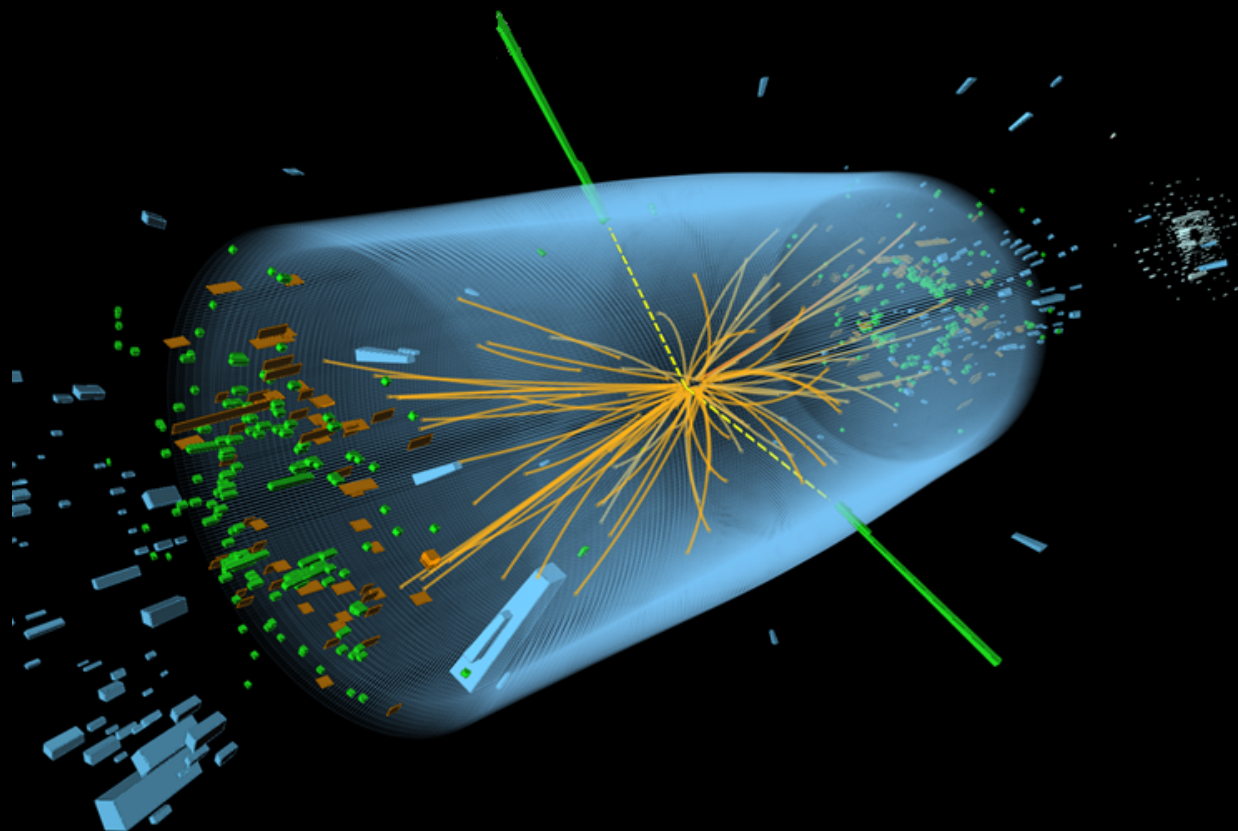


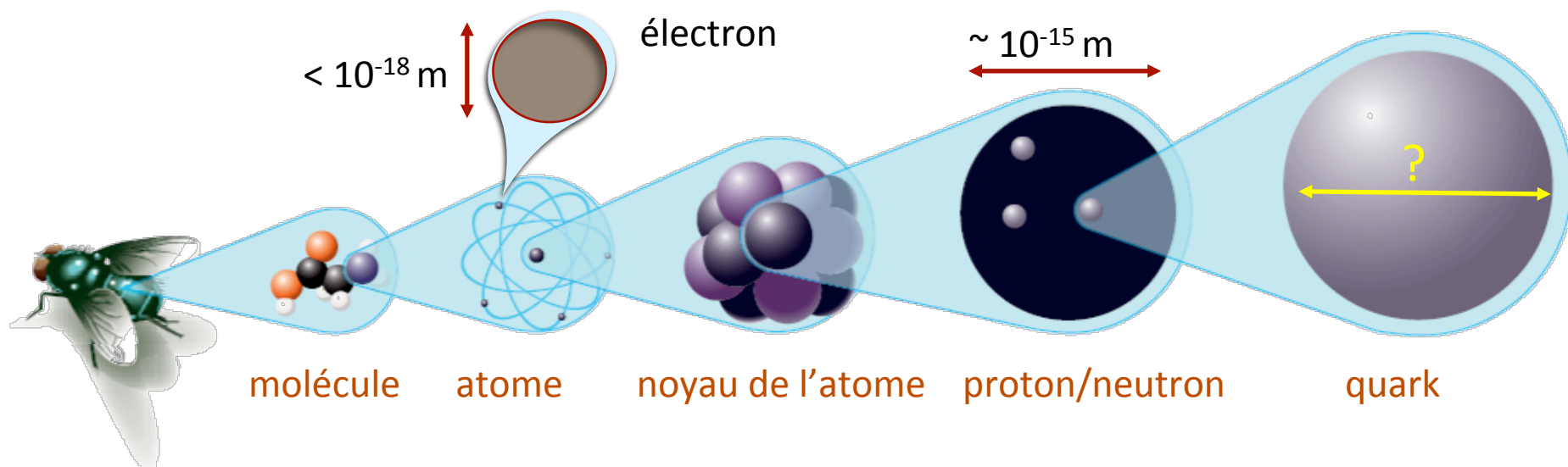
DERNIERS RESULTATS SUR LA RECHERCHE DU BOSON DE HIGGS AU LHC



Claude Guyot et Julie Malclès pour ATLAS et CMS, SPP, Saclay, le 6 Juillet 2012

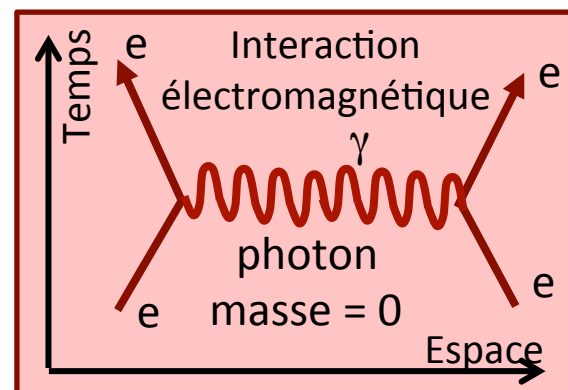


Particules et forces



Les électrons et les quarks sont les constituants élémentaires de la matière.

Les particules de matière interagissent entre elles par des forces engendrées par l'échange de bosons:





Le Modèle Standard (MS)

Le MS comporte 12 particules de matière (+12 d'antimatière) et 3 forces.
Il décrit tous les phénomènes observés en physique des particules (avec 29 paramètres libres).

Fermions

Particules de matière

Organisées en 3 familles

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$



6 Leptons

6 Quarks



$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Bosons

Propagateurs de force

Distinguant 3 forces

Photon



Force électro-
magnétique

3 Bosons faibles



Force faible



8 Gluons



Force forte

Boson de Higgs



Brise la symétrie électrofaible
Génère les masses des particules



Le Modèle Standard : Les masses

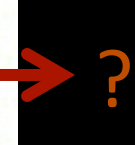
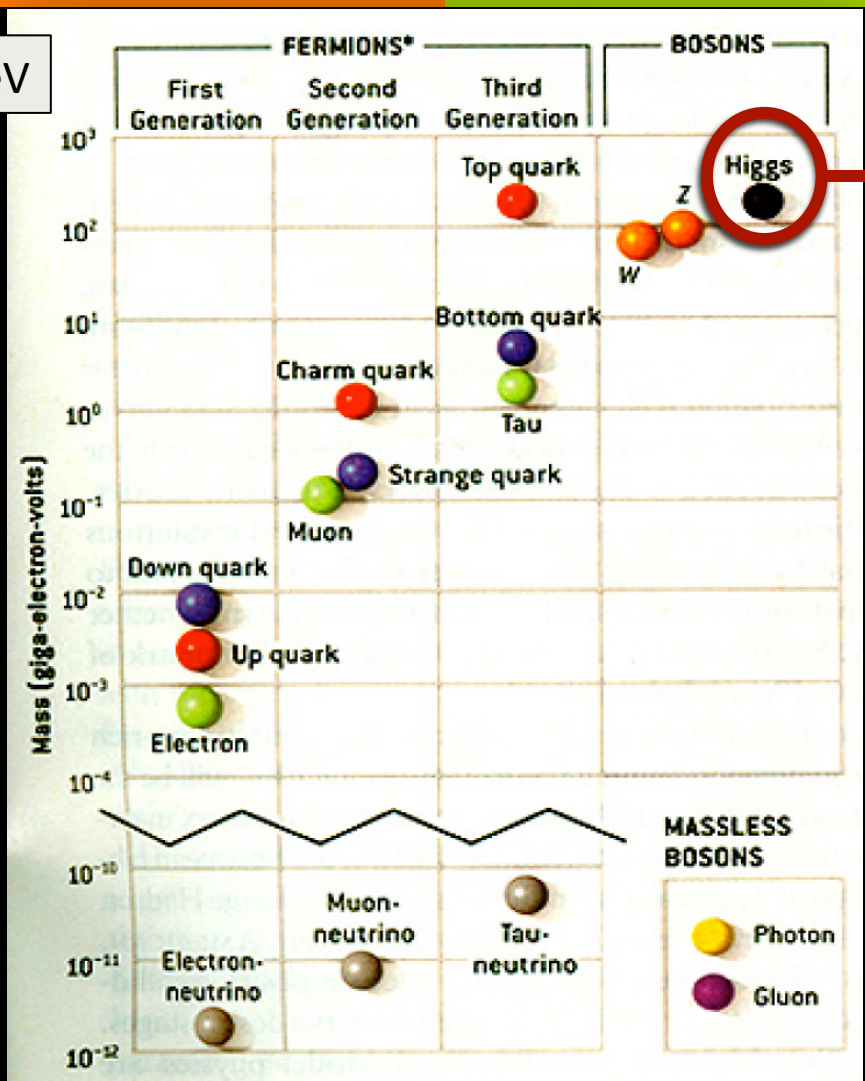
GeV

100

1

0,001

10^{-11}





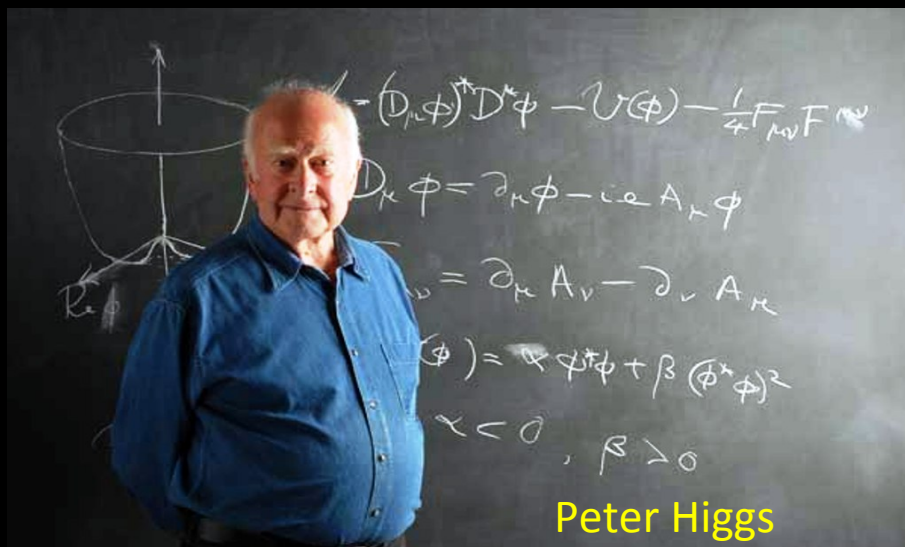
Pourquoi le Boson de Higgs

Question centrale du (pré)Modèle Standard:

La théorie mathématique qui décrit les interactions prévoit a priori une masse nulle pour les bosons vecteurs (avec une portée infinie de la force associée).

Les expériences montrent que la force faible (W^{+-}, Z^0) est de très courte portée, compatible avec des masses de boson d'environ 100GeV (~ 100 fois la masse du proton).

Le Mecanisme de Higgs





Le Boson de Higgs

La
me
Un
to
Se
co
Le
me
L'a
du



plit
e).
té



Le Boson de Higgs

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs est la clef de l'unification électrofaible en expliquant la différence de masse entre les bosons W/Z et photon γ .

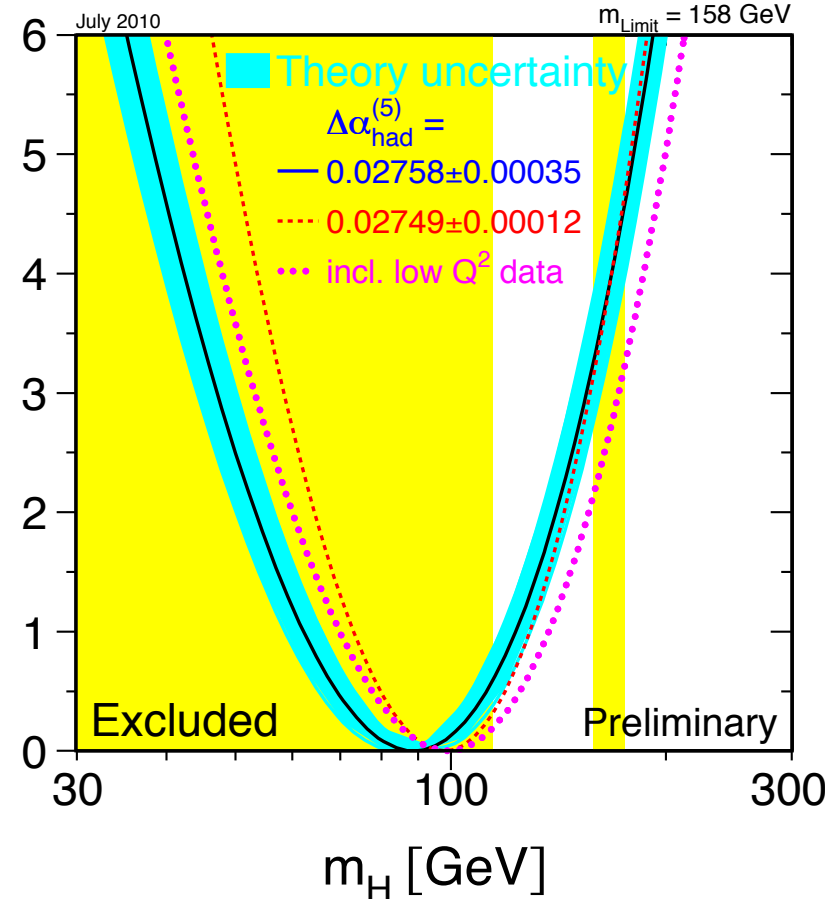
Ce mécanisme dérive des concepts développés en physique de l'état condensé:

- brisure spontanée des symétries et
- rôle du vide en tant qu'état fondamental de la matière où des champs peuvent se condenser.

Le rôle du boson de Higgs est analogue sur le plan théorique à celui des paires de Cooper de la supraconductivité.

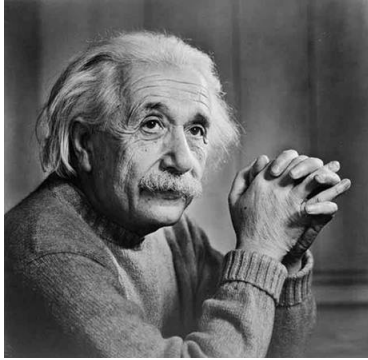
Connaissances avant le LHC

- ❑ Le modèle ne prédit pas la **masse du boson de Higgs**
- ❑ En revanche, **pour une masse donnée, le modèle prédit ses propriétés**
- ❑ **Le LEP au CERN** (Genève, 1989-2000) collision^{es} électron-positon jusqu'à 209 GeV
 - Mesures de la masse du W et des paramètres du Z
 - Recherches directes: $m_H > 115$ GeV
- ❑ **Le Tevatron au Fermilab** (Chicago, 1992-2011) collisions proton-antiproton à 1.96 TeV
 - Découverte du quark top et mesure de sa masse
 - Recherches directes: $m_H \notin [158-173]$ GeV



La gamme de masse la plus probable d'après ces mesures:
 $115 \text{ GeV} < m_H < 160 \text{ GeV}$

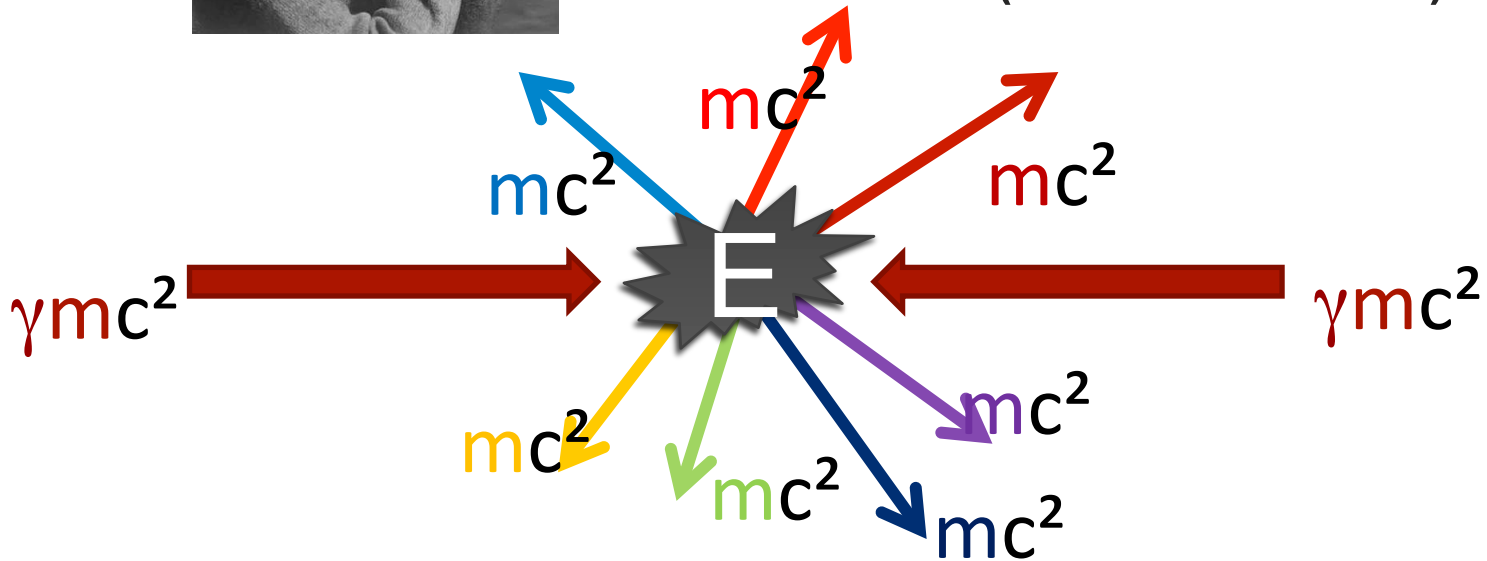
Comment le produire?



$$E = mc^2$$

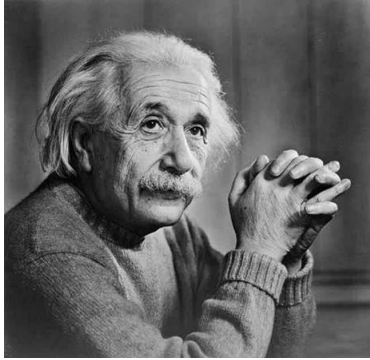
Energie \leftrightarrow Masse

(masse = matière)



Au LHC: production du boson de Higgs principalement par collision de 2 gluons

Comment le produire?



$$E = mc^2$$

Energie \leftrightarrow Masse

(masse = matière)

NB: eV = unité de mesure des énergies et masses dans cette présentation

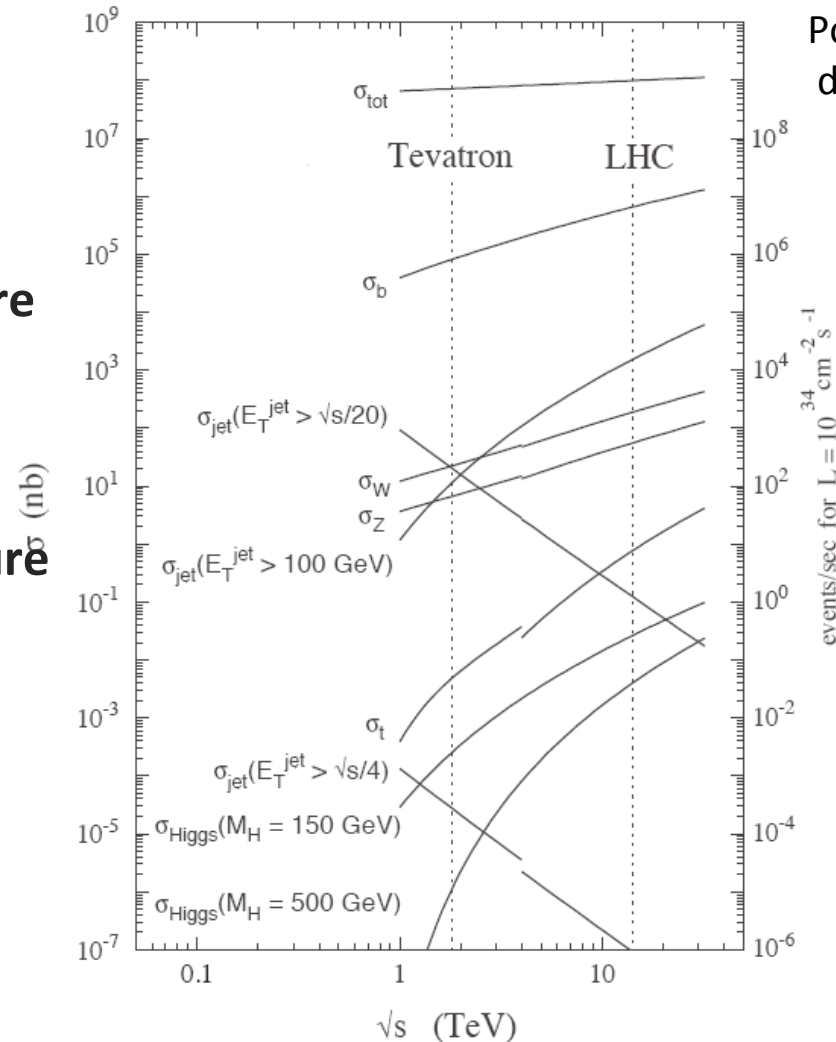
- **1 GeV \approx masse du proton**
- **1 TeV = 1000 GeV**

Comment le produire?

