

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

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

4.4	Énergie transverse manquante . . . . .	8
5	Conclusion . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Calibration en énergie des jets</b>	<b>9</b>
1	Introduction . . . . .	9
2	Phénoménologie des événements photon + jets . . . . .	9
3	Corrections résiduelles absolues des jets . . . . .	10
3.1	Méthode de la balance . . . . .	10
3.2	Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante . . . .	10
3.3	Analyse . . . . .	10
3.4	Résultats . . . . .	10
4	Correction de la résolution en énergie des jets . . . . .	10
4.1	• . . . . .	10
4.2	• . . . . .	10
4.3	• . . . . .	10
4.4	• . . . . .	10
5	Conclusion . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Recherche d'un boson de Higgs de haute masse</b>	<b>11</b>
1	Introduction . . . . .	11
2	Sélection d'événements et catégorisation . . . . .	11
2.1	Données . . . . .	11
2.2	Simulation . . . . .	11
2.3	Catégorisation . . . . .	11
3	Chaîne d'analyse . . . . .	11
4	Estimation du bruit de fond . . . . .	11
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations . . . . .	11
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données . . . . .	11
5	Incertitudes systématiques . . . . .	11
5.1	Incertitudes de normalisation . . . . .	11
5.2	Incertitudes de forme . . . . .	11
6	Résultats et interprétations . . . . .	12
7	Conclusion . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>

## 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). . . . .	4
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 $b$ . . . . .	5
4.1	Procédé de calibration des jets. Plusieurs corrections sont appliquées pour obtenir les jets calibrés à partir des jets reconstruits. . . . .	9
4.2	Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final. . . . .	9
4.3	• . . . .	10



