

Sujet de thèse :

## Recherche du boson de Higgs se désintégrant en deux photons en production associée avec une paire de quarks top dans l'expérience CMS.

Julie Malclès (julie.malcles@cea.fr)  
Gautier Hamel de Monchenault (Gautier.Hamel.de.Monchenault@cern.ch),  
Groupe CMS,  
CEA-Saclay, IRFU-SPP

Cette thèse doit débiter en septembre 2014. Les demandes de financement (écoles doctorales ou CEA) doivent généralement se faire avant le mois d'avril précédent le début de la thèse.

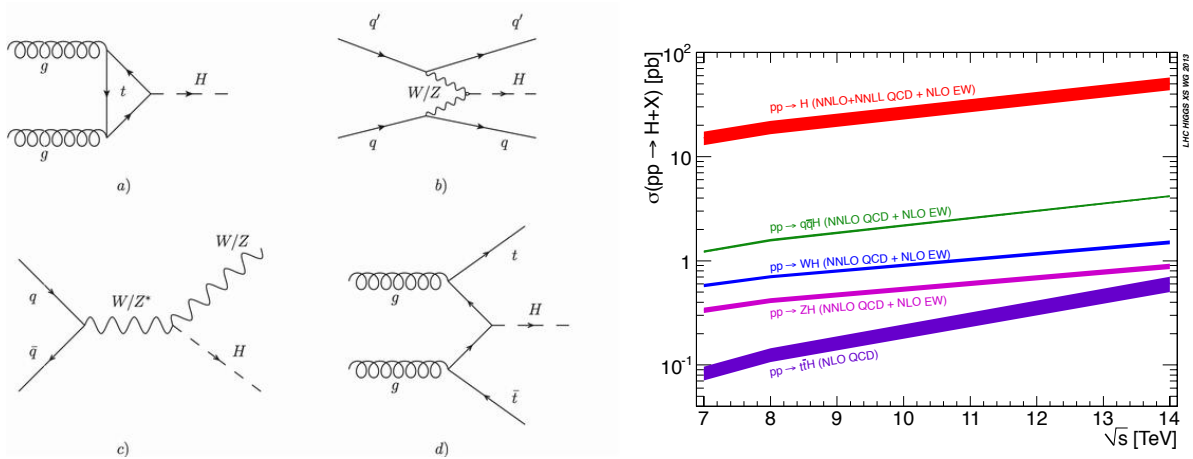
Le 4 juillet 2012, les expériences ATLAS et CMS du LHC au CERN ont observé un nouveau boson, avec un échantillon d'environ  $10 \text{ fb}^{-1}$  de données de collisions proton-proton à une énergie dans le centre de masse de 7 à 8 TeV [1, 2]. Cette particule est compatible avec le boson de Higgs, particule prédite par le Modèle Standard de la physique des particules (MS) [3–6]. Sa masse, de l'ordre de 125 GeV, est en bon accord avec les contraintes indirectes sur le boson de Higgs du MS, issues des mesures de précision électrofaibles [7]. Elle a été observée via les deux canaux de désintégration en deux photons et en quatre leptons, canaux les plus sensibles à cette masse. Son observation en deux photons démontre que cette particule a un spin entier et pair. La mesure des propriétés de cette particule est aujourd'hui un des enjeux majeurs en physique des particules : son spin, sa parité et ses couplages aux autres particules doivent être mesurés avec une grande précision pour vérifier s'il s'agit ou non du boson de Higgs du MS.

L'étude de la production  $t\bar{t}H$  est le seul accès direct au couplage de Yukawa du boson de Higgs au quark top. Les sections efficaces de production en association avec une paire de quarks top sont 2 ordres de grandeur plus petites que la production principale par fusion de gluon, ce canal souffre donc d'une très faible statistique. À 13 TeV, la production est cependant 4 fois plus importante qu'à 8 TeV.

De premières recherches de la production  $t\bar{t}H$  ont été effectuées avec les données à 7 et 8 TeV dans différents canaux de désintégration, aussi bien dans ATLAS que dans CMS. La statistique actuelle ne permet pas d'observation. Les résultats de CMS sont présentés sur la figure 2. Les limites actuelles à 95% de niveau de confiance sur la section efficace de production  $t\bar{t}H$  [9, 10], issues du canal en deux photons, sont :

$$\begin{array}{ll} \frac{\sigma}{\sigma_{\text{SM}}}(t\bar{t}H) < 5.4 \text{ (5.3 attendus)} & \text{CMS} \\ \frac{\sigma}{\sigma_{\text{SM}}}(t\bar{t}H) < 5.3 \text{ (6.4 attendus)} & \text{ATLAS} \end{array}$$

