

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, champs et symétries	4
2.2	Interaction électromagnétique	4
2.3	Interaction électrofaible	4
2.4	Mécanisme de Higgs	4
2.5	Interaction forte	4
3	Succès et limites du modèle standard	4
3.1	Succès	5
3.2	Limites	5
4	Au-delà du modèle standard	5
4.1	Modèles à deux doublets de Higgs	5
4.2	La supersymétrie	5
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM	5
5	Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM	5
5.1	Production de bosons de Higgs	5
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	6
5.3	Désintégration des leptons tau	7
6	Conclusion	7
3	Dispositif expérimental	9
1	Le LHC : <i>Large Hadron Collider</i>	9
1.1	Collisions de protons	9
1.2	Accélération de protons	9
1.3	Luminosité et nombre d'événements	9
1.4	L'empilement	9
1.5	Les expériences du LHC	9
2	L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoid</i>	10
2.1	Le solénoïde	10
2.2	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	10
2.3	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	10
2.4	Le calorimètre hadronique ou HCAL	10
2.5	Les chambres à muons	10
2.6	Prise de données à CMS	10
3	Événements simulés	10
3.1	Génération d'événements	10
3.2	Simulation du détecteur	10
4	Reconstruction des événements	10
4.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	10

4.2	Identification et reconstruction des particules	10
4.3	Objets de haut niveau	10
4.4	Énergie transverse manquante	10
5	Conclusion	10
4	Calibration en énergie des jets	11
1	Introduction	11
2	Formation des jets	11
2.1	Gerbe partonique	11
2.2	Hadronisation	12
3	Reconstruction des jets	12
3.1	Algorithmes de reconstruction	12
3.2	Identification des jets dans CMS	12
3.3	Saveur des jets	12
4	Calibration en énergie des jets dans CMS	12
4.1	Correction de l'empilement	12
4.2	Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η	13
4.3	Propagation à la MET	13
4.4	Corrections résiduelles	13
4.5	Correction de la résolution en énergie	13
4.6	Incertitudes	13
5	Phénoménologie des événements photon + jets	13
6	Corrections résiduelles absolues des jets	13
6.1	Méthode de la balance	13
6.2	Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante	13
6.3	Analyse	13
6.4	Résultats	13
7	Correction de la résolution en énergie des jets	13
7.1	•	13
7.2	•	14
7.3	•	14
7.4	•	14
8	Conclusion	14
5	Recherche d'un boson de Higgs de haute masse	15
1	Introduction	15
2	Sélection d'événements et catégorisation	15
2.1	Données	15
2.2	Simulation	15
2.3	Catégorisation	15
3	Chaîne d'analyse	15
4	Estimation du bruit de fond	15
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations	15
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données	15
5	Incertitudes systématiques	15
5.1	Incertitudes de normalisation	15
5.2	Incertitudes de forme	15
6	Résultats et interprétations	16
7	Conclusion	16
6	Conclusion	17

Table des figures

2.1	Les particules du modèle standard.	4
2.2	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).	5
2.3	Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.	5
2.4	Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark b	6
4.1	Procédé de calibration des jets. Plusieurs corrections sont appliquées pour obtenir les jets calibrés à partir des jets reconstruits.	12
4.2	Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final.	13
4.3	•	13

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, champs et symétries	4
2.2	Interaction électromagnétique	4
2.3	Interaction électrofaible	4
2.4	Mécanisme de Higgs	4
2.5	Interaction forte	4
3	Succès et limites du modèle standard	4
3.1	Succès	5
3.2	Limites	5
4	Au-delà du modèle standard	5
4.1	Modèles à deux doublets de Higgs	5
4.2	La supersymétrie	5
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM	5
5	Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM	5
5.1	Production de bosons de Higgs	5
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	6
5.3	Désintégration des leptons tau	7
6	Conclusion	7

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?