## Liste des tableaux





# **Chapitre 1**

## **Introduction**



## Chapitre 2

### Particules, interactions et phénoménologie

#### Sommaire

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

#### 1 Les particules du modèle standard

##### 1.1 Les fermions

##### 1.2 Les bosons

#### 2 Formalisme théorique et interactions

##### 2.1 Lagrangien, champs et symétries

##### 2.2 Interaction électromagnétique

##### 2.3 Interaction électrofaible

##### 2.4 Mécanisme de Higgs

##### 2.5 Interaction forte

#### 3 Succès et limites du modèle standard

#### 4 Au-delà du modèle standard

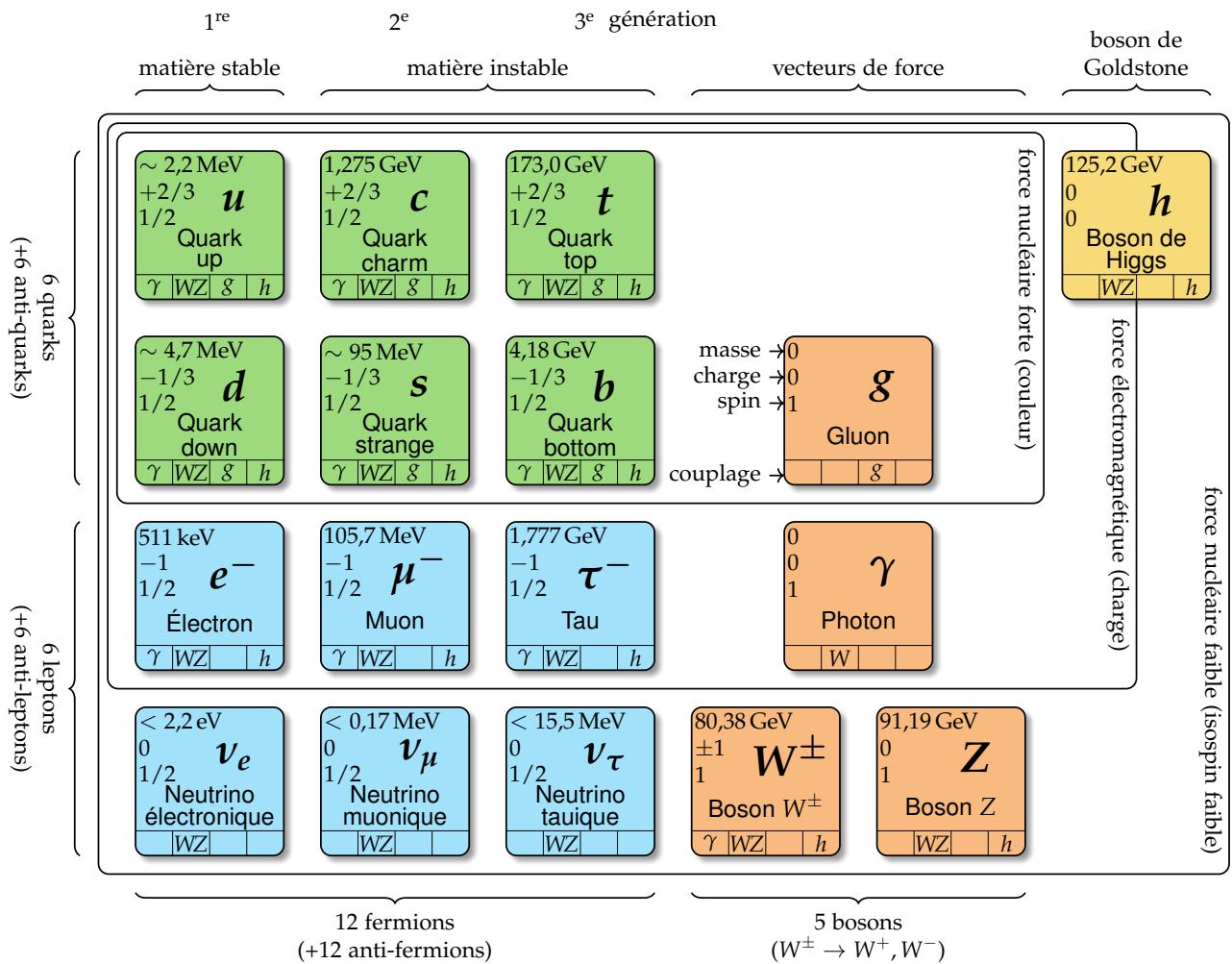


Figure 2.1 – Les particules du modèle standard.

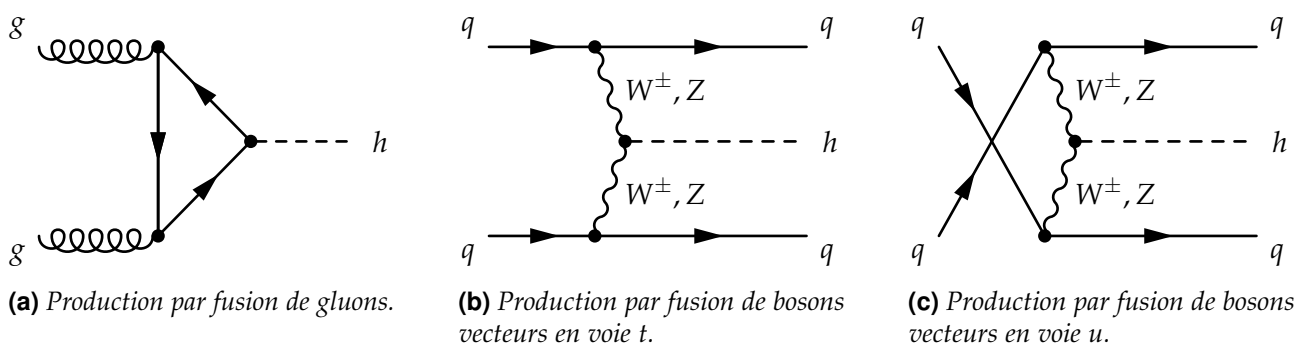
#### 4.1 Modèles à deux doublets de Higgs

