

Les résultats du LHC sur le boson de Higgs

G.Unal (CERN)

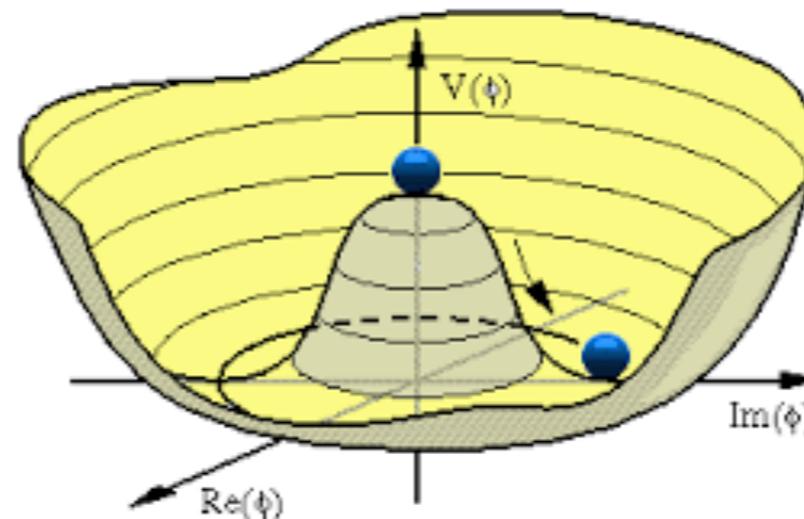
Revue des résultats d'ATLAS et CMS

Congrès SFP 2015, Strasbourg

Le boson de Higgs dans le Modèle Standard

- Modèle Standard:

- Fermions (quarks, lepton) particules élémentaires de matière
- Interactions électromagnétique, forte et faible décrites par théorie de jauge => prédit des bosons intermédiaires de masse nulle
- Les bosons W,Z sont massifs ($\sim 80,90$ GeV). Comment préserver les "bonnes" propriétés de la théorie (renormalisable) ?
- Brisure spontanée de symétrie => Mécanisme de Brout-Englert-Higgs pour les théories de jauge

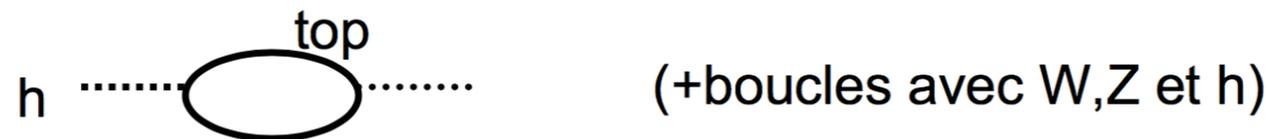


- L'application de ce mécanisme au Modèle Standard prédit l'existence d'un boson scalaire massif
- L'étude de la brisure de la symétrie électrofaible et la recherche puis l'étude du boson de Higgs est l'un des objectifs majeurs du LHC
- Dans le Modèle Standard, la masse des fermions est aussi générée par le champ de Higgs via des couplages du type $H f f$

Quelques propriétés du boson de Higgs

- Couplage proportionnel à la masse des particules
- Se désintègre très rapidement (10^{-7} fs pour une masse de ~ 125 GeV)
- Particule scalaire
- Sa masse n'est pas protégée par une symétrie
- Si échelle de nouvelle physique $\Lambda \sim$ masse de Planck, difficile de préserver $m(H) \sim 100$ GeV

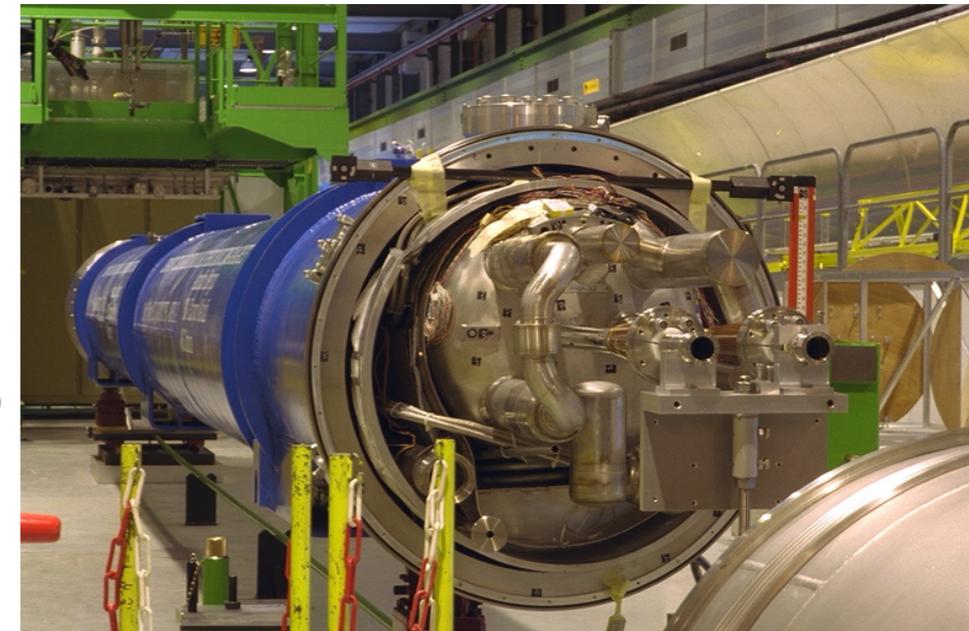
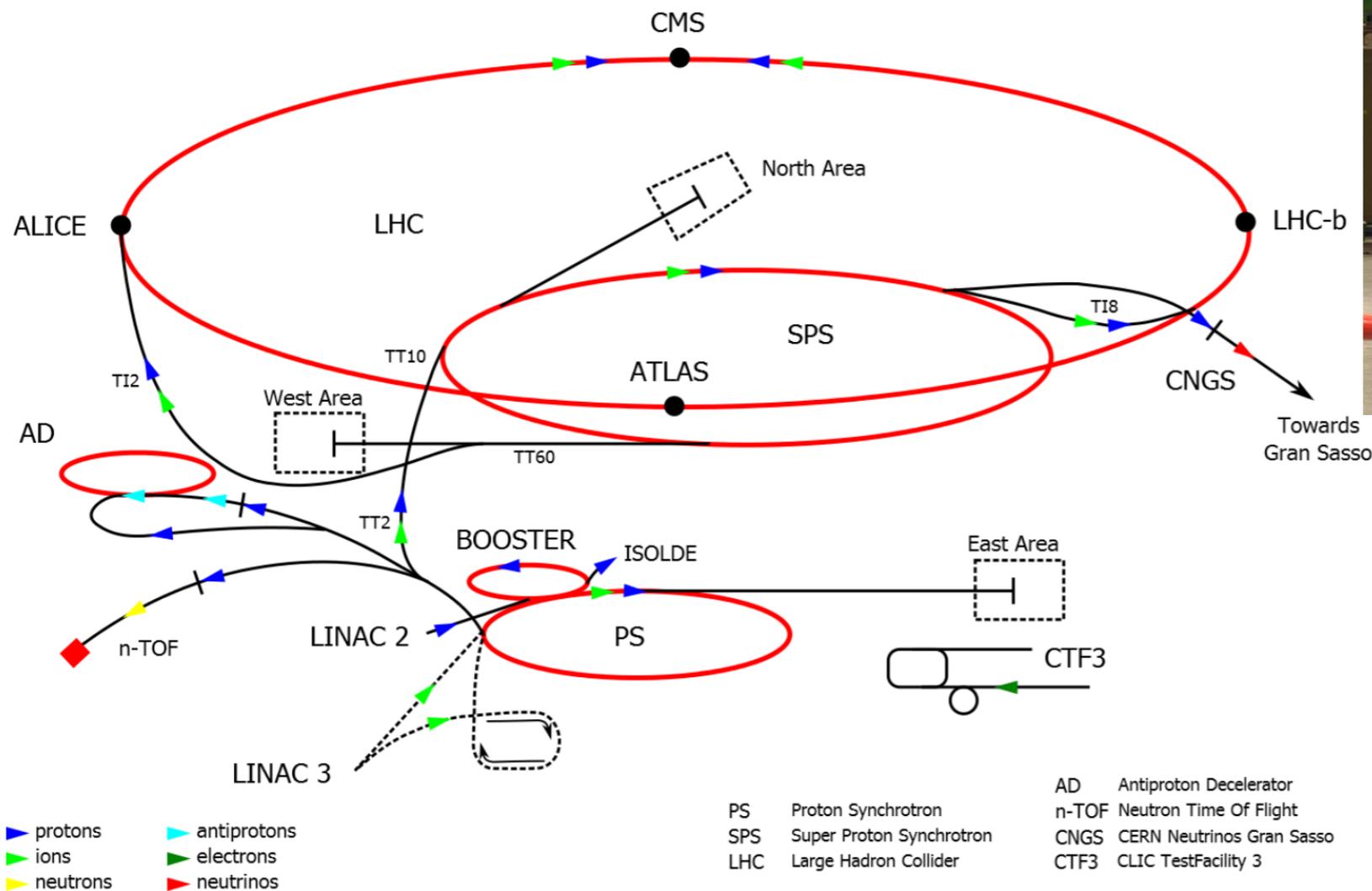
Corrections radiatives à la masse du Higgs:



$$\delta m_h^2 \sim - m_{\text{top}}^2 / (4\pi^2 v^2) \Lambda^2 \quad (\Lambda = \text{échelle de nouvelle physique})$$

- sauf si il y a de la nouvelle physique à $O(\text{TeV})$
- Exemple: Supersymétrie
 - les nouvelles particules compensent les contributions du Modèle Standard

La source de bosons de Higgs: Le LHC au CERN



Dipole de 8.3 T pour courber les protons
NbTi à T=1.9K

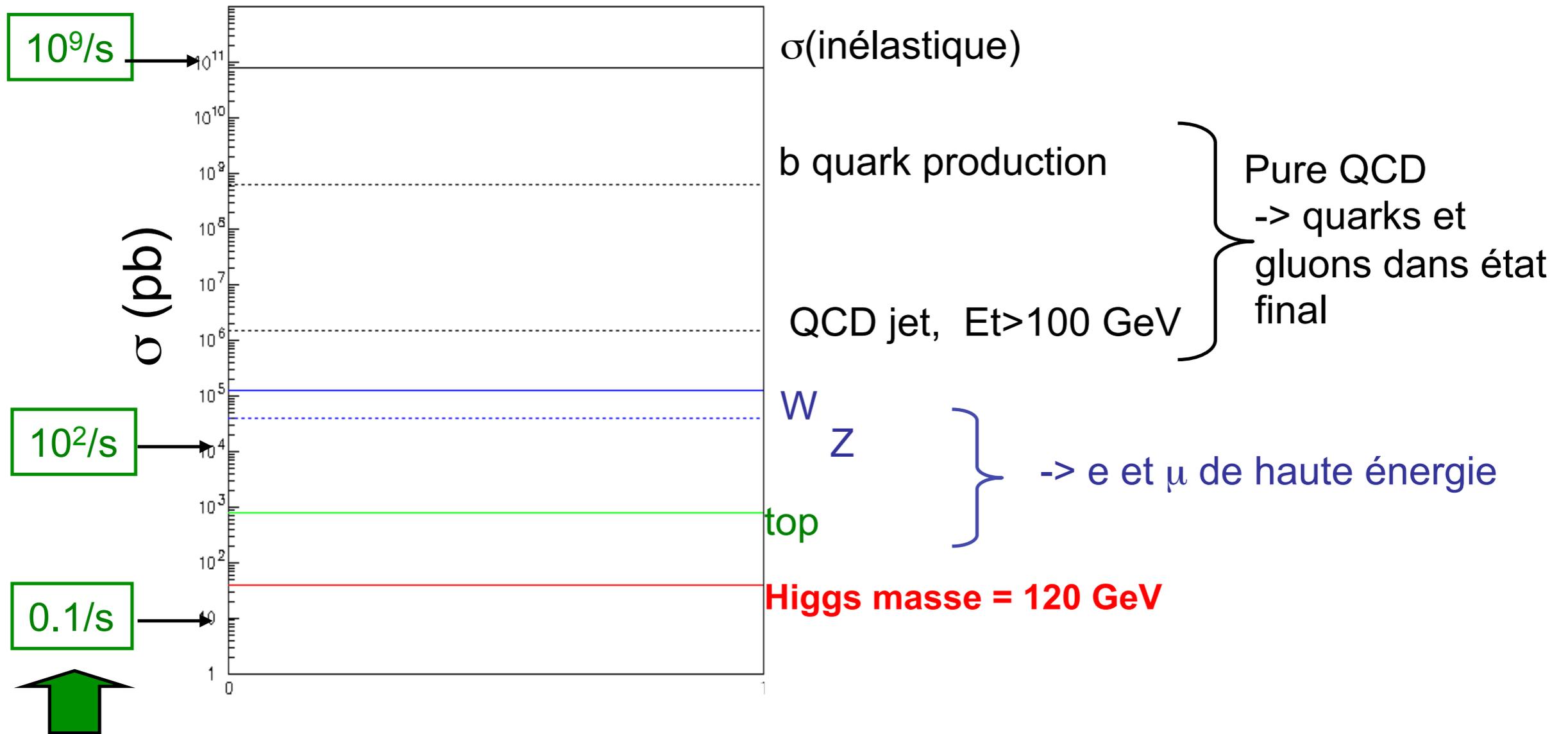
Période 2010-2012 : Opération à énergie réduite
 (8 TeV dans le centre de masse au lieu de 14 TeV nominal)
 mais taux de collision déjà ~75% du nominal

Year	Beam energy (TeV)	k	N (10^{11})	Bunch spacing (ns)	Luminosity L ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Stored energy (MJ)
May 2010	3.5	13	0.24	> 1000	2.4×10^{29}	0.2
August 2010	3.5	50	1.0	500	1.0×10^{31}	2.8
October 2010	3.5	368	1.0	150	2.1×10^{32}	24
October 2011	3.5	1380	1.45	50	3.6×10^{33}	110
October 2012	4	1376	1.6	50	7.7×10^{33}	140
Design	7	2808	1.15	25	1.0×10^{34}	360

Luminosité intégrée: 5 fb⁻¹ à 7 TeV en 2011,
 20 fb⁻¹ à 8 TeV en 2012

**Les résultats sur le boson de Higgs ont été
 obtenus grâce aux très bonnes performances de
 l'accélérateur**

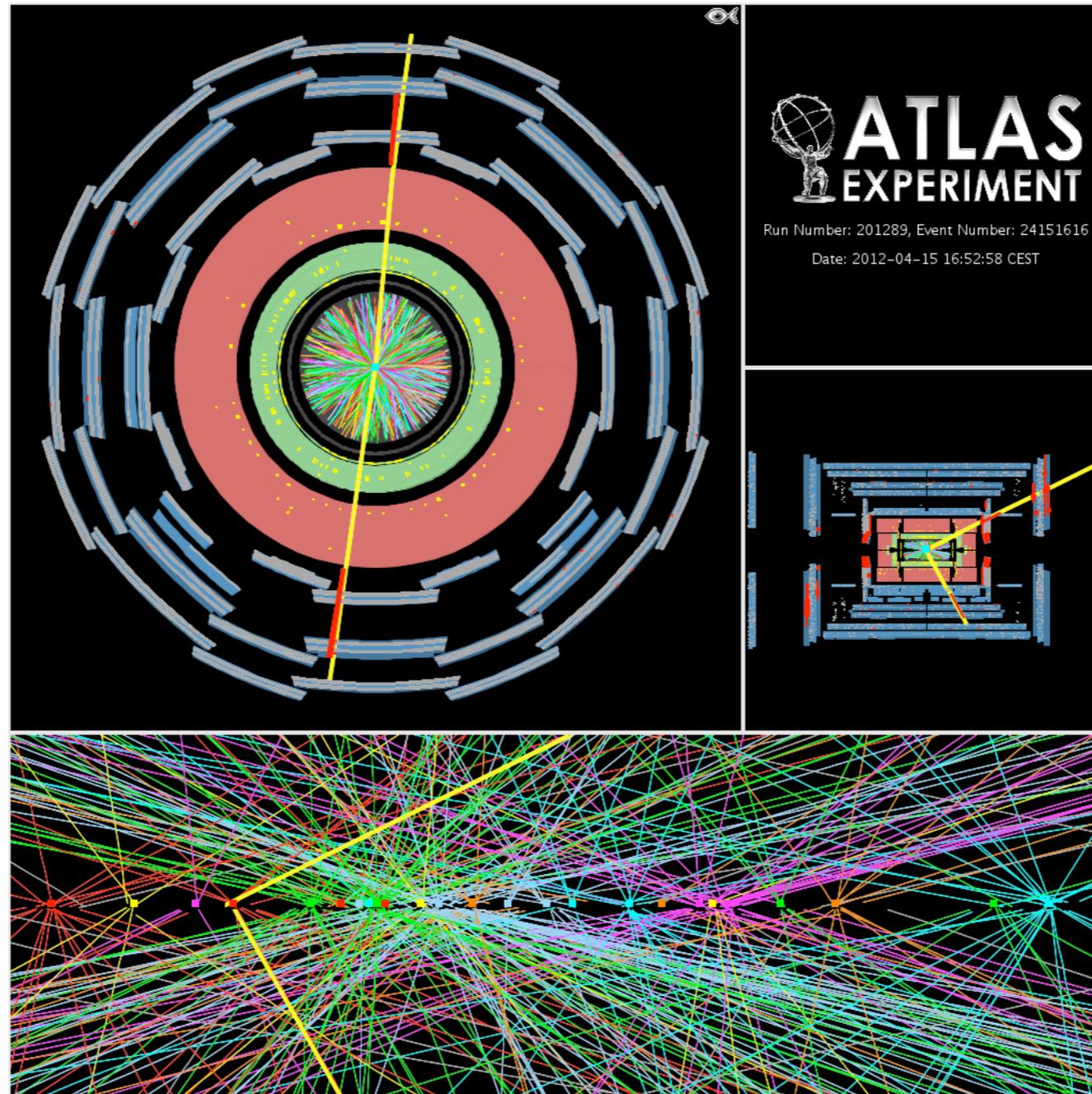
Ordre de grandeur des principaux processus



Taux d'événements à $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

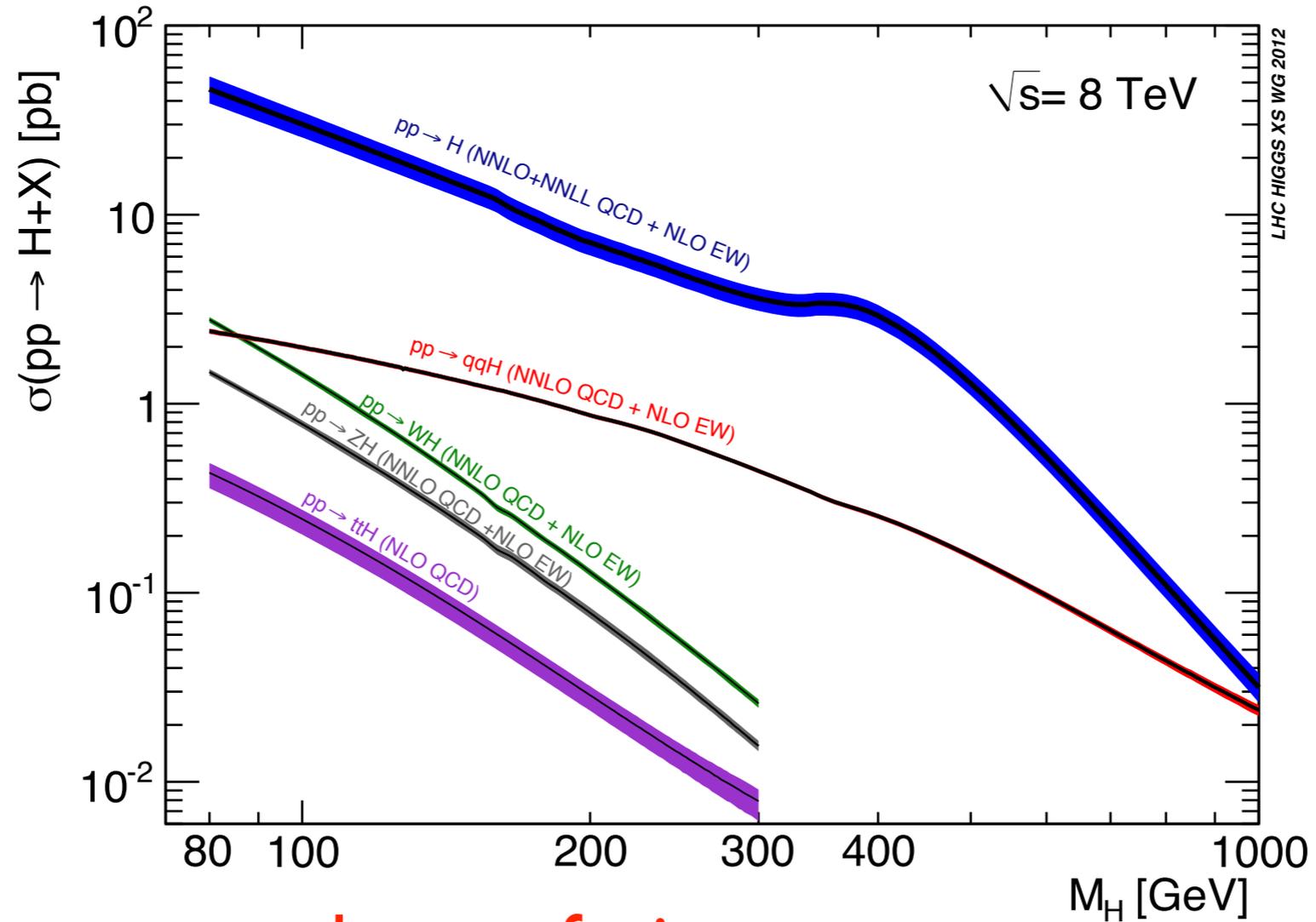
=> Sélection "en temps réel" importante pour écrire ~1 kHz de collisions sur disque

