



UPPSALA
UNIVERSITET

1477

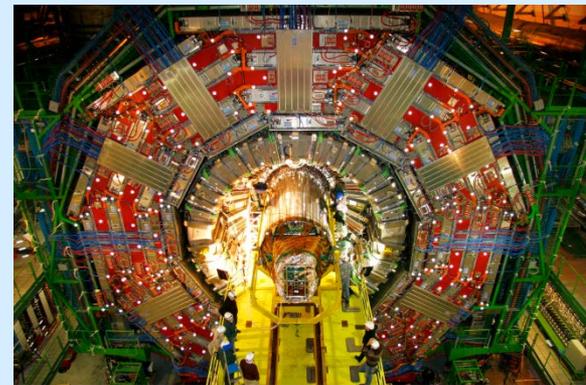
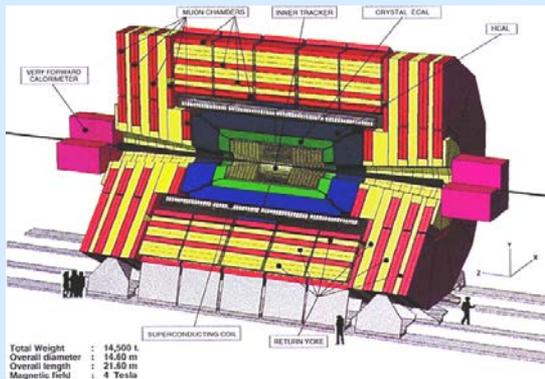
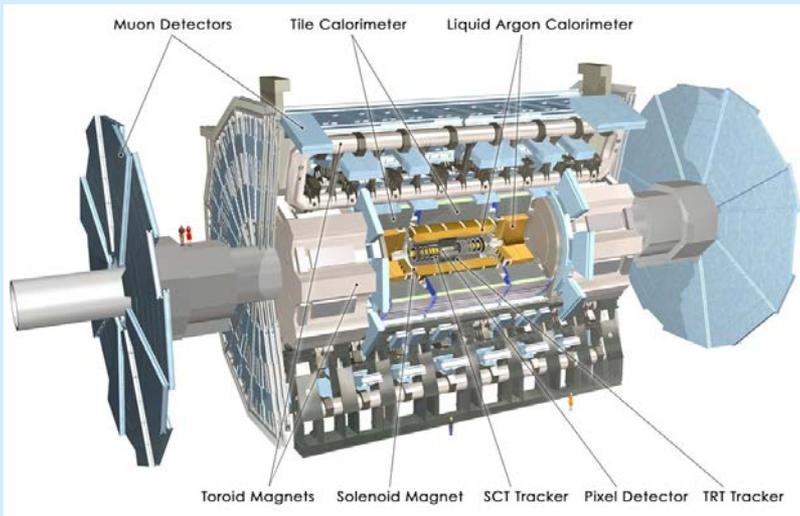


COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

La recherche pour le Higgs chargé au LHC

Tord Ekelöf
Université d'Uppsala

ATLAS et CMS



Le Boson Higgs reste à découvrir

La théorie quantique des champs dans sa forme originale (Yang-Mills) exige que les particules de force soient sans masse - comme le photon l'est.

On a trouvé expérimentalement que les particules de la force faible (W^+ , W^- et Z^0) avaient la propriété d'être très massives (de l'ordre de 100 fois la masse du proton).

Il était donc nécessaire de trouver dans la théorie un moyen d'attribuer de la masse aux particules de la force faible - mais pas à la particule de force électromagnétique (photon). Cela a été accompli par l'introduction du champ de Higgs.

Avec le LHC le voyage de découverte continue vers l'inconnu ...

Higgs
the mystery of mass

What causes particles to have mass? Why do the masses of fundamental particles differ so enormously - the top quark is more than 200,000 times heavier than the electron?

A solution has been developed by several physicists and takes the name of Peter Higgs. According to this, the whole of space is permeated by a field, similar in some ways to the electromagnetic field. As particles move through space they travel through this field. The interaction between the particles and the field is similar to the action of a viscous force felt by a particle moving through a thick liquid. The stronger the interaction of the particles with the Higgs field, the more mass they appear to have.

We know from quantum theory that fields have particles associated with them, so if the Higgs idea is right, there must be a Higgs particle. Finding it is the key to verifying whether our best hypothesis for the origin of mass is indeed correct.

$m_f = m_e \frac{G M}{r^2}$

Martin earned mass and weight.

$E = m c^2$

Lambert discovered that heat is equivalent to energy.

The Higgs mechanism would explain the origin of mass.

A simulation of the production of a Higgs particle decaying into two photons.

A simulation of the Higgs signal for its decay into four leptons (1 year of data taking at the LHC).

Events/500 MeV for 100 fb⁻¹

$H \rightarrow \gamma\gamma$

Higgs signal

$M_{\gamma\gamma}$ (GeV)

Events / 2 GeV

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

A simulation of the Higgs signal for its decay into four leptons (1 year of data taking at the LHC).

$M_{4\ell}$ (GeV)

Questions auxquelles le Modèle Standard n'a pas de réponse

- Pourquoi n'y a-t-il dans l'univers que de la matière et pas d'antimatière?
- Comment pouvons-nous unifier la force électrofaible et la force forte?
- De quoi est faite la matière noire?
- Nos descriptions des forces électrofaible et forte sont basées sur la conception des champs quantifiés dans le vide et notre description de la gravitation sur la base de la conception de l'espace-temps courbe - comment pouvons-nous trouver une description commune pour toutes les forces de la nature avec ces différents points de départ?

Hypothèses: supersymétrie et cordelettes

La motivation de la quête pour trouver une théorie plus générale qui pourra remplacer le Modèle Standard est le désir d'inclure la gravité dans la théorie afin d'obtenir un TOE - « Theory of everything ».

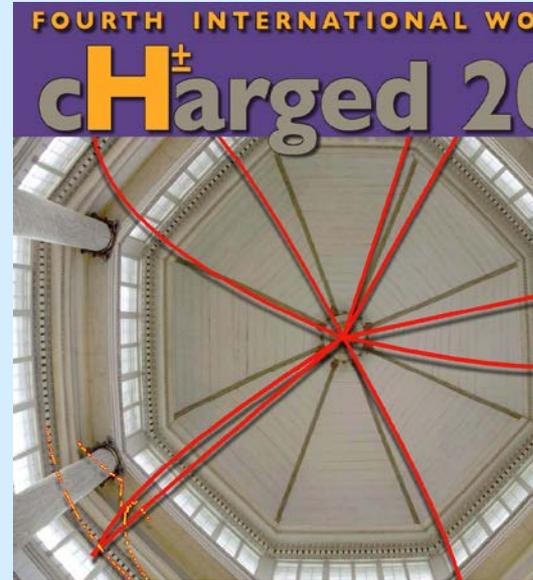
Dans cette optique, il est postulé

- qu' il y a une symétrie entre les particules de force et ceux de la matière, nommée la supersymétrie,
- qu' il y a plus de dimensions d'espace (jusqu'à 10) que les 3 que nous connaissons et
- que les plus petites unités de la matière ne sont pas des particules sans extension (des « points ») mais des cordelettes ou des membranes.