Le boson de Higgs

- ❑ Pas vu au LEP, car l'énergie du LEP est trop faible pour produire une si grande masse ($E=mc^2$)
- ❑ Pas vu au Tevatron, car s'il est produit, il ne l'est pas en quantité suffisante pour conclure

Il faut donc un collisionneur avec une énergie plus grande, et un très grand nombre de collisions: le LHC!



Pour 10 milliards d'événements

≈ 100 millions de quarks b

events/sec for $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

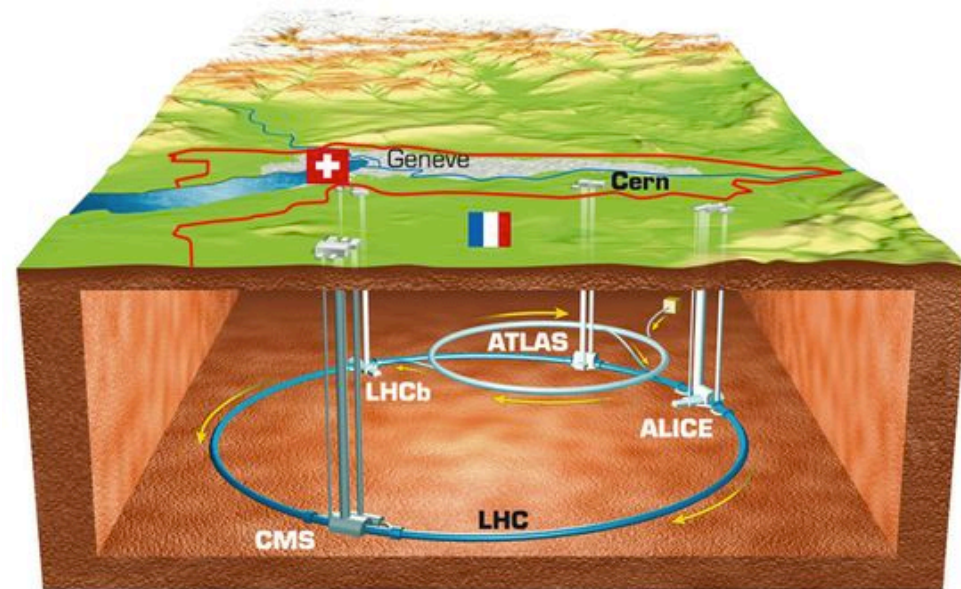
$\approx 200\,000$ bosons W

≈ 3 bosons de Higgs

Comment le produire?

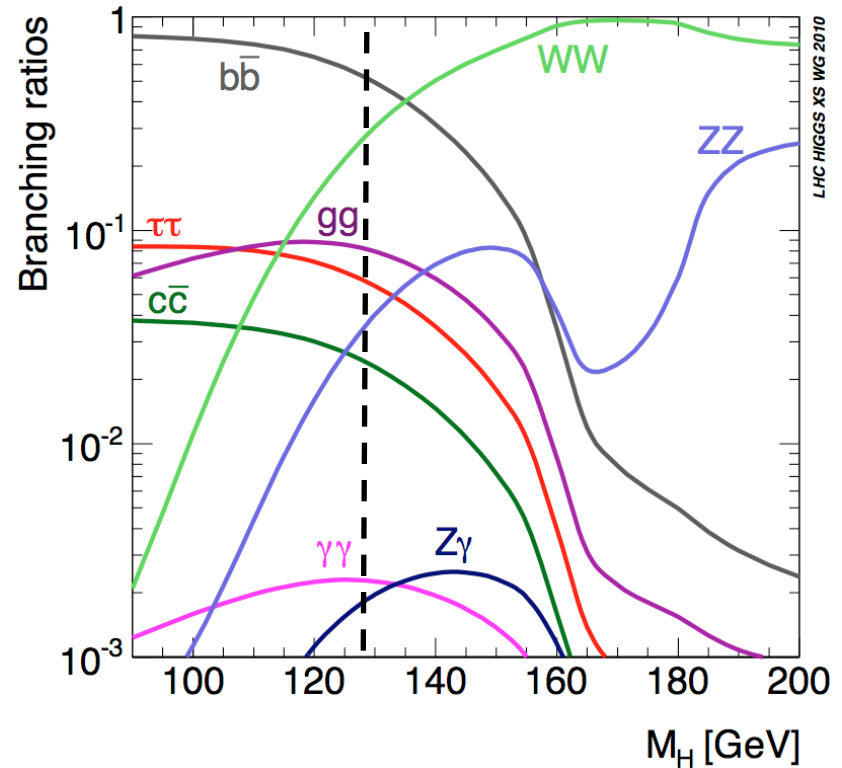
Le LHC:

- ❑ Collisionneur proton-proton au CERN à Genève dans l'anneau du LEP (27 km)
- ❑ Énergie:
 - Nominale: 7 TeV par faisceau soit 14 TeV dans le centre de masse, près de 7 fois l'énergie du Tevatron!
 - Actuelle: la première phase de prise de donnée a eu lieu à 7 TeV en 2011 et 8 TeV en 2012
- ❑ Luminosité (proportionnelle au nombre d'interactions par seconde):
 - Nominale: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (= 25 x Tevatron)
 - Actuelle: $6 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Comment le détecter?

- ❑ Le boson de Higgs se désintègre instantanément en d'autres particules
- ❑ On l'observe en détectant ses produits de désintégration
- ❑ Le modèle ne prédit pas la masse du boson de Higgs
- ❑ Pour une masse donnée, le modèle prédit ses probabilités de désintégration en différentes particules



Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions

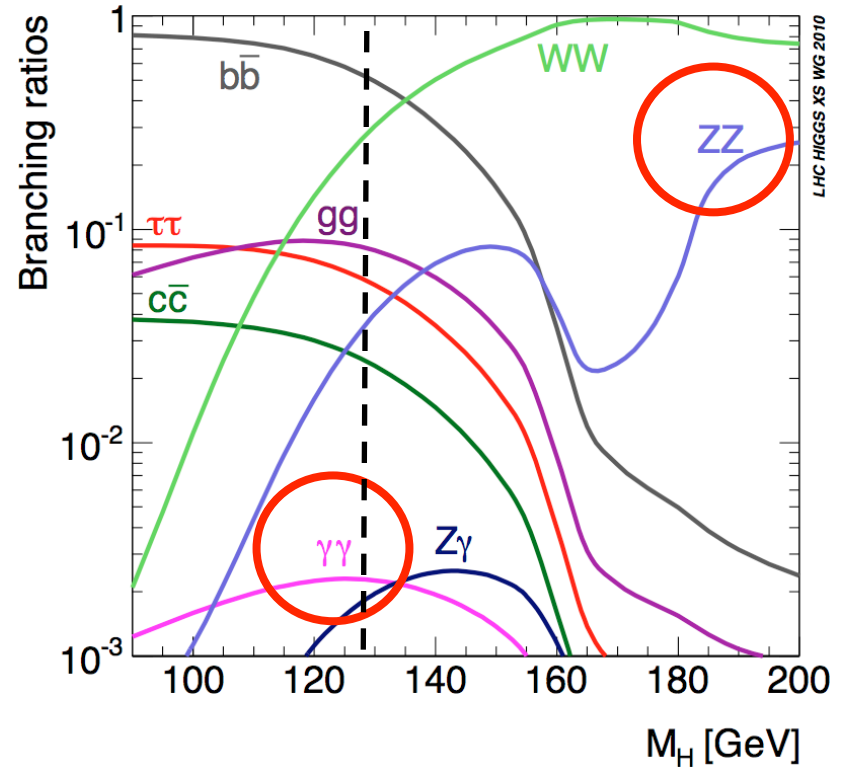
Comment le détecter?

Les “modes” d’observation privilégiés sont:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ (deux photons)
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$ ou 4μ ou $2e2\mu$ (electrons et muons)

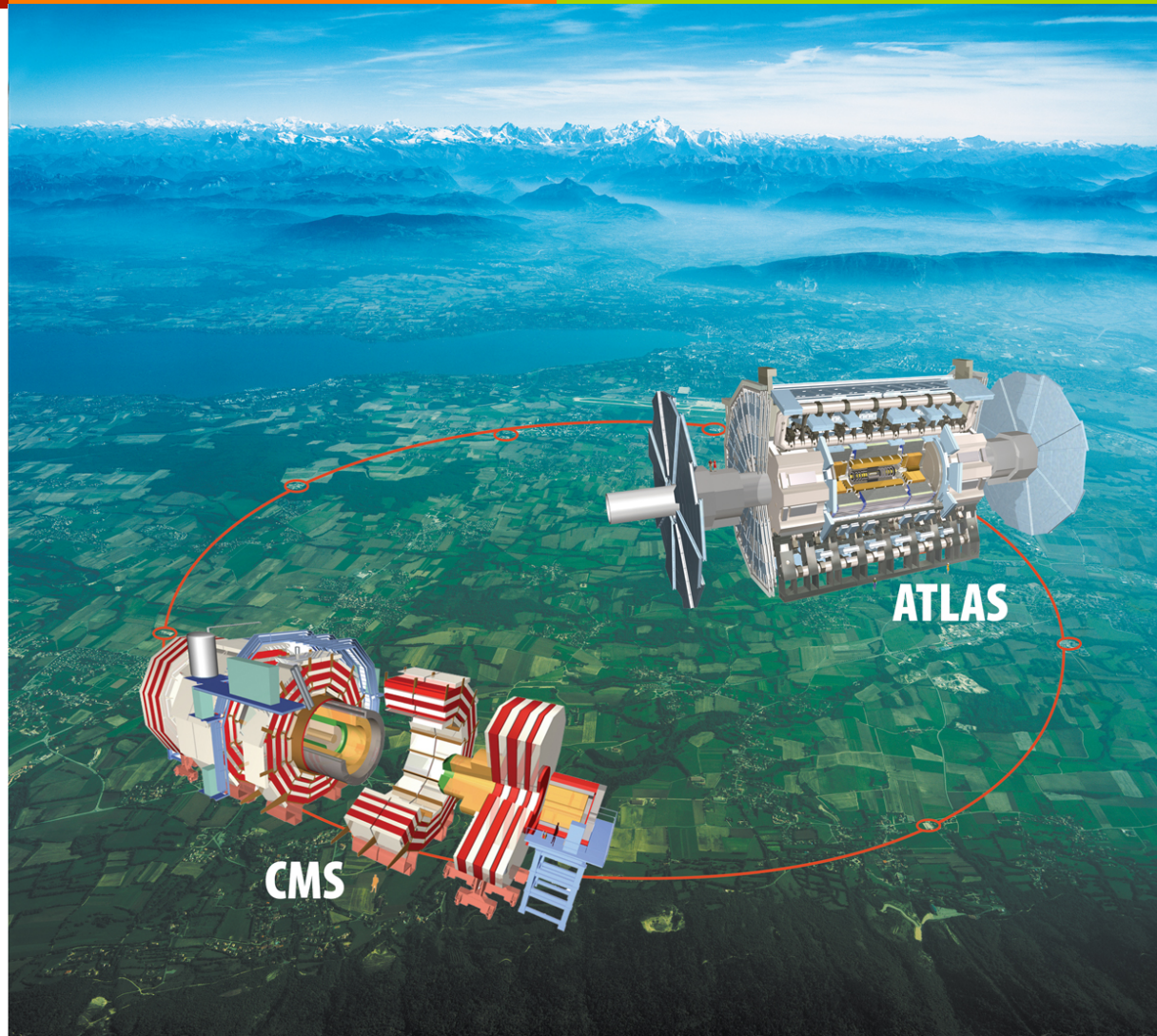
Car:

- Les bruits de fond sont limités (au contraire pour bb , le bruit de fond est 10 millions de fois plus important!)
- Nous savons détecter tous les produits de désintégrations (électrons, muons et photons) et mesurer leur énergie avec une grande précision pour calculer la masse du boson de Higgs



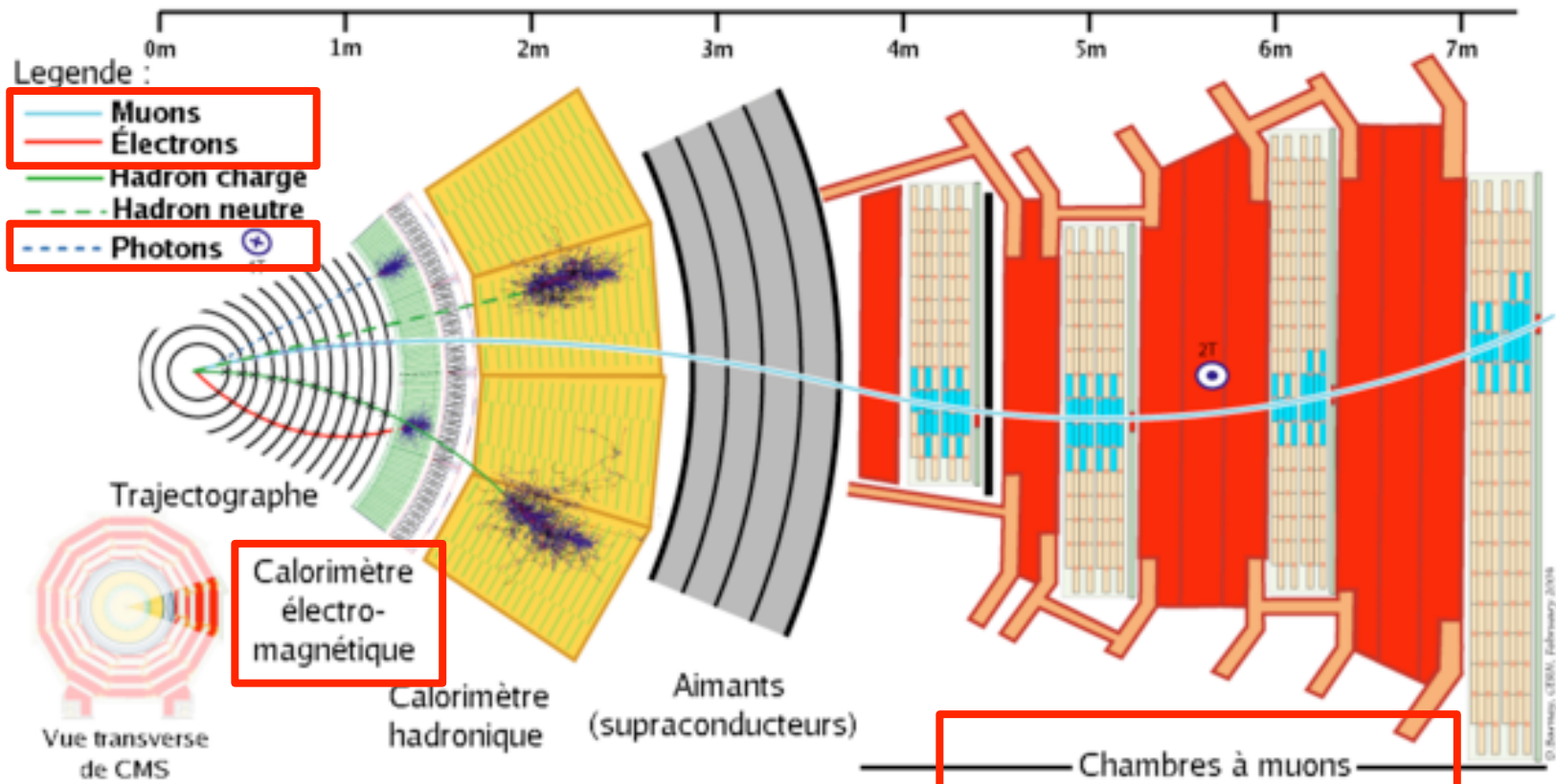
Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions

Comment le détecter?



Comment le détecter?

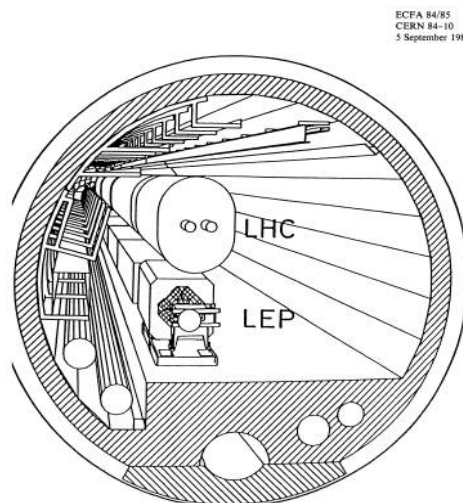
- On utilise les interactions entre les particules et la matière pour détecter les particules
- Chaque type de particule interagit différemment et a un sous-détecteur dédié





La naissance du projet LHC

- ❑ **1981-1984:** le collisionneur proton-antiproton du CERN a fonctionné à merveille
 - Les particules W et Z ont été découvertes par les expériences UA1 et UA2 en 1983
- ❑ Le LEP n'est pas encore terminé, mais son tunnel est creusé (27 km)
 - Sous l'impulsion de Carlo Rubbia, quelques dizaines de physiciens imaginent un collisionneur à protons pour l'après-LEP avec comme objectif principal la découverte du boson de Higgs
- ❑ **Mars 1984:** Workshop de Lausanne => LHC
- ❑ Le principe du projet LHC est approuvé par le conseil du CERN en décembre **1991**
- ❑ Les (proto)-collaborations pour les détecteurs se forment (CMS, EAGLE, ASCOT....)
 - Phase de conception, de discussions, du partage des tâches au niveau mondial.
- ❑ Formation des collaborations en **1992** (workshop d'Evian): **CMS, ATLAS**, ALICE, LHCb
 - Décisions sur les participations du DAPNIA(=IRFU) à ATLAS, puis à CMS
- ❑ Le SSC, concurrent US géant, sera abandonné en **1993**.
 - Les premières collisions au LHC sont promises pour l'année 2000! Elles ne viendront qu'en 2009.



ECFA 84/85
CERN 84-10
5 September 1984

LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

Vol. I

PROCEEDINGS OF THE ECFA-CERN WORKSHOP

held at Lausanne and Geneva,
21-27 March 1984

Lausanne 1984



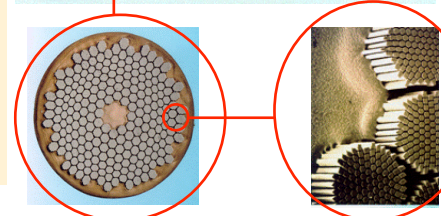
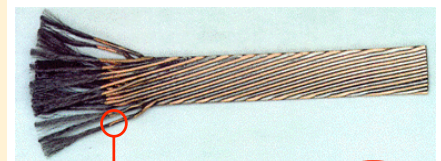
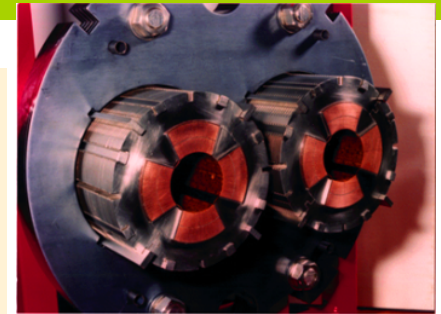
LHC 2006
le millième aimant est posé
(sur 1232)



Le LHC en quelques chiffres

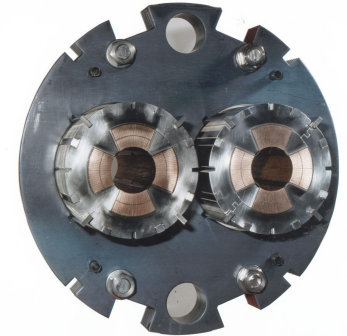
La machine contient 9300 aimants:

- 392 quadripôles supraconducteurs (focalisation)
- 2464 sextupôles, 1232 octupôles, plus de 1200 autres petits aimants de correction
- 1232 dipôles, le plus gros défi à relever (14.3m et 35t par dipôle = 18 km de dipôles sur les 27 km de LHC)
- **Supraconducteurs:**
 - NbTi température de transition 10K utilisé à 1.9K \Rightarrow champ de 8.33T
 - Energie stockée > 10 GJ (\approx un A380 à 700 km/h) (200 x les précédents accélérateurs)
- **Bobinage**
 - 1 câble (\varnothing 1.5cm) = 36 brins torsadés (\varnothing 15mm)
 - 1 brin = 6400 filaments (\varnothing 7 μ m)
 - 7600km de câbles = en brins 5 AR Terre-Soleil plus un aller sur la Lune!
- **Cryogénie:**
 - Le plus gros frigo du monde: 40000t de matériel à 1.9K (120t d'He superfluide). 1,9K = -271,25°C.
 - L'endroit le plus froid de l'univers (le fond diffus est à 2.7K)
 - Avec des températures générées par les collisions plus de 100 000 fois supérieures à celles qui règnent au centre du Soleil.



Le LHC au CEA

Le DAPNIA a eu en charge l'étude, la réalisation de prototypes, leurs essais, le transfert industriel et le suivi technique de la production de série de plus de 400 aimants quadripolaire supraconducteurs double ouverture à fort gradient (223 T/m) pour la focalisation des faisceaux de particules dans les arcs de l'accélérateur LHC du CERN.



