

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION



N° d'ordre NNT : ?
LYCEN – ?

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 d'Astrophysique

Spécialité du doctorat : Physique des particules

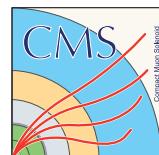
Soutenue publiquement le XX xxxx 2021 par

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>
M	Bla	BLA	Fonction	Institut	<rôle>
M	Bla	BLA	Fonction	Institut	<rôle>
M	Bla	BLA	Fonction	Institut	<rôle>
M	Bla	BLA	Fonction	Institut	<rôle>
M	Colin	BERNET	Chargé de recherche CNRS	IP2I	Directeur de thèse



À ...

Remerciements

Remerciements

Colin

Ece

<membres du jury>

direction IP2I, groupe CMS

Yi Giuseppe, Juska, Mikko (service task)

Gaël

Hugues

KIT : Roger Wolf (welcoming in the collaborative team), Artur Gottmann (lots...), Sebastian Brommer (use of KIT resources), Maximilian Burkart (account at KIT)

autres doctorants IP2I, Aurélien, JF, Greg, Antoine

parents

Sarah

<oubliés>

Résumé

Résumé

Abstract

Abstract

Table des matières

1	Introduction	1
2	Particules, interactions et phénoménologie	3
1	Les particules du modèle standard	4
1.1	Les fermions	4
1.2	Les bosons	5
2	Formalisme théorique et interactions	6
2.1	Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange	6
2.2	Interaction électromagnétique	8
2.3	Interaction électrofaible	10
2.4	Mécanisme de Higgs et brisure spontanée de symétrie	14
2.5	Interaction forte	17
3	Succès et limites du modèle standard	20
3.1	Succès	20
3.2	Limites	20
4	Au-delà du modèle standard	23
4.1	La supersymétrie	23
4.2	Modèles à deux doublets de Higgs	24
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard	26
5	Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM	27
5.1	Production de bosons de Higgs	28
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	31
5.3	Désintégration des leptons tau	33
6	Conclusion	34
3	Dispositif expérimental	37
1	Introduction	37
2	Le CERN	38
2.1	Les origines du CERN	38
2.2	Réalisations du CERN	38
2.3	Les accélérateurs du CERN	39
3	Le LHC : <i>Large Hadron Collider</i>	39
3.1	Exploitation du LHC	39
3.2	Accélération de protons	39
3.3	Collisions de protons	41
3.4	Luminosité, nombre d'événements et statistiques	43
3.5	L'empilement	45
3.6	Les expériences du LHC	45
4	L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoid</i>	46
4.1	Vue d'ensemble et système de coordonnées	46
4.2	Le solénoïde	48
4.3	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	49
4.4	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	51
4.5	Le calorimètre hadronique ou HCAL	53

4.6	Les chambres à muons	54
4.7	Prise de données à CMS	56
5	Événements simulés	57
5.1	Génération d'événements	58
5.2	Simulation du détecteur	59
6	Reconstruction des événements	59
6.1	Éléments d'identification du <i>Particle Flow</i>	59
6.2	Identification et reconstruction des particules	61
6.3	Énergie transverse manquante	63
7	Conclusion	63
4	Calibration en énergie des jets	65
1	Introduction	65
2	Formation des jets	66
2.1	Gerbe partonique	66
2.2	Hadronisation	67
3	Reconstruction des jets	68
3.1	Algorithmes de regroupement	69
3.2	Identification des jets dans CMS	70
3.3	Saveur des jets	71
4	Calibration en énergie des jets dans CMS	74
4.1	Correction de l'empilement	77
4.2	Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η	78
4.3	Corrections résiduelles	79
4.4	Incertitude sur la correction en énergie des jets	82
4.5	Correction de la résolution en énergie	82
5	Phénoménologie des événements $\gamma + \text{jets}$	84
5.1	Principe des événements $\gamma + \text{jets}$ et réponse balancée	84
5.2	Activité additionnelle des jets	86
6	Correction résiduelle absolue en p_T avec les événements $\gamma + \text{jets}$	86
6.1	Événements utilisés	86
6.2	Analyse	90
6.3	Résultats	95
7	Correction de la résolution en énergie avec les événements $\gamma + \text{jets}$	102
7.1	Définition de la résolution en énergie des jets	103
7.2	Analyse	103
7.3	Résultats	105
8	Conclusion	105
5	Recherche d'un boson de Higgs de haute masse	107
1	Introduction	107
2	Sélection d'événements et catégorisation	107
2.1	Données	107
2.2	Simulation	108
2.3	Catégorisation	108
3	Chaîne d'analyse	108
4	Estimation du bruit de fond	108
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations	108
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données	108
5	Incertitudes systématiques	108
5.1	Incertitudes de normalisation	108
5.2	Incertitudes de forme	108
6	Résultats et interprétations	108
7	Conclusion	108

6	Reconstruction de la masse d'une résonance grâce au <i>Machine Learning</i>	109
1	Introduction	110
2	Le <i>Machine Learning</i>	110
2.1	Généralités	110
2.2	Le <i>Gradient Boosting</i>	110
2.3	Le <i>Deep Learning</i>	110
3	Application du <i>Machine Learning</i> aux événements $H \rightarrow \tau\tau$	110
3.1	Génération des événements	110
3.2	Variables d'entrées	110
3.3	Performances sur les événements de test	110
3.4	Performances sur les événements de l'analyse CMS	110
4	Prise en compte de l'empilement	110
4.1	Génération des événements	110
4.2	Performances	110
4.3	Variables d'entrées supplémentaires	110
4.4	Performances	110
5	Effets sur les résultats de l'analyse MSSM HTT	110
6	Conclusion	110
7	Conclusion	111
A	Notions mathématiques	113
B	Diagrammes de Feynman	115

Table des figures

2.1	Les particules fondamentales du modèle standard.	4
2.2	Une particule se déplace au cours du temps.	6
2.3	Variation de la trajectoire d'une particule.	6
2.4	Diagrammes de Feynman possibles à partir du terme $\bar{\psi}\gamma^\mu e Q A_\mu \psi$ du lagrangien \mathcal{L}_{QED}	10
2.5	Diagrammes de Feynman de production de paire $W^+ W^-$ à l'arbre.	10
2.6	Diagramme de Feynman correspondant à l'interaction entre trois bosons.	13
2.7	Forme du potentiel du Higgs V selon le signe de μ^2	15
2.8	Combinaisons des couleurs des quarks dans les hadrons.	18
2.9	Interaction entre un quark et un gluon.	18
2.10	Diagrammes de Feynman correspondant à l'interaction entre trois et quatre gluons.	18
2.11	Mesure de α_s en fonction de l'échelle d'énergie.	19
2.12	Spectre de masse des hadrons légers.	20
2.13	Diagrammes de Feynman des corrections à la masse du boson de Higgs.	21
2.14	Masses des bosons de Higgs du MSSM.	27
2.15	Sections efficaces des modes de production du boson de Higgs du modèle standard.	30
2.16	Production de boson de Higgs par fusion de gluons et de bosons vecteurs.	30
2.17	Production de boson de Higgs en association avec un boson.	30
2.18	Production de boson de Higgs en association avec un quark top.	30
2.19	Production de boson de Higgs du MSSM par fusion de gluons et de bosons vecteurs.	31
2.20	Production de boson de Higgs du MSSM en association avec un boson.	31
2.21	Production de boson de Higgs du MSSM en association avec un quark b	31
2.22	Rapports de branchement des bosons de Higgs du MSSM.	32
2.23	Désintégration $h, H, A \rightarrow \tau^+ \tau^-$	33
2.24	Diagrammes de Feynman de désintégration d'un τ^-	34
3.1	Emplacements des grandes expériences du LEP et du LHC.	40
3.2	Complexe des accélérateurs du CERN.	40
3.3	Diagramme de Feynman de la propagation d'un proton avec apparition d'une paire $q\bar{q}$	41
3.4	Fonctions de densité partoniques.	42
3.5	Luminosité totale et empilement en 2016.	44
3.6	Luminosité totale et empilement en 2017.	44
3.7	Luminosité totale et empilement en 2018.	44
3.8	Vue éclatée du détecteur CMS.	46
3.9	Système de coordonnées du détecteur CMS.	47
3.10	Vue longitudinale d'un quadrant du détecteur CMS.	48
3.11	Champ magnétique dans le détecteur CMS.	49
3.12	Schéma détaillé du trajectographe du détecteur CMS.	50
3.13	Résolution en p_T du trajectographe.	50
3.14	Comparaison des trajectographes à pixels utilisés en 2016 et à partir de 2017.	51
3.15	Schéma du calorimètre électronique de CMS.	52
3.16	Évolution temporelle de la réponse du ECAL.	53
3.17	Résolution relative de l'énergie des électrons dans le ECAL lors du Run II.	53
3.18	Schéma du calorimètre hadronique de CMS.	54
3.19	Réponse relative du calorimètre hadronique de CMS.	54

3.20 Le logo de la collaboration CMS.	55
3.21 Schéma des chambres à muons de CMS.	55
3.22 Distribution de la masse invariante de deux muons.	56
3.23 Architecture du système de déclenchement L1.	57
3.24 Représentation d'une collision de protons.	58
3.25 Coupe transverse schématique du détecteur CMS.	60
3.26 Points d'interactions entre particules des événements et matière composant le détecteur.	61
4.1 Un boson Z se désintègre en paire quark-antiquark.	66
4.2 Formation de deux gerbes partoniques.	67
4.3 Formation de jets dans le cadre du modèle des cordes de Lund.	68
4.4 Formation de jets dans le cadre du modèle d'agglomération hadronique.	68
4.5 Formes des jets reconstruits à partir de différents algorithmes.	70
4.6 Temps de recombinaison d'un événement dijet.	71
4.7 Compositions des jets reconstruits lors du Run II.	71
4.8 Trois jets, dont un de saveur lourde.	73
4.9 Performances des algorithmes d'identification de la saveur des jets.	75
4.10 Performances de la discrimination quark-gluon pour la saveur des jets.	75
4.11 Étapes successives de la JEC.	76
4.12 Valeur moyenne de la réponse de jets d'événements QCD simulés.	76
4.13 Contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule.	78
4.14 Réponse des jets reconstruits en fonction de p_T et η lors du Run II.	79
4.15 Correction résiduelle relative en η lors du Run II.	80
4.16 Correction résiduelle absolue en p_T pour $ \eta < 1,3$ lors du Run II.	81
4.17 Correction résiduelle de saveur en fonction de l'impulsion du jet.	81
4.18 Incertitudes relatives sur la JEC en fonction de p_T et η lors du Run II.	83
4.19 Résolution en énergie des jets.	84
4.20 Résolution en énergie des photons.	85
4.21 Diagrammes de Feynman donnant un photon et un jet dans l'état final.	85
4.22 Topologies typiques des événements $\gamma + \text{jets}$.	85
4.23 Diagrammes de Feynman de processus avec ISR ou FSR.	86
4.24 Régions des calorimètres à exclure de l'analyse dans le plan (η, ϕ) .	90
4.25 Densités de probabilité de N_{PU} pour 2018.	92
4.26 Densités de probabilité de N_{PU} pour 2017-UL.	93
4.27 Observables d'événements $\gamma + \text{jets}$ en 2018.	94
4.28 Réponses balancée et MPF en 2018.	95
4.29 Extrapolation vers $\alpha = 0$ de la réponse des jets.	96
4.30 Réponses balancées en 2018 avant extrapolation.	97
4.31 Réponses MPF en 2018 avant extrapolation.	98
4.32 Réponses balancées en 2018 après extrapolation.	99
4.33 Réponses MPF en 2018 après extrapolation.	100
4.34 Distributions de la réponse MPF moyenne en fonction de p_T en 2018.	101
4.35 Comparaison des réponses MPF avant et après correction résiduelle absolue en 2018.	102
4.36 Détermination de la résolution en énergie des jets.	104
4.37 Facteurs correctifs de la résolution en énergie des jets.	105
4.38 Réponses balancées avant et après correction de la résolution en énergie des jets.	106
B.1 Diagramme de Feynman issu du terme (B.1).	115

Liste des tableaux

2.1	Représentation des fermions selon leur chiralité et leur isospin faible.	11
2.2	Valeurs des hypercharges, isospins faibles et charges électriques pour les leptons.	13
2.3	Valeurs expérimentales des 19 paramètres libres du modèle standard.	22
2.4	Couplages des bosons de Higgs neutres.	25
2.5	Particules et leurs superpartenaires.	28
2.6	Couplages des bosons de Higgs neutres dans la limite découpée.	28
2.7	Rapports de branchement des événements $h \rightarrow \tau\tau$	34
3.1	<i>Runs</i> du LHC.	41
3.2	Caractéristiques du solénoïde supraconducteur CMS.	48
4.1	Critères d’identification des jets à CMS pour l’analyse des données de 2016.	72
4.2	Critères d’identification des jets à CMS pour l’analyse des données de 2017.	72
4.3	Critères d’identification des jets à CMS pour l’analyse des données de 2018.	72
4.4	Critères d’identification des jets à CMS pour l’analyse des données de 2017-UL.	72
4.5	Liste des périodes de prise de données considérées et luminosités correspondantes. .	87
4.6	Sections efficaces des différents événements $\gamma +$ jets simulés.	87
4.7	Aires effectives de correction de l’isolation du photon.	88
4.8	Coupures utilisées pour l’identification des photons.	89
4.9	Chemins de déclenchement.	90
4.10	Intervalles de p_T^γ	90
4.11	Intervalles larges de $ \eta^{\text{jet}} $	91
4.12	Intervalles de α utilisés pour la JES.	91
4.13	Rapports des réponses balancée et MPF obtenus en 2018.	101
4.14	Rapports des réponses balancée et MPF obtenus en 2018 après extrapolation vers $\alpha = 0$. .	102
4.15	Intervalles de p_T^γ utilisés pour la JER.	103
4.16	Intervalles fins de $ \eta^{\text{jet}} $ utilisés pour la JER.	103
4.17	Intervalles de α utilisés pour la JER.	103
5.1	Valeurs prises par gen_match.	108

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 »

Grandeur	Dimensions : (M , L , T), (\hbar , c , GeV), ($\hbar = c = 1$, GeV)		Conversion SI \leftrightarrow UN
Masse	M	$\text{GeV} \cdot c^{-2}$	GeV
Longueur	L	$\hbar \cdot c \cdot \text{GeV}^{-1}$	GeV^{-1}
Durée	T	$\hbar \cdot \text{GeV}^{-1}$	GeV^{-1}
Énergie	$ML^2 T^{-2}$	GeV	$1 \text{ J} = \frac{10^{-3}}{1,6 \times 10^{-19}} \text{ GeV}$
Impulsion	MLT^{-1}	$\text{GeV} \cdot c^{-1}$	$1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 1,87 \times 10^{18} \text{ GeV}$

Chapitre 2

Particules, interactions et phénoménologie

Sommaire

1	Les particules du modèle standard	4
1.1	Les fermions	4
1.2	Les bosons	5
2	Formalisme théorique et interactions	6
2.1	Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange	6
2.2	Interaction électromagnétique	8
2.3	Interaction électrofaible	10
2.4	Mécanisme de Higgs et brisure spontanée de symétrie	14
2.5	Interaction forte	17
3	Succès et limites du modèle standard	20
3.1	Succès	20
3.2	Limites	20
4	Au-delà du modèle standard	23
4.1	La supersymétrie	23
4.2	Modèles à deux doublets de Higgs	24
4.3	L'extension supersymétrique minimale du modèle standard	26
5	Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM	27
5.1	Production de bosons de Higgs	28
5.2	Désintégration de bosons de Higgs	31
5.3	Désintégration des leptons tau	33
6	Conclusion	34

Ce chapitre présente le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse. Le modèle standard est le cadre théorique en place en physique des particules. Il permet de décrire les objets fondamentaux qui composent l'Univers, les particules, ainsi que leurs interactions.

Les particules du modèle standard sont présentées dans la section 1. Le formalisme mathématique permettant de décrire leur comportement, faisant apparaître les forces fondamentales, est introduit dans la section 2. Le modèle standard ainsi construit propose une description de l'Univers à la fois précise et robuste.

Le boson de Higgs, dernière particule découverte à ce jour, a ainsi été postulé près de cinquante ans avant d'être observé. De nombreux succès, dont une présentation non exhaustive est proposée dans la section 3.1, couronnent ainsi le modèle standard. Cependant, malgré plusieurs décennies de prédictions correctement vérifiées, certaines observations montrent que le modèle standard ne saurait prétendre au titre de « théorie du tout ».

Ces limitations au modèle standard, dont certaines sont présentées dans la section 3.2, mènent à de nouveaux modèles dits « au-delà du modèle standard », dont il est question dans la section 4. Parmi eux se trouvent des modèles dit « à deux doublets de Higgs », c'est-à-dire avec un secteur de Higgs plus complexe, comme la supersymétrie.

Il existe plusieurs degrés de complexité dans ces nouveaux modèles, aussi seule l'extension supersymétrique minimale du modèle standard, ou MSSM, sera considérée pour l'analyse menée dans

cette thèse. Dans le cadre du MSSM, de nouvelles particules existent et la phénoménologie de ces particules, présentée dans la section 5, motive le choix du type d'événements d'intérêt pour la recherche de cette nouvelle physique.

1 Les particules du modèle standard

Une particule est considérée comme fondamentale si elle ne possède pas de sous-structure observée à ce jour. Le modèle standard décrit le comportement de ces particules fondamentales qui peuvent être catégorisées selon plusieurs critères. Le premier d'entre eux est le « spin », une observable quantique intrinsèque aux particules. Les particules de spin demi-entier sont les fermions, celles de spin entier les bosons.

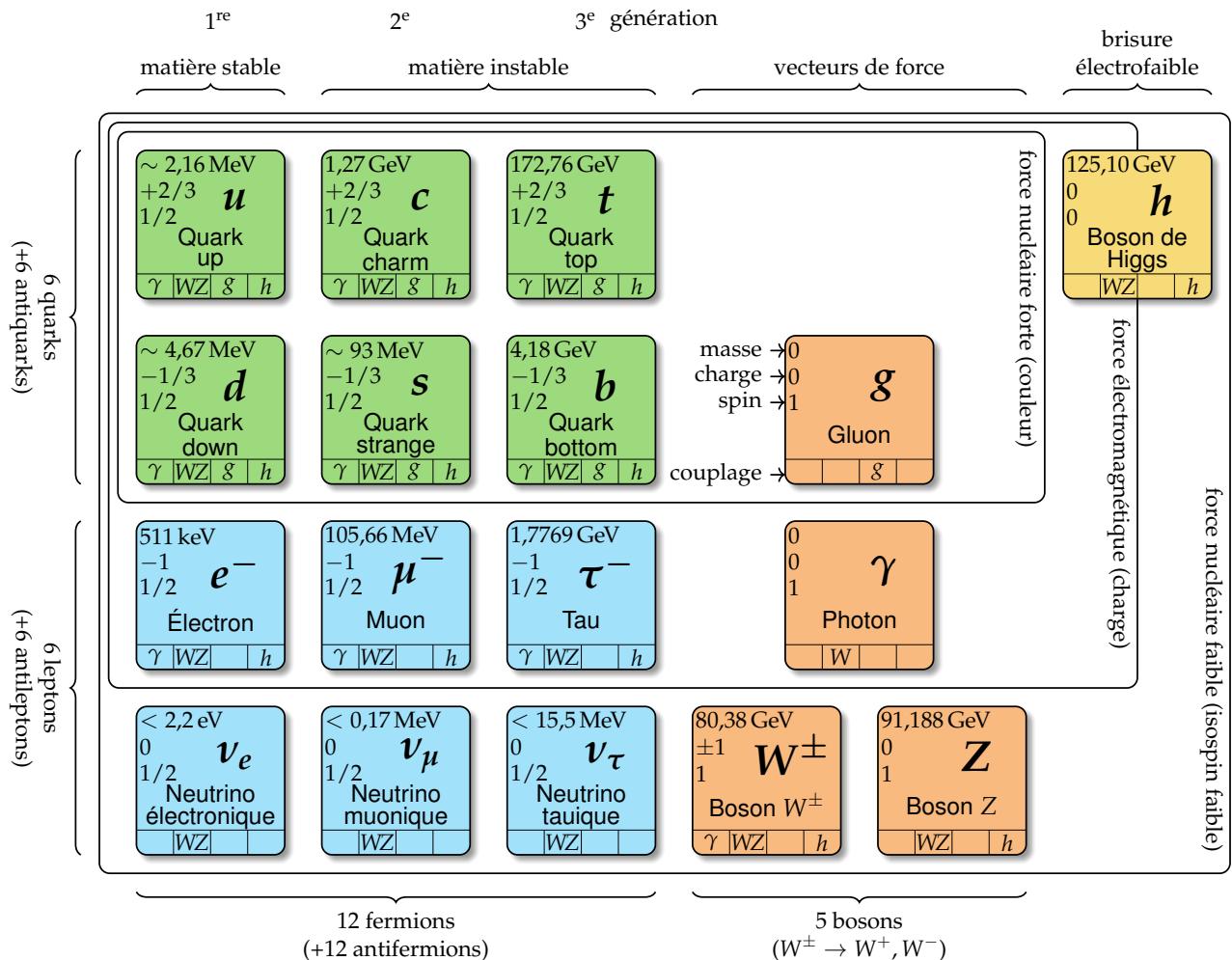


Figure 2.1 – Les particules fondamentales du modèle standard.