Des bosons de Higgs chargés

Une des conséquences de l'hypothèse de la supersymétrie est qu'il y aurait non seulement des bosons de Higgs neutres, mais aussi des bosons de Higgs électriquement chargés.

Un thème principal à l'université d'Uppsala au CERN est de rechercher des bosons de Higgs chargés au LHC .



Séminaire au Collège de France le 27 juin à 17 heures

L'extension minimale supersymétrique du Modèle Standard (MSSM)

Dans le modèle (SM) standard la cassure de la symétrie électrofaible (EWSB) se fait par un seul champ scalaire complexe doublet. Il en résulte une seule observable du boson Higgs, qui n'a, jusqu'à aujourd'hui, pas encore été découverte. Par conséquent, le mécanisme de EWSB reste en question.

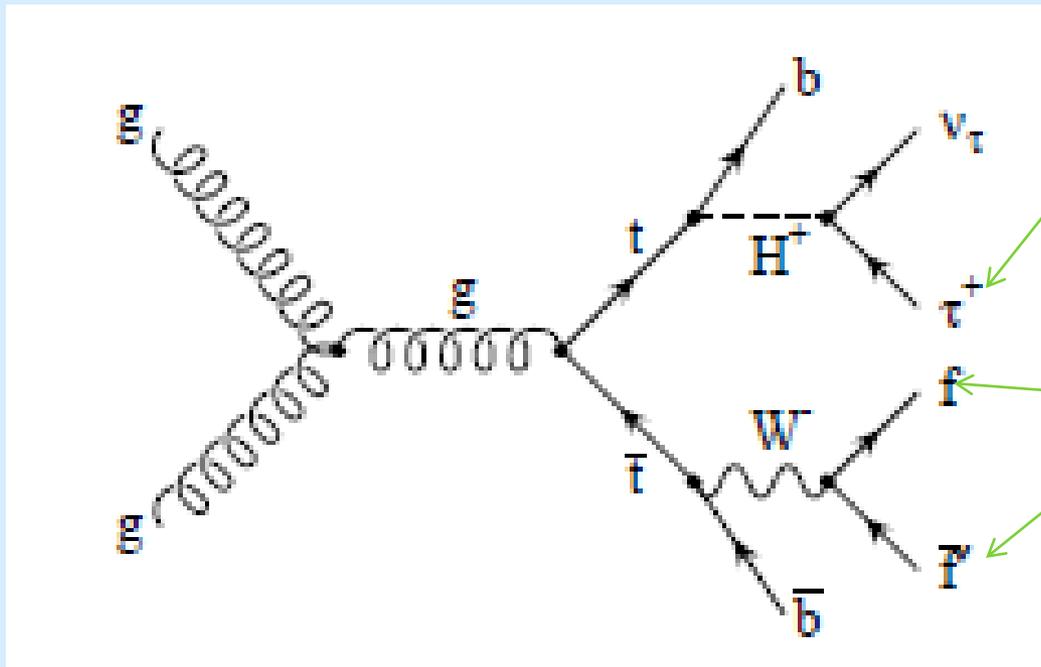
Au-delà de la SM, de nombreux modèles ont été proposés d'étendre le secteur de Higgs pour expliquer EWSB. Une extension simple est les deux Higgs doublets modèle (2HDM). Dans le 2HDM, il y a cinq états physiques. Deux d'entre eux sont chargés (H^+ et H^-) et trois sont neutres.

Comme le modèle standard (SM) ne contient aucune particule scalaire élémentaire chargée, l'observation d'un boson Higgs chargé indiquerait clairement la nouvelle physique au-delà du SM.

Par exemple, les modèles supersymétriques, prédisent l'existence de bosons de Higgs chargés. Dans un 2HDM de type II, tels que le secteur de Higgs de l'extension minima supersymétrique I du Modèle Standard (MSSM), le principal mode de production du H^+ dans le LHC est par la désintégration du quark top, pour un Higgs boson chargé de masse (m_{H^+}) plus petit que la masse du quark top (m_{top}).

La principale source de quarks top au LHC est la production de $t\text{-}\bar{t}$

La recherche au LHC pour le boson de Higgs chargé a porté jusqu'à présent sur la H^\pm dans une gamme de masses 90-160 GeV, en utilisant des événements $t\bar{t}$ avec un τ lepton qui se désintègre en leptons ou en hadrons dans l'état final, c'est à dire avec la topologie montré ci-dessous. Les résultats sont basés sur de données de collisions pp à $\sqrt{s} = 7$ TeV, recueillies en 2011 avec les expériences ATLAS (basée sur $4,6 \text{ fb}^{-1}$) et CMS (basé sur 2 fb^{-1}) au LHC.



Le τ peut se désintégrer en leptons ($e\nu$ ou $\mu\nu$) ou en hadrons (1 ou 3 mesons π chargés + des neutres+ ν)

Le $f\bar{f}$ est une paire de fermions qui peut être une paire de quarks (ud ou cs) ou une paire de leptons ($e\nu$, $\mu\nu$ ou $\nu\tau$)

Quatre états finaux sont possibles:

1. $W \rightarrow$ jets + $\tau \rightarrow$ jet (analysé ATLAS et CMS):

$t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(qq')(\tau \rightarrow qq'\nu)$,

Désintégration de W des hadrons (deux quarks \rightarrow deux jets) et de τ en un jet étroit (un ou trois pions chargés, plus neutres, plus d'énergie manquante)

2. $W \rightarrow$ jets + $\tau \rightarrow$ lepton (analysé par ATLAS):

$t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(qq')(\tau \rightarrow l\nu\nu)$,

Désintégration W des hadrons (deux quarks \rightarrow deux jets) et de τ en tau $\nu\nu$ ou $\mu\nu$ (un lepton chargé et grande énergie manquante)

3. $W \rightarrow$ lepton + $\tau \rightarrow$ jet (analysé par ATLAS et CMS):

$t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(l\nu)(\tau \rightarrow qq'\nu)$,

Désintégration W à $e\nu$ ou $\mu\nu$ (un lepton chargé et consommant le manque) et de τ en hadrons + ν (un ou trois pions chargés, plus neutres, plus d'énergie manquante)

4. $W \rightarrow$ lepton + $\tau \rightarrow$ lepton (analysé par CMS):

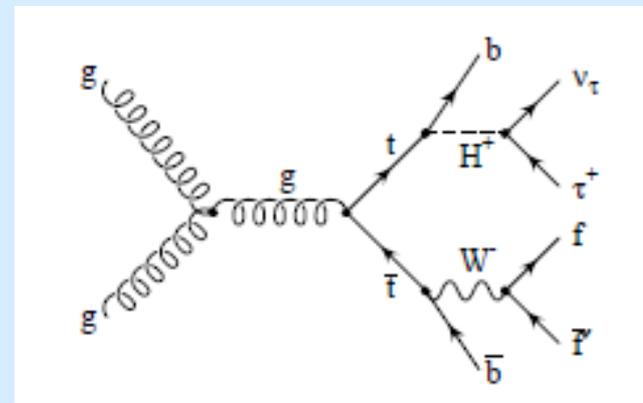
$t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(l\nu)(\tau \rightarrow l\nu\nu)$,

