

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> . . . . .                 | 7        |
| 2.1      | Le solénoïde . . . . .  | 7        |
| 2.2      | Le trajectographe ou <i>tracker</i> . . . . .                             | 7        |
| 2.3      | Le calorimètre électromagnétique ou ECAL . . . . .                        | 7        |
| 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      | « Comment ça fonctionne ce code » . . . . .                                    | 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

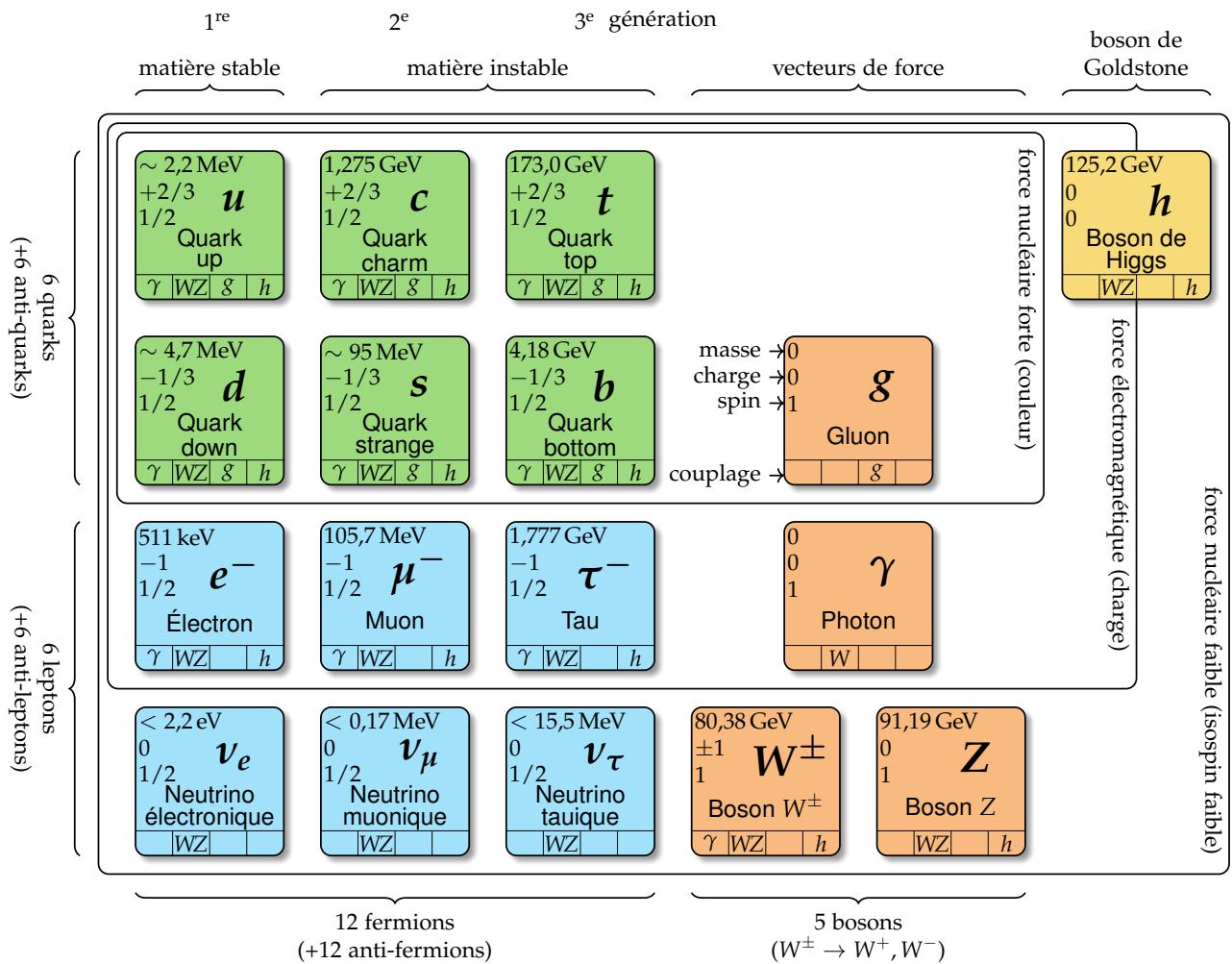


Figure 2.1 – Les particules du modèle standard.