Bien que le canal en deux photons ne soit pas celui qui présente le plus fort taux de branchement (seulement environ 0.2% contre 56% pour le canal en paire de quarks b), il est très prometteur car une reconstruction précise de la masse  $y$  est possible. De plus, sa signature est très propre dans le détecteur : la présence de



**FIGURE 1:** À gauche : mécanismes dominants de production du boson de Higgs au LHC. À droite : sections efficaces de production du boson de Higgs pour ces différents mécanismes en fonction de l'énergie dans le centre de masse, à  $m_H = 125$  GeV. La production  $t\bar{t}H$  est moindre par rapport à la production par fusion de gluons de 2 ordres de grandeur. La production  $t\bar{t}H$  est environ 4 fois plus importante à 13 TeV qu'à 8 TeV.

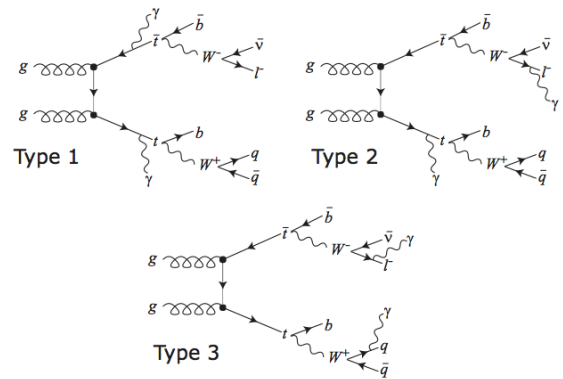
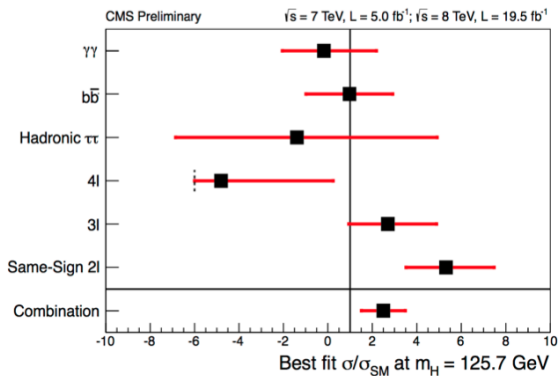
deux photons énergétiques et isolés, soit la présence de deux dépôts d'énergie isolés dans le calorimètre électromagnétique et sans trace de particule chargée associée dans le trajectographe. Le canal en deux photon est particulièrement intéressant car c'est le seul mode de désintégration qui permet d'étudier tous les modes de production du boson de Higgs. Ainsi, bien que limité par les incertitudes statistiques au départ, ce canal sera le plus précis à long terme, car la plupart des incertitudes systématiques peuvent être éliminées en faisant des rapports de sections efficaces pour les différents modes de production. Des études préliminaires [8] montrent qu'un excès à  $3\sigma$  devrait être observable au LHC dans le canal  $t\bar{t}H$  avec  $H \rightarrow \gamma\gamma$  avec une centaine de  $\text{fb}^{-1}$ .

L'état final considéré est plus contraint que dans le canal inclusif puisqu'il comporte, en plus des deux photons issus de la désintégration du boson de Higgs, deux quarks  $b$  et deux bosons  $W$ <sup>1</sup>. Les bruits de fond sont donc plus faciles à rejeter. Deux canaux peuvent être envisagés : le canal "hadronique", dans lequel les deux bosons  $W$  se désintègrent hadroniquement (en jets), et le canal "leptonique", avec au moins un  $W$  se désintégrant leptoniquement  $W \rightarrow \ell\nu$  avec  $\ell = e, \mu$ . Les bruits de fonds principaux sont les productions  $\gamma\gamma$ +jets,  $\gamma$ +jets, la production QCD multijets, et les productions de top,  $V\gamma\gamma$  et  $VV$  (avec  $V = Z$  ou  $W^\pm$ ). Les bruits de fond irréductibles sont les productions  $t\bar{t}\gamma\gamma$  (cf Figure 2).

Différentes variables pourront être utilisées pour réduire les bruits de fond. La présence de quarks top augmente la multiplicité de l'événement (le nombre de jets et le nombre de jets de  $b$ ), qui peut être utilisée pour réduire le bruit de fond QCD. De plus, le  $p_T$  des photons tend à être plus grand pour le signal boosté. Dans le canal leptonique, la présence d'un lepton isolé de haut  $p_T$  permet aussi de discriminer le bruit de fond QCD et de reconstruire avec une précision accrue le vertex primaire de l'interaction. L'énergie transverse manquante due à la présence d'un neutrino dans le canal semi-leptonique peut aussi permettre d'éliminer certains bruits de fond.