Désintégration de W à $e\nu$ ou $\mu\nu$ (un lepton chargé et consommant le manque) et de τ en un jet étroit (un ou trois pions chargés, plus neutres, plus grande énergie manquante)

1. $W \rightarrow$ jets + $\tau \rightarrow$ jet (analysé ATLAS et CMS):

$t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(qq')(\tau \rightarrow qq'v)$,

Désintégration de W des hadrons (deux quarks \rightarrow deux jets) et de τ en un jet étroit (un ou trois pions chargés, plus neutres, plus d'énergie manquante)



Les critères de sélection

- au moins quatre jets (à l'exclusion des jets tau) ayant $p_T > 20 \text{ GeV}$, dont au moins l'un est marqué b;
- exactement un τ jet avec $p_T > 40 \text{ GeV}$, trouvés dans $|\text{rapidité}| < 2.3$ et correspond à un objet trigger τ ;
- ni une seconde τ jet avec $p_T > 20 \text{ GeV}$, ni aucun électrons avec $E_T > 20 \text{ GeV}$, ni aucun muons avec $p_T > 15 \text{ GeV}$;
- $E_{\text{miss}T} > 65 \text{ GeV}$;
- de rejeter des événements dans lesquels une grande énergie manquante, $E_{\text{miss}T}$, est due à la résolution limitée de la mesure de l'énergie, le rapport suivant doit être satisfait

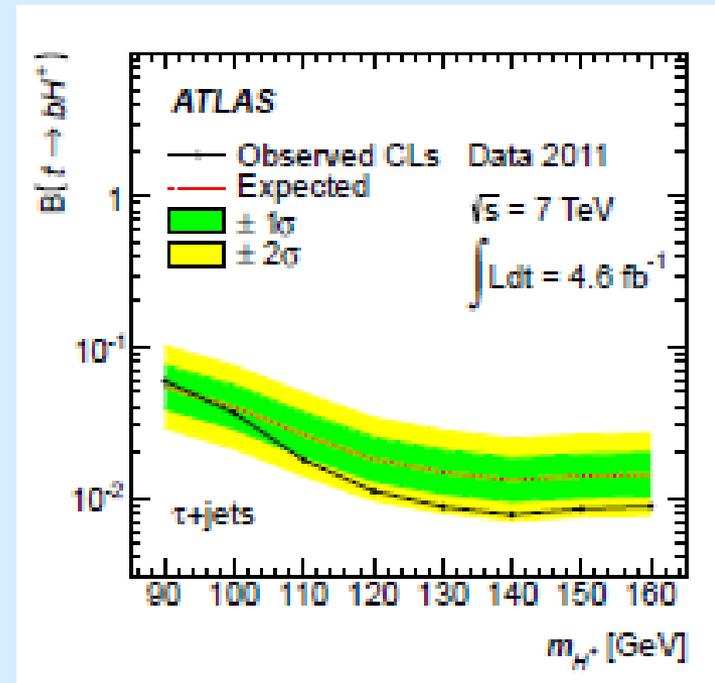
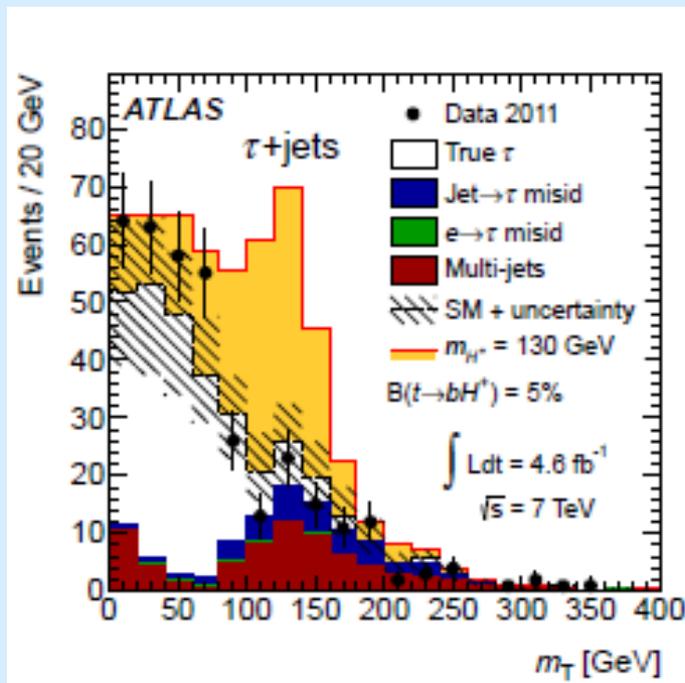
$$\frac{E_{\text{T}}^{\text{miss}}}{0.5 \text{ GeV}^{1/2} \cdot \sqrt{\sum p_T}} > 13;$$

Variable discriminante

$$m_T = \sqrt{2p_T^\tau E_T^{\text{miss}} (1 - \cos \Delta\phi_{\tau, \text{miss}})},$$

ATLAS

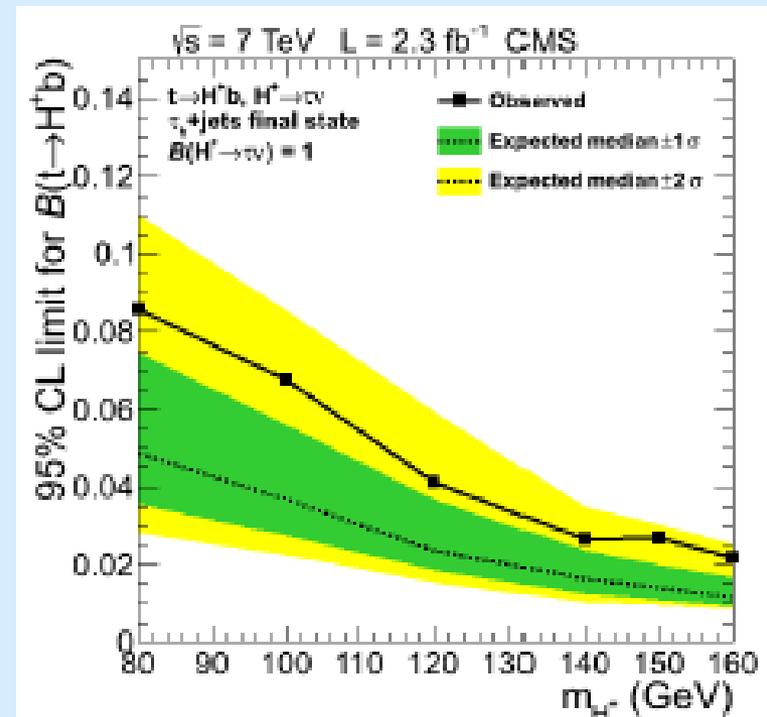
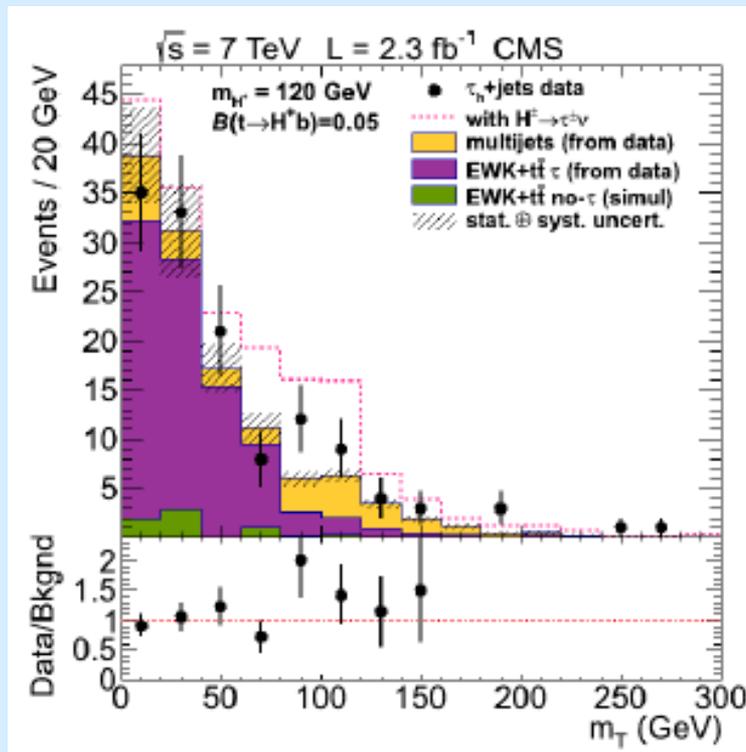
Sample	Event yield (τ +jets)
True τ (embedding method)	$210 \pm 10 \pm 44$
Misidentified $\text{jet} \rightarrow \tau$	$36 \pm 6 \pm 10$
Misidentified $e \rightarrow \tau$	$3 \pm 1 \pm 1$
Multi-jet processes	$74 \pm 3 \pm 47$
All SM backgrounds	$330 \pm 12 \pm 65$
Data	355
$t \rightarrow bH^+$ (130 GeV)	$220 \pm 6 \pm 56$
Signal+background	$540 \pm 13 \pm 85$



