

N° d'ordre NNT : ?

Thèse de doctorat de l'Université de Lyon
opérée au sein de
L'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale N° 52
École Doctorale de Physique et Astrophysique

Spécialité du doctorat : Physique des particules

Soutenue publiquement le **XX xxxx** 2021 par

Lucas TORTEROTOT

**Recherche d'un boson de Higgs de haute masse se
désintégrant en paire de taus dans l'expérience
CMS au LHC**

devant le jury composé de :

M Bla BLA Fonction Institut <rôle>

À...

Remerciements

Remerciements

Résumé

Résumé

Abstract

Abstract

Table des matières

1	Introduction	1
2	Particules, interactions et phénoménologie	3
1	Les particules du modèle standard	3
1.1	Les fermions	3
1.2	Les bosons	3
2	Formalisme théorique et interactions	4
2.1	Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange	4
2.2	Lagrangien, champs et symétries	6
2.3	Interaction électromagnétique	6
2.4	Interaction électrofaible	6
2.5	Mécanisme de Higgs	6
2.6	Interaction forte	6
3	Succès et limites du modèle standard	6
3.1	Succès	6
3.2	Limites	6
4	Au-delà du modèle standard	7
4.1	Modèles à deux doublets de Higgs	7
4.2	La supersymétrie	7
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM	7
5	Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM	7
5.1	Production de bosons de Higgs	7
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	8
5.3	Désintégration des leptons tau	8
6	Conclusion	9
3	Dispositif expérimental	11
1	Le LHC : <i>Large Hadron Collider</i>	11
1.1	Collisions de protons	11
1.2	Accélération de protons	11
1.3	Luminosité et nombre d'événements	11
1.4	L'empilement	11
1.5	Les expériences du LHC	11
2	L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoid</i>	12
2.1	Le solénoïde	12
2.2	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	12
2.3	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	12
2.4	Le calorimètre hadronique ou HCAL	12
2.5	Les chambres à muons	12
2.6	Prise de données à CMS	12
3	Événements simulés	12
3.1	Génération d'événements	12
3.2	Simulation du détecteur	12
4	Reconstruction des événements	12

4.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	12
4.2	Identification et reconstruction des particules	12
4.3	Objets de haut niveau	12
4.4	Énergie transverse manquante	12
5	Conclusion	12
4	Calibration en énergie des jets	13
1	Introduction	13
2	Formation des jets	13
2.1	Gerbe partonique	13
2.2	Hadronisation	14
3	Reconstruction des jets	14
3.1	Algorithmes de reconstruction	14
3.2	Identification des jets dans CMS	14
3.3	Saveur des jets	14
4	Calibration en énergie des jets dans CMS	14
4.1	Correction de l'empilement	14
4.2	Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η	15
4.3	Propagation à la MET	15
4.4	Corrections résiduelles	15
4.5	Correction de la résolution en énergie	15
4.6	Incertitudes	15
5	Phénoménologie des événements photon + jets	15
6	Corrections résiduelles absolues des jets	15
6.1	Méthode de la balance	15
6.2	Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante	15
6.3	Analyse	15
6.4	Résultats	15
7	Correction de la résolution en énergie des jets	15
7.1	•	15
7.2	•	16
7.3	•	16
7.4	•	16
8	Conclusion	16
5	Recherche d'un boson de Higgs de haute masse	17
1	Introduction	17
2	Sélection d'événements et catégorisation	17
2.1	Données	17
2.2	Simulation	17
2.3	Catégorisation	17
3	Chaîne d'analyse	17
4	Estimation du bruit de fond	17
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations	17
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données	17
5	Incertitudes systématiques	17
5.1	Incertitudes de normalisation	17
5.2	Incertitudes de forme	17
6	Résultats et interprétations	18
7	Conclusion	18
6	Conclusion	19

Table des figures

2.1	Les particules du modèle standard.	4
2.2	Une particule se déplace au cours du temps d'un point A à un point B le long d'une dimension x	4
2.3	Variation de la trajectoire d'une particule se déplaçant au cours du temps d'un point A à un point B	5
2.4	Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons (ggh) et fusion de bosons vecteurs (VBF).	7
2.5	Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.	7
2.6	Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark b	8
4.1	Procédé de calibration des jets. Plusieurs corrections sont appliquées pour obtenir les jets calibrés à partir des jets reconstruits.	14
4.2	Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final.	15
4.3	•	15

Liste des tableaux

Chapitre 1

Introduction

MS = th description ptcs et interactions

50+ ans échanges th et expé

MAIS matière et énergie noire, asymétrie matière antimat., ... BSM

LHC!