A haute luminosité de nombreuses collisions pp se produisent lors du même croisement de paquets "Empilement"



Exemple: $Z \rightarrow \mu\mu$ avec 25 autres collisions inélastiques superposées

Production du boson Higgs au LHC

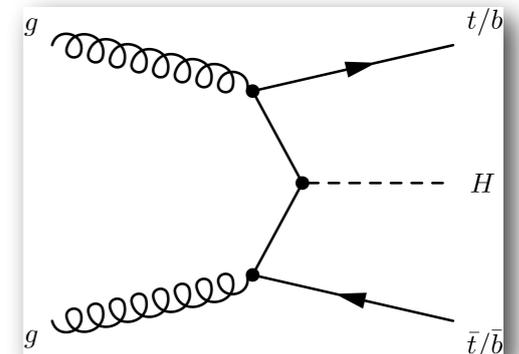
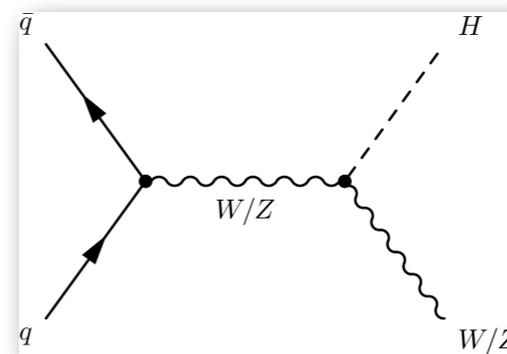
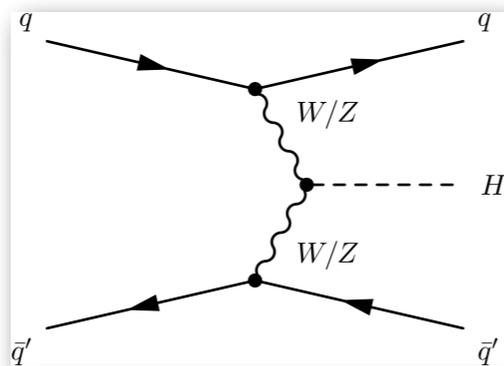
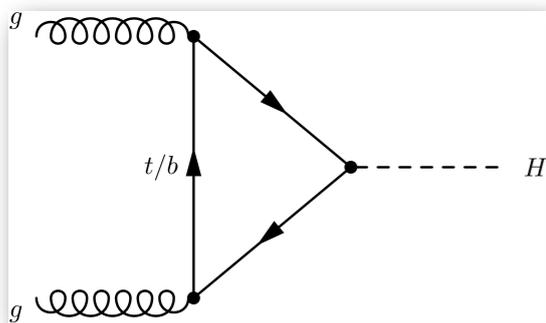


gluon fusion

vector boson fusion

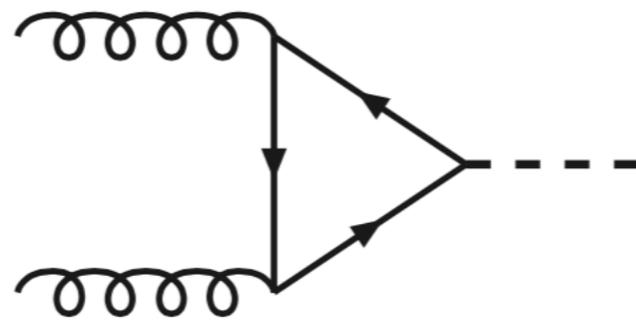
WH, ZH

ttH

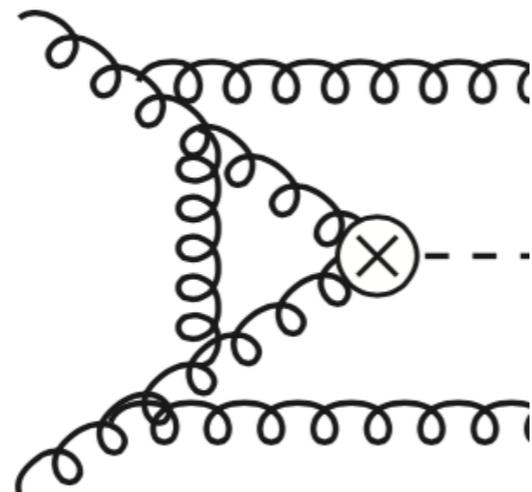


Le calcul de la section efficace de production du boson de Higgs a bénéficié de développements spectaculaires

Calcul perturbatif en puissance de la constante de couplage de l'interaction forte



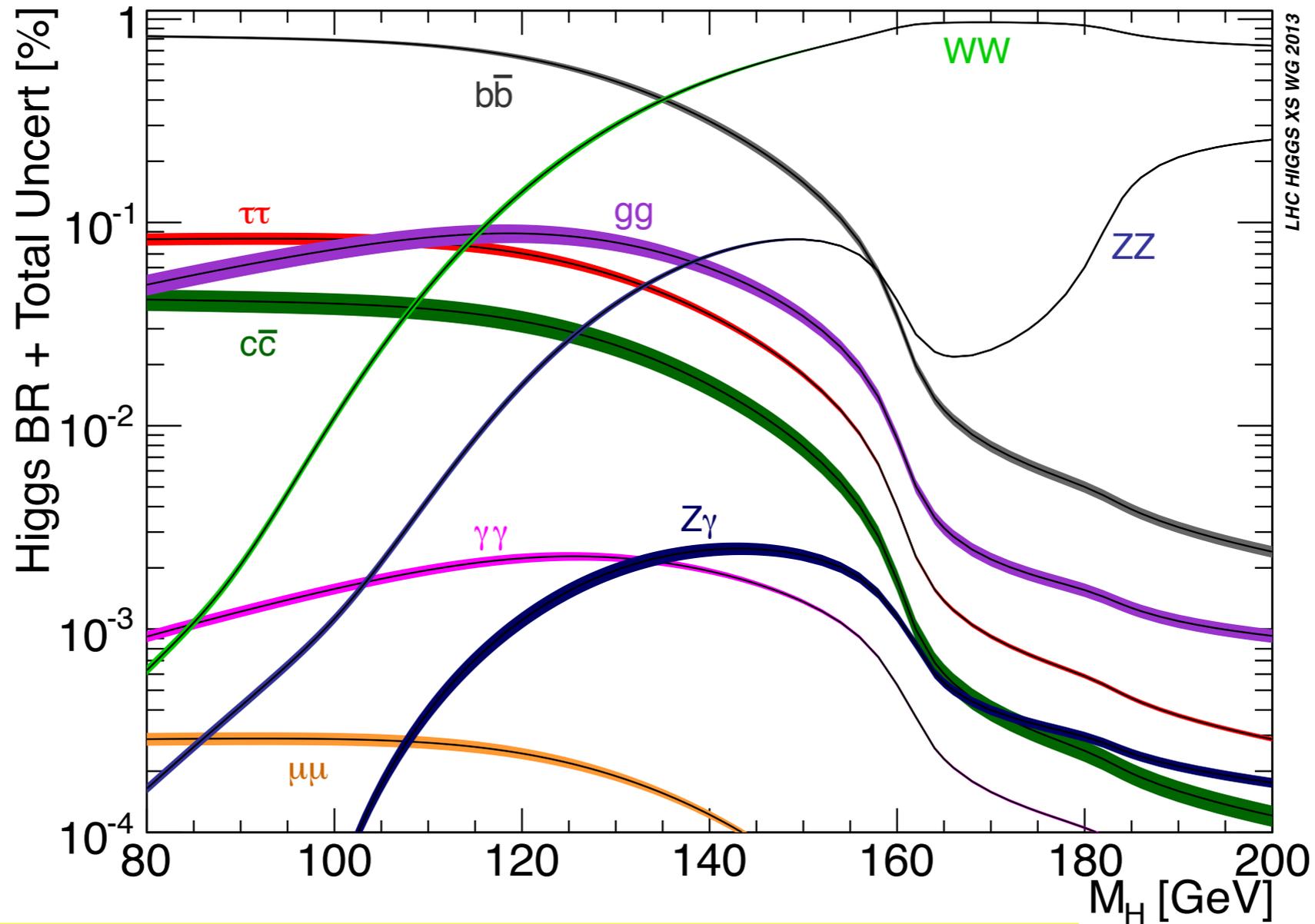
Ordre le plus bas (LO)



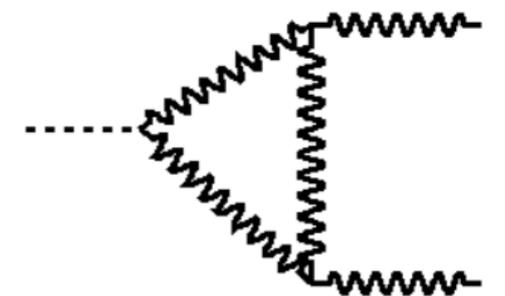
Ordre N3LO (i.e 4eme terme dans le développement perturbatif)
~100 000 diagrammes.....

A l'ordre N2LO, incertitude totale ~10%

Désintégration boson Higgs



Désintégration dominante: en particules les plus lourdes accessibles.
Exception importante: $H \rightarrow \gamma\gamma$ (via boucle de bosons W ou quarks top)



Stratégies pour la recherche du boson de Higgs

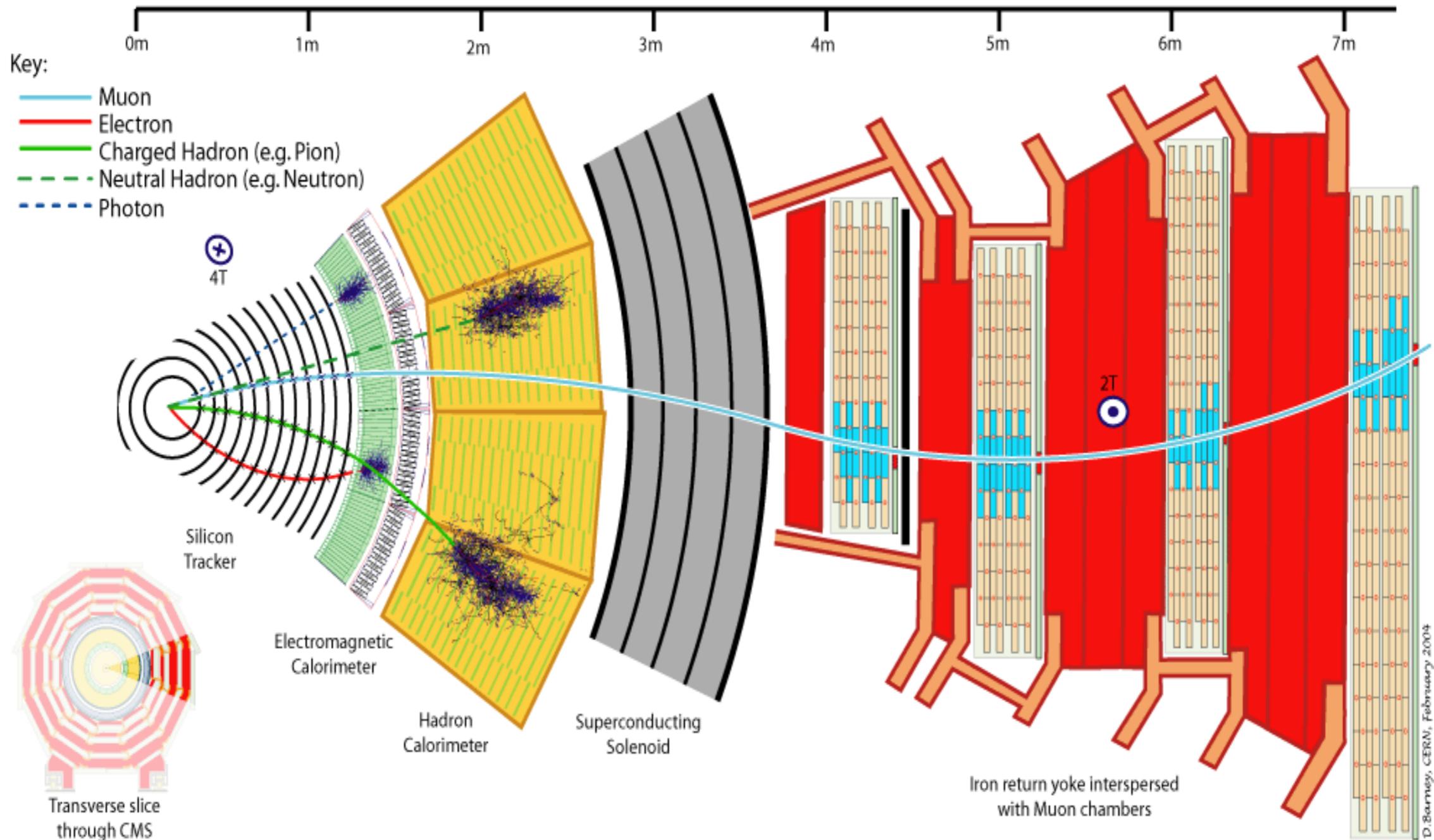
Combiner **mode de production** * **mode de désintégration** pour obtenir un état final qui peut être séparé des sources de bruit de fond

	gg fusion	VBF	VH	ttH
$H \rightarrow \gamma\gamma$	■	■	■	■
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$	■	■	■	□
$H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu$	■	■	■	■
$H \rightarrow \tau\tau$	■	■	■	□
$H \rightarrow bb$	□	■	■	■
$H \rightarrow \mu\mu$	■	□	□	□
$H \rightarrow Z\gamma$	■	□	□	□

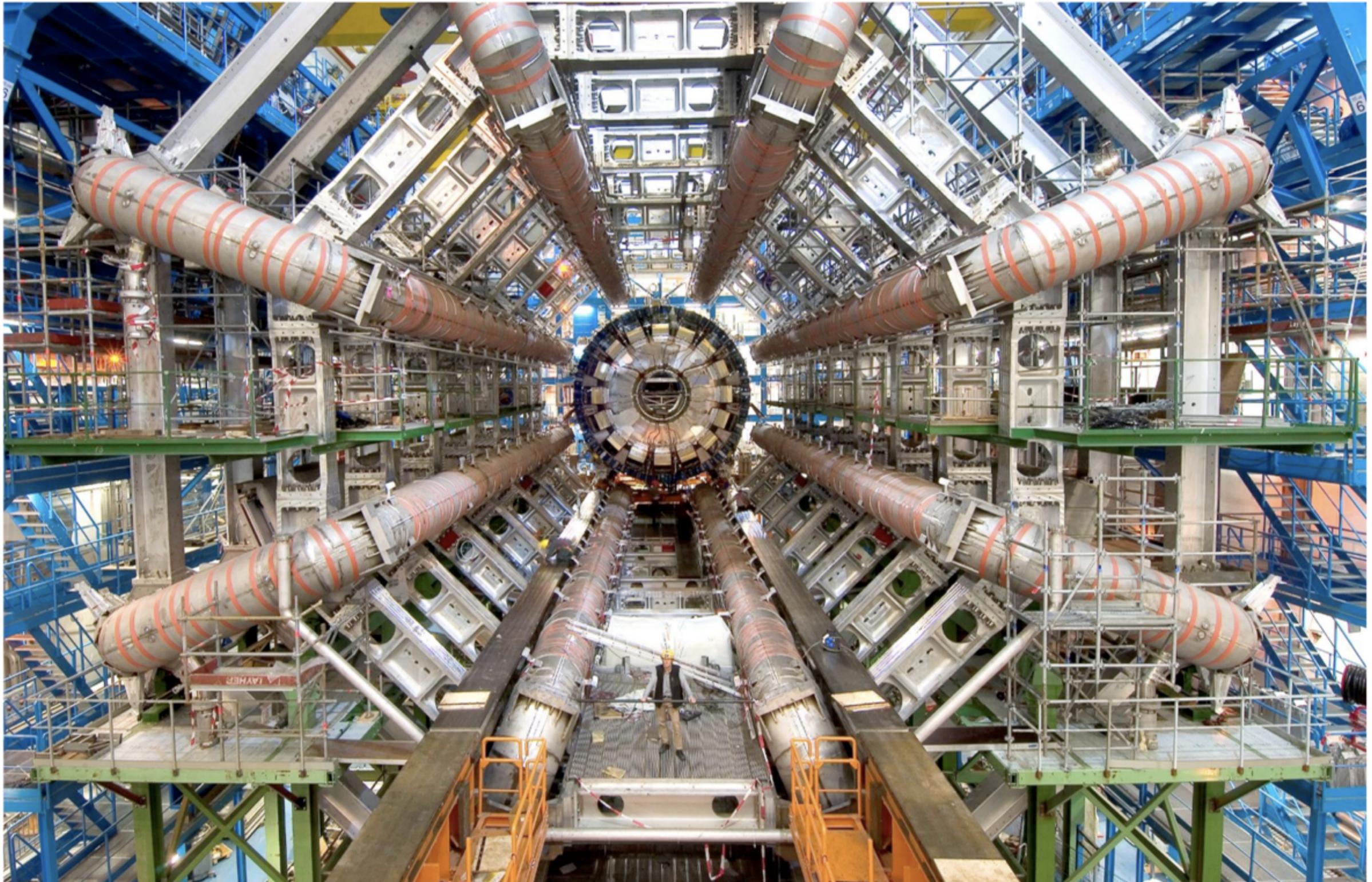
(l = e ou μ)

Quels instruments pour détecter ces collisions ?

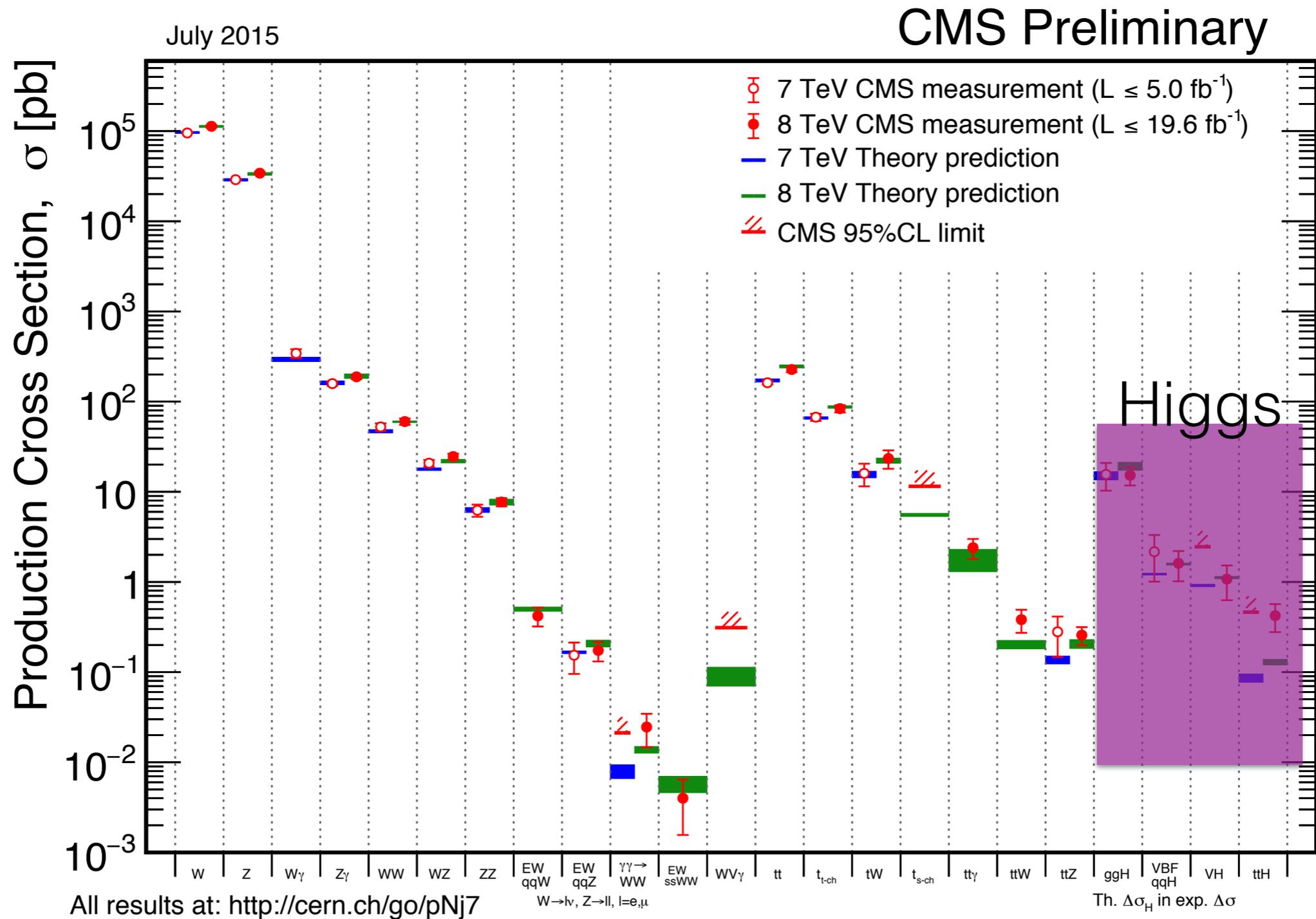
Le détecteur CMS



Le détecteur ATLAS durant l'installation en 2005



Les processus du Modèle Standard sont mesurés et bien compris



(cf exposé d'Isabelle Wingarter)

Comment détecter le boson de Higgs ?

