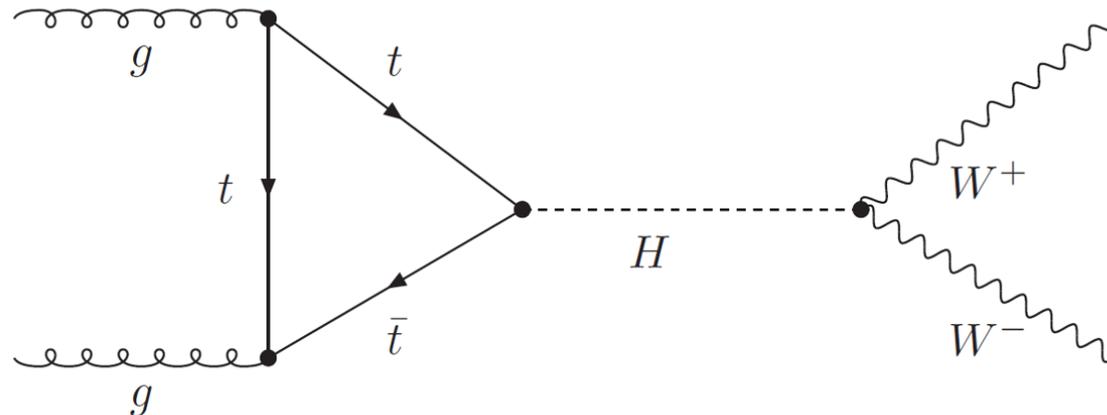


# Masterclasses

Avez-vous découvert le  
boson de Higgs?

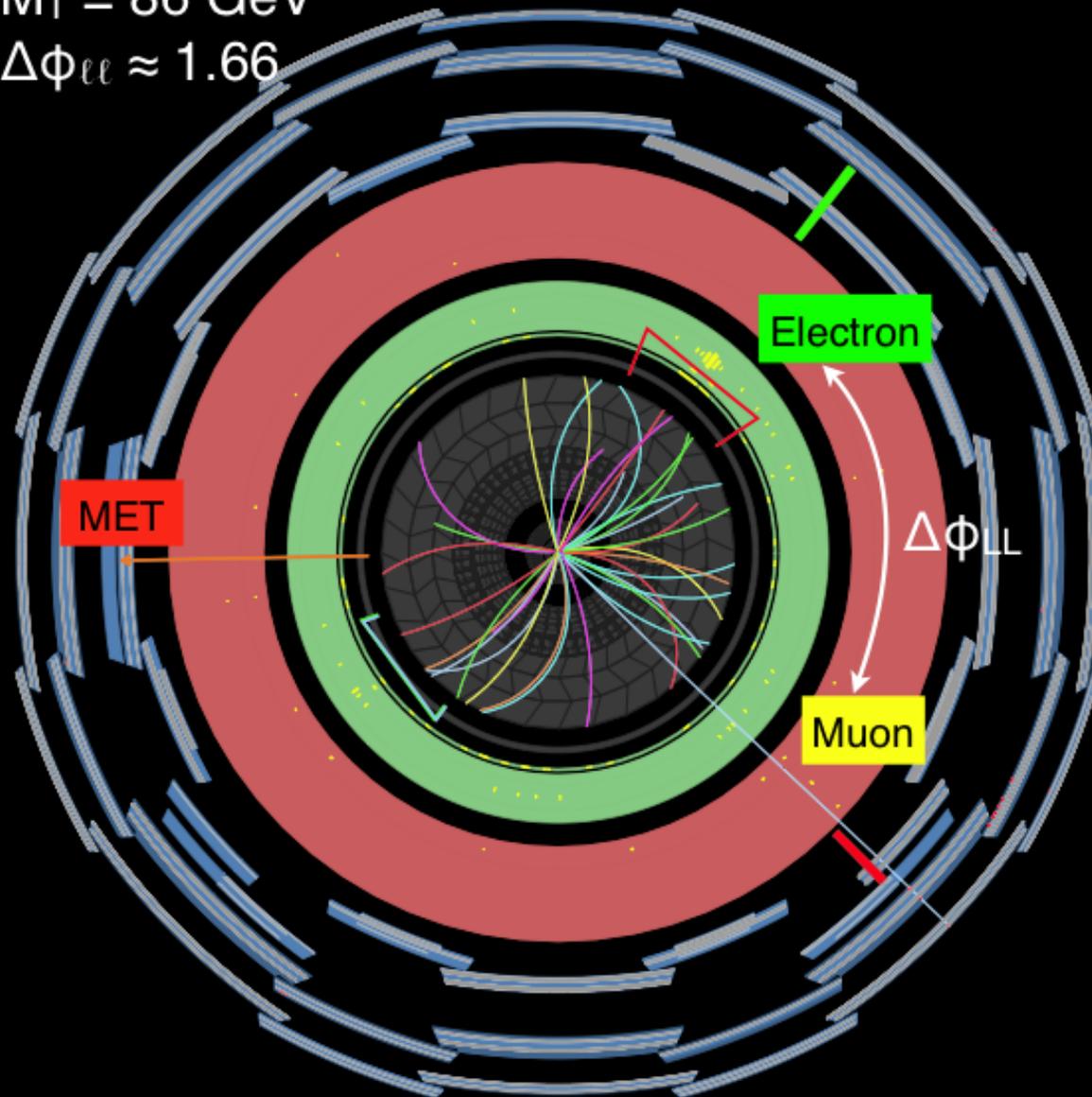


$pp \rightarrow H \rightarrow 2 W$ , avec  $W \rightarrow e \nu$  ou  $\mu \nu$

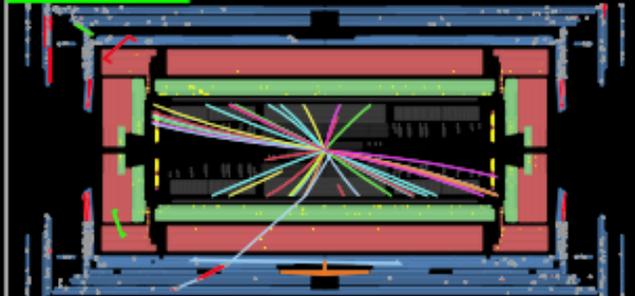
# $e\mu + 0$ jet in 2011 passing all cuts

$M_T = 86$  GeV

$\Delta\phi_{e\mu} \approx 1.66$



Electron



Muon



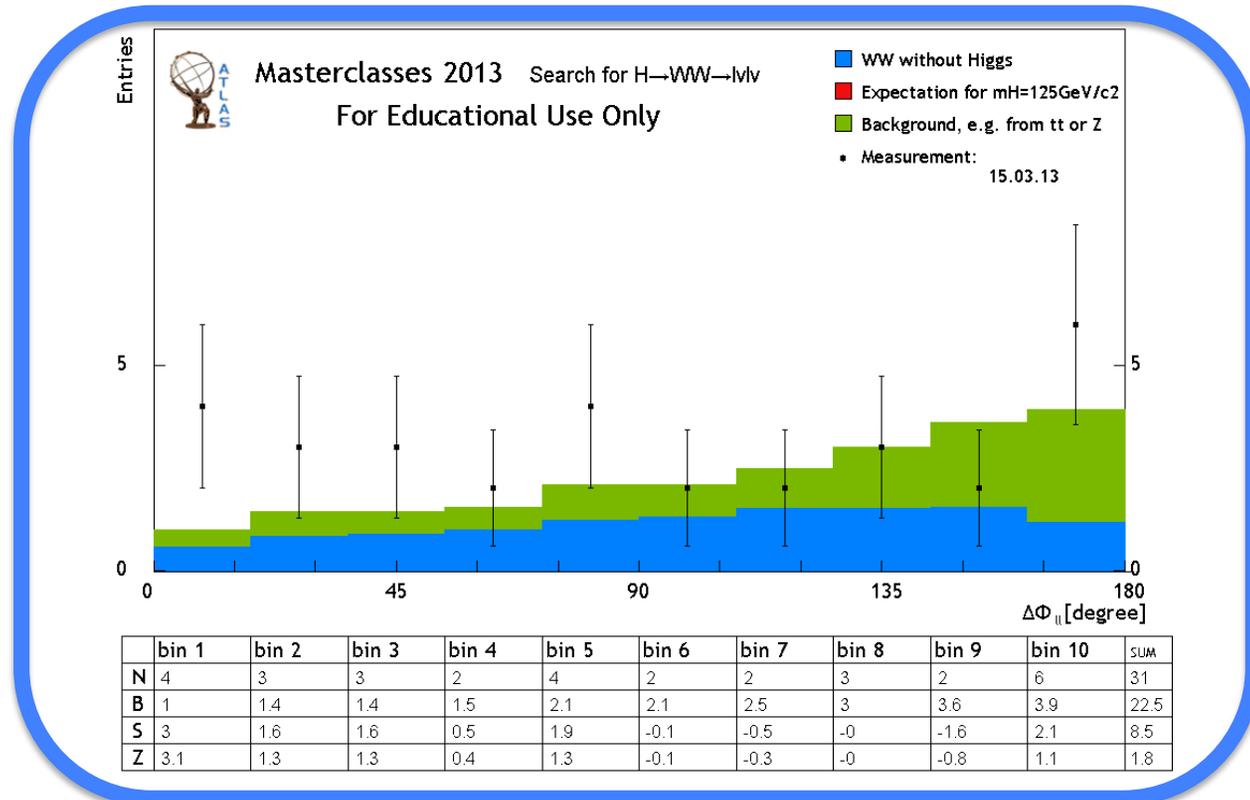
**ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 189483, Event Number: 90659667