1.1 Les fermions

Les fermions sont les particules fondamentales de spin demi-entier et suivent donc la statistique de Fermi-Dirac. Ainsi, deux fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique, c'est-à-dire avoir chacun de leurs nombres quantiques égaux entre eux, comme exposé par le principe d'exclusion de Pauli. Le modèle standard comprend douze fermions constituant la matière, accompagnés de douze antifermions correspondants pour l'antimatière.

Les fermions peuvent se diviser d'une part en deux catégories, les quarks et les leptons, et d'autre part en trois catégories correspondant à trois « générations », comme illustré sur la figure 2.1. La première génération (quarks u et d , électron e^- et neutrino électronique ν_e) correspond aux particules

les plus communes ; les deuxièmes et troisièmes générations contiennent des particules analogues, plus massives et instables.

1.1.1 Les quarks

Les quarks sont les fermions possédant une charge de couleur. Il existe deux quarks par génération, un quark de type *up* et un quark de type *down*, formant un doublet d'isospin faible. L'isospin faible est un nombre quantique décrit dans la section 2.3. Il y a donc six quarks au total. Les quarks de type *up* (*u*, *c* et *t*) portent une charge électrique $+\frac{2}{3}e$ avec e la charge électrique élémentaire, les quarks de type *down* (*d*, *s* et *b*) une charge $-\frac{1}{3}e$. Les antiquarks possèdent une charge électrique opposée ($-\frac{2}{3}e$ et $+\frac{1}{3}e$). Les quarks sont donc sensibles à l'interaction électromagnétique.

À l'instar de la charge électrique pour l'interaction électromagnétique, la « couleur » rend les quarks sensibles à l'interaction forte. La charge de couleur peut prendre trois valeurs orthogonales, nommées par convention rouge, verte et bleue, car les particules portant une charge de couleur ne sont pas stables à elles seules et se regroupent pour former des particules composites de charge de couleur nulle, ou de couleur « blanche ». C'est ce que l'on appelle le phénomène de « confinement de couleur », décrit dans la section 2.5.3.

Les particules composées de quarks sont les hadrons. Ces particules sont de couleur blanche, ce qui peut être obtenu de deux manières :

- par association d'un quark rouge, un vert et un bleu ; il s'agit d'un « baryon ». Le proton (*uud*) et le neutron (*udd*) sont deux exemples de baryons.
- par association d'un quark et d'un antiquark ; il s'agit d'un « méson ». En effet, un antiquark porte une « anticolore ». Ainsi, un quark up (*u*) rouge et un antiquark down (\bar{d}) « antiroUGE » forment un pion chargé π^+ .

Enfin, comme tous les fermions, les quarks sont également sensibles à l'interaction faible. Les quarks sont ainsi les seules particules sensibles à toutes les interactions fondamentales décrites par le modèle standard.

1.1.2 Les leptons

Les leptons sont les fermions ne possédant pas de charge de couleur. Ils sont donc insensibles à l'interaction forte. En revanche, ils sont tous sensibles à l'interaction faible. Sur le même principe que pour les quarks, il y a un doublet d'isospin faible de deux leptons par génération, soit six leptons au total. Les leptons d'isospin faible haut sont l'électron (e^-), le muon (μ^-) et le tau (τ^-), ils portent une charge électrique $-e$ ($+e$ pour les antiparticules correspondantes). Les leptons d'isospin faible bas sont les neutrinos. Les neutrinos ne portent pas de charge électrique et interagissent donc uniquement par interaction faible, ce qui en fait des particules difficiles à détecter.

1.2 Les bosons

Les bosons sont les particules fondamentales de spin entier. Ils suivent la statistique de Bose-Einstein qui n'interdit pas la présence de plusieurs bosons ayant tous leurs nombres quantiques égaux entre eux, contrairement à la statistique de Fermi-Dirac.

Les bosons de spin 1 sont les bosons de jauge, ou bosons vecteurs, et sont les médiateurs des interactions fondamentales. Ainsi, le photon (γ) est le boson vecteur de l'interaction électromagnétique. Il est de masse nulle et est électriquement neutre. Les bosons W^+ , W^- et Z sont ceux de l'interaction faible. Le boson Z est électriquement neutre et de masse $m_Z = 91,19 \text{ GeV}$, les bosons W portent une charge électrique de $\pm e$, ont une masse de $m_W = 80,38 \text{ GeV}$ et n'interagissent qu'avec les particules de chiralité gauche et les antiparticules de chiralité droite. La chiralité est définie dans la section 2.3. Enfin, huit gluons (g) sont les médiateurs de l'interaction forte. Ils n'ont ni masse ni charge électrique, mais portent une charge de couleur et une charge d'anticouleur. Un gluon peut donc être chargé « rouge et antibleu ». Si un tel gluon interagit avec un quark bleu, par conservation, ce quark est rouge après interaction.

Le boson de Higgs est de spin nul, il s'agit donc d'un boson scalaire. Ce boson est une conséquence du mécanisme de brisure spontanée de symétrie électrofaible, mécanisme donnant leurs masses aux particules. Ce mécanisme est présenté dans la section 2.4.

2 Formalisme théorique et interactions

Il ne suffit pas de lister les particules fondamentales pour obtenir un modèle, il faut également décrire leur comportement, c'est-à-dire leur évolution à travers le temps et l'espace. Pour cela, le modèle standard se base sur la théorie quantique des champs. Une particule n'est pas un « objet ponctuel » comme en mécanique classique, mais une excitation d'un champ quantique relativiste. Il s'agit alors de décrire l'évolution de ces excitations.

Les lois de la mécanique classique ne sauraient remplir ce rôle. Le comportement des particules fondamentales est obtenu par l'application des équations d'Euler-Lagrange au lagrangien du modèle standard. Afin de comprendre pourquoi ce formalisme mathématique permet effectivement d'obtenir l'évolution des champs quantiques relativistes décrivant les particules, la section suivante consiste en une brève introduction du lagrangien dans le cas de la mécanique classique, suivie d'une généralisation au cas du modèle standard.

2.1 Lagrangien et équation d'Euler-Lagrange

2.1.1 Lagrangien en mécanique Newtonienne

Soit 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

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

La position de la particule à tout instant est alors obtenue.

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. 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,

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

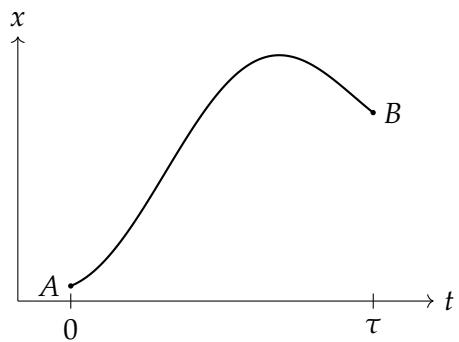


Figure 2.2 – Une particule se déplace au cours du temps d'un point A à un point B le long d'une dimension x .

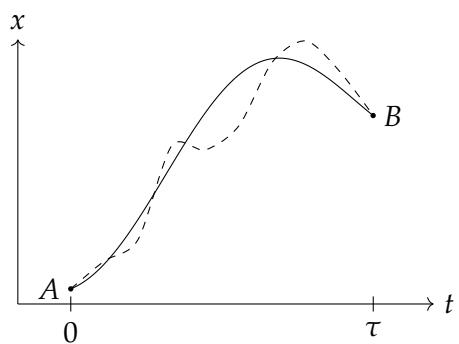


Figure 2.3 – Variation de la trajectoire d'une particule se déplaçant au cours du temps d'un point A à un point B .

avec, en notant $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$,

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

Lorsque la trajectoire suivie par la particule varie par rapport à la trajectoire déterminée par la mécanique Newtonienne, ce qui est le cas en mécanique quantique, ces grandeurs sont modifiées. 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 à V par $F = -\frac{dV}{dx}$. De même, l'énergie cinétique moyenne varie selon

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

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

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

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. Le lagrangien L du système étudié est alors défini comme

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

2.1.2 Équation d'Euler-Lagrange

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 pour la trajectoire classique

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

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.

2.1.3 Lagrangien, champs et symétries

Le raisonnement précédent peut se généraliser 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. Soit à présent 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 \mathcal{L} ,

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

Il s'agit à présent de déterminer la densité lagrangienne \mathcal{L} du modèle standard. Par la suite, la densité lagrangienne \mathcal{L} est nommée « 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

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

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

2.2 Interaction électromagnétique

Le lagrangien libre d'un fermion, c'est-à-dire le lagrangien décrivant le comportement d'un fermion seul, s'exprime

$$\mathcal{L}_{\text{fermion libre}} = \bar{\psi} (i\cancel{D} - m) \psi = \bar{\psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi = i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\bar{\psi} \psi \quad (2.17)$$

où la notation « slash » pour un objet k signifie $\cancel{k} = \gamma^\mu k_\mu$, i est l'unité imaginaire ($i^2 = -1$), ψ le spinor de Dirac correspondant au champ fermionique, $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$ son adjoint de Dirac, ψ^\dagger étant l'adjoint de ψ , γ^μ les matrices de Dirac, définies dans l'annexe A, ∂_μ la dérivée partielle par rapport à la coordonnée μ dans l'espace-temps de Minkowski et m la masse de la particule considérée. Le terme $\gamma^\mu \partial_\mu$, par convention de sommation d'Einstein exposée dans l'annexe A, correspond à une somme sur les différentes valeur de μ .

Le lagrangien $\mathcal{L}_{\text{fermion libre}}$ est invariant sous une transformation globale du groupe $U(1)_{em}$ ¹, c'est-à-dire lorsque la transformation suivante est appliquée au spinor ψ

$$\psi \rightarrow e^{iQ\alpha} \psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} \quad (2.18)$$

où $\alpha \in \mathbb{R}$ et Q est l'opérateur de charge électrique². En effet, sous une telle transformation,

$$\bar{\psi} \psi \rightarrow \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} e^{iQ\alpha} \psi = \bar{\psi} \psi \quad (2.19)$$

et

$$\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi \rightarrow \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} \gamma^\mu \partial_\mu (e^{iQ\alpha} \psi) = \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} e^{iQ\alpha} \gamma^\mu \partial_\mu (\psi) + \bar{\psi} e^{-iQ\alpha} \gamma^\mu \partial_\mu (e^{iQ\alpha}) \psi = \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi \quad (2.20)$$

car α ne dépend pas de l'espace-temps pour une transformation globale.

1. Dans la notation $U(1)_{em}$, « em » signifie électromagnétique. Ce groupe n'apparaît pas dans l'équation (2.16) car seul l'électromagnétisme est traité ici. Le groupe $U(1)_Y$ est traité dans la section 2.3.

2. Lorsque cet opérateur est appliqué à un champ quantique décrivant un fermion, il permet d'obtenir la valeur de la charge électrique du fermion.

En revanche, pour une transformation locale,

$$i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi \rightarrow i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi + ie^{-iQ\alpha}\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\left(e^{iQ\alpha}\right)\psi = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - \bar{\psi}\gamma^\mu Q\partial_\mu\alpha\psi \quad (2.21)$$

ce qui fait apparaître un terme supplémentaire, $\bar{\psi}\gamma^\mu Q\partial_\mu\alpha\psi$, provenant de la transformation du terme $i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi$ de $\mathcal{L}_{\text{fermion libre}}$ qui brise ainsi l'invariance de jauge du lagrangien. Afin de rendre le lagrangien invariant sous les transformations locales du groupe $U(1)_{em}$, il est possible de remplacer la dérivée usuelle ∂_μ par la dérivée covariante D_μ , telle que

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - ieQA_\mu \quad (2.22)$$

où e est la charge électrique élémentaire et A_μ un champ de jauge nouvellement introduit, dont la transformation de jauge permet de supprimer le terme supplémentaire qui brise l'invariance de jauge du lagrangien. En effet, le champ A_μ se transforme tel que

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha. \quad (2.23)$$

Ainsi, en réécrivant le lagrangien du fermion de l'équation (2.17) avec la dérivée covariante,

$$\mathcal{L}'_{\text{fermion libre}} = i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi = \mathcal{L}_{\text{fermion libre}} + \bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi, \quad (2.24)$$

le dernier terme se transforme en

$$\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi \rightarrow \bar{\psi}e^{-iQ\alpha}\gamma^\mu eQ\left(A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu\alpha\right)e^{iQ\alpha}\psi = \bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu Q\partial_\mu\alpha\psi \quad (2.25)$$

et le dernier terme obtenu compense exactement le terme brisant l'invariance de jauge dans l'équation (2.21).

Le nouveau terme introduit par l'utilisation de la dérivée covariante, $\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi$, correspond à l'interaction entre un fermion et le champ de jauge A_μ , dont l'intensité est directement proportionnelle à la charge électrique du fermion. Toutefois, le champ A_μ ne représente pas encore le photon en l'état, il faut permettre au photon de se propager librement. Pour cela, il faut introduire un terme cinétique qui soit invariant de jauge dans le lagrangien, ce qui peut se faire avec

$$\mathcal{L}_{\text{photon libre}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad (2.26)$$

avec $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$. Un terme de masse pour le champ A_μ devrait s'écrire sous la forme $\frac{1}{2}m^2 A^\mu A_\mu$, ce qui n'est pas invariant de jauge. Par conséquent, le champ A_μ est de masse nulle.

Le lagrangien complet pour l'interaction électromagnétique, aussi nommé QED (électrodynamique quantique, *Quantum Electro-Dynamics*), s'exprime alors

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = \underbrace{\bar{\psi}(i\cancel{D} - m)\psi}_{\text{fermions}} - \underbrace{\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}_{\text{photons}} = \underbrace{\bar{\psi}(i\cancel{D} - m)\psi}_{\mathcal{L}_{\text{fermion libre}}} + \underbrace{\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi}_{\text{interaction}} - \underbrace{\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}_{\mathcal{L}_{\text{photon libre}}}. \quad (2.27)$$

Le terme d'interaction dans ce lagrangien permet de « connecter » les fermions aux photons dans les diagrammes de Feynman, dont le principe est décrit dans l'annexe B. La « connexion » ainsi obtenue est nommée « vertex ». La structure du terme d'interaction, $\bar{\psi}\gamma^\mu eQA_\mu\psi$, impose ainsi la présence au vertex d'un photon (A_μ), d'un fermion entrant ou d'un antifermion sortant (ψ) et d'un fermion sortant ou d'un antifermion entrant ($\bar{\psi}$). Ces possibilités donnent les diagrammes de la figure 2.4.

Maintenir l'invariance de jauge locale à l'aide de la dérivée covariante fait émerger l'interaction électromagnétique dans le cas de l'invariance de jauge sous $U(1)_{em}$. Dans les sections suivantes, un raisonnement similaire est appliqué afin d'obtenir les interactions électrofaible et forte.

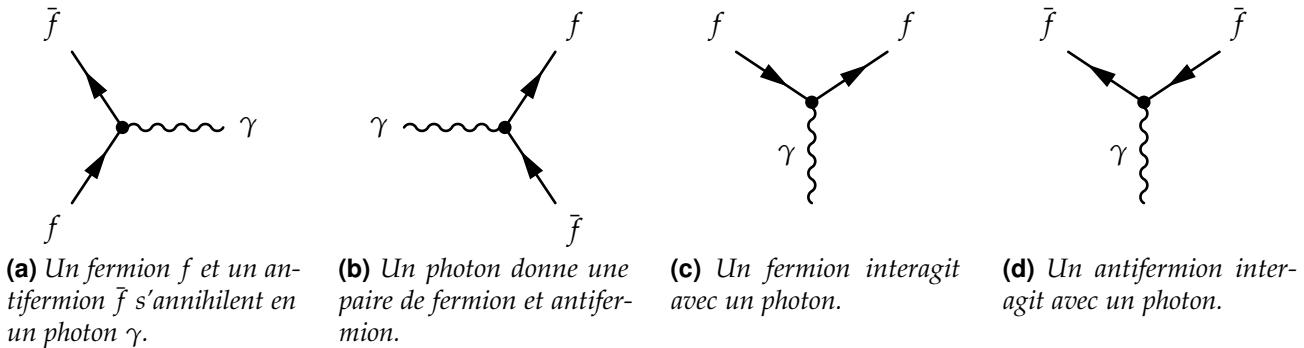


Figure 2.4 – Diagrammes de Feynman possibles à partir du terme $\bar{\psi}\gamma^\mu e Q A_\mu \psi$ du lagrangien \mathcal{L}_{QED} .

2.3 Interaction électrofaible

Le modèle standard décrit les interactions électromagnétique et faible comme deux facettes d'une seule et même interaction qui les unifie, l'interaction électrofaible, notée « EW » pour *electroweak*. L'interaction électrofaible a été développée à partir des travaux de Sheldon Glashow [1], Abdus Salam [2] et Steven Weinberg [3], récompensés à ce titre par le prix Nobel de physique en 1979.

Une des raisons pour unifier ces deux forces provient du calcul de la section efficace de production de paire W^+W^- . La section efficace d'un processus physique ainsi que son lien avec le nombre d'événements de ce processus est abordé dans la section 3.4 du chapitre 3. Pour obtenir cette section efficace sans avoir de divergence, ce qui ne saurait représenter la réalité physique, il est nécessaire de considérer les diagrammes des figures 2.5a, 2.5b et 2.5c. L'analogie entre les diagrammes 2.5a et 2.5c pousse ainsi à unifier les deux forces.