Exemple: Identification des photons avec ATLAS

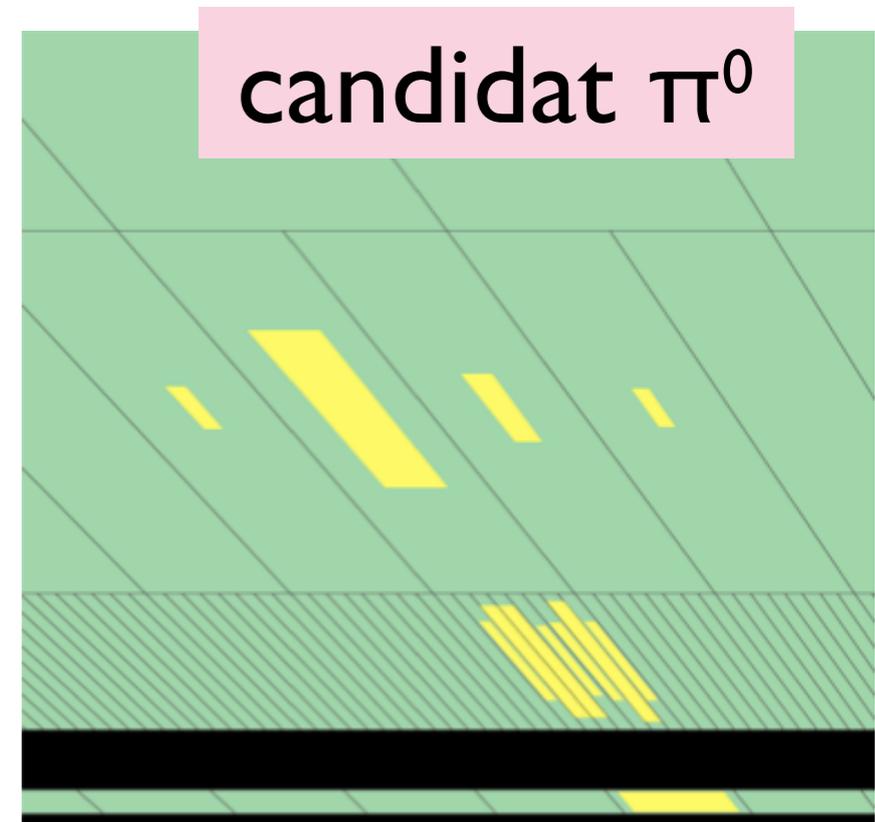
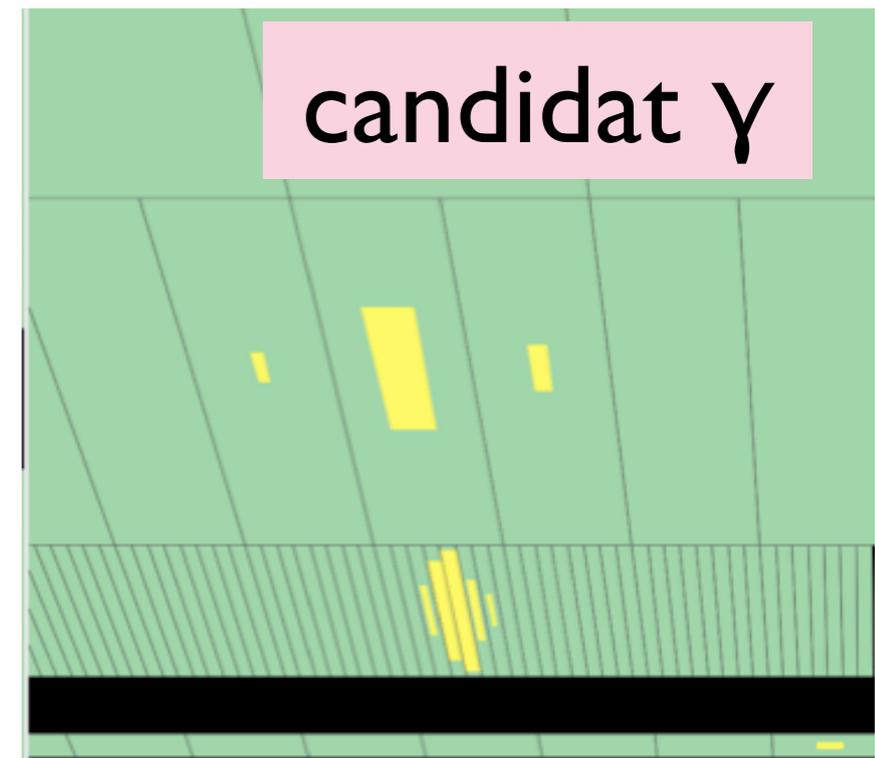
Objectif: Séparer les photons "prompts" des photons issus des désintégrations de hadrons, principalement des π^0 de grande énergie

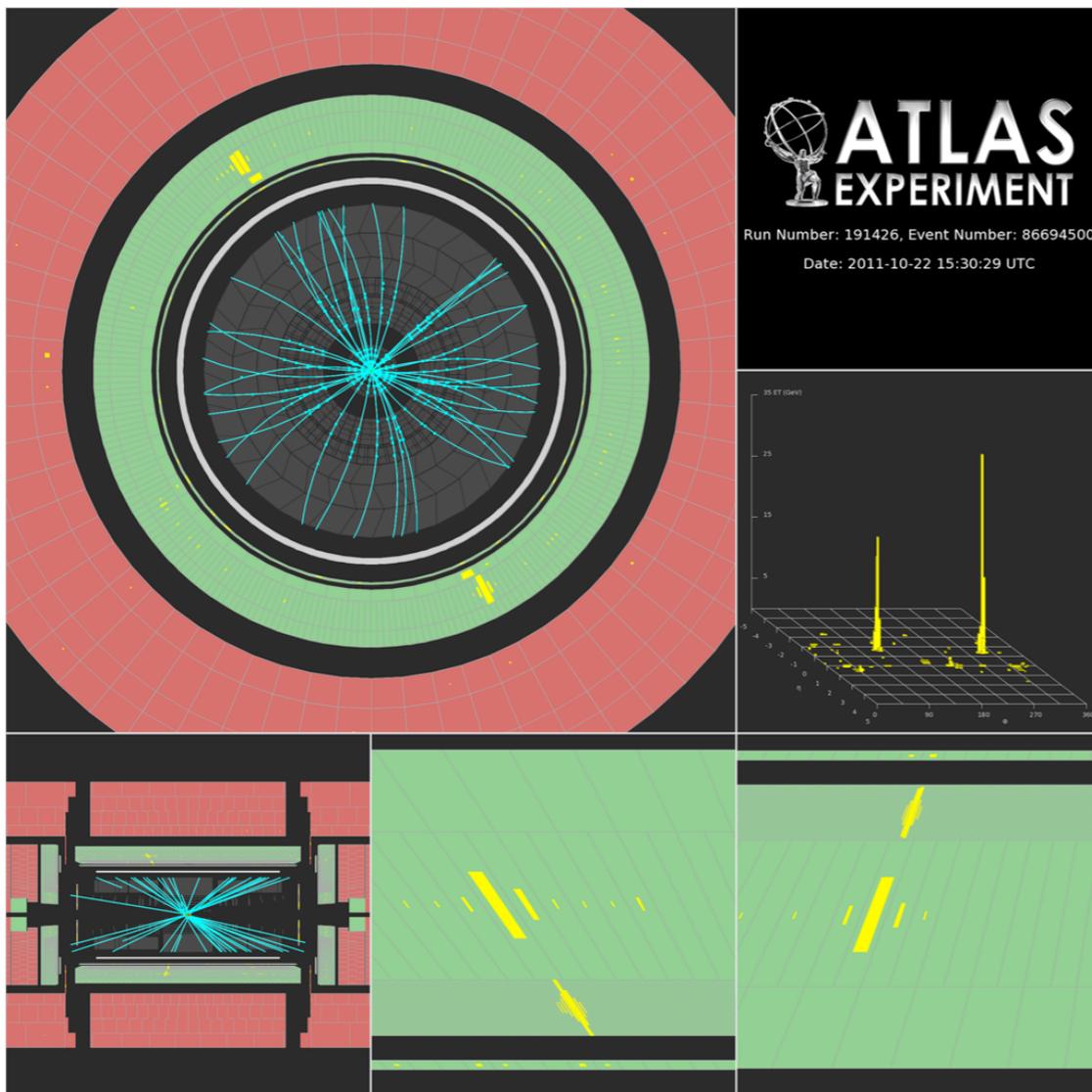
Exploite la segmentation transverse du calorimètre:

Une couche avec une taille de cellule de $\sim 5\text{mm}$ (angle 0.0031)

Pour un π^0 , de 40 GeV , la séparation minimale entre les 2 photons est de 0.006

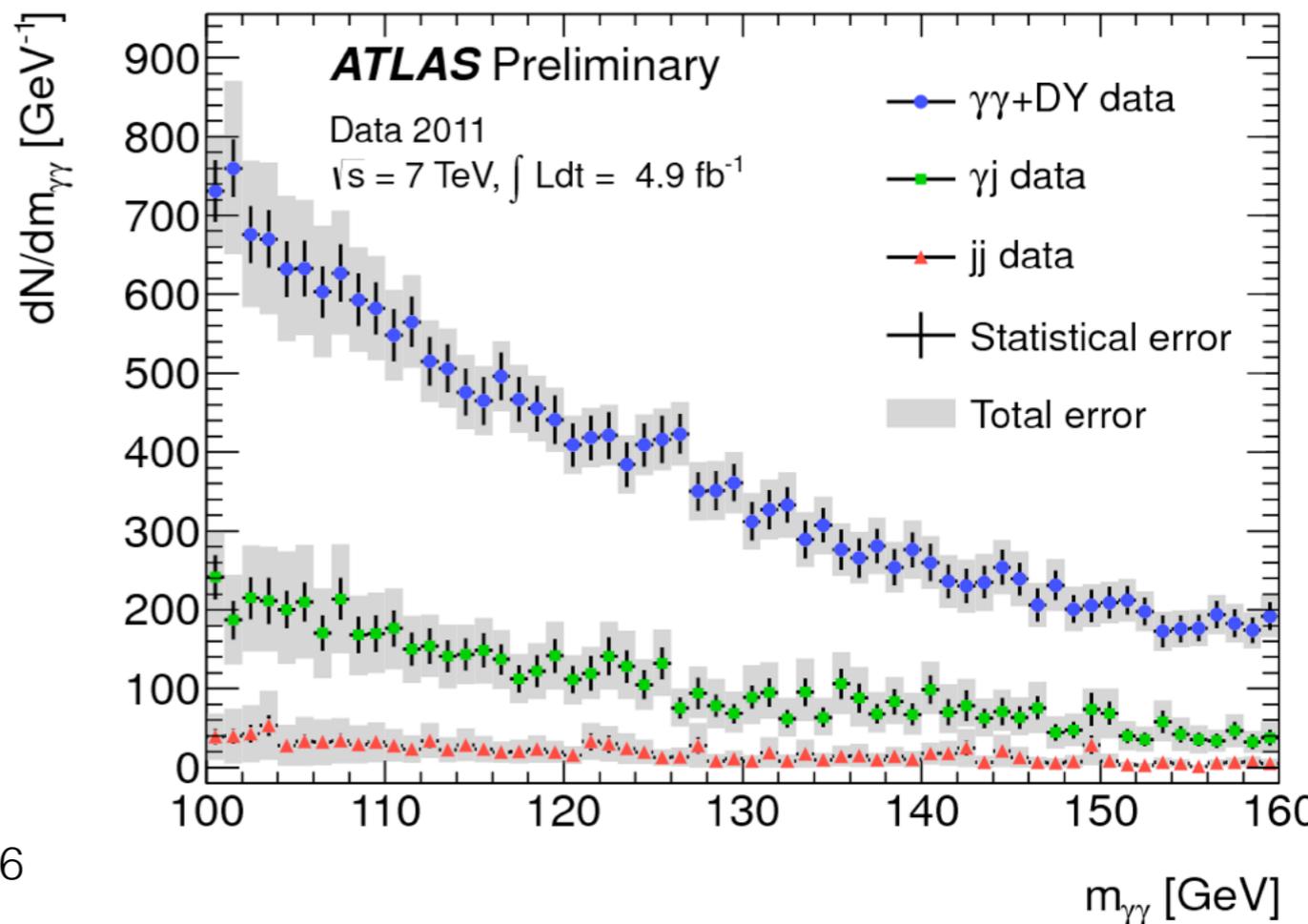
Applique des critères stricts sur la forme de la gerbe électromagnétique





Collision pp avec 2 candidats photons de grande énergie

$$M^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos\theta)$$



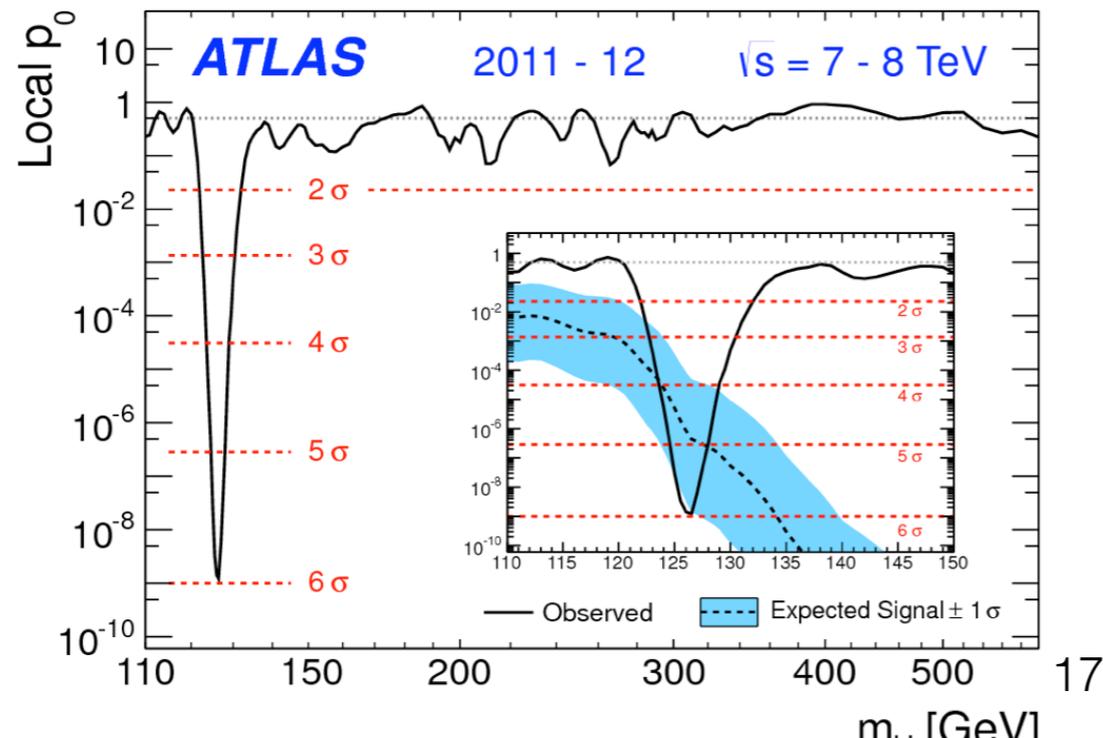
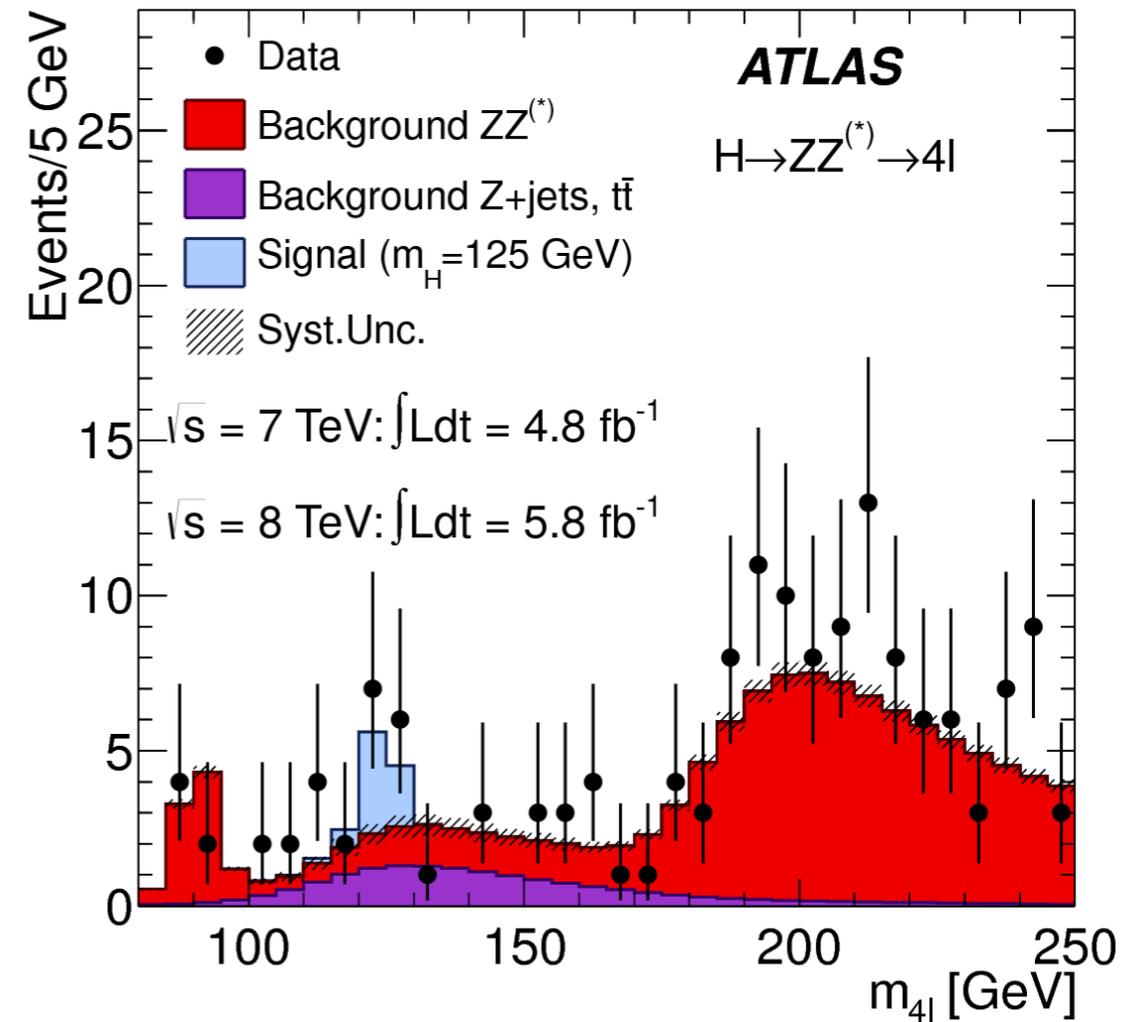
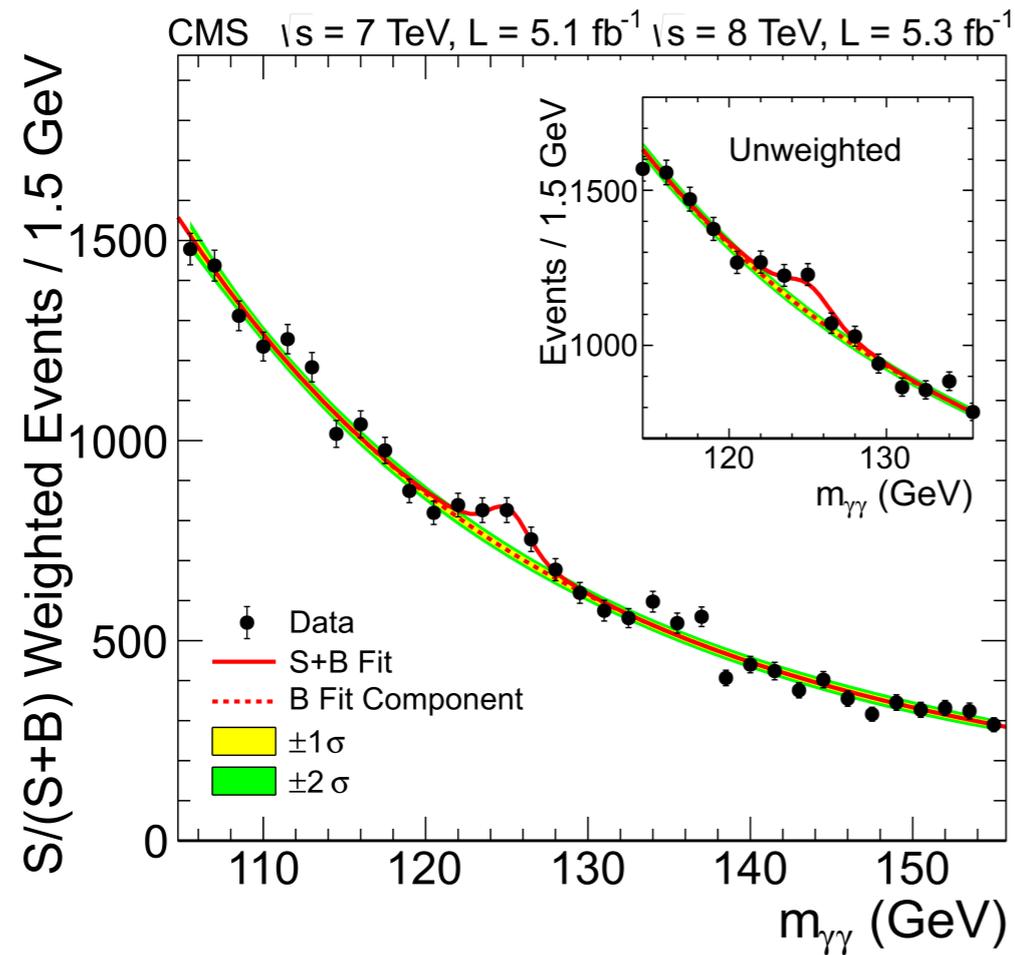
$M(\gamma\gamma)$ (données 2011)

$H \rightarrow \gamma\gamma$ donne un pic à $M(H)$

=> une très bonne résolution est nécessaire pour avoir une bonne sensibilité.

Résolution ~1%

Découverte du boson de Higgs en Juillet 2012



Séminaire au CERN 4 juillet 2012

Prix Nobel physics 2013 à Englert et Higgs



C'est le début des études de ce nouveau boson

Caractérisation du boson

- **Mesure de la masse**

- Pas prédite dans le Modèle Standard (mais peut être contrainte par des mesures de précision)
- Une fois la masse fixée, toutes les propriétés du boson sont prédites dans le Modèle Standard
- Peut être prédite dans certaines extensions du Modèle Standard

- **Mesure de la durée de vie (largeur)**

- Difficilement mesurable dans le Modèle Standard

- **Mesure du spin et de la parité**

- Doit être 0^+ pour le boson lié au mécanisme BEH => les hypothèses alternatives explorées sont rejetées fortement.