CMS

un détecteur différent
et d'autres critères de
sélection et d'analyse

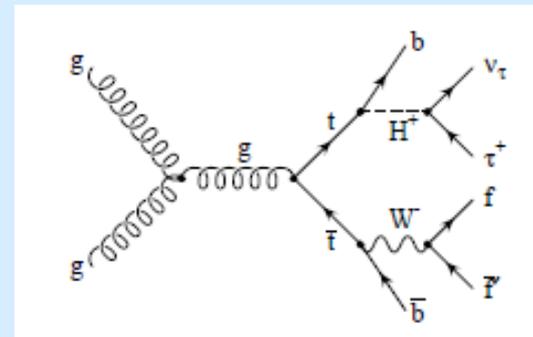
Source	$N_{ev}^{\tau_h+jets} \pm \text{stat.} \pm \text{syst.}$
HH + WH, $m_{H^+} = 120 \text{ GeV}$, $B(t \rightarrow H^+b) = 0.05$	$51 \pm 4 \pm 8$
multijets (from data)	$26 \pm 2 \pm 1$
EWK+t \bar{t} τ (from data)	$78 \pm 3 \pm 11$
EWK+t \bar{t} no- τ	$6.0 \pm 3.0 \pm 1.2$
residual $Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$	$7.0 \pm 2.0 \pm 2.1$
residual $WW \rightarrow \tau\nu_\tau\tau\nu_\tau$	$0.35 \pm 0.23 \pm 0.09$
Total expected background	$119 \pm 5 \pm 12$
Data	130



2. $W \rightarrow \text{jets} + \tau \rightarrow \text{lepton}$ (analysé par ATLAS):

$t\text{-}t^+ \rightarrow bbWH^+ \rightarrow bb(qq')(\tau \rightarrow l\nu)$

Désintégration W des hadrons (deux quarks \rightarrow deux jets)
et de τ en tau evv ou $\mu\nu\nu$ (un lepton chargé et grande énergie manquante)



Critères de sélection

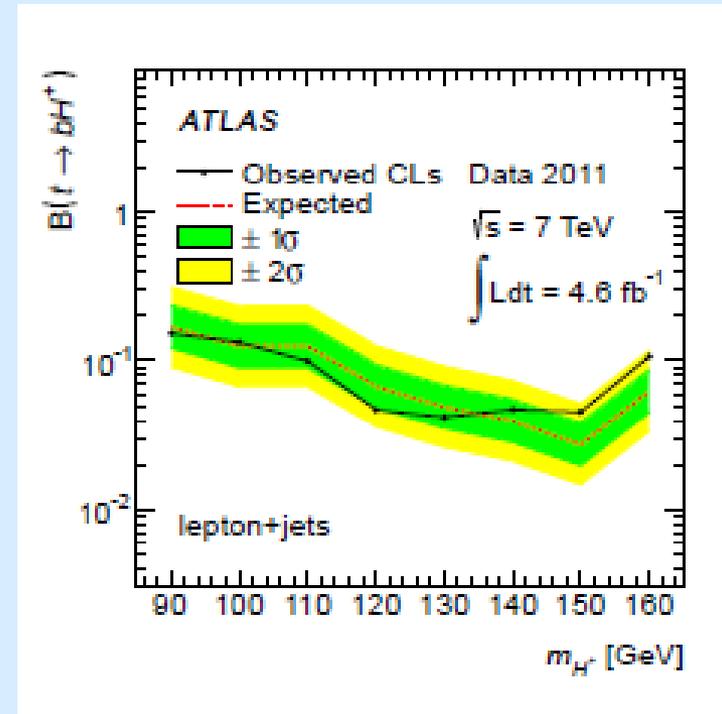
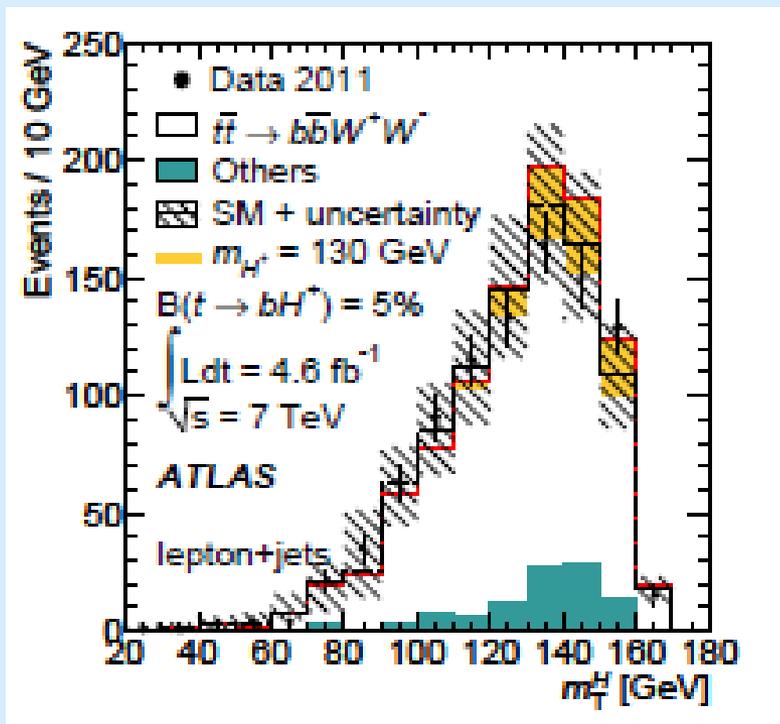
- exactement un lepton ayant $E_T > 25 \text{ GeV}$ (électrons) ou $p_T > 20 \text{ GeV}$ (muon) et adaptée à l'objet de trigger correspondant, ni un deuxième lepton, ni un jet τ dans l'événement;
- au moins quatre jets avec $p_T > 20 \text{ GeV}$, avec exactement deux d'entre eux étant identifiés comme des quarks b;
- $E_{\text{miss}} > 40 \text{ GeV}$ et, afin de discriminer entre les E_{miss} découlant de neutrinos et de leptons isolés mal reconstruits, cette exigence est serrée à $E_{\text{miss}} \times |\sin\phi_{\text{miss}}| > 20 \text{ GeV}$ si l'angle azimutal ϕ , E_{miss} entre le lepton et E_{miss} est plus petit que $\pi/6$.