CMS

« ce qui suit dans ce manuscrit »

Chapitre 2

Particules, interactions et phénoménologie

Sommaire

1	Les particules du modèle standard	3
1.1	Les fermions	3
1.2	Les bosons	3
2	Formalisme théorique et interactions	4
2.1	Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange	4
2.2	Lagrangien, champs et symétries	6
2.3	Interaction électromagnétique	6
2.4	Interaction électrofaible	6
2.5	Mécanisme de Higgs	6
2.6	Interaction forte	6
3	Succès et limites du modèle standard	6
3.1	Succès	6
3.2	Limites	6
4	Au-delà du modèle standard	7
4.1	Modèles à deux doublets de Higgs	7
4.2	La supersymétrie	7
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM	7
5	Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM	7
5.1	Production de bosons de Higgs	7
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	8
5.3	Désintégration des leptons tau	8
6	Conclusion	9

1 Les particules du modèle standard

ptc fondamentale = ? 10^{-18} m

1.1 Les fermions

spin demi entier (stat Fermi-Dirac). Constituants de la matière, il y en a 12.

Quarks fermions avec couleur

Leptons

1.2 Les bosons

spin entier, 1 (bosons de jauge, bosons vecteurs, vecteurs de force) ou 0 (Higgs)
W et chiralité?

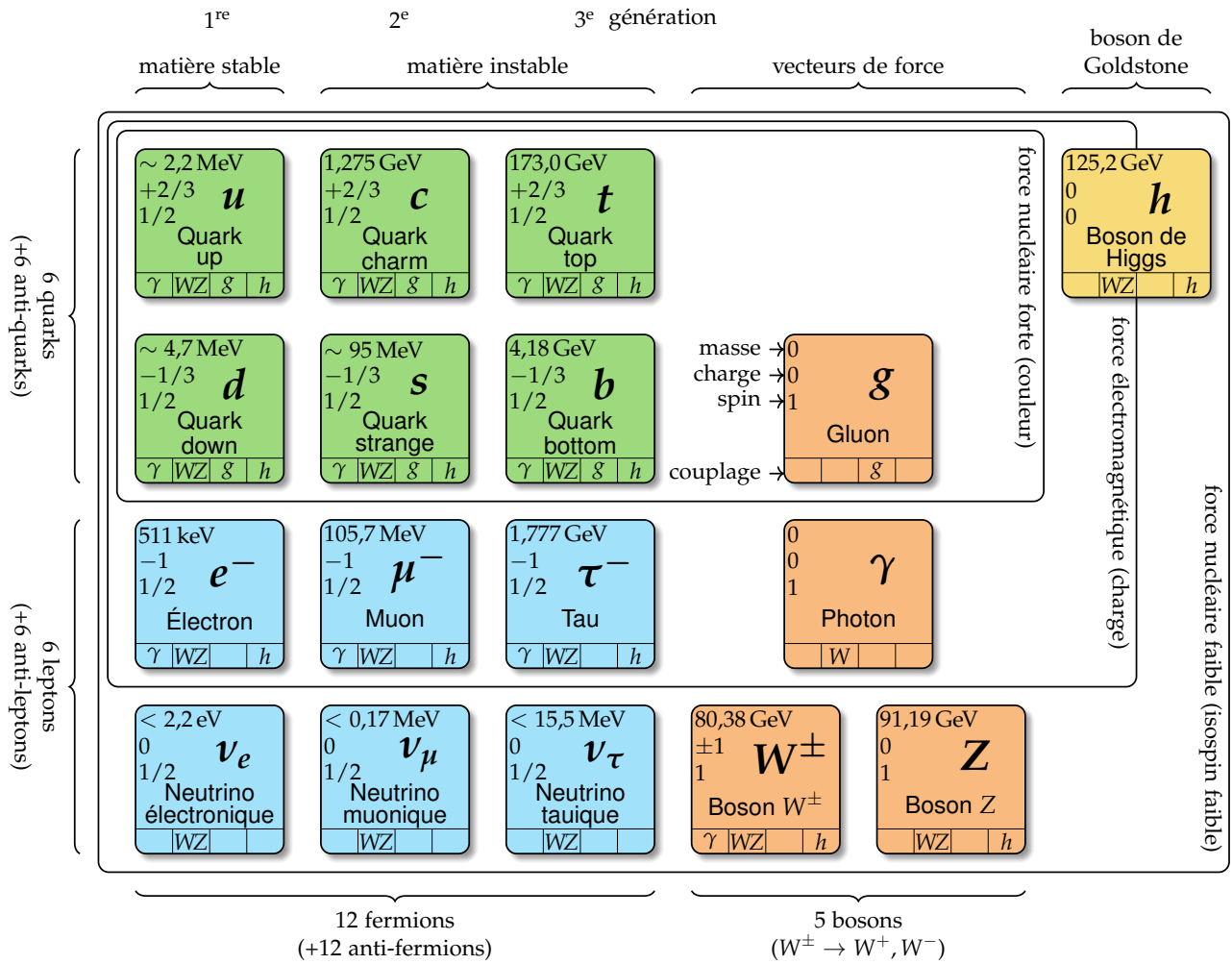


Figure 2.1 – Les particules du modèle standard.