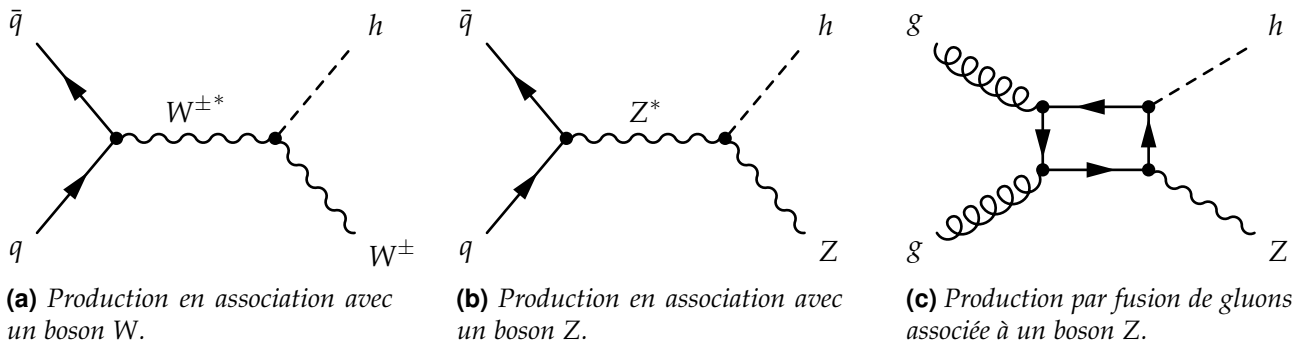
#### 4.2 La supersymétrie

#### 4.3 L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM

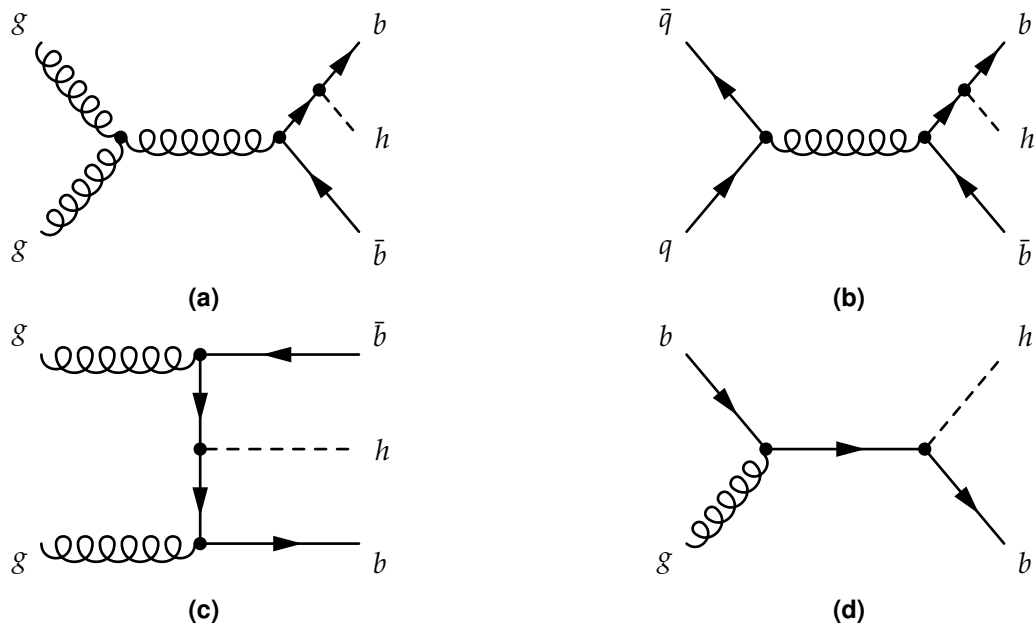
### 5 Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM

#### 5.1 Production de bosons de Higgs

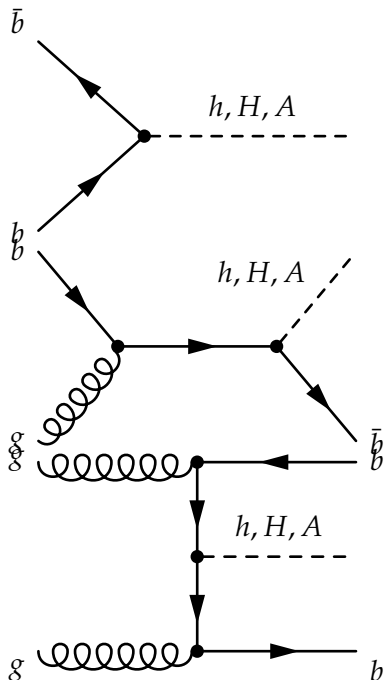
Figure 2.2 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons ( $ggh$ ) et fusion de bosons vecteurs (VBF).