- **Mesure des couplages entre le boson et les autres particules**

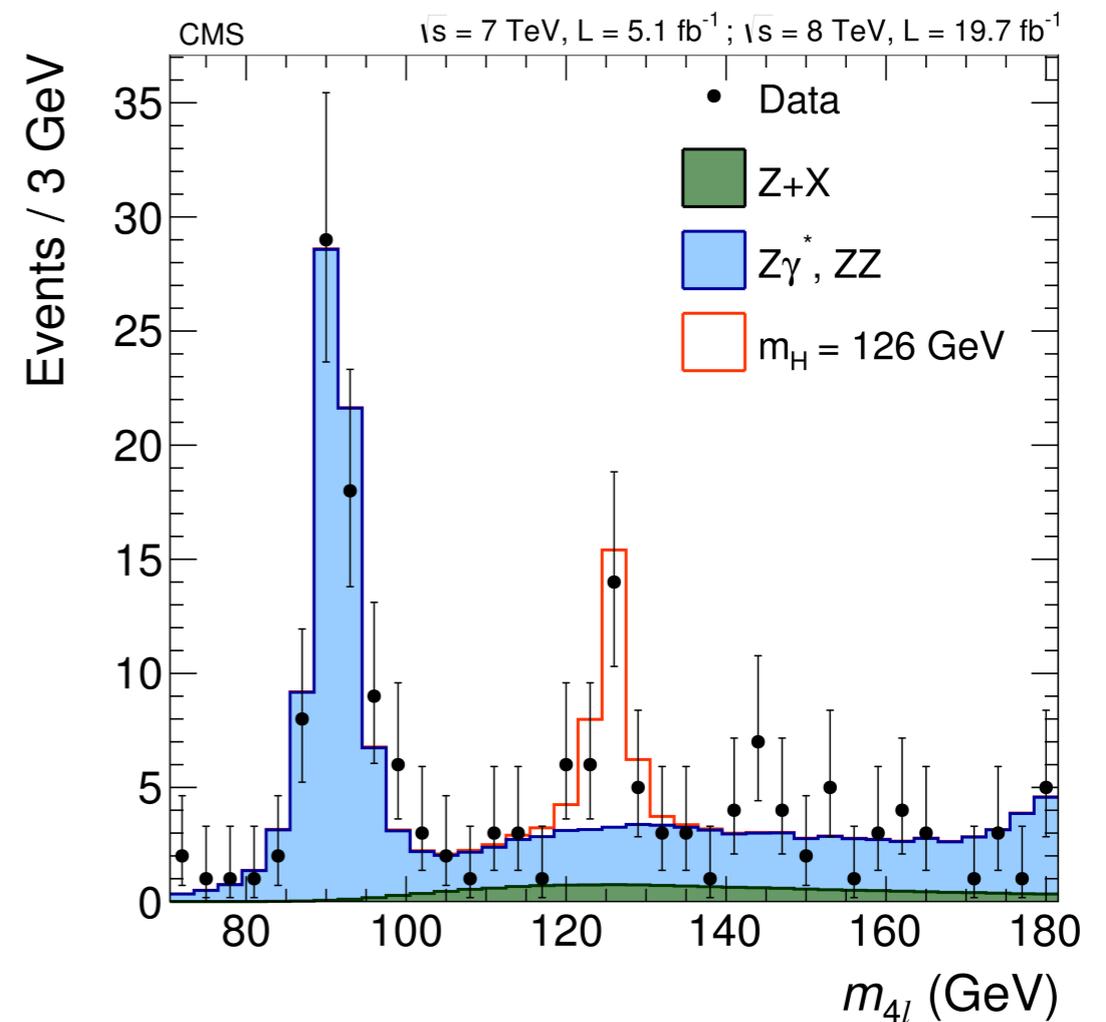
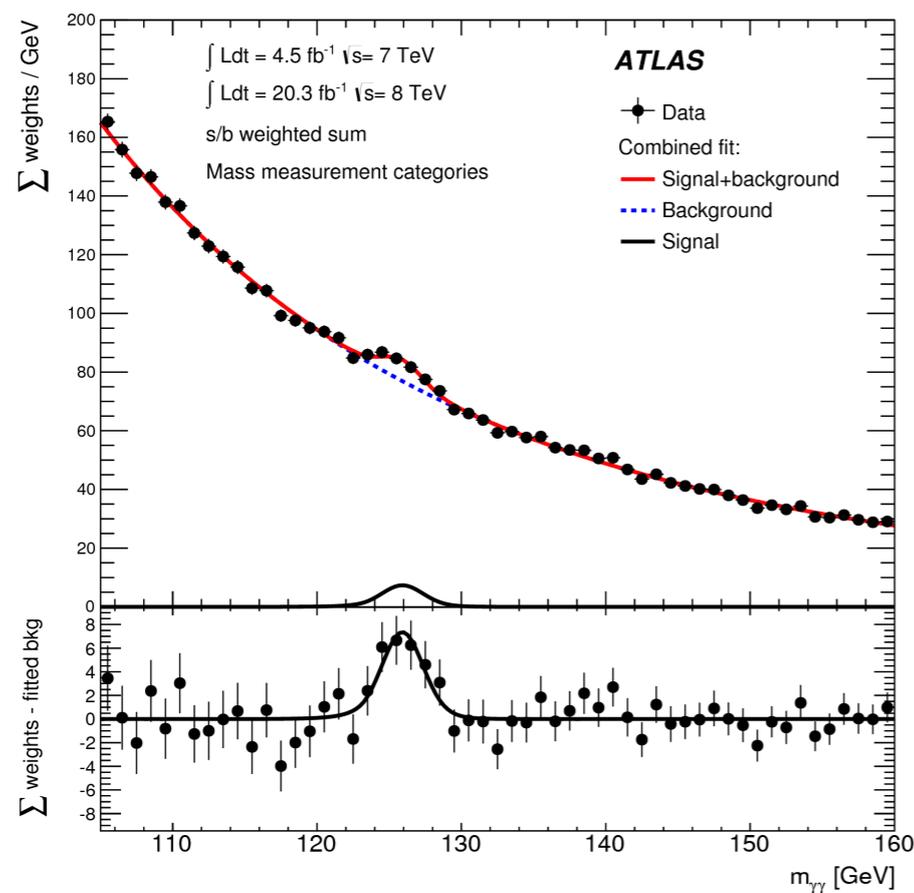
- Sensible à des modèles au delà du Modèle Standard

Mesure de la masse

Utilise les 2 canaux avec la meilleure résolution sur la mesure de la masse

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l \quad (l=e \text{ ou } \mu)$$



Les analyses exploitent les données le mieux possible en combinant avec d'autres informations sensibles à S/B et à la résolution de la masse invariante

Etalonnage de la mesure d'énergie des electrons et muons:

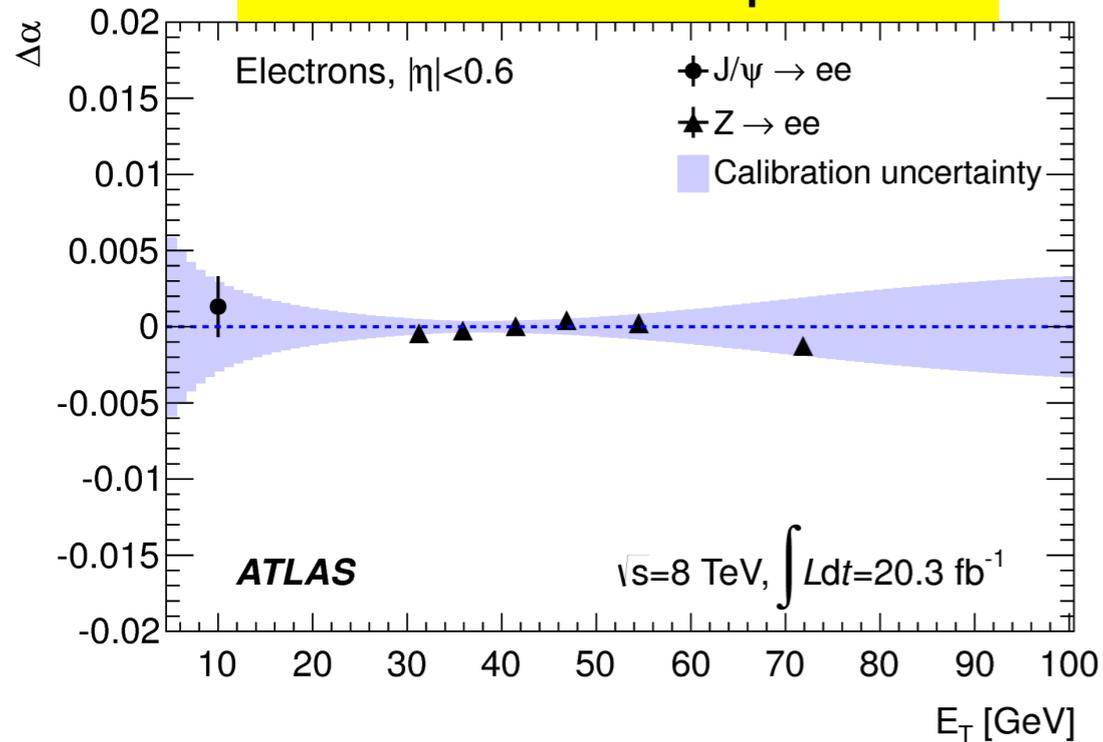
Utilise $Z \rightarrow ee$ ou $\mu\mu$

$M(Z)$ connu à $\sim 10^{-5}$ grâce au LEP du CERN

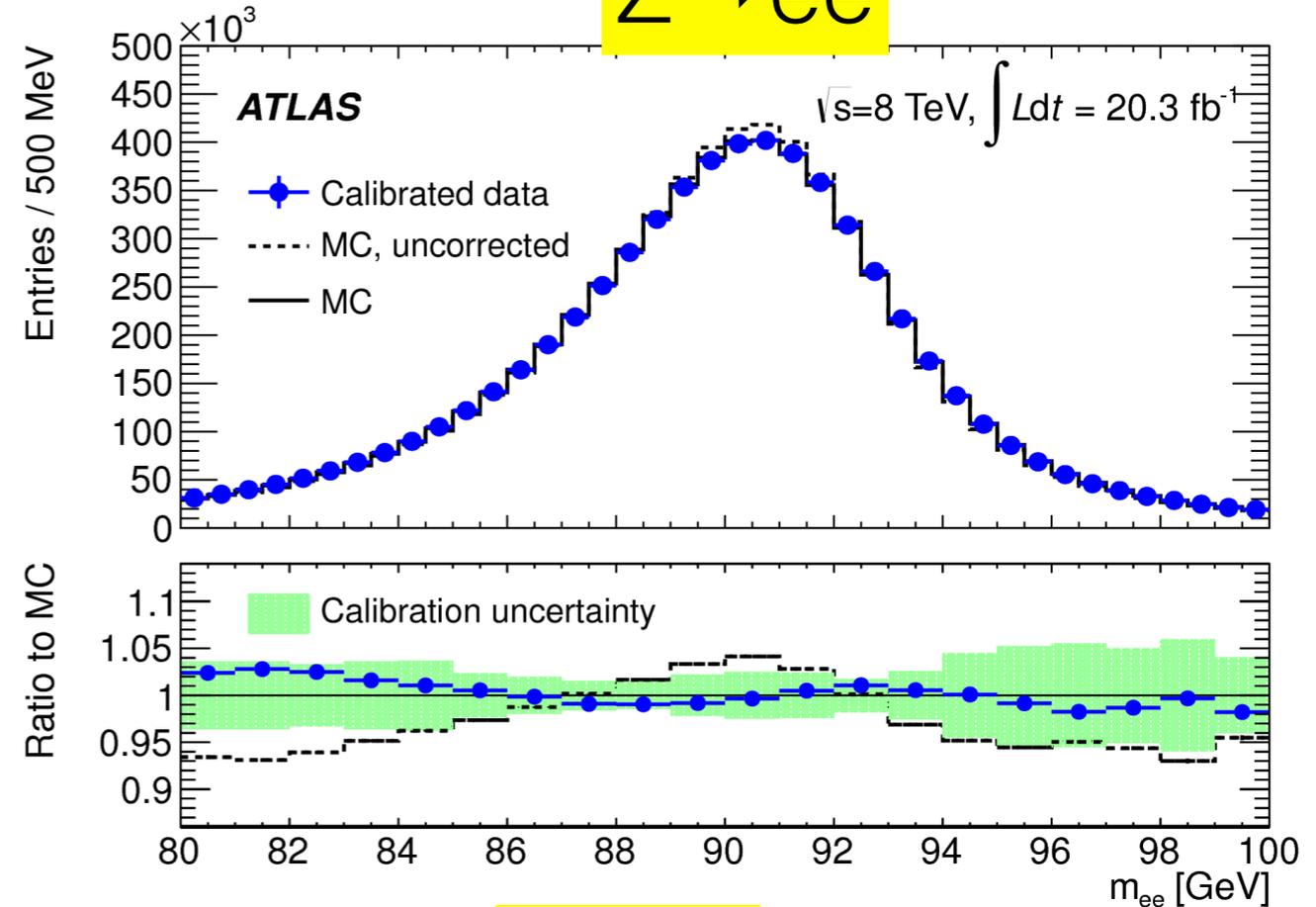
Permet l'ajustement de l'échelle d'énergie

Puis vérification de la stabilité en énergie et de l'extrapolation $e \rightarrow \gamma$

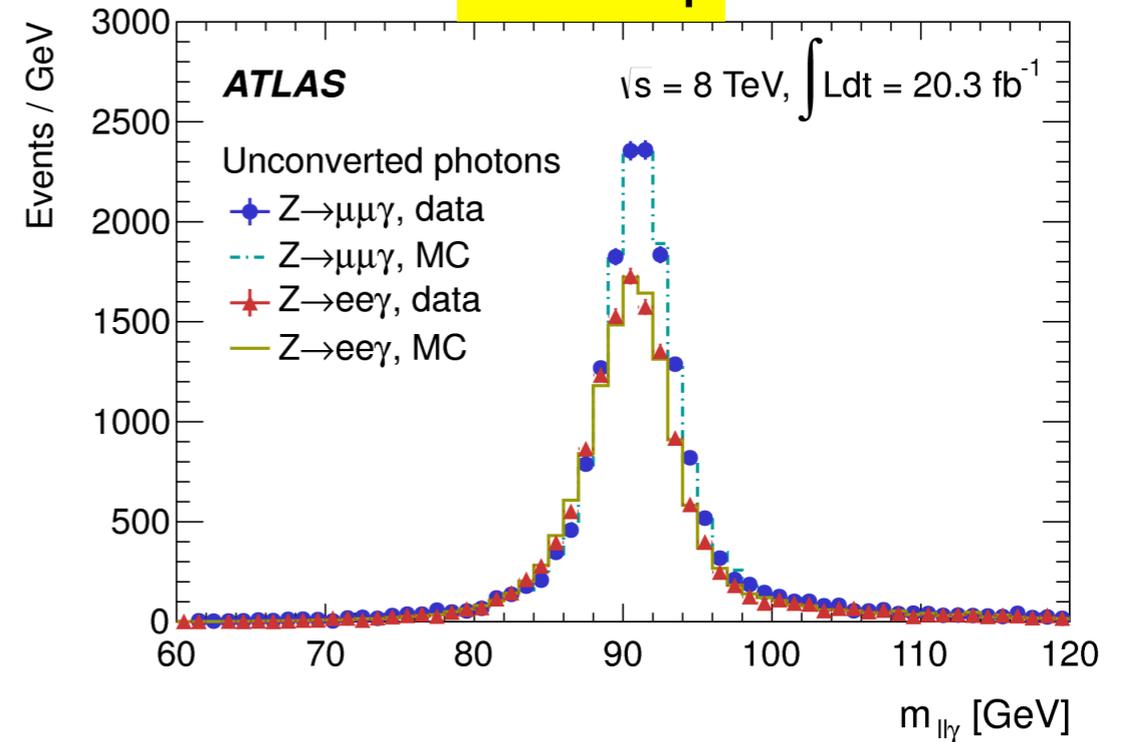
$Z \rightarrow ee$ et $J/\psi \rightarrow ee$



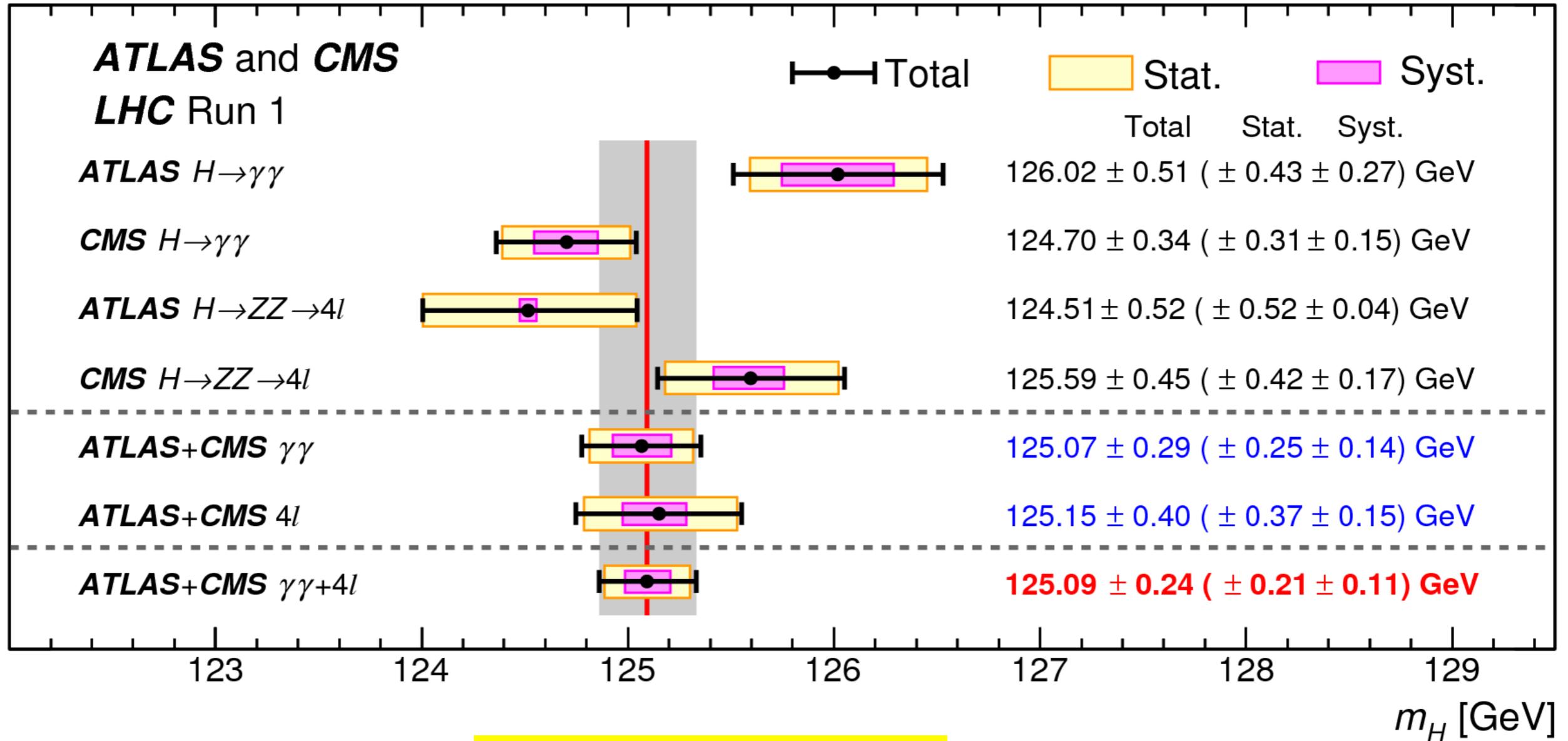
$Z \rightarrow ee$



$Z \rightarrow ll\gamma$



Résultats pour la masse

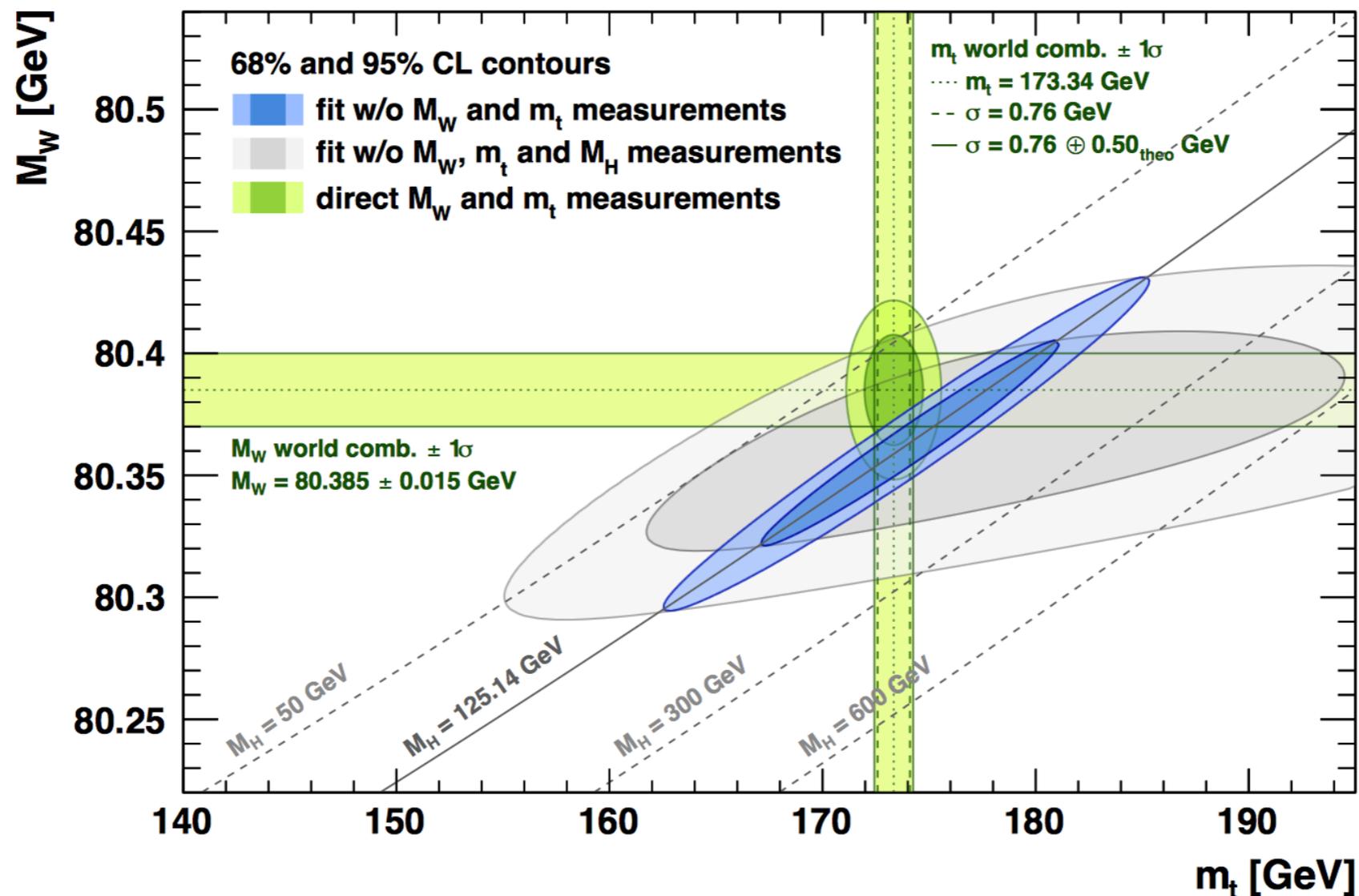


Précision < 0.2%

Implications de la mesure de la masse

Dans le Modèle Standard $M_W = f(M_Z, M_{\text{top}}, M_H)$ via corrections radiatives aux masses des bosons W et Z

