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$, $m_{\gamma\gamma} = 126.6$ GeV



Candidat $H \rightarrow 4e$, $m_{eeee} = 124.6$ GeV



Dépôts d'énergie dans le calorimètre électromagnétique

Débuts de l'histoire

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

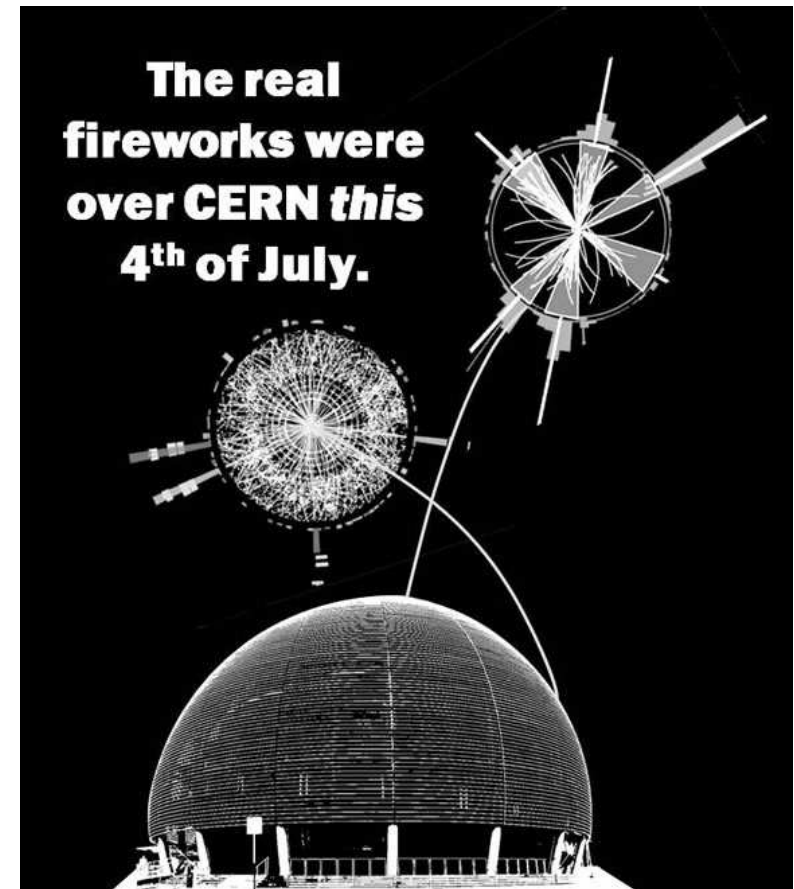
GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES*

G. S. Guralnik,[†] C. R. Hagen,[‡] and T. W. B. Kibble

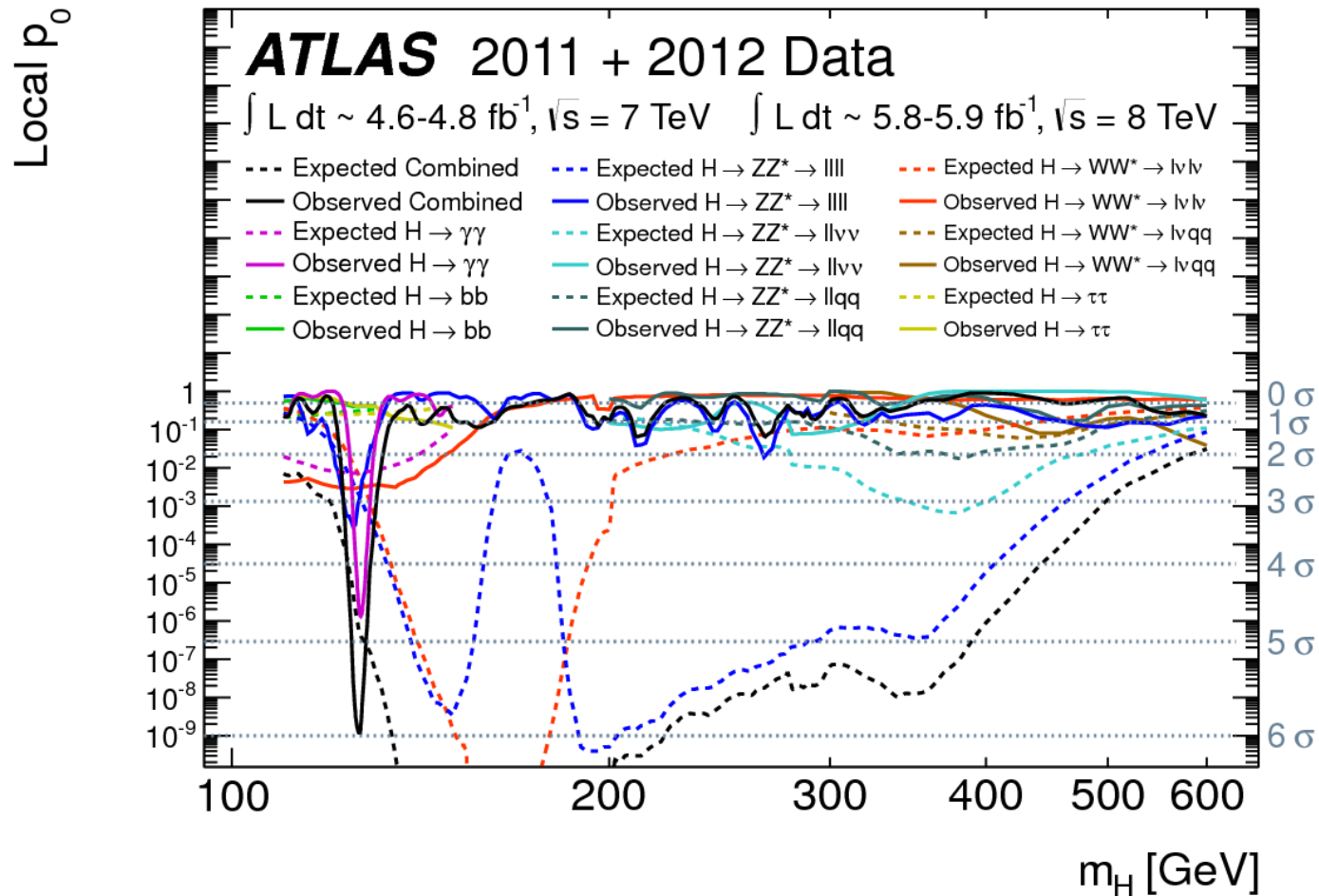
Department of Physics, Imperial College, London, England