La thèse proposée se divisera en plusieurs parties :

1. le quark top se désintègre à 100% en  $Wb$



**FIGURE 2:** À gauche : résultats de CMS pour la recherche de production  $t\bar{t}H$  dans différents canaux de désintégration du boson de Higgs. Les contraintes sur les sections efficaces sont rapportées aux sections efficaces attendues dans le MS, pour un boson de Higgs de masse 125.7 GeV. Les erreurs sont encore très grandes, puisqu'on cherche ici à discriminer entre 0 et 1. On note que le mode en deux photons est déjà compétitif. À droite : bruits de fond irréductibles  $t\bar{t}\gamma\gamma$ .

1. En 2014-2015 (LHC à l'arrêt) :
  - Une étude portant sur les upgrades du calorimètre électromagnétique de CMS pour la phase II du LHC, phase à haute luminosité qui permettra d'atteindre les précisions ultimes sur le couplage  $t\bar{t}H$ . La dégradation de la résolution en énergie dans le calorimètre et de l'identification des photons nécessiteront des mises à jour de l'appareillage qui doivent être définies et étudiées.
  - Une étude détaillée de la sensibilité attendue à 13 TeV à moyen et à long terme, avec une simulation réaliste dans le canal  $t\bar{t}H$  avec  $H \rightarrow \gamma\gamma$ .
2. En 2015-2016 (reprise des collisions à 13 TeV, 30 fb<sup>-1</sup> prévus fin 2015) :

L'analyse des données à 13 TeV, en adaptant et améliorant l'analyse précédente, avec une première limite sur la production  $t\bar{t}H$  à 13 TeV et une première publication.
3. En 2016-2017 (poursuite des collisions à 13 TeV, 80 fb<sup>-1</sup> prévus fin 2016) :
  - L'analyse de l'échantillon final, qui devrait permettre une première mesure de la production  $t\bar{t}H$  avec  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , ainsi qu'une seconde publication.
  - La rédaction du manuscrit et la recherche de post-doctorat durant les 4 à 6 derniers mois.

Durant cette thèse, l'étudiant sera amené à travers ce sujet à maîtriser un grand nombre d'aspects : la mesure de l'énergie des photons dans le calorimètre électromagnétique, la mesure de l'angle entre les photons et de la position du vertex primaire de l'interaction, l'identification des électrons, des muons et des photons, la mesure de l'échelle d'énergie des jets, la maîtrise de la mesure de l'énergie transverse manquante, l'identification des jets contenant des hadrons beaux, l'étiquetage des jets b.

Le groupe CMS de Saclay possède une grande expertise dans la mesure de l'énergie des photons, ayant pris part à la construction du calorimètre électromagnétique de CMS et ayant depuis un rôle leader dans sa calibration. Le groupe a aussi participé activement à l'analyse du canal  $H \rightarrow \gamma\gamma$  qui a permis la découverte du boson de Higgs. L'étudiant sera encadré par une équipe possédant l'expertise et les outils nécessaires pour entreprendre cette étude. Ainsi, l'analyse pourra être rapidement démarrée en ajoutant des jets et ou des leptons à l'analyse existante.

## Références

- [1] G. Aad *et al.* [ATLAS Collaboration], Phys. Lett. B **716** (2012) 1.
- [2] S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration], Phys. Lett. B **716** (2012) 30.
- [3] S. L. Glashow, Nucl. Phys. **22** (1961) 579 ; S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264 ; A. Salam, Proceedings of 8th Nobel Symposium - Lerum - Sweden (19-25 May 1968) 367.
- [4] S. L. Glashow, J. Iliopoulos and L. Maiani, Phys. Rev. **D2** (1970) 1285.
- [5] P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 508 et Phys. Rev. **145** (1966) 1156 ; F. Englert, R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321 ; G. S. Guralnik, C. R. Hagen, T. W. B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 585 ; T. W. B. Kibble, Phys. Rev. **155** (1967) 1554.
- [6] G. 't Hooft, Nucl. Phys. **B33** (1971) 173 et Nucl. Phys. **B35** (1971) 167 ; G. 't Hooft, M. J. G. Veltman, Nucl. Phys. **B44** (1972) 189.
- [7] [ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL Collaborations, LEP electroweak and SLD electroweak and heavy flavor working groups], Phys. Rept. **427** (2006) 257.
- [8] G. L. Bayatian *et al.* [CMS Collaboration], J. Phys. G **34** (2007) 995.
- [9] [CMS Collaboration], CMS PAS HIG-13-015 (2013).
- [10] [ATLAS Collaboration], ATLAS-CONF-2013-080 (2013).