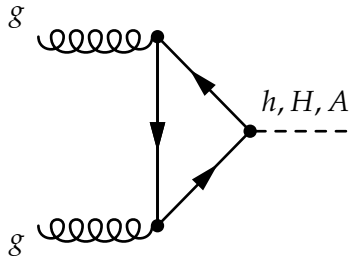


**Figure 2.3** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.

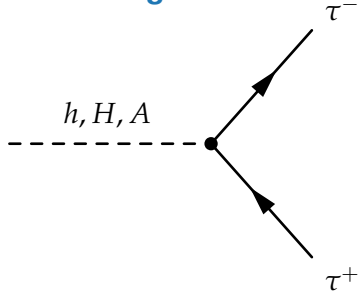


**Figure 2.4** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark  $b$ .

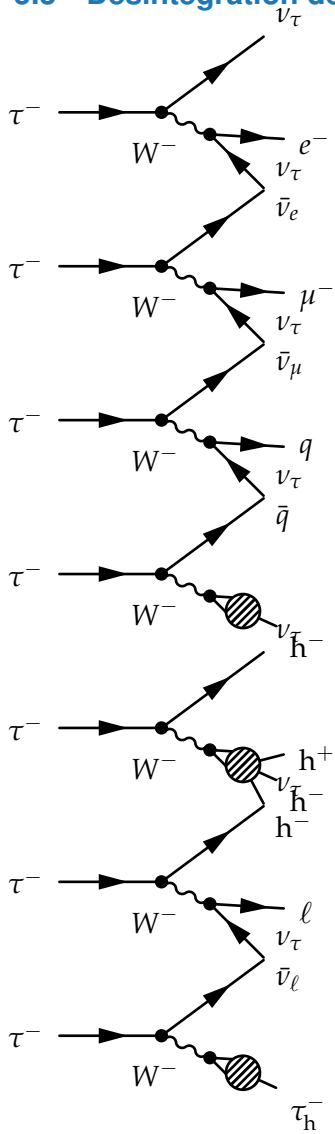




## 5.2 Désintégration de bosons de Higgs



## 5.3 Désintégration des leptons tau



## 6 Conclusion

## Chapitre 3

### Dispositif expérimental

#### Sommaire

<b>1</b>	<b>Le LHC : <i>Large Hadron Collider</i></b>	<b>7</b>
1.1	Collisions de protons	7
1.2	Accélération de protons	7
1.3	Luminosité et nombre d'événements	7
1.4	L'empilement	7
1.5	Les expériences du LHC	7
<b>2</b>	<b>L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoid</i></b>	<b>8</b>
2.1	Le solénoïde	8
2.2	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	8
2.3	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	8
2.4	Le calorimètre hadronique ou HCAL	8
2.5	Les chambres à muons	8
2.6	Prise de données à CMS	8
<b>3</b>	<b>Événements simulés</b>	<b>8</b>
3.1	Génération d'événements	8
3.2	Simulation du détecteur	8
<b>4</b>	<b>Reconstruction des événements</b>	<b>8</b>
4.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	8
4.2	Identification et reconstruction des particules	8
4.3	Objets de haut niveau	8
4.4	Énergie transverse manquante	8
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>8</b>