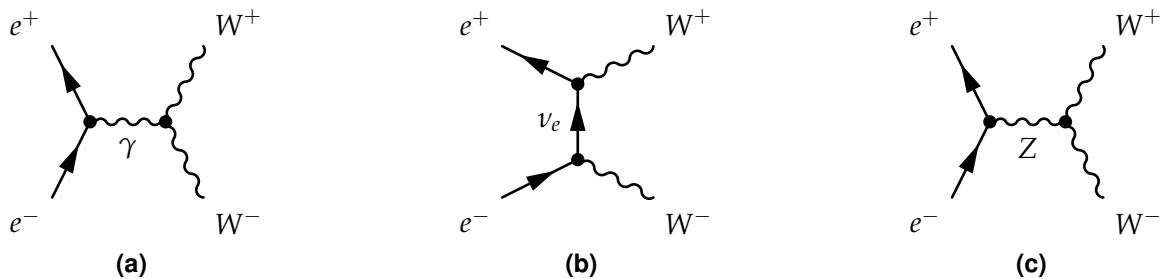


Figure 2.5 – Diagrammes de Feynman de production de paire W^+W^- à l'arbre.

L'interaction électromagnétique repose sur l'invariance de jauge sous les transformations locales du groupe $U(1)_{em}$. Dans le cas de l'interaction électrofaible, ce groupe de symétrie est $SU(2)_L \times U(1)_Y$. Dans un premier temps, seul le cas de $SU(2)_L$ avec les leptons est traité et permet de soulever toute la richesse supplémentaire de ce groupe par rapport à $U(1)$. Ensuite, $SU(2)_L \times U(1)_Y$ est abordé, toujours avec les leptons. Puis, les traitements des quarks sont présentés, donnant alors une description de l'interaction électrofaible.

2.3.1 Symétrie $SU(2)_L$ et chiralité

Une des propriétés les plus importantes de l'interaction faible est de violer la symétrie de parité, notée P . La symétrie P consiste à remplacer une des trois coordonnées spatiales par son opposé, comme le passage d'un objet à son image par un miroir le ferait. La violation de P par l'interaction faible, observée expérimentalement avec les désintégrations β [4], peut être expliquée en considérant que les couplages aux bosons W ne se font qu'avec certains états de chiralité.

Dans les termes de couplage du lagrangien, un facteur γ^μ correspond à un couplage vectoriel, comme pour l'électromagnétisme. Un facteur $\gamma^\mu\gamma^5$ correspond quant à lui à un couplage vectoriel axial. Un facteur $\gamma^\mu(1 \pm \gamma^5)$ somme ainsi un vecteur à un vecteur axial, ce qui implique une violation de la symétrie de parité. Les expériences montrent que les bosons W ne sont couplés qu'aux fermions de chiralité gauche et aux antifermions de chiralité droite. Or, il est possible de projeter un spinor ψ

afin d'obtenir sa composante de chiralité gauche ψ_L à l'aide du projecteur chiral γ^5 ,

$$\psi_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\psi. \quad (2.28)$$

Pour les antiparticules décrites par $\bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$,

$$\overline{\psi_L} = (\psi_L)^\dagger \gamma^0 = \left(\frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\psi \right)^\dagger \gamma^0 = \psi^\dagger \frac{1}{2}(1 - \gamma^5)\gamma^0 = \psi^\dagger \gamma^0 \frac{1}{2}(1 + \gamma^5) = \bar{\psi}_R, \quad (2.29)$$

d'où le couplage entre fermions de chiralité gauche et antifermions de chiralité droite. Dans la notation $SU(2)_L$, L signifie ainsi *left*. Les couplages du boson Z ne sont pas purement en $(1 - \gamma^5)$, il est alors également couplé aux fermions de chiralité droite et aux antifermions de chiralité gauche. Ce comportement du Z peut être expliqué dans le cadre de la force électrofaible, la force faible à elle seule ne permet pas d'en rendre compte.

La violation de P par l'interaction faible a également pour conséquence la violation de C , la symétrie de charge. En effet, C change une particule de chiralité gauche en une antiparticule de même chiralité, dont les couplages aux bosons de l'interaction faible ne sont pas les mêmes. En revanche, la symétrie CP change une particule de chiralité gauche en une antiparticule de chiralité droite, ce qui semble être conservé par l'interaction faible. L'étude des désintégrations des kaons a toutefois montré que l'interaction faible viole également la symétrie CP [5], ce qui a pu être expliquée théoriquement en postulant l'existence d'une troisième génération de quarks [6] observée depuis.

L'introduction de la symétrie $SU(2)_L$ amène un nouveau nombre quantique, l'*« isospin faible »*, noté I . Il se comporte mathématiquement comme le spin des particules, d'où son nom *isospin*. Les fermions de chiralité gauche sont rassemblés en doublet d'isospin faible $I = \frac{1}{2}$, les fermions de chiralité droite en singlets d'isospin faible $I = 0$. Ces derniers sont ainsi invariants sous les transformations de $SU(2)_L$, ce qui se traduit physiquement par une insensibilité à l'interaction faible.

Mis à part les neutrinos qui n'existent, dans le cadre actuel du modèle standard, qu'avec une chiralité gauche³, les fermions peuvent être de chiralité droite ou gauche, ce qui mène aux représentations du tableau 2.1.

I	Quarks gauches	Quarks droits	Leptons gauches	Leptons droits
$\frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}_L$	-	$\begin{pmatrix} \nu_i \\ \ell_i \end{pmatrix}_L$	-
0	-	$u_{i,R}, d_{i,R}$	-	$\ell_{i,R}$

Tableau 2.1 – Représentation des fermions selon leur chiralité et leur isospin faible. L'indice $i \in \{1, 2, 3\}$ correspond à la génération des particules. Ainsi, les symboles u_i, d_i, ℓ_i et ν_i correspondent, respectivement, aux quarks d'isospin faible haut (u, c, t), d'isospin faible bas (d, s, b), aux leptons chargés (e, μ, τ) et aux neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ).

2.3.2 Symétrie $SU(2)$ et interactions entre bosons

Afin d'alléger les notations, le cas plus général d'un groupe de symétrie $SU(2)$ est traité. Pour étendre les résultats à $SU(2)_L$, il suffit de se souvenir que les couplages ont uniquement lieu entre fermions de chiralité gauche et antifermions de chiralité droite. La méthode reste la même que pour l'électromagnétisme. Sous une transformation de $SU(2)$, les spineurs se transforment selon

$$\psi \rightarrow e^{\frac{i}{2}\tau \cdot \alpha(x)}\psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi}e^{-\frac{i}{2}\tau \cdot \alpha(x)} \quad (2.30)$$

où $\alpha \in \mathbb{R}^3$ et τ est un vecteur dont les composantes τ_i sont les générateurs de $SU(2)$ ⁴. L'équation (2.30) est l'analogue directe de l'équation (2.19).

3. Il n'y a à ce jour aucune raison pour les neutrinos de chiralité droite de ne pas exister. Cependant, ils n'interagissent pas avec la matière dans le cadre du modèle standard. Ainsi, il est possible de les retirer du modèle tout en conservant une description cohérente du comportement des particules.

4. Les générateurs de $SU(2)$ sont des matrices 2×2 s'identifiant aux matrices de Pauli σ_i définies dans l'annexe A. Toutefois, ces générateurs agissent dans le cas de $SU(2)_L$ sur les doublets d'isospin faible alors que les matrices de Pauli agissent sur le spin d'un fermion. Afin d'éviter les confusions, la notation τ est utilisée.

Afin de simplifier les calculs qui suivent, seules les transformations infinitésimales sont considérées. En effet, $SU(2)$ est un groupe non abélien. Cela signifie deux transformations successives a et b de ce groupe ne donnent pas le même résultat selon que soient appliqués a puis b ou b puis a , c'est-à-dire $ab - ba \neq 0$. Ainsi, des termes supplémentaires apparaissent, ou plutôt ne se simplifient pas entre eux. Les transformations précédentes sous leurs formes infinitésimales, c'est-à-dire au premier ordre en α , s'expriment

$$\psi \rightarrow \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi, \quad \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right). \quad (2.31)$$

Les termes du lagrangien du fermion libre, introduit dans l'équation (2.17), se transforment alors comme

$$-m\bar{\psi}\psi \rightarrow -m\bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi = -m\bar{\psi}\psi + \mathcal{O}(\alpha^2) \quad (2.32)$$

et

$$i\bar{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi \rightarrow i\bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \gamma^\mu \partial_\mu \left(\left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi\right) = i\bar{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi - \bar{\psi} \frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \gamma^\mu \partial_\mu \boldsymbol{\alpha}(x) \psi + \mathcal{O}(\alpha^2) \quad (2.33)$$

ce qui fait apparaître, sur le même principe qu'avec l'interaction électromagnétique, un terme supplémentaire brisant l'invariance de jauge du lagrangien. Une nouvelle dérivée covariante peut être définie afin de rétablir l'invariance de jauge,

$$D_\mu = \partial_\mu - \frac{i}{2}g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu(x), \quad (2.34)$$

où l'on introduit g_I la constante de couplage d'isospin faible, ainsi que trois champs de jauge vectoriels $\boldsymbol{W}_\mu^i(x)$, $i \in \{1, 2, 3\}$ se transformant tels que

$$\boldsymbol{W}_\mu \rightarrow \boldsymbol{W}_\mu + \frac{1}{g_I} \partial_\mu \boldsymbol{\alpha} - (\boldsymbol{\alpha} \wedge \boldsymbol{W}_\mu). \quad (2.35)$$

Dans ce cas, le lagrangien du fermion libre se réécrit sous la forme

$$\begin{aligned} \mathcal{L}'_{\text{fermion libre}} &= i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu \psi - m\bar{\psi}\psi = i\bar{\psi}\gamma^\mu \partial_\mu \psi + \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2}g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi - m\bar{\psi}\psi \\ &= \mathcal{L}_{\text{fermion libre}} + \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2}g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Ainsi, le terme supplémentaire du lagrangien se transforme tel que

$$\begin{aligned} \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2}g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi &\rightarrow \bar{\psi} \left(1 - \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \gamma^\mu \frac{g_I}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \left(\boldsymbol{W}_\mu + \frac{1}{g_I} \partial_\mu \boldsymbol{\alpha} - (\boldsymbol{\alpha} \wedge \boldsymbol{W}_\mu)\right) \left(1 + \frac{i}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x)\right) \psi \\ &= \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{g_I}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi - \bar{\psi} \frac{i}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x) \gamma^\mu \frac{g_I}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi + \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{g_I}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \frac{i}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}(x) \psi \\ &\quad + \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \partial_\mu \boldsymbol{\alpha} \psi - \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{g_I}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\alpha} \wedge \boldsymbol{W}_\mu) \psi + \mathcal{O}(\alpha^2). \end{aligned} \quad (2.37)$$

Or,

$$(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{a})(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{b}) = (\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b}) + i\boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{a} \wedge \boldsymbol{b}) \Leftrightarrow \boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{a} \wedge \boldsymbol{b}) = i[(\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b}) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{a})(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{b})]. \quad (2.38)$$

Ainsi,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\alpha} \wedge \boldsymbol{W}_\mu) &= \frac{1}{2} [\boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{\alpha} \wedge \boldsymbol{W}_\mu) - \boldsymbol{\tau} \cdot (\boldsymbol{W}_\mu \wedge \boldsymbol{\alpha})] \\ &= \frac{i}{2} [[(\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{W}_\mu) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha})(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu)] - [(\boldsymbol{W}_\mu \cdot \boldsymbol{\alpha}) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu)(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha})]] \\ &= \frac{i}{2} [(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu)(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha}) - (\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\alpha})(\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu)]. \end{aligned} \quad (2.39)$$

En combinant les équations (2.37) et (2.39), il vient

$$\bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2}g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi \rightarrow \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{g_I}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{W}_\mu \psi + \bar{\psi}\gamma^\mu \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \partial_\mu \boldsymbol{\alpha} \psi + \mathcal{O}(\alpha^2), \quad (2.40)$$

où le dernier terme obtenu compense exactement le terme brisant l'invariance de jauge dans l'équation (2.33).

À ce stade, l'analogie avec l'électromagnétisme pousse à introduire $\mathbf{W}_{\mu\nu}$ l'analogue à $F_{\mu\nu}$ tel que $\mathbf{W}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{W}_\nu - \partial_\nu \mathbf{W}_\mu$. Or, les invariances de jauge imposées mènent à utiliser une définition légèrement différente,

$$\mathbf{W}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{W}_\nu - \partial_\nu \mathbf{W}_\mu + g_I (\mathbf{W}_\mu \wedge \mathbf{W}_\nu). \quad (2.41)$$

Le lagrangien pour $SU(2)$ s'écrit alors

$$\mathcal{L}_{SU(2)} = \bar{\psi} (iD - m) \psi - \frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu}. \quad (2.42)$$

Une nouvelle différence notable et importante vis-à-vis de \mathcal{L}_{QCD} est la non linéarité de $\mathbf{W}_{\mu\nu}$ par rapport à \mathbf{W}_μ et \mathbf{W}_ν . Cette composante non linéaire ouvre la porte aux interactions directes entre les champs W_μ^i , c'est-à-dire entre les bosons, ce qui était impossible avec QED. De nouveaux types de vertex, comme celui de la figure 2.6, sont donc possibles dans une théorie de jauge avec une symétrie locale $SU(2)$.

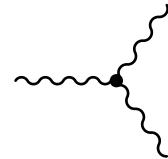


Figure 2.6 – Diagramme de Feynman correspondant à l'interaction entre trois bosons.

2.3.3 Symétrie $SU(2)_L \times U(1)_Y$ et unification électrofaible

Dans la notation $U(1)_Y$, Y est l'« hypercharge », reliée à Q la charge électrique et à I_3 la projection de l'isospin faible par la relation de Gell-Mann–Nishijima,

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}, \quad (2.43)$$

dont les résultats pour les différents leptons sont présentés dans le tableau 2.2.

Les raisonnements réalisés précédemment peuvent ici être mis à profit. En effet, le cas de $U(1)_{em}$ est traité dans la section 2.2. Il est possible d'obtenir directement les mêmes résultats pour $U(1)_Y$ en procédant à l'analogie $U(1)_{em} \leftrightarrow U(1)_Y$, avec

$$A_\mu \leftrightarrow B_\mu, \quad F_{\mu\nu} \leftrightarrow F_{\mu\nu}^{(B)}, \quad e \leftrightarrow g_Y, \quad Q \leftrightarrow \frac{1}{2}Y. \quad (2.44)$$

De plus, sachant que $SU(2)_L$ couple les fermions de chiralité gauche et les antifermions de chiralité droite, les résultats pour $SU(2)$ sont directement utilisables en ajoutant les projections décrites par les équations (2.28) et (2.29).

La dérivée covariante pour $SU(2)_L \times U(1)_Y$ est ainsi

$$D_\mu = \partial_\mu - ig_I \mathbf{I} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{i}{2} g_Y Y B_\mu, \quad (2.45)$$

pouvant agir sur un doublet d'isospin faible, noté L , ou un singlet d'isospin faible, noté R , selon

$$D_\mu L = \left[\partial_\mu - \frac{i}{2} g_I \mathbf{I} \cdot \mathbf{W}_\mu + \frac{i}{2} g_Y Y B_\mu \right] L, \quad (2.46)$$

$$D_\mu R = [\partial_\mu + ig_Y B_\mu] R, \quad (2.47)$$

compte-tenu des différentes valeurs de Y et I données dans le tableau 2.2.

Le lagrangien invariant sous $SU(2)_L \times U(1)_Y$ de l'interaction électrofaible s'écrit alors

$$\mathcal{L}_{EW} = i\bar{\psi} D\psi - \frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(B)} \cdot F^{(B)\mu\nu}. \quad (2.48)$$

Attention toutefois, les champs B_μ et W_μ^i ne correspondent pas, respectivement, au photon et aux bosons W^\pm et Z . Ces quatre bosons sont en fait des combinaisons de ces quatre champs, ce qui est décrit dans la section 2.4.2.

2.3.4 Interaction électrofaible pour les quarks

Le lagrangien électrofaible ainsi construit pour les leptons pourrait facilement être réutilisé dans le cas des quarks, ψ étant un champ décrivant un fermion. Cependant, le lagrangien de l'équation (2.48) ne couple entre eux que des fermions de même génération. Or, il a été observé expérimentalement que l'interaction faible peut également coupler des quarks de générations différentes.

Un mécanisme rendant possible de tels couplages a été introduit par Cabibbo, Kobayashi et Maskawa [6-8]. Le principe est de faire, pour les quarks, la distinction entre les états propres de masse, c'est-à-dire ceux que l'on observe, et les états propres de l'interaction faible. Ces deux ensembles d'états propres diffèrent ainsi pour les quarks d'isospin faible bas et sont reliés entre eux par la matrice CKM \mathcal{M}_{CKM} , matrice 3×3 unitaire complexe,

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}, \quad (2.49)$$

où d' , s' et b' sont les états propres de l'interaction faible et d , s et b ceux de masse. L'élément de matrice V_{ij} ou son conjugué V_{ij}^* est ainsi un facteur appliqué au vertex pour le calcul de la section efficace des processus impliquant des quarks et l'interaction faible. Ces coefficients ne sont pas prédicts par le modèle standard et sont donc mesurés expérimentalement. Les valeurs de leurs modules sont les suivantes [9]

$$|\mathcal{M}_{CKM}| = \begin{pmatrix} 0,973\,70 \pm 0,000\,14 & 0,2245 \pm 0,0008 & 0,003\,82 \pm 0,000\,24 \\ 0,221 \pm 0,004 & 0,987 \pm 0,011 & 0,0410 \pm 0,0014 \\ 0,0080 \pm 0,0003 & 0,0388 \pm 0,0011 & 1,013 \pm 0,030 \end{pmatrix}. \quad (2.50)$$

Cette matrice a une structure très prononcée, presque diagonale. Le couplage entre les quarks de générations différentes est faible, ce qui se traduit expérimentalement par des durées de vie de certains hadrons contenant des quarks de deuxième et troisième génération suffisamment longs pour qu'ils se propagent sur quelques millimètres, voire quelques mètres.

Le modèle ainsi construit décrit l'interaction électrofaible pour tous les fermions. Cependant, il n'y a aucun terme de masse dans le lagrangien de l'équation (2.48). En effet, un terme de masse pour les fermions serait de la forme

$$-m\bar{\psi}\psi = -m(\bar{\psi}_R + \bar{\psi}_L)(\psi_R + \psi_L) = -m(\bar{\psi}_R\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L + \bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_L\psi_L) = -m(\bar{\psi}_R\psi_L + \bar{\psi}_L\psi_R). \quad (2.51)$$

Or, ce terme n'est pas invariant sous $SU(2)_L \times U(1)_Y$. Pour les champs W_μ^i et B_μ , des termes de masse violeraient également la symétrie de jauge. Dès lors, il semble difficile pour un tel lagrangien de décrire les forces électromagnétique et faible.

En réalité, ce lagrangien décrit l'interaction « électrofaible ». Les interactions électromagnétique et faible résultent d'un mécanisme de brisure spontanée de symétrie, qui se trouve dans ce cas être le mécanisme de Higgs. La section suivante montre comment l'introduction du champ de Higgs amène cette brisure de symétrie et comment sont obtenus des fermions massifs, le photon et les bosons W^\pm et Z .