Date: 2011-09-19 10:11:20 CEST

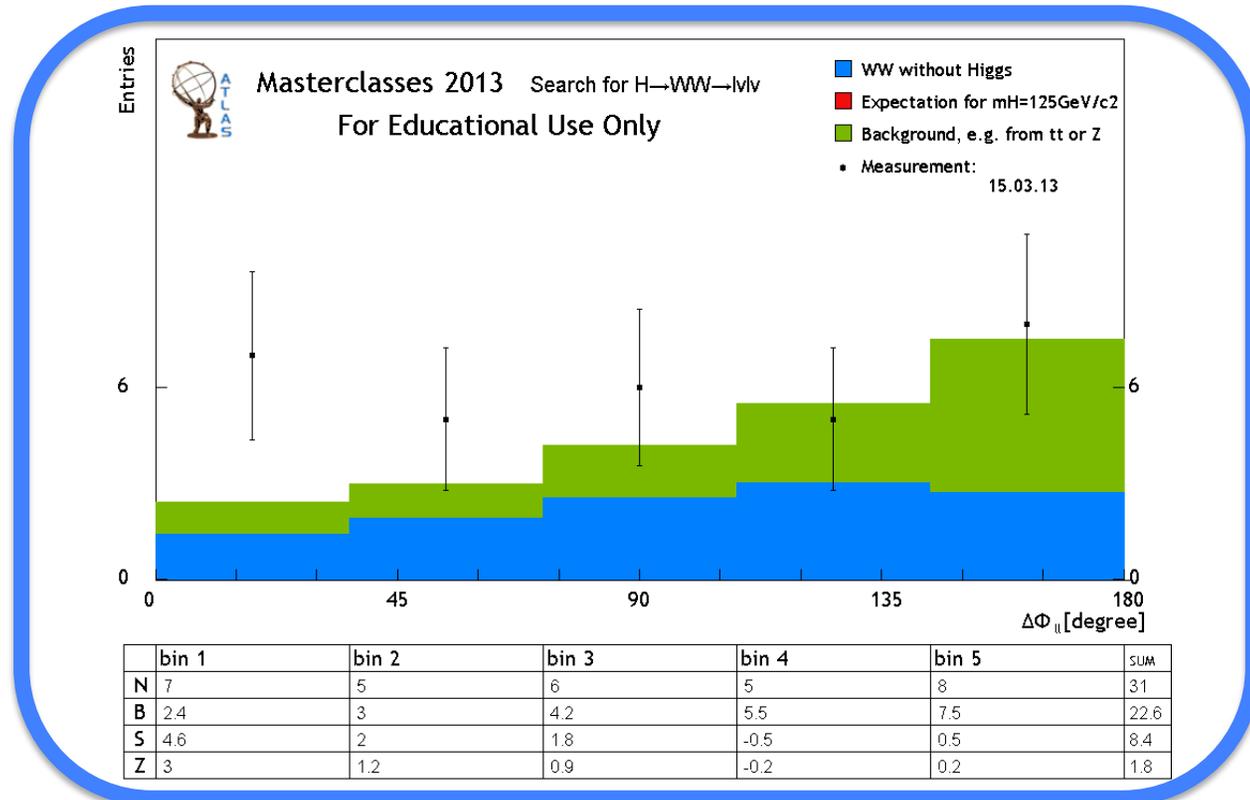


# Vos résultats



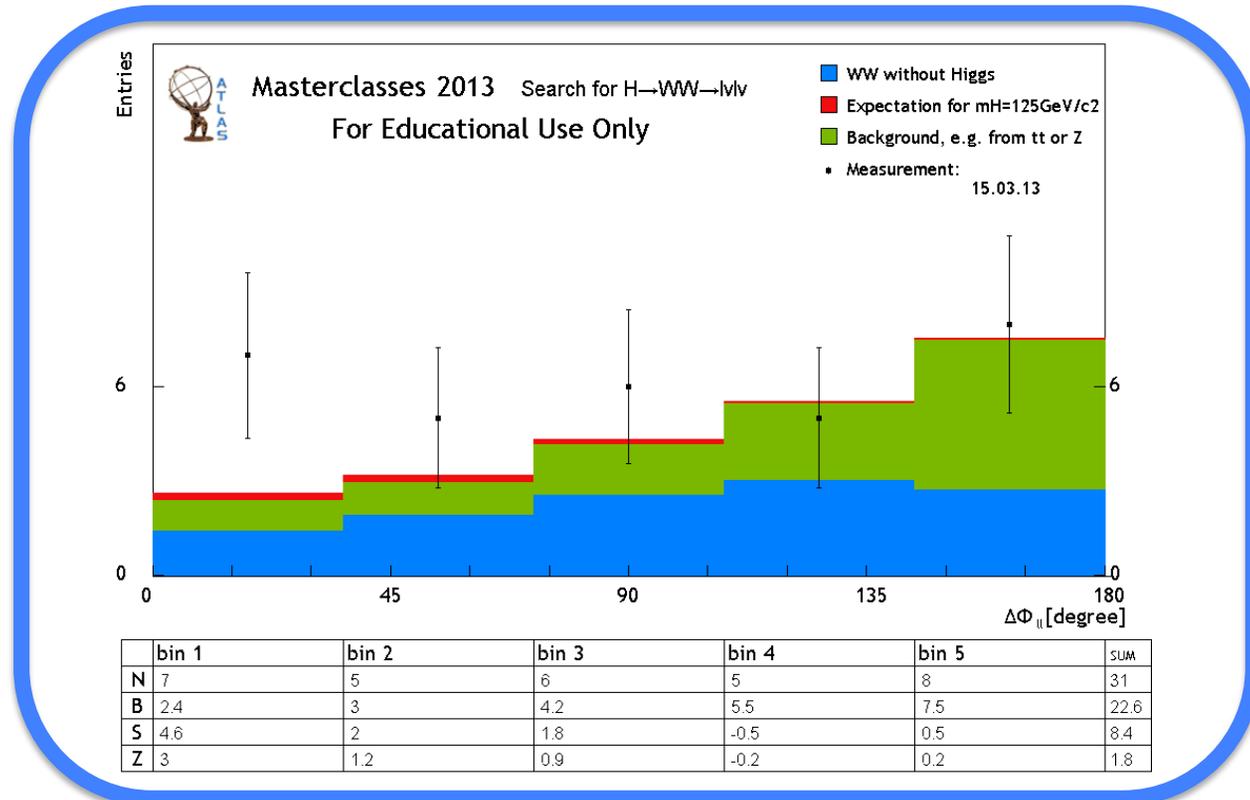
- Présentation dans un histogramme
- Incertitude statistique sur la mesure
- Confrontation aux prédictions théoriques
- Peu d'événements analysés

# Vos résultats



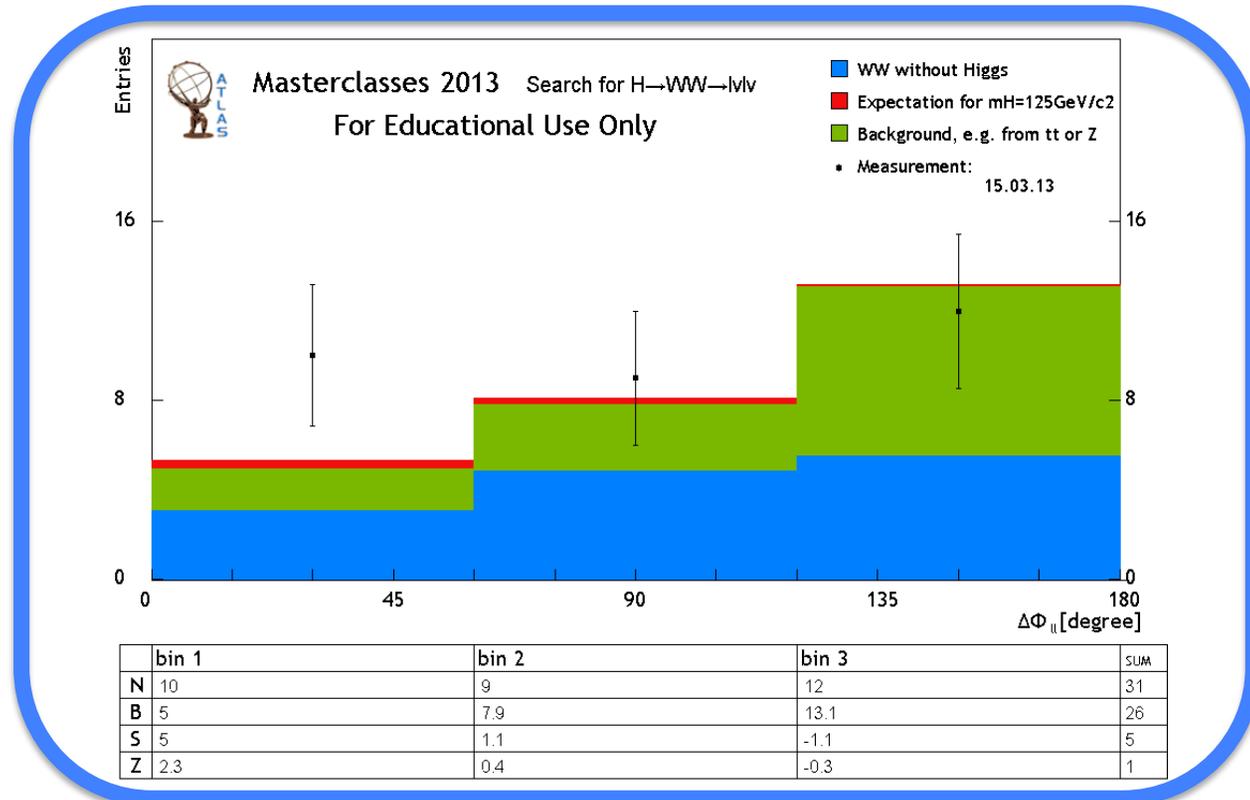
- Présentation dans un histogramme
- Incertitude statistique sur la mesure
- Confrontation aux prédictions théoriques
- Peu d'événements analysés

# Vos résultats



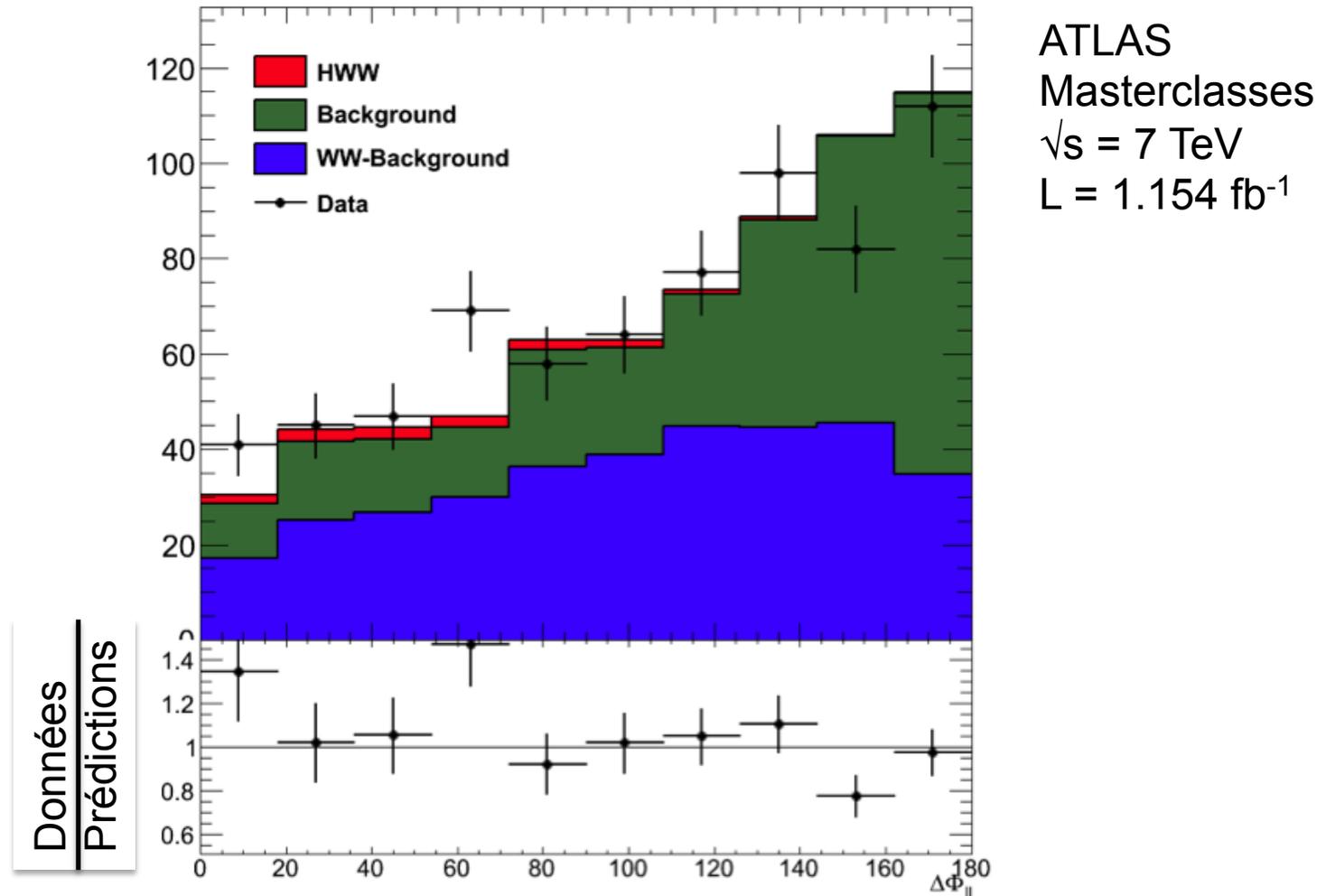
- Présentation dans un histogramme
- Incertitude statistique sur la mesure
- Confrontation aux prédictions théoriques
- Peu d'événements analysés
- Difficile de voir un excès...

# Vos résultats



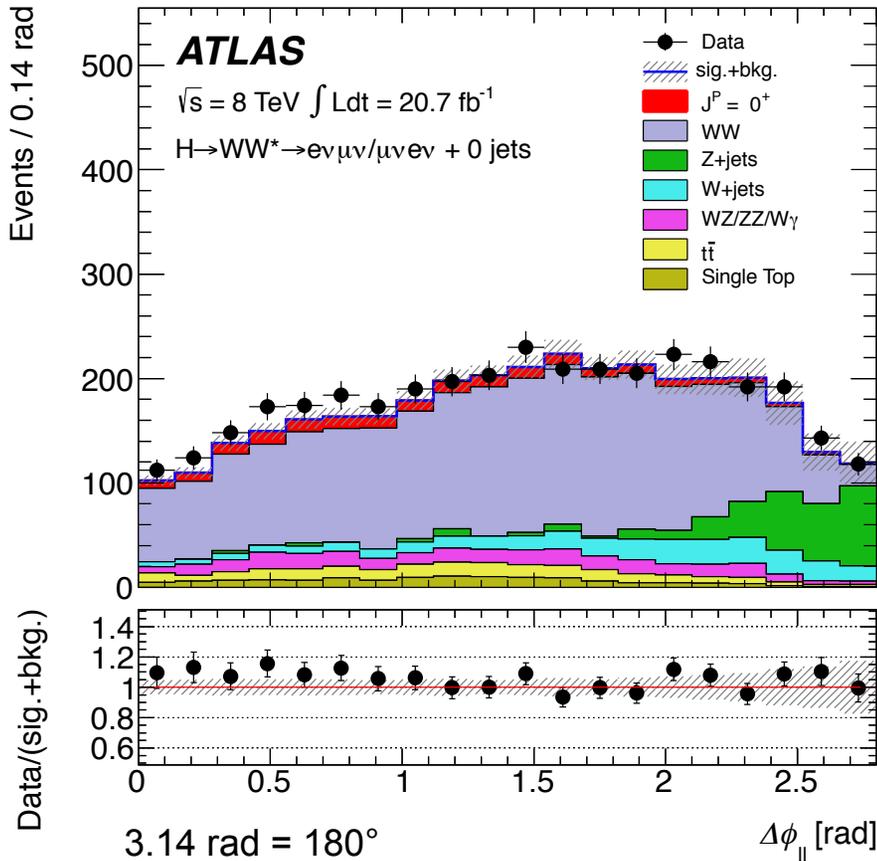
- Présentation dans un histogramme
- Incertitude statistique sur la mesure
- Confrontation aux prédictions théoriques
- Peu d'événements analysés
- Difficile de voir un excès...