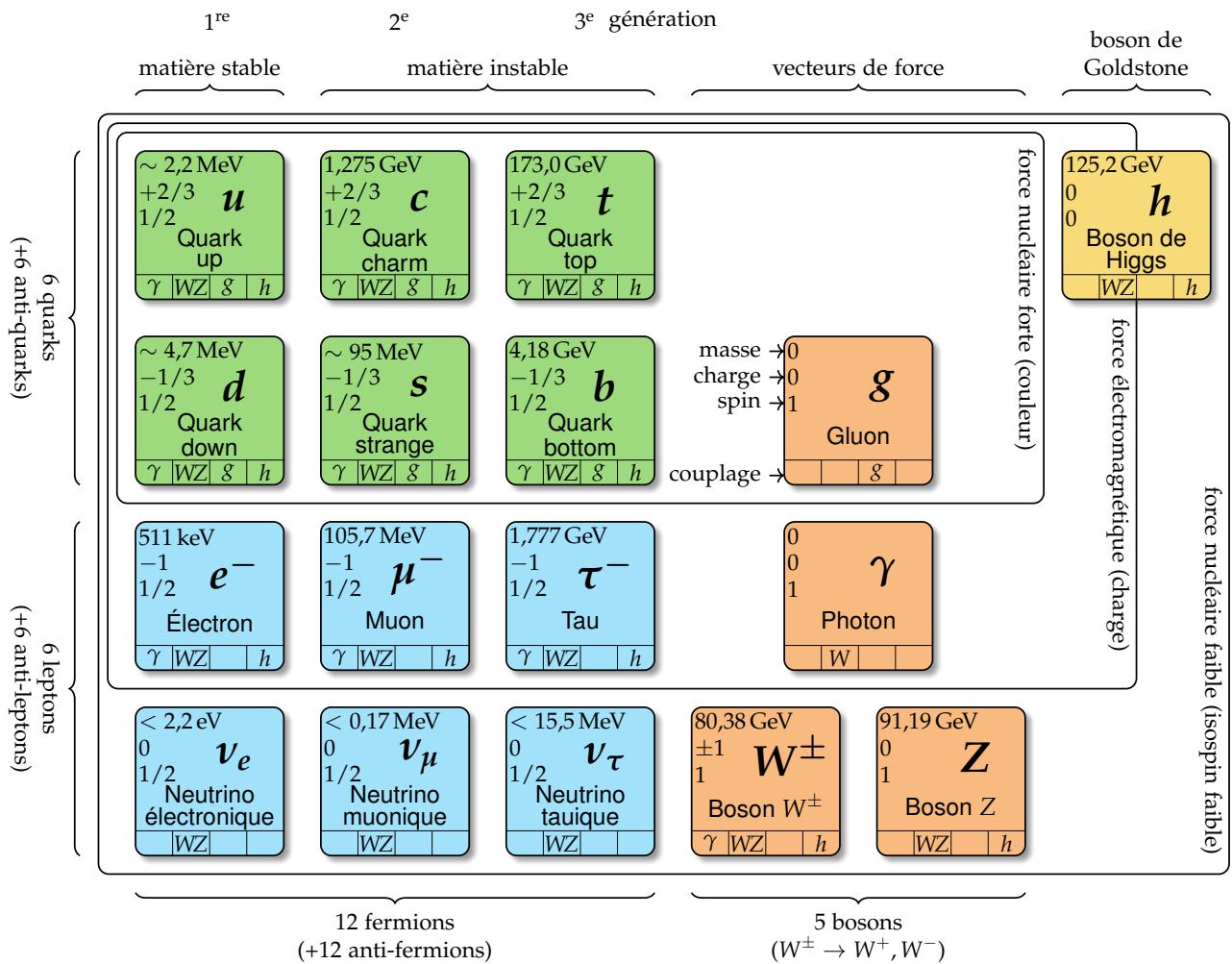


Figure 2.1 – Les particules du modèle standard.

2 Formalisme théorique et interactions

2.1 Lagrangien, champs et symétries

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (2.1)$$

Équation d'Euler-Lagrange,

$$\partial_\mu \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \phi} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0 \quad (2.2)$$