(Received 12 October 1964)

Séminaire du 4 juillet 2012 au CERN

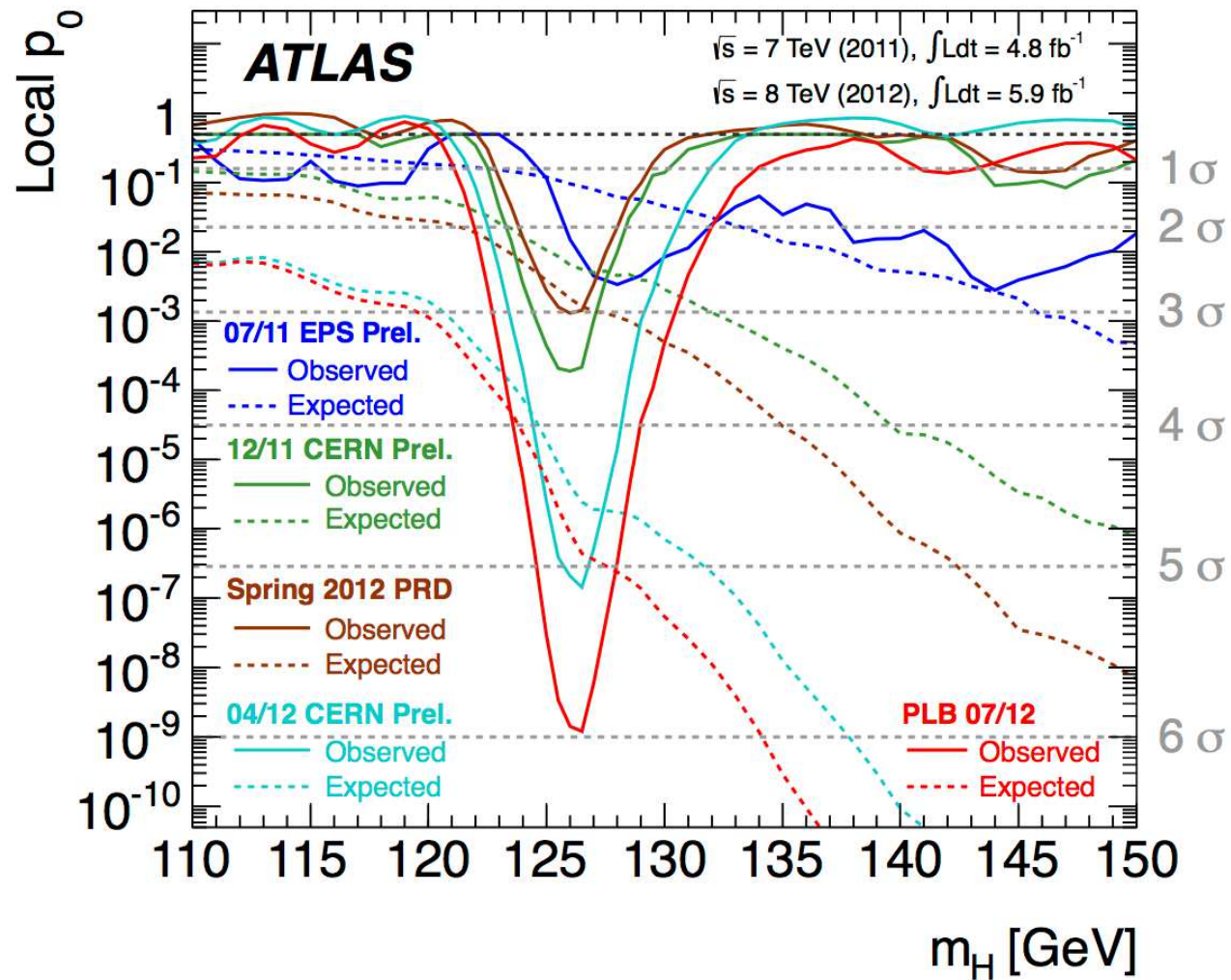


Résultats finals

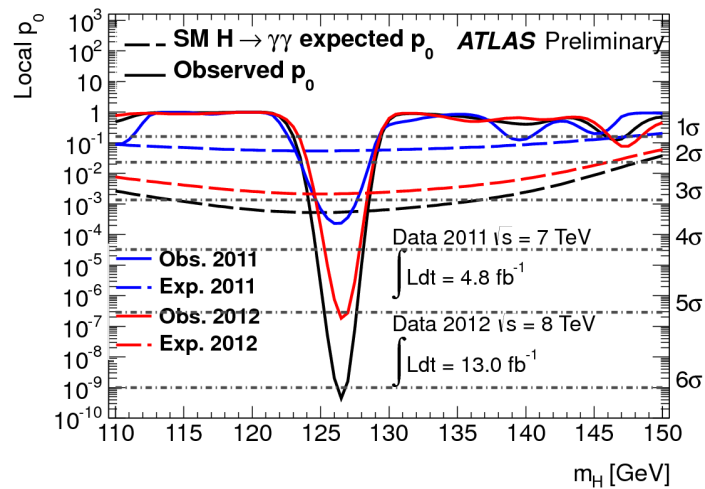
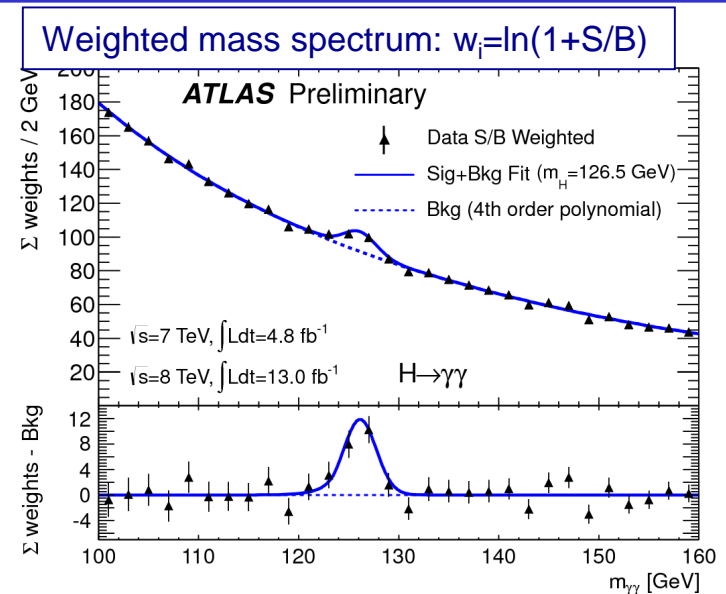
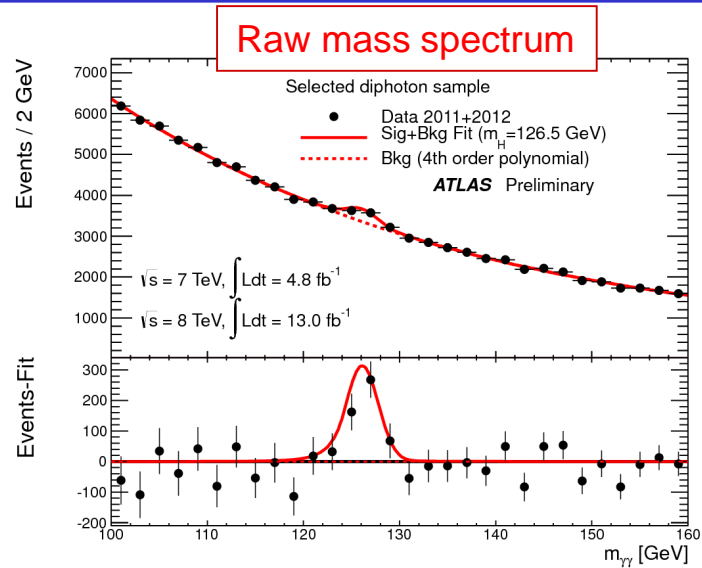


→ Ce sont les canaux $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow 4l$ qui ont permis de faire cette découverte

Evolution of excess with time



Derniers résultats $H \rightarrow \gamma\gamma$ (déc. 2012)



→ **Local excess 6.1σ (3.3σ expected for SM Higgs)**
Global excess 5.4σ