# Si vous aviez tourné sur tous les événements des Masterclasses

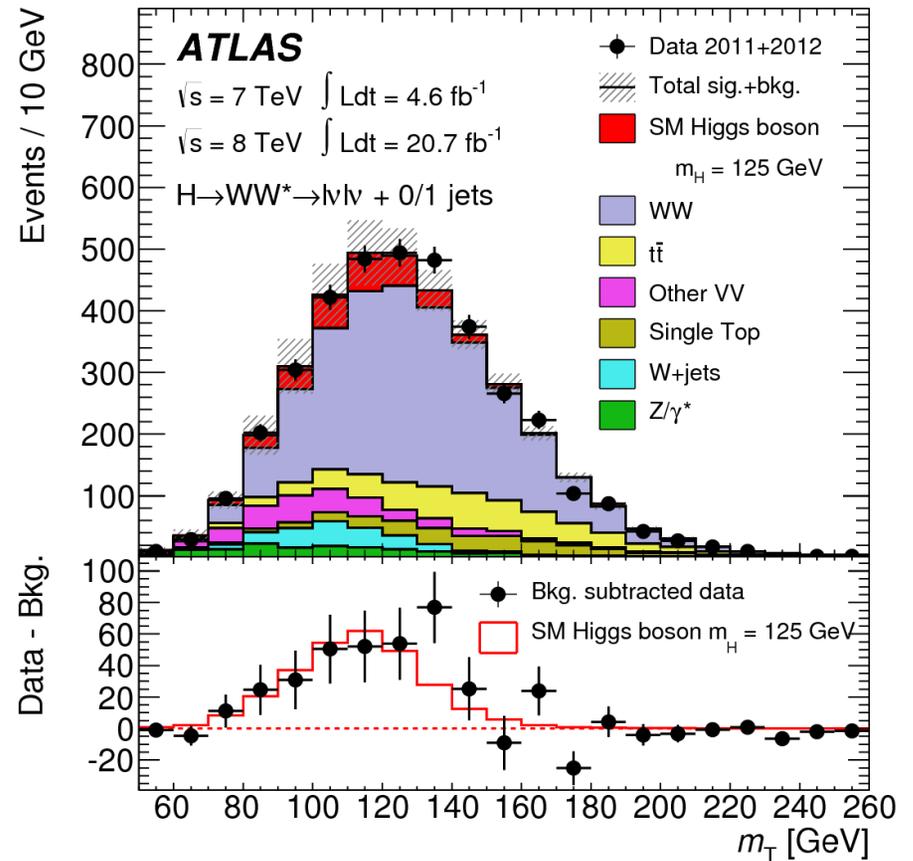


# Analyse ATLAS sur Run1

2012



2011 & 2012

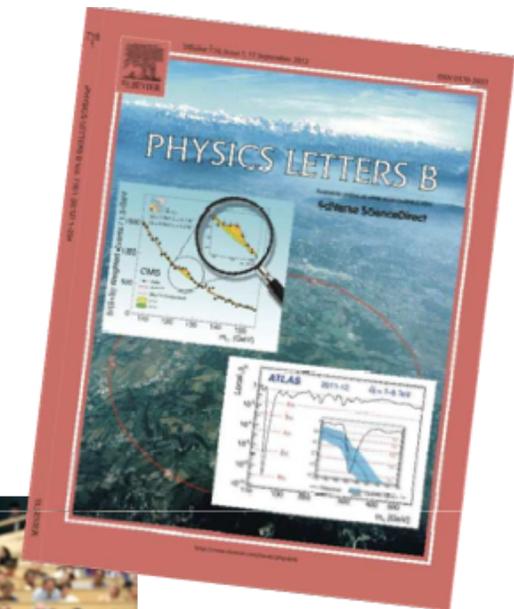
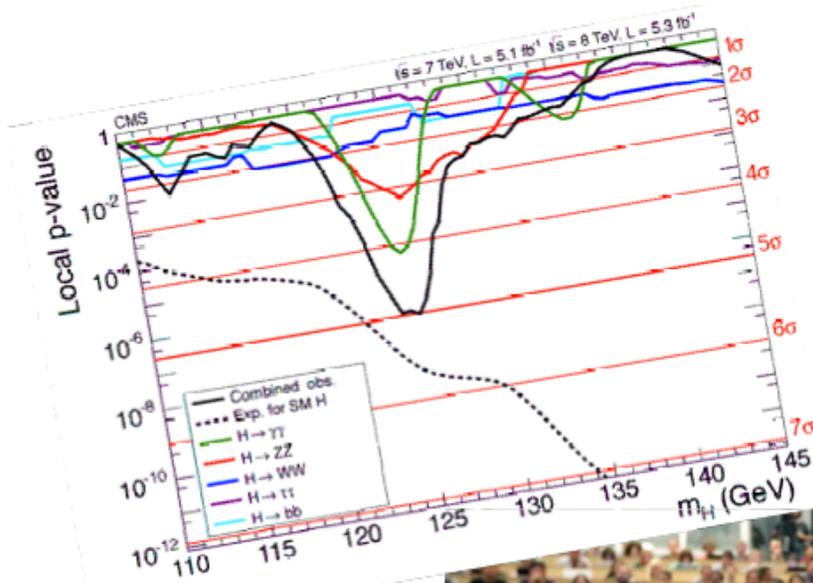


Plus d'événements et des sélections plus fortes

Signal significance for HWW is **3.8 $\sigma$**  (3.8 $\sigma$ )  
 observed expected

# Masterclasses

La découverte du boson  
de Higgs



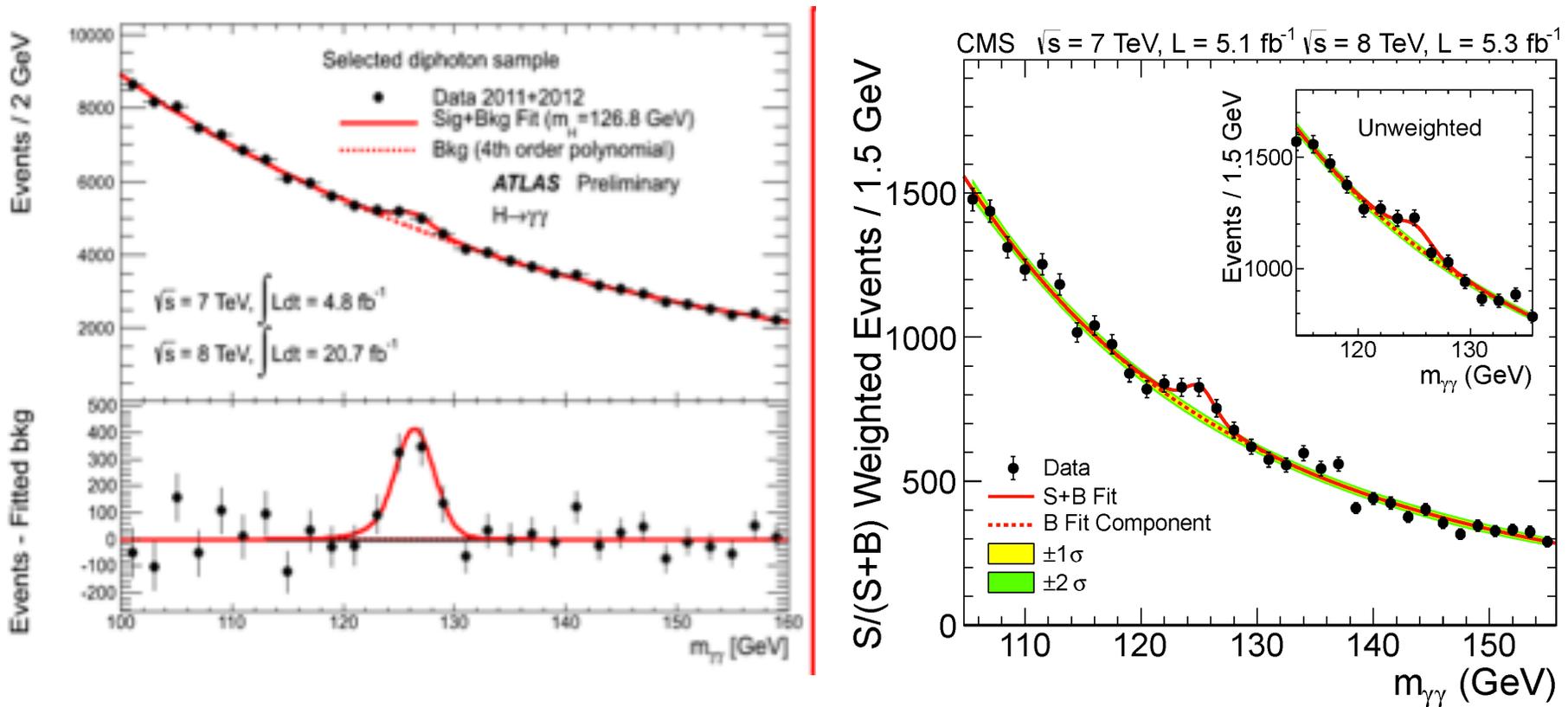
**4 juillet 2012 :  
date  
historique!**



Rolf Heuer :  
**« We have it! »**

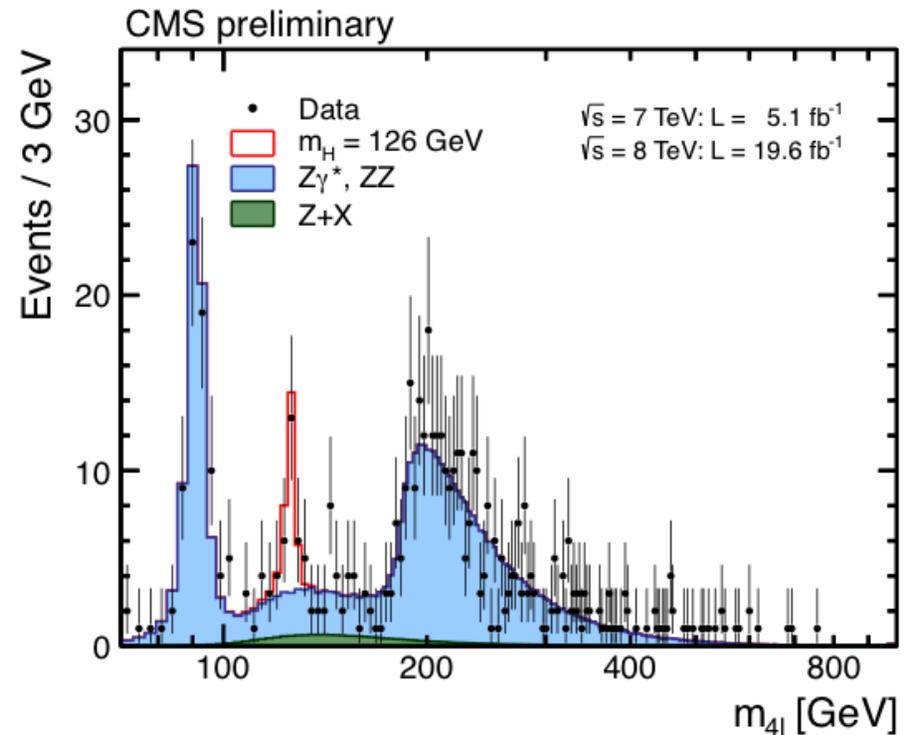
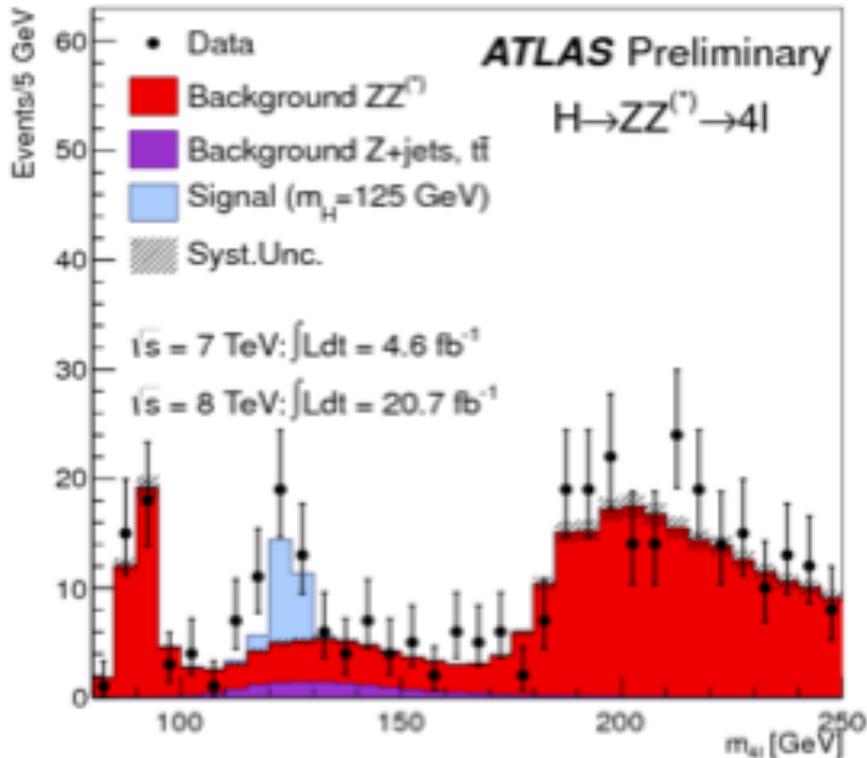