2.4 Mécanisme de Higgs et brisure spontanée de symétrie

2.4.1 Champ de Higgs et brisure de symétrie

Soit un champ complexe, scalaire, massif, le champ de Higgs [10-13], noté ϕ . Il s'agit d'un champ à quatre composantes, qu'il est possible d'écrire sous la forme d'un doublet d'isospin faible,

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_3 + i\phi_4 \\ \phi_1 + i\phi_2 \end{pmatrix}. \quad (2.52)$$

Le champ de Higgs a pour hypercharge $Y = +1$ et pour isospin faible $I = \frac{1}{2}$. Il se transforme ainsi, respectivement sous $U(1)_Y$ et $SU(2)_L$, selon

$$\begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} e^{i\frac{\beta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\beta}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \rightarrow e^{\frac{i}{2}\tau \cdot \alpha} \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

La dérivée covariante définie par l'équation (2.45) agit donc sur le champ de Higgs selon

$$D_\mu \phi = \left[\partial_\mu - \frac{i}{2} g_I \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{i}{2} g_Y B_\mu \right] \phi, \quad (2.54)$$

et ce champ de Higgs apporte les termes \mathcal{L}_h au lagrangien du modèle standard, où

$$\mathcal{L}_h = (D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) - V(\phi) \quad (2.55)$$

avec

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2, \quad \lambda > 0. \quad (2.56)$$

Il est possible de déterminer le comportement de ce champ autour du minimum du potentiel V , c'est-à-dire autour de sa position d'équilibre. Soit v tel que $v^2 = \phi_1^2 + \phi_2^2 + \phi_3^2 + \phi_4^2$. Alors, à la position d'équilibre,

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial V}{\partial \phi} \right|_{\text{éq}} = 0 \\ \left. \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} \right|_{\text{éq}} \geqslant 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \left(2\mu^2 + 4\lambda \frac{v^2}{2} \right) \frac{v}{\sqrt{2}} = 0 \\ 2\mu^2 + 12\lambda \frac{v^2}{2} \geqslant 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu^2 \geqslant 0 \Rightarrow v = 0 \\ \mu^2 < 0 \Rightarrow v^2 = \frac{-\mu^2}{\lambda}. \end{cases} \quad (2.57)$$

Ainsi, dans le cas où $\mu^2 < 0$, le potentiel possède une infinité de minimums, situés sur un cercle de rayon $\frac{|v|}{\sqrt{2}}$, comme cela est visible sur la figure 2.7. La forme de ce potentiel n'est pas sans rappeler celle d'un chapeau mexicain.

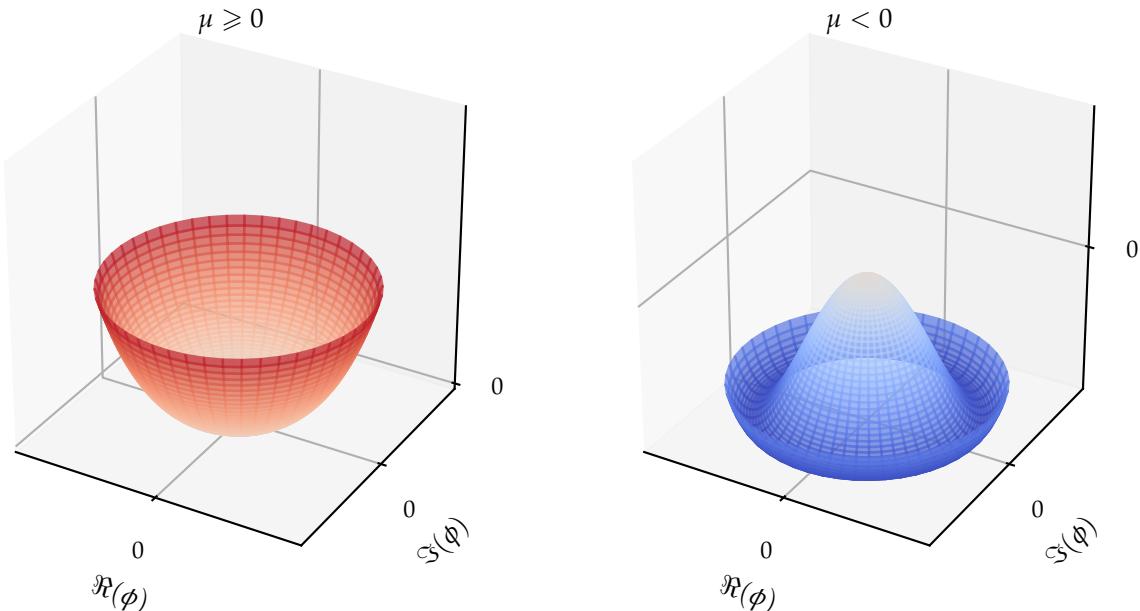


Figure 2.7 – Forme du potentiel du Higgs V selon le signe de μ^2 .

Le condensat de ce champ dans le vide correspond à la position de ce minimum de ce potentiel,

$$\langle \phi \rangle_0 = \frac{v}{\sqrt{2}} \neq 0, \quad (2.58)$$

ce qui implique le phénomène de brisure spontanée de symétrie.

Le minimum de potentiel pour V étant dégénéré, c'est-à-dire qu'il y a une infinité de points au minimum, il est possible de briser la symétrie avec n'importe lequel de ces points. Alors, les observables physiques s'obtiennent en réalisant un développement limité autour du point choisi. Le choix le plus simple est nommé « jauge unitaire ». Dans ce cas,

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + h(x) \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

où h correspond à un nouveau champ de Higgs, cette fois-ci physiquement réel.

2.4.2 Masses des bosons

Lorsque l'expression (2.59) de ϕ est injectée dans \mathcal{L}_h , le terme cinétique devient

$$\begin{aligned} (D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) &= \frac{1}{2} \partial_\mu h \partial^\mu h \\ &+ \frac{(v+h)^2}{8} g_I^2 \left(W_\mu^1 + iW_\mu^2 \right) \left(W^{\mu 1} - iW^{\mu 2} \right) \\ &+ \frac{(v+h)^2}{8} \left(g_I W_\mu^3 - g_Y B_\mu \right) \left(g_I W^{\mu 3} - g_Y B^\mu \right) + \mathcal{O}(h^2). \end{aligned} \quad (2.60)$$

Il est possible de développer cette expression et d'identifier les termes quadratiques qui correspondent à des termes de masse pour les bosons physiques, tout en obtenant les combinaisons des champs leurs correspondant,

$$\text{bosons } W^\pm : \quad W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(W_\mu^1 \mp iW_\mu^2 \right), \quad m_W = \frac{1}{2} v g_I, \quad (2.61)$$

$$\text{photon } \gamma : \quad A_\mu = \frac{g_Y W_\mu^3 + g_I B_\mu}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}, \quad m_A = 0, \quad (2.62)$$

$$\text{boson } Z : \quad Z_\mu = \frac{g_I W_\mu^3 - g_Y B_\mu}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}, \quad m_Z = \frac{1}{2} v \sqrt{g_I^2 + g_Y^2}. \quad (2.63)$$

Ces équations peuvent être réécrites en introduisant l'angle de mélange faible⁵ noté θ_W [14], tel que

$$\cos \theta_W = \frac{g_I}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}, \quad \sin \theta_W = \frac{g_Y}{\sqrt{g_I^2 + g_Y^2}}. \quad (2.64)$$

Alors,

$$\text{photon } \gamma : \quad A_\mu = B_\mu \cos \theta_W + W_\mu^3 \sin \theta_W, \quad m_A = 0, \quad (2.65)$$

$$\text{boson } Z : \quad Z_\mu = W_\mu^3 \cos \theta_W - B_\mu \sin \theta_W, \quad m_Z = \frac{m_W}{\cos \theta_W}. \quad (2.66)$$

Pour le boson de Higgs lui-même, le terme de masse provient de $V(\phi)$ et donne $m_h = \sqrt{-2\mu^2}$.

Les masses des bosons W^\pm , γ et Z ainsi prédites [3] sont expérimentalement confirmées [9, 15-19]. Cependant, la masse du boson de Higgs dépendant de μ , paramètre libre de ce modèle, seule une détermination expérimentale permet de l'obtenir. En 2012, les collaborations ATLAS et CMS ont observé un boson [20-22], confirmé comme étant ce boson de Higgs [23, 24]. Sa masse est déterminée à $125,10 \pm 0,14 \text{ GeV}$ [9].

2.4.3 Masses des fermions

Le champ de Higgs peut également interagir avec les fermions. Une telle interaction, entre un champ scalaire et un champ de Dirac, est une interaction de Yukawa et permet d'introduire des termes de masse invariants de jauge pour ces fermions.

Avant la brisure de symétrie, les termes de Yukawa pour un champ ψ dont la composante d'isospin faible bas correspond à une particule de masse m s'exprime

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\frac{m\sqrt{2}}{v} \bar{\psi} \phi \psi = -\frac{m\sqrt{2}}{v} \left(\bar{\psi}_L \phi \psi_R + \bar{\psi}_R \phi^\dagger \psi_L \right), \quad (2.67)$$

donnant après la brisure spontanée de symétrie précédemment décrite les termes de masse pour les fermions d'isospin faible bas,

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -m \bar{\psi} \psi + \frac{m}{v} \bar{\psi} h \psi. \quad (2.68)$$

5. L'angle de mélange faible est également connu sous le nom d'angle de Weinberg.

En effet, la brisure de symétrie dans le cas de la jauge unitaire (2.59) laisse la composante d'isospin faible haut du champ de Higgs nulle. Ce formalisme permet donc d'obtenir les termes de masse pour les leptons chargés. Les neutrinos étant considérés dans le lagrangien du modèle standard comme des particules de masses nulles, l'ensemble des leptons est donc traité à ce stade.

Dans le cas des quarks en revanche, il faut obtenir des termes de masse pour les quarks d'isospin faible haut. Pour cela, il est possible d'introduire le conjugué de charge du champ de Higgs,

$$\phi^C = i\sigma_2 \phi^* = \begin{pmatrix} \phi^* \\ -\phi^- \end{pmatrix} \quad (2.69)$$

dont l'expression devient après brisure de symétrie dans le cas de la jauge unitaire

$$\phi^C = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v + h(x) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.70)$$

Cette fois, la composante d'isospin faible haut du champ de Higgs n'est pas nulle et permet d'obtenir des termes de masse pour les quarks d'isospin faible haut.

Ainsi, les termes de Yukawa pour les fermions s'expriment

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = y \bar{\psi} \phi \psi + \text{h.c.} = \sum_{i=1}^3 y_i^\ell \bar{\ell}_i \phi \ell_i + \sum_{i=1}^3 y_i^d \bar{d}_i \phi d_i + \sum_{i=1}^3 y_i^u \bar{u}_i \phi^C u_i, \quad y_i^x = -\frac{\sqrt{2}}{v} m_i^x \quad (2.71)$$

où i correspond à la génération des fermions, ℓ_i , d_i et u_i aux champs listés dans le tableau 2.1 et m_i^x à la masse du fermion de type x et de génération i .

2.5 Interaction forte

2.5.1 La couleur

L'interaction forte est la troisième force fondamentale décrite par le modèle standard. L'analogie de la charge électrique pour l'interaction électromagnétique est, dans le cas de l'interaction forte, la « couleur », concept né de l'observation des baryons Δ^{++} , Δ^- [25-27] et Ω^- [28]. Dans le modèle des quarks, ces baryons sont composés comme

$$\Delta^{++} = (uuu), \quad \Delta^- = (ddd), \quad \Omega^- = (sss). \quad (2.72)$$

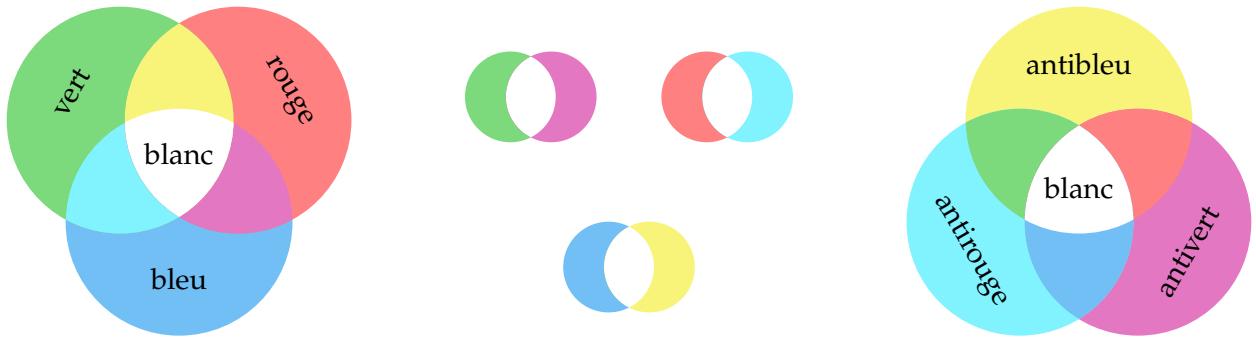
Or, ces baryons sont de spin $\frac{3}{2}$. Les quarks possédant un spin $\frac{1}{2}$, il faudrait alors que pour chacun de ces baryons, les trois quarks les composant aient leurs nombres quantiques égaux, ce qui va à l'encontre du principe de Pauli.

Il est possible de décrire ces baryons sans violer le principe d'exclusion de Pauli en introduisant un nouveau nombre quantique, la couleur. Les quarks portent ainsi une charge de couleur, pouvant prendre trois valeurs orthogonales, nommées par convention rouge, verte et bleue. Les antiquarks portent une anticolleur. Il suffit alors que chaque quark porte une couleur différente, c'est-à-dire

$$\Delta^{++} = (\textcolor{red}{u}\textcolor{green}{u}\textcolor{blue}{u}), \quad \Delta^- = (\textcolor{red}{d}\textcolor{green}{d}\textcolor{blue}{d}), \quad \Omega^- = (\textcolor{red}{s}\textcolor{green}{s}\textcolor{blue}{s}). \quad (2.73)$$

Les baryons ainsi formés de trois quarks (un rouge, un vert et un bleu) portent une charge de couleur globale nulle, ils sont de couleur « blanche », comme cela est visible sur la figure 2.8a. Dans le cas des antibaryons formés de trois antiquarks, sur la figure 2.8c, c'est l'association des trois anticolleurs qui permet d'obtenir un baryon blanc. Il est également possible de former une particule composite blanche par association d'un quark avec un antiquark portant l'anticolleur correspondante. Les trois combinaisons possibles sont illustrées sur la figure 2.8b. Il s'agit alors de mésons.

Les quarks et antiquarks se regroupent ainsi en particules composites, les hadrons (baryons et mésons), dont la neutralité de couleur est confirmée expérimentalement. Ce phénomène est connu sous le nom de « confinement de couleur » et est abordé dans la section 2.5.3.



(a) Un baryon est constitué de trois quarks, un de chaque couleur.

(b) Un méson est constitué d'un quark et d'un antiquark de l'anticouleur correspondante.

(c) Un antibaryon est constitué de trois antiquarks, un de chaque anticolore.

Figure 2.8 – Combinaisons des couleurs des quarks dans les hadrons. La couleur globale est toujours blanche, c'est-à-dire que la charge de couleur globale est nulle.

2.5.2 Symétrie $SU(3)_C$

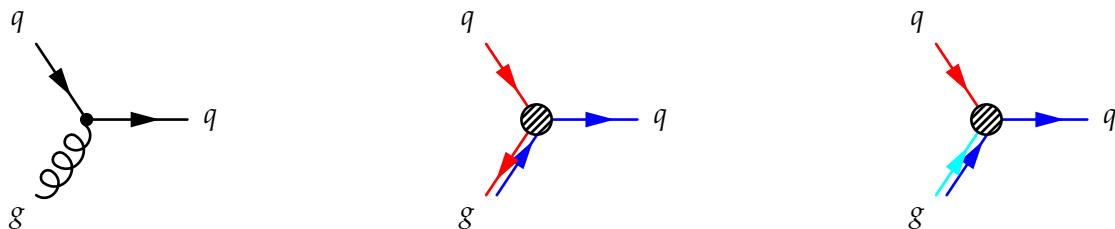
Afin de décrire l'interaction forte dans le même formalisme que les autres interactions fondamentales, il faut un groupe de symétrie. Étant donné qu'il existe trois dimensions de couleur (rouge, verte, bleue), la théorie quantique des champs associée à l'interaction forte se base sur le groupe $SU(3)_C$, où C signifie « couleur ».

Tout comme $SU(2)$, $SU(3)$ est un groupe non abélien. Il est possible de reprendre exactement les mêmes calculs que ceux de la section 2.3.2, en procédant aux changements

$$\tau \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C})^3 \leftrightarrow \lambda \in \mathcal{M}_3(\mathbb{C})^8, \quad \alpha \in \mathbb{R}^3 \leftrightarrow \theta \in \mathbb{R}^8, \quad g_I \leftrightarrow \alpha_s, \quad W_\mu \leftrightarrow G_\mu, \quad W_{\mu\nu} \leftrightarrow G_{\mu\nu} \quad (2.74)$$

où λ est un vecteur à huit composantes, chacune étant une matrice de Gell-Mann, définies dans l'annexe A, G_μ décrit donc huit gluons, bosons vecteurs de l'interaction forte et α_s est la constante de couplage de l'interaction forte.

Les gluons portent une couleur et une anticolore. Lors de chaque interaction, la charge de couleur est conservée, ainsi un quark rouge interagissant avec un gluon bleu-antirouge devient un quark bleu. Le flux de couleur ainsi conservé dans cet exemple est représenté sur la figure 2.9.



(a) Diagramme de Feynman de l'interaction.

(b) Représentation du flux de couleur conservé.

(c) Interprétation en utilisant les anticouleurs.

Figure 2.9 – Interaction entre un quark rouge et un gluon bleu-antirouge, donnant un quark bleu.



Figure 2.10 – Diagrammes de Feynman correspondant à l'interaction entre trois et quatre gluons.

Le terme non linéaire $G_\mu \wedge G_\nu$ dans l'expression de $G_{\mu\nu}$, obtenue à partir de l'analogie (2.74) appliquée à l'équation (2.41), est lourd de conséquences. Il permet le couplage entre trois et quatre gluons, comme cela est illustré sur la figure 2.10, et donne à l'interaction forte toute sa singularité. En effet, ce terme est responsable du confinement de couleur et de l'initiation de la gerbe partonique qui donne naissance aux jets, ce qui est discuté dans le chapitre 4.

2.5.3 Confinement de couleur et liberté asymptotique

Le confinement de couleur force les quarks, particules colorées, à s'associer en formant des particules composites, les hadrons, états liés de charge globale de couleur nulle. Ce phénomène empirique peut s'expliquer par la variation en fonction de l'échelle d'énergie de la constante de couplage de l'interaction forte α_s , représentée sur la figure 2.11.

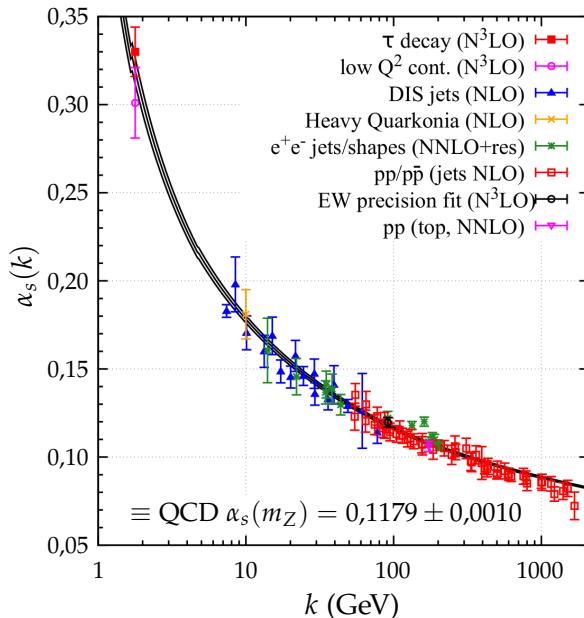


Figure 2.11 – Mesures de α_s en fonction de l'échelle d'énergie k (points) et prédiction théorique (courbe) [9]. Le degré des calculs perturbatifs de QCD utilisés pour extraire α_s est indiqué entre parenthèses (NLO : next-to-leading order, c'est-à-dire jusqu'à l'ordre suivant le premier degré non nul ; NNLO : un ordre de plus que NLO ; etc.).