#### 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

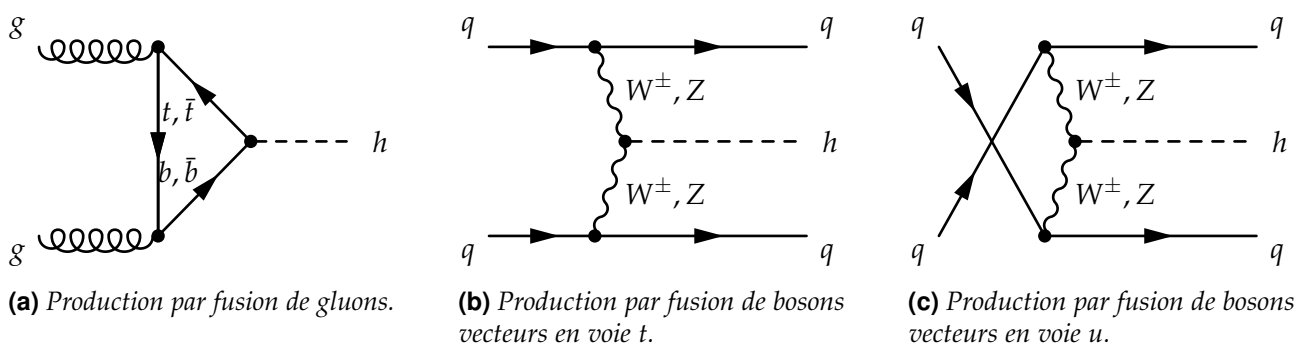
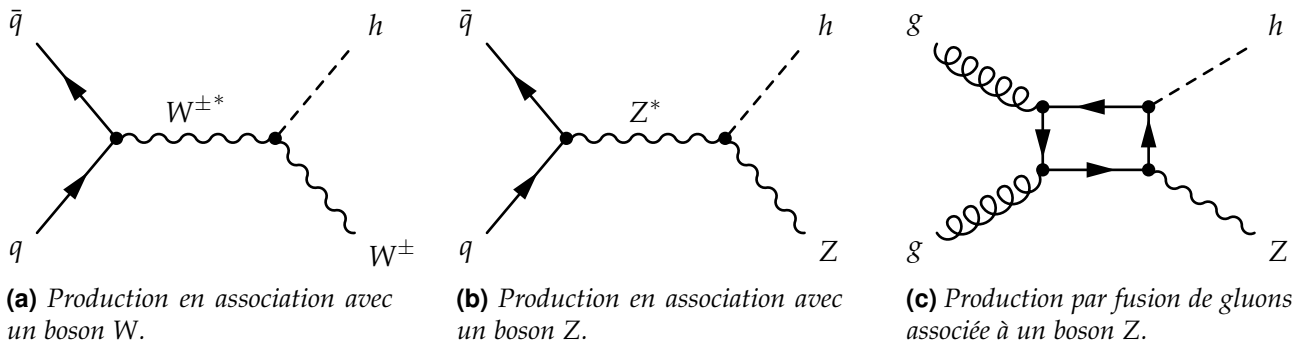
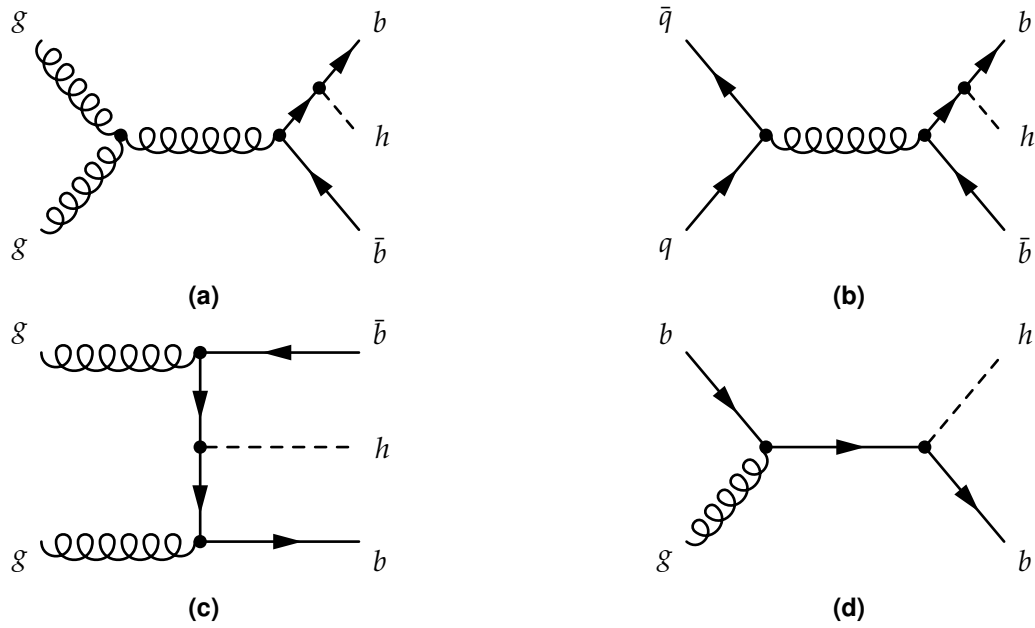