1994 : Essais réussis des 2 premiers prototypes

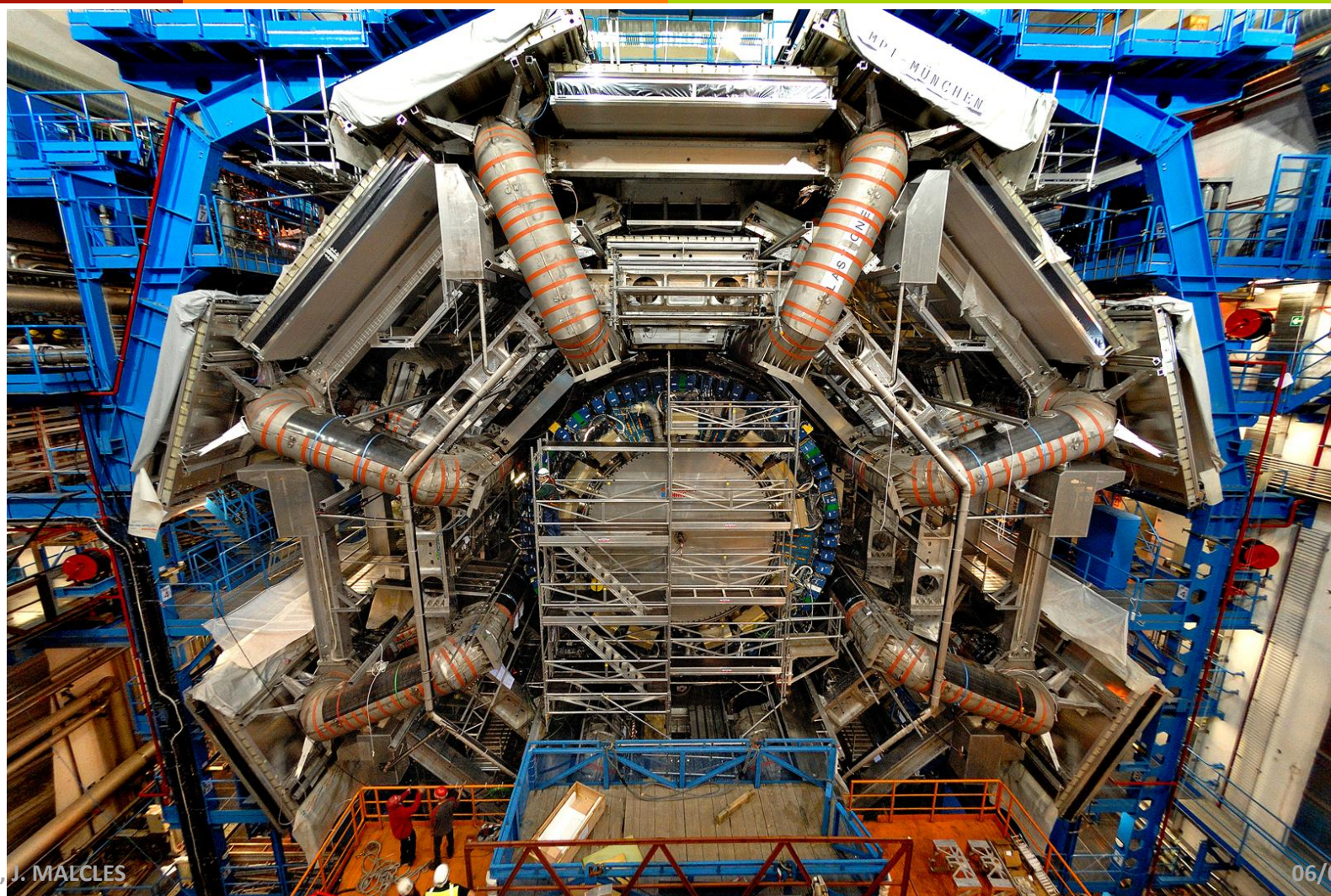
Juillet 2002 : Premier aimant de série livré au CERN

Avril 2005 : Premier quadripôle dans le tunnel de l'accélérateur

Avril 2007 : le dernier aimant a été descendu dans le tunnel

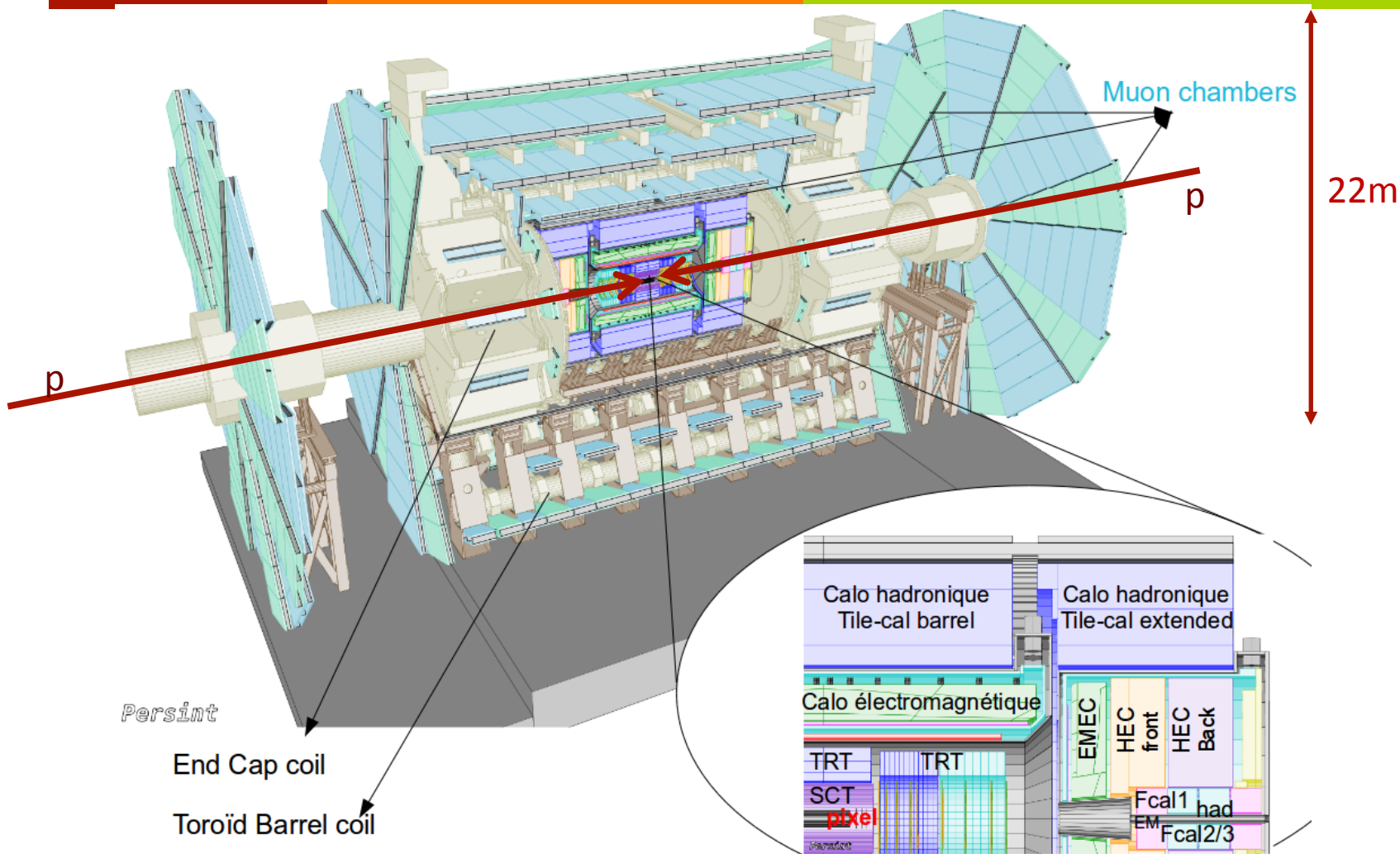


L'expérience ATLAS





Le détecteur ATLAS





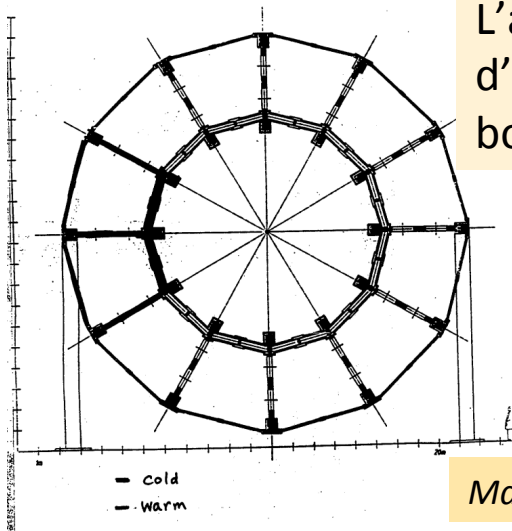
La collaboration ATLAS



38 pays
175 instituts
>3000 physiciens et ingénieurs
~2900 auteurs
~1000 étudiants



Le DAPNIA/IRFU dans ATLAS(1)



L'aimant toroïde d'ASCOT et ses 12 bobines (1992)



Marc Virchaux 1953-2004

L'aimant toroïdal d'ATLAS et ses 8 bobines (2004):

Le DAPNIA/SACM maître d'oeuvre

Spécial
Festival d'Avignon

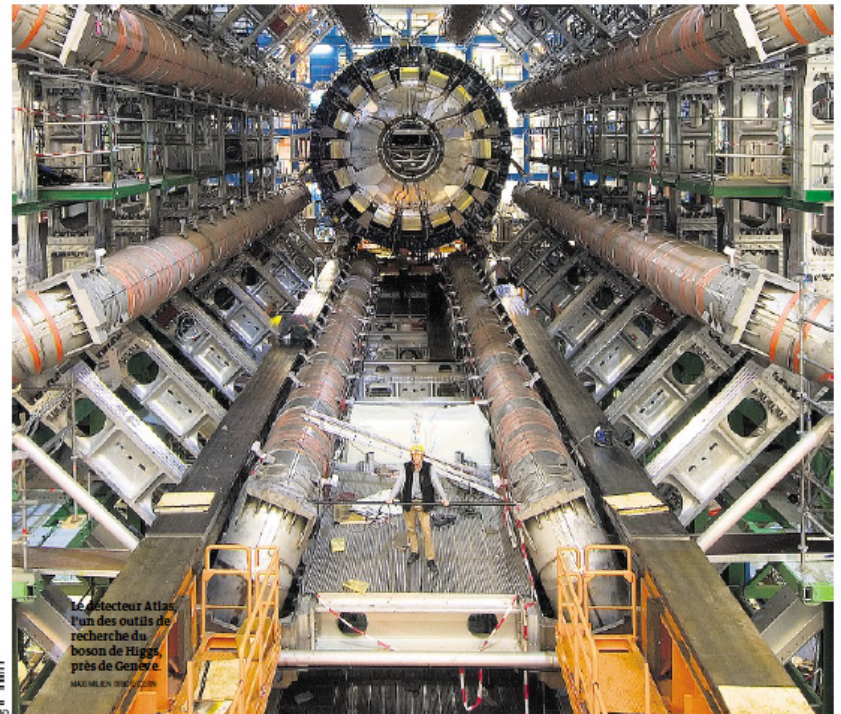
La 66^e fête du théâtre
démarre le 7 juillet
Supplément

Le Monde

Jeudi 5 juillet 2012 - 68^e année - N°20981 - 1,60 € - France métropolitaine - www.lemonde.fr -

Science : la matière dévoilée

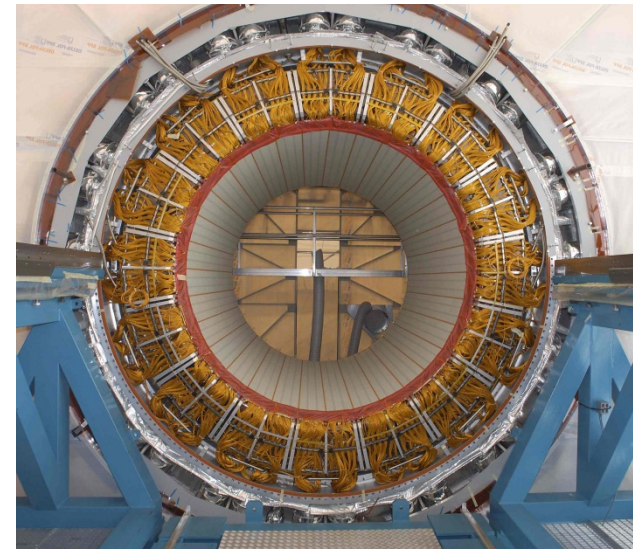
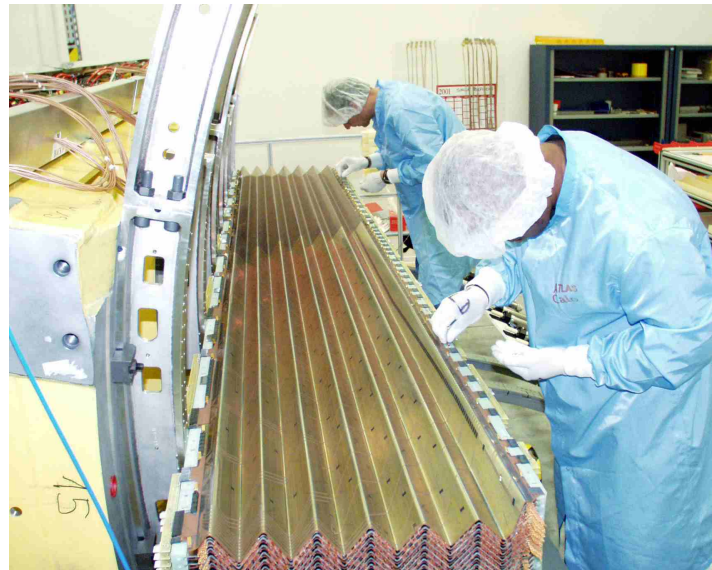
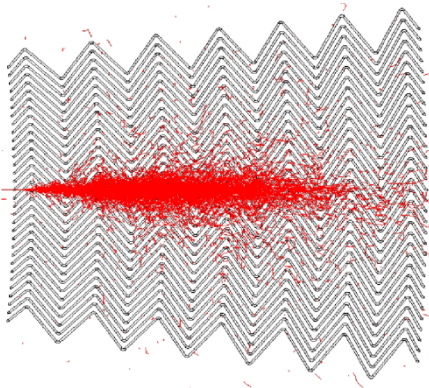
- Le boson de Higgs, particule manquante pour expliquer l'Univers, vient d'être découvert
- Les physiciens du CERN de Genève ont prouvé son existence à 99,9999 %



Le détecteur Atlas
l'un des outils de
recherche du
boson de Higgs,
près de Genève.

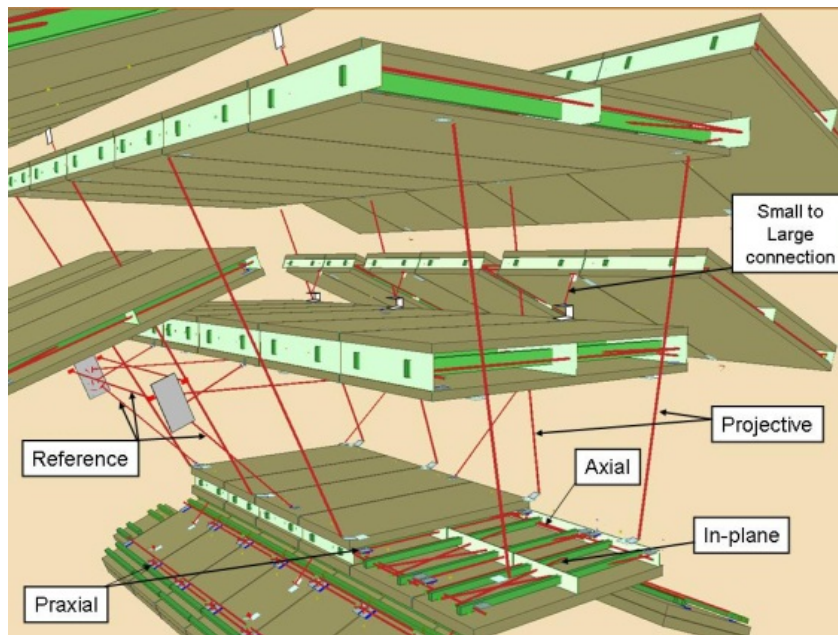
Le DAPNIA/IRFU dans ATLAS(2)

Participation a la conception, a la construction, a l'installation et a l'exploitation du calorimètre électromagnétique « accordéon » a argon liquide (SEDI)

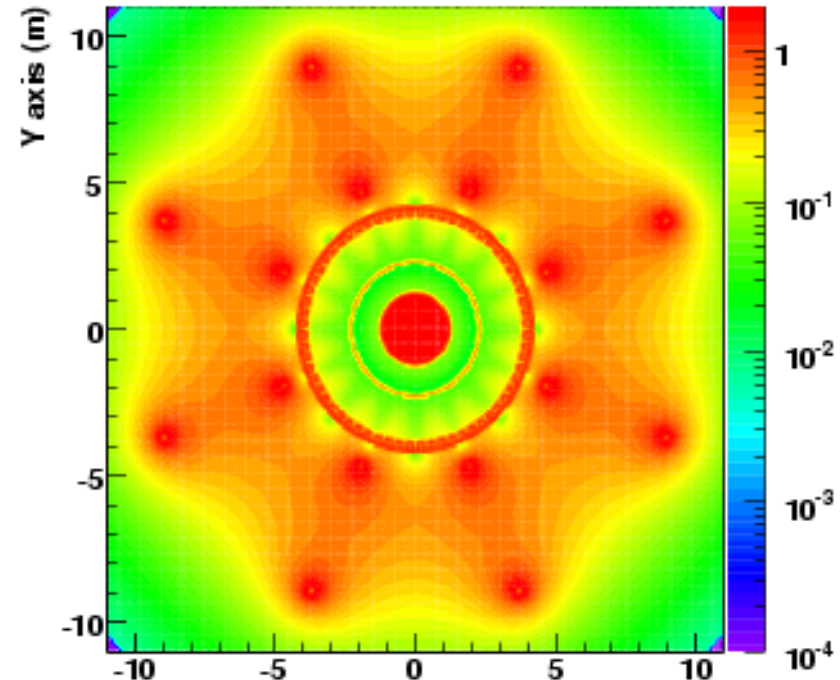


Le DAPNIA/IRFU dans ATLAS(3)

- ❑ Conception, construction, installation et exploitation du système d'alignement de la partie centrale du spectromètre a muon (SIS-SEDI)
- ❑ Cartographie du champ magnétique inhomogène des aimants toroïdaux a l'aide d'un réseau de 1700 sondes de Hall (SIS-SEDI)



$z = -20\text{cm}, \phi = 2\pi$

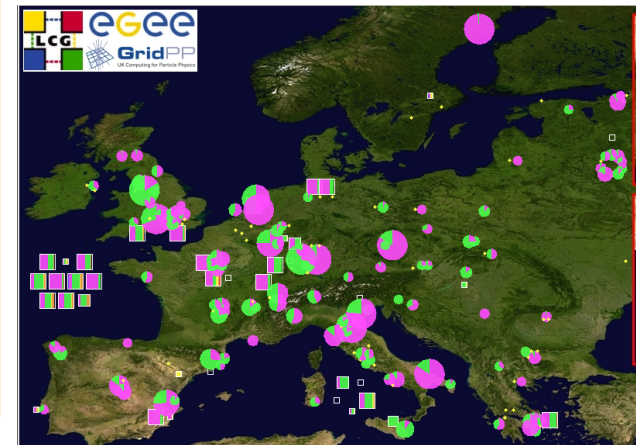
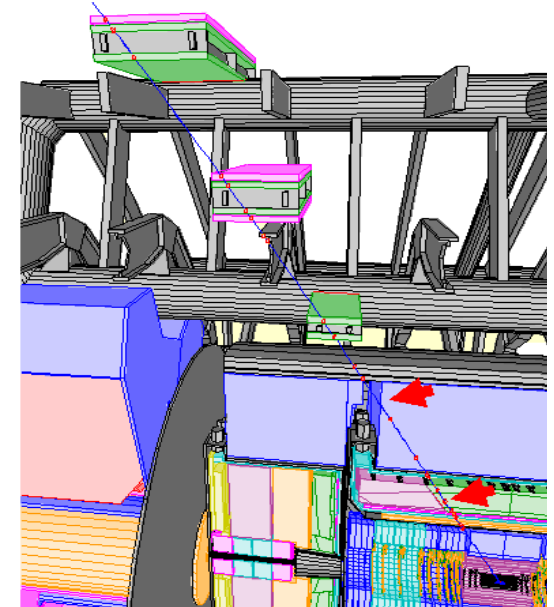




Le DAPNIA/IRFU dans ATLAS(4)

- ❑ Calibration du calorimètre a l'aide des évènements $Z \rightarrow e^+e^-$
- ❑ Développement des premiers logiciels de reconstruction des muons à partir des coups dans les chambres a muons (encore utilisé actuellement dans la recherche des bosons de Higgs)
- ❑ Travaux sur la simulation du spectromètre
- ❑ Développement d'un logiciel de visualisation des évènements complexe d'ATLAS en 3D (PERSINT)
- ❑ Implication de certains physiciens du groupe sur le bon fonctionnement du calcul local à Saclay et le nuage français de la grille de calcul qui a permis le traitement d'une masse de données sans commune mesure avec les expériences précédentes sur une échelle de temps très restreinte
 - les résultats de l'analyse Higgs sont apparus seulement 2 semaines après la fin de la prise de données.