Aux basses énergie, α_s diverge. Ainsi, séparer et isoler des particules colorées mène à une énergie potentielle de couleur suffisamment grande pour créer des paires quark-antiquark. Lorsqu'un quark est issu d'une collision en physique des particules, ce processus se réalise et produit un ensemble collimé de particules, un jet.

De plus, à cause de la valeur élevée de α_s aux basses énergies, il n'est pas possible de réaliser des calculs perturbatifs pourtant usuels en théorie quantique des champs. D'autres techniques sont toutefois utilisées, comme la méthode de QCD sur réseau. Son principe est de discréteriser l'espace-temps en un réseau de points. Bien que cette méthode requière d'importantes capacités de calcul et beaucoup de temps, elle permet d'obtenir avec succès les masses des hadrons comme cela se voit sur la figure 2.12 pour les hadrons légers.

Les valeurs de α_s à deux échelles d'énergie k et μ sont reliées par la relation

$$\alpha_s(k) = \frac{\alpha_s(\mu)}{1 + \frac{11n_c - 2n_f}{12\pi} \alpha_s(\mu) \ln\left(\frac{k^2}{\mu^2}\right)} \quad (2.75)$$

avec n_c le nombre de couleurs et n_f le nombre de saveurs de quarks, c'est-à-dire $n_c = 3$ et $n_f = 6$ [30]. Cette relation peut ainsi se réécrire

$$\alpha_s(k) = \frac{6\pi}{21 \ln\left(\frac{k}{\Lambda_{\text{QCD}}}\right)}, \quad \Lambda_{\text{QCD}} = 218 \pm 24 \text{ MeV}, \quad (2.76)$$

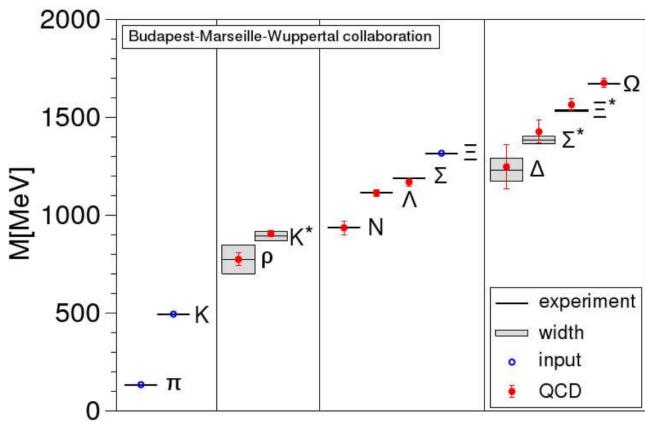


Figure 2.12 – Spectre de masse des hadrons légers [29]. Les lignes horizontales ainsi que les zones grisées sont les valeurs expérimentales et les largeurs de désintégration. Les résultats obtenus en utilisant des calculs de QCD sur réseau sont représentés par des cercles, avec les erreurs associées. Seules les masses des hadrons π , K et Ξ sont sans barre d'erreur, elles sont utilisées pour fixer les paramètres libres du modèle.

avec Λ_{QCD} l'échelle d'énergie à laquelle α_s diverge. Il ressort que α_s décroît lorsque l'échelle d'énergie augmente. Cette diminution de α_s aux hautes énergies est la « liberté asymptotique » [31, 32], régime où les particules colorées ne sont plus confinées et peuvent se propager comme des particules libres. Aux LHC, les énergies de collision permettent d'atteindre ce régime.

3 Succès et limites du modèle standard

3.1 Succès

Le modèle standard a été conçu il y a plus de 50 ans et a évolué avec les nouvelles observations expérimentales. Ses succès sont nombreux, notamment de par son pouvoir prédictif. L'existence de bosons massifs W et Z est ainsi prédite dès la fin des années 60 [3], leur observation est réalisée en 1983 [15-19]. De même, le quark top postulé en 1973 [6] est observé 22 ans plus tard [33, 34]. Dernier tour de force en date, le boson de Higgs, prédit en 1964 [10-13] et observé en 2012 [20, 21].

Le lagrangien du modèle standard s'écrit à ce jour sous la forme

$$\mathcal{L}_{SM} = \underbrace{-\frac{1}{4} \mathcal{F}_{\mu\nu} \mathcal{F}^{\mu\nu}}_{\text{bosons vecteurs libres}} + \underbrace{i\bar{\psi} \not{D} \psi}_{\text{fermions et interactions}} + \underbrace{(D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) - V(\phi)}_{\text{boson de Higgs et interactions avec les autres bosons}} + \underbrace{(y \bar{\psi} \phi \psi + \text{h.c.})}_{\text{termes de Yukawa (interactions fermions-Higgs)}} \quad (2.77)$$

où « h.c. » signifie conjugué hermitien et

$$\mathcal{F}_{\mu\nu} \mathcal{F}^{\mu\nu} = G_{\mu\nu} \cdot G^{\mu\nu} + W_{\mu\nu} \cdot W^{\mu\nu} + F_{\mu\nu}^{(B)} F^{(B)\mu\nu}, \quad (2.78)$$

$$\not{D} = \gamma^\mu D_\mu = \gamma^\mu \left[\partial_\mu - ig_I I \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - ig_Y \frac{Y}{2} B_\mu - i\alpha_s \frac{C}{2} \lambda \cdot \mathbf{G}_\mu \right], \quad (2.79)$$

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2. \quad (2.80)$$

Le modèle standard ainsi construit permet d'expliquer la plupart des phénomènes observés avec une grande précision. Cependant, il ne propose pas d'explications à certaines observations discutées dans la section suivante.

3.2 Limites

La plupart des phénomènes connus sont parfaitement décrits par le modèle standard et son formalisme, mais ils ne le sont pas tous. En effet, certaines observations présentées de manière non exhaustive ci-après laissent à penser que le modèle standard est une théorie effective à basse énergie et qu'il existe une théorie plus fondamentale au-delà à même de pouvoir les expliquer.

Nombre de générations Le modèle standard ne permet pas de prédire le nombre de générations, aujourd’hui égal à trois. Ainsi, il est tout à fait possible qu’il existe une quatrième génération de fermions (quarks t' et b' , leptons τ' et ν_τ'). Seule contrainte connue à ce jour, les mesures sur la largeur du Z impliquent que seulement trois générations peuvent présenter des neutrinos de masse inférieure à $\frac{1}{2}m_Z$ [35]. Il faudrait ainsi nécessairement $\nu_\tau' > \frac{1}{2}m_Z$. Mesurer avec précision les paramètres de la matrice CKM permet de tester la présence d’une génération supplémentaire de fermions, cette matrice devant être unitaire.

Masse des neutrinos Dans le lagrangien du modèle standard (2.77), les neutrinos ne possèdent pas de masse. Or, des oscillations entre saveurs de neutrinos ont été observées [36, 37]. Ces oscillations impliquent d’une part que les neutrinos possèdent une masse, et d’autre part que les états propres de l’interaction faible ne sont pas les états propres de masse des neutrinos.

Donner une masse aux neutrinos demande d’introduire des neutrinos de chiralité droite, non présents dans le modèle standard. Des telles particules, par construction, n’interagissent ni par interaction forte (pas de charge de couleur), ni par interaction électromagnétique (pas de charge électrique), ni par interaction faible (particules de chiralité droite). Plusieurs hypothèses, comme le mécanisme de Seesaw [38-42], sont avancées afin de décrire de tels neutrinos stériles. Il n’existe à ce jour aucun résultat expérimental permettant de conclure sur la validité de ces hypothèses.

Les états propres de l’interaction faible des neutrinos peuvent être reliés à leurs états propres de masse à l’aide de la matrice PMNS [43], pour Pontecorvo, Maki, Nakagawa et Sakata, analogue à la matrice CKM introduite dans la section 2.3.4. Dans ce cas,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{\mu 2} & U_{\tau 3} \\ U_{e1} & U_{\mu 2} & U_{\tau 3} \\ U_{e1} & U_{\mu 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad (2.81)$$

où ν_e , ν_μ et ν_τ sont les états propres de l’interaction faible et ν_1 , ν_2 et ν_3 ceux de masse.

Nombre de paramètres libres Le modèle standard tel que décrit dans la section 2 comporte 19 paramètres libres, listés dans le tableau 2.3. Une théorie comportant moins de paramètres libres propose plus de prédictions, sur la masse des particules par exemple, ce qui permet de réaliser plus de comparaisons aux données expérimentales. Parmi ces 19 paramètres libres, 15⁶ sont reliés au boson de Higgs. C’est pourquoi l’étude du boson de Higgs est un enjeu majeur en physique des particules.

L’introduction de neutrinos massifs, précédemment évoquée, apporte trois nouveaux paramètres libre, les masses des trois neutrinos. De plus, la matrice PMNS permettant de décrire leurs oscillation demande quatre paramètres libres, analogues aux quatre paramètres reliés à la matrice CKM dans le tableau 2.3. Il y a donc potentiellement 26 paramètres libres pour un modèle standard incluant les neutrinos massifs.

Ajustement fin Le calcul de la masse du boson de Higgs demande d’introduire des diagrammes de Feynman avec des boucles, comme ceux de la figure 2.13.

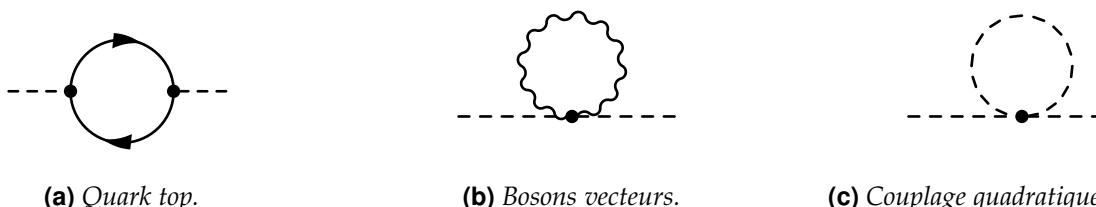


Figure 2.13 – Diagrammes de Feynman des contributions aux corrections radiatives à la masse du boson de Higgs.

6. Ces 15 paramètres sont les masses des 6 quarks et des 3 leptons chargés, la masse du Higgs, son condensat dans le vide et les quatre paramètres de la matrice CKM.

Grandeur	Symbol	Valeur	
Masse du quark up	m_u	$2,16^{+0,49}_{-0,26}$	MeV
Masse du quark down	m_d	$4,67^{+0,48}_{-0,17}$	MeV
Masse du quark strange	m_s	93^{+11}_{-5}	MeV
Masse du quark charm	m_c	$1,27^{+0,02}_{-0,035}$	GeV
Masse du quark bottom	m_b	$4,18^{+0,03}_{-0,02}$	GeV
Masse du quark top	m_t	$172,76 \pm 0,30$	GeV
Masse de l'électron	m_e	$0,510\,998\,946\,1 \pm 0,000\,000\,003\,1$	MeV
Masse du muon	m_μ	$105,658\,374\,5 \pm 0,000\,002\,4$	MeV
Masse du tau	m_τ	$1776,86 \pm 0,12$	MeV
Angle de mélange CKM I-II	θ_{12}	$13,091 \pm 0,028$	°
Angle de mélange CKM II-III	θ_{23}	$2,323^{+0,048}_{-0,035}$	°
Angle de mélange CKM I-III	θ_{13}	$0,2068^{+0,0063}_{-0,0052}$	°
Phase de violation CP CKM	δ_{CKM}	$68,53^{+2,58}_{-2,46}$	°
Phase de violation CP forte	θ_{QCD}	$< 10^{-10}$	
Constante de couplage $U(1)_Y$	g_Y	$0,349\,70 \pm 0,000\,19$	
Constante de couplage $SU(2)_L$	g_I	$0,652\,95 \pm 0,000\,12$	
Constante de couplage $SU(3)_C$	α_s	$0,1179 \pm 0,0010$	
Condensat du champ de Higgs	v	$246 \pm 6 \times 10^{-5}$	GeV
Masse du boson de Higgs	m_h	$125,10 \pm 0,14$	GeV

Tableau 2.3 – Valeurs expérimentales des 19 paramètres libres du modèle standard [9].

Dans ce cas, la masse effective du boson de Higgs m_h s'exprime à partir de la masse « nue » m_{h0} à laquelle sont apportées des corrections [44] :

$$\text{du top, figure 2.13a} \quad - \frac{3}{8\pi^2} y_t^2 \Lambda^2 \quad \sim -(2 \text{ TeV})^2 \quad (2.82)$$

$$\text{des bosons vecteurs, figure 2.13b} \quad + \frac{1}{16\pi^2} g^2 \Lambda^2 \quad \sim +(0,7 \text{ TeV})^2 \quad (2.83)$$

$$\text{du Higgs, figure 2.13c} \quad + \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 \quad \sim +(0,5 \text{ TeV})^2 \quad (2.84)$$

$$(2.85)$$

où y_t^2 est la constante de couplage de Yukawa du quark top défini équation (2.71), g la constante de couplage de l'interaction associée au boson vecteur considéré, λ le paramètre du terme quadratique du potentiel de Higgs (2.56) et Λ l'échelle d'énergie de la « nouvelle physique », c'est-à-dire l'échelle d'énergie où le modèle standard n'est plus valable.

La masse du boson de Higgs s'exprime alors

$$m_h^2 = m_{h0}^2 - \frac{3}{8\pi^2} y_t^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} g^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \dots \quad (2.86)$$

Le boson de Higgs a été observé avec une masse de $125,10 \pm 0,14$ GeV. Or, les corrections sont de l'ordre du TeV. Les paramètres dont elles dépendent devraient donc être ajustés jusqu'à la 32^e décimale, ce qui semble peu naturel.

Gravitation Le modèle standard ne propose aucune description de la gravitation. La relativité générale permet de décrire la gravitation à l'échelle macroscopique avec succès, mais cette théorie n'est pas quantifiée. En l'état actuel, l'ajout de la gravitation au modèle standard introduit des infinis qui le rendent non renormalisable. Le modèle standard est donc valide uniquement pour des échelles où la gravitation est négligeable face aux autres interactions (électromagnétique, faible et forte). C'est le cas dans les expériences de physique des particules ; aucune d'entre elles n'a observé d'effet gravitationnel dans ses résultats.

Matière noire et énergie noire La matière noire est, par hypothèse, de la matière interagissant gravitationnellement mais pas électromagnétiquement. Son existence est postulée suite à l'observation des galaxies, dont les courbes de vitesses de rotation ne peuvent être expliquées à ce jour avec la relativité générale et la matière ordinaire seulement. Des effets de lentille gravitationnelle vont également en ce sens [45]. Le modèle standard ne propose aucun candidat pour la matière noire. D'autres observations cosmologiques montrent que l'expansion de l'Univers s'accélère. Cette accélération implique l'existence d'une énergie, l'énergie noire, inexplicable par le modèle standard. Les mesures cosmologiques [46] indiquent que l'Univers est ainsi composé de 68 % d'énergie noire et 27 % de matière noire. Le modèle standard ne décrit donc que 5 % du contenu de l'Univers.

Asymétrie matière-antimatière Pour chaque particule de matière, il existe une antiparticule, dont les nombres quantiques sont opposés. Or, l'Univers est composé presque exclusivement de matière. La force électrofaible propose un mécanisme violant la symétrie CP pouvant mener à une asymétrie entre matière et antimatière, lié à la phase complexe de la matrice CKM, δ_{CKM} . Cependant, cet effet est trop faible pour expliquer à lui seul l'asymétrie effectivement observée.

4 Au-delà du modèle standard

Le modèle standard souffre ainsi de lacunes malgré ses prédictions précises. Des modèles sont développés afin de les combler, ils sont dits « au-delà » du modèle standard (BSM, *Beyond Standard Model*). Un des modèles BSM les plus prometteurs est la supersymétrie (SUSY), présentée dans la section 4.1. La SUSY nécessite d'introduire un second doublet de Higgs, elle est ainsi un cas particulier de modèle à deux doublets de Higgs (2HDM, *2 Higgs Doublets Model*). Les 2HDM sont abordés dans la section 4.2. Puis, le modèle le plus simple de SUSY, l'extension supersymétrique minimale du modèle standard (MSSM, *Minimal Supersymmetric extension of Standard Model*), est présenté section 4.3.

4.1 La supersymétrie

La supersymétrie (SUSY) [47] introduit une nouvelle symétrie entre fermions et bosons. Ces deux types de particules ne sont plus indépendants, ce sont des saveurs, ou manifestations, d'un champ quantique plus complexe. À chaque particule du modèle standard correspond alors une nouvelle particule du fait de cette symétrie, nommée « superpartenaire ». Les fermions du modèle standard ont des superpartenaires de spin entier, c'est-à-dire des bosons, les « sfermions ». Les bosons du modèle standard ont des superpartenaires de spin demi-entier, c'est-à-dire des fermions, les « bosinos ». Une particule et son superpartenaire ont les mêmes nombres quantiques à l'exception de leurs spins.

De nouvelles interactions sont potentiellement possibles, dans lesquelles les nombres baryonique B et leptonique L ne sont pas conservés et $B - L$ non plus. Or, ce type d'interactions rendent le proton instable, ce qui n'est pas observé expérimentalement. Une nouvelle symétrie est ainsi introduite afin de supprimer ces interactions violent la conservation de $B - L$, la parité R . L'opérateur de parité R est défini comme

$$P_R = (-1)^{3(B-L)-2s} \quad (2.87)$$

où s correspond au spin de la particule. Les particules du modèle standard possèdent une parité R égale à 1, leurs superpartenaires une parité R égale à -1. La conservation de cette nouvelle parité permet non seulement de garder le proton stable, mais rend également stable la particule supersymétrique de plus basse masse, notée LSP (*Lightest Supersymmetric Particle*).

La SUSY est un des modèles BSM les plus prometteurs. Ce type de modèle permet en effet de résoudre, s'il est confirmé expérimentalement, de nombreuses lacunes du modèle standard. Les trois forces fondamentales décrites par le modèle standard pourraient être unifiées grâce à ce modèle. Dans la section 2.3, l'unification des forces électromagnétique et faible est déjà réalisée. Toutefois, la force électrofaible et la force forte ne semblent pas s'unifier à haute énergie. Or, les interactions avec les superpartenaires introduits par la SUSY modifient le comportement des constantes de couplage des trois forces fondamentales de manière à les unifier à haute énergie. La SUSY propose également un candidat pour la matière noire dans le cas où la LSP est de charge électrique nulle, potentiellement

un neutralino ou un sneutrino. De plus, la SUSY permet de résoudre le problème de l'ajustement fin. La divergence quadratique de la masse du Higgs est naturellement supprimée par les diagrammes à boucles des superpartenaires dont les contributions ont des signes opposés à celles des particules, les fermions ayant des contributions positives et les bosons des contributions négatives [48].

Toutefois, il est impossible de mettre en place la SUSY sans un second doublet de Higgs. Dans le modèle standard, la masse des quarks d'isospin faible haut est obtenue dans la section 2.4.3 à l'aide du conjugué de charge du doublet de Higgs. Cependant, le potentiel supersymétrique contenant les termes de Yukawa, nécessaires à l'obtention des masses des fermions, n'autorise pas l'utilisation du conjugué de charge du doublet de Higgs afin de donner une masse aux quarks d'isospin faible haut [44]. Un second doublet de Higgs, couplé aux fermions d'isospin faible haut, doit nécessairement être introduit [44, 48]. La SUSY est donc un cas particulier de modèle à deux doublets de Higgs.