2 Formalisme théorique et interactions

2.1 Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange

Nous souhaitons ici trouver un moyen de décrire le comportement des particules, c'est-à-dire leur évolution à travers le temps et l'espace. Considérons, dans un premier temps, une particule de masse m , soumise à une force F , se déplaçant dans le temps le long d'une dimension x , d'un point A à $t = 0$ à un point B à $t = \tau$, comme illustré sur la figure 2.2.

Comme cela est enseigné dès les premiers cours de physique, la trajectoire de cette particule peut être déterminée à l'aide du principe fondamental de la dynamique, ou seconde loi de Newton, qui s'exprime simplement dans ce cas sous la forme

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F. \quad (2.1)$$

Nous obtenons alors la position de la particule à tout instant.

Or, cette méthode ne permet pas de décrire le comportement des particules fondamentales. En effet, à leur échelle, la mécanique quantique prévaut et il n'est pas possible, lorsque l'on observe une particule à un point A puis à un point B , de déterminer la trajectoire exacte suivie par cette particule.

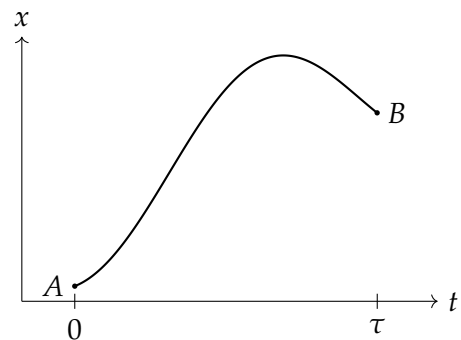


Figure 2.2 – Une particule se déplace au cours du temps d'un point A à un point B le long d'une dimension x .

La particule peut suivre la trajectoire déterminée avec la mécanique classique, c'est-à-dire celle de la figure 2.2, comme toute autre trajectoire reliant A à B , comme illustré sur la figure 2.3.

Si le principe fondamental de la dynamique tel que formulé par Newton ne tient plus dans le contexte de la mécanique quantique, il existe un autre principe physique toujours en place, la conservation de l'énergie. Dans le cas de la particule précédemment décrit, il s'agit de la somme de son énergie cinétique T et de son énergie potentielle V , c'est-à-dire

$$E = T + V = C^{\text{te}} \quad (2.2)$$

où T dépend uniquement de la vitesse de la particule et V uniquement de sa position. Il en va ainsi de même pour les moyennes temporelles de ces grandeurs,

$$E = \langle E \rangle = \langle T \rangle + \langle V \rangle = C^{\text{te}} \quad (2.3)$$

avec

$$\langle T \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau T(\dot{x}(t)) dt, \quad \langle V \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau V(x(t)) dt, \quad (2.4)$$

où $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$.

Nous pouvons alors nous demander de quelle manière ces grandeurs sont modifiées lorsque la trajectoire suivie par la particule varie par rapport à la trajectoire déterminée par la mécanique Newtonienne. La variation de la valeur moyenne de l'énergie potentielle s'exprime

$$\frac{\delta \langle V \rangle}{\delta x(t')} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{\delta V(x(t))}{\delta x(t')} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dV(x(t))}{dx(t)} \delta(t - t') dt = \frac{1}{\tau} \left. \frac{dV}{dx(t)} \right|_{t=t'} = -\frac{1}{\tau} F(x(t')) \quad (2.5)$$

car la force F est reliée au potentiel V par $F = -\frac{dV}{dx}$. De même, l'énergie cinétique moyenne varie selon

$$\begin{aligned} \frac{\delta \langle T \rangle}{\delta x(t')} &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{\delta T(\dot{x}(t))}{\delta x(t')} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dT(\dot{x}(t))}{d\dot{x}(t)} \delta'(t - t') dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \delta(t - t') \frac{d}{dt} \left(\frac{dT(\dot{x}(t))}{d\dot{x}(t)} \right) dt \\ &= -\frac{1}{\tau} \left. \frac{d}{dt} \left(\frac{dT(\dot{x}(t))}{d\dot{x}(t)} \right) \right|_{t=t'} = -\frac{1}{\tau} m \frac{d^2 x}{dt^2} \Big|_{t=t'} \end{aligned} \quad (2.6)$$

car pour une particule de masse m , en mécanique newtonienne, $T = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$.

Le long de la trajectoire classique, le principe fondamental de la dynamique est vérifié. Alors, les variations autour de la trajectoire classique sont reliées par

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F \Rightarrow \frac{\delta \langle T \rangle}{\delta x(t')} = \frac{\delta \langle V \rangle}{\delta x(t')} \Rightarrow \frac{\delta}{\delta x(t')} (\langle T \rangle - \langle V \rangle) = 0. \quad (2.7)$$