C. GUYOT, J. MALCLES





L'IRFU dans ATLAS

21 Permanents SPP: *H. Bachacou, F. Bauer, N. Besson, M. Boonekamp, L. Chevalier, F. Deliot, A.I. Etievre, P.G. Giraud, C. Guyot, S. Hassani, W. Kozanecki, E. Lançon, J.F. Laporte, B. Mansoulié, J.P. Meyer, R. Nikolaïdou, A. Ouraou, C. Royon, L. Schoeffel, P. Schune, J. Schwindling*

1 Conseiller Scientifique: *J. Ernwein*

Equipe actuelle

7 Post-Docs SPP: *H. Abreu, J.B. Banchard, C. Maiani, P.K. Mal, L. Mijovic, O. Simard, N. Vranjes*

16 Etudiants: *N. Bolnet, C. Deterre (D0/ATLAS), F. Balli, A. Chapelain (D0/ATLAS), L. Gauthier, H. Grabas, J. Manjarres-Ramos, H. Martinez, N. Morange, S. Protopapadaki, C. Xu, M. Xiao, E. Mountricha (cotutelle), R. Stazewski (cotutelle), M. Trzebinski (cotutelle), M. Zeman (cotutelle)*

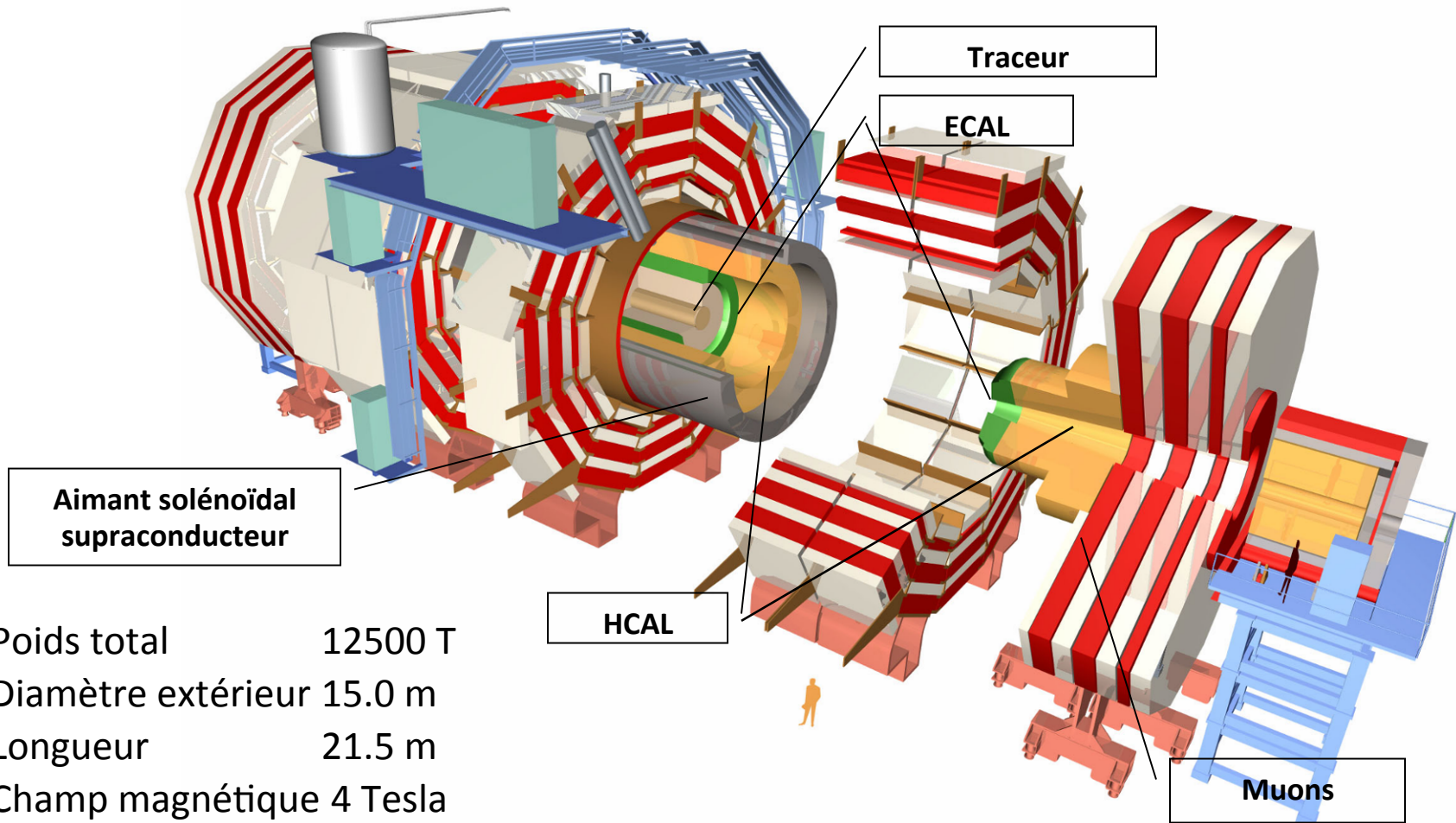
Forte implication des services techniques (et budgetaires):

G.Adroit, M.Arnault, M.Boyer, J.Ch.Barriere, J.Belorgey, G.Besnard, T.Chaminade, M.Chalifour, F.Chateau, O.Cloue, X.Delabroise, E.Delagnes, B.Duboue, D.Durant, F.Desages, D.Desforge, B.Duboue, M.Fontaine, A.Formica, V.Gautard, P.Girolamo, A.Gongadze, P.Graffin, P.Hardy, J.Heitzmann, M.Humeau, D.Jourde, R.Leboeuf, A.LeCoguie, T.Lerch, J.F.Millot, JP.Mols, J.Noury, P.Pailler, J.Pascual, E.Pasquetto, Y.Penichot, P.Perrin, D.Pierrepoint, D.Pomarede, P.Ponsot, S.Portier, G.Prono, Y.Reinert, P.Sizun, J.P.Taguet et de nombreux autres !!!

A.Dael, P.Vedrine, Z.Sun, H.Desportes, Y.Pabot, J.M.Base, + l' équipe du SACM

Un grand merci a tout le staff technique pour le travail remarquable !!

Le détecteur CMS



Poids total 12500 T
Diamètre extérieur 15.0 m
Longueur 21.5 m
Champ magnétique 4 Tesla

La collaboration CMS





Le groupe CMS à l'IRFU

Composition actuelle:

- 16 physiciens:** *M. Besançon, F. Couderc, M. Déjardin, D. Denegri, B. Fabbro, J.L. Faure, F. Ferri, S. Ganjour, A. Givernaud, P. Gras, G. Hamel de Monchenault, P. Jarry, E. Locci, J. Malclès, A. Rosowsky, M. Titov*
- 3 doctorants:** *S. Choudhury, J. Neveu, T. Hennequin*
- 2 postdocs:** *I. Tecker, A. Nayak*

Dans le passé:

- Forte implication du SEDI à la construction:** *M. Anfreville, J.-P. Bard, D. Bésin, M. Boyer, C. Bouchand, C. Coquelet, M. Géléoc, O. Gachelin, A. Gomes, P. Gras, C. Jeanney, A. Joudon, I. Mandjavidze, Y. Penichot, D. Pierrepont (antenne), J.-M. Reymond, J. Rolequin, J. Tartas, P. Venault, Sun Zhihong (SIS)*
- Physiciens du SPP:** *F.-X. Gentil, M.-C. Lemaire, J.-P. Pansart, J. Rander, P. Verrecchia*

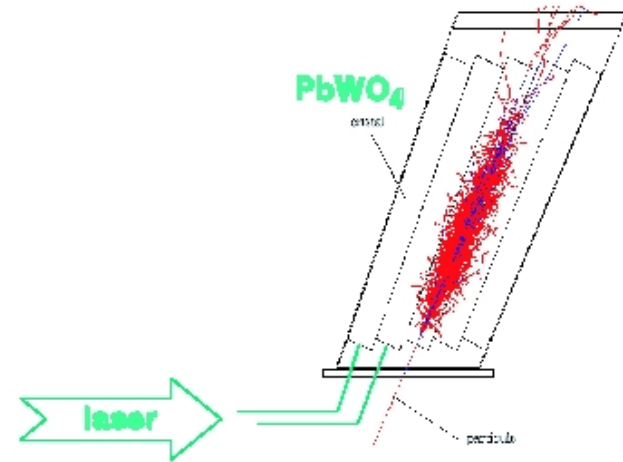
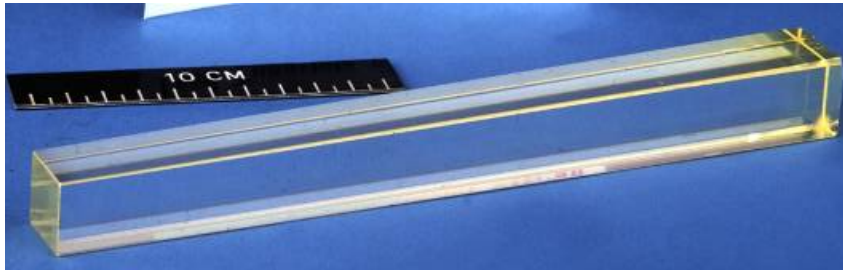
Contributions majeures au détecteur:

- ❑ **Design:** Forte participation au design de l'expérience, R&D sur les cristaux, design du calorimètre électromagnétique, avant de convaincre les ingénieurs de la faisabilité des projets
- ❑ **Solénoïde:** IRFU à l'origine de la conception de ce solénoïde supraconducteur, le plus grand jamais réalisé
- ❑ **Calorimètre électromagnétique:**
 - Electronique de lecture selective
 - Monitoring par LASER: **crucial pour la recherche du Higgs en deux photons**

Contribution aux analyses liées au boson de Higgs:

- ❑ **H en deux photons**
- ❑ **H en deux τ**

Le calorimètre de CMS: ECAL



Le calorimètre (cristaux+photodetecteurs) mesure l'énergie des électrons et photons:

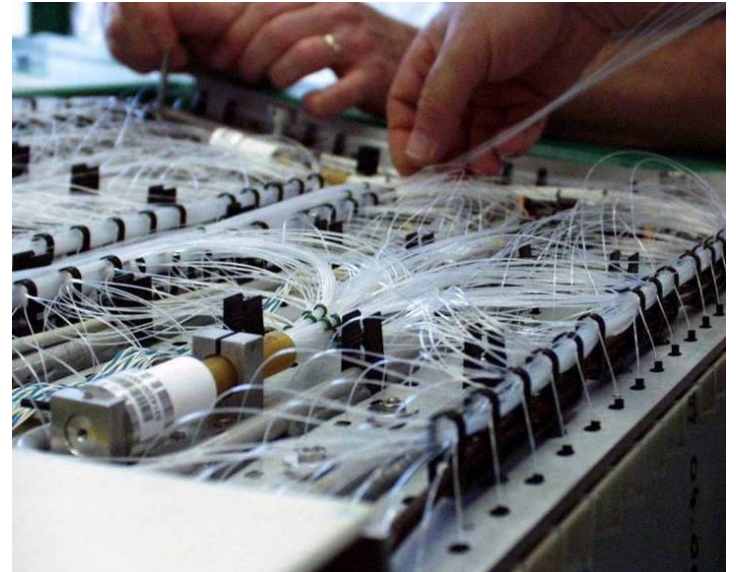
- Lorsqu'un photon ou un électron arrive dans un cristal, une suite d'interactions électromagnétiques transforme toute son énergie en lumière visible
- On recueille cette lumière et en déduit son énergie initiale

- ❑ **Problème:** après irradiation (quand des collisions ont lieu), les cristaux perdent de la transparence à cette lumière visible, et l'énergie est sous estimée donc mal mesurée
- ❑ **Solution:** le système de monitoring LASER conçu par saclay

Le système de monitoringage LASER

Principe simplifié:

- On envoie des impulsions lasers connues dans tous les cristaux (≈ 80000) toutes les 30 minutes via un système de fibres optiques
- On mesure la perte de réponse de chaque cristal avec la réponse mesurée à ces impulsions
- On corrige l'énergie au fur et à mesure cristal par cristal pour les événements de collision



Le système de monitoring LASER

CMS saclay a conçu et mis en place ce système et s'occupe de tous les calculs nécessaires en temps réel pour corriger l'énergie.

Cette correction est cruciale pour la recherche du Higgs en deux photons.

Données
2012

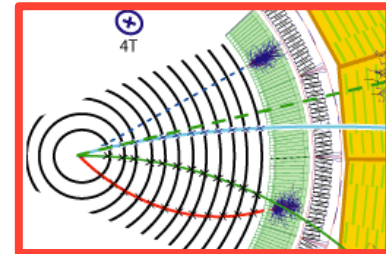
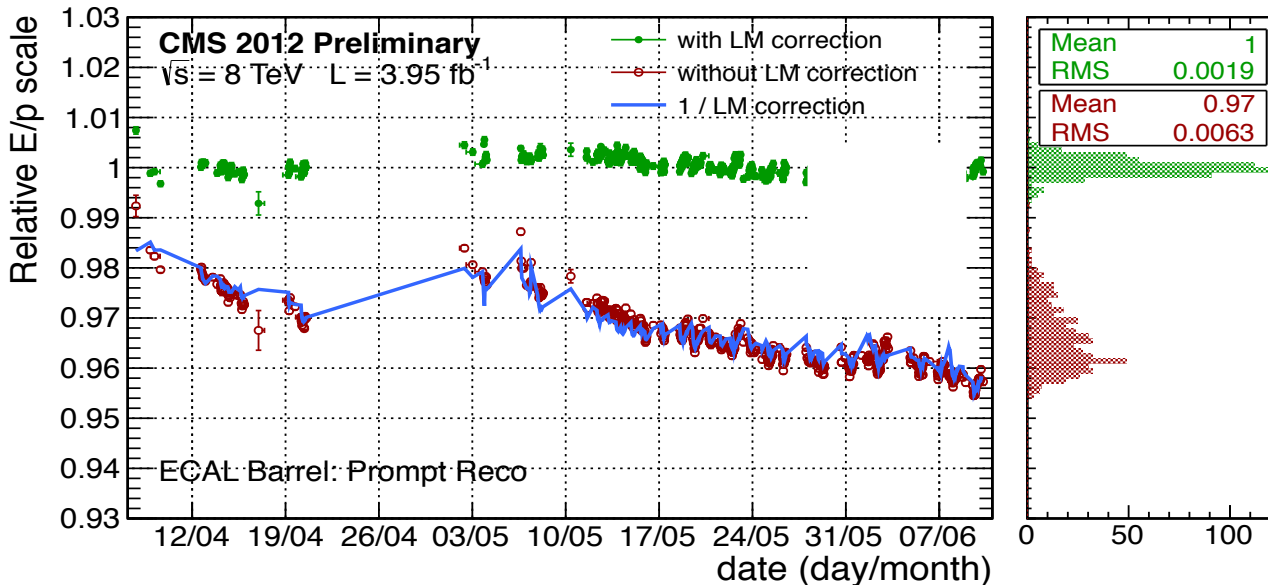


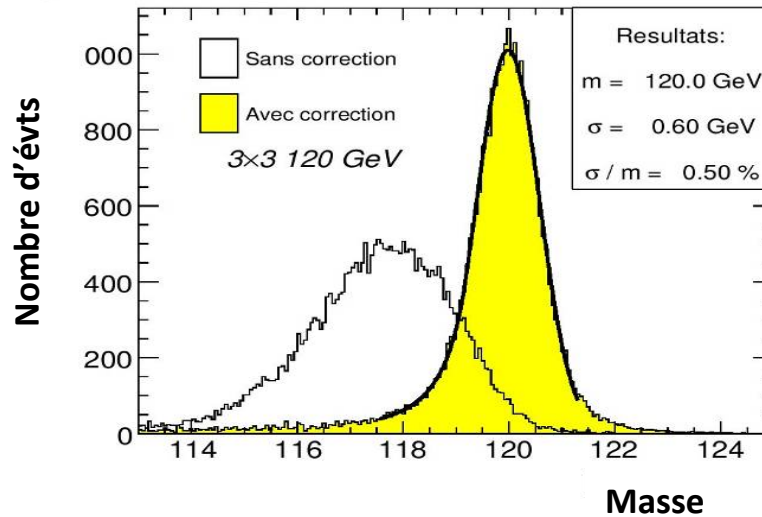
Illustration que ça fonctionne: rapport entre l'énergie mesurée dans ECAL et dans le trajectographe en fonction du temps pour des électrons avant et après correction

Le système de monitoring LASER

CMS saclay a conçu et mis en place ce système et s'occupe de tous les calculs nécessaires en temps réel pour corriger l'énergie.

Cette correction est cruciale pour la recherche du Higgs en deux photons.

Simulation



Masse du Higgs: précision accrue après correction



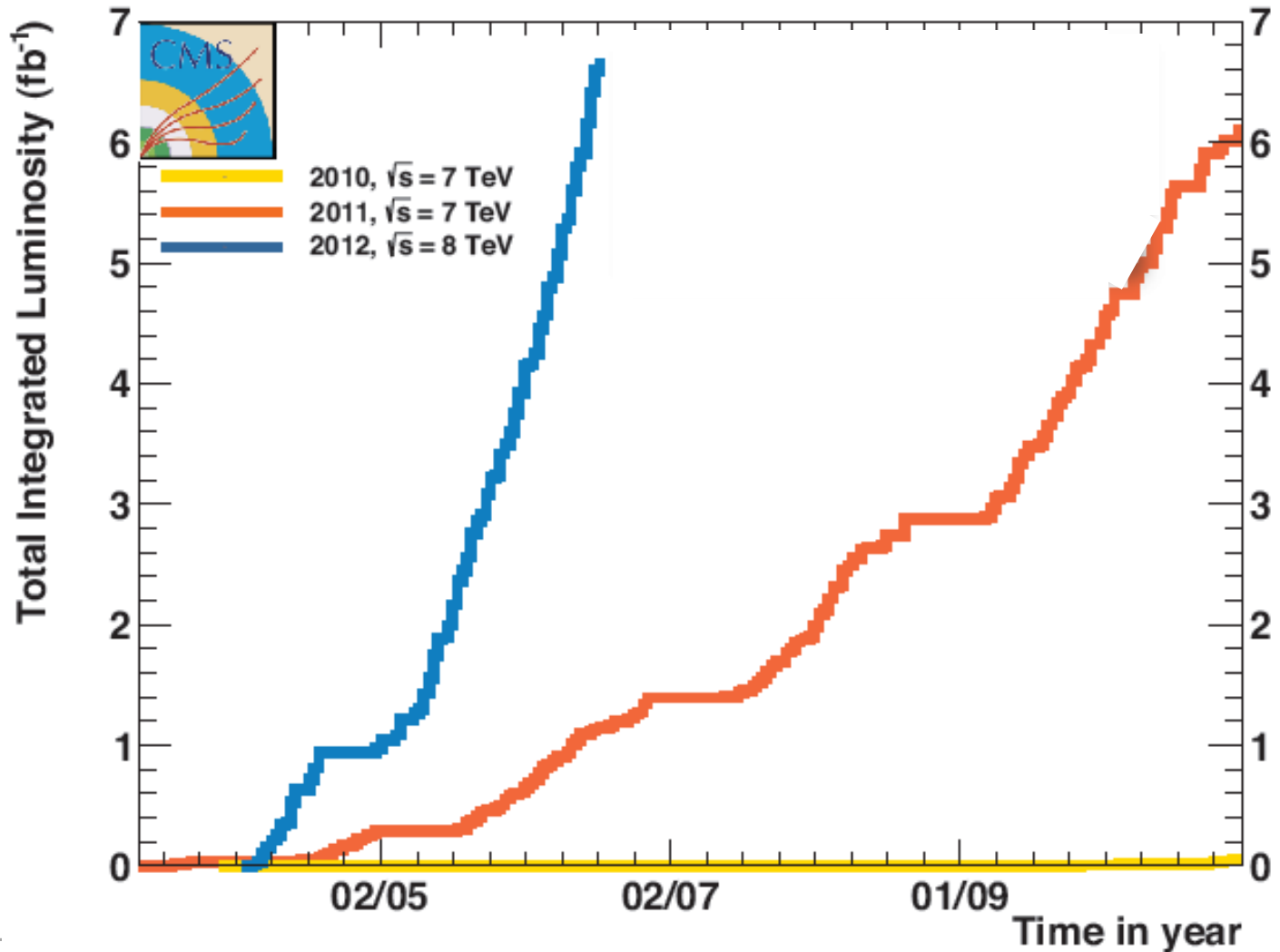
Les prises de données en 2011 et 2012

- Incident de septembre 2008 => énergie (\sqrt{s}) ramenée de 14 TeV a 7 TeV puis remontée a 8 TeV en 2012
 - Premières collisions proton-proton fin 2009 (a 900 GeV puis a 2.2 TeV)
 - Premières collisions a 7 TeV en mars 2010
-
- Ce que j'ai écrit dans une présentation de novembre 2010:

La possibilité d'étendre le run pp à 7 ou 8 TeV en 2012 jusqu'à accumuler 4 à 5 fb⁻¹ par expérience est sérieusement envisagée.

Premier élément de réponse après le meeting de Chamonix en janvier 2011

Les prises de données en 2011 et 2012



Les prises de données en 2011 et 2012

Principale difficulté: le taux de collisions

- Croisement de paquets de protons ($>1,5 \cdot 10^{11}p$) chaque 50 ns $\Rightarrow 40 \cdot 10^6$ par seconde
- Plus de 25 interactions proton-protons en moyenne par croisement
 - ✓ Beaucoup de travail nécessaire pour maintenir les performances des détecteurs
- Seulement 400 évènements enregistrés par seconde $\Rightarrow \sim 10^9$ évènements/an
 - ✓ ~ 25 bosons de Higgs ($m_H=125$ GeV) attendus dans le canal $H \rightarrow 4$ leptons sur 2011+2012 (avant analyse)

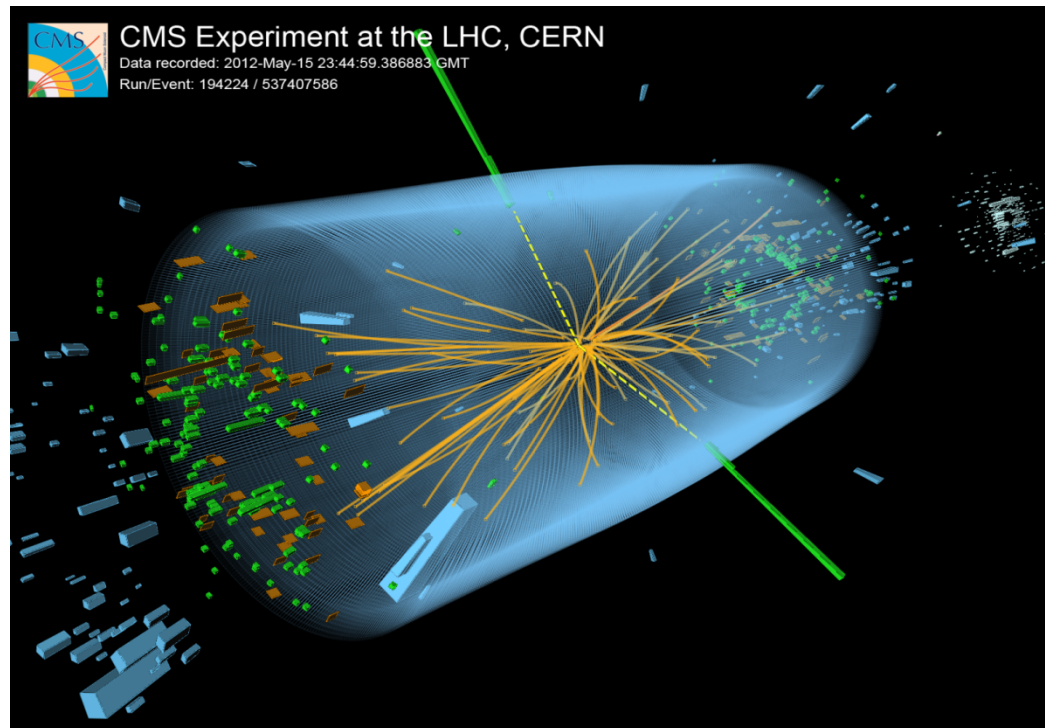


Recherche du boson de Higgs

Les derniers résultats d'ATLAS et CMS:

- Recherche du Higgs se désintégrant en deux photons γ
- Recherche du Higgs se désintégrant en deux bosons Z

On cherche tous les événements avec 2 photons dans le détecteur:



Après cette sélection, il reste beaucoup de bruit de fond!

D'autres processus connus peuvent produire deux photons isolés

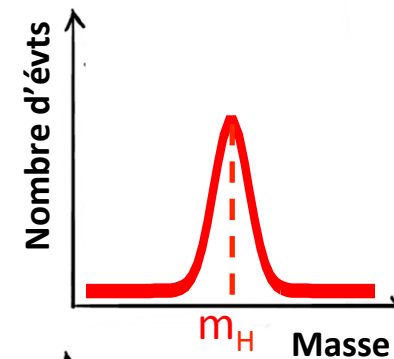
Comment séparer les bruits de fonds restants du boson de Higgs?