Variable discriminante

M_{τ}^H représente une limite inférieure à la masse du boson chargée (W ou Higgs)

$$(m_{\tau}^H)^2 = \left(\sqrt{m_{\text{top}}^2 + (\vec{p}_T^l + \vec{p}_T^b + \vec{p}_T^{\text{miss}})^2} - p_T^b \right)^2 - (\vec{p}_T^l + \vec{p}_T^{\text{miss}})^2.$$

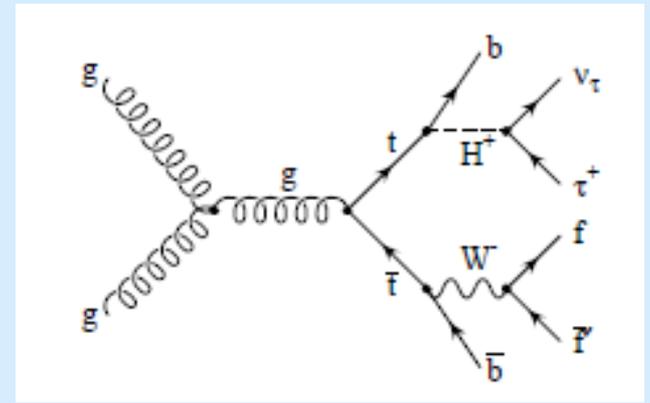
Sample	Event yield (lepton+jets)
$t\bar{t}$	$840 \pm 20 \pm 150$
Single top quark	$28 \pm 2 \begin{smallmatrix} +8 \\ -6 \end{smallmatrix}$
W +jets	$14 \pm 3 \begin{smallmatrix} +6 \\ -3 \end{smallmatrix}$
Z +jets	$2.1 \pm 0.7 \begin{smallmatrix} +1.3 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$
Diboson	$0.5 \pm 0.1 \pm 0.2$
Misidentified leptons	$55 \pm 10 \pm 20$
All SM backgrounds	$940 \pm 22 \pm 150$
Data	933
$t \rightarrow bH^+$ (130 GeV)	$120 \pm 4 \pm 26$
Signal+background	$990 \pm 21 \pm 140$



3. $W \rightarrow \text{lepton} + \tau \rightarrow \text{jet}$ (analysé par ATLAS et CMS):

$t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(l\nu)(\tau \rightarrow qq'\nu)$,

Désintégrations W à $e\nu$ ou $\mu\nu$ (un lepton chargé et consommant le manque) et de τ en hadrons + ν (un ou trois pions chargés, plus neutres, plus d'énergie manquante)



Critères de sélection

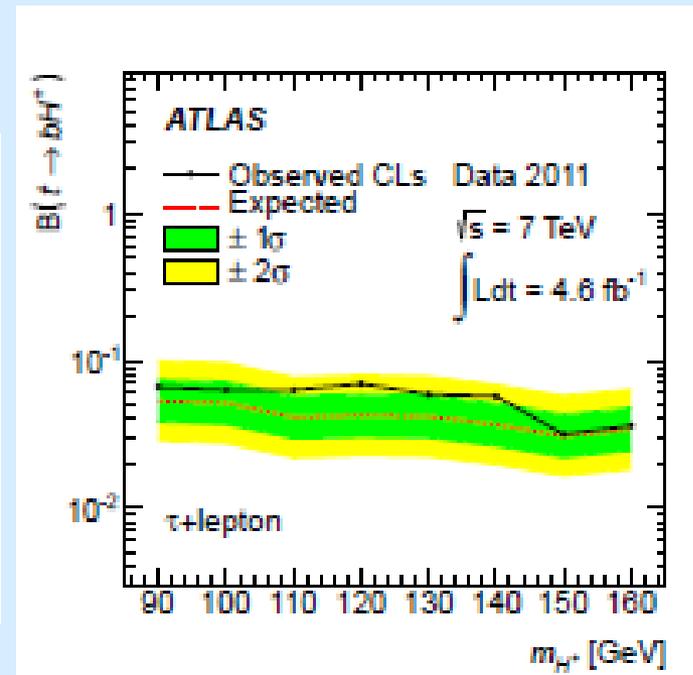
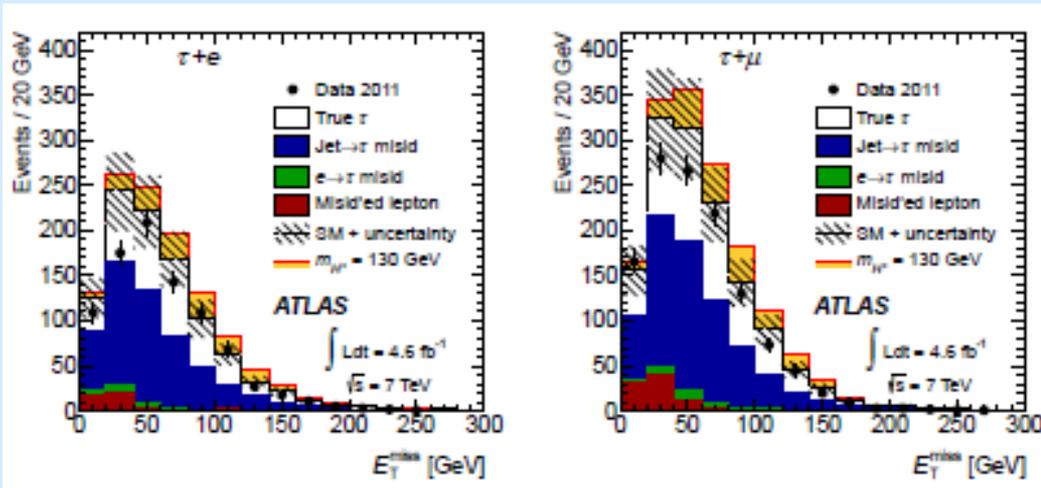
- exactement un lepton avec $HE > 25 \text{ GeV}$ (électrons) ou $p_T > 20 \text{ GeV}$ (muon) et lié à l'objet de trigger correspondant, et pas d'autres électrons ou muons;
- exactement un jet τ avec $p_T > 20 \text{ GeV}$ et une charge électrique opposée à celle du lepton;
- au moins deux jets de $p_T > 20 \text{ GeV}$, dont au moins un jet b-tagged;
- $\Sigma p_T > 100 \text{ GeV}$ dans le but de supprimer des événements multi-jets, d'ailleurs PPT est la somme des moments transversaux de toutes les traces associées avec le sommet primaire. Ces traces doivent passer des coupes de qualité sur le nombre de coordonnées mesurés et avoir $p_T > 1 \text{ GeV}$.