avec \mathcal{L} la densité lagrangienne

2.2 Interaction électromagnétique

2.3 Interaction électrofaible

2.4 Mécanisme de Higgs

2.5 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

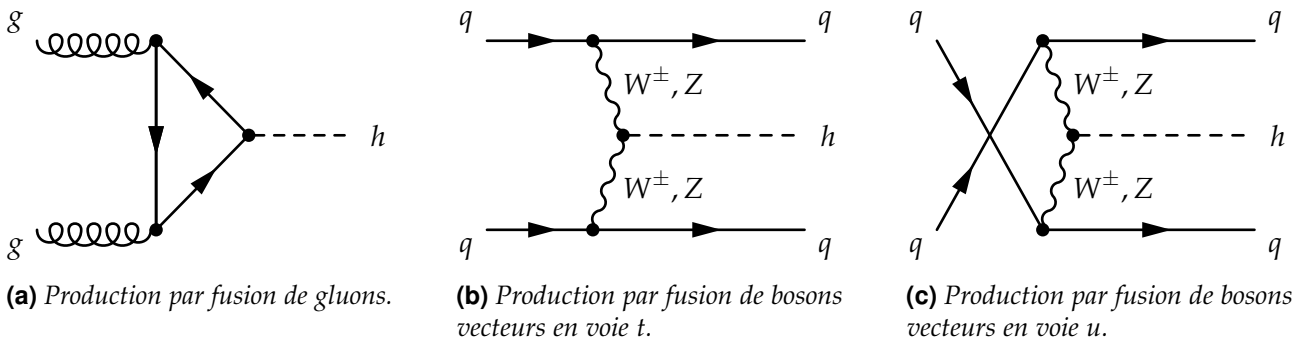


Figure 2.2 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons (ggh) et fusion de bosons vecteurs (VBF).

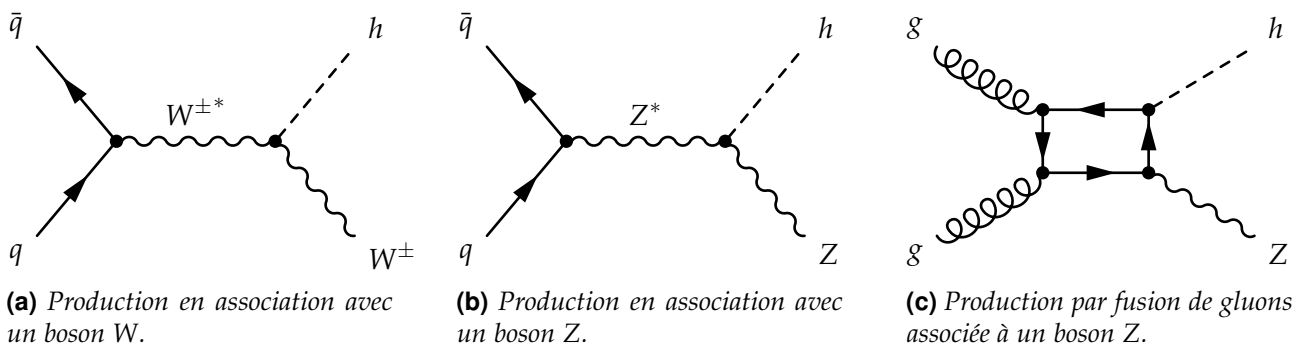


Figure 2.3 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.

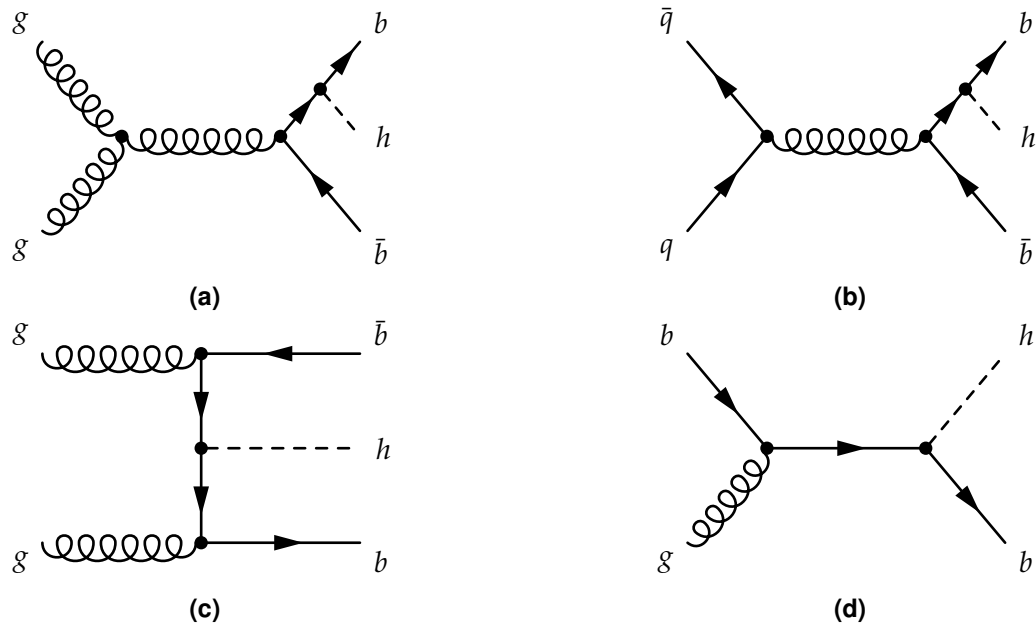
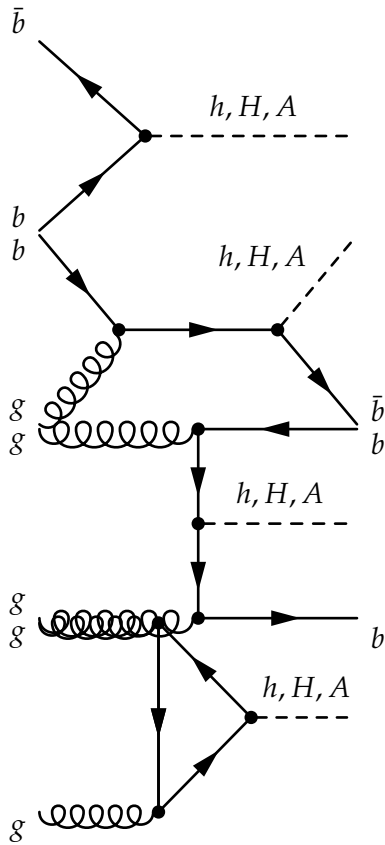
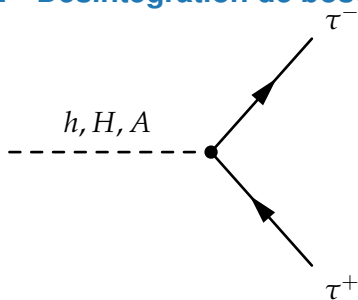


