



# DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **8 septembre 2017**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Nicolas DEUTSCHMANN**

Titre de la thèse : « Calculs de précision dans des théories effectives pour la physique du boson de Higgs ».



## RÉSUMÉ DE THÈSE :

La découverte du boson de Higgs en 2012 a marqué le début d'une nouvelle ère en physique des particules. Après cinq ans d'études, les caractéristiques de cette nouvelle particule confirment qu'elle se conforme aux prédictions du modèle standard de la physique des particules, bien que les incertitudes expérimentales permettent encore des déviations non-négligeables, qui pourraient être indicatrices de nouvelle physique. L'étude du boson de Higgs est donc actuellement tournée vers l'amélioration de la précision des mesures existantes et l'extension du corpus de données expérimentales à de nouveaux canaux de production et de désintégration afin de contraindre au mieux les possibles déviations.

Tester les propriétés du modèle standard en utilisant des mesures très précises requiert d'avoir à notre disposition des prédictions théoriques auxquelles les comparer. Ma thèse s'inscrit dans cette entreprise qui vise à améliorer la précision des calculs théoriques dans le modèle standard et au delà dans le but de fournir aux expérimentateurs les outils les plus performants possibles pour tester le modèle standard, contraindre les modèles de nouvelle physique, et extraire un maximum d'informations de découvertes éventuelles.

Après une introduction générale, ce manuscrit contient deux chapitres d'introduction, l'un décrivant le contexte physique et l'autre les techniques mathématiques qui ont permis le développement de cette thèse. L'introduction du contexte physique fait un survol des aspects les plus importants de la physique des particules au LHC en présentant d'abord le modèle standard, puis les spécificités des calculs de précisions en collisionneurs hadroniques, en particulier l'annulation des divergences infrarouges entre les corrections virtuelles et les émissions réelles. Nous abordons ensuite en plus de détails la physique du boson de Higgs, passant en revue son statut expérimental après le Run I du LHC et les méthodes d'ajustement qui ont servi aux mesures globales, avant de décrire la théorie effective du boson de Higgs, approximation du modèle standard dans la limite de la masse du quark top infinie, qui a permis de calculer la section efficace de production du boson de Higgs par fusion de gluons à une très grande précision. L'introduction du contexte physique se termine par l'introduction de la théorie effective du modèle standard, qui en est une extension permettant de décrire de manière universelle les effets indirects de nouvelle physique très lourde sur les interactions des particules élémentaires déjà connues.

La présentation des techniques mathématiques utilisées dans la thèse fait une revue des méthodes d'évaluation des diagrammes de Feynman à plusieurs boucles, qui sont les briques élémentaires des calculs perturbatifs aux ordres élevés. Nous présentons d'abord les techniques qui permettent de passer d'un grand nombre de diagrammes et d'intégrales à un petit nombre d'intégrales maîtresses, avant de décrire trois méthodes d'évaluation de celles-ci: la paramétrisation de Feynman qui permet l'évaluation directe des intégrales, l'expansion par régions et l'évaluation numérique par la méthode des secteurs. Le chapitre se termine par l'introduction des polylogarithmes multiples, fonctions spéciales essentielles à nos calculs, et à leur structure d'algèbre de Hopf, qui est un outil essentiel dans les calculs d'intégrales de Feynman.

Passés ces deux chapitres d'introduction, le manuscrit présente les travaux originaux développés au cours de cette thèse. Le chapitre 4 décrit l'extraction de la correction du couplage de Yukawa du quark bottom dans la théorie effective du boson de Higgs par un calcul de correspondance à deux boucles entre cette théorie effective et le modèle standard. Cette correction représentait la pièce manquante pour l'amélioration de la prédiction de la section efficace de production du boson de Higgs en association avec deux quarks bottom, et nous pourrions l'utiliser à l'avenir pour réduire l'incertitude théorique de cette prédiction. Le calcul de correspondance est effectué par le biais d'un facteur de forme de la désintégration du boson de Higgs en deux quarks bottom. Les deux grandes parties du chapitre décrivent le calcul de ce facteur de forme. Nous effectuons d'abord un calcul exact dans la théorie effective du boson de Higgs en décrivant la décomposition de l'amplitude en termes d'intégrales maîtresses à une boucle, que nous évaluons par intégration directe après avoir introduit plusieurs techniques d'intégration dont une méthode itérative qui exploite la simplification des polylogarithmes par application du coproduit de manière itérée. Nous effectuons ensuite le calcul du même facteur de forme dans le modèle standard, où il est décrit par des diagrammes à deux boucles. Nous réduisons ceux-ci en termes d'intégrales maîtresses que nous calculons par intégration directe après expansion dans la limite de la masse du quark top infinie par la méthode des régions. Finalement, nous comparons les deux résultats pour fixer la valeur de la correction du couplage de Yukawa du quark bottom dans la théorie effective du boson de Higgs, qui prend une forme compacte.