Ainsi, la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système étudié semble jouer un rôle particulier lorsque l'on s'intéresse aux différentes trajectoires possibles pour ce système. Définissons alors le lagrangien L du système étudié comme

$$L = T - V. \quad (2.8)$$

L'intégrale au cours du temps du lagrangien est appelée action et est définie comme

$$S = \int_0^\tau dt L. \quad (2.9)$$

Compte-tenu de l'équation (2.7), l'action vérifie

$$\frac{\delta S}{\delta x(t')} = 0, \quad (2.10)$$

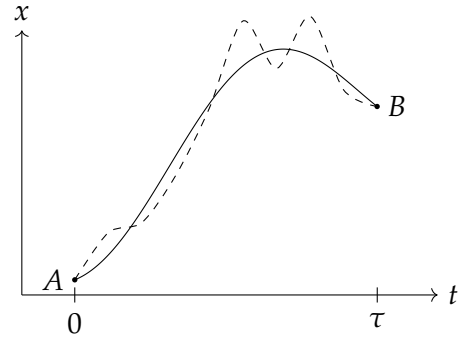


Figure 2.3 – Variation de la trajectoire d'une particule se déplaçant au cours du temps d'un point A à un point B .

ce qui est connu sous le nom de principe de moindre action. Or,

$$\frac{\delta S}{\delta x(t')} = \int_0^\tau dt \left[\frac{\delta L}{\delta x(t)} \delta(t-t') + \frac{\delta L}{\delta \dot{x}(t)} \delta'(t-t') \right] = \frac{\delta L}{\delta x(t')} - \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{x}(t')}, \quad (2.11)$$

ce qui implique

$$\frac{\delta L}{\delta x(t')} - \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{x}(t')} = 0. \quad (2.12)$$

Cette équation est l'équation d'Euler-Lagrange et permet d'obtenir toutes les équations du mouvement du système, c'est-à-dire de décrire son évolution au cours du temps.

2.2 Lagrangien, champs et symétries

Le modèle standard décrit le comportement des particules fondamentales à l'aide de la théorie quantique des champs. Une particule est ainsi une excitation d'un champ quantique relativiste ϕ et il s'agit alors de décrire l'évolution de ces excitations.

Généralisons le raisonnement précédent à un espace à une dimension temporelle et trois dimensions spatiales. À partir du lagrangien, il est possible de définir la densité lagrangienne \mathcal{L} telle que

$$L = \int d^3x \mathcal{L}, \quad S = \int d^4x \mathcal{L} \quad (2.13)$$

où x désigne la coordonnée dans l'espace de Minkowski, c'est-à-dire l'espace-temps à quatre dimensions. Considérons alors une densité lagrangienne dépendant d'un champ $\phi(x)$ et de ses dérivées $\partial_\mu \phi(x)$. Alors,

$$S = \int d^4x \mathcal{L}(\phi(x), \partial_\mu \phi(x)) \quad (2.14)$$

et du principe de moindre action résultent les équations d'Euler-Lagrange pour cette densité lagrangienne,

$$\frac{\delta S}{\delta \phi} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi)} = 0. \quad (2.15)$$

Il s'agit à présent de déterminer la densité lagrangienne \mathcal{L} du modèle standard. Par la suite, nous nommerons la densité lagrangienne \mathcal{L} « lagrangien » dans un souci de praticité.

Un champ quantique peut subir une transformation de jauge locale. Une telle transformation doit laisser la physique inchangée, ainsi le lagrangien du modèle standard est construit pour être invariant sous les transformations de jauge locales du groupe de symétrie

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y. \quad (2.16)$$

De cette construction résultent les interactions fondamentales, discutées ci-après.

2.3 Interaction électromagnétique

2.4 Interaction électrofaible

2.5 Mécanisme de Higgs

2.6 Interaction forte

3 Succès et limites du modèle standard

3.1 Succès

3.2 Limites

Gravitation

Masse des neutrinos

Matière noire bullet cluster!

Énergie noire

Asymétrie matière-antimatière

4 Au-delà du modèle standard

4.1 Modèles à deux doublets de Higgs

4.2 La supersymétrie

4.3 L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM

5 Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM

5.1 Production de bosons de Higgs

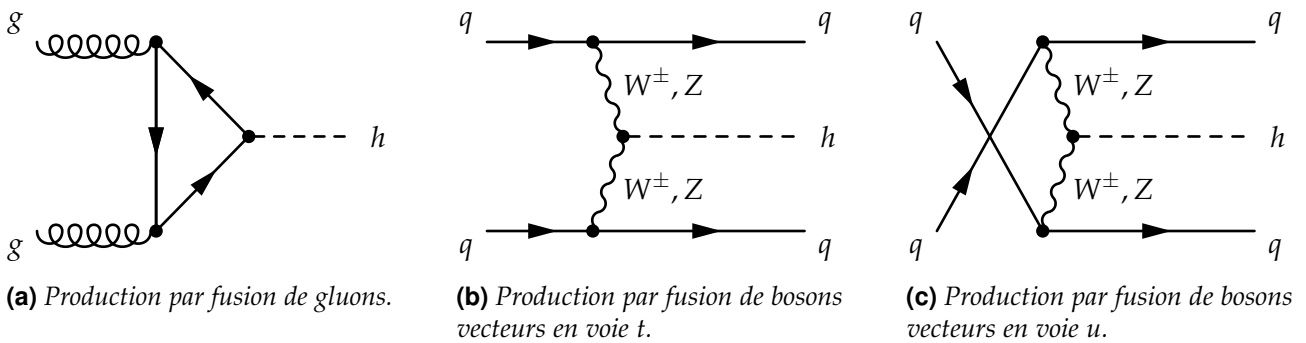


Figure 2.4 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons (ggh) et fusion de bosons vecteurs (VBF).