# H → 2 photons



On est sur! On a bien découvert une particule de masse  $\sim 125$  GeV, mais est-ce vraiment le boson de Higgs?

# H → 2Z



On est sur! On a bien découvert une particule de masse  $\sim 125$  GeV, mais est-ce vraiment le boson de Higgs?

# Comment savoir si c'est le Higgs?

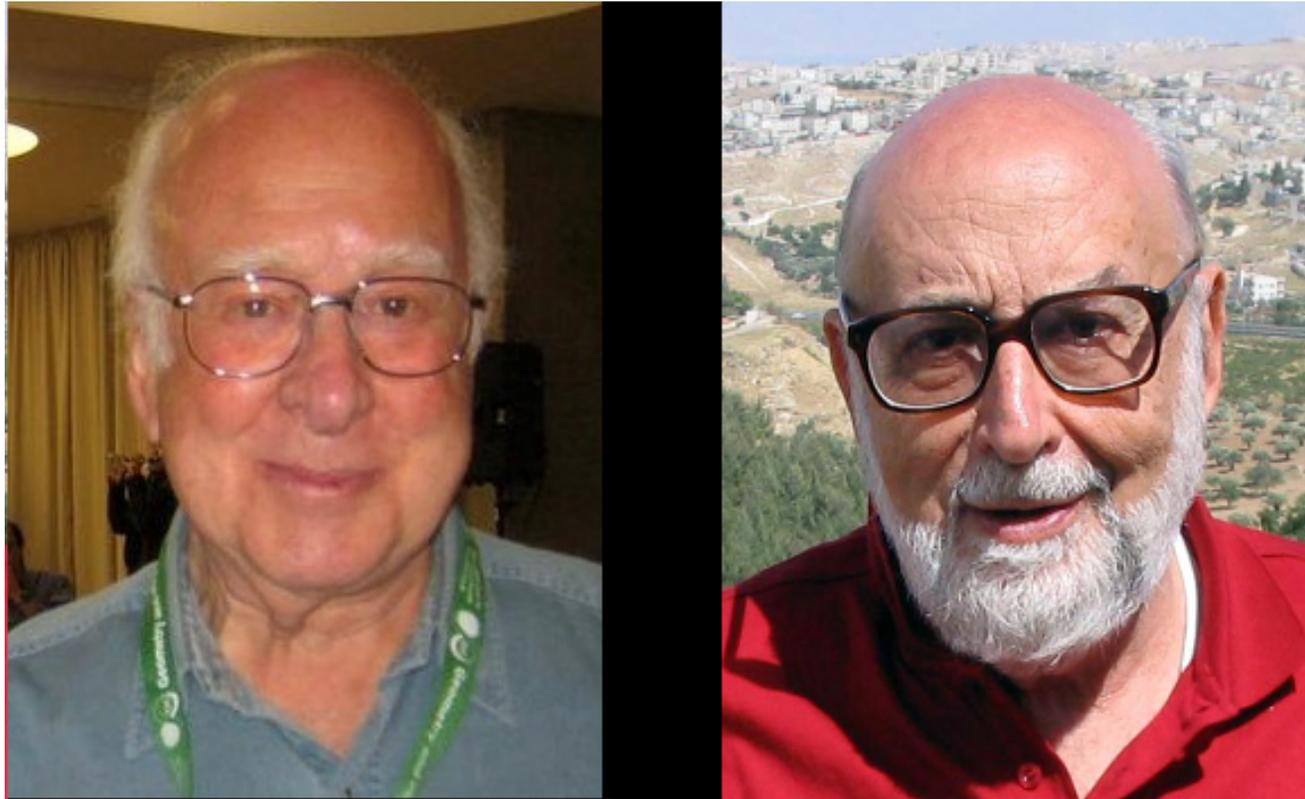
Sa masse  $M_H$  : non prédite

Ses propriétés : définies en fonction de  $M_H$

→ On va tester toutes les propriétés pour vérifier si c'est bien le Higgs du MS :

- modes de désintégration et taux
- couplage aux particules
- spin

# Le Nobel 2013 de la physique



Le comité Nobel a récompensé le physicien britannique Peter Higgs et le physicien belge François Englert pour leur « découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à la compréhension de l'origine de la masse des particules élémentaires, et qui a été confirmé récemment par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du Grand collisionneur de hadrons (LHC) au CERN ».

# Masterclasses

Et maintenant?

# Qu'est-ce que la découverte change pour nous?

Découverte majeure au LHC → enthousiasme!

Reste la question de la nature de la particule :  
Higgs du MS ou a-t-on découvert de la nouvelle physique?

Va-t-on faire d'autres découvertes?

Répondrons-nous à d'autres questions ouvertes de la physique des particules?

# Masterclasses

Qui est le boson de Higgs?

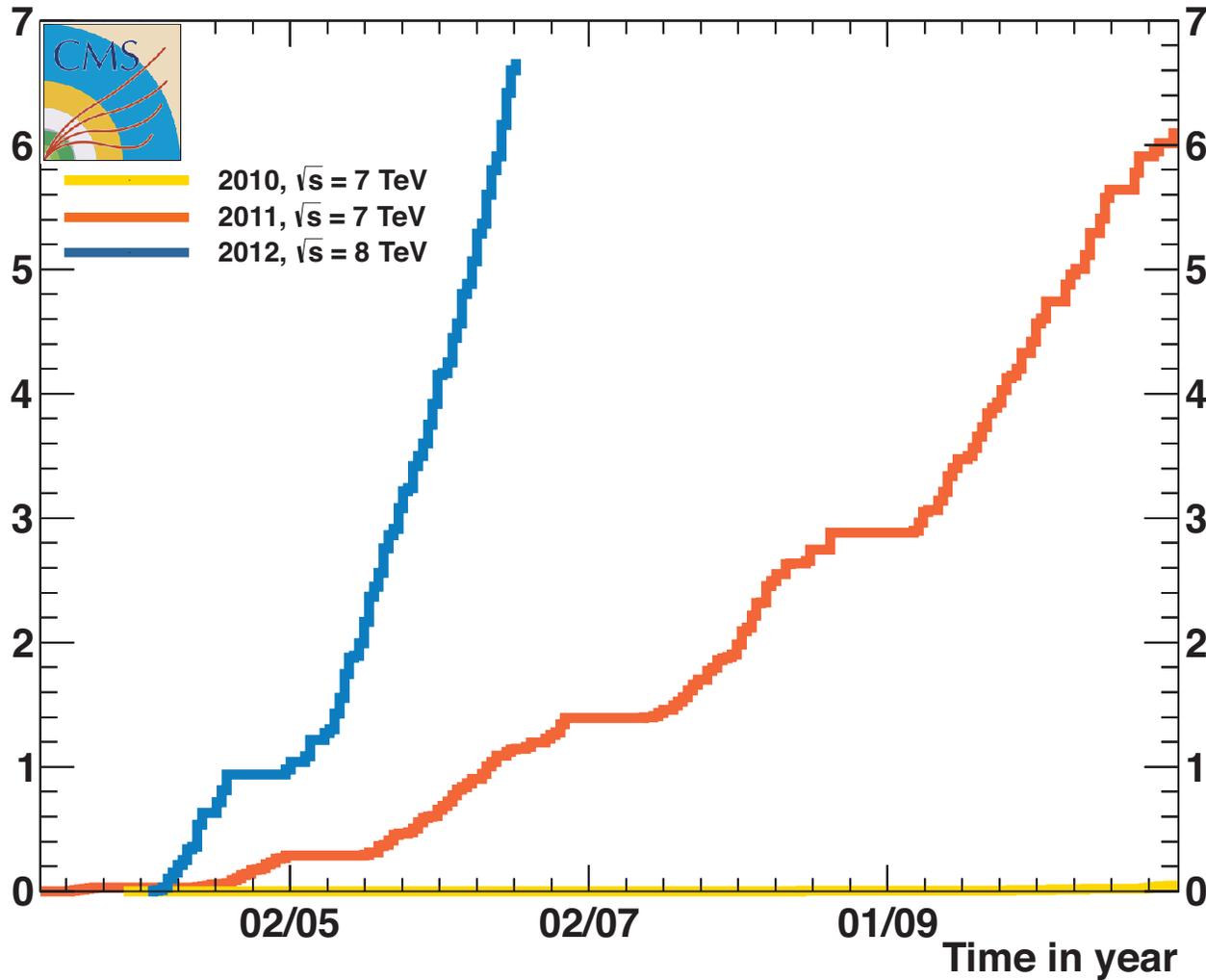
# Le Boson de Higgs

## Particule spéciale dans le Modèle Standard

- **Boson** : spin entier 0
  - (les médiateurs des interactions ont spin 1)
  - (les particules de matière ont des spins 1/2)
- **Higgs** : le nom d'un des 3 inventeurs
- **Son rôle** : lié à l'origine des masses des autres particules
- **Sa découverte** : le 4 juillet 2012 😊