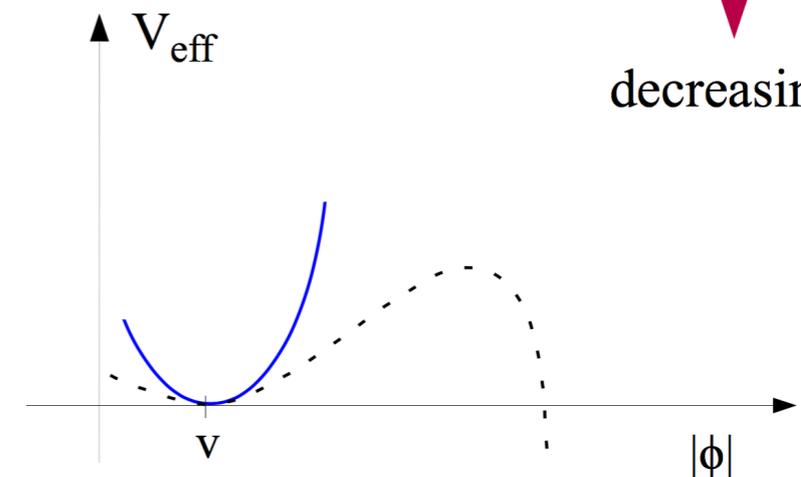
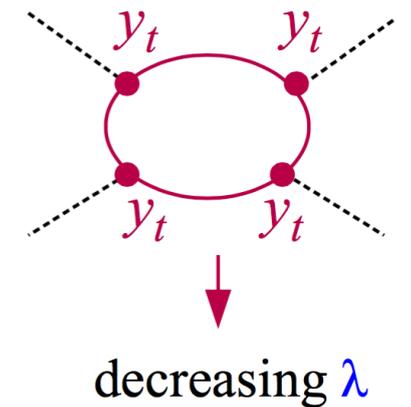
=> M_W et M_{top} peuvent être prédites à partir d'observables mesurées précisément (notamment au LEP) et comparées aux mesures directes



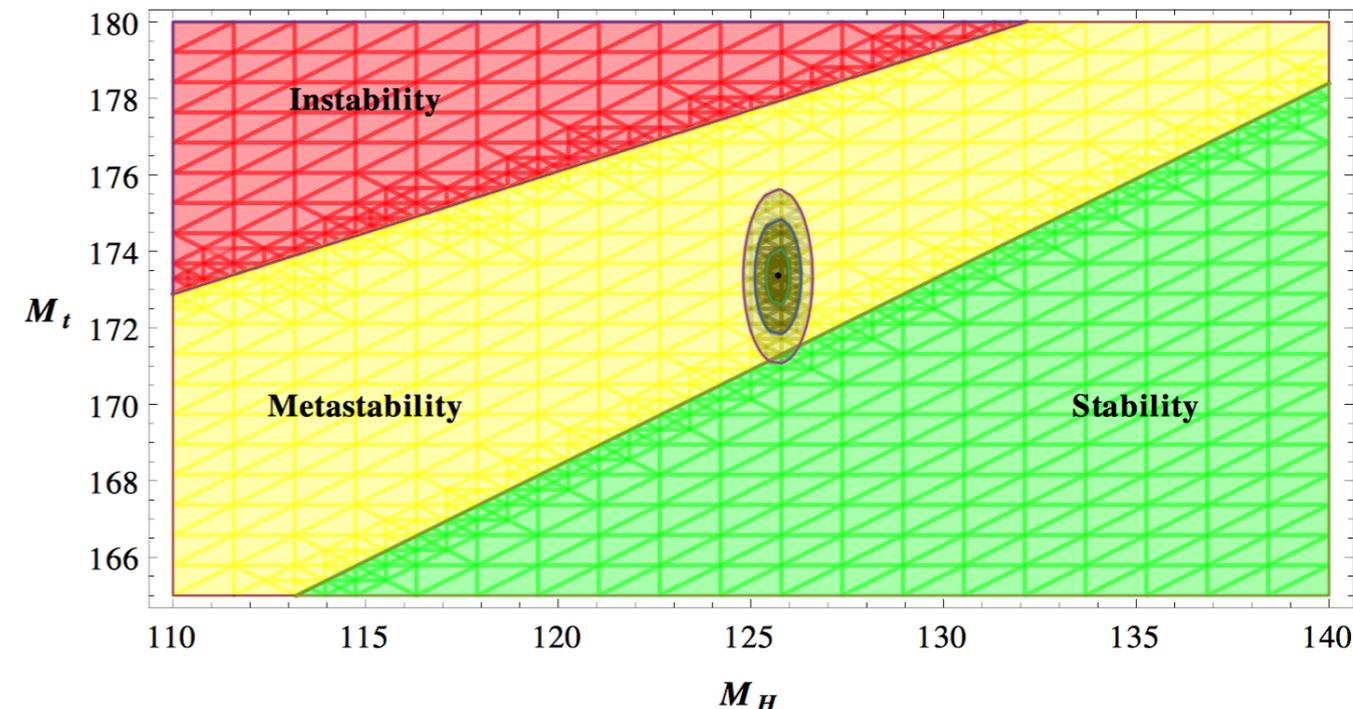
Implications de la mesure de la masse

Dans le Modèle Standard, le potentiel du champ de Higgs a des corrections radiatives dépendant de M_{top}
 => Le potentiel peut être instable pour des grandes valeurs du champ
 => instabilité du vide ou "métastabilité" si temps de transition par effet tunnel > âge de l'univers (en supposant que le Modèle Standard est valable jusqu'à $\sim M_{\text{Planck}}$)
 La valeur de M_H est proche de cette limite. Est-ce une coïncidence ? $\lambda(M_{\text{Planck}}) \sim 0$?

$$V(\phi) \sim \lambda(\phi) \phi^4$$



Egalement le couplage top-Higgs est proche de 1. (m_{top}/v)
 Est-ce une coïncidence ? Le quark top joue-t-il un rôle spécial ?

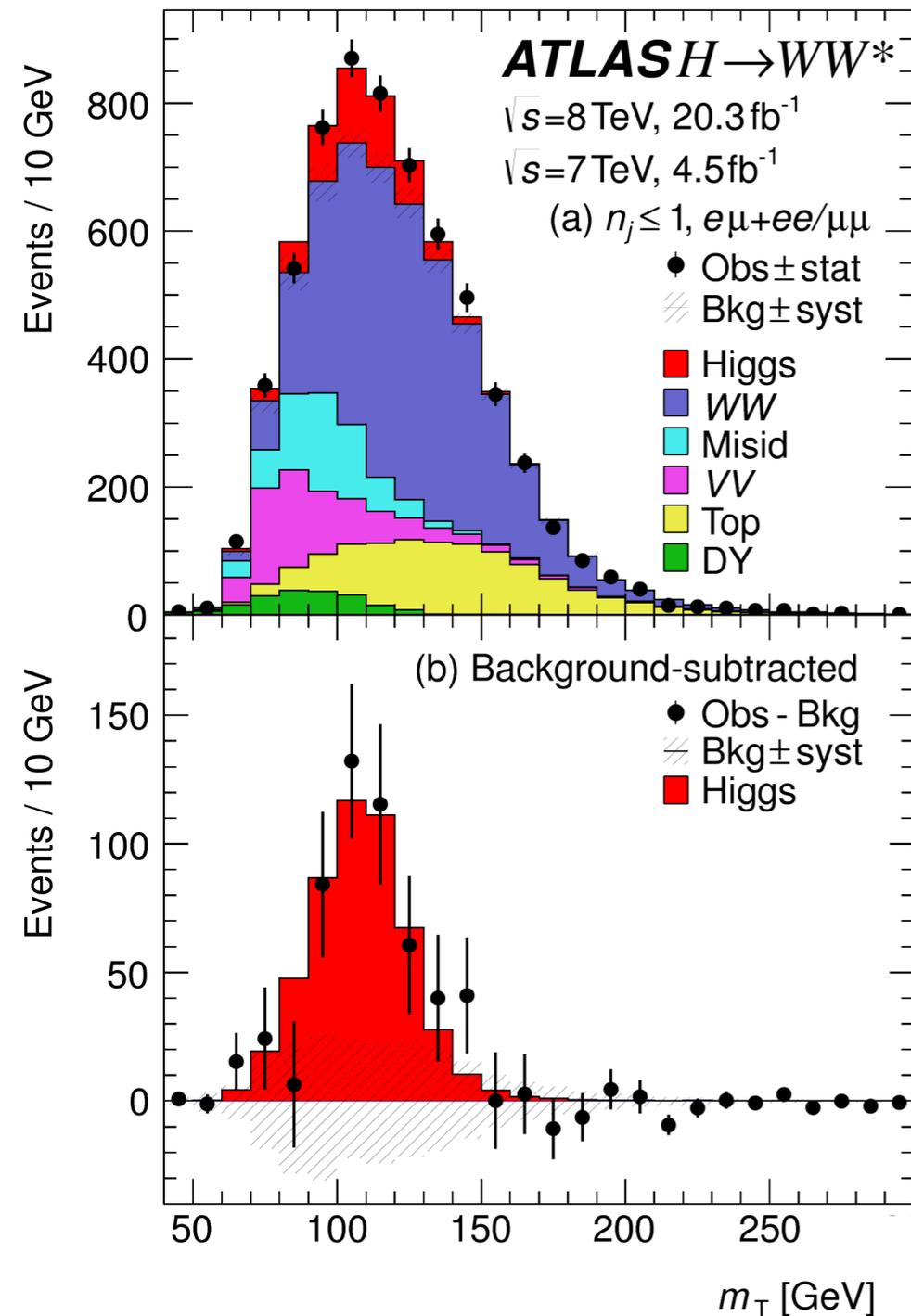


Etude des couplages

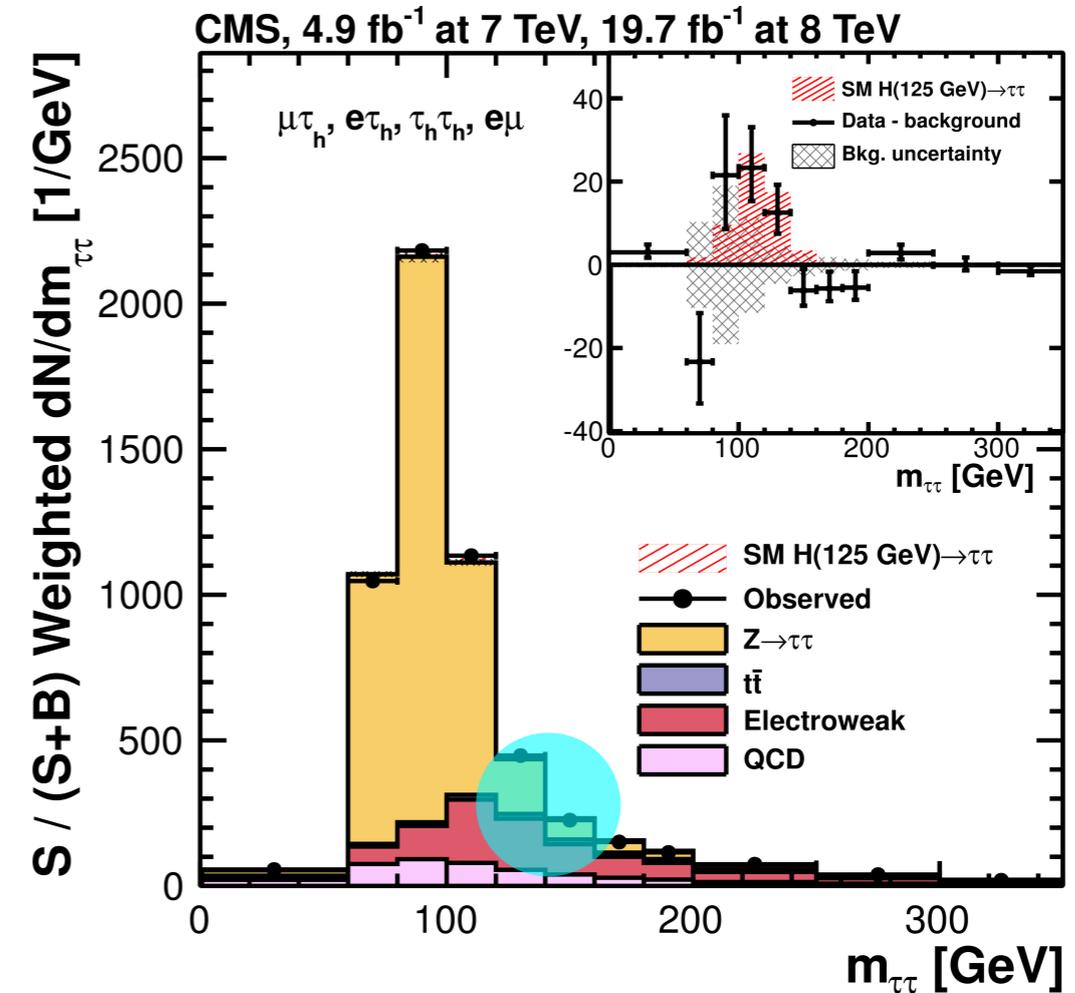
- Mesure le maximum de (canal production)*(Mode de désintégration)
 - Certains rapports permettent de réduire par exemple les incertitudes théoriques
- Suppose une seule particule à $M \sim 125$ GeV avec spin 0
- Même structure du Lagrangien que dans le Modèle Standard
- Définit des multiplicateurs pour les couplages κ
 - $\kappa=1$ pour Modèle Standard
 - Explore différentes possibilités de κ : un par particule du Modèle Standard, ou bien un nombre plus restreint de κ , ainsi que différentes hypothèses sur la présence de nouvelles particules dans les boucles.
 - Pas encore de sensibilité au couplage du H avec lui même (production de paires HH)
- On peut aussi autoriser des désintégrations "exotiques" du boson de Higgs
 - Complémentaire de recherches directes $H \rightarrow$ (particules invisibles) (par exemple Matière Noire) où aucun excès n'est observé

Point de départ: recherche du signal dans chaque canal séparément pour les 5 modes de désintégration majeurs
 Analyses raffinées (méthodes multivariées) pour optimiser la sensibilité

$H \rightarrow WW \rightarrow ll\nu\nu$
 Clairement observé

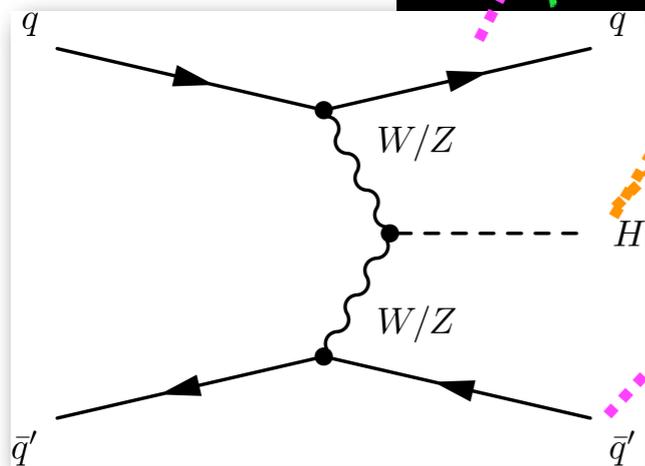
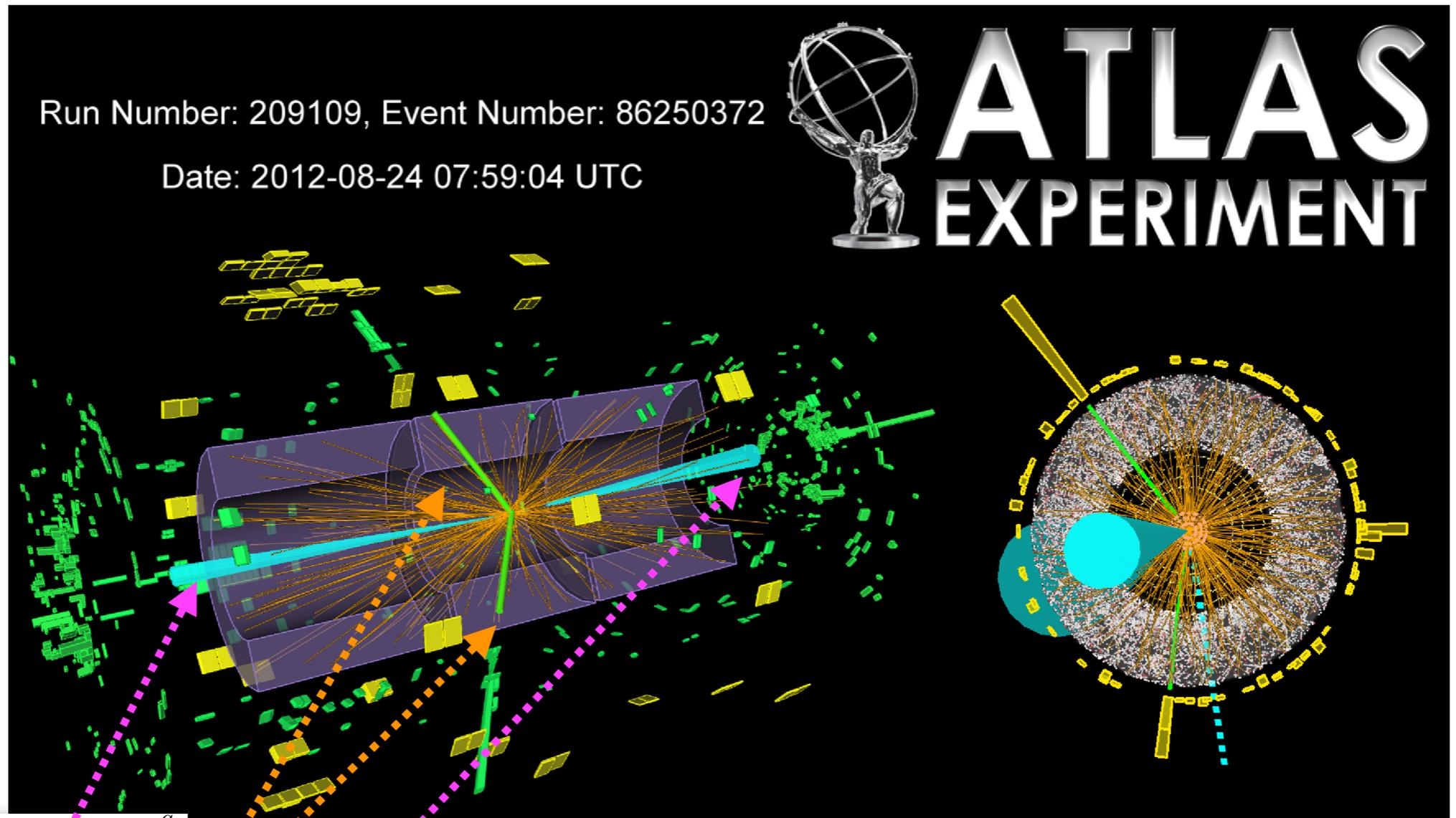