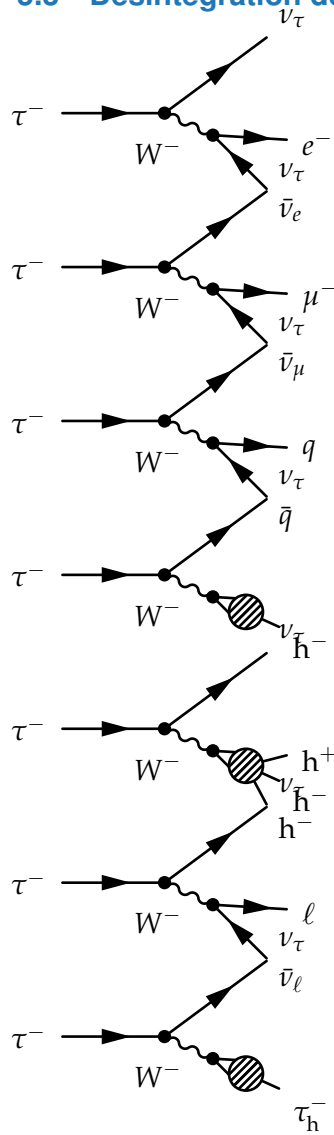
Figure 2.4 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark b .



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>	9
1.1	Collisions de protons	9
1.2	Accélération de protons	9
1.3	Luminosité et nombre d'événements	9
1.4	L'empilement	9
1.5	Les expériences du LHC	9
2	L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoid</i>	10
2.1	Le solénoïde	10
2.2	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	10
2.3	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	10
2.4	Le calorimètre hadronique ou HCAL	10
2.5	Les chambres à muons	10
2.6	Prise de données à CMS	10
3	Événements simulés	10
3.1	Génération d'événements	10
3.2	Simulation du détecteur	10
4	Reconstruction des événements	10
4.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	10
4.2	Identification et reconstruction des particules	10
4.3	Objets de haut niveau	10
4.4	Énergie transverse manquante	10
5	Conclusion	10

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	11
2	Formation des jets	11
2.1	Gerbe partonique	11
2.2	Hadronisation	12
3	Reconstruction des jets	12
3.1	Algorithmes de reconstruction	12
3.2	Identification des jets dans CMS	12
3.3	Saveur des jets	12
4	Calibration en énergie des jets dans CMS	12
4.1	Correction de l'empilement	12
4.2	Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η	13
4.3	Propagation à la MET	13
4.4	Corrections résiduelles	13
4.5	Correction de la résolution en énergie	13
4.6	Incertitudes	13
5	Phénoménologie des événements photon + jets	13
6	Corrections résiduelles absolues des jets	13
6.1	Méthode de la balance	13
6.2	Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante	13
6.3	Analyse	13
6.4	Résultats	13
7	Correction de la résolution en énergie des jets	13
7.1	•	13
7.2	•	14
7.3	•	14
7.4	•	14
8	Conclusion	14