Avec la masse diphoton: $m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2} E_1 E_2 [1 - \cos(\theta)]$

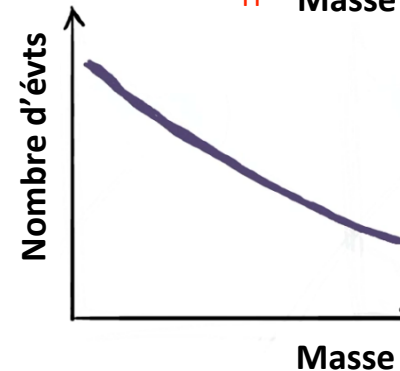
Avec E_1 et E_2 les énergies des photons et θ l'angle entre les photons

➔ Si les deux photons proviennent de la désintégration d'un boson de Higgs, cette masse sera égale à la masse du Higgs

➔ Sinon, cette masse peut prendre des valeurs variées

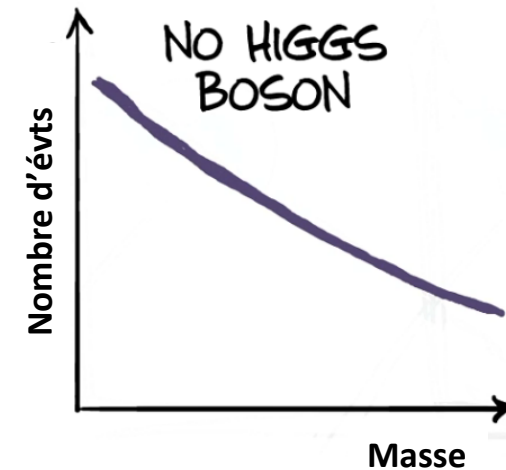
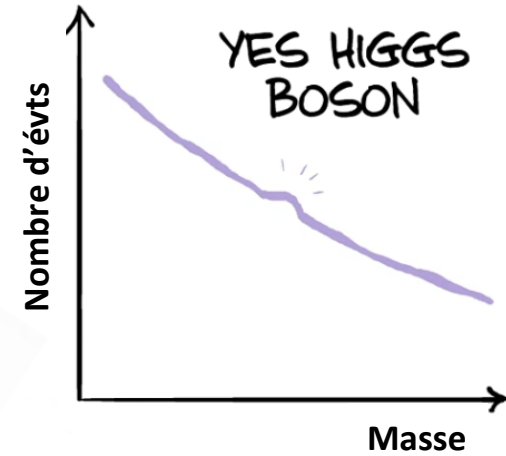
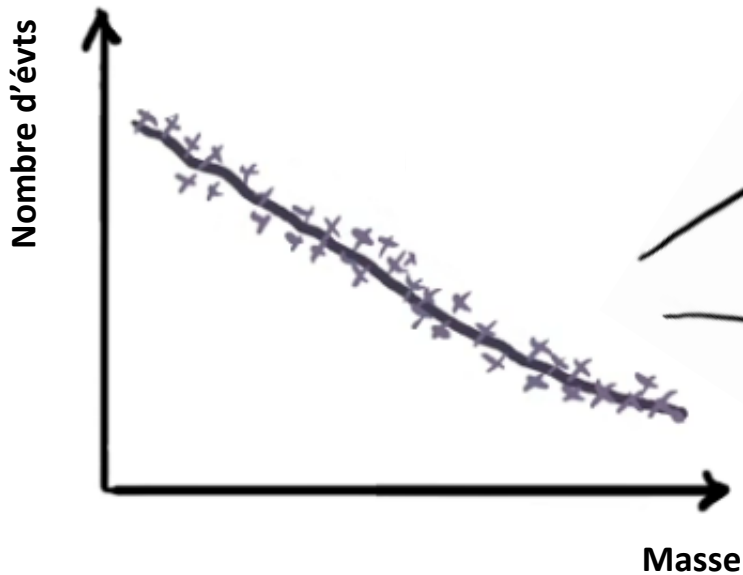


environ 200 événements



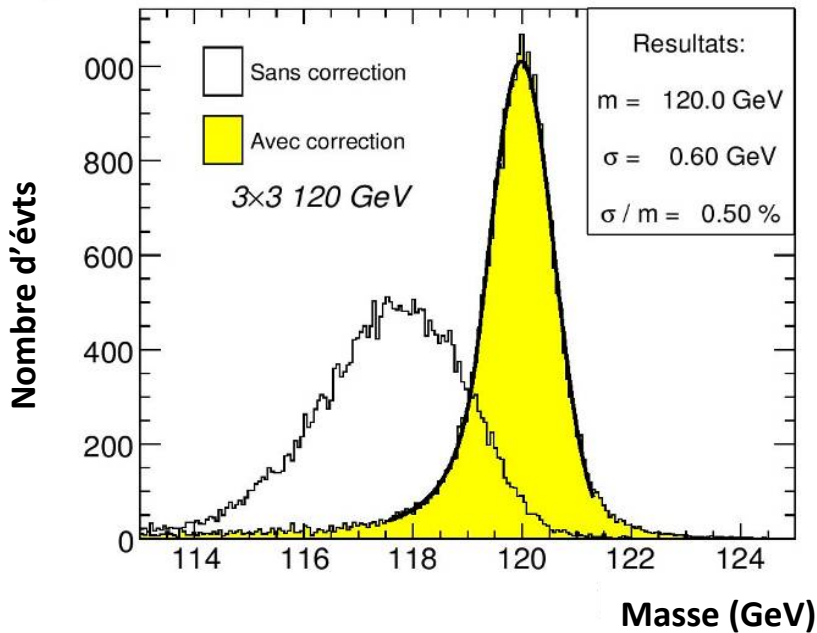
des milliers d'événements

Les données vont ressembler à ça:

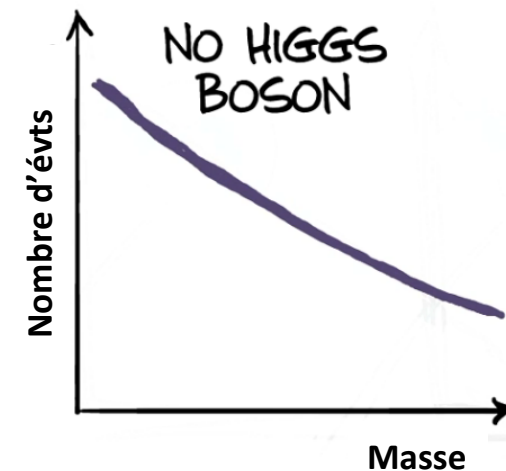
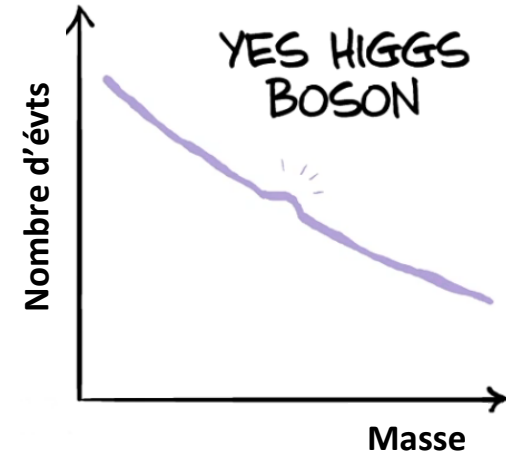


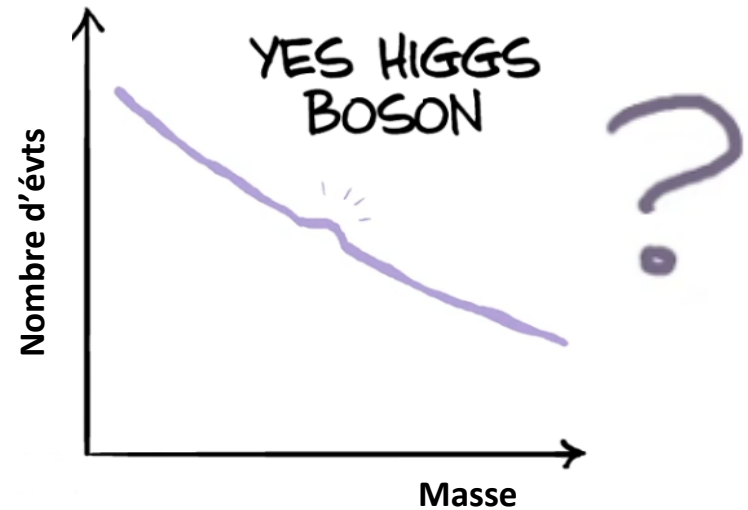
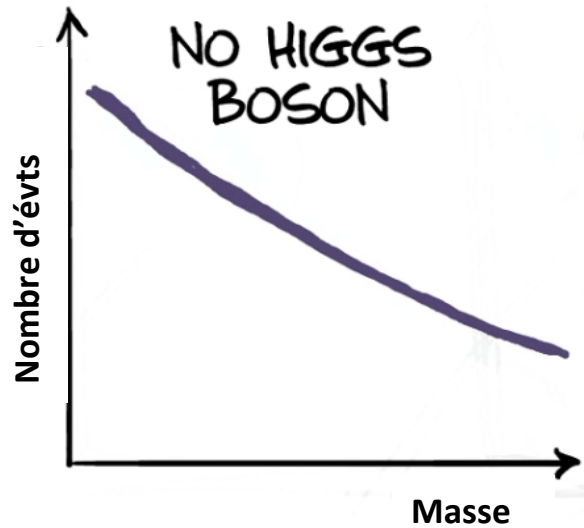
Plus on a de données, plus ce petit pic se voit clairement, car moins grandes sont les fluctuations statistiques du bruit de fond

Plus ce pic est fin, plus il est facile à voir.
La précision de la mesure de l'énergie des photons est cruciale!



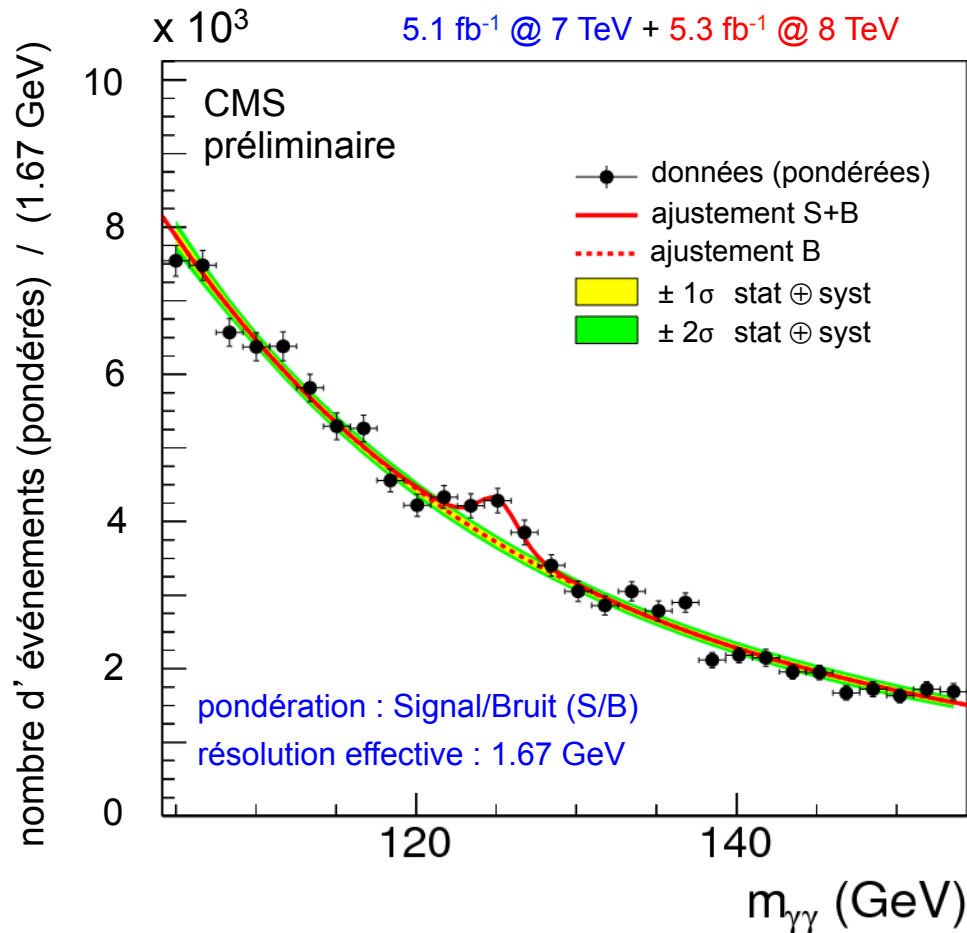
Pic beaucoup plus étroit après la correction de l'énergie par le système de monitoring de saclay.





Suspense...

Les données en 2011 et 2012:



Excès autour de 125 GeV!

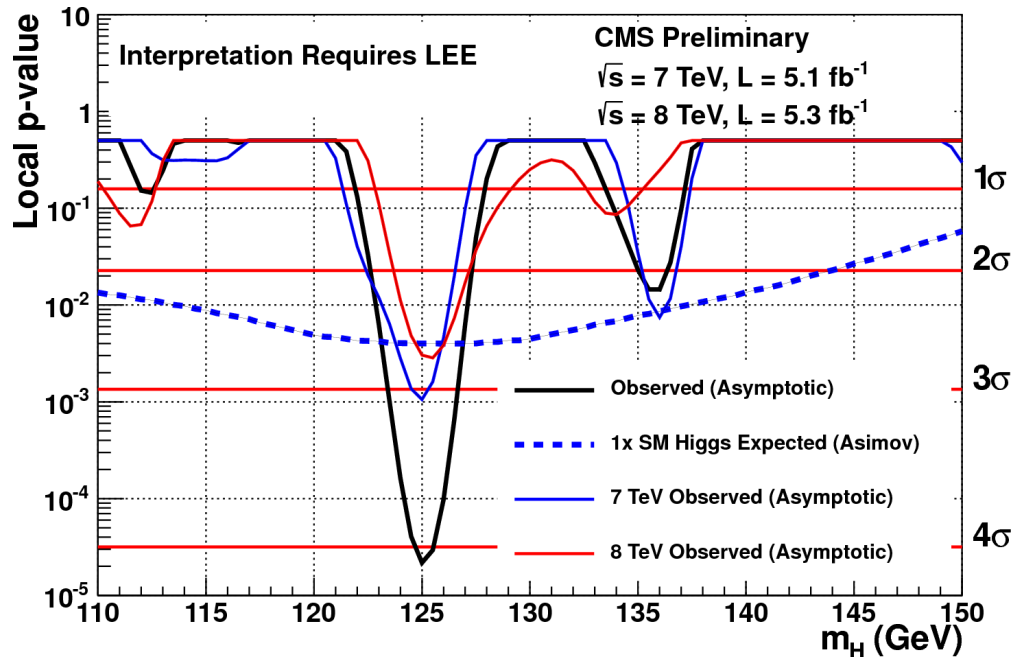
Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 30 sur un million
= 0.00003

(~ 4.1 écarts standard ou
4.1σ)

NB: par convention, on
déclare une découverte à
partir de 5σ soit environ
une probabilité 0.0000003

H en $\gamma\gamma$: CMS

Les données en 2011 et 2012:



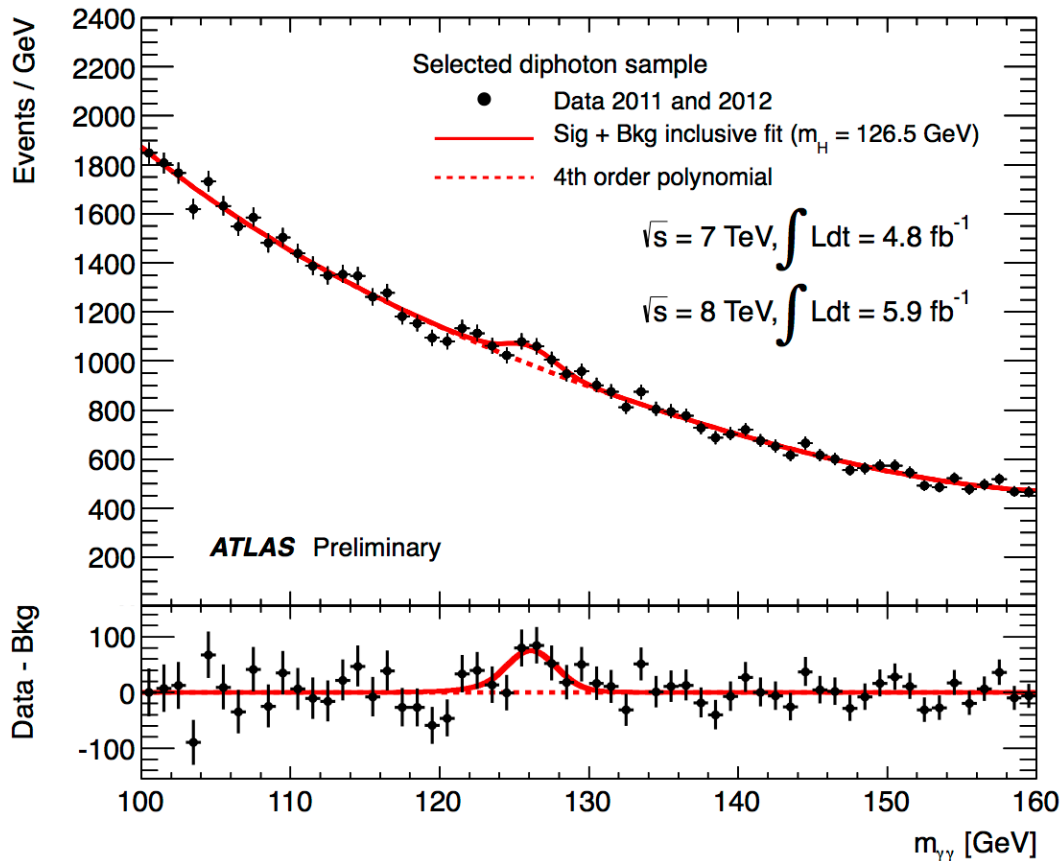
Excès autour de 125 GeV!

Probabilité d'une
 fluctuation du bruit de
 fond: 30 sur un million
 = 0.00003

(~ 4.1 écarts standard ou
 4.1 σ)

NB: par convention, on
 déclare une découverte à
 partir de 5 σ soit environ
 une probabilité 0.0000003

Les données en 2011 et 2012:



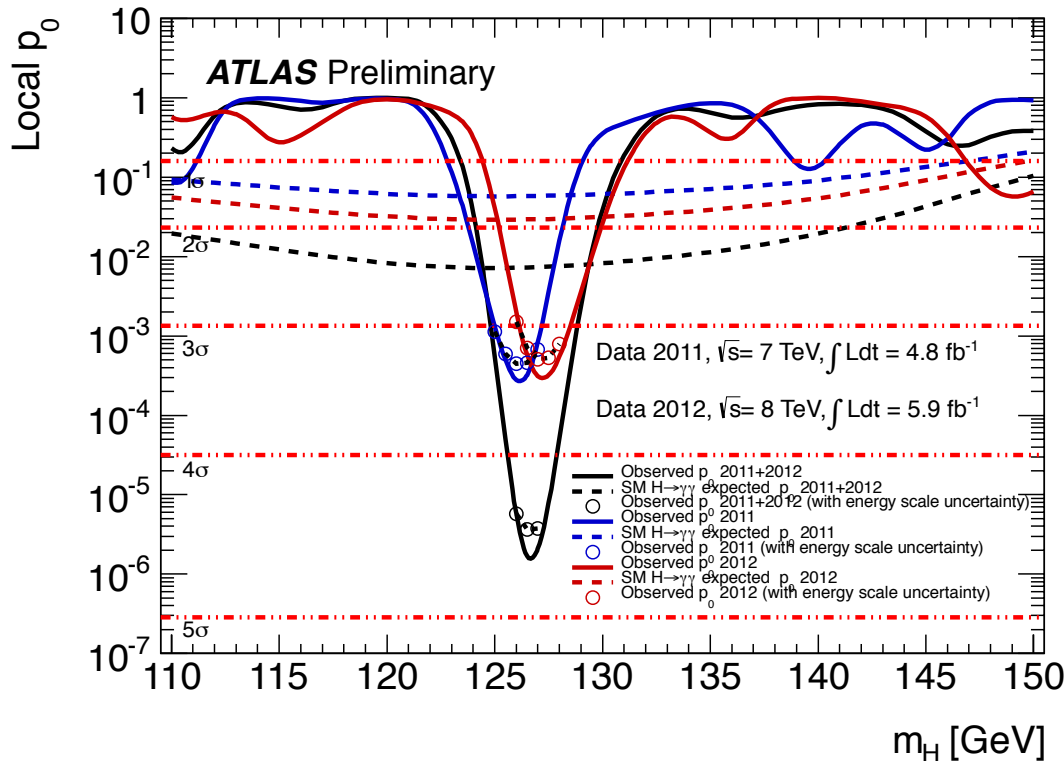
Excès autour de 125 GeV!

Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 2 sur un million
= 0.000002

(~ 4.5 écarts standard ou
 4.5σ)

NB: par convention, on
déclare un découverte à
partir de 5σ soit environ
une probabilité 0.0000003

Les données en 2011 et 2012:



Excès autour de 125 GeV!

Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 2 sur un million
= 0.000002

(~ 4.5 écarts standard ou
4.5 σ)

NB: par convention, on
déclare un découverte à
partir de 5 σ soit environ
une probabilité 0.0000003



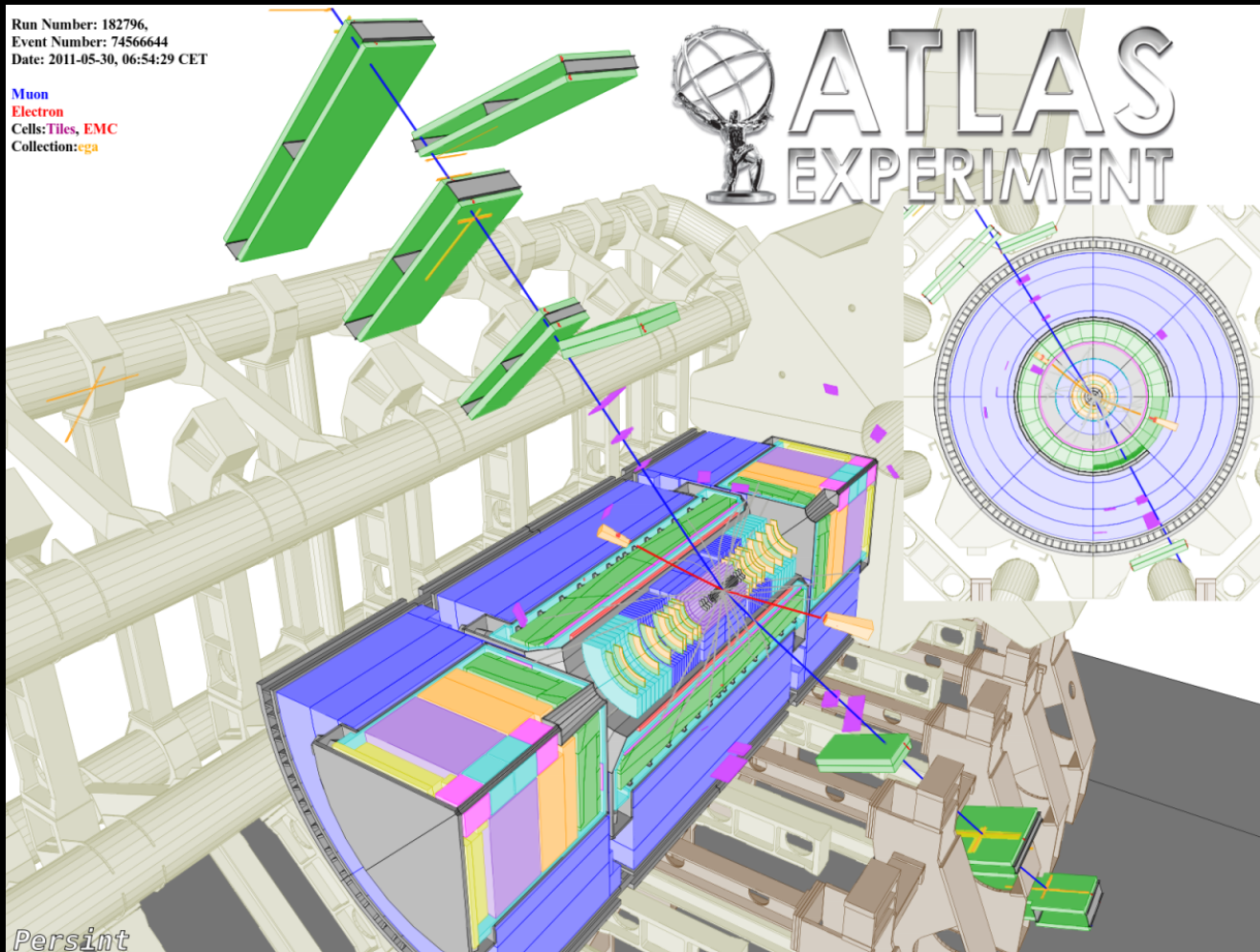
$$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons} (4e, 2e2\mu, 4\mu)$$

Candidat
 $H \rightarrow 2e2\mu$



Run Number: 182796,
Event Number: 74566644
Date: 2011-05-30, 06:54:29 CET

Muon
Electron
Cells: Tiles, EMC
Collection: ega



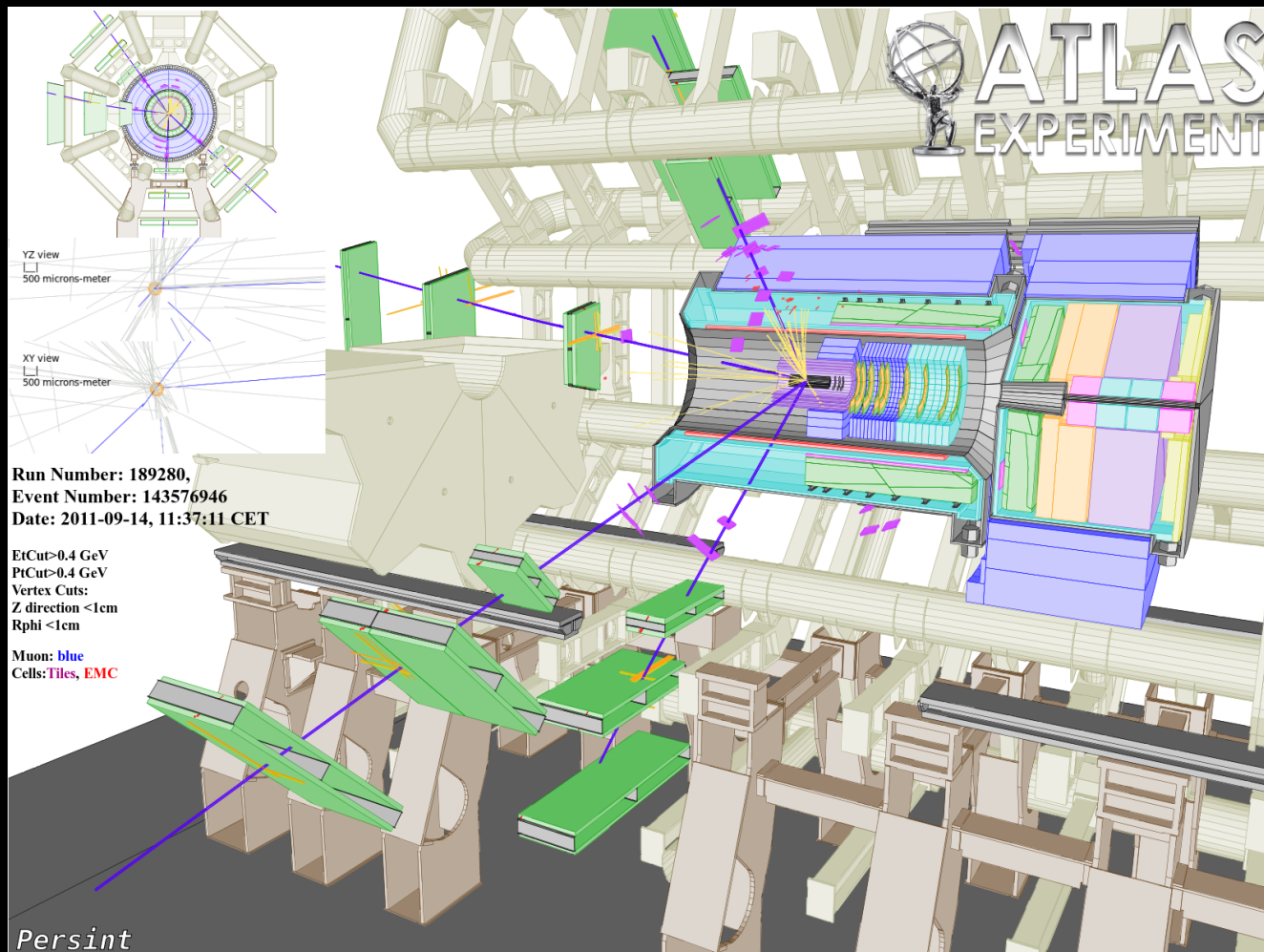
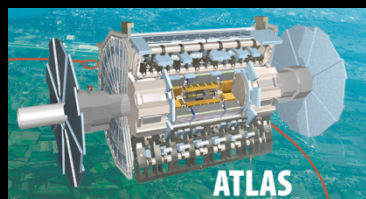


$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons } (4e, 2e2\mu, 4\mu)$

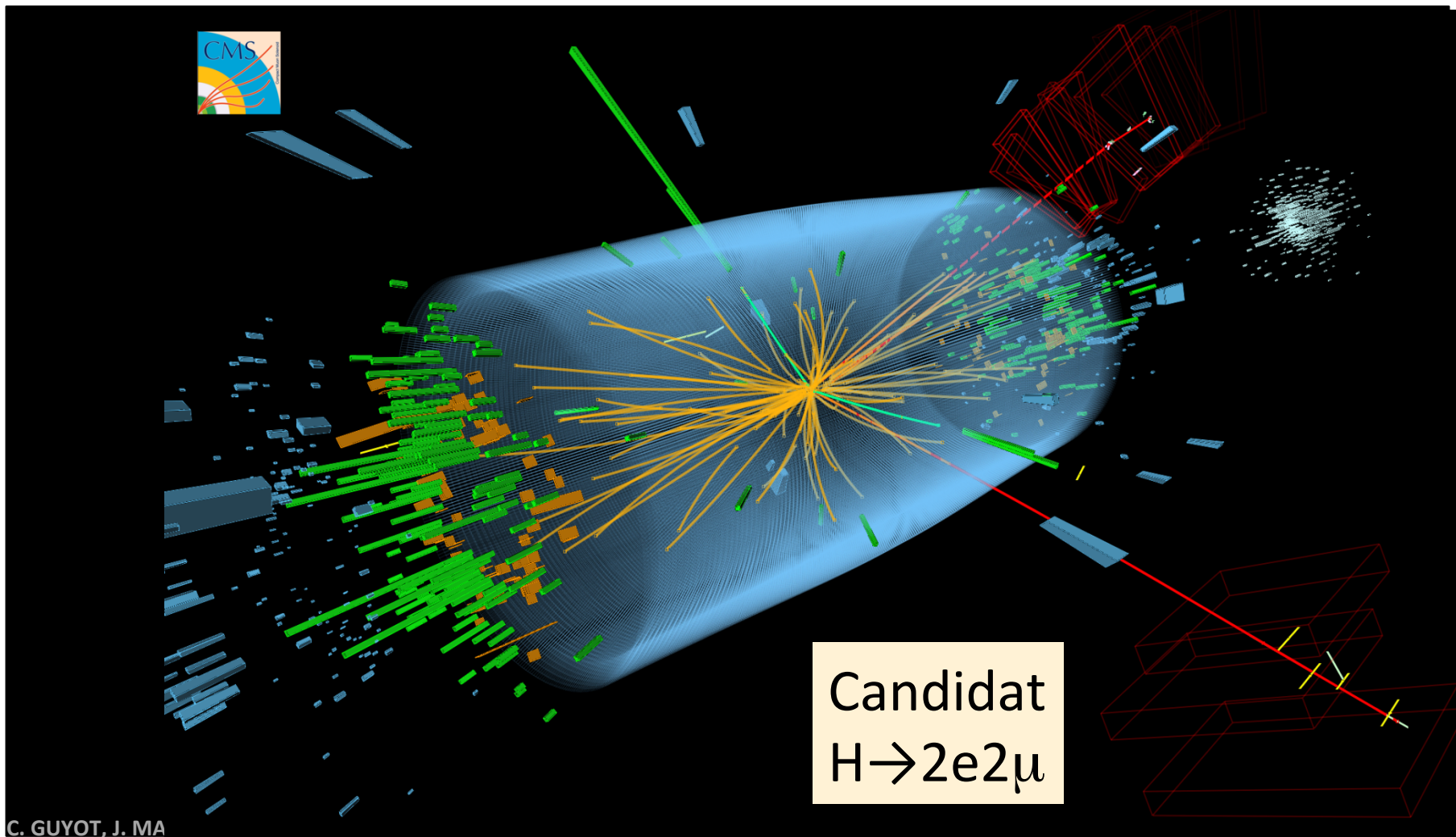
- ❑ Canal utilisable pour $120\text{GeV} < m_H < 600 \text{ GeV}$
 - ❑ A l'opposé du canal en 2γ , faible nombre d'évènement attendus (~ 5 evts pour $m_H = 125 \text{ GeV}$ après coupures d'analyse dans ATLAS), mais avec un très faible bruit de fond (~ 5 evts entre 120 et 130 GeV):
 - **ZZ** (dit irréductible: état final a 4 leptons isoless)
 - **Z+b \bar{b}** (désintégration semi-leptonique des hadrons B)
 - **Z+jets** (jets simulant des leptons)
 - **t \bar{t}** : top-antitop $\rightarrow 2$ leptons + $b\bar{b} \rightarrow 4$ leptons +...
- } Fond dit reductible

$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Candidat
 $H \rightarrow 4\mu$



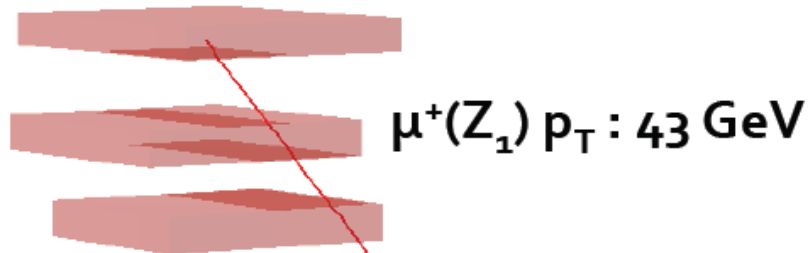
$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$





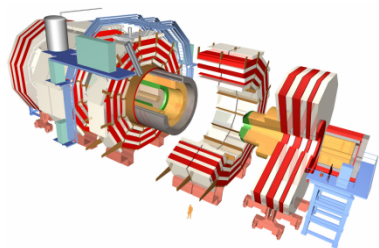
$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Candidat
 $H \rightarrow 2e2\mu$

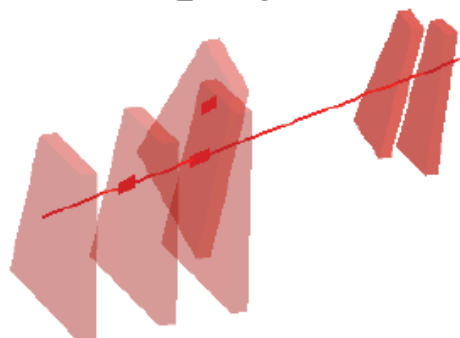


8 TeV DATA

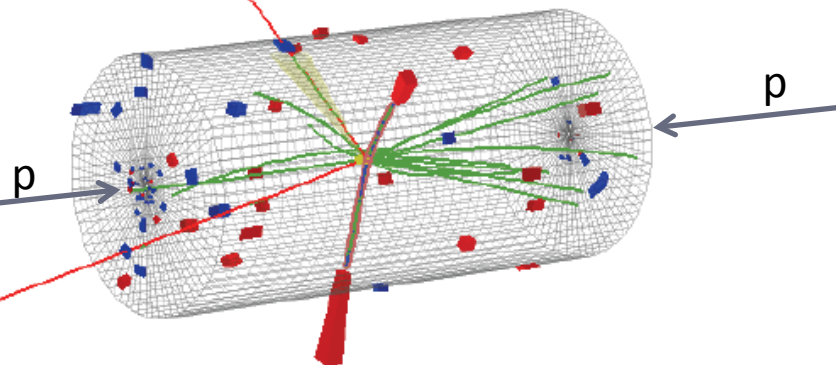
4-lepton Mass : 126.9 GeV



$\mu^-(Z_1) p_T : 24 \text{ GeV}$



$e^-(Z_2) p_T : 10 \text{ GeV}$



$e^+(Z_2) p_T : 21 \text{ GeV}$

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST
Run/Event: 195099 / 137440354
Lumi section: 115



$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

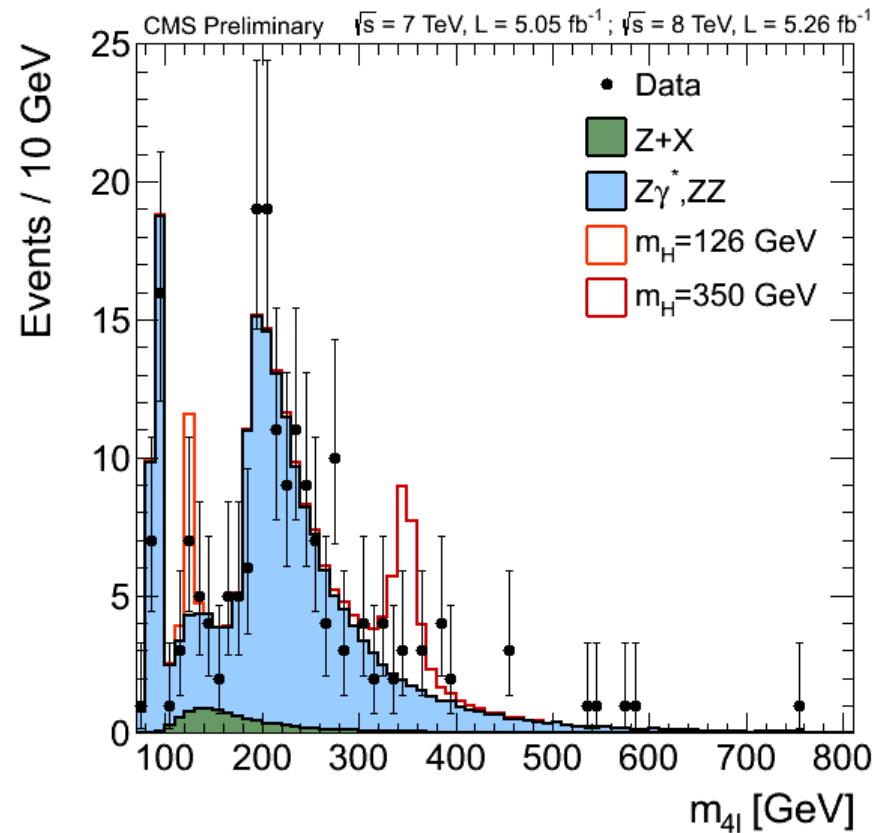
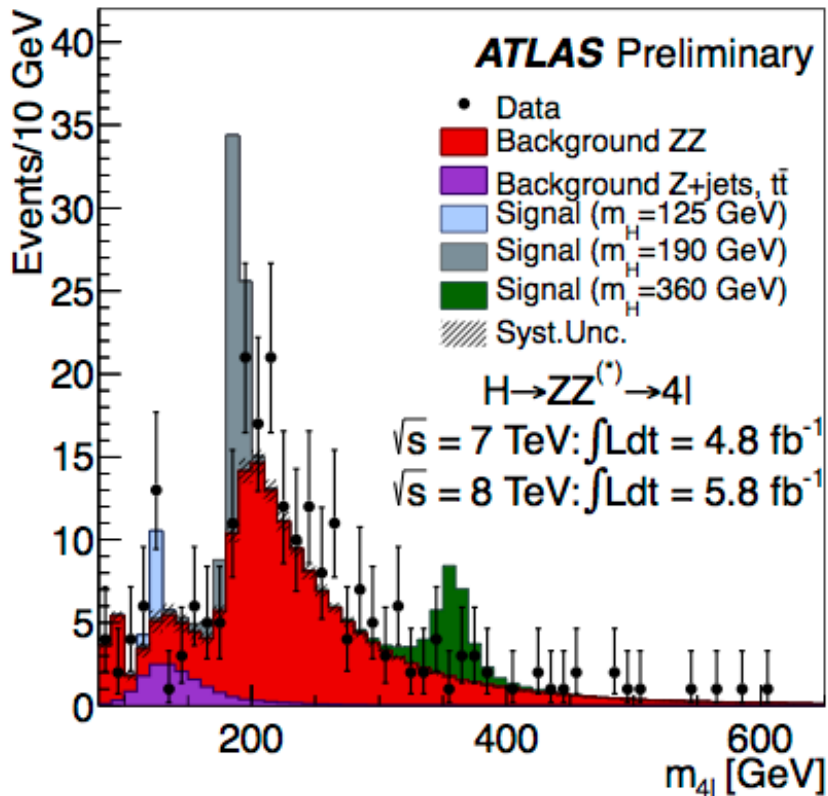
Implication du groupe ATLAS IRFU dans cette analyse :

- ❑ Environ 8 physiciens SPP directement engagés dans la recherche du bosons de Higgs
 - Expertise dans la détection des électrons et des muons suite aux travaux sur les données simulées, sur les données de faisceaux test et avec évènements cosmiques.
 - Optimisation de l'identification des électrons et des muons.
 - Optimisation de la sélection du signal de Higgs et du rapport signa/bruit de fond
 - Estimation à partir des données elles-mêmes du niveau de bruit de fond provenant des canaux $Z+b\bar{b}$, « Z+jets » et « top-antitop ».



$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

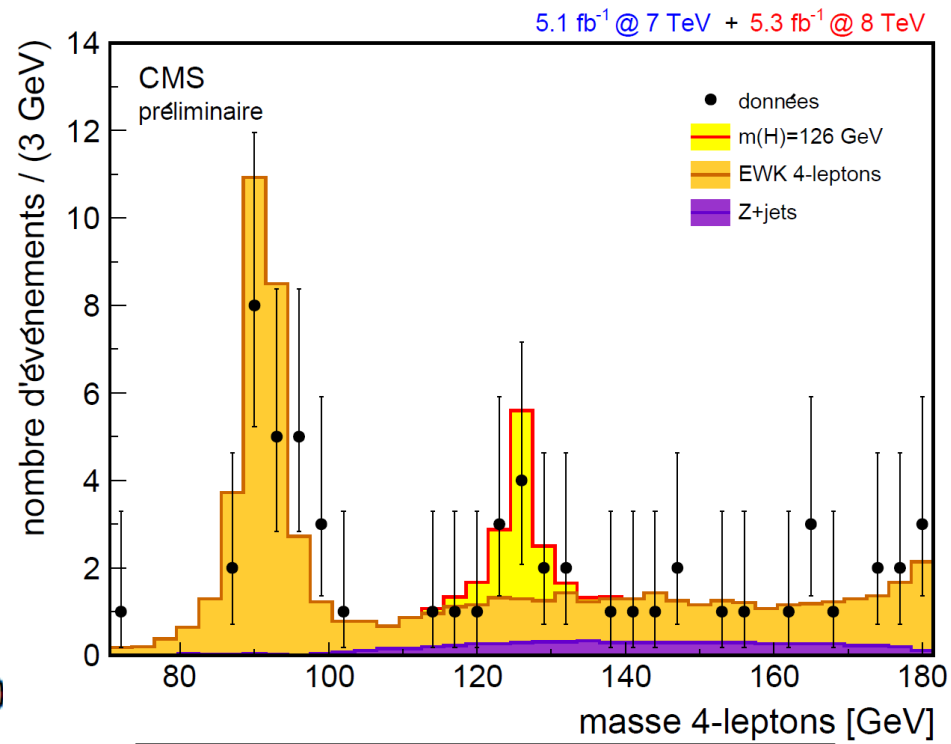
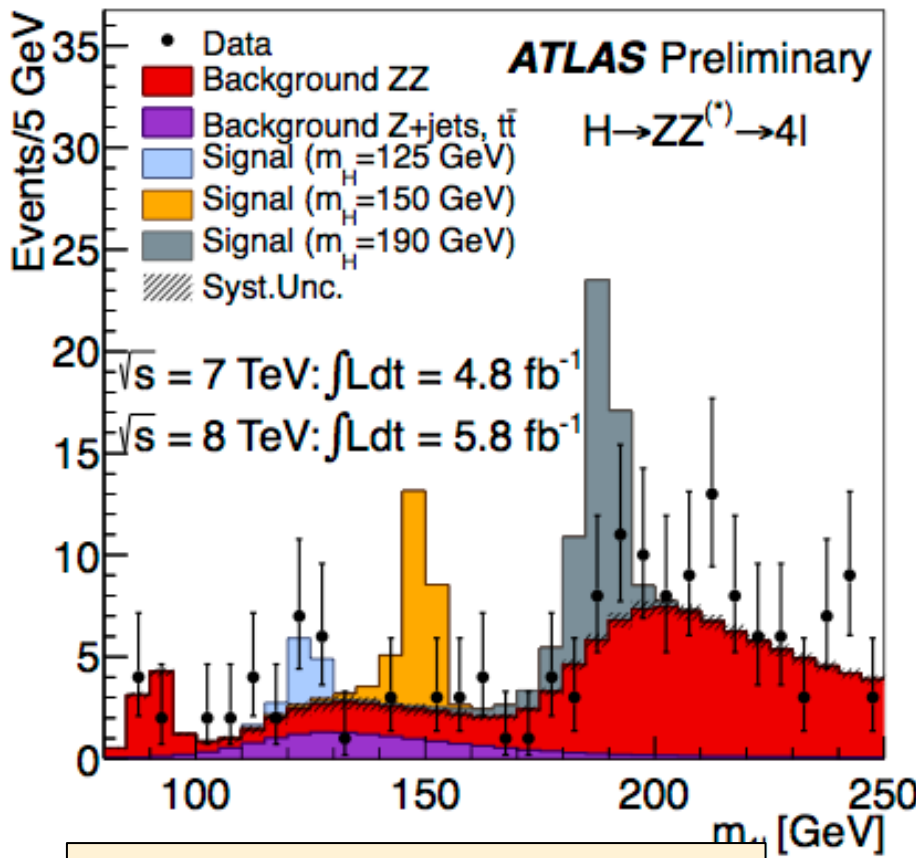
Spectre de masse invariante des 4 leptons