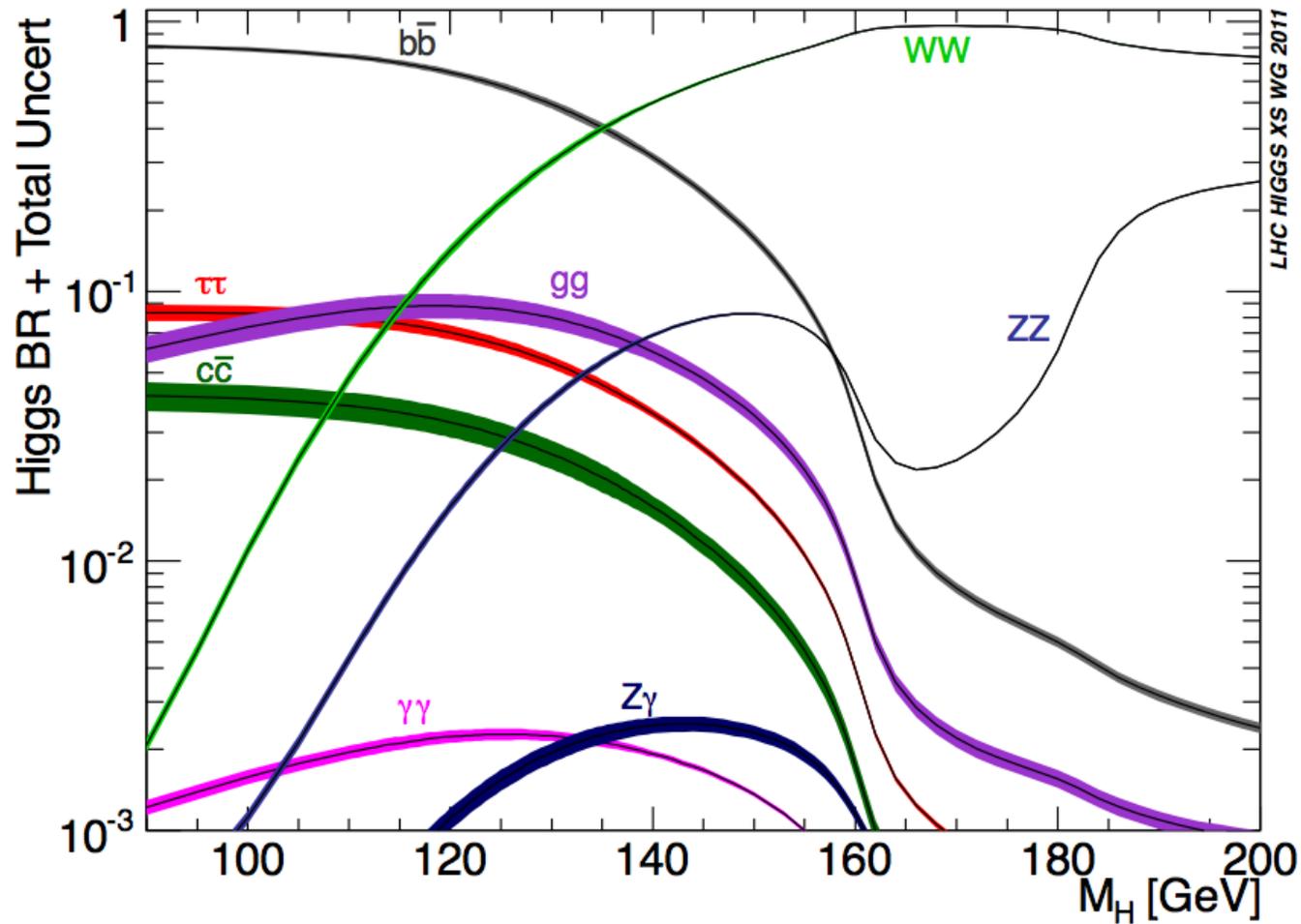
# Combien de Higgs?

Nombre de collisions proton-proton  
(en centaine de millier de milliards)



Nombre de Higgs potentiellement  
produits (en dizaine de milliers)

# Dans quel canal de désintégration?



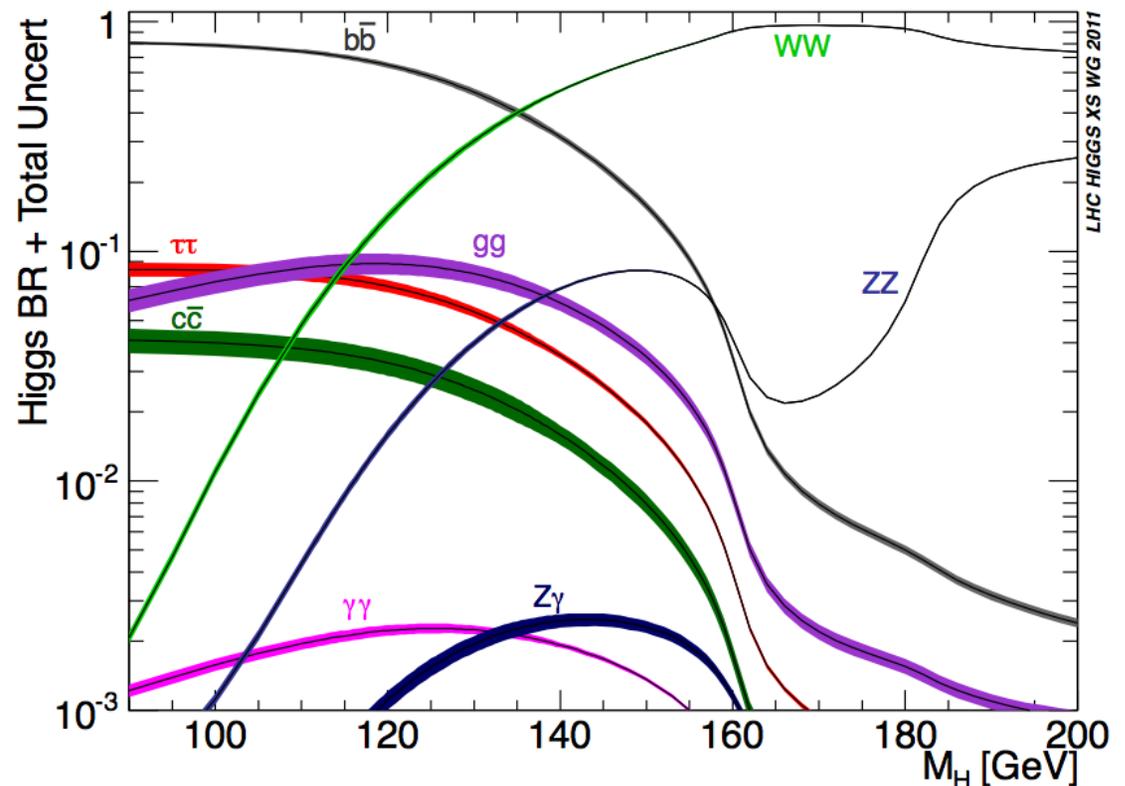
# Masterclasses

Comment ça se passe au  
LHC ?

# La recherche du boson de Higgs

Différents modes de désintégration :

- $H \rightarrow 2$  photons
- $H \rightarrow 2 Z \rightarrow 4 l$
- $H \rightarrow 2 W \rightarrow 2 l + 2\nu$
- ...



→ Un maximum de canaux de désintégration étudiés

# La recherche du boson de Higgs

Des analyses très complexes :

- sélection d'événements,
- détermination des bruits de fond,
- technique d'analyses multi variées,
- méthodes statistiques,
- Beaucoup de vérifications

Beaucoup de monde impliqué : quelques centaines de personnes par collaboration



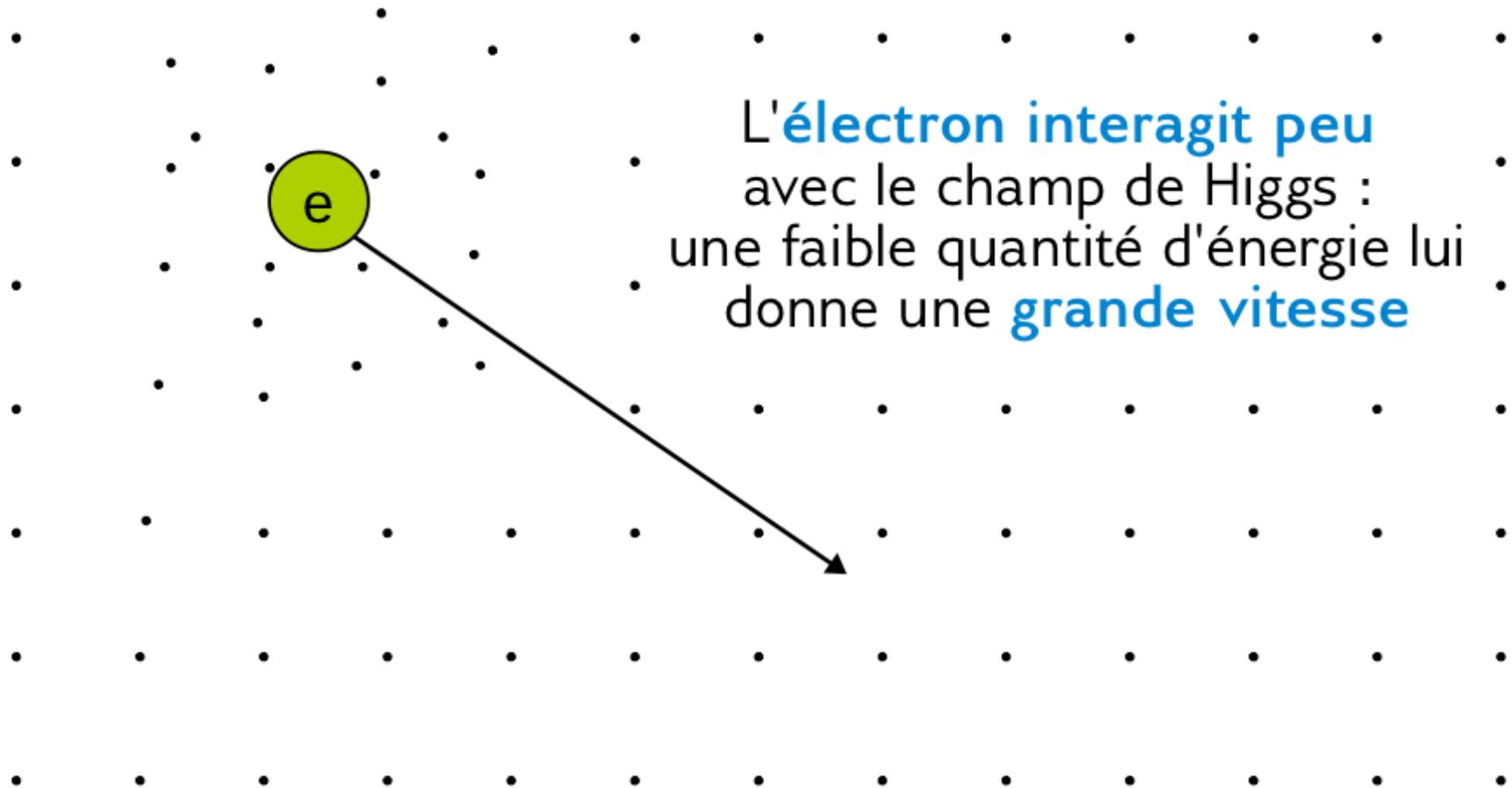
# Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



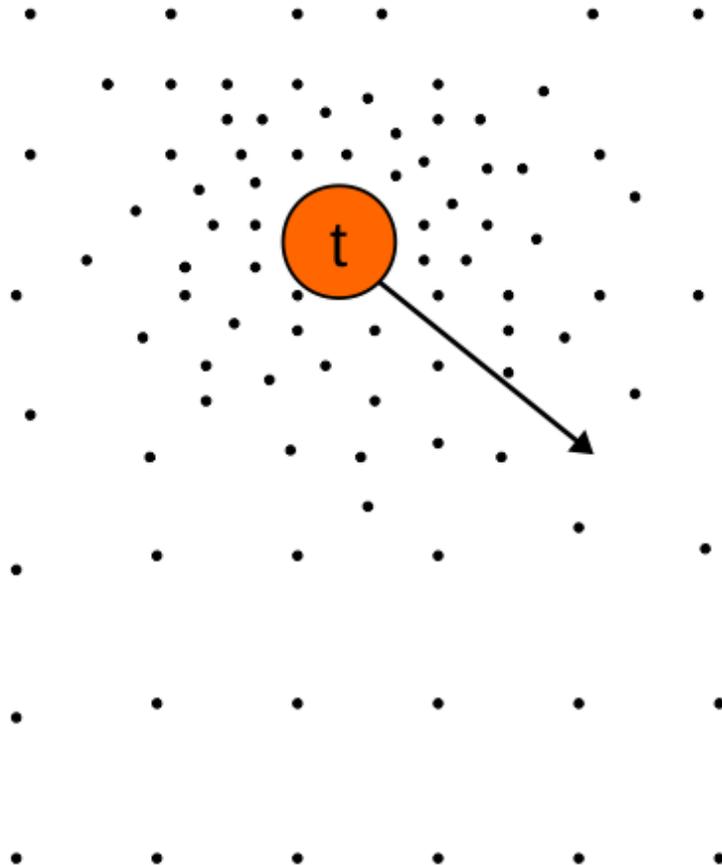
# Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