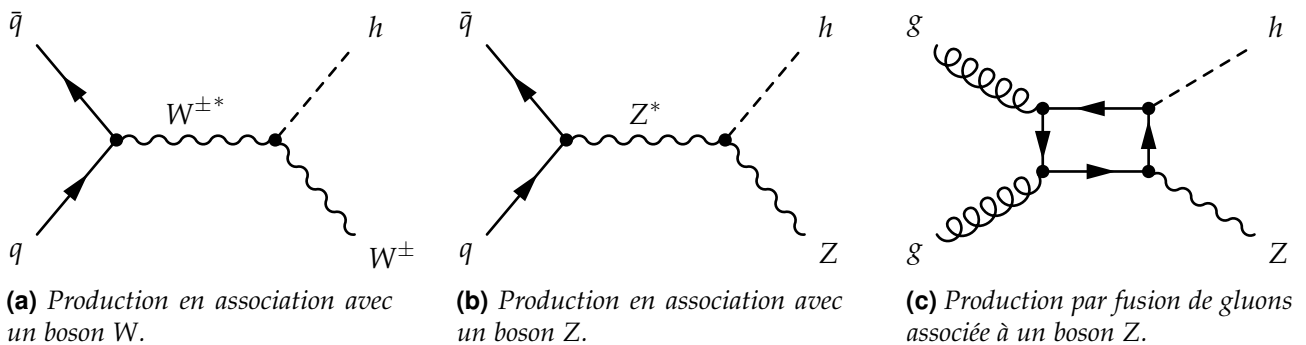
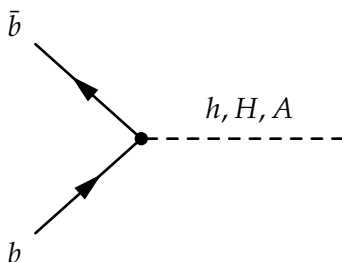


Figure 2.5 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.



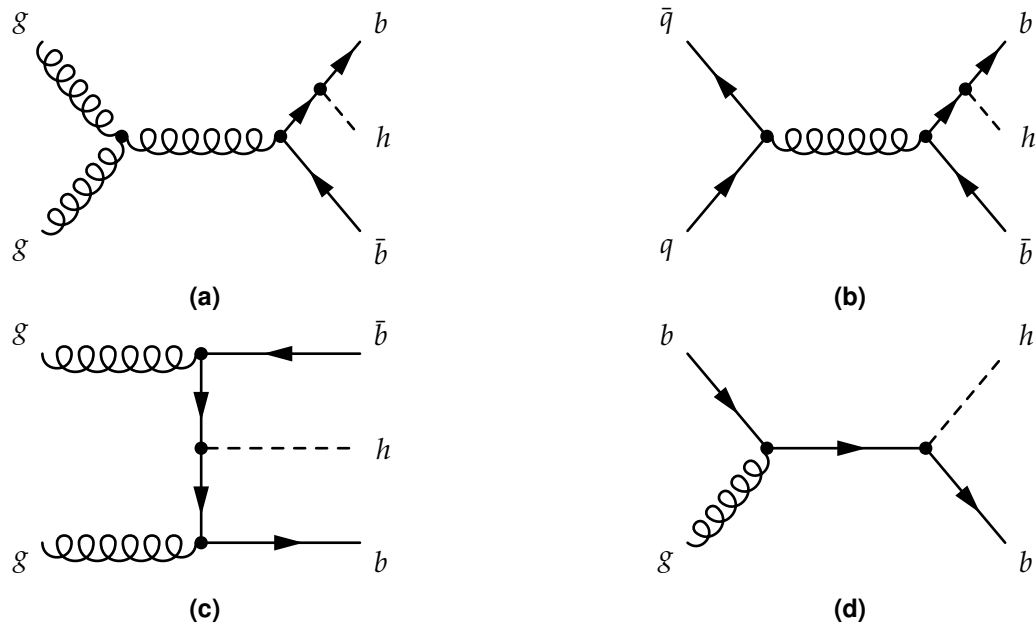
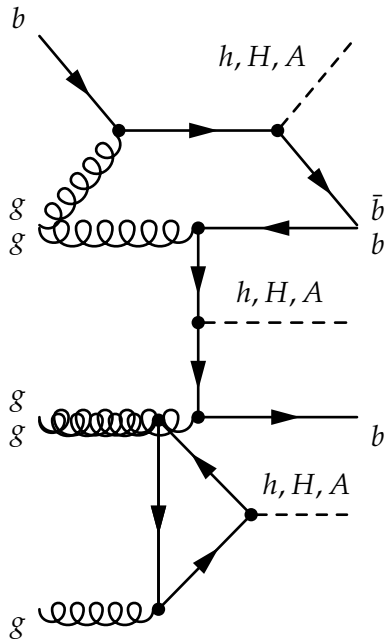
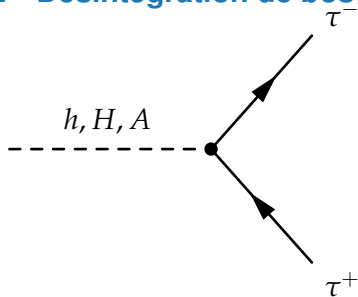