Variable discriminante

L'énergie transverse manquante qui est reconstruite à partir des grappes tridimensionnelles de cellules débruitées dans le calorimètre et à partir de traces de muons reconstruites dans le spectromètre de muon et les détecteurs de trace intérieure.

ATLAS

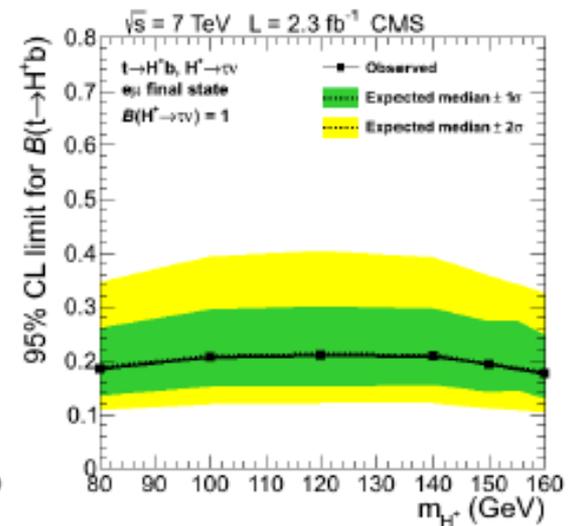
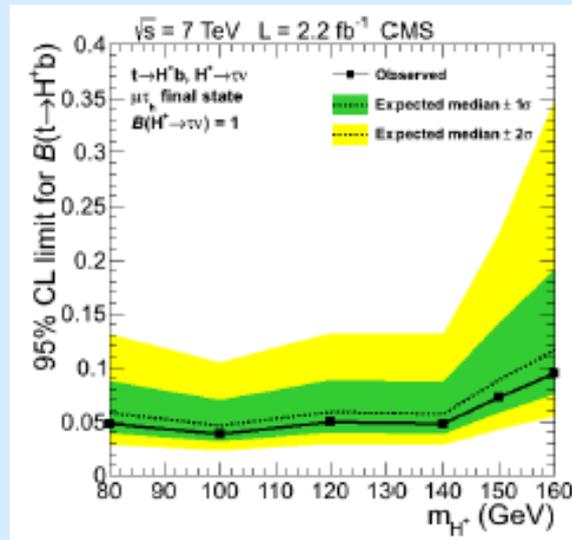
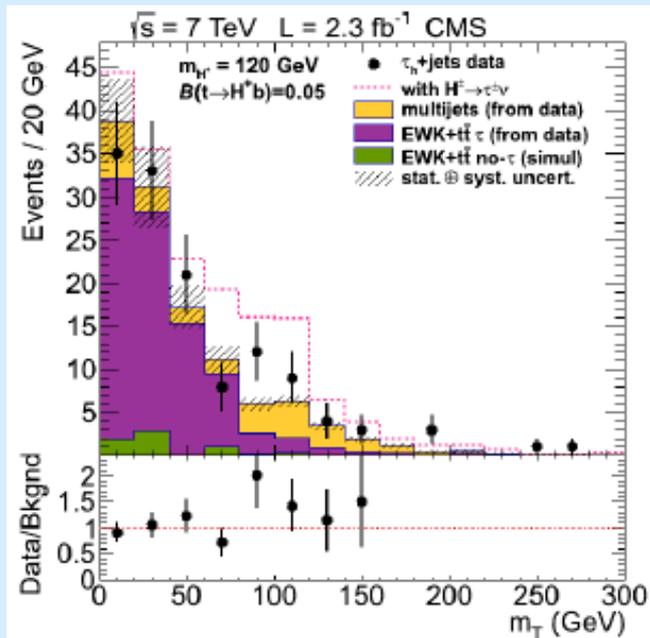
Sample	Event yield (τ +lepton)	
	$\tau + e$	$\tau + \mu$
True τ +lepton	$430 \pm 14 \pm 59$	$570 \pm 15 \pm 75$
Misidentified jet $\rightarrow \tau$	$510 \pm 23 \pm 86$	$660 \pm 26 \pm 110$
Misidentified $e \rightarrow \tau$	$33 \pm 4 \pm 5$	$34 \pm 4 \pm 6$
Misidentified leptons	$39 \pm 10 \pm 20$	$90 \pm 10 \pm 34$
All SM backgrounds	$1010 \pm 30 \pm 110$	$1360 \pm 30 \pm 140$
Data	880	1219
$t \rightarrow bH^+$ (130 GeV)	$220 \pm 6 \pm 29$	$310 \pm 7 \pm 39$
Signal+background	$1160 \pm 30 \pm 100$	$1570 \pm 30 \pm 130$



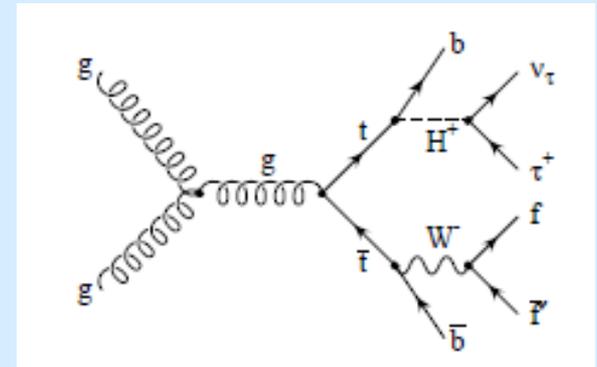
CMS

a different detector
and other selection
criteria and analysis

Source	$N_{ev}^{e\tau b} \pm \text{stat.} \pm \text{syst.}$	$N_{ev}^{\mu\tau b} \pm \text{stat.} \pm \text{syst.}$
HH+HW, $m_{H^\pm} = 120 \text{ GeV}$, $B(t \rightarrow H^\pm b) = 0.05$	$51 \pm 3 \pm 8$	$89 \pm 4 \pm 13$
misidentified τ (from data)		
$t\bar{t} \rightarrow WbW\bar{b} \rightarrow \ell\nu b \tau\nu\bar{b}$	$100 \pm 3 \pm 14$	$162 \pm 4 \pm 23$
$t\bar{t} \rightarrow WbW\bar{b} \rightarrow \ell\nu b \ell\nu\bar{b}$	$9.0 \pm 0.9 \pm 1.8$	$13.0 \pm 1.2 \pm 2.5$
$Z/\gamma^* \rightarrow ee, \mu\mu$	$4.8 \pm 1.8 \pm 1.3$	$0.7 \pm 0.7 \pm 0.7$
$Z/\gamma^* \rightarrow \tau\tau$	$17.0 \pm 3.3 \pm 3.0$	$26.0 \pm 4.3 \pm 6.1$
single top quark	$7.9 \pm 0.4 \pm 1.1$	$13.5 \pm 0.5 \pm 1.9$
diboson	$1.3 \pm 0.1 \pm 0.2$	$2.0 \pm 0.2 \pm 0.3$
Total expected background	$194 \pm 8 \pm 20$	$306 \pm 11 \pm 32$
Data	176	288