Les deux chapitres finaux couvrent différents aspects du calcul de la correction au deuxième ordre de la section efficace de production d'un boson de Higgs par fusion de gluon dans la théorie effective du modèle standard, en présentant d'abord le calcul analytique des corrections virtuelles puis la phénoménologie du résultat. Le premier chapitre commence par la présentation des opérateurs de dimension six qui modifient la boucle du quark top dans la fusion de gluon et détaille les étapes qui ont permis d'évaluer analytiquement l'amplitude au premier ordre et sa correction virtuelle à deux boucles. Nous obtenons l'expression de l'amplitude en termes d'intégrales maîtresses identiques à celles utilisées dans le calcul de la section efficace de fusion de gluon dans le modèle standard, effectué en 2006, et utilisons ce résultat pour obtenir l'expression de la correction virtuelle de l'amplitude dans la théorie effective. Nous décrivons ensuite la structure des divergences de cette amplitude et appliquons sa renormalisation à une boucle. Nous utilisons ensuite la soustraction des divergences infrarouges pour isoler les divergences à deux boucles de l'amplitudes, dont la structure était inconnue avant notre calcul et fixons ainsi un des éléments de la matrice de renormalisation à deux boucles de la théorie effective du modèle standard. L'analyse des divergences infrarouges des contre-termes à une boucle permet d'expliquer l'apparition d'une divergence d'ordre trois dans l'amplitude non-renormalisée, fait inhabituel dans les calculs de corrections radiatives au second ordre. Ayant fixé entièrement la renormalisation de l'amplitude, nous pouvons exprimer sa contribution finie dans le formalisme de la soustraction de Catani-Seymour. Finalement, nous présentons la continuation analytique du résultat aux régions physique en décrivant le chemin suivi dans le plan complexe par le paramètre rationnel en termes duquel sont exprimées les intégrales maîtresses, qui montre que des points de branchement apparaissent lorsque l'énergie passe le seuil de production du quark top et nous expliquons la méthode qui permet d'exprimer les polylogarithmes multiples dans le résultat en termes de fonctions sans point de branchement et de logarithmes dont la continuation analytique est triviale.

Le second chapitre présente la combinaison du résultat à deux boucles avec le calcul automatique des corrections par émission réelles par le logiciel Madgraph5\_aMC@NLO, qui permet l'intégration de la section efficace évaluée au deuxième ordre et corrigée par l'inclusion de simulations de gerbes hadroniques. Le résultat de l'évaluation numérique est présenté et nous observons que la distribution différentielle en impulsion transverse peut discriminer l'effet de chaque opérateur dans la queue de la distribution. Nous discutons de l'impact des corrections radiatives sur le taux global de production du boson de Higgs ainsi que sur la section efficace différentielle en impulsion transverse. Ces corrections sont universelles pour les taux de production totaux, ce que l'on peut expliquer par la domination de la production au seuil, où les détails de l'interaction ne peuvent être résolus et chaque contribution prend la forme universelle d'une interaction de contact. Cette explication est confirmée par l'étude des corrections radiatives au niveau différentiel, où l'universalité est brisée à haute énergie.

Nous finissons la discussion de la phénoménologie du processus par une rapide considération des effets éventuels d'opérateurs permettant à d'autres quarks d'apparaître dans la boucle de la fusion de gluons et concluons que seul le quark bottom pourrait contribuer de façon non-négligeable car d'autres mécanismes sont plus contraignants pour les quarks légers.