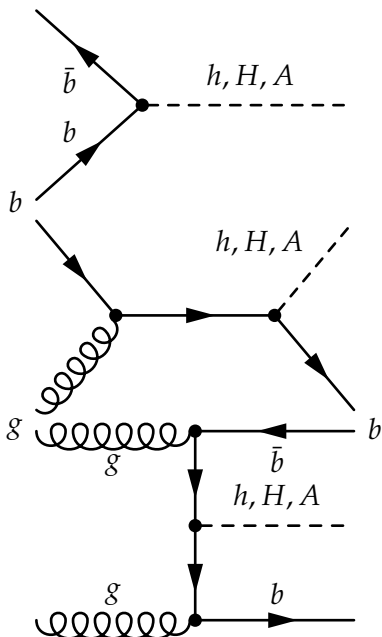
Figure 2.2 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons (ggh) et fusion de bosons vecteurs (VBF).

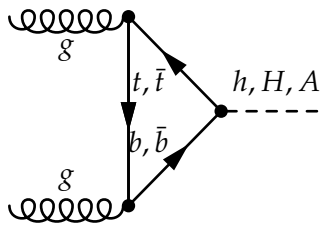


**Figure 2.3** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.

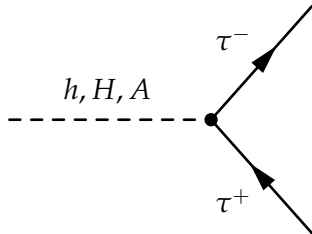


**Figure 2.4** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark  $b$ .

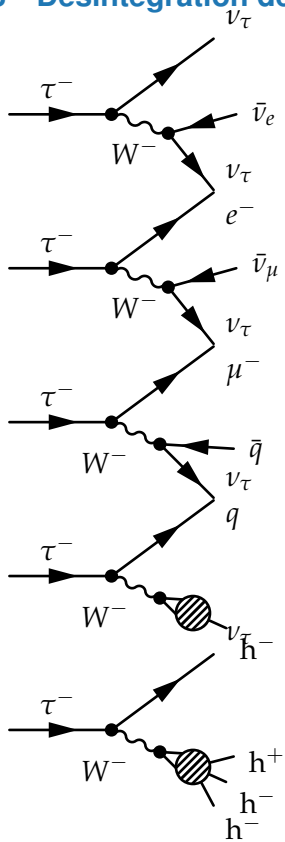




## 5.2 Désintégration de bosons de Higgs



## 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 Solenoïd</i></b> | <b>7</b> |
| 2.1      | Le solénoïde   | 7        |
| 2.2      | Le trajectographe ou <i>tracker</i>                    | 7        |
| 2.3      | Le calorimètre électromagnétique ou ECAL               | 7        |
| 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