# Le mécanisme de Higgs

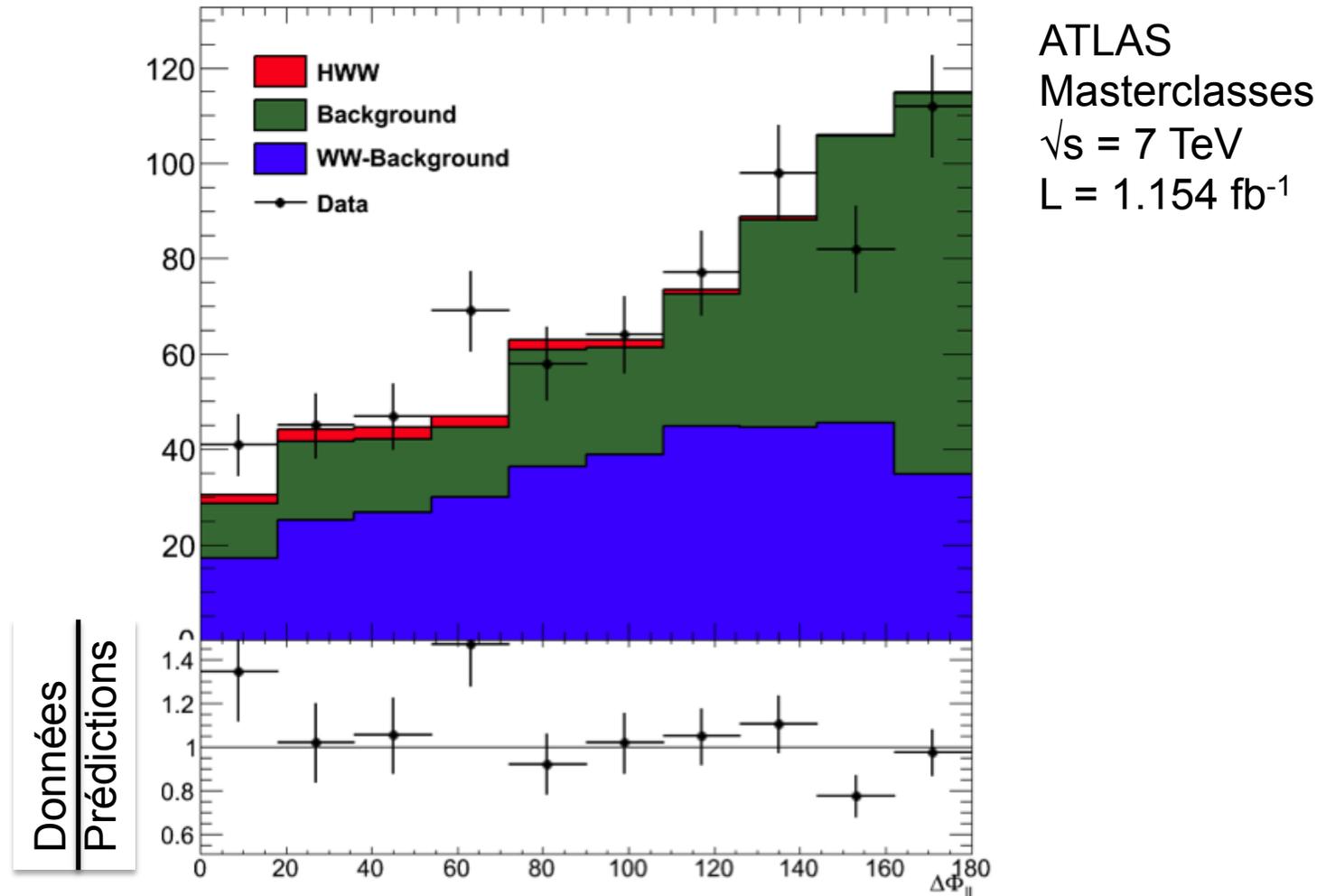
Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



Le **quark top interagit beaucoup** avec le champ de Higgs : il lui fait plus d'énergie pour se déplacer, il paraît **plus lourd** !



# Si vous aviez tourné sur tous les événements des Masterclasses



# Nombres d'événements attendus

ATLAS Masterclasses,  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ ,  $L = 1.154 \text{ fb}^{-1}$

Drell Yan	$t\bar{t}$	WW	W + jets	single-top	total Background	Signal	$S/\sqrt{B}$	Data
22.63	30.43	242.51	39.37	20.74	355.67	9.86	0.52	381

Table 1: Number of events left after all cuts in the **H0** bin.

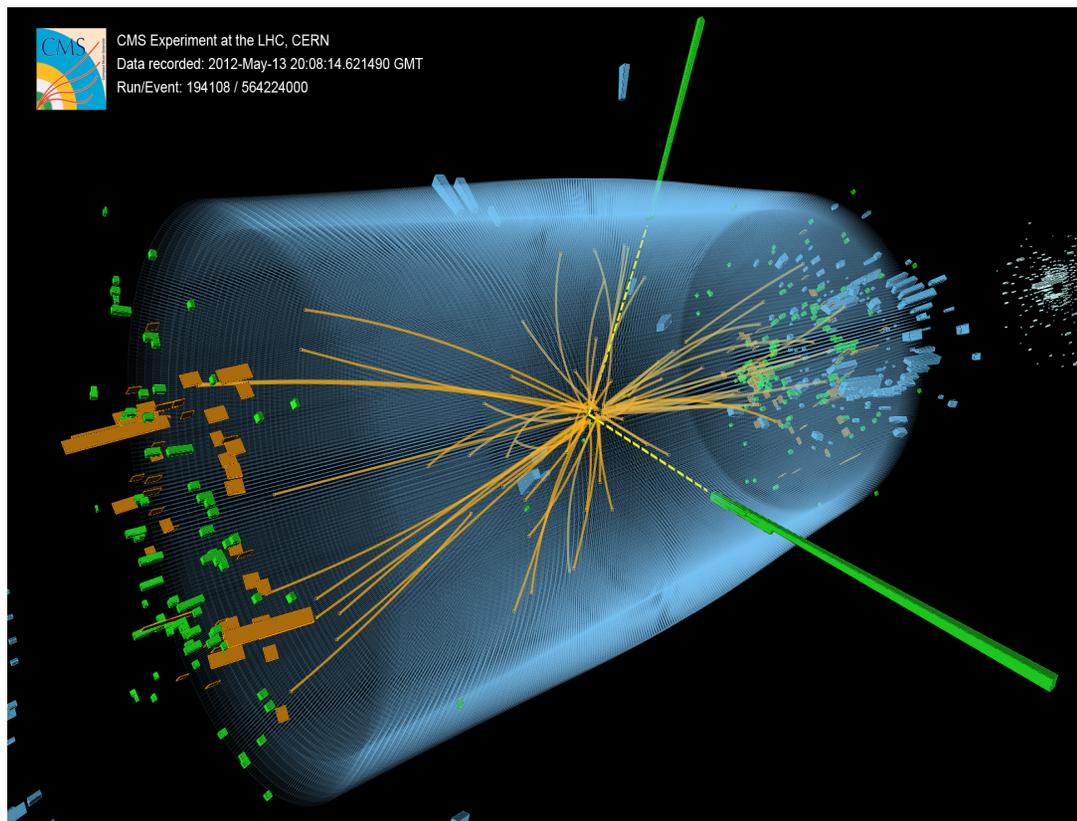
Drell Yan	$t\bar{t}$	WW	W + jets	single-top	total Background	Signal	$S/\sqrt{B}$	Data
94.36	64.16	101.37	12.65	31.93	304.47	4.85	0.28	312

Table 2: Number of events left after all cuts in the **H1** bin.

Hence we expect to have 14.7 Higgs events in total among 660 Background events. In Data we found 693 events in total which is in good agreement with the Monte Carlo simulation.

# le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Canal qui en juillet 2012 a donné la signification la plus grande!  
(Il n'a pas été updaté pour HCP)



# le canal $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptons

Canal qui est sensé être le plus sensible à 125 GeV



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Tue Oct 4 00:10:13 2011 CEST  
Run/Event: 177782 / 72158025  
Lumi section: 99