4.2 Modèles à deux doublets de Higgs

Les modèles à deux doublets de Higgs (2HDM, 2 *Higgs Doublets Model*) introduisent un second doublet de Higgs. Ainsi, au lieu d'avoir uniquement le doublet ϕ défini par (2.52), il en existe deux, ϕ_1 et ϕ_2 . Le potentiel de Higgs (2.56) du modèle standard est remplacé par le potentiel scalaire le plus général possible⁷ brisant spontanément $SU(2)_L \times U(1)_Y$ en $U(1)_{em}$ [48, 49],

$$\begin{aligned} V(\phi_1, \phi_2) = & \lambda_1 \left(\phi_1^\dagger \phi_1 - \frac{1}{2} v_1^2 \right)^2 + \lambda_2 \left(\phi_2^\dagger \phi_2 - \frac{1}{2} v_2^2 \right)^2 \\ & + \lambda_3 \left[\left(\phi_1^\dagger \phi_1 - \frac{1}{2} v_1^2 \right) + \left(\phi_2^\dagger \phi_2 - \frac{1}{2} v_2^2 \right) \right]^2 + \lambda_4 \left[(\phi_1^\dagger \phi_1)(\phi_2^\dagger \phi_2) - (\phi_1^\dagger \phi_2)(\phi_2^\dagger \phi_1) \right] \\ & + \lambda_5 \left[\Re(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \cos \xi \right]^2 + \lambda_6 \left[\Im(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \sin \xi \right]^2 \\ & + \lambda_7 \left[\Re(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \cos \xi \right] \left[\Im(\phi_1^\dagger \phi_2) - \frac{1}{2} v_1 v_2 \sin \xi \right]. \end{aligned} \quad (2.88)$$

Le dernier terme de (2.88) peut être éliminé en redéfinissant les phases des champs scalaires. Les paramètres λ_i sont réels et dans le cas de la SUSY, $\lambda_5 = \lambda_6$. Dans le cas $\sin \xi \neq 0$, le secteur de Higgs du modèle viole la symétrie CP . Le minimum du potentiel ainsi construit est tel que

$$\langle \phi_1 \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \end{pmatrix}, \quad \langle \phi_2 \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 e^{i\xi} \end{pmatrix}. \quad (2.89)$$

Il est possible de définir, à ce stade, une variable importante dans la suite, le rapport des condensats des doublets de Higgs dans le vide,

$$\tan \beta = \frac{\langle \phi_2 \rangle_0}{\langle \phi_1 \rangle_0} = \frac{v_2}{v_1} \quad (2.90)$$

avec $0 \leq \beta \leq \pi/2$. Il est aussi possible de définir

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2. \quad (2.91)$$

De ce formalisme découle l'existence de cinq bosons de Higgs massifs,

$$\text{deux Higgs chargés : } H^\pm = -\phi_1^\pm \sin \beta + \phi_2^\pm \cos \beta, \quad m_{H^\pm}^2 = \frac{1}{2} \lambda_4 v^2, \quad (2.92)$$

$$\text{un Higgs pseudo-scalaire : } A = \sqrt{2} (-\Im(\phi_1^0) \sin \beta + \Im(\phi_2^0) \cos \beta), \quad m_A^2 = \frac{1}{2} \lambda_6 v^2, \quad (2.93)$$

ainsi que deux bosons de Higgs scalaires neutres dont les champs quantiques sont mélangés par la matrice

$$\mathcal{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 4v_1^2(\lambda_1 + \lambda_3) + v_2^2 \lambda_5 & (4\lambda_3 + \lambda_5)v_1 v_2 \\ (4\lambda_3 + \lambda_5)v_1 v_2 & 4v_2^2(\lambda_2 + \lambda_3) + v_1^2 \lambda_5 \end{pmatrix}. \quad (2.94)$$

7. Des facteurs $\frac{1}{2}$ ont été introduits par rapport à [48, 49] afin de conserver une cohérence sur les définitions de v_1 et v_2 vis-à-vis de la section 2.4 tout en conservant la physique inchangée.

Ces deux bosons de Higgs sont

$$h = \sqrt{2} \left(-\Re(\phi_1^0 - v_1/\sqrt{2}) \sin \alpha + \Re(\phi_2^0 - v_2/\sqrt{2}) \cos \alpha \right), \quad (2.95)$$

$$H = \sqrt{2} \left(\Re(\phi_1^0 - v_1/\sqrt{2}) \cos \alpha + \Re(\phi_2^0 - v_2/\sqrt{2}) \sin \alpha \right), \quad (2.96)$$

où l'angle de mélange α s'obtient par

$$\sin 2\alpha = \frac{2\mathcal{M}_{12}}{\sqrt{(\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22})^2 + 4\mathcal{M}_{12}^2}}, \quad \cos 2\alpha = \frac{\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22}}{\sqrt{(\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22})^2 + 4\mathcal{M}_{12}^2}} \quad (2.97)$$

avec $-\pi/2 \leq \alpha \leq 0$ et dont les masses à l'ordre le plus bas s'expriment, avec $m_h \leq m_H$,

$$m_{h,H}^2 = \frac{1}{2} \left(\mathcal{M}_{11} + \mathcal{M}_{22} \mp \sqrt{(\mathcal{M}_{11} - \mathcal{M}_{22})^2 + 4\mathcal{M}_{12}^2} \right). \quad (2.98)$$

Enfin, v est fixée par la masse du W ,

$$m_W = \frac{1}{2} v g_I. \quad (2.99)$$

Le 2HDM ainsi construit possède 6 paramètres libres :

- m_h, m_H, m_A, m_{H^\pm} les masses des bosons de Higgs;
- $\tan \beta$ le rapport des condensats des doublets de Higgs dans le vide;
- α l'angle de mélange des Higgs.

Ce modèle peut être affiné par les observations expérimentales. Par exemple, le changement de saveur par courant neutre (FCNC, *Flavor-Changing Neutral Currents*), n'est pas observé expérimentalement Afin d'être compatible avec ce fait expérimental [48],

- soit les masses des bosons de Higgs sont élevées, de l'ordre du TeV, supprimant ainsi suffisamment le FCNC pour rester dans les limites observées;
- soit tous les fermions portant une même charge électrique ne sont couplés qu'à un seul doublet de Higgs au plus.

La masse du Higgs du modèle standard n'étant pas de l'ordre du TeV, la seconde option est choisie.

Dans le cas des modèles de type II⁸, les fermions d'isospin faible bas sont ainsi couplés à ϕ_1 et ceux d'isospin faible haut à ϕ_2 . Les intensités des couplages des fermions et des bosons avec h, H et A ainsi obtenues, par rapport à celles avec le boson de Higgs du modèle standard, sont présentées dans le tableau 2.4.

Couplage avec	h	H	A
Bosons vecteurs	$\sin(\beta - \alpha)$	$\cos(\beta - \alpha)$	0
Fermions hauts	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\cot \beta$
Fermions bas	$\frac{-\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$	$\tan \beta$

Tableau 2.4 – Couplages des bosons de Higgs neutres des modèles de type II par rapport aux couplages du boson de Higgs du modèle standard [48].

Les modèles à deux doublets de Higgs sont donc une extension du modèle standard ajoutant une nouvelle physique, par exemple l'existence de nouveaux bosons de Higgs. Ces modèles, par rapport à d'autres possibilités explorées, apportent le moins de nouveaux paramètres arbitraires possibles, ce qui est un critère important dans l'élaboration d'une nouvelle théorie. Enfin, ils doivent être introduits dans les modèles supersymétriques pour que ceux-ci respectent les observations expérimentales.

8. Dans les modèles de type I, les fermions ne sont pas couplés à ϕ_1 , mais le sont à ϕ_2 .

4.3 L'extension supersymétrique minimale du modèle standard

L'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM est un modèle supersymétrique et donc, à ce titre, un cas particulier de modèle à deux doublets de Higgs. Il s'agit du modèle le plus simple permettant d'introduire la supersymétrie tout en étant compatible avec les observations expérimentales à ce jour. Dans le MSSM, les deux doublets de Higgs s'expriment en fonction de ϕ_1 et ϕ_2 introduits dans la section traitant de la supersymétrie comme [48]

$$H_d = \begin{pmatrix} \phi_1^{0*} \\ -\phi_1^- \end{pmatrix}, \quad H_u = \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ \phi_2^0 \end{pmatrix}. \quad (2.100)$$

L'expression du potentiel de Higgs général des 2HDM (2.88) devient

$$\begin{aligned} V(H_d, H_u) = & \mu_d^2 H_d^\dagger H_d + \mu_u^2 H_u^\dagger H_u - \mu^2 (H_d \wedge H_u + \text{h.c.}) \\ & + \frac{g_I^2 + g_Y^2}{8} (H_d^\dagger H_d - H_u^\dagger H_u)^2 + \frac{g_I^2}{2} (H_d^\dagger H_u)^2 \end{aligned} \quad (2.101)$$

en posant [44, 48, 49]

$$\lambda_2 = \lambda_1, \quad (2.102a)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{8}(g_I^2 + g_Y^2) - \lambda_1, \quad (2.102b)$$

$$\lambda_4 = 2\lambda_1 - \frac{1}{2}g_Y^2, \quad (2.102c)$$

$$\lambda_5 = \lambda_6 = 2\lambda_1 - \frac{1}{2}(g_I^2 + g_Y^2), \quad (2.102d)$$

$$\mu_d^2 = \mu^2 \tan \beta - \frac{1}{2}m_Z^2 \cos(2\beta), \quad (2.102e)$$

$$\mu_u^2 = \mu^2 \cot \beta + \frac{1}{2}m_Z^2 \cos(2\beta), \quad (2.102f)$$

$$\mu^2 = -\frac{1}{2}v_1 v_2 (g_I^2 + g_Y^2 - 4\lambda_1). \quad (2.102g)$$

Afin d'assurer la stabilité du vide, le potentiel ne doit pas pouvoir être infiniment bas, ce qui implique $\mu_u^2 + \mu_d^2 > 2\mu^2$ si $|\phi_1^0| = |\phi_2^0|$. La brisure spontanée de symétrie donnant leurs masses aux bosons de l'interaction faible est présente si $\mu^4 > \mu_u^2 \mu_d^2$. Alors, les condensats dans le vide des deux doublets de Higgs sont

$$\langle H_d \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \langle H_u \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix}. \quad (2.103)$$

Les masses des bosons de Higgs s'expriment alors à l'ordre le plus bas

$$m_A^2 = \mu^2 (\tan \beta + \cot \beta) = \frac{2\mu^2}{\sin 2\beta}, \quad (2.104)$$

$$m_{H^\pm}^2 = m_A^2 + m_W^2, \quad (2.105)$$

$$m_{h,H}^2 = \frac{1}{2} \left(m_A^2 + m_Z^2 \mp \sqrt{(m_A^2 + m_Z^2)^2 - 4m_A^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta} \right), \quad (2.106)$$

et l'angle de mélange des Higgs scalaires neutres vérifie

$$\cos 2\alpha = -\frac{m_A^2 - m_Z^2}{m_H^2 - m_h^2} \cos 2\beta, \quad \sin 2\alpha = -\frac{m_A^2 + m_Z^2}{m_H^2 - m_h^2} \sin 2\beta. \quad (2.107)$$

Enfin, la masse du W vérifie toujours (2.99) et celle du Z peut être exprimée en fonction des paramètres du MSSM. Ainsi,

$$m_W = \frac{1}{2}v g_I \Leftrightarrow m_W^2 = \frac{1}{4}v^2 g_I^2, \quad m_Z^2 = \frac{\mu_d^2 - \mu_u^2 \tan^2 \beta}{\tan^2 \beta - 1}. \quad (2.108)$$

À l'ordre le plus bas, les masses des bosons de Higgs dépendent donc seulement de deux paramètres libres, m_A et $\tan \beta$ défini par (2.90). Il est à noter que l'équation (2.106) implique l'existence d'un boson de Higgs neutre de masse inférieure à $m_Z = 91,19 \text{ GeV}$. Toutefois, ceci n'est vrai qu'à l'ordre le plus bas. La prise en compte des corrections radiatives change les expressions de ces masses, en particulier les corrections dues au quark top et à son superpartenaire le stop. La correction à la masse du boson de Higgs léger est ainsi donnée par [44]

$$m_h^2 \rightarrow m_h^2 + \delta m_h^2 \simeq m_Z^2 + \frac{3m_t^4}{2\pi^2 v^2} \left[\ln \frac{m_S^2}{m_t^2} + \frac{X_t^2}{m_S^2} \left(1 - \frac{X_t^2}{12m_S^2} \right) \right] \quad (2.109)$$

où

$$X_t = A_t - \mu \cot \beta \quad (2.110)$$

est le paramètre de mélange du stop avec A_t la constante de couplage entre les Higgs et le stop et

$$m_S = \sqrt{m_{\tilde{t}_1} m_{\tilde{t}_2}}. \quad (2.111)$$

est l'échelle d'énergie de la SUSY, définie comme la moyenne géométrique des masses des stops. Il existe en effet deux états propres de masse du stop, \tilde{t}_1 et \tilde{t}_2 , mélanges des stops de chiralité droite et gauche. La présence de nombreux paramètres libres du MSSM mène à proposer des « scénario » dans lesquels les paramètres intervenant dans les corrections d'ordres supérieurs sont fixés [50, 51]. Il ne reste alors que deux paramètres libres, m_A et $\tan \beta$. Les valeurs des masses corrigées de h , H et H^\pm sont tracées sur la figure 2.14 en fonction de m_A pour $\tan \beta = 3$ et 30 dans le cas de mélange maximal du stop avec $m_{\tilde{t}} = 2$ TeV et les autres paramètres de la SUSY fixés à 1 TeV [44]. Ainsi, pour $m_A \lesssim 125$ GeV, H joue le rôle du modèle standard et il existe un Higgs léger. Pour $m_A \gtrsim 125$ GeV, h joue le rôle du modèle standard et les bosons de Higgs supplémentaires sont de masses plus élevées.

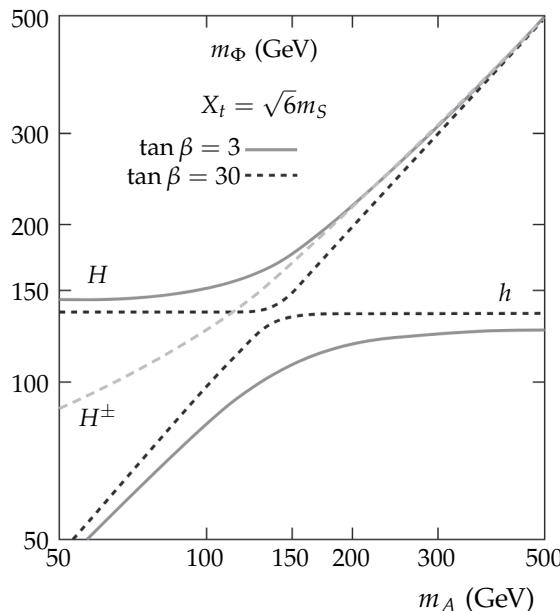


Figure 2.14 – Masses des bosons de Higgs du MSSM en fonction de m_A pour $\tan \beta = 3$ et 30 dans le cas de mélange maximal du stop avec $m_{\tilde{t}} = 2$ TeV et les autres paramètres de la SUSY fixés à 1 TeV [44].

Les particules du MSSM et leurs superpartenaires sont résumés dans le tableau 2.5. Un test expérimental est possible par la recherche d'un signal correspondant aux bosons de Higgs supplémentaires, ce qui est un des sujets de cette thèse. L'étude de la phénoménologie de ces bosons de Higgs, présentée ci-après, permet de déterminer les conditions favorables à la recherche d'un tel signal.

5 Phénoménologie des bosons de Higgs du MSSM

Pour concevoir une analyse de physique des particules à même de tester le MSSM, il faut dans un premier temps déterminer la manifestation du MSSM à observer. Comme cela a été développé dans la section précédente, le MSSM implique l'existence de quatre bosons de Higgs supplémentaires, en particulier deux nouveaux bosons de Higgs neutres, H et A . Si de tels bosons existent, un signal leur correspondant doit pouvoir être observé.

Au premier ordre, les masses des bosons de Higgs s'expriment en fonction de deux paramètres uniquement, m_A et $\tan \beta$. Les couplages des trois bosons de Higgs neutres du MSSM aux autres particules, par rapport aux couplages du boson de Higgs du modèle standard, sont présentés dans

Particules				Superpartenaires			
Type	Spin	Particules	Symboles	Type	Spin	Particules	Symboles
Fermions	$\frac{1}{2}$	quarks leptons	q ℓ	Sfermions	0	squarks sleptons	\tilde{q} $\tilde{\ell}$
Bosons	1	gluon bosons W^\pm photon boson Z	g W^+, W^- γ Z		Bosinos	gluino winos photino zino	\tilde{g} \tilde{W}^+, \tilde{W}^- $\tilde{\gamma}$ \tilde{Z}
	0	Higgs	h, H, A, H^\pm			Higgsinos	$\tilde{h}, \tilde{H}, \tilde{A}, \tilde{H}^\pm$

Tableau 2.5 – Particules et leurs superpartenaires. La présence de plusieurs bosons de Higgs est justifiée par la nécessité d'un second doublet de Higgs. Ce formalisme est décrit dans la section 4.2.

le tableau 2.4 en fonction de α et β . Or, α et β sont reliés par les équations (2.107), donnant

$$\tan 2\alpha = \frac{m_A^2 + m_Z^2}{m_A^2 - m_Z^2} \tan 2\beta. \quad (2.112)$$

Les observations expérimentales semblent favoriser $m_A \gg m_Z$ [23, 24, 52, 53]. Dans ce cas, H et A sont de masses similaires et h doit jouer le rôle du boson de Higgs du modèle standard observé expérimentalement en 2012 [20-22]. Cette situation correspond à la limite découplée, dans laquelle

$$\lim_{m_A \gg m_Z} \tan 2\alpha = \tan 2\beta \quad (2.113)$$

d'après (2.112). Alors, dans la limite découplée, $\alpha \sim \beta$ ou $\alpha \sim \beta \pm \frac{\pi}{2}$. Or, $\beta \geq 0$ et $\alpha \leq 0$ et $\tan \beta$ est contraint par [54]

$$1 < \tan \beta \lesssim \frac{m_t}{m_b} \simeq 42. \quad (2.114)$$

Il ne reste donc plus que la possibilité $\alpha \sim \beta - \frac{\pi}{2}$. Dans la limite découplée, les couplages du tableau 2.4 deviennent alors ceux du tableau 2.6.

Couplage avec	h	H	A
Bosons vecteurs	~ 1	~ 0	0
Fermions hauts	~ 1	$\sim -\cot \beta$	$\cot \beta$
Fermions bas	~ 1	$\sim \tan \beta$	$\tan \beta$

Tableau 2.6 – Couplages des bosons de Higgs neutres dans la limite découplée du MSSM par rapport aux couplages du boson de Higgs du modèle standard.

Les couplages ainsi obtenus dans le tableau 2.6 présentent trois caractéristiques d'intérêt :

- le boson de Higgs le plus léger, h , se comporte comme le boson de Higgs du modèle standard, ce qui le rend tout à fait cohérent avec les observations actuelles ;
- les bosons de Higgs neutres massifs H et A présentent peu voire aucun couplage aux bosons vecteurs, par exemple la désintégration $A \rightarrow ZZ$ est impossible mais $A \rightarrow Zh$ est possible ;
- les bosons de Higgs neutres massifs H et A sont couplés de manières similaires aux fermions.