#### 2 L'expérience CMS : *Compact Muon Solenoïd*

##### 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**



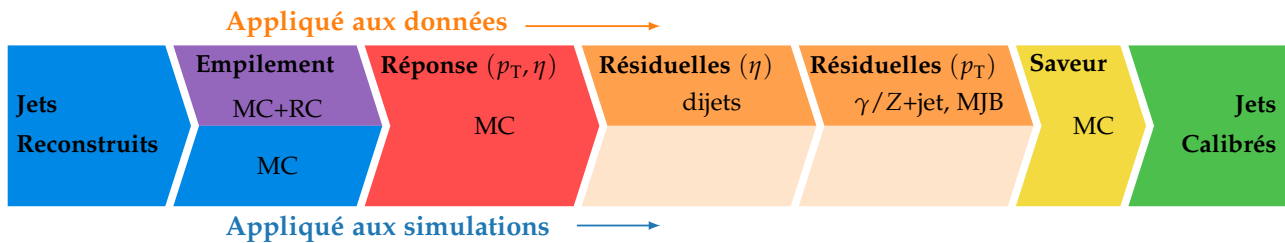
# Chapitre 4

## Calibration en énergie des jets

### Sommaire

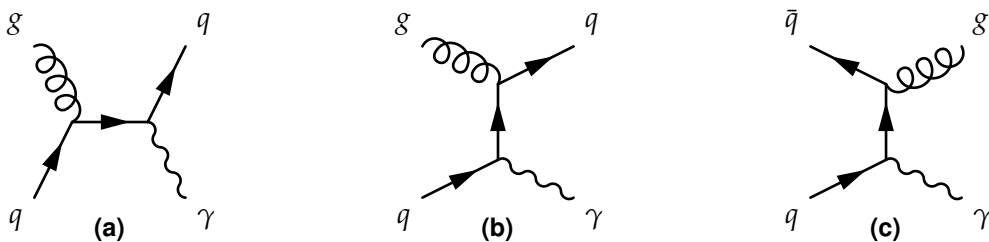
|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Introduction . . . . .   | 9  |
| 2   | Phénoménologie des événements photon + jets . . . . .                          | 9  |
| 3   | Corrections résiduelles absolues des jets . . . . .                            | 10 |
| 3.1 | Méthode de la balance . . . . .  | 10 |
| 3.2 | Méthode de la projection de la fraction d'énergie transverse manquante . . . . | 10 |
| 3.3 | « Comment ça fonctionne ce code » . . . . .                                    | 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.

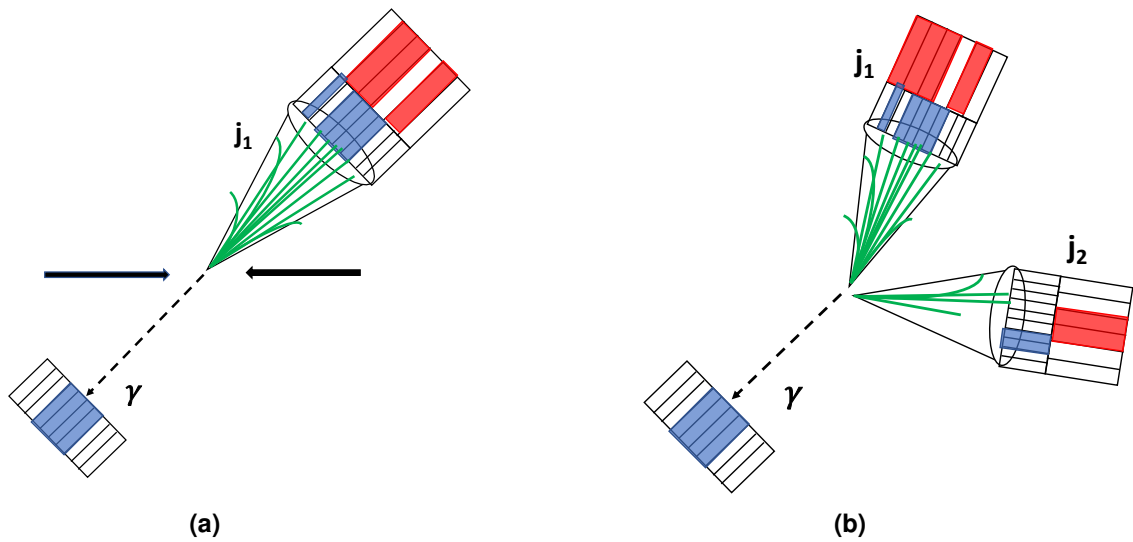


Figure 4.3 – •

### 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 « Comment ça fonctionne ce code »

#### 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**