$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

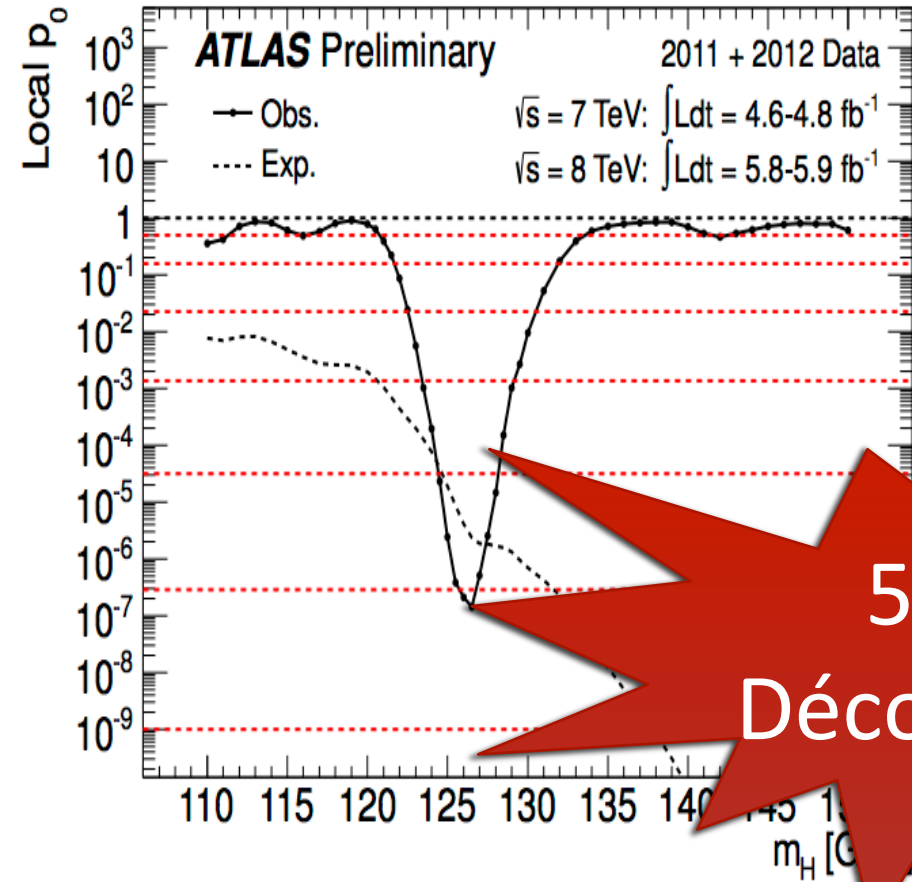
Spectre de masse invariante des 4 leptons (zone a basse masse)



c. Significativité statistique: $3,4\sigma$

Significativité statistique: $3,2\sigma$ 7/2012

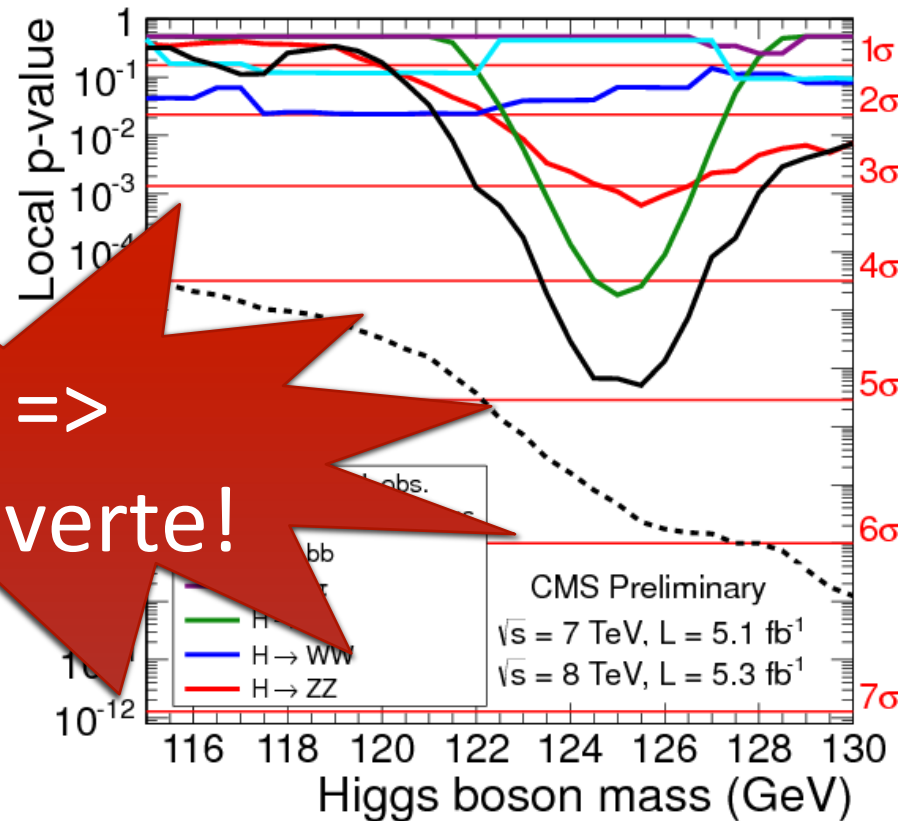
Et en combinant les canaux!



Probabilité que les données soient compatibles avec une fluctuation du bruit de fond

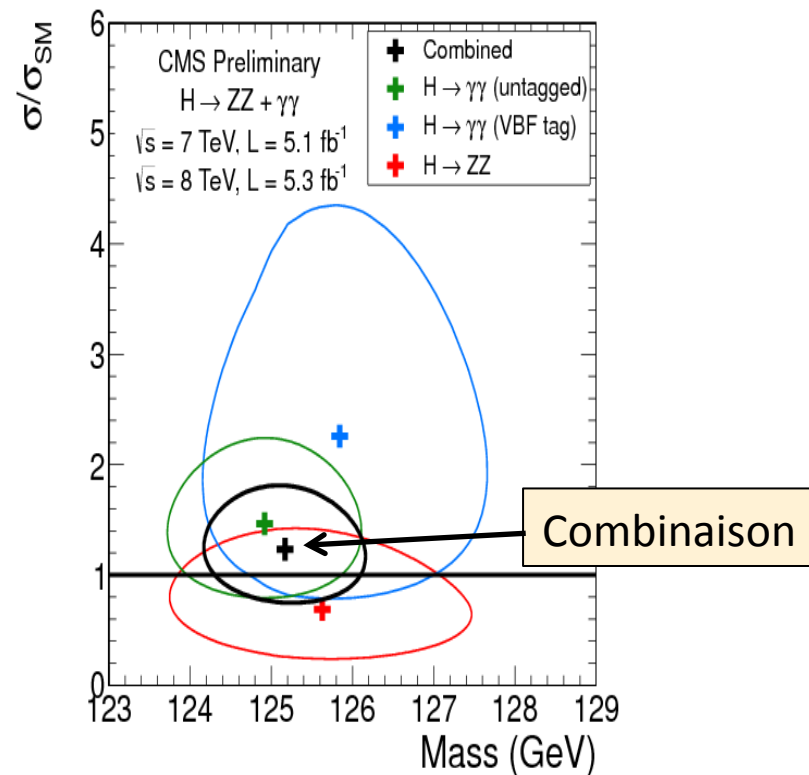
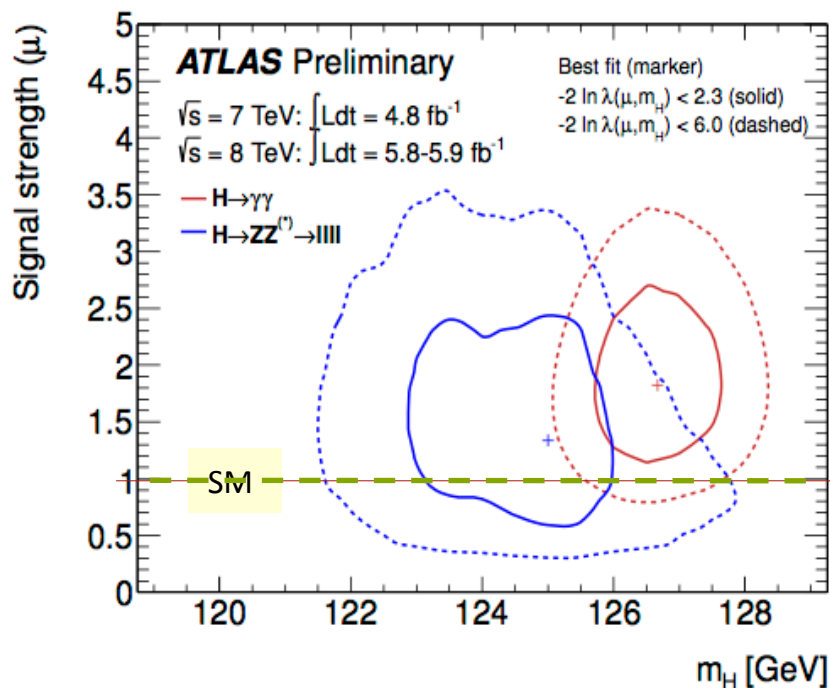
$5\sigma \Rightarrow$

Découverte!



Masse du boson

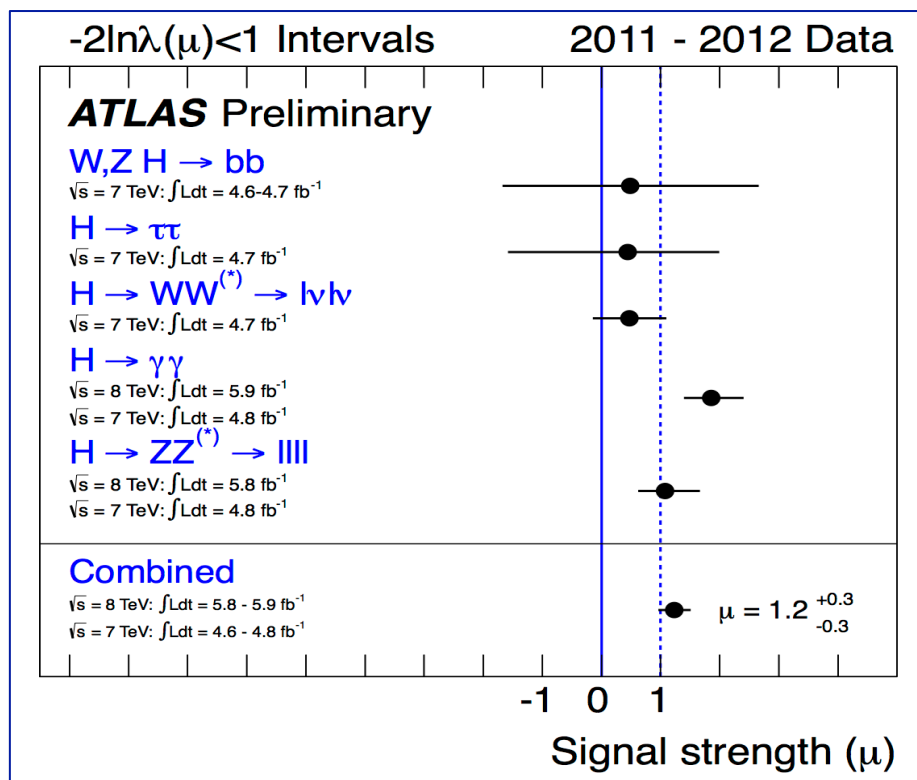
Ajustement combine (par canal de désintégration) de la force du signal et de la masse m_H



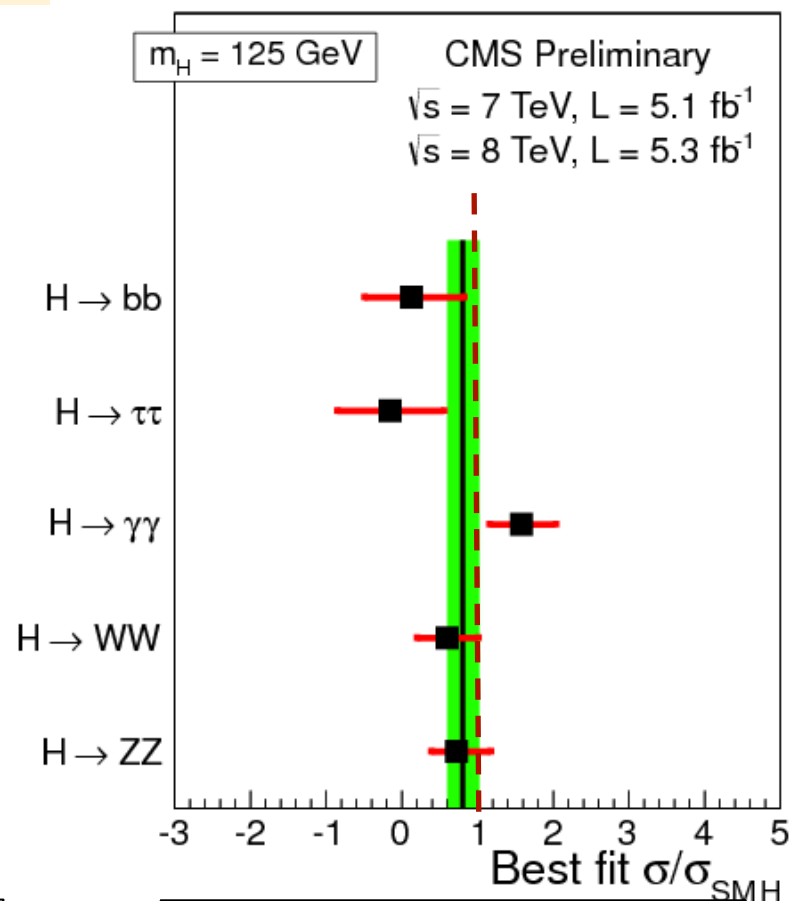
CMS: $m_H = 125,3 \pm 0,6 \text{ GeV}$

Est-ce un boson de Higgs du MS?

ATLAS: données 2011 seulement pour $b\bar{b}$, WW , $\tau\tau$



CMS: données 2011+2012





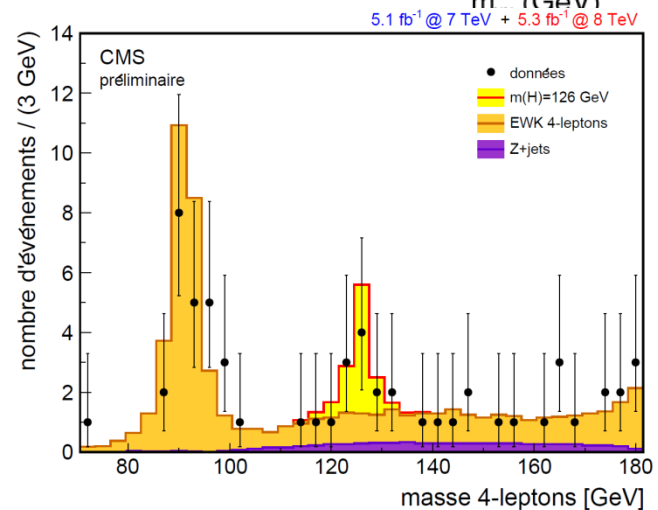
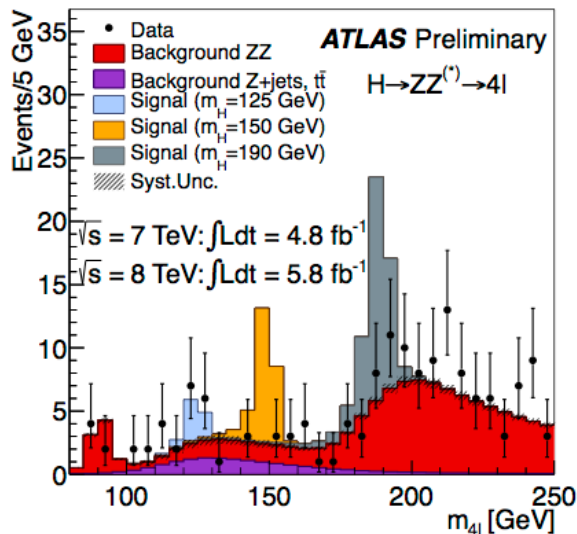
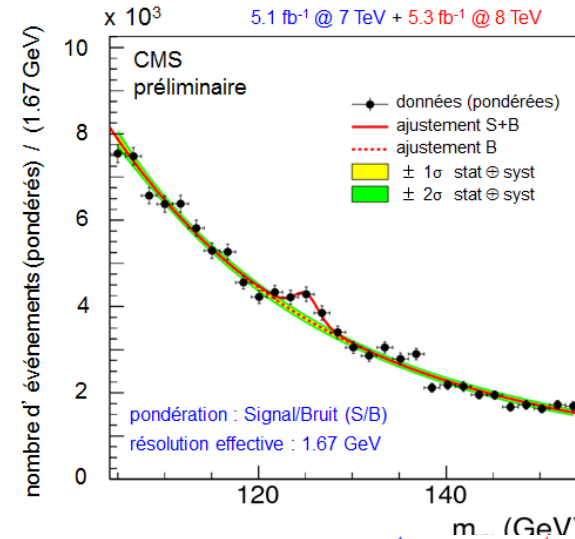
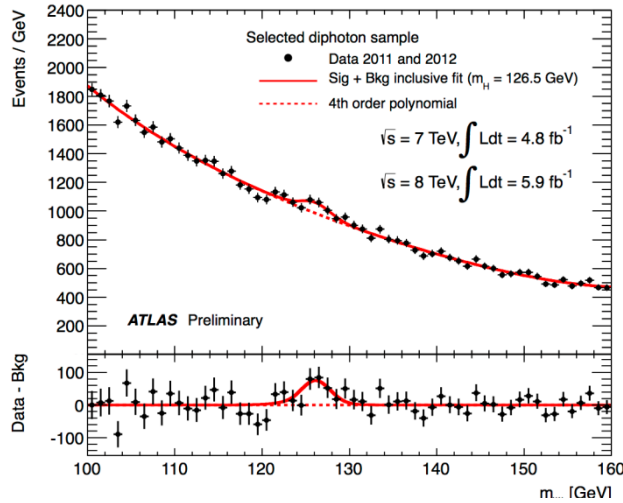
Conclusions et perspectives

- ❑ **Une nouvelle particule d'une masse proche de 125 GeV a été découverte**, dont les propriétés semblent compatibles avec celles du boson de Higgs prédit par le Modèle Standard.
 - La précision des mesures de ses couplages avec les particules du Modèle Standard est encore insuffisante pour affirmer que c'est le boson de Higgs du MS.

Cette découverte ouvre tout un champ de physique au delà du Modèle Standard tant au niveau expérimental qu'au niveau théorique

- Données a 13 TeV a partir de 2015-...
- ❑ Nouvelles pistes ouvertes vers la physique au-delà du MS, en particulier s'il s'avère que ce boson n'est pas un Higgs « standard »
 - Il est possible que d'autres bosons de Higgs existent dans d'autres domaines de masse comme prédit par d'autres théories au-delà du MS (ex: la supersymétrie)

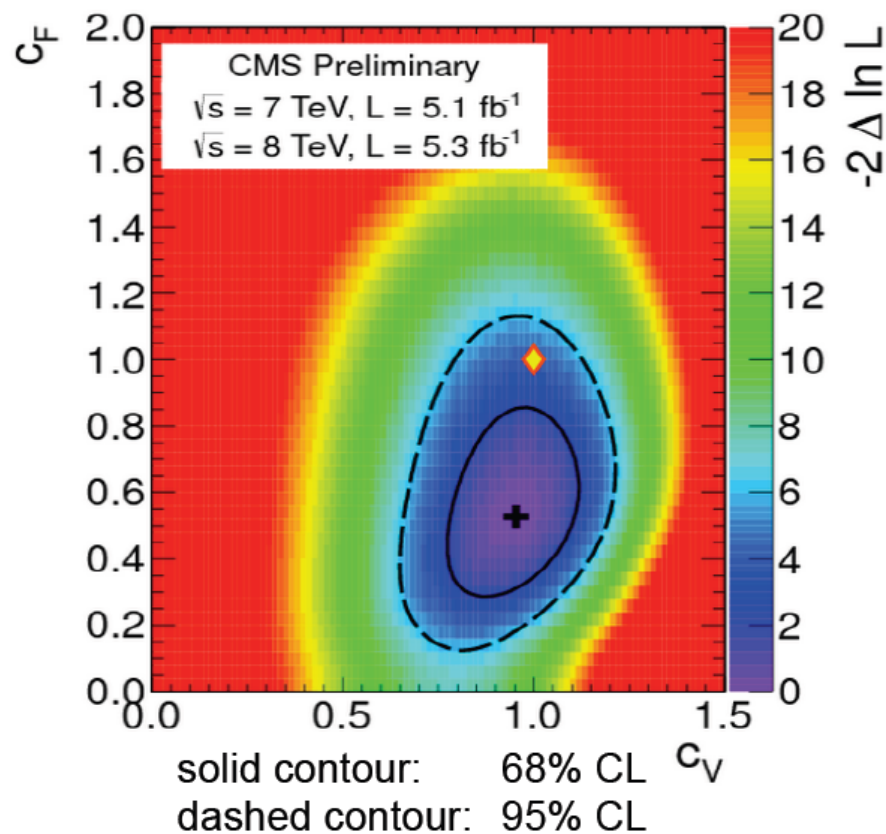
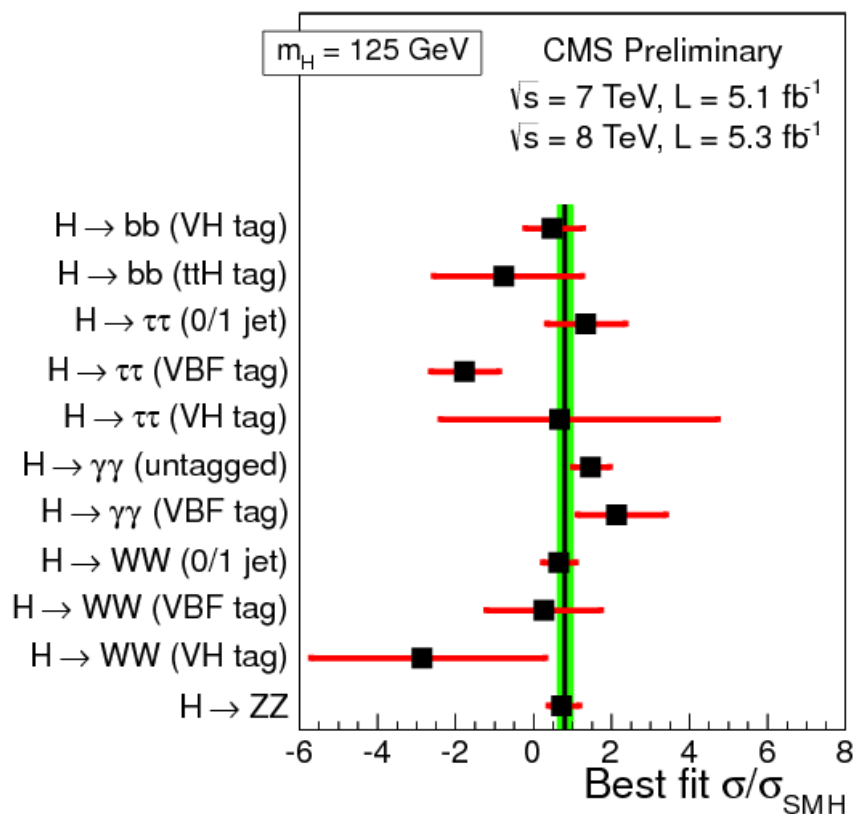
La masse est dite!