$H \rightarrow \tau\tau$
 Combinaison "naive" ATLAS+CMS $> 5\sigma$



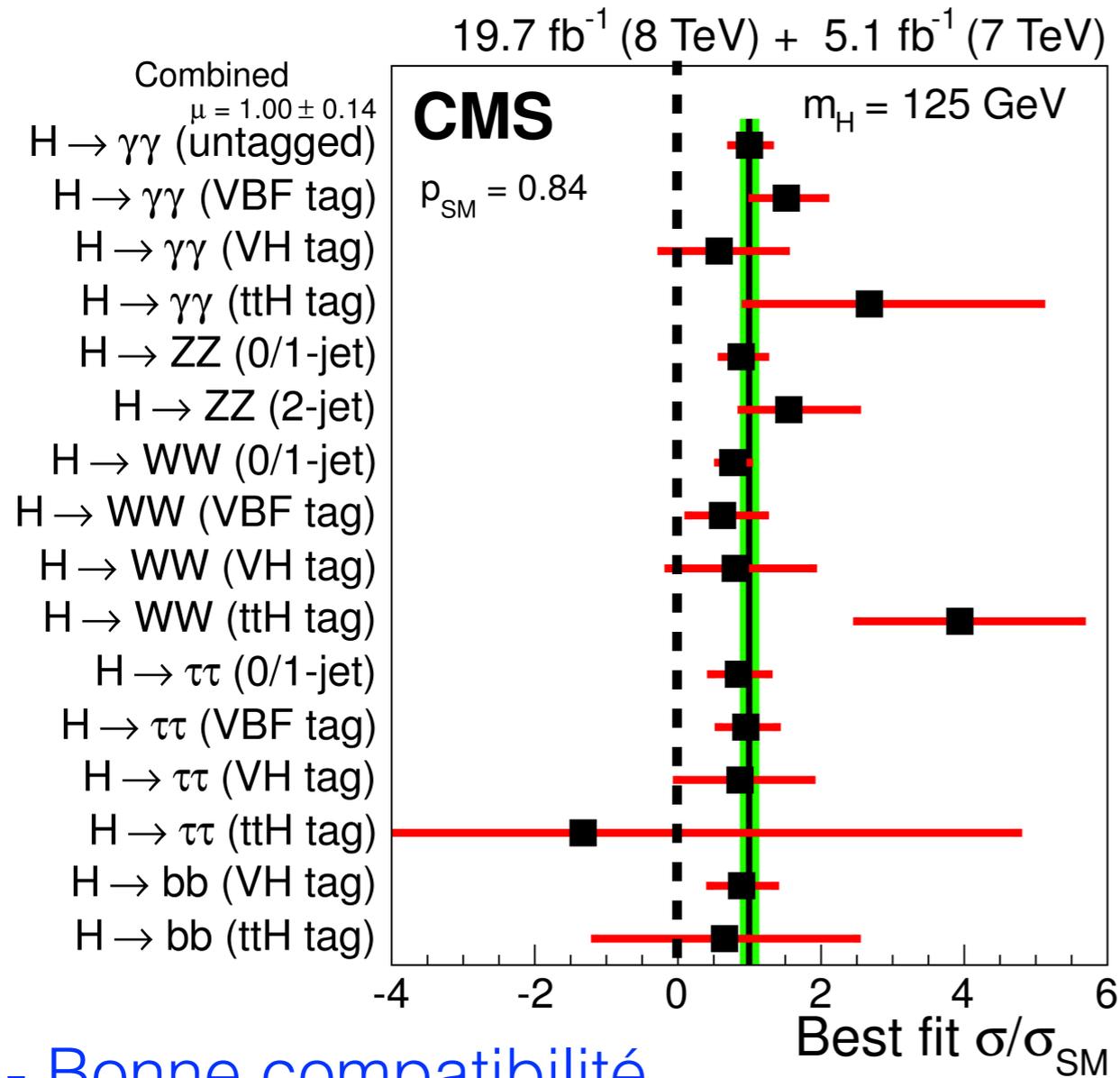
Signification du signal $\sim 2-3\sigma$
 pour VH ($H \rightarrow bb$)

Séparation des modes de production:
Exemple d'un candidat $H(\rightarrow\tau\tau)$ produit par fusion de bosons vecteurs

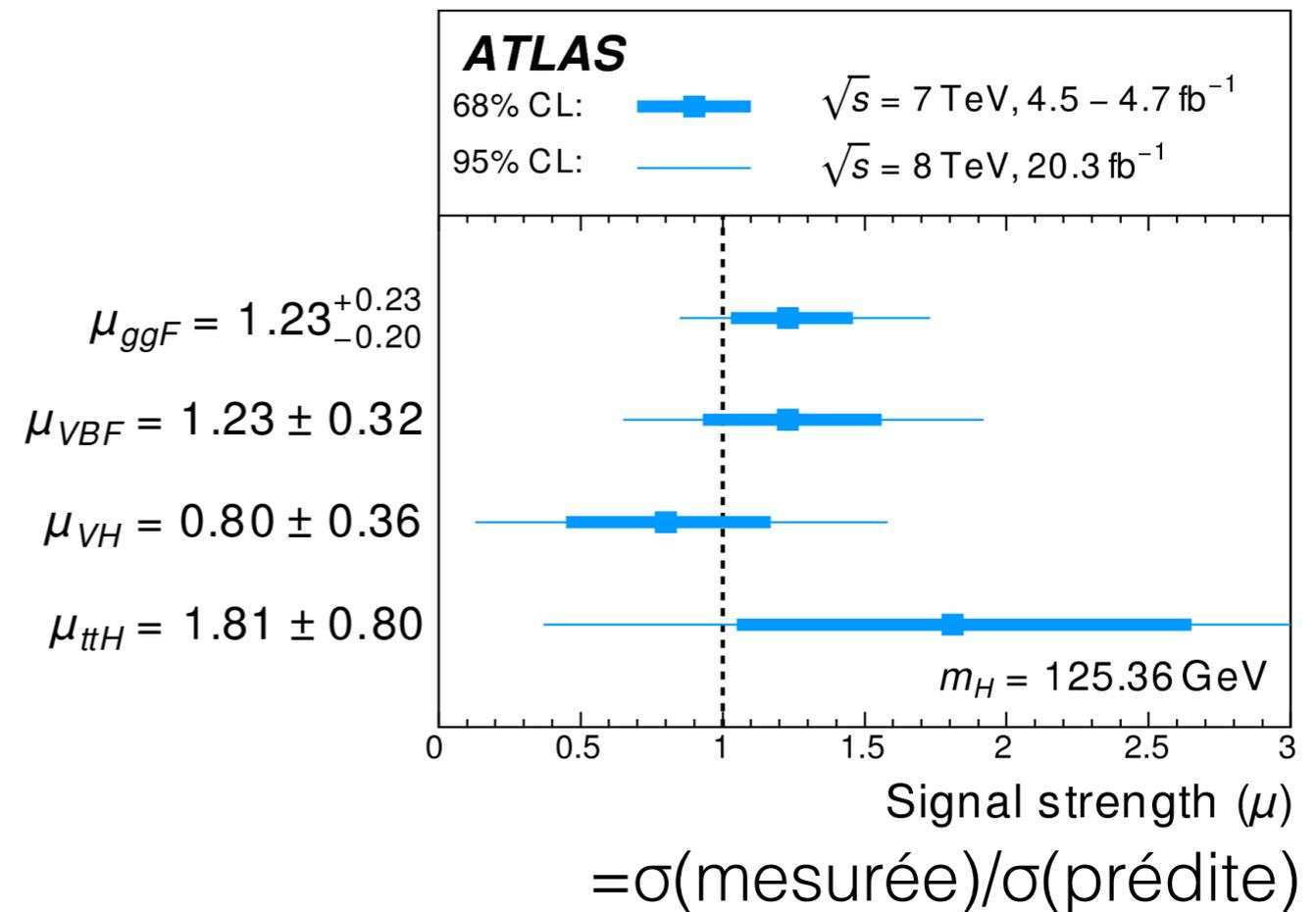


Complication: prendre correctement en compte les contaminations croisées entre les différents modes de production

Résumé du signal mesuré dans chaque catégorie comparé au signal prédit par Modèle Standard



Mesure des section efficaces de production (en supposant BR=BR(SM))



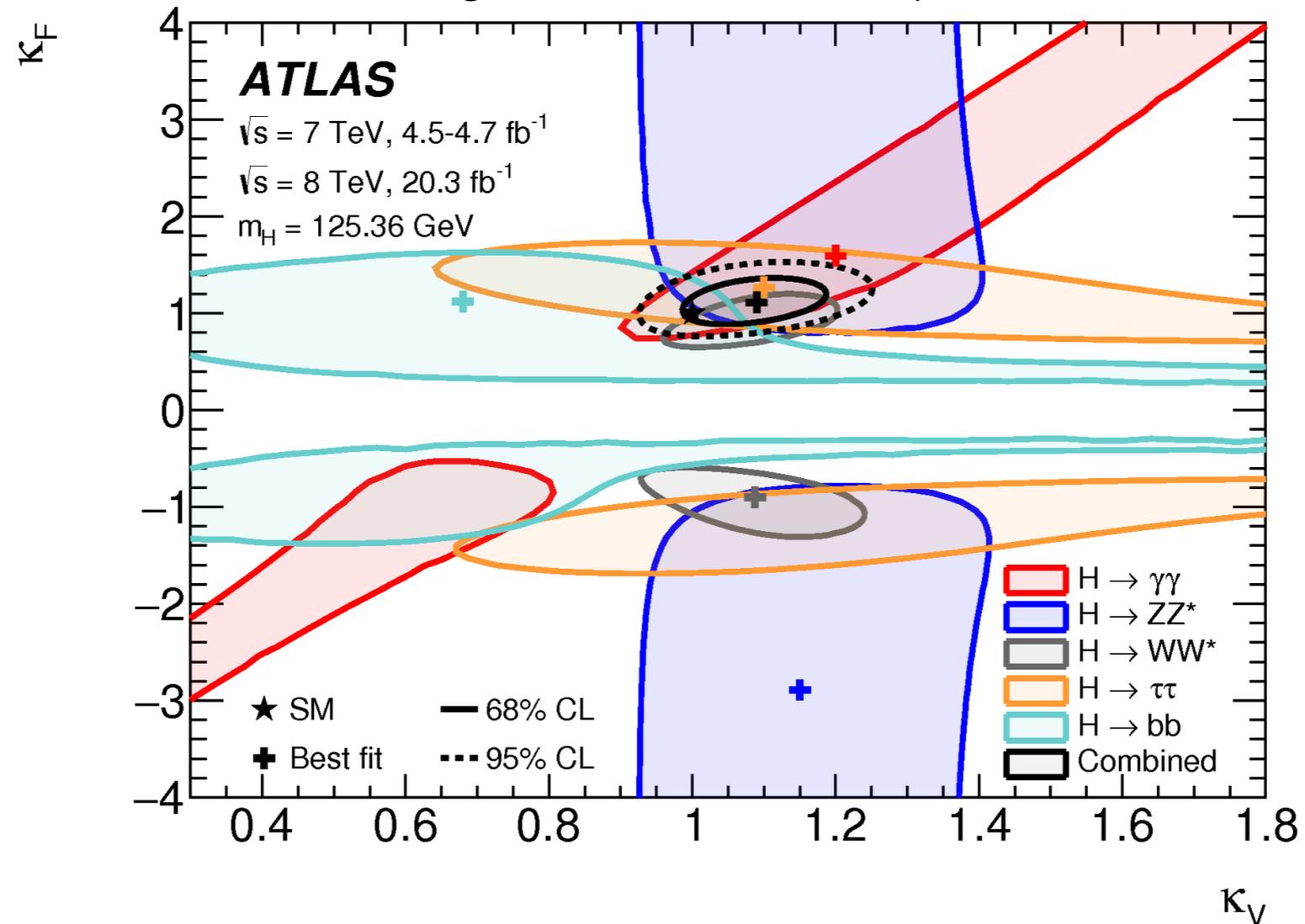
- Bonne compatibilité
- Production ttH pas encore fermement établie, mais un excès n'est pas exclu
A regarder de plus près avec les données du run 2
- Les incertitudes sont principalement limitées par la statistique de données (+ incertitudes théoriques)

Ajustement avec deux modificateurs de couplage

κ_F pour tous les fermions

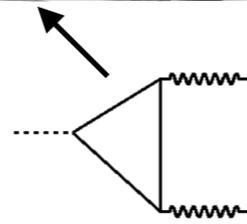
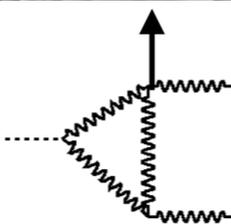
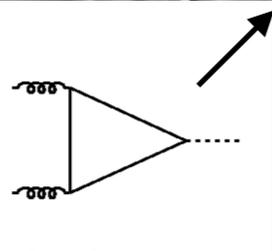
κ_V pour tous les bosons

(pas de nouvelles désintégrations ni nouvelles particules dans les boucles)



Exemple:

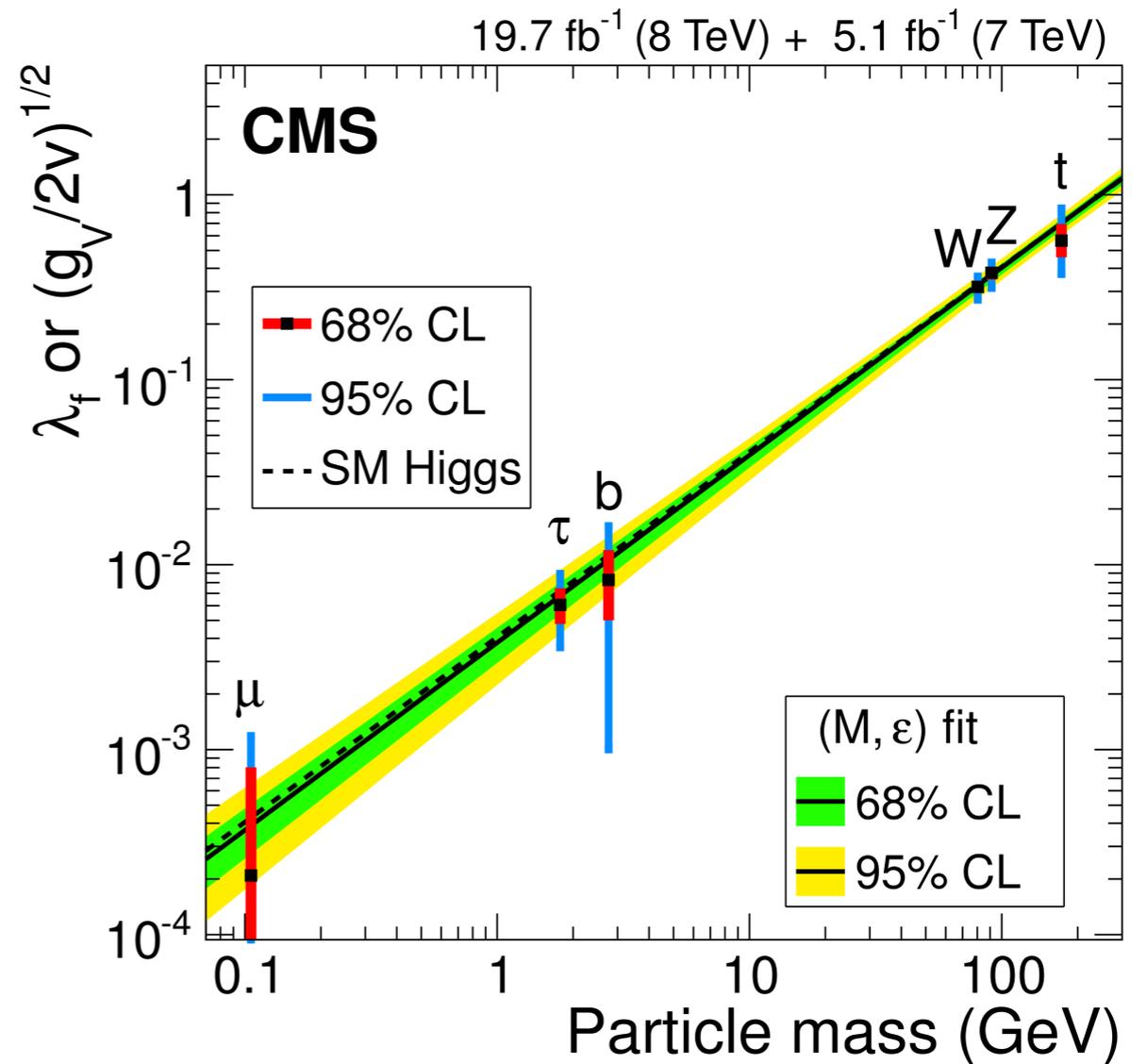
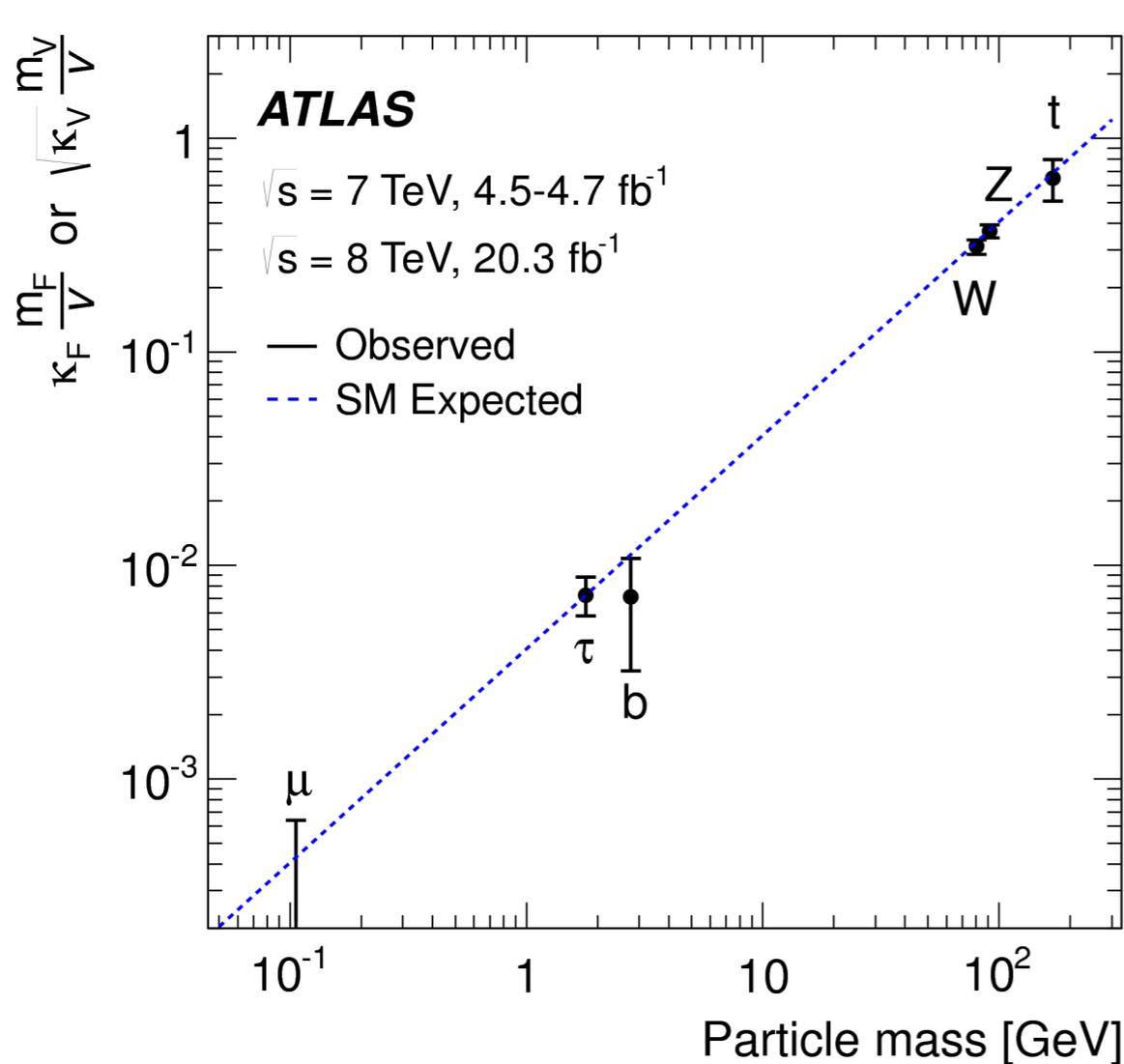
$$\text{taux}(gg \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma) \sim \kappa_F^2 * (1.6 \kappa_V^2 + 0.07 \kappa_F^2 - 0.66 \kappa_F \kappa_V) / (0.75 * \kappa_F^2 + 0.25 * \kappa_V^2)$$



\uparrow
 $\Gamma(H)$

Ajustement avec un modificateur de couplage par particule du Modèle Standard

(pas de nouvelles désintégrations ni nouvelles particules dans les boucles)



Les précisions typique sur la mesure des couplages sont $O(15\text{-}40)\%$ pour des modèles flexibles

D'autres bosons de Higgs ?