Lorsque $\tan \beta$ augmente, les couplages de H et A aux fermions d'isospin faible bas sont augmentés et ceux aux fermions d'isospin faible haut supprimés. La production des bosons de Higgs neutres supplémentaires, tout comme leurs désintégrations, s'en trouvent donc intrinsèquement liées à la présence de fermions d'isospin faible bas.

5.1 Production de bosons de Higgs

La production de bosons de Higgs au LHC peut être réalisée selon plusieurs modes dont une mesure précise des sections efficaces a pu être réalisée dans le cadre du modèle standard [55-58]. Ces

sections efficaces sont représentées en fonction de l'énergie de collision dans le centre de masse sur la figure 2.15. Les processus correspondants à ces différents modes sont présentés dans la section 5.1.1 ci-après. Puis, la production des bosons de Higgs du MSSM est discutée dans la section 5.1.2.

5.1.1 Dans le cadre du modèle standard

Le mode de production principal du boson de Higgs du modèle standard h au LHC est la fusion de gluon, avec près de 85 % des bosons de Higgs produits ainsi. Ce mode est noté ggh et est représenté figure 2.16a. L'interaction entre gluons et Higgs est réalisée par une boucle de quarks. Or, comme cela est vu dans la section 2.4.3, page 16, le couplage du Higgs aux fermions est proportionnel à la masse du fermion. Le quark top est donc dominant dans cette boucle.

Le second mode de production de Higgs le plus important au LHC est la fusion de boson vecteur, noté VBF (*Vector Boson Fusion*) et représenté sur les figures 2.16b et 2.16c. Deux quarks produisent chacun un boson vecteur (W^+ et W^- ou deux Z). Ces deux bosons fusionnent en un boson de Higgs. Bien que la section efficace du VBF soit dix fois moindre que celle du ggh , les deux quarks de l'état final donnent deux jets très caractéristiques, dont le processus de formation à partir des quarks est abordé dans le chapitre 4. Le calcul de la section efficace de ce processus inclu les corrections QCD (chromodynamique quantique, *Quantum ChromoDynamic*), abordée dans la section 2.5, au NNLO⁹ et les corrections électrofaibles au NLO [58, 59].

La production d'un boson de Higgs peut également se faire en association avec un boson vecteur, c'est le mode VH. Une paire quark-antiquark produit un boson vecteur de haute énergie (W sur la figure 2.17a ou Z sur la figure 2.17b). Ce boson émet alors un Higgs, d'où la dénomination « Higgs-strahlung » parfois utilisée pour le mode VH. Les sections efficaces de ces processus sont calculées en prenant en compte les corrections QCD NNLO et les corrections électrofaibles au NLO [58]. Une fusion de gluons peut également amener à une production d'un Higgs en association avec un Z , c'est le cas du processus de la figure 2.17c.

Enfin, il est possible de produire un Higgs en association avec des fermions lourds, en particulier des quarks top ($t\bar{t}h$) ou bottom ($b\bar{b}h$) avec lesquels la production de Higgs est accompagnée de jets. Le mode $t\bar{t}h$ est illustré sur la figure 2.18. Ces processus contribuent peu à la production de boson de Higgs au LHC dans le cadre du modèle standard. Cependant, la phénoménologie du MSSM peut rendre les modes de production en association avec des quarks b significatifs voire dominants.

5.1.2 Dans le cadre du MSSM

Dans la limite découpée du MSSM, compte-tenu des couplages des bosons de Higgs h , H et A du tableau 2.6, les processus présentés dans la section précédente sont modifiés. Ainsi, la fusion de gluons de la figure 2.16a permet, dans le MSSM, de produire h , H et A . Il s'agit toujours du mode dominant tant que $\tan \beta$ ne prend pas de valeur élevée. Dans le cas de la production de h et H , la boucle peut également contenir des contributions des squarks stop et sbottom s'ils ont des masses suffisamment basses [60]. Le mode VBF, dont les processus sont présentés sur les figures 2.16b et 2.16c, permet de produire h et H , mais pas A . Les corrections aux ordres supérieurs de ces diagrammes dues à la QCD supersymétrique sont faibles et celles dues à la force électrofaible supersymétrique de l'ordre du pourcent [55]. Ces nouveaux processus sont représentés sur la figure 2.19.

Dans le mode VH, le Higgs émis peut également être un H . Les processus de la figure 2.17 sont ainsi modifiés en ceux de la figure 2.20. Les corrections aux ordres supérieurs de ces diagrammes dues à la QCD supersymétrique sont faibles et celles dues à la force électrofaible supersymétrique ne sont pas connues [55].

Pour de grandes valeurs de $\tan \beta$, la production de Higgs lourds en association avec des quarks b est un mode dominant. Plusieurs processus participent à ce mode. Sur les figures 2.21a et 2.21b se trouvent les processus analogues à ceux du mode $t\bar{t}h$ du modèle standard présentés figures 2.18a et 2.18b. Des processus comme ceux des figures 2.21c et 2.21d sont également envisageables si le quark b est considéré comme présent au sein du proton, c'est le « schéma à cinq saveurs » ou 5fs

9. Les notations NLO, NNLO, N^3LO , etc. signifient *next-to-leading order*, c'est-à-dire jusqu'à l'ordre suivant le premier degré non nul; *next-to-next-to-leading order*, un ordre de plus que NLO; etc.

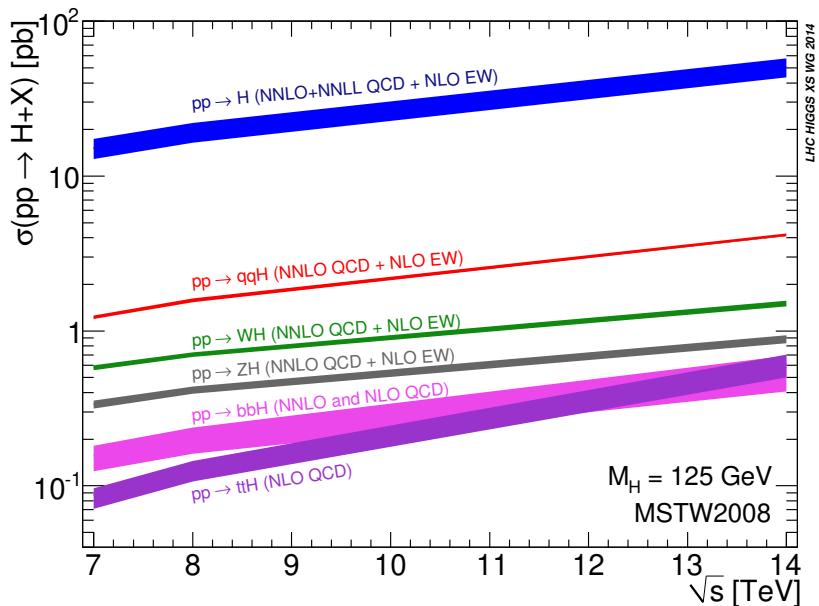


Figure 2.15 – Sections efficaces des modes de production du boson de Higgs du modèle standard [55-58].

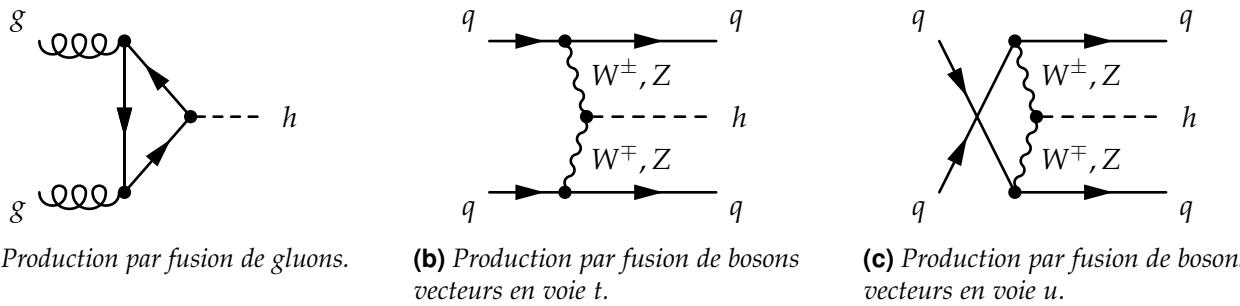


Figure 2.16 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard par fusion de gluons (ggh) et fusion de bosons vecteurs (VBF).

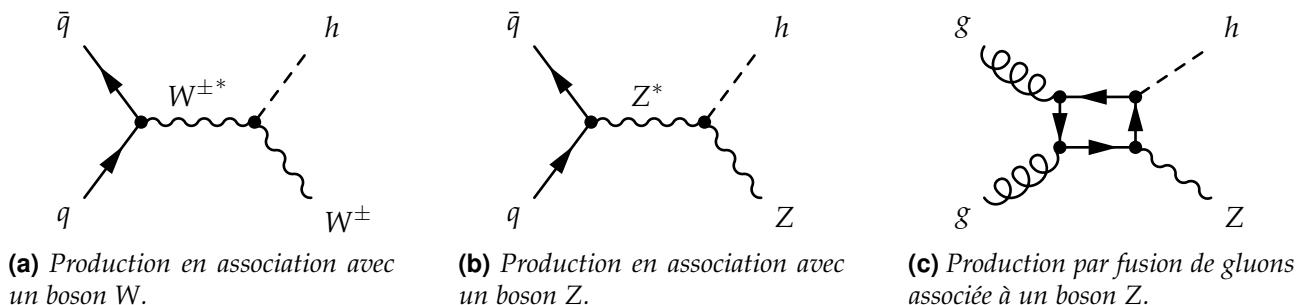


Figure 2.17 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un boson.



Figure 2.18 – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du modèle standard en association avec un quark top.

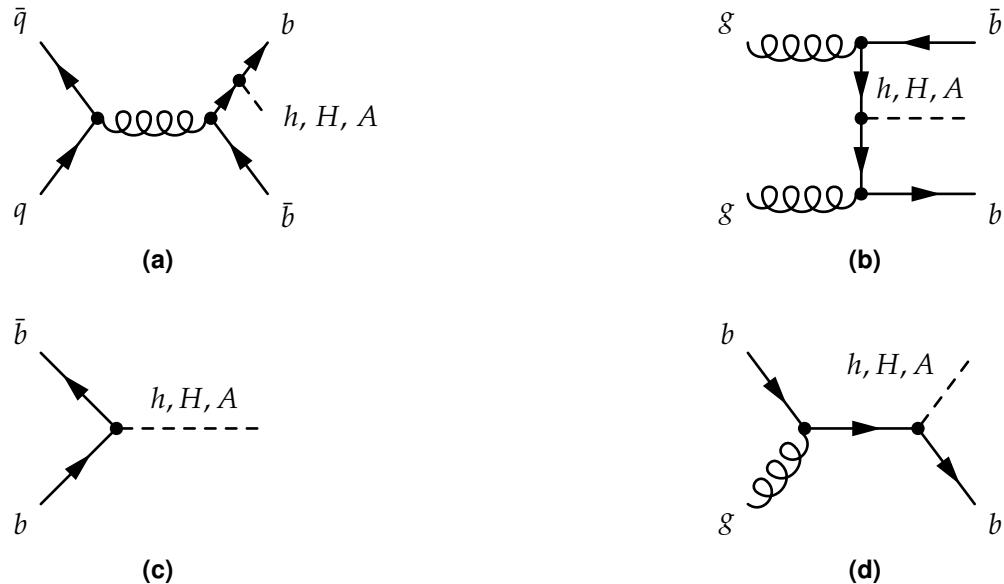


(a) Production par fusion de gluons.

(b) Production par fusion de bosons vecteurs en voie t .**Figure 2.19** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du MSSM par fusion de gluons (ggH) et fusion de bosons vecteurs (VBF).(a) Production en association avec un boson W .(b) Production en association avec un boson Z .**Figure 2.20** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du MSSM en association avec un boson.

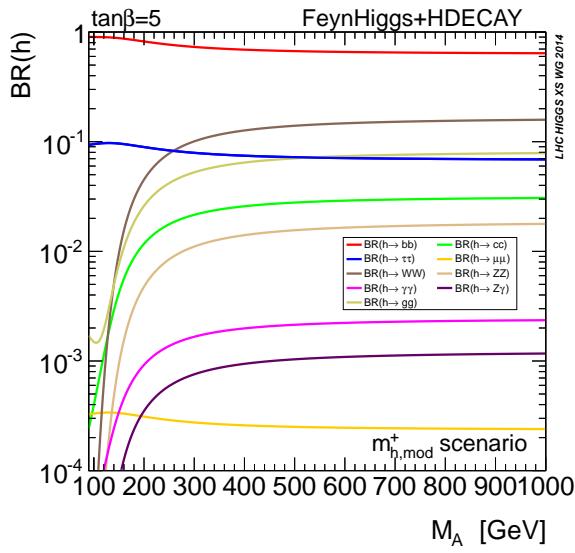
(5-flavor scheme). Les sections efficaces des processus du mode $b\bar{b}h$ sont calculées au NLO dans le 4fs et au NNLO pour le 5fs.

Les processus des figures 2.21a et 2.21b présentent deux jets de quarks b associés à la production d'un boson de Higgs, celui de la figure 2.21d un jet de quark b . L'identification de ces jets est donc un enjeu dans les analyses testant les cas de hautes valeurs de $\tan\beta$.

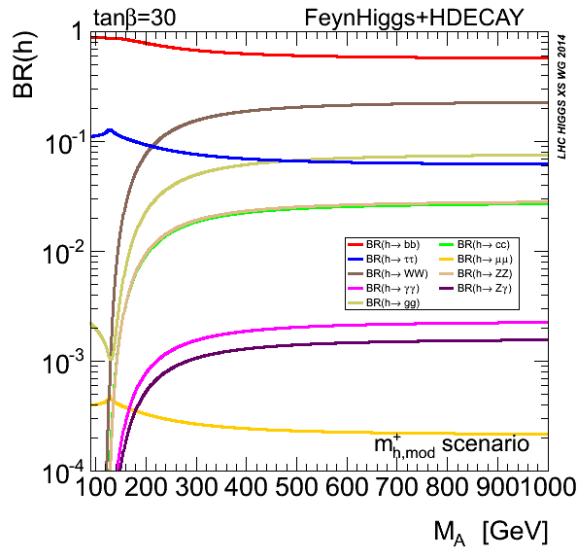
**Figure 2.21** – Diagrammes de Feynman de production de boson de Higgs dans le cadre du MSSM en association avec un quark b .

5.2 Désintégration de bosons de Higgs

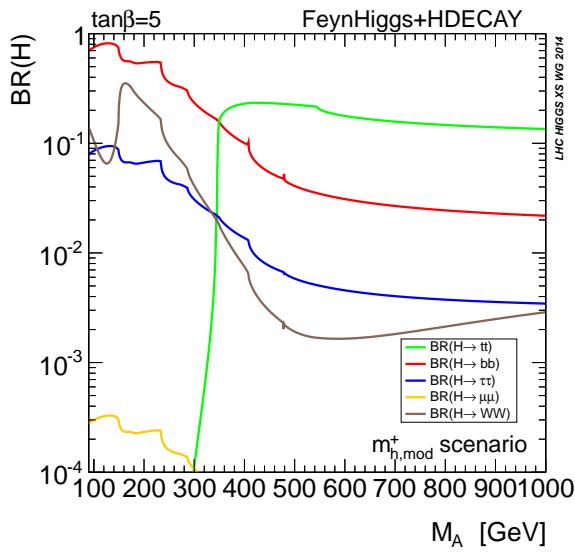
Les bosons de Higgs ont une durée de vie très courte, de l'ordre de 10^{-22} s pour le boson de Higgs du modèle standard par exemple [9]. Leur propagation se fait ainsi sur des distances ne pouvant excéder quelques dizaines de femtomètres, c'est-à-dire 10^{-14} m, soit moins que le diamètre du noyau d'un



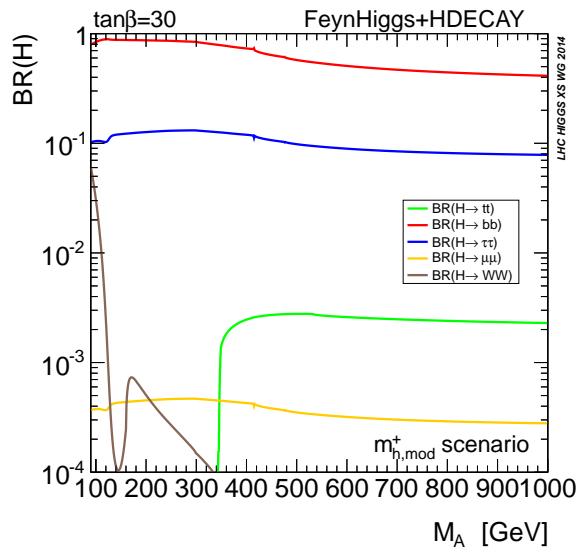
(a) Rapports de branchements à $\tan \beta = 5$ pour h .



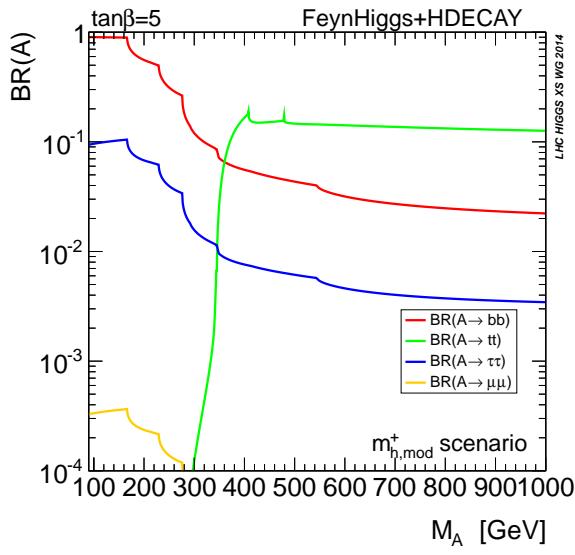
(b) Rapports de branchements à $\tan \beta = 30$ pour h .



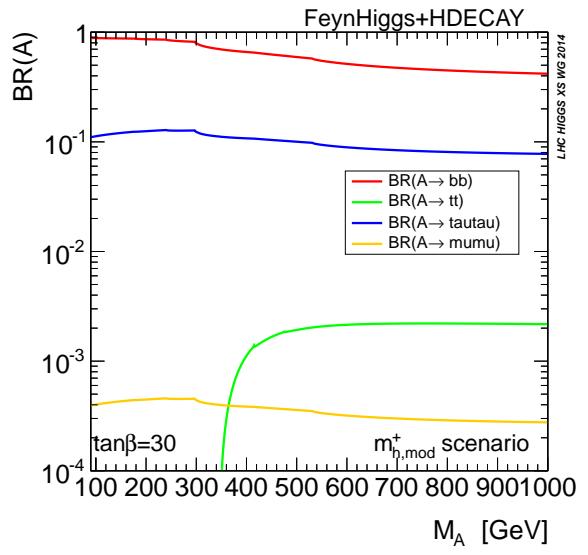
(c) Rapports de branchements à $\tan \beta = 5$ pour H .



(d) Rapports de branchements à $\tan \beta = 30$ pour H .



(e) Rapports de branchements à $\tan \beta = 5$ pour A .



(f) Rapports de branchements à $\tan \beta = 30$ pour A .