EXTRAS

Est-ce un Higgs « Standard »?

Couplages du boson de Higgs aux fermions (C_F) et aux bosons vecteurs (C_V)

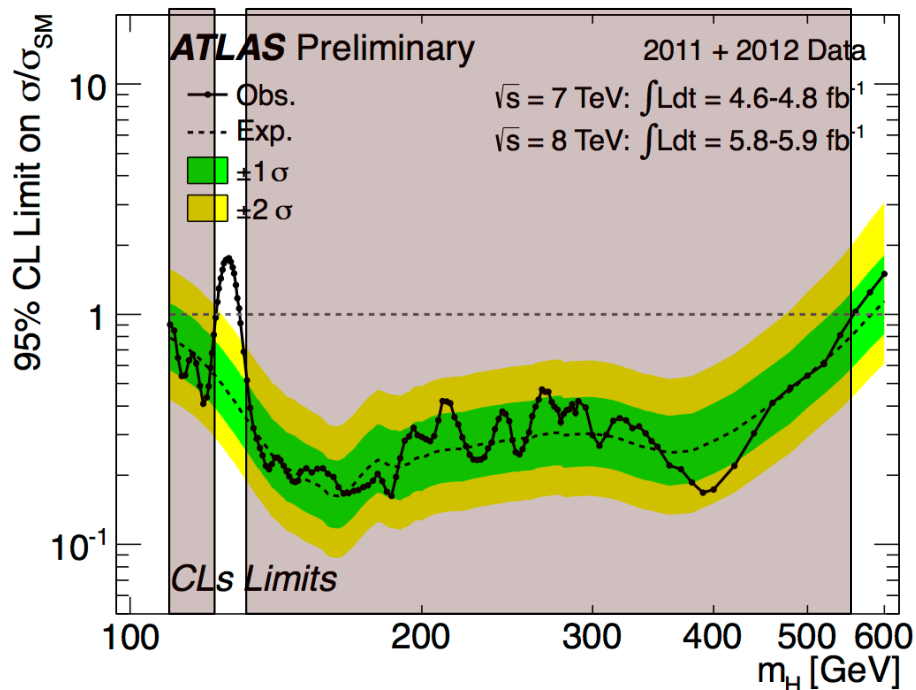




$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Force du signal normalisee au Modele Standard

Meilleur fit pour $m_H = 125 \text{ GeV}$: $\mu = 1.3 \pm 0.6$

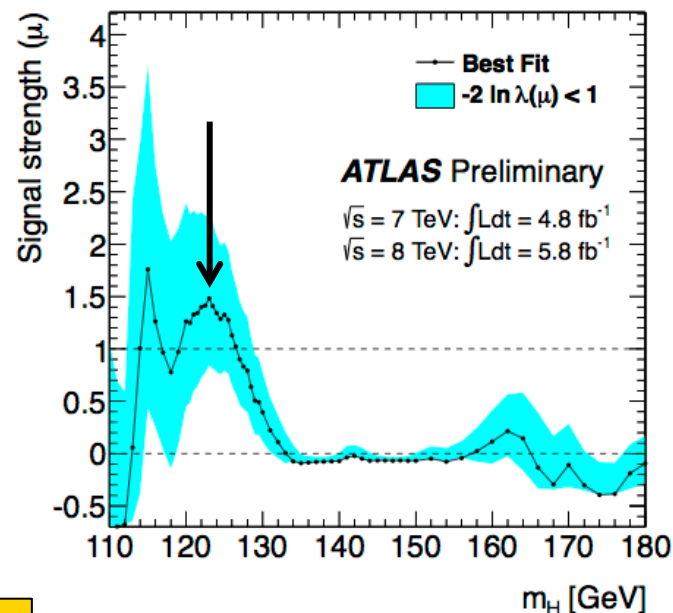


Exclusion a 95% CL

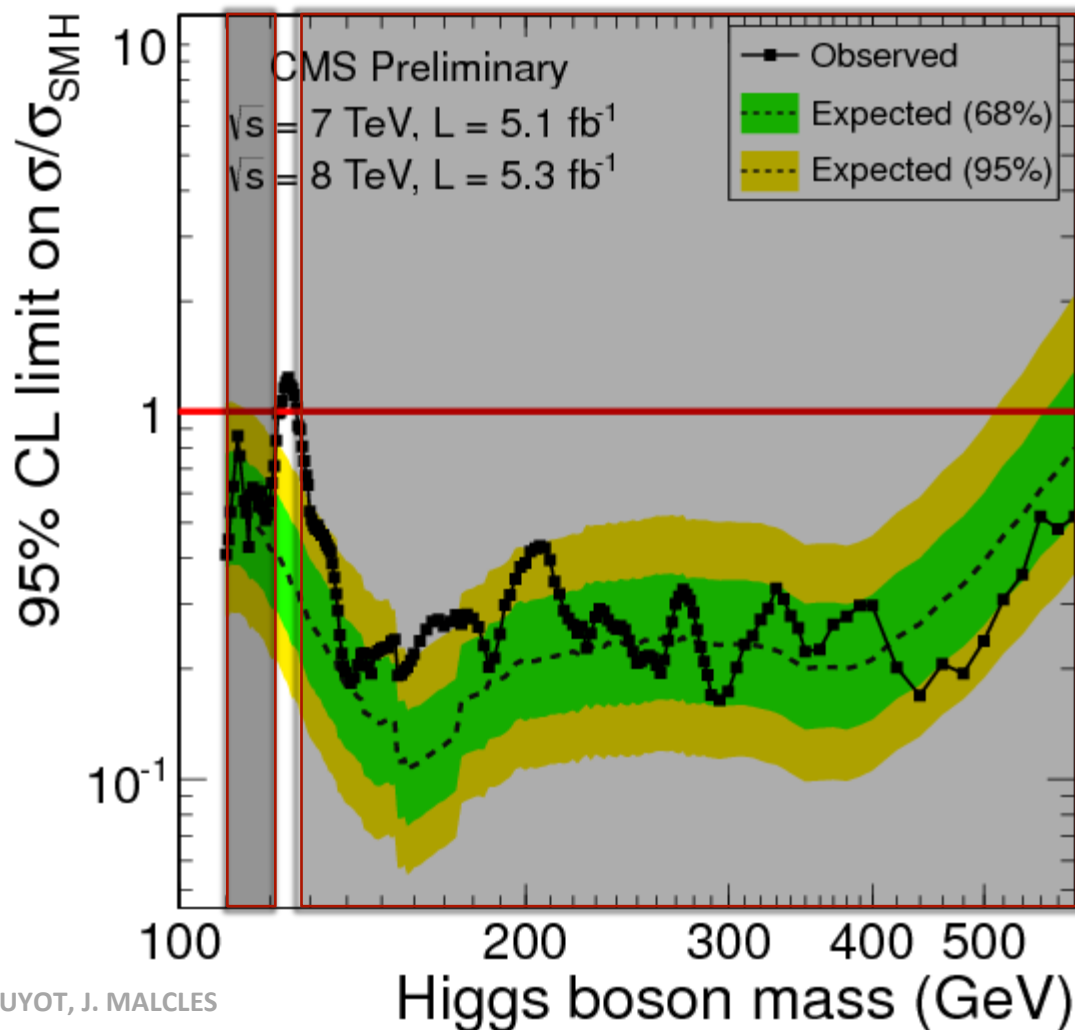
110-122.6 129.7-558 GeV

Exclusion a 99% CL

111.7-121.8 GeV 130.7-523 GeV



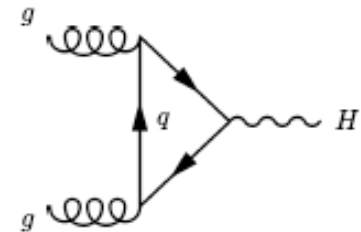
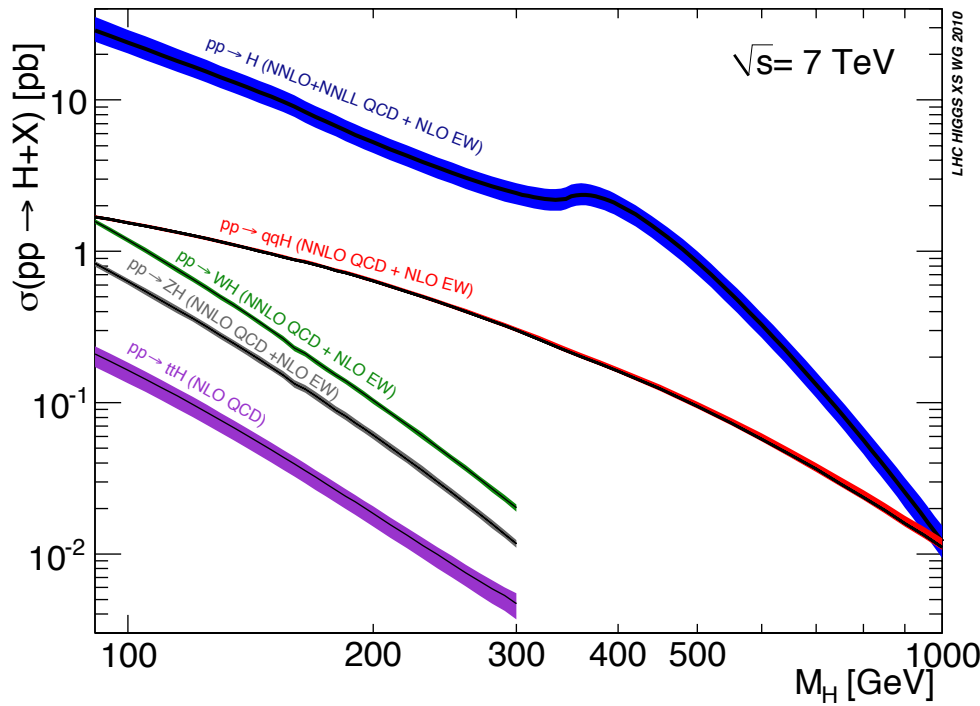
Zones de masse exclues avec tous les canaux de desintegration disponibles



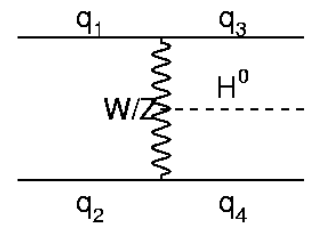
Zones exclues a 95% de niveau de confiance (CL):

110 GeV - 122,5 GeV
 127 GeV - 600 GeV

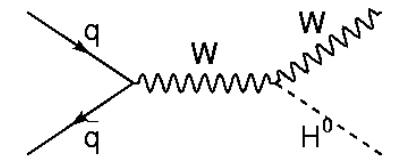
Production au LHC



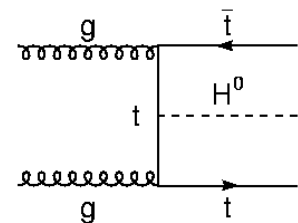
Fusion de gluons



Fusion de bosons vecteurs



Production en association avec un boson W ou Z



Production en association avec une paire tt

➤ **Contributions au détecteur ATLAS**

- Le calorimètre électromagnétique
- Le spectromètre à muons
- Le toroïde

☐ **Contributions au détecteur CMS: le calorimètre électromagnétique**

- Le système de monitoring LASER
- La lecture sélective du calorimètre
- Le solénoïde: bobine supra

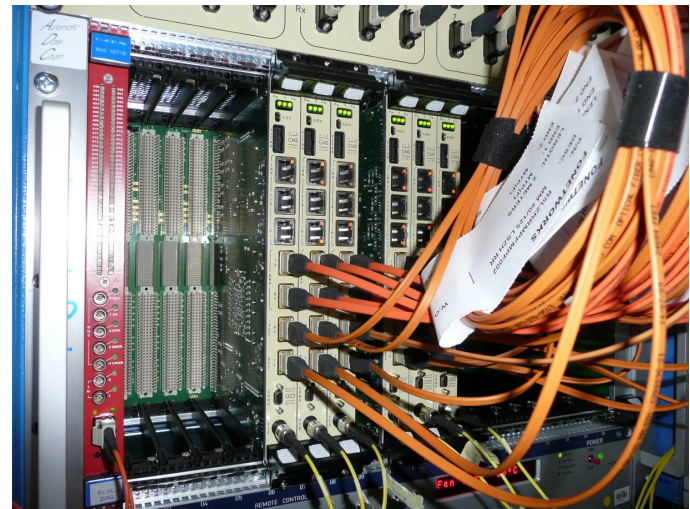
Les implications de saclay ont été importantes dans les sous-détecteurs cruciaux pour la recherche du boson de Higgs: les calorimètres électromagnétiques (électrons et photons) et le spectromètre à muons et aussi pour la calibration et l'analyse des données!

La lecture sélective du ECAL

ECAL: 75848 cristaux – canaux de lecture

- ❑ 4032 unités de déclenchement (lecture synchrone 40 MHz)
- ❑ 3072 unités de lecture (lecture asynchrone)
 - Lecture totale ECAL(1,5 Mo) > Taille événement CMS (1 Mo): **Impossible!**
 - **SRP: Réduction intelligente /20 (sans perdre d'information pour la physique)**
 - ❑ Pas de suppression de zéros massive
 - ❑ Lecture de zones d'intérêt hiérarchisées
 - ❑ Lecture de tous les dépôts d'énergie avec une grosse granularité

Cartes de SRP faites à Saclay et opérationnelles depuis le début de la prise de données



Connaissances avant le LHC

Recherches directes avant le LHC:

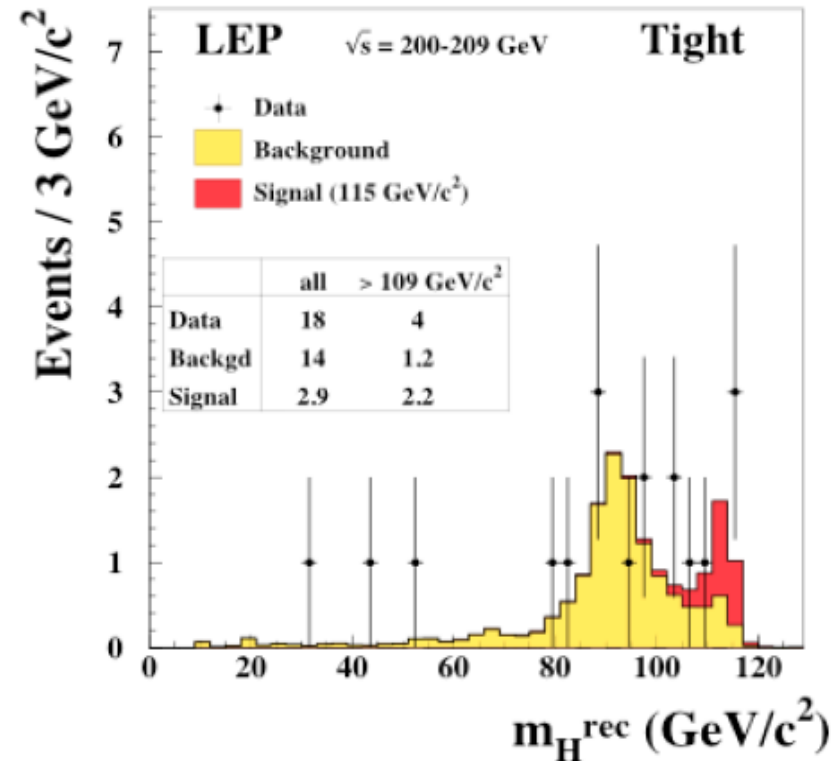
- Le LEP au CERN (Genève) de 1989 à 2000 (collisions électron-positon à la masse du Z, puis à 130 GeV et 209 GeV)

Gamme de masse en dessous de 115 GeV exclue à 95% de niveau de confiance

- Le Tevatron au Fermilab (Chicago) de 1992-2011 (collisions proton-antiproton à 1.96 TeV)

Première exclusion d'une zone autour de 160 GeV en 2010 ($m_H \notin [158-173]$ GeV)

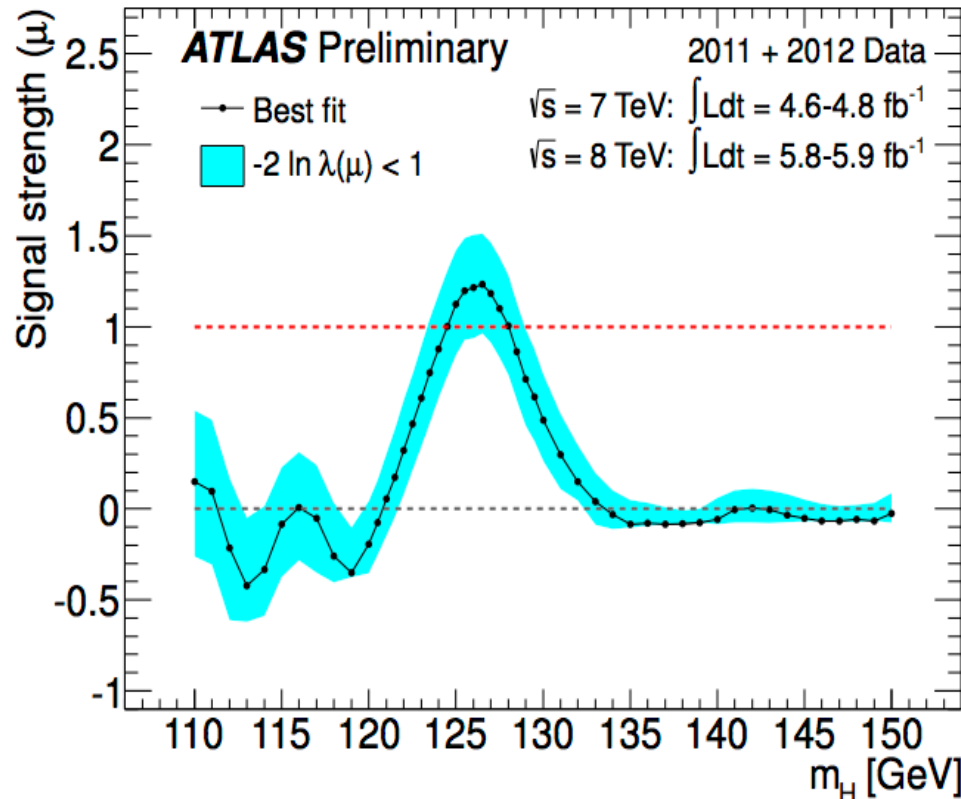
Gamme de masse entre 147 et 179 GeV exclue à 95% de niveau de confiance à l'hiver 2012



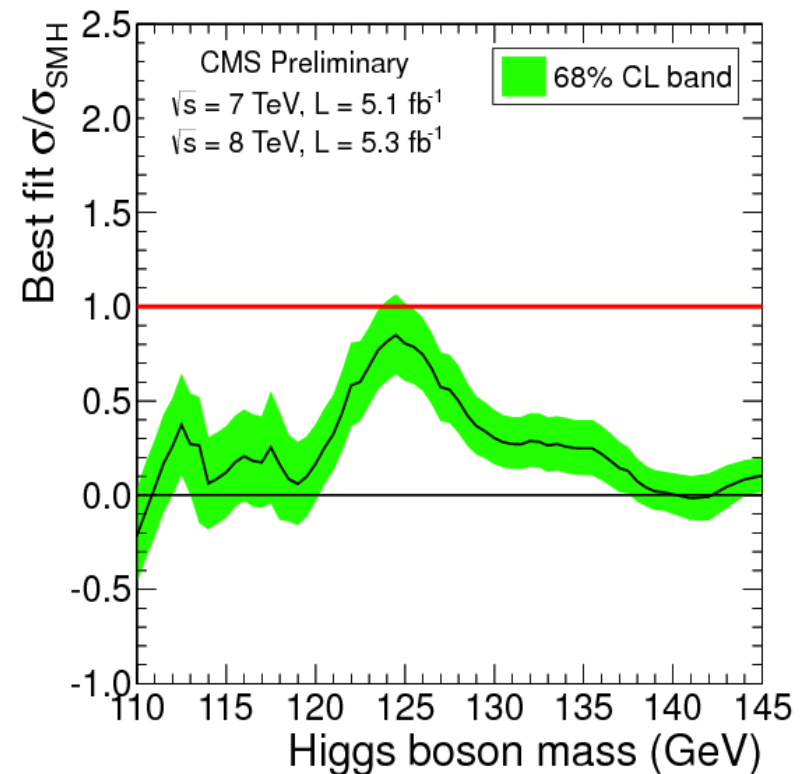
$m_H > 114.4$ GeV à 95% de niveau de confiance

Résultats combinés

Force du signal normalisée a la prédiction du Modèle Standard



Meilleur ajustement pour $m_H = 126.5 \text{ GeV}$:
 $\mu = \sigma/\sigma_{SM} = 1.2 \pm 0.3$



Meilleur ajustement pour $m_H = 125.5 \text{ GeV}$:
 $\sigma/\sigma_{SM} = 0,88 \pm 0,22$