4. $W \rightarrow \text{lepton} + \tau \rightarrow \text{lepton}$ (analysé par CMS):
 $t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}WH^+ \rightarrow b\bar{b}(l\nu)(\tau \rightarrow l\nu\nu)$,
 Désintégration de W à $e\nu$ ou $\mu\nu$ (un lepton chargé et consommant le manque) et de τ en un jet étroit (un ou trois pions chargés, plus neutres, plus grande énergie manquante)



Critères de sélection

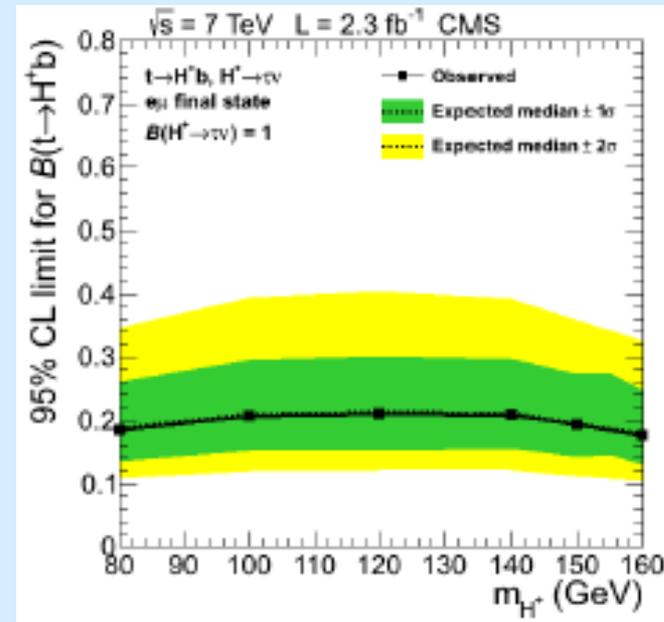
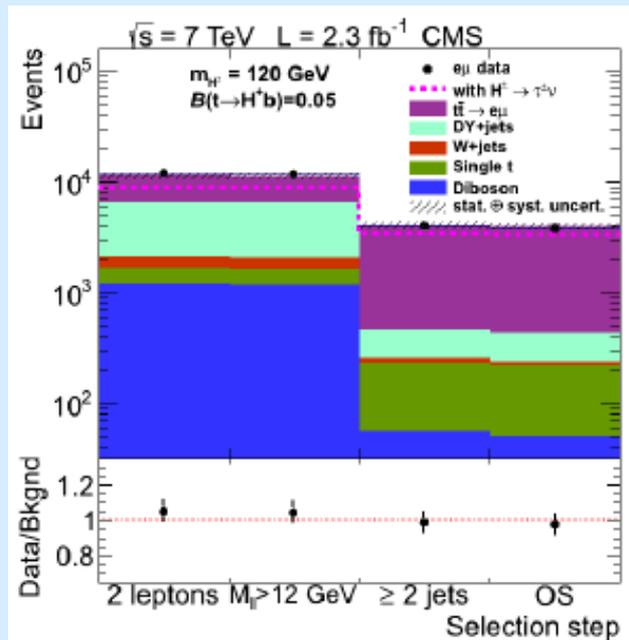
- au moins un électron isolé et au moins un muon isolé dans un cône de rayon $\Delta R = 0,3$ autour du lepton avec $p_T > 20 \text{ GeV}$ avec la rapidité $< 2,5$ (2,4) pour les électrons (muons).
- au moins deux jets avec $p_T > 30 \text{ GeV}$ avec la rapidité $< 2,4$.
- les leptons sont tenus d'être séparés de tous les jets sélectionnés par une distance $\Delta R > 0,4$.
- la masse invariante des paires électron-muon, $m_{e\mu}$, doit dépasser 12 GeV
- l'électron et le muon sont tenus d'avoir des charges électriques opposées.

Variable discriminante

Le nombre d'événements qui passent la sélection moins le nombre d'événements bruit de fond estimée à partir de la simulation Monte Carlo

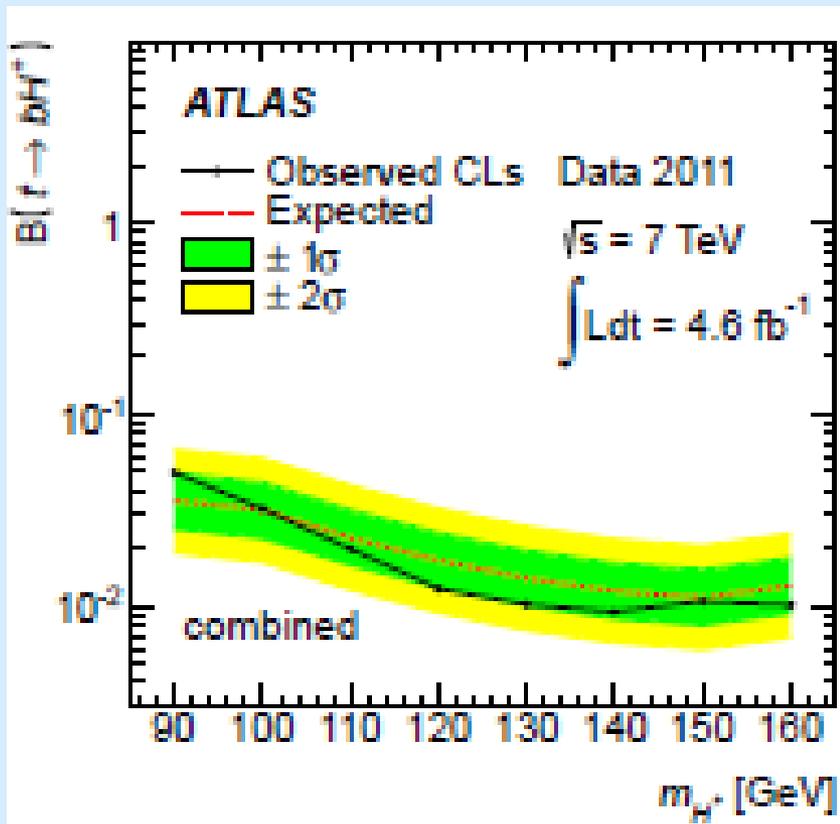
CMS

Source	$N_{ev}^{e\mu} \pm \text{stat.} \pm \text{syst.}$
HH+WH, $m_{H^+} = 120 \text{ GeV}$, $B(t \rightarrow H^+b) = 0.05$	$125 \pm 9 \pm 13$
$t\bar{t}$ dileptons	$3423 \pm 35 \pm 405$
other $t\bar{t}$	$23 \pm 3 \pm 3$
$Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell$	$192 \pm 12 \pm 19$
W+jets	$14 \pm 6 \pm 2$
single top quark	$166 \pm 3 \pm 18$
diboson	$48 \pm 2 \pm 5$
Total expected background	$3866 \pm 38 \pm 406$
Data	3875