#### 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



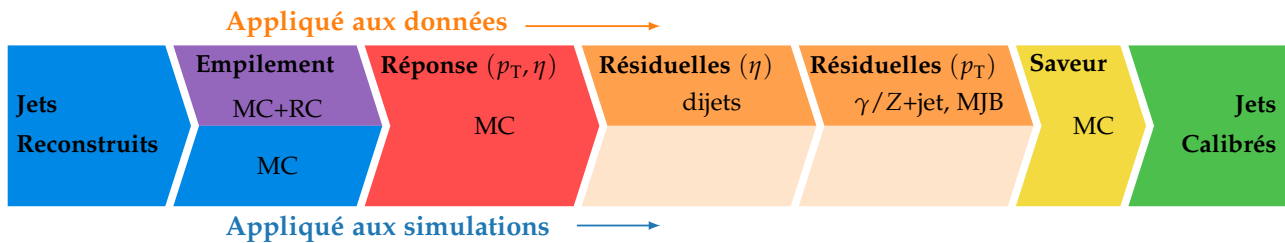
# Chapitre 4

## Calibration en énergie des jets

### Sommaire

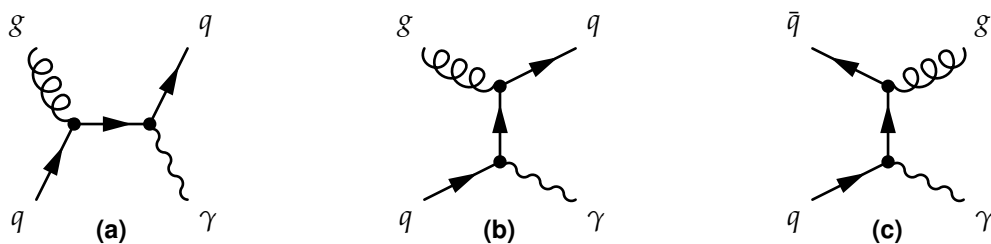
1	Introduction . . . . .	9
2	Phénoménologie des événements photon + jets . . . . .	9
3	Corrections résiduelles absolues des jets . . . . .	10
3.1	Méthode de la balance . . . . .	10
3.2	Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante . . . . .	10
3.3	Analyse . . . . .	10
3.4	Résultats . . . . .	10
4	Correction de la résolution en énergie des jets . . . . .	10
4.1	• . . . . .	10
4.2	• . . . . .	10
4.3	• . . . . .	10
4.4	• . . . . .	10
5	Conclusion . . . . .	10

## 1 Introduction



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

## 2 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.

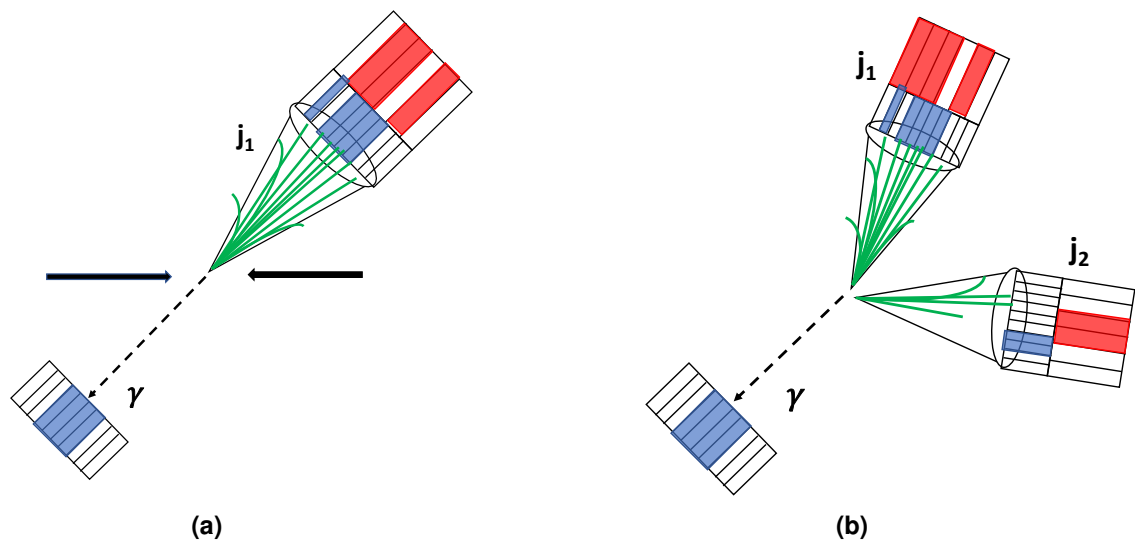


Figure 4.3 – •

### 3 Corrections résiduelles absolues des jets

#### 3.1 Méthode de la balance

#### 3.2 Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante

#### 3.3 Analyse

#### 3.4 Résultats

### 4 Correction de la résolution en énergie des jets

#### 4.1 •

#### 4.2 •

#### 4.3 •

#### 4.4 •

### 5 Conclusion

# Chapitre 5

## Recherche d'un boson de Higgs de haute masse

### Sommaire

---

1	Introduction . . . . .	11
2	Sélection d'événements et catégorisation . . . . .	11
2.1	Données . . . . .	11
2.2	Simulation . . . . .	11
2.3	Catégorisation . . . . .	11
3	Chaîne d'analyse . . . . .	11
4	Estimation du bruit de fond . . . . .	11
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations . . . . .	11
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données . . . . .	11
5	Incertitudes systématiques . . . . .	11
5.1	Incertitudes de normalisation . . . . .	11
5.2	Incertitudes de forme . . . . .	11
6	Résultats et interprétations . . . . .	12
7	Conclusion . . . . .	12

---

## 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>.