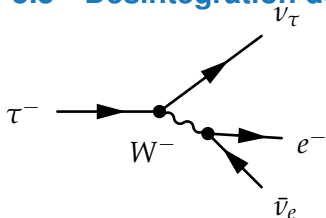
Figure 2.6 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark b .

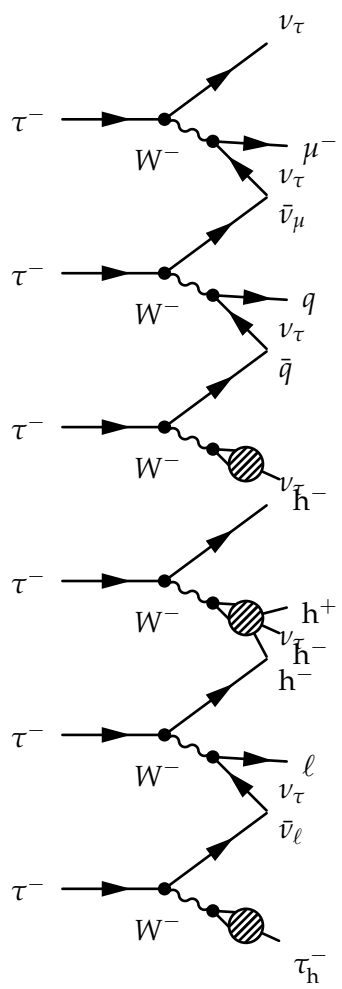


5.2 Désintégration de bosons de Higgs



5.3 Désintégration des leptons tau





6 Conclusion

Chapitre 3

Dispositif expérimental

Sommaire

1	Le LHC : <i>Large Hadron Collider</i>	11
1.1	Collisions de protons	11
1.2	Accélération de protons	11
1.3	Luminosité et nombre d'événements	11
1.4	L'empilement	11
1.5	Les expériences du LHC	11
2	L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoid</i>	12
2.1	Le solénoïde	12
2.2	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	12
2.3	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	12
2.4	Le calorimètre hadronique ou HCAL	12
2.5	Les chambres à muons	12
2.6	Prise de données à CMS	12
3	Événements simulés	12
3.1	Génération d'événements	12
3.2	Simulation du détecteur	12
4	Reconstruction des événements	12
4.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	12
4.2	Identification et reconstruction des particules	12
4.3	Objets de haut niveau	12
4.4	Énergie transverse manquante	12
5	Conclusion	12

1 Le LHC : *Large Hadron Collider*

1.1 Collisions de protons

1.2 Accélération de protons

1.3 Luminosité et nombre d'événements

1.4 L'empilement

1.5 Les expériences du LHC

Quatre grandes expériences sont présentes sur le LHC. Elles se situent chacune à un des points d'interaction de l'anneau afin d'étudier les collisions qui y sont produites.

ALICE [1], A Large Ion Collider Experiment, est une expérience conçue pour étudier le déconfinement des quarks et des gluons à l'aide de collisions d'ions lourds. Ces études permettent de mieux comprendre le fonctionnement de la chromodynamique quantique ou QCD.

ATLAS [2], A Toroidal LHC ApparatuS, est une expérience généraliste avec un éventail d'études très large, allant des mesures de précision des paramètres du modèle standard à la recherche de nouvelle physique.

CMS [3], Compact Muon Solenoid, est également une expérience généraliste dont les objectifs sont similaires à ceux d'ATLAS. Les détecteurs d'ATLAS et de CMS étant conçus différemment, ces deux expériences peuvent valider leurs résultats de manière indépendante.

LHCb [4], Large Hadron Collider beauty, se concentre sur l'étude de la violation de la symétrie CP avec la quark b , qui lui donne son nom. Cette expérience réalise également des mesures de précision de certains paramètres du modèle standard.