Un secteur scalaire plus étendu est possible

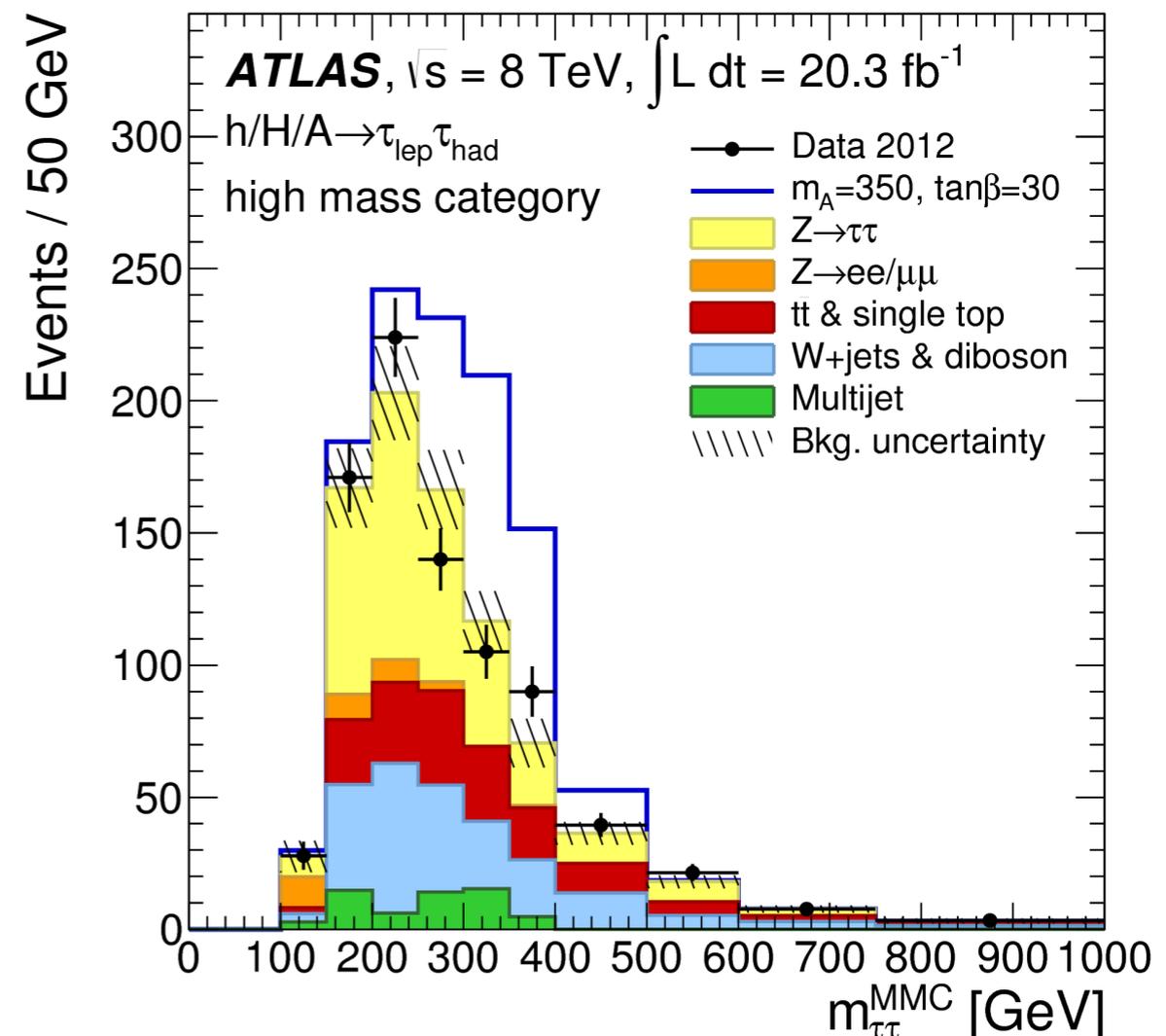
Exemple classique: Les modèles supersymétriques impliquent 2 doublets scalaires au lieu de 1 dans le MS

=> 5 champs physiques après brisure symétrie Electrofaible.

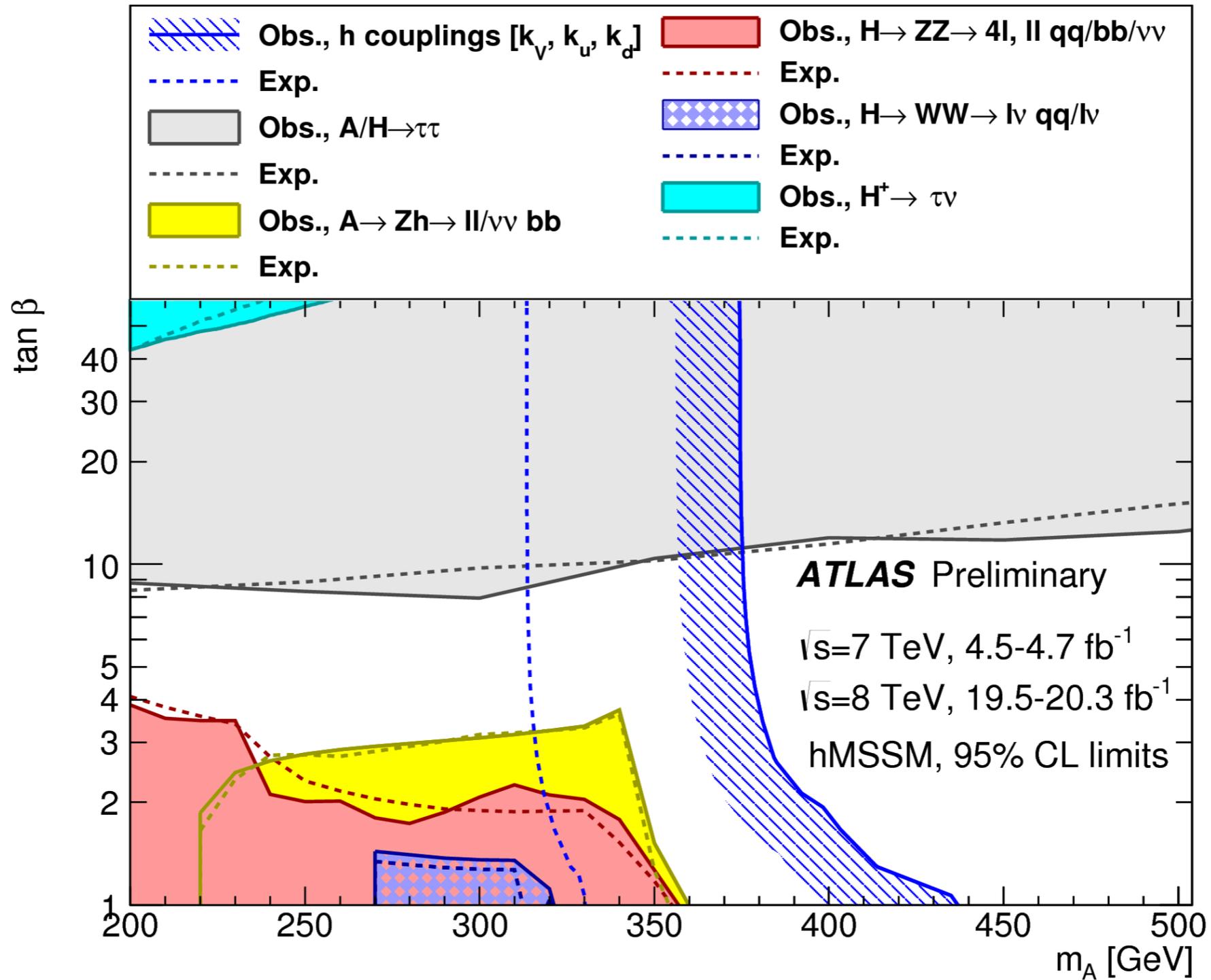
h, H, A, H^\pm

h = scalaire le plus léger, peut avoir des propriétés "proches" de $h(\text{MS})$

H, A, H^\pm typiquement plus lourds
Recherche par exemple $H, A \rightarrow \tau\tau$



Complémentarité entre recherche directe de nouveaux bosons scalaires lourds et les mesure de précision du h(125 GeV) dans le cadre de modèle supersymétrique minimum



Perspectives

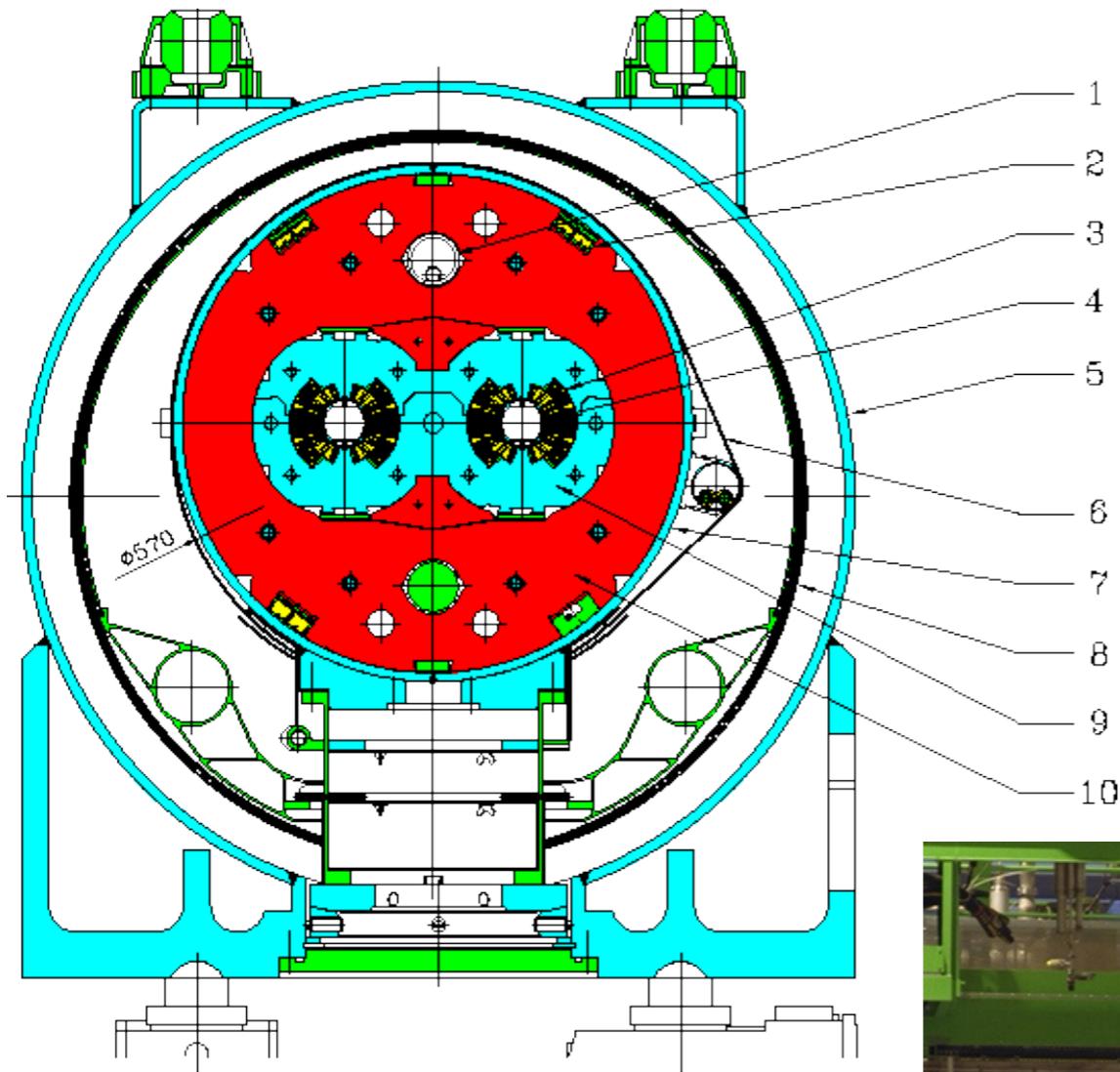
- L'analyse des données du run 1 (2010-2012) est quasiment finale
 - Une combinaison des données ATLAS et CMS va être disponible très bientôt
- Futur au LHC
 - Avec les runs 2 et 3 (jusqu'en 2022) \Rightarrow $O(10)$ fois plus de données à plus haute énergie
 - Avec le programme HL-LHC \Rightarrow $O(100)$ fois plus de données
 - Amélioration drastique des précisions des études de H(125 GeV) ainsi que de la recherche d'autres particules scalaires plus massives
- La masse de 125 GeV est accessible aussi à de possibles futurs collisionneurs e^+e^-

Conclusions

- La découverte d' "un" boson de Higgs a été le fait marquant de la première phase d'exploitation du LHC
 - Même si elle ne doit pas occulter les très nombreux autres résultats obtenus
- Cette découverte confirme le mécanisme du Modèle Standard pour donner des masses aux particules élémentaires
 - De nombreuses théories alternatives sont exclues
- Mais l'existence de boson scalaire ouvre de nombreuses questions
 - Première particule "élémentaire" de spin 0 observée
 - Stabilité de sa masse ?
 - Porte vers de la physique au delà du Modèle Standard ?
 - Liens avec d'autres champs scalaires et la cosmologie ?
 - Des mesures précises des propriétés de ce boson ouvrent un nouveau champ d'exploration
 - Avec le run I du LHC, les couplages du boson de Higgs ont été sondés avec une précision de $\sim 15-40\%$

quelques references (non exhaustives)

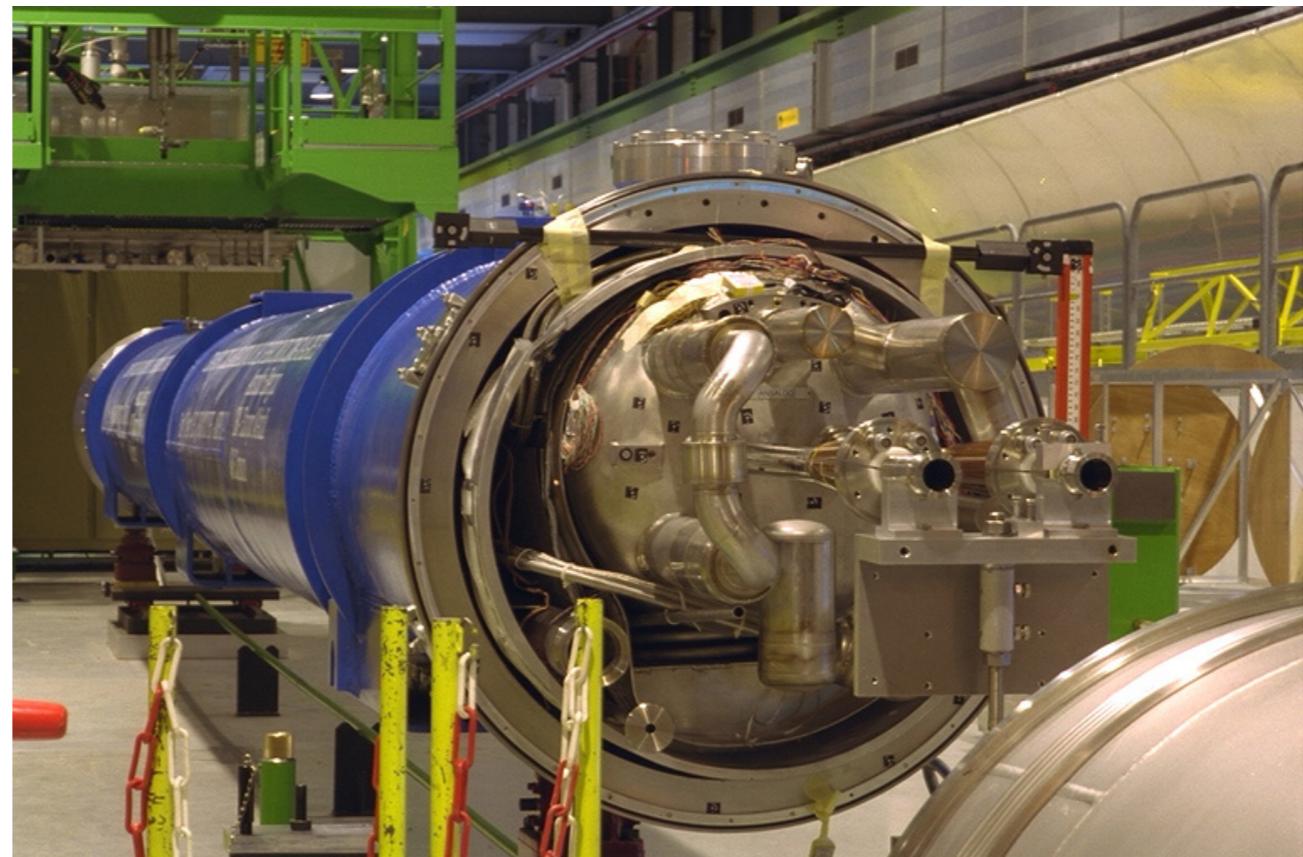
- Résultats ATLAS et CMS
 - <http://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>
 - <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIG/index.html>
- Mécanisme BEH
 - F. Englert and R. Brout, Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321.
 - P. W. Higgs, Broken symmetries, massless particles and gauge fields, Phys. Lett. 12 (1964) 132.
 - P. W. Higgs, Broken symmetries and the masses of gauge bosons, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508.
 - G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, Global conservation laws and massless particles, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.
- Modèle Standard
 - S. L. Glashow, Partial-symmetries of weak interactions, Nucl. Phys. 22 no. 4, (1961) 579.
 - S. Weinberg, A Model of Leptons, Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1264.
 - A. Salam, "Weak and electromagnetic interactions", in Elementary particle theory: relativistic groups and analyticity, N. Svartholm, ed., p. 367. Almqvist & Wiksell, 1968. Proceedings of the eighth Nobel symposium.
 - G. 't Hooft and M. Veltman, Regularization and Renormalization of Gauge Fields, Nucl. Phys. B44 (1972) 189.
- Test de précision du Modèle Standard
 - M. Baak, J. Cuth, J. Haller, A. Hoecker, R. Kogler, K. Mönig, M. Schott, J. Stelzer Eur. Phys. J. C **74**, 3046 (2014)
- Metastabilité
 - Degrassi, Di Vita, Elias-Miro', Espinosa, Giudice, G.I., Strumia arXiv 1205.6497
 - V. Branchina, E. Messina, M. Sher, Phys.Rev.D91 (2015) 1, 013003
- Production off-shell
 - N. Kauer and G. Passarino, Inadequacy of zero-width approximation for a light Higgs boson signal, JHEP 08 (2012) 116, arXiv:1206.4803.
 - F. Caola and K. Melnikov, Constraining the Higgs boson width with ZZ production at the LHC, Phys. Rev. D 88 (2013) 054024, arXiv:1307.4935
 - J. M. Campbell, R. K. Ellis, and C. Williams, Bounding the Higgs width at the LHC using full analytic results for $gg \rightarrow e^-e^+\mu^-\mu^+$, JHEP 04 (2014) 060, arXiv:1311.3589
 - J. M. Campbell, R. K. Ellis, and C. Williams, Bounding the Higgs width at the LHC: complementary results from $H \rightarrow WW$, Phys. Rev. D 89 (2014) 053011, arXiv:1312.1628.
- Calcul section efficaces et BR du Higgs
 - S. Dittmaier et al., Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables (2011), arXiv:1101.0593 [hep-ph].
 - S. Dittmaier et al., Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 2. Differential Distributions (2012), arXiv:1201.3084 [hep-ph].
 - S. Heinemeyer et al., Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 3. Higgs Properties (2013), arXiv:1307.1347 [hep-ph].
 - + references dans ces articles
 - C. Anastasiou, C. Duhr, F. Dulat, F. Herzog and B. Mistlberger, arXiv:1503.06056 (calcul N3LO)



Dipole de 8.3 T pour courber les protons

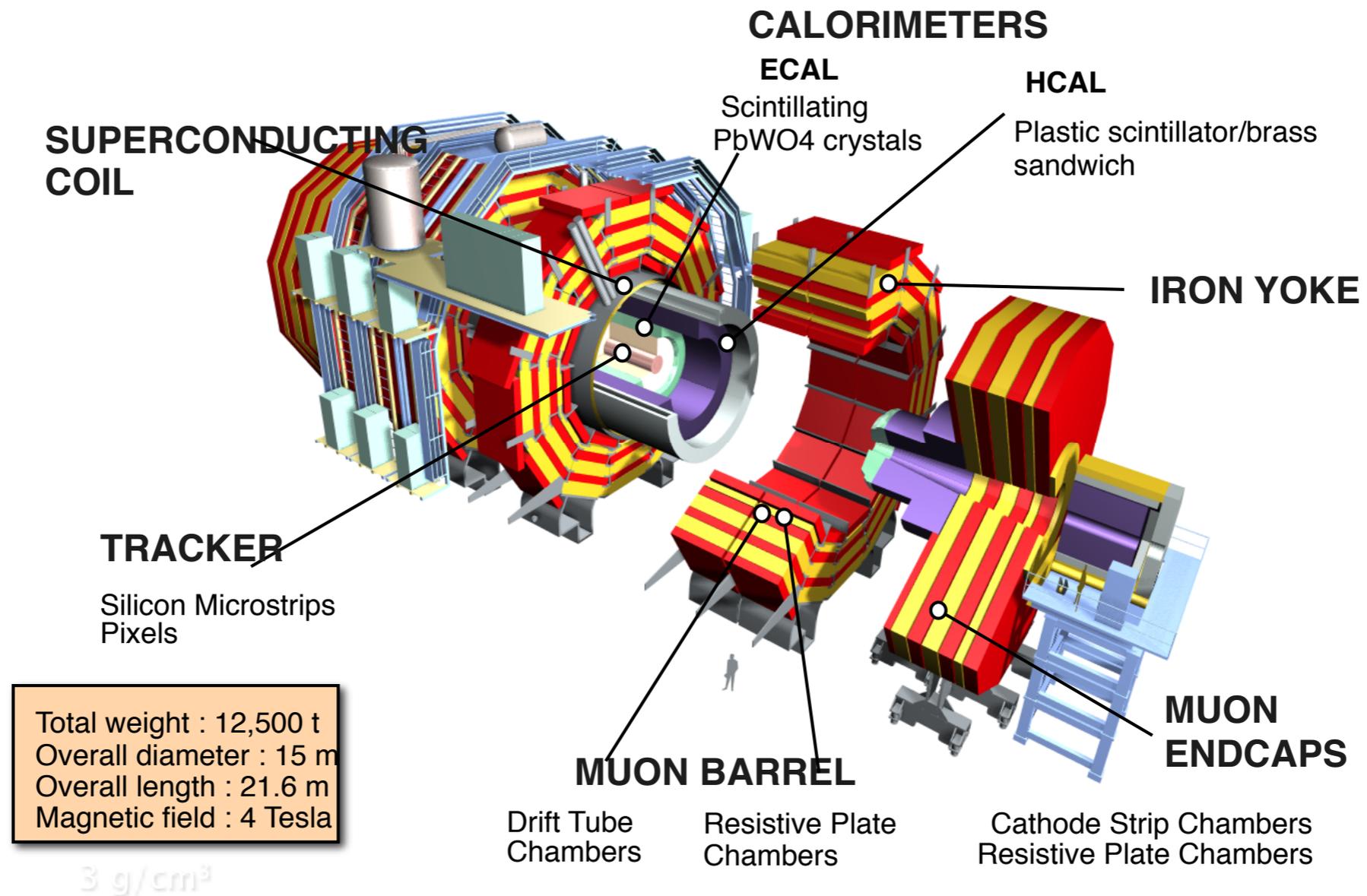
NbTi à $T=1.9\text{K}$

1 GJ énergie magnétique stockée

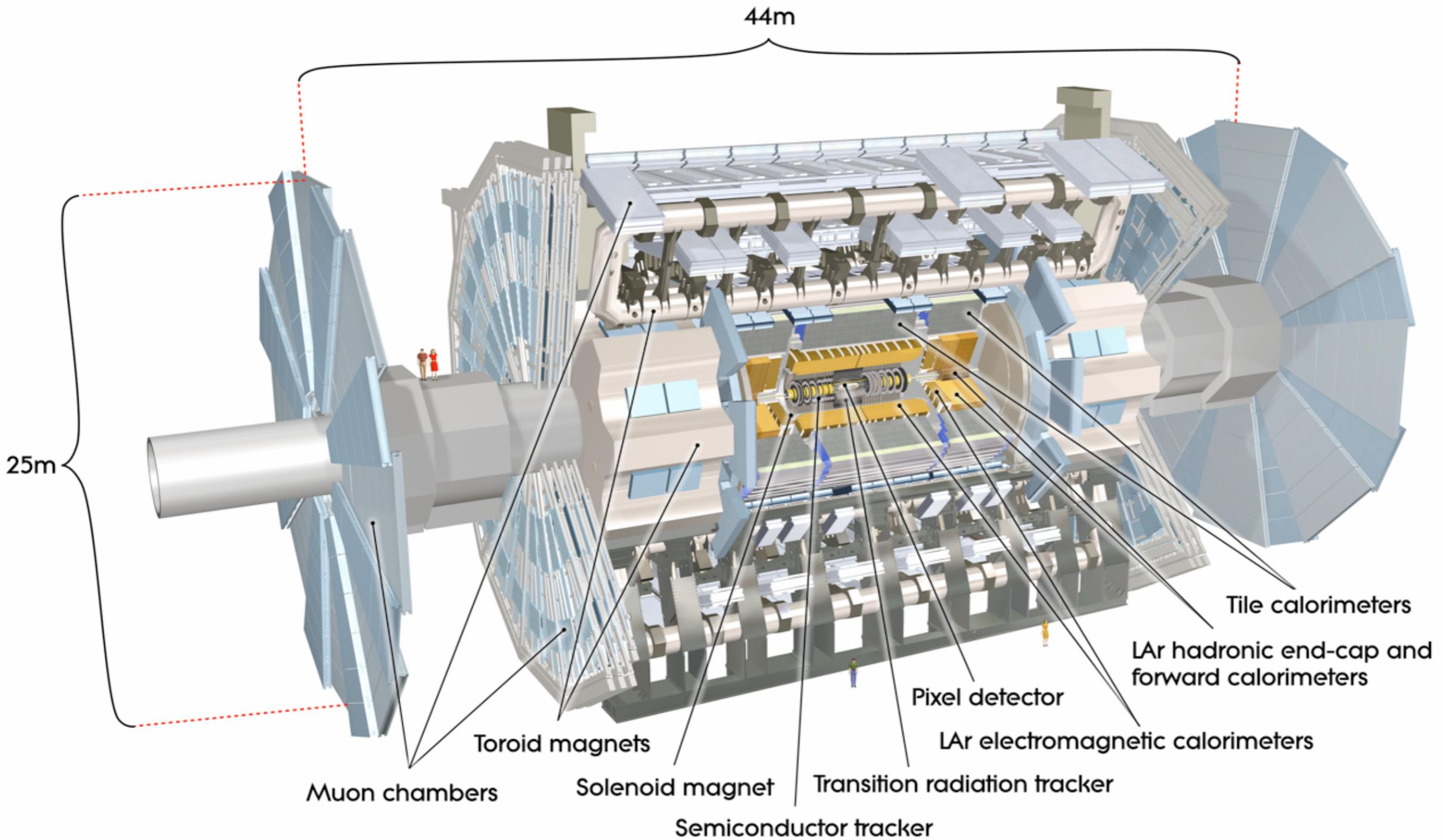


Quels instruments pour détecter ces collisions ?

Le détecteur CMS



Le détecteur ATLAS



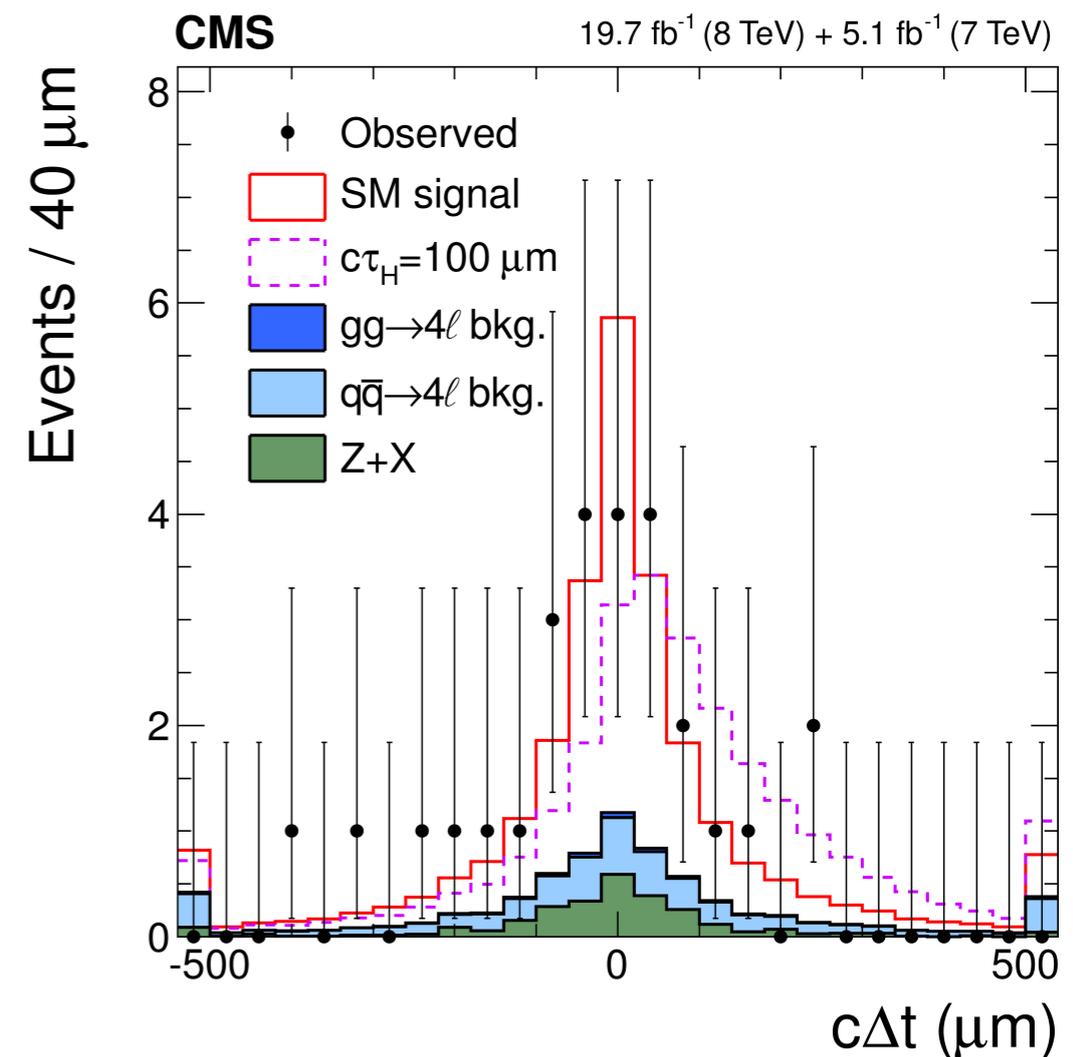
Durée de vie /largeur

$\Gamma(\text{MS}) \sim 4 \text{ MeV}$ (durée de vie $\sim 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ fs}$,
 $c\tau \sim 50 \text{ fm}$)

Mesure directe de la largeur de la distribution de M_H (mesurée)
 \Rightarrow Limite $O(\text{GeV})$ (limitée par résolution expérimentale)

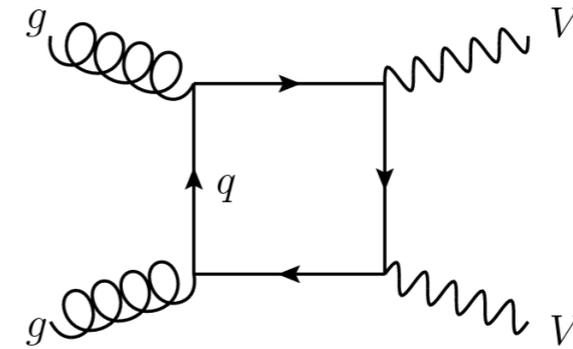
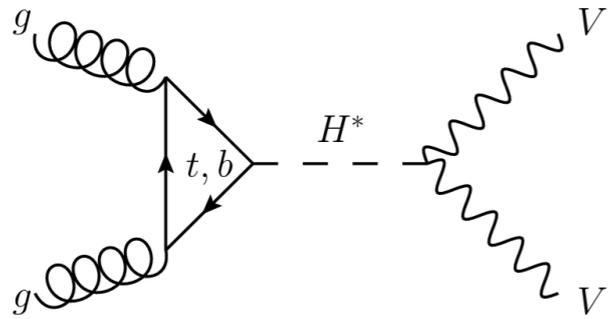
On peut exclure une durée de vie grande en vérifiant que le boson de Higgs se désintègre au point où il est produit

\Rightarrow durée de vie $c\tau < 57 \mu\text{m}$
i.e $\Gamma > 3.6 \cdot 10^{-9} \text{ MeV}$



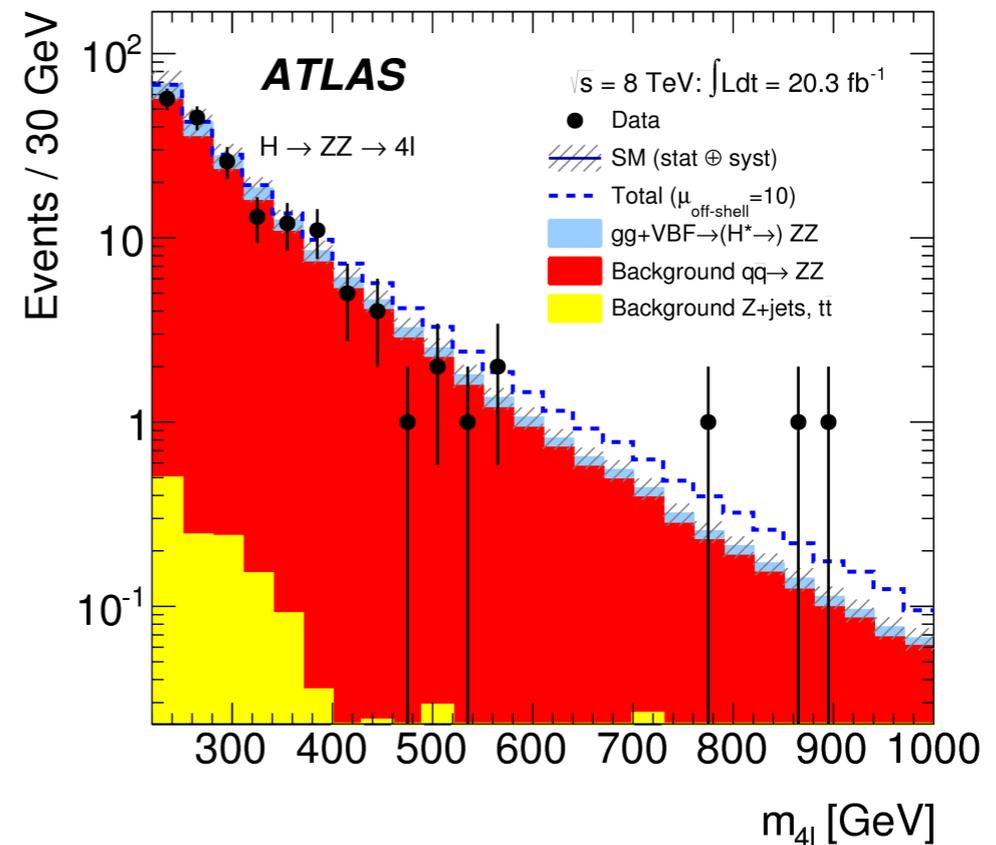
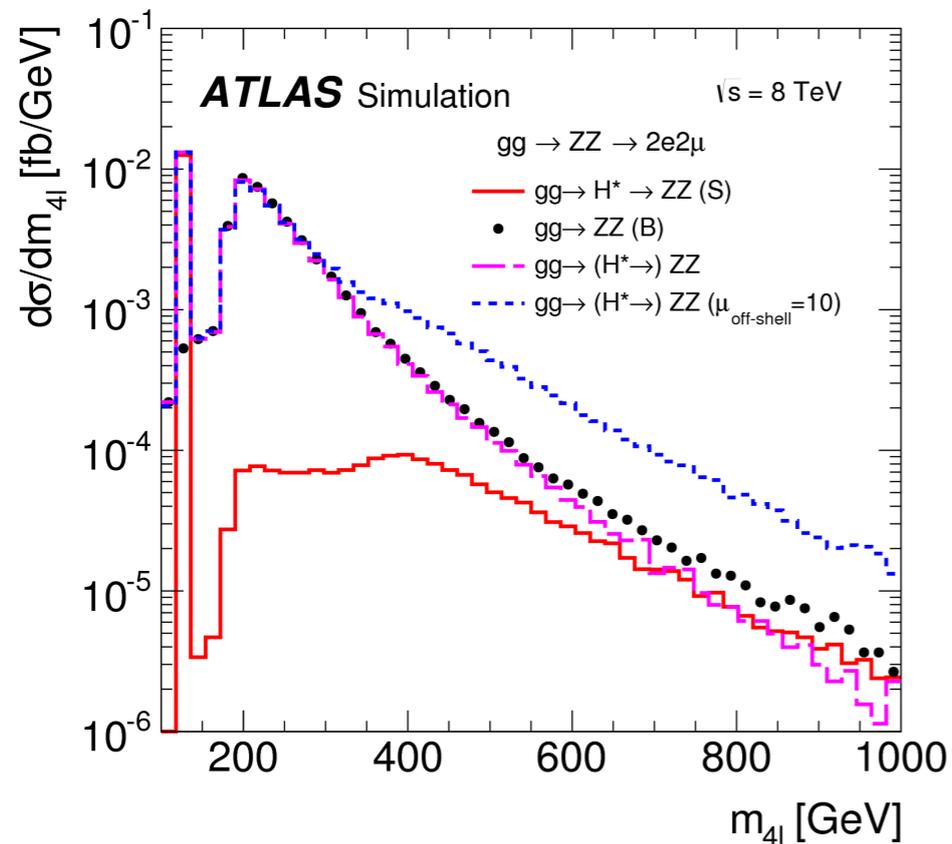
Evénements "hors couche de masse"

Une nouvelle idée pour contraindre la largeur



Interférence avec "bruit de fond"

$q \sim M_H \quad \sigma \sim 1/\Gamma_H \cdot (\text{couplages})$
 $q \gg M_H \quad \sigma \sim (\text{couplages})$



$\Rightarrow \Gamma/\Gamma(MS) < \sim (5-7)$

(avec des caveat)

Spin /CP

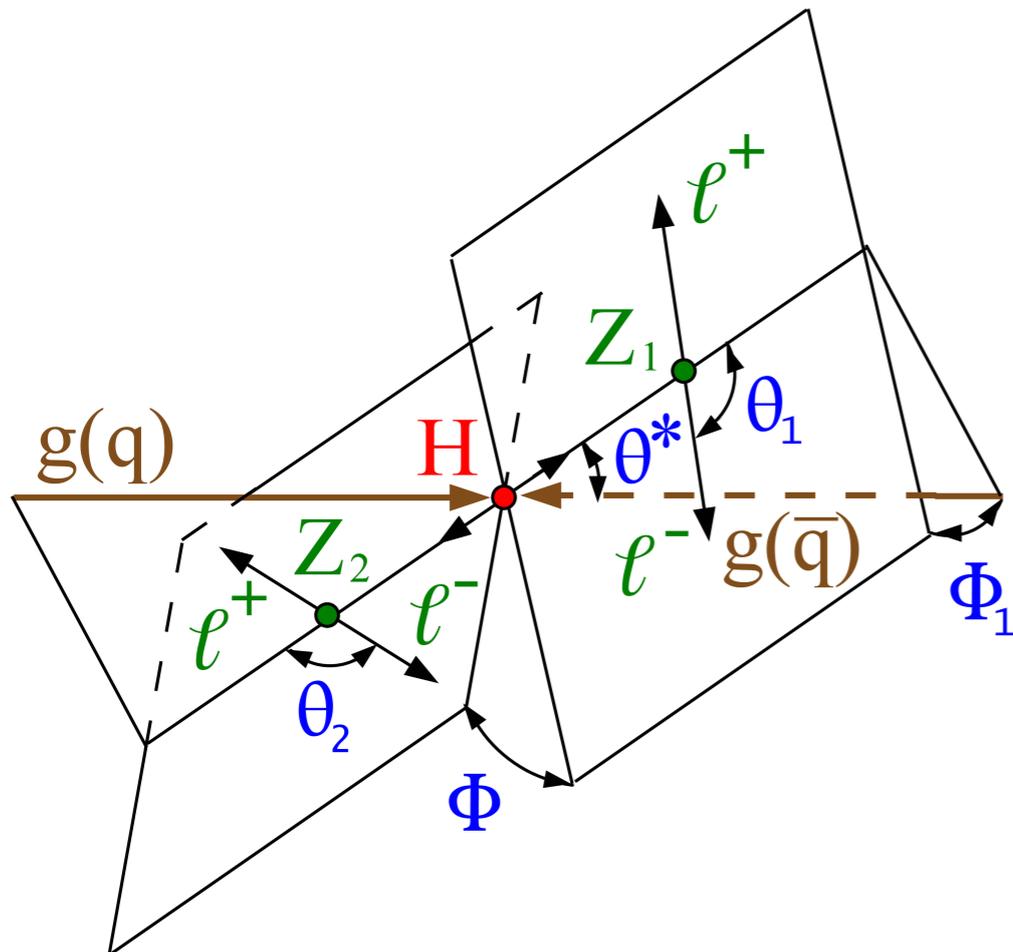
$H \rightarrow ZZ^*$ est le canal idéal pour étudier ces nombres quantiques

L'événement peut être complètement reconstruit

La désintégration $Z \rightarrow \ell\ell$ permet une analyse détaillée des propriétés du boson de Higgs

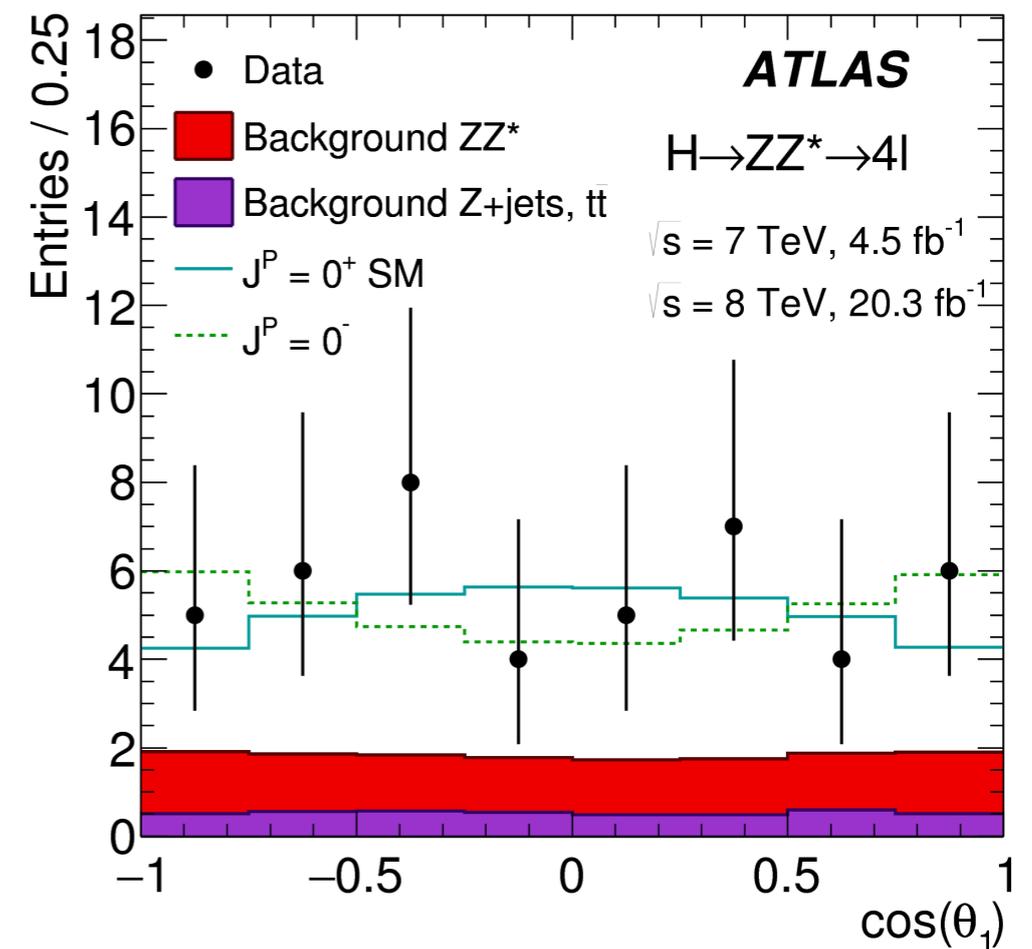
Les autres canaux de désintégrations fournissent une information complémentaire

L'observation $H \rightarrow \gamma\gamma$ exclut l'hypothèse spin 1



5 variables angulaires + 2 cinématiques

Combine l'information complète pour comparer différentes hypothèses



Résultats pour spin/CP

L'hypothèse 0^+ est toujours favorisée par rapport aux hypothèses alternatives