$\mu^-(Z_2) p_T : 15 \text{ GeV}$

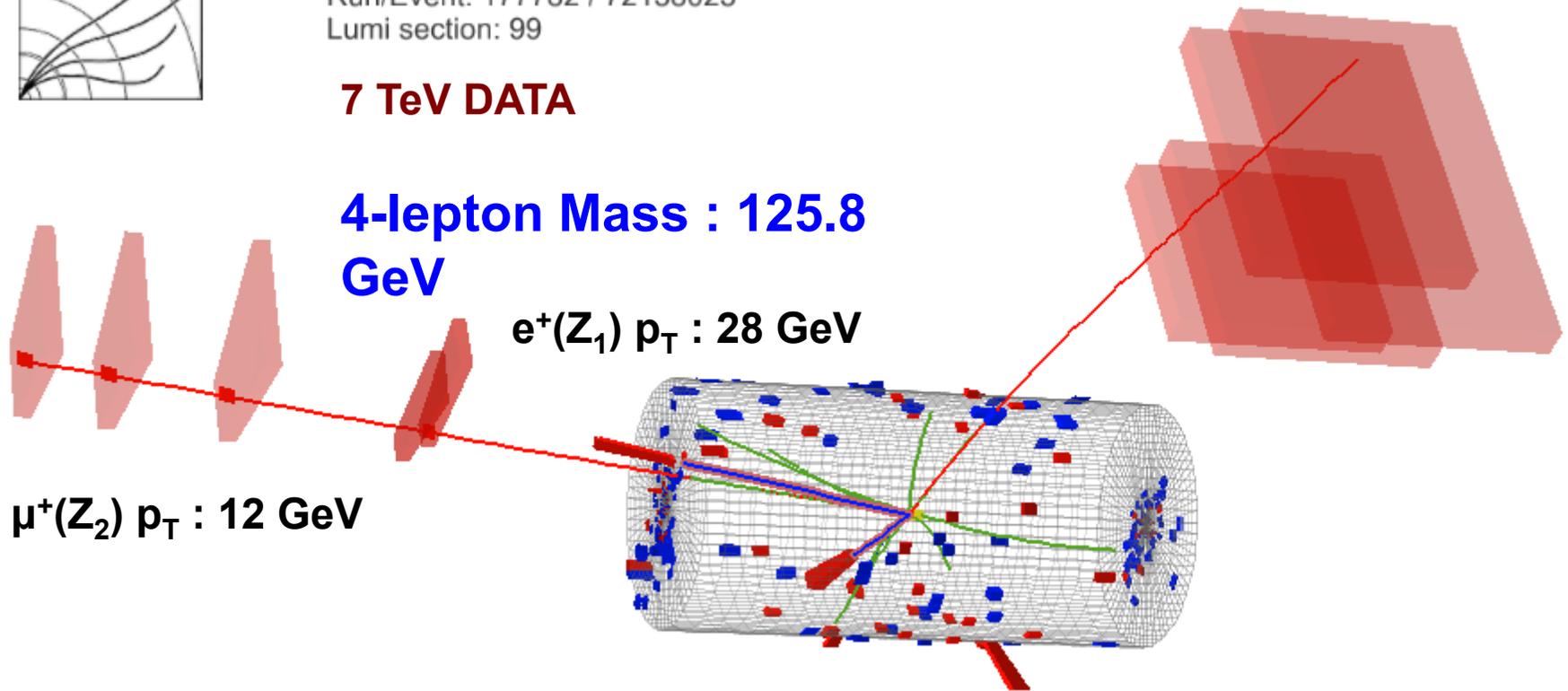
**7 TeV DATA**

**4-lepton Mass : 125.8 GeV**

$e^+(Z_1) p_T : 28 \text{ GeV}$

$\mu^+(Z_2) p_T : 12 \text{ GeV}$

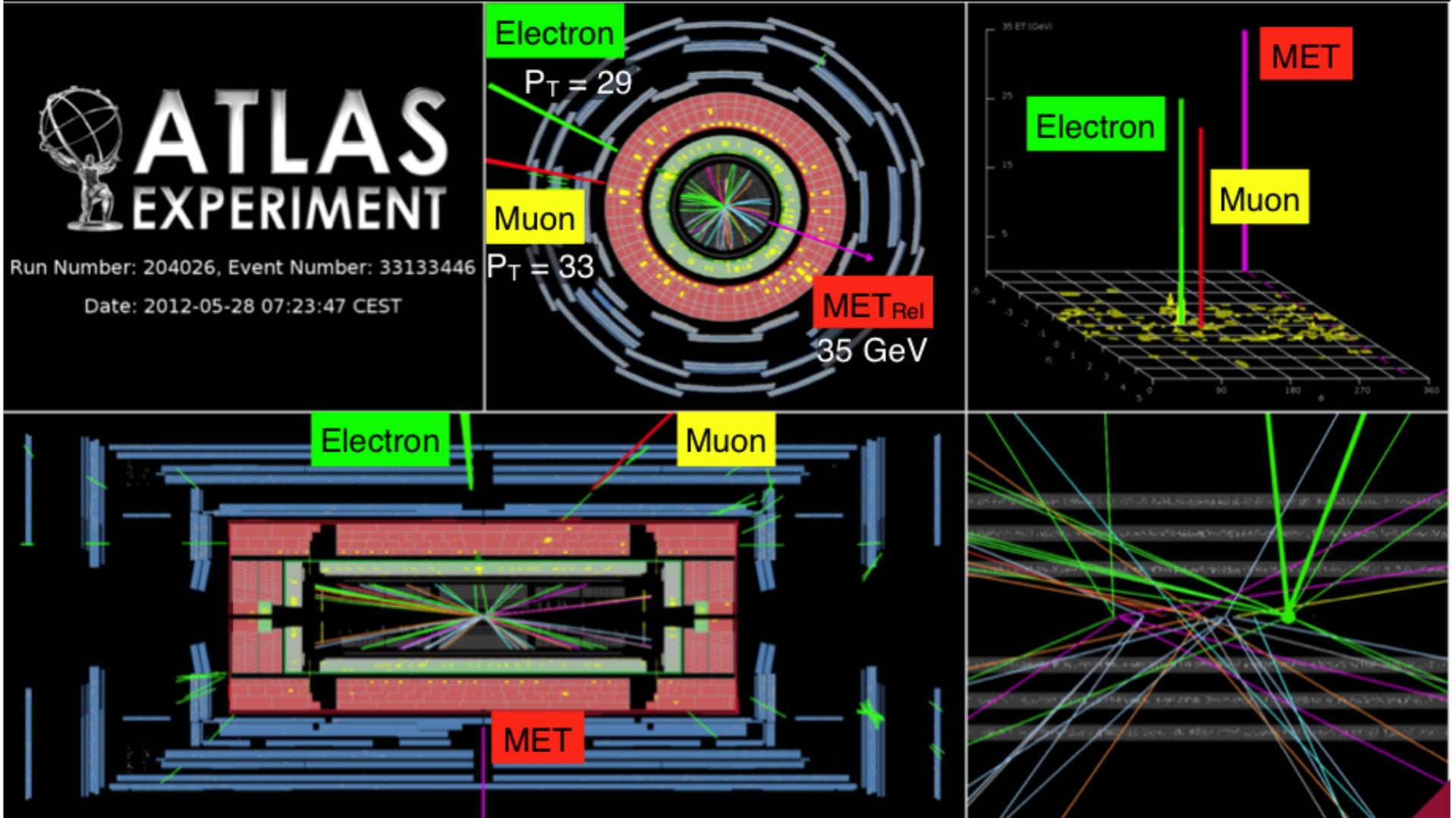
$e^-(Z_1) p_T : 14 \text{ GeV}$



# le canal $H \rightarrow WW \rightarrow 2$ leptons

$M_T = 94$  GeV  
 $\Delta\phi_{\ell\ell} \approx 0.29$

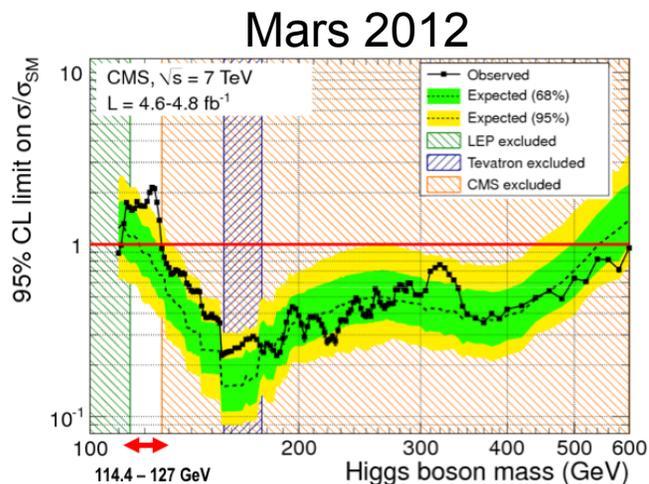
**$e\mu + 0$  jet in 2012 passing all cuts**



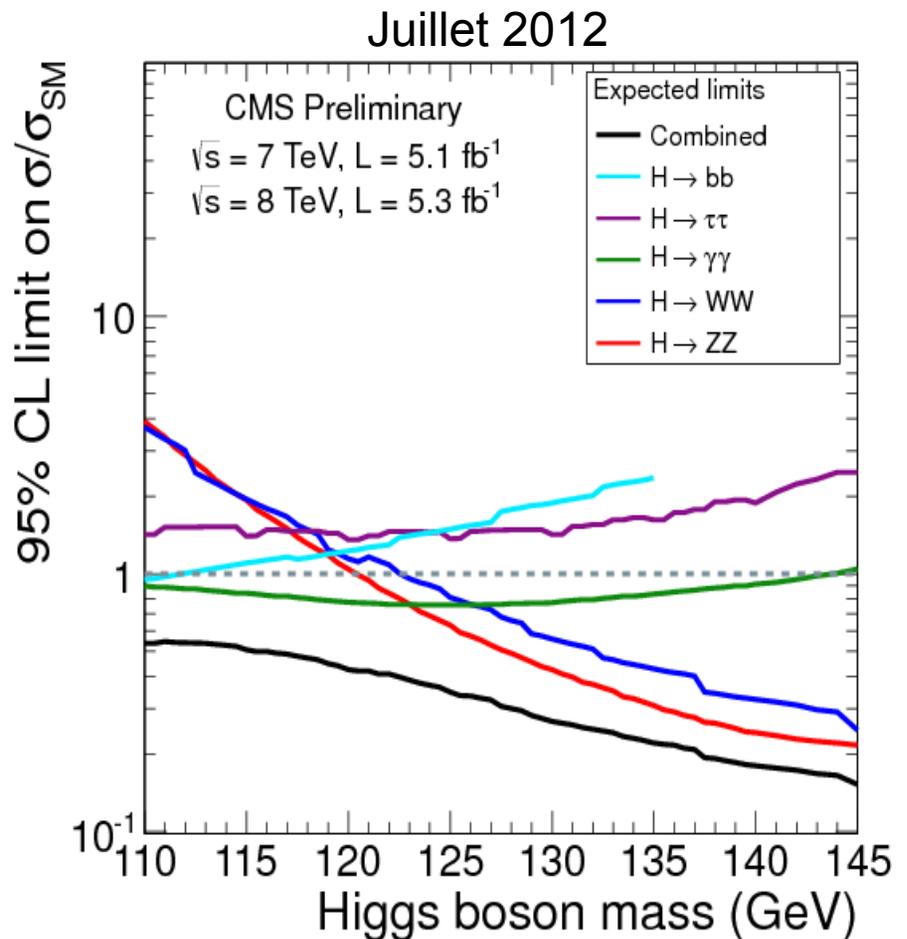
# Test statistique pour l'exclusion

On teste la compatibilité avec l'hypothèse signal+bruit de fond. Si la limite sur le rapport  $\sigma/\sigma_{SM}$  est  $<1$  pour une masse considérée, cette masse est exclue pour un Higgs du Modèle Standard.

Début juillet, il restait uniquement une zone non exclue :  $\sim[115-130]$  GeV

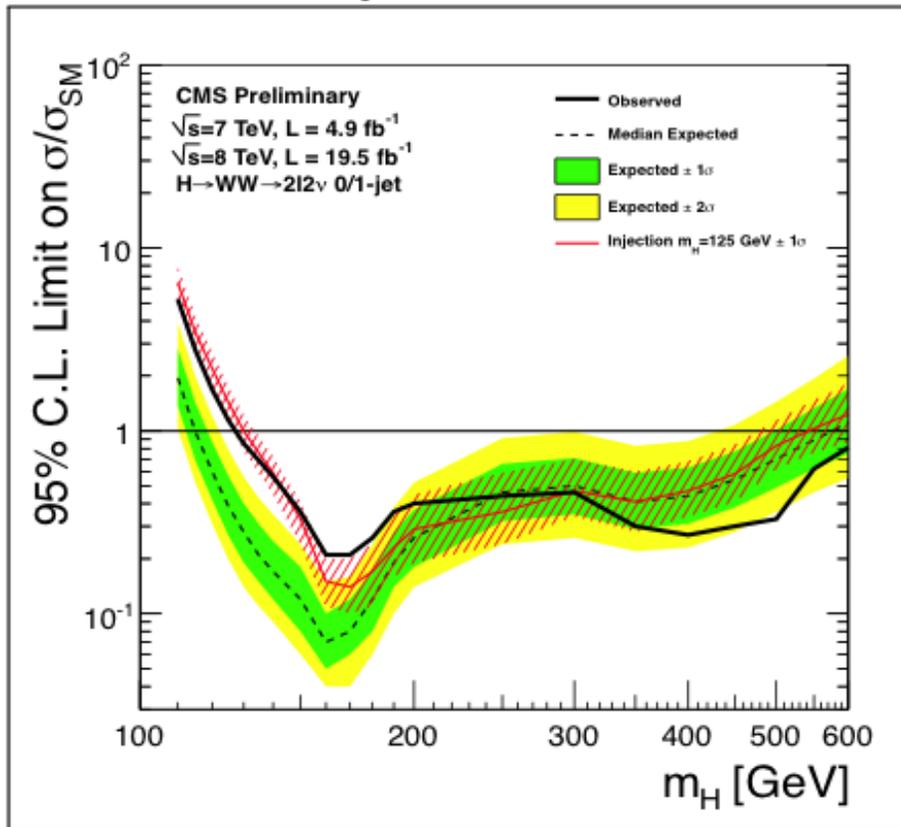


Autour de 125 GeV, ZZ,  $\gamma\gamma$  et WW ont les plus grandes sensibilités, suivi par  $\tau\tau$  et bb.

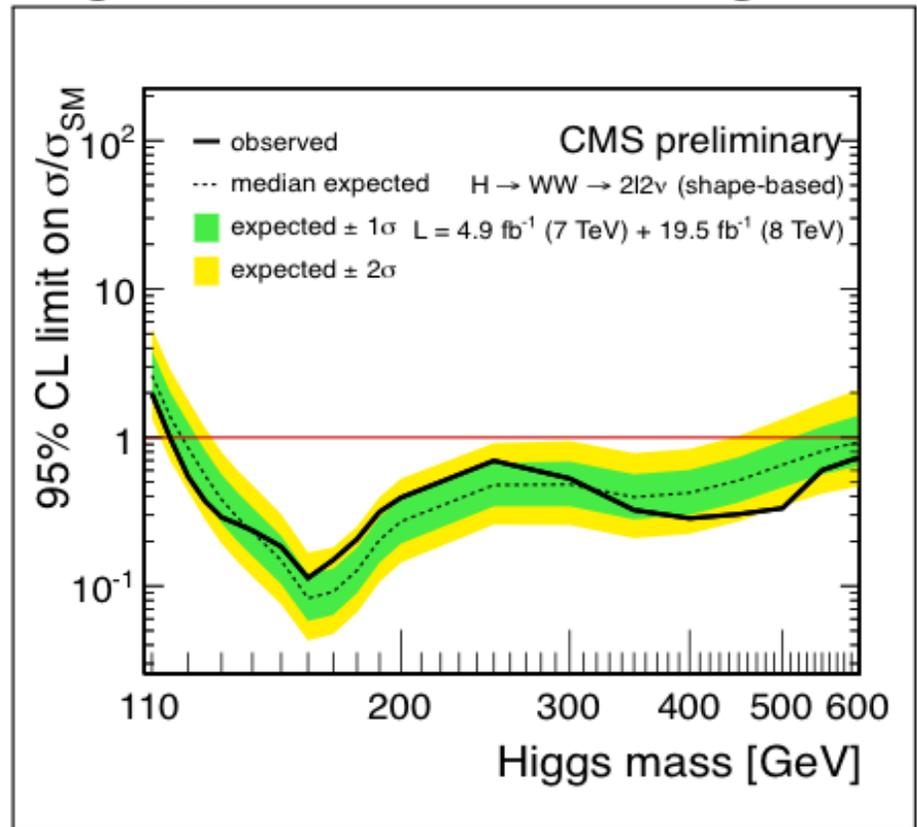


# H → WW

standard analysis



using  $m_H = 125$  GeV as background



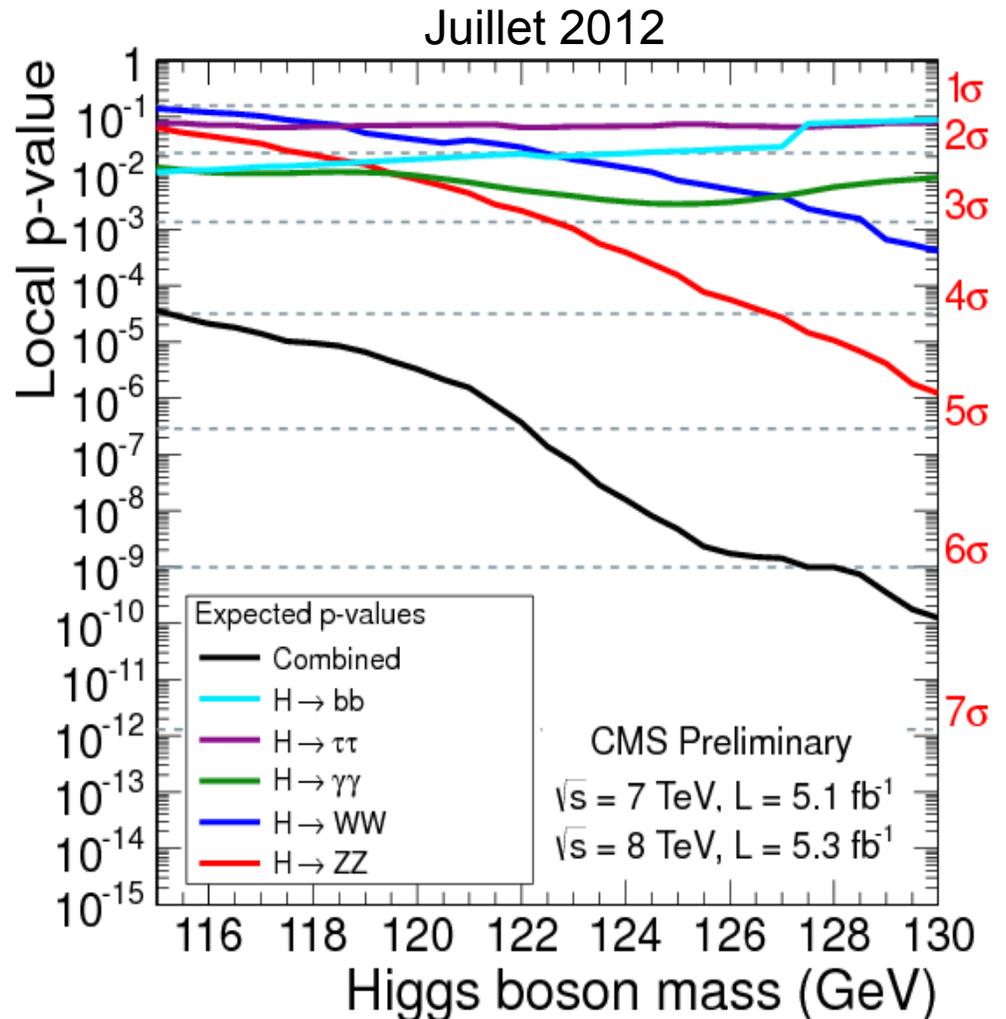
# Test statistique pour la découverte

On dénomme par **p-value** la probabilité qu'une fluctuation du bruit de fond produise un excès aussi grand que le signal moyen attendu pour un boson de Higgs ou observé.

Pour une masse donnée, on parlera de p-value **locale**.

On peut passer de la probabilité à la **significance** (en  $\sigma$ ).

Lorsqu'on regarde une zone étendue en masse, il y a un risque qu'une fluctuation arrive au hasard pour n'importe quelle masse. Tenir compte de cela (« **look elsewhere effect** ») va avoir tendance à diminuer la signification du résultat.



# Situation en Juillet 2012

Juillet 2012

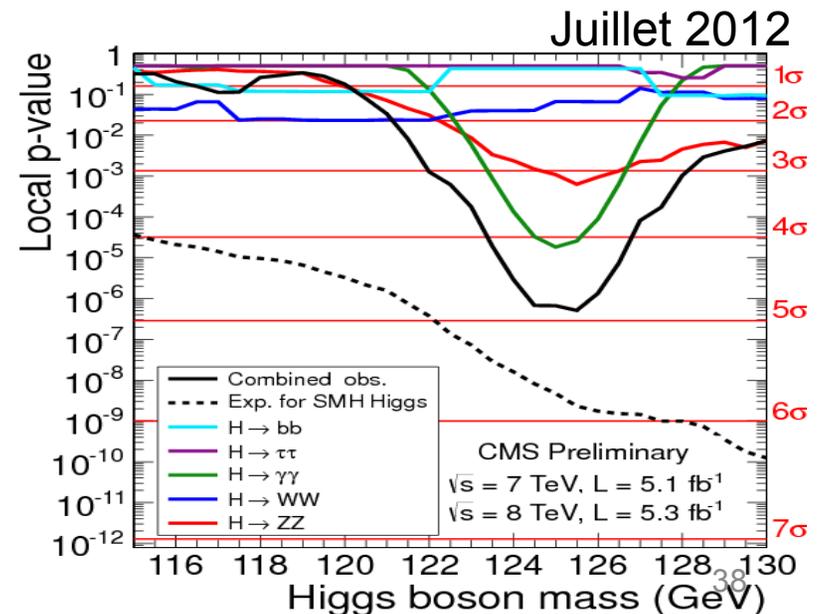
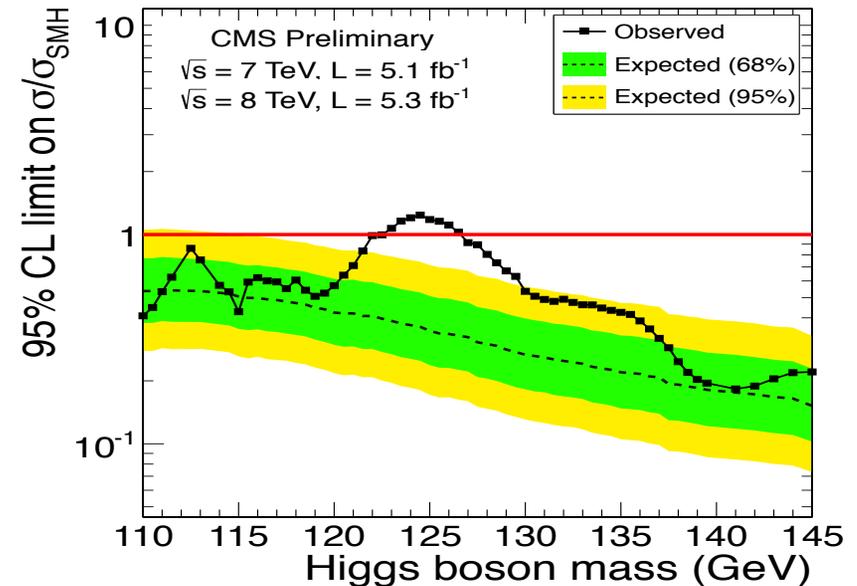
Analyses **re-optimisées** en 2012

Analyses dites « **blind** » (toutes les sélections sont déterminées avant de regarder dans la zone de signal) en 2012

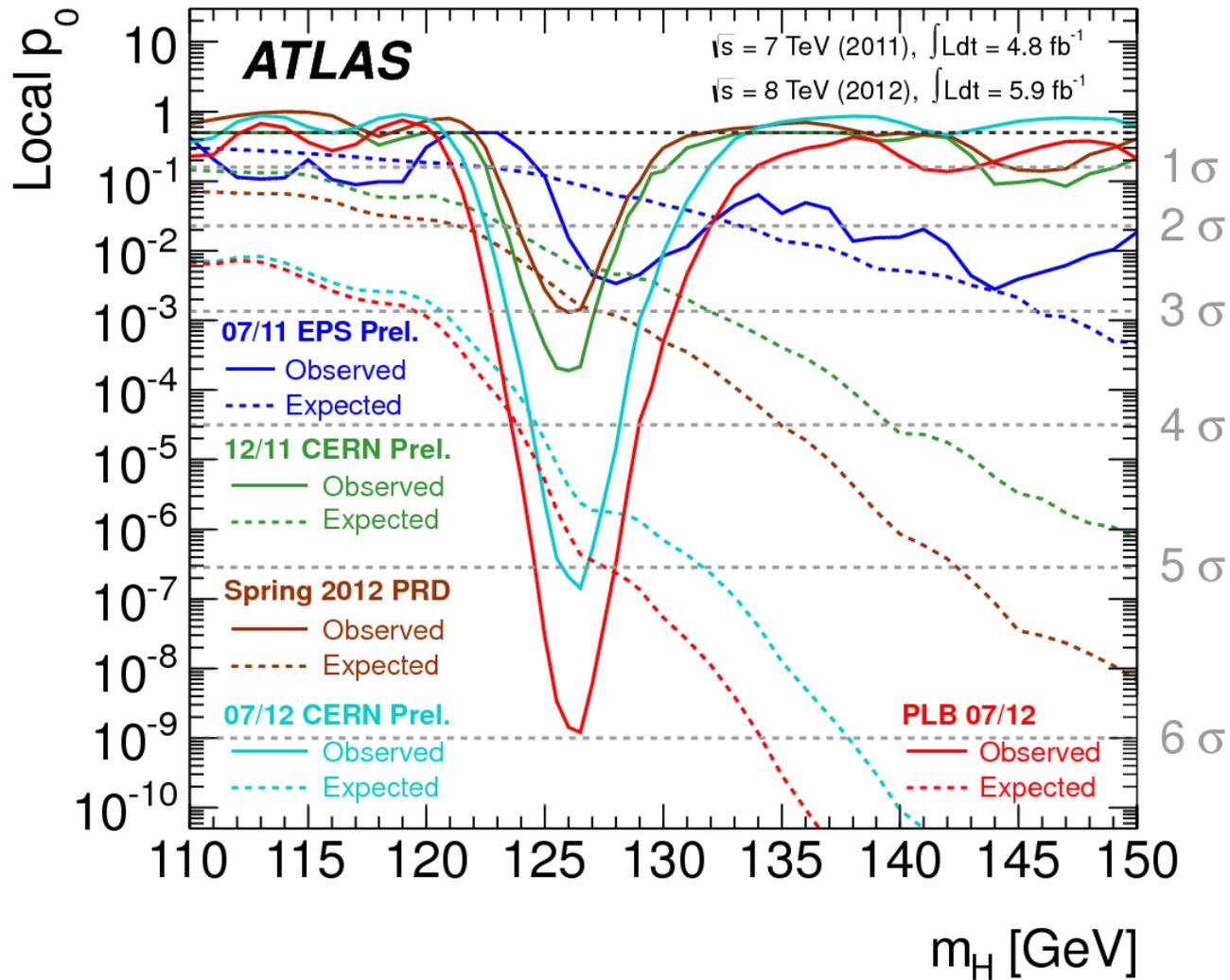
Nombreuses **vérifications** & analyses indépendantes

→ **Excès proche de 125 GeV**  
significance observée pour la combinaison des canaux : **4.9  $\sigma$**   
significance attendue : **5.9  $\sigma$**

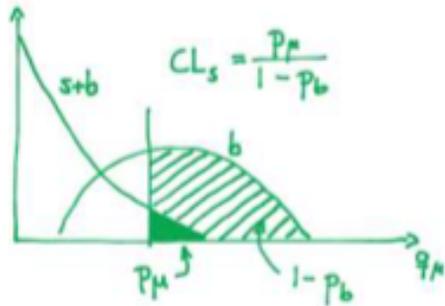
ATLAS aussi a annoncé une significane observée de **5 $\sigma$**  (pas exactement la même combinaison)



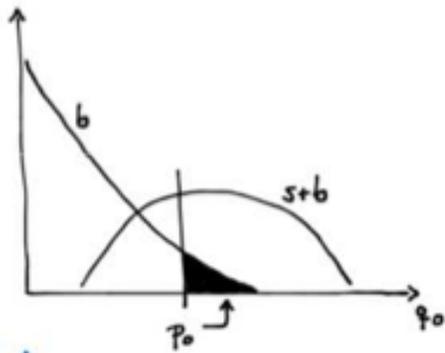
# Evolution de l'excès au cours du temps dans ATLAS



## Quelques définitions utiles...

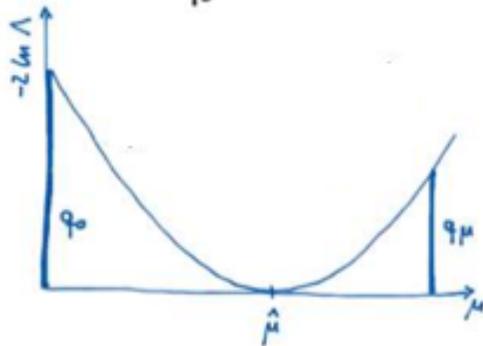


Test de compatibilité avec l'hypothèse signal+bruit de fond



Quantifie la probabilité d'un excès par rapport au bruit de fond seul

$5\sigma \sim 1/3$  millions  
 $3\sigma \sim 1/700$



Evalue l'intensité du signal