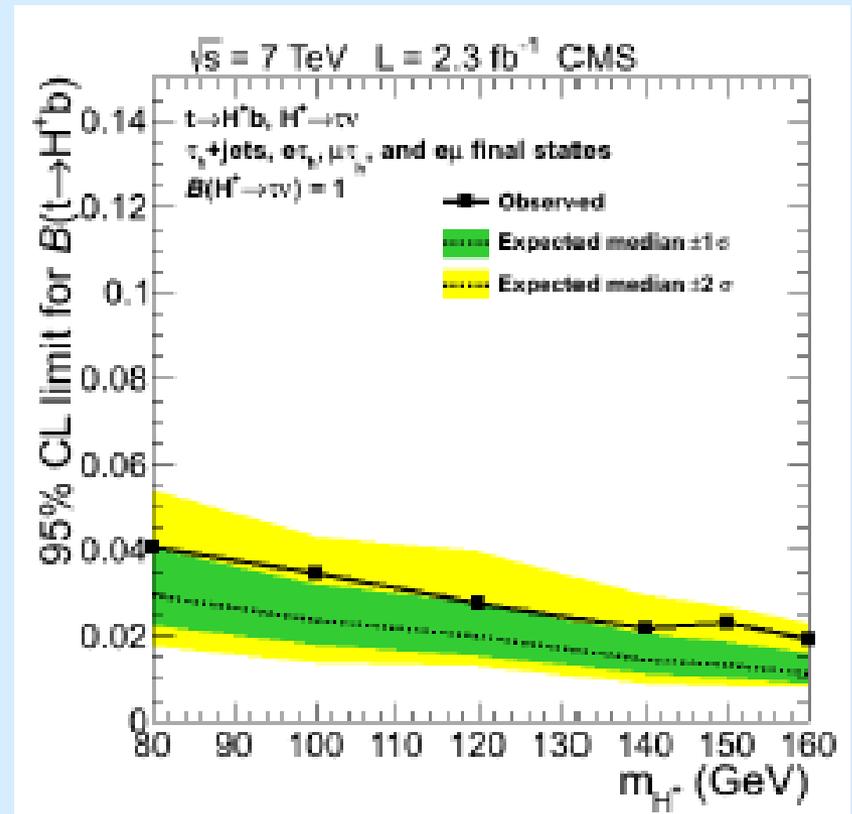


Combinaison de tous le canaux analysés

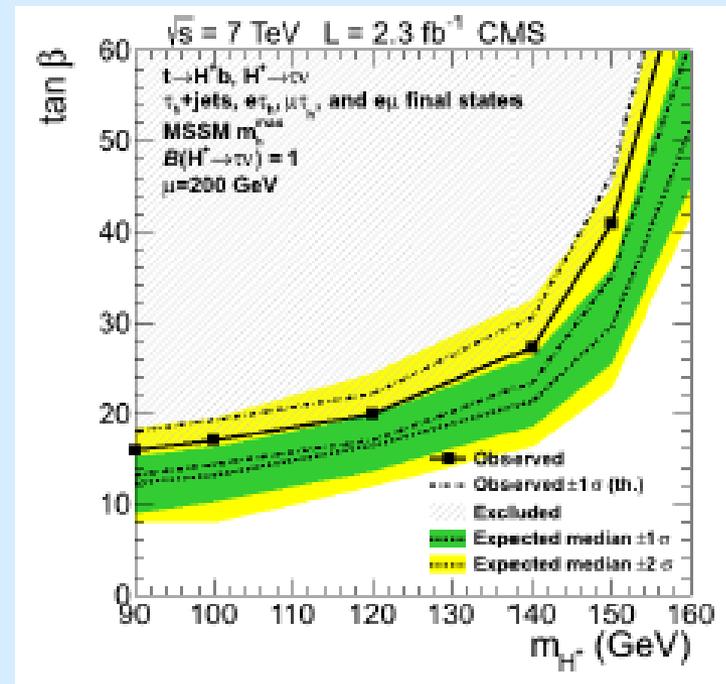
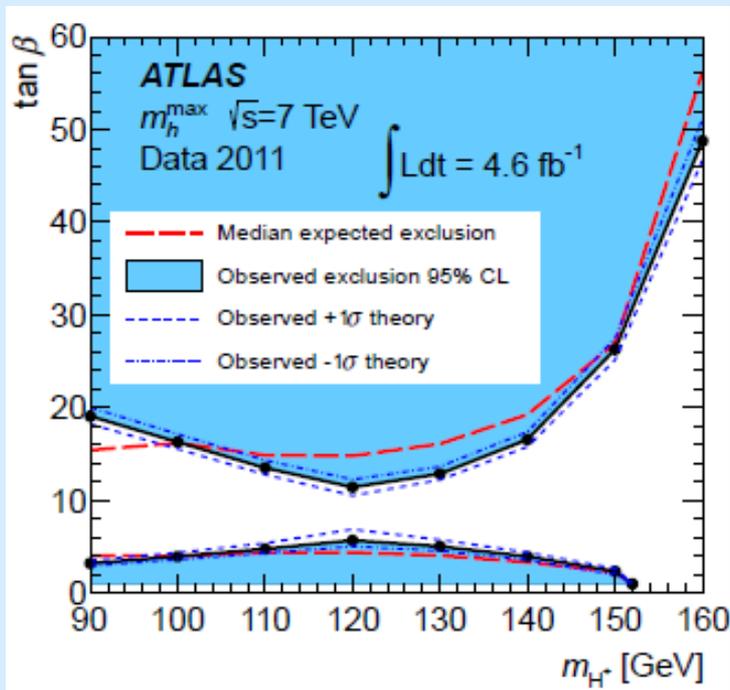
ATLAS



CMS



Interprétation des résultats dans le m_h^{\max} scenario du Minimal SuperSymmetric Model MSSM



Conclusions

Le boson Higgs chargé est recherché au LHC en top-antitop événements, dans le mode de désintégration $t \rightarrow + bH$ suivie par $H + \rightarrow \tau\nu$. Jusqu'ici, un total de $4,6 \text{ fb}^{-1}$ et 2 fb^{-1} de données sur les collisions pp ont été recueillis en 2011 à $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ et analysées à cet effet par les expériences ATLAS et CMS, respectivement.

Quatre différents états finaux ont été considérée qui se caractérisent par la présence d'un τ se désintégrant en un lepton chargé ou en un jet hadronique, un W se désintégrant en un lepton chargé ou en deux jets hadroniques, un manque d'énergie transversale et de deux jets b accompagnants.

Les données observées se trouvent être en accord avec les prédictions SM. En supposant que $B(H + \rightarrow \tau\nu) = 100\%$, des limites supérieures de confiance de 95% ont été fixé pour le rapport de branchement $B(t \rightarrow BH+)$ entre 4% ($M_{H+} = 80 \text{ GeV}$) et 1% ($M_{H+} = 160 \text{ GeV}$).

Ces résultats constituent une amélioration significative par rapport aux limites trouvés par les expériences du Tevatron?

Interprété dans le contexte du scénario m_h^{\max} du MSSM, la domaine au-dessus $\tan\beta$ 12-26, ainsi que celui entre $\tan\beta$ 1 et 2-6, peuvent être exclus dans la gamme de masse $90 \text{ GeV} < m_{H+} < 150 \text{ GeV}$.