2 L'expérience CMS : *Compact Muon Solenoid*

2.1 Le solénoïde

2.2 Le trajectographe ou *tracker*

2.3 Le calorimètre électromagnétique ou ECAL

2.4 Le calorimètre hadronique ou HCAL

2.5 Les chambres à muons

2.6 Prise de données à CMS

3 Événements simulés

3.1 Génération d'événements

3.2 Simulation du détecteur

4 Reconstruction des événements

4.1 L'algorithme de *Particle Flow*

4.2 Identification et reconstruction des particules

4.3 Objets de haut niveau

4.4 Énergie transverse manquante

5 Conclusion

Chapitre 4

Calibration en énergie des jets

Sommaire

1	Introduction	13
2	Formation des jets	13
2.1	Gerbe partonique	13
2.2	Hadronisation	14
3	Reconstruction des jets	14
3.1	Algorithmes de reconstruction	14
3.2	Identification des jets dans CMS	14
3.3	Saveur des jets	14
4	Calibration en énergie des jets dans CMS	14
4.1	Correction de l'empilement	14
4.2	Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η	15
4.3	Propagation à la MET	15
4.4	Corrections résiduelles	15
4.5	Correction de la résolution en énergie	15
4.6	Incertitudes	15
5	Phénoménologie des événements photon + jets	15
6	Corrections résiduelles absolues des jets	15
6.1	Méthode de la balance	15
6.2	Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante	15
6.3	Analyse	15
6.4	Résultats	15
7	Correction de la résolution en énergie des jets	15
7.1	•	15
7.2	•	16
7.3	•	16
7.4	•	16
8	Conclusion	16

1 Introduction

radiation de q et g par des q et g, chute de l'énergie et lpus possible de faire des calculs perturbatifs
 qcd car α_s (commande?) tend vers 1 (perte de la liberté asymptotique) + confinement
 flux collimé de ptes stables = jet, en grosse qté au LHC car collisions pp
 calibrer?

2 Formation des jets

2.1 Gerbe partonique

A. J. Larkoski. An Unorthodox Introduction to QCD. 2017. 1709.06195

2.2 Hadronisation

cordes de Lund e. a. B. Andersson. Parton fragmentation and string dynamics. Phys. Rep., 1983. doi :97 :31.

agglomération hadronique J.-C. Winter, et al. A Modified cluster hadronization model. Eur. Phys. J., C36 :381–395, 2004. doi :10.1140/epjc/s2004-01960-8. hep-ph/0311085.

3 Reconstruction des jets

$q, g \rightarrow$ jet dans détecteur

3.1 Algorithmes de reconstruction

anti- k_T (cmd k_T)

M. Cacciari, et al. The anti- k_t jet clustering algorithm. JHEP, 04 :063, 2008. doi :10.1088/1126-6708/2008/04/063. 0802.1189.

$$d_{ij} = \min\left(\frac{1}{p_{Ti}^2}, \frac{1}{p_{Tj}^2}\right) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2} \quad (4.1)$$

voir le cours de GGrenier

produit des jets de forme régulière, plutôt conique

moins sensible aux perturbations dues aux partons spectateurs

regroupement autour des particules de plus haute énergie en utilisant les écarts angulaires

moins proche de l'évolution du parton shower

3.2 Identification des jets dans CMS

quels critères ?

3.3 Saveur des jets

b-tagging

4 Calibration en énergie des jets dans CMS

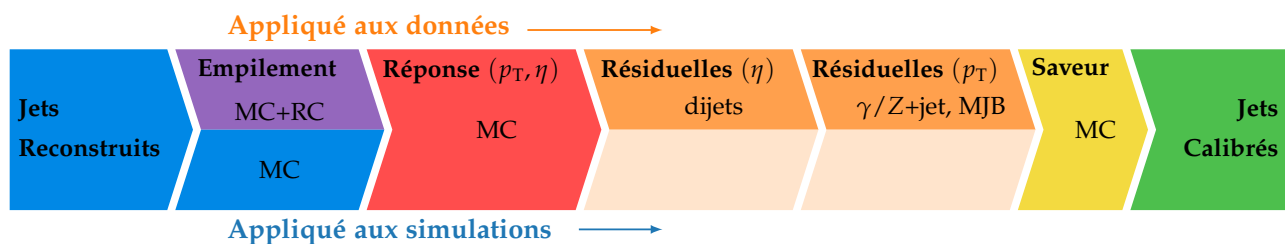


Figure 4.1 – Procédé de calibration des jets. Plusieurs corrections sont appliquées pour obtenir les jets calibrés à partir des jets reconstitués.

4.1 Correction de l'empilement

offset en énergie d'empilement

4.2 Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η

non uniformité de la réponse de CMS

4.3 Propagation à la MET

4.4 Corrections résiduelles

4.5 Correction de la résolution en énergie

4.6 Incertitudes

5 Phénoménologie des événements photon + jets

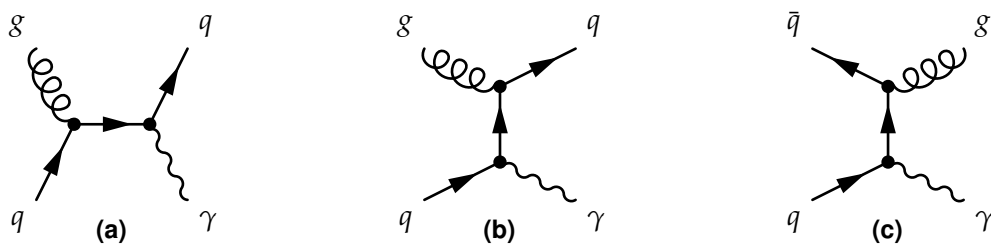


Figure 4.2 – Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final.