Figure 2.22 – Rapports de branchements des bosons de Higgs du MSSM en fonction de m_A pour $\tan \beta = 5$ et 30 [56, 57]. L'effet de $\tan \beta$ sur les couplages de H et A aux fermions est bien visible avec l'augmentation des rapports de branchements au bottom (en rouge) et au tau (en bleu) et la diminution du rapport de branchements au top (en vert).

atome d'or. Il est donc impossible d'observer directement la présence d'un boson de Higgs, comme cela peut se faire avec d'autres particules plus stables comme les kaons, les muons, les électrons ou les protons pour ne citer qu'eux. Pour détecter ces bosons, il faut donc détecter leurs produits de désintégration.

La désintégration des bosons de Higgs peut se faire sous différentes formes ayant différents rapports de branchement ou \mathcal{BR} (*Branching Ratio*), c'est-à-dire différentes probabilités de survenir vis-à-vis des autres formes. La topologie des événements correspondants est également fortement affectée par les produits de désintégration des bosons de Higgs.

Les bosons de Higgs supplémentaires H et A voient leurs couplages aux bosons vecteurs supprimés dans la limite découpée du MSSM. Leurs couplages sont proportionnels à $\tan \beta$ avec les fermions d'isospin faible bas et inversement proportionnels à $\tan \beta$ avec les fermions d'isospin faible haut par rapport au couplage de h avec ces mêmes fermions. Les couplages des bosons de Higgs aux fermions sont de plus proportionnels aux masses de ces fermions. Ces rapports de branchement sont représentés sur la figure 2.22, page 32, pour les trois bosons de Higgs neutres du MSSM et pour $\tan \beta = 5$ et 30 . Pour des masses de H et A suffisamment grandes pour leur permettre de se désintégrer en paire de quarks top, malgré la masse élevée de ce dernier, la suppression des couplages aux fermions d'isospin faible haut par $\tan \beta$ laisse le quark b et le lepton τ avec les rapports de branchement les plus élevés à haut $\tan \beta$. Les rapports de branchement du boson de Higgs h correspondant au boson de Higgs du modèle standard sont peu affectés par $\tan \beta$.

La valeur de $\tan \beta$ est un paramètre libre du MSSM pouvant être grand. À haut $\tan \beta$ le quark b et le lepton τ proposent les rapports de branchement les plus grands à H et A . Pour des valeurs modérées voire basses de $\tan \beta$, le quark top peut éventuellement proposer un rapport de branchement plus grand, mais seulement pour $m_A \gtrsim 350$ GeV. Les désintégrations en $b\bar{b}$ et en $\tau^+\tau^-$ sont donc les plus prometteuses pour la recherche de bosons de Higgs supplémentaires de haute masse.

Bien que le canal de désintégration $h, H, A \rightarrow b\bar{b}$ possède un rapport de branchement 5 à 10 fois supérieur à celui du canal $h, H, A \rightarrow \tau^+\tau^-$, il est sujet à de nombreuses sources de bruit de fond au LHC où les collisions ont lieu entre protons. C'est pourquoi le sujet de cette thèse est la recherche d'un boson de Higgs de haute masse se désintégrant en paire de taus, dont l'accessibilité expérimentale est meilleure. La présence de deux leptons tau de haute énergie dans l'état final est en effet une signature bien plus claire que la présence de quarks b . Le diagramme de Feynman correspondant à cette désintégration est présenté sur la figure 2.23. Toutefois, les taus ne sont pas des particules stables et ils se désintègrent avant d'entrer dans les parties sensibles du détecteur. Seuls leurs produits de désintégration sont observés.

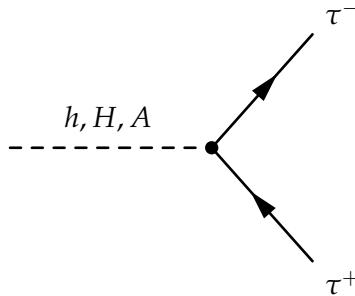


Figure 2.23 – Diagramme de Feynman d'une désintégration $h, H, A \rightarrow \tau^+\tau^-$.

5.3 Désintégration des leptons tau

La durée de vie du lepton τ est de 290 fs. Ils se propage ainsi sur des distances inférieures à 87 μm. Le τ n'est donc pas directement observé dans le détecteur, ses produits de désintégration le sont.

Les leptons τ se désintègrent par interaction faible selon $\tau^- \rightarrow W^-\nu_\tau$. Le boson W , virtuel, se désintègre ensuite :

- leptoniquement selon $W^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e$ dans 17,82 % des cas;
- leptoniquement selon $W^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu$ dans 17,39 % des cas;
- hadroniquement selon $W^- \rightarrow q\bar{q}'$ dans 64,79 % des cas.

Dans le cas de la désintégration hadronique, l'hadronisation présentée dans la section 2.2 du chapitre 4 a lieu et les deux quarks donnent un ensemble constitué de quelques hadrons, en général trois ou moins, et éventuellement des particules neutres comme des π^0 , ces derniers se désintégrant majoritairement en deux photons. L'ensemble des particules issues de la désintégration du W forme ainsi un petit jet. Il s'agit d'un « tau hadronique », noté τ_h dans la suite.

Les diagrammes de Feynman correspondant aux désintégrations leptонique et hadronique du τ sont représentés figures 2.24a et 2.24b. Le tableau 2.7a résume plus en détails les rapports de branchement des différents modes de désintégration du τ .



(a) Désintégration leptонique d'un τ^- . Le lepton ℓ peut être un électron ou un muon.

(b) Désintégration hadronique d'un τ^- .

Figure 2.24 – Diagrammes de Feynman de désintégration d'un τ^- .

Mode de désintégration	$\mathcal{BR} (\%)$
$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\tau$	17,82
$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau$	17,39
$\tau^- \rightarrow h^- \bar{\nu}_\tau$	11,51
$\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	25,93
$\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	9,48
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \bar{\nu}_\tau$	9,80
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \pi^0 \bar{\nu}_\tau$	4,76
Autres modes hadroniques	3,31
$\tau^- \rightarrow \tau_h^- \bar{\nu}_\tau$	64,79

(a) Rapports de branchement des différents modes de désintégration du τ [9].

Canal	$\mathcal{BR} (\%)$
$\tau_h \tau_h$	41,98
$\mu \tau_h$	22,53
$e \tau_h$	23,09
$\mu \mu$	3,02
ee	3,18
$e \mu$	6,20

(b) Rapports de branchement des six canaux des événements $h \rightarrow \tau \tau$.

Tableau 2.7 – Rapports de branchement des différents modes de désintégration du τ [9] et des différents canaux des événements $h \rightarrow \tau \tau$.

La désintégration d'un τ peut donc se faire selon trois modes différents, $\tau \rightarrow \tau_h \nu_\tau$, $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ et $\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau$. Dans tous les cas, les neutrinos sont invisibles pour le détecteur. Les deux leptons τ issus de la désintégration du boson de Higgs se désintègrent indépendamment l'un de l'autre. Il existe donc six canaux différents pour les événements où un boson de Higgs se désintègre en paire de τ , listés avec leurs rapports de branchement dans le tableau 2.7b.

6 Conclusion

Les constituants fondamentaux de la matière usuelle sont les fermions de la première génération, c'est-à-dire les quarks u et d pouvant former les protons (uud) et les neutrons (udd), l'électron et le neutrino électronique, dont la présence se manifeste lors des désintégrations radioactives β . Cependant, la liste des particules fondamentales est bien plus longue. Il existe ainsi trois générations de fermions, portant leur nombre à douze. Avec l'antimatière, il existe également douze antifermions.

Aux fermions s'ajoutent les bosons. Les bosons de jauge sont les vecteurs des forces fondamentales, il s'agit du photon, des bosons W^+ , W^- et Z et des gluons. Le boson de Higgs, scalaire, est issu de la brisure spontanée de symétrie.

Le modèle standard, reposant sur la théorie quantique des champs, permet ainsi de décrire fidèlement le comportement de ces particules. L'invariance de jauge locale sous les transformations du groupe $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ fait émerger naturellement les forces électrofaible et forte. Le mécanisme de brisure spontanée de symétrie introduit le champ de Higgs et donne une masse aux particules.

Ce modèle a permis de prédire l'existence de particules comme les bosons W et Z , le quark top ou encore le boson de Higgs de nombreuses années avant leurs observations. Malgré ces prouesses et les décennies de prédictions correctement vérifiées, la communauté scientifique sait pertinemment que le modèle standard n'est qu'une étape vers une théorie plus complète. En effet, le modèle standard ne permet pas d'expliquer certains faits expérimentaux comme la présence de la matière noire. D'autres phénomènes comme l'ajustement fin laissent à croire qu'il s'agit d'une théorie effective à basse énergie.

De nombreuses extensions au modèle standard sont alors proposées, comme la supersymétrie. Les modèles supersymétriques introduisent les « sparticules », partenaires supersymétriques des particules. Dans sa version la plus simple, l'extension supersymétrique minimale du modèle standard ou MSSM, il n'y a pas un mais cinq bosons de Higgs, ainsi que leurs partenaires. La recherche d'un signal associé à ces bosons de Higgs supplémentaires est un test expérimental du MSSM.

Dans le cas où ces bosons de Higgs supplémentaires sont de hautes masses, le canal de désintégration en paire de leptons tau est le plus prometteur. Les leptons tau se désintègrent eux-mêmes en électron, muon ou tau hadronique. Il existe donc six états finaux différents. Le chapitre 5 présente une analyse expérimentale menée pour la recherche d'un boson de Higgs de haute masse se désintégrant en paire de taus.

Les couplages des bosons de Higgs aux quarks b rendent le mode de production de bosons de Higgs en association avec ces particules dominant dans une grande portion de l'espace des phases ($m_A, \tan \beta$). Ces quarks donnent des jets dans l'état final, dont l'identification et la caractérisation est ainsi un enjeu dans le contexte d'une analyse expérimentale testant le MSSM. Le chapitre 4 aborde la formation des jets, leur reconstruction et leur calibration.

Grâce à la collaboration CMS (*Compact Muon Solenoid*) et au détecteur du même nom installé au LHC (*Large Hadron Collider*) de l'organisation européenne pour la recherche nucléaire ou CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), les conditions expérimentales sont réunies pour procéder à la recherche d'un boson de Higgs de haute masse se désintégrant en paire de taus. Le chapitre 3 présente ce dispositif expérimental.

Chapitre 3

Dispositif expérimental

Sommaire

1	Introduction	37
2	Le CERN	38
2.1	Les origines du CERN	38
2.2	Réalisations du CERN	38
2.3	Les accélérateurs du CERN	39
3	Le LHC : Large Hadron Collider	39
3.1	Exploitation du LHC	39
3.2	Accélération de protons	39
3.3	Collisions de protons	41
3.4	Luminosité, nombre d'événements et statistiques	43
3.5	L'empilement	45
3.6	Les expériences du LHC	45
4	L'expérience CMS : Compact Muon Solenoid	46
4.1	Vue d'ensemble et système de coordonnées	46
4.2	Le solénoïde	48
4.3	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	49
4.4	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	51
4.5	Le calorimètre hadronique ou HCAL	53
4.6	Les chambres à muons	54
4.7	Prise de données à CMS	56
5	Événements simulés	57
5.1	Génération d'événements	58
5.2	Simulation du détecteur	59
6	Reconstruction des événements	59
6.1	Éléments d'identification du <i>Particle Flow</i>	59
6.2	Identification et reconstruction des particules	61
6.3	Énergie transverse manquante	63
7	Conclusion	63

1 Introduction

La matière « du quotidien » est constituée des fermions de la première génération, présentés avec les autres particules fondamentales connues à ce jour dans le chapitre 2. L'étude des autres particules fondamentales doit donc nécessairement se faire dans des conditions particulières. Les rayons cosmiques issus du Soleil produisent de nombreuses particules lors de leur interaction avec l'atmosphère. Leur étude a ainsi permis la découverte des muons [61]. Toutefois, les particules les plus massives nécessitent des gammes d'énergies bien plus élevées afin d'être produites. De plus, certains processus du modèle standard ont une faible section efficace, c'est-à-dire une faible probabilité de survenir. Enfin, de nombreux paramètres sont difficiles voir impossibles à obtenir sans connaître les

conditions expérimentales de tels événements naturels. La caractérisation des particules de l’Univers ne peut donc se faire uniquement par ces observations.

Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC, *Large Hadron Collider*) [62-64] de l’organisation européenne pour la recherche nucléaire ou CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) [65] réalise des collisions entre particules. Cet environnement expérimental, contrôlé, permet d’atteindre des échelles d’énergies suffisantes pour produire des particules de hautes masses et ce de nombreuses fois. Ces conditions sont nécessaires afin de découvrir certaines particules fondamentales comme le boson de Higgs [20-24] et les caractériser.

Le CERN est présenté dans la section 2. Le plus grand et le plus puissant de ses collisionneurs de particules à ce jour, le LHC, est introduit dans la section 3. La section 4 présente l’expérience CMS, une des quatre grandes expériences du LHC, dont les données expérimentales sont utilisées dans cette thèse. La comparaison des observations expérimentales aux prédictions théoriques peut se faire en simulant des collisions, ce qu’aborde la section 5. Enfin, la section 6 explique comment les signaux détectés permettent de déterminer les particules présentes.

2 Le CERN

2.1 Les origines du CERN

L’acronyme « CERN » signifie Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. Sa création est motivée par l’état de la recherche scientifique en Europe après la Seconde Guerre Mondiale [65]. Des scientifiques comme Raoul Dautry, Pierre Auger ou Niels Bohr envisagent la création d’un laboratoire européen de physique atomique¹ n’ayant aucune motivation militaire. Leur objectif est de stopper la fuite des cerveaux vers l’Amérique, d’unifier l’Europe et de lui donner les moyens d’avoir une infrastructure de recherche en physique de calibre mondial.

Le 9 décembre 1949, Louis de Broglie propose officiellement la création d’un laboratoire européen. C’est en décembre 1951, lors d’une conférence de l’Unesco à Paris, qu’est adoptée une résolution pour la mise en place d’un conseil européen pour la recherche nucléaire avec pour objectif de créer une convention pour un laboratoire européen sous 18 mois. Le site de Meyrin, au Nord-Ouest de Genève, est choisi en octobre 1952 pour sa position centrale vis-à-vis des pays européens et la neutralité militaire suisse. Les travaux commencent dès le printemps 1954.

Lors de la sixième session du Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, la convention établissant l’organisation européenne pour la recherche nucléaire est adoptée par les douze pays membres fondateurs : la Belgique, le Danemark, la France, la Grèce, l’Italie, la Norvège, les Pays-Bas, la République Fédérale d’Allemagne, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Yougoslavie. La ratification est terminée le 29 septembre 1954. Le Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire est alors dissous, mais l’acronyme CERN est resté attaché à l’organisation européenne pour la recherche nucléaire.

2.2 Réalisations du CERN

Le CERN a permis de réaliser de nombreuses découvertes en physique fondamentale, comme les courants neutres (1973) [66-68], les bosons W et Z (1983, Nobel 1984) [15-19] et dernièrement le boson de Higgs (2012, Nobel 2013) [20, 21].

En plus de découvertes majeures en physique fondamentale, le CERN apporte également des innovations technologiques importantes. Par exemple, les techniques de hadronthérapie pour le traitement des tumeurs cancéreuses sont en grande partie développées au CERN. Plus connus du grand public, les écrans tactiles ont été développés dans les années 70 au CERN afin de réduire le nombre de boutons dans la salle de contrôle du Supersynchrotron à Protons [69]. Le Web a également été développé au CERN [70].

1. À cette époque, la physique fondamentale est la physique atomique et nucléaire, la physique des particules telle qu’elle est connue aujourd’hui n’est pas encore née.

2.3 Les accélérateurs du CERN

Le premier accélérateur de particules du CERN est le Synchrocyclotron, mis en service en 1957 à une énergie de 600 MeV. Il est remplacé en 1990 par ISOLDE.

À la fin des années 50, le Synchrotron à Protons (PS) permet d'accélérer des protons et d'atteindre une énergie de 28 GeV, ce qui en fait l'accélérateur le plus puissant à l'époque. Avec l'arrivée de nouveaux anneaux au CERN, le PS sert également de pré-accélérateur.

En 1976, le Supersynchrotron à Protons (SPS) est mis en service. Le tunnel circulaire de 7 km de circonférence permet de faire collisionner deux faisceaux de particules circulant en sens inverse avec une énergie dans le centre de masse allant jusqu'à 450 GeV pour des protons. Le SPS a permis entre autres d'étudier la structure interne du proton et de découvrir les bosons W [15-17] et Z [18, 19].

Une nouvelle étape est franchie à la fin des années 80 avec la mise en service du Grand Collisionneur Électron-Positron (LEP, *Large Electron-Positron collider*). Il est, à ce jour, le plus grand collisionneur de leptons au monde avec 27 km de circonférence. Quatre grandes expériences étaient installées sur le LEP, ALEPH (*Apparatus for LEP Physics at CERN*) [71], DELPHI (*DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification*) [72], L3 [73] et OPAL (*Omni-Purpose Apparatus at LEP*) [74], dont les emplacements sont visibles sur la figure 3.1 avec ceux des grandes expériences du LHC. Le LEP a permis de réaliser des mesures de précision sur les bosons W et Z précédemment découverts avec le SPS. Il a été mis en arrêt en 2000 afin de construire le LHC, sujet de la section suivante.

De nombreuses autres expériences et installations expérimentales sont présentes au CERN dont le complexe d'accélérateurs s'étend sur près de 10 km. Sur la figure 3.2 se trouve une carte de ce complexe avec les différentes structures encore en fonctionnement à ce jour.

3 Le LHC : *Large Hadron Collider*

Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC, *Large Hadron Collider*) [62-64] est le plus grand et le plus puissant accélérateur de particules au monde. Son tracé ainsi que ceux du *Booster*, du PS et du SPS sont illustrés sur la figure 3.1. Le LHC est installé dans le même tunnel que le LEP, il s'agit donc d'un accélérateur circulaire de 27 km de circonférence, situé entre 50 et 100 m sous la frontière franco-suisse.

Le LHC permet de réaliser des collisions proton-proton, proton-ion lourd et ion lourd-ion lourd. Les collisions d'ions lourds permettent de reproduire les conditions des premiers instants de l'Univers après le *Big Bang* et sont principalement étudiées par l'expérience ALICE, une des quatre grandes expériences du LHC présentées dans la section 3.6. Dans tous les cas, deux faisceaux de particules sont accélérés en sens inverses. Seules les collisions de protons sont considérées dans cette thèse.

3.1 Exploitation du LHC

Le fonctionnement du LHC peut être divisé en plusieurs périodes ou *runs*. Chaque *run* du LHC présente différentes caractéristiques, en particulier l'énergie dans le centre de masse des collisions. Le tableau 3.1 résume les différents *runs* du LHC, passés et à venir. Chaque *run* est lui-même divisé par année civile, des arrêts techniques étant faits en période hivernale. Enfin, une année civile est subdivisée en plusieurs périodes (A, B, C, etc.) entre lesquelles les conditions expérimentales peuvent varier, comme la nature des particules entrant en collision.

3.2 Accélération de protons

Les protons sont obtenus par ionisation de dihydrogène, directement issu d'une bouteille. Ils sont alors progressivement accélérés à travers différentes installations du CERN, illustrées sur la figure 3.2, menant les protons à des niveaux d'énergie de plus en plus hauts avant de pouvoir être injectés dans le LHC [64] :

- l'accélérateur linéaire 2 (LINAC 2)² permet d'accélérer les protons à une énergie de 50 MeV ;
- le *Booster*, premier élément circulaire, amène les protons à 1,4 GeV ;

2. Le LINAC 2 est remplacé pour le Run III du LHC par le LINAC 4.