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

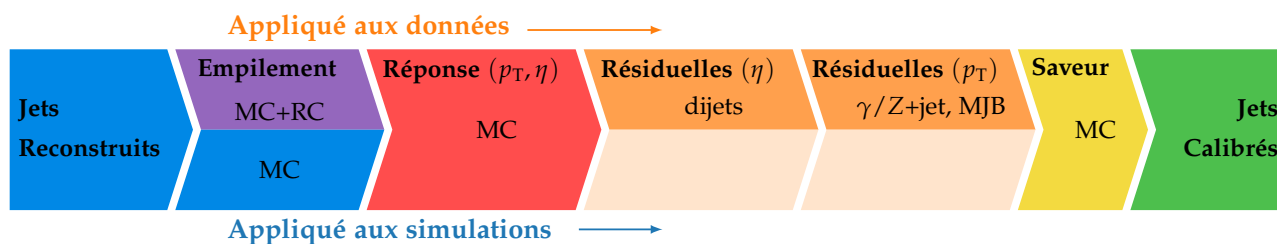


Figure 4.1 – Procédé de calibration des jets. Plusieurs corrections sont appliquées pour obtenir les jets calibrés à partir des jets reconstitués.

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

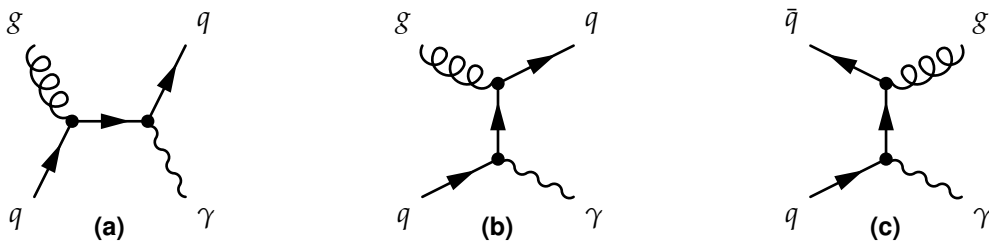


Figure 4.2 – Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final.

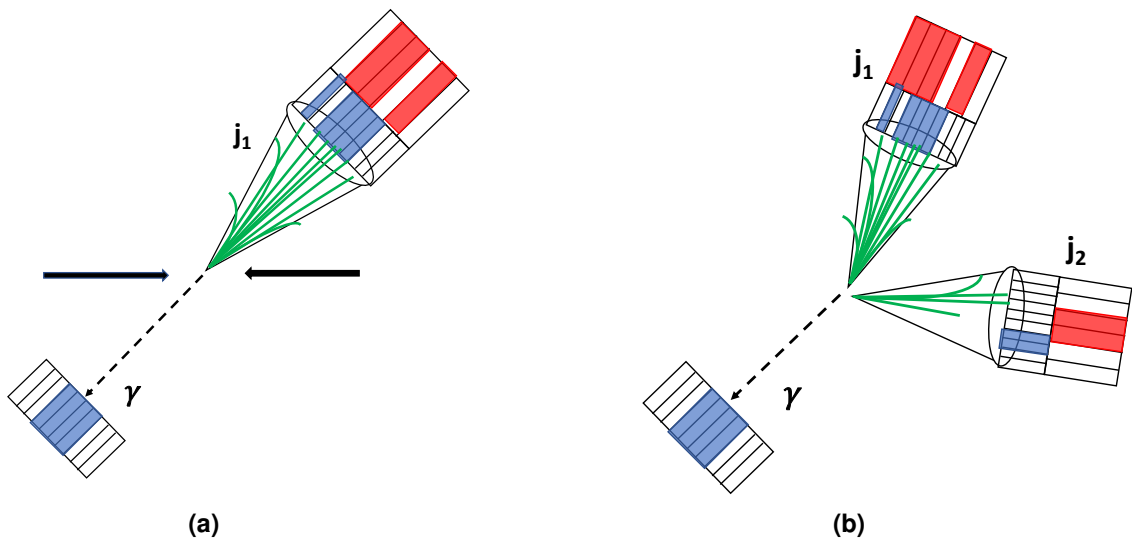


Figure 4.3 – •

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	15
2	Sélection d'événements et catégorisation	15
2.1	Données	15
2.2	Simulation	15
2.3	Catégorisation	15
3	Chaîne d'analyse	15
4	Estimation du bruit de fond	15
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations	15
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données	15
5	Incertitudes systématiques	15
5.1	Incertitudes de normalisation	15
5.2	Incertitudes de forme	15
6	Résultats et interprétations	16
7	Conclusion	16

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>.