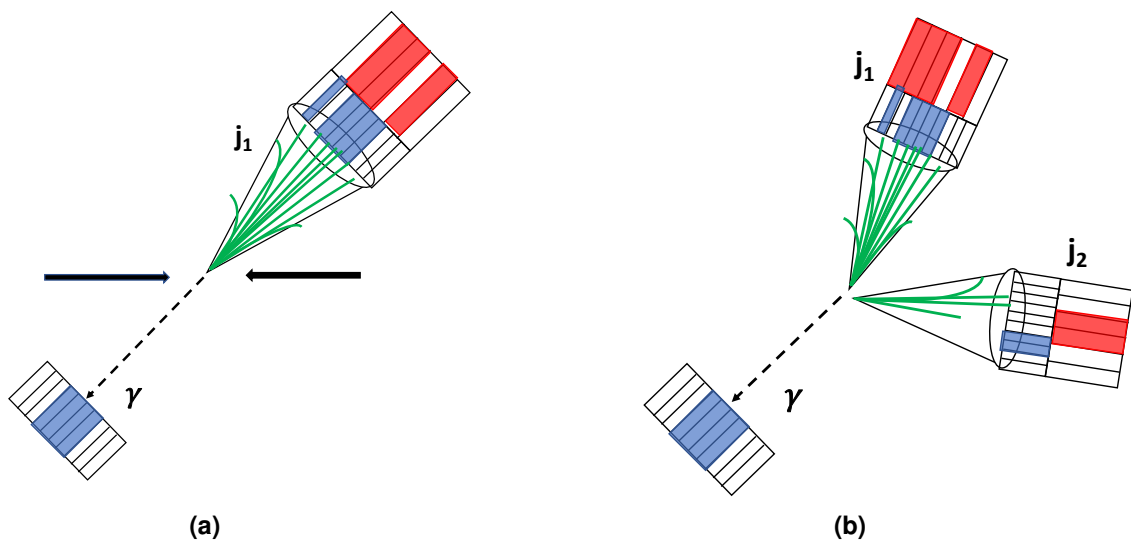


Figure 4.3 – •

6 Corrections résiduelles absolues des jets

6.1 Méthode de la balance

6.2 Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante

6.3 Analyse

6.4 Résultats

7 Correction de la résolution en énergie des jets

7.1 •

7.2 •

7.3 •

7.4 •

8 Conclusion

Chapitre 5

Recherche d'un boson de Higgs de haute masse

Sommaire

1	Introduction	17
2	Sélection d'événements et catégorisation	17
2.1	Données	17
2.2	Simulation	17
2.3	Catégorisation	17
3	Chaîne d'analyse	17
4	Estimation du bruit de fond	17
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations	17
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données	17
5	Incertitudes systématiques	17
5.1	Incertitudes de normalisation	17
5.2	Incertitudes de forme	17
6	Résultats et interprétations	18
7	Conclusion	18

1 Introduction

2 Sélection d'événements et catégorisation

2.1 Données

2.2 Simulation

2.3 Catégorisation

3 Chaîne d'analyse

4 Estimation du bruit de fond

4.1 Estimations de bruits de fond à partir de simulations

4.2 Estimations de bruits de fond à partir de données

4.2.1 Méthode de l'encapsulation ou *embedding*

4.2.2 Méthode du facteur de faux ou *fake factor*

5 Incertitudes systématiques

5.1 Incertitudes de normalisation

5.2 Incertitudes de forme

6 Résultats et interprétations

7 Conclusion

Chapitre 6

Conclusion

Bibliographie

- [1] The ALICE Collaboration. « The ALICE experiment at the CERN LHC. A Large Ion Collider Experiment ». *Journal of Instrumentation* **3**.S08002 (2008). DOI : [10.1088/1748-0221/3/08/S08002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08002). URL : <http://cds.cern.ch/record/1129812>.
- [2] The ATLAS Collaboration. « The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider ». *Journal of Instrumentation* **3**.S08003 (2008). DOI : [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003). URL : <http://cds.cern.ch/record/1129811>.
- [3] The CMS Collaboration. « The CMS experiment at the CERN LHC. The Compact Muon Solenoid experiment ». *Journal of Instrumentation* **3**.S08004 (2008). DOI : [10.1088/1748-0221/3/08/S08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004). URL : <http://cds.cern.ch/record/1129810>.
- [4] The LHCb Collaboration. « The LHCb Detector at the LHC ». *Journal of Instrumentation* **3**.S08005 (2008). DOI : [10.1088/1748-0221/3/08/S08005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08005). URL : <http://cds.cern.ch/record/1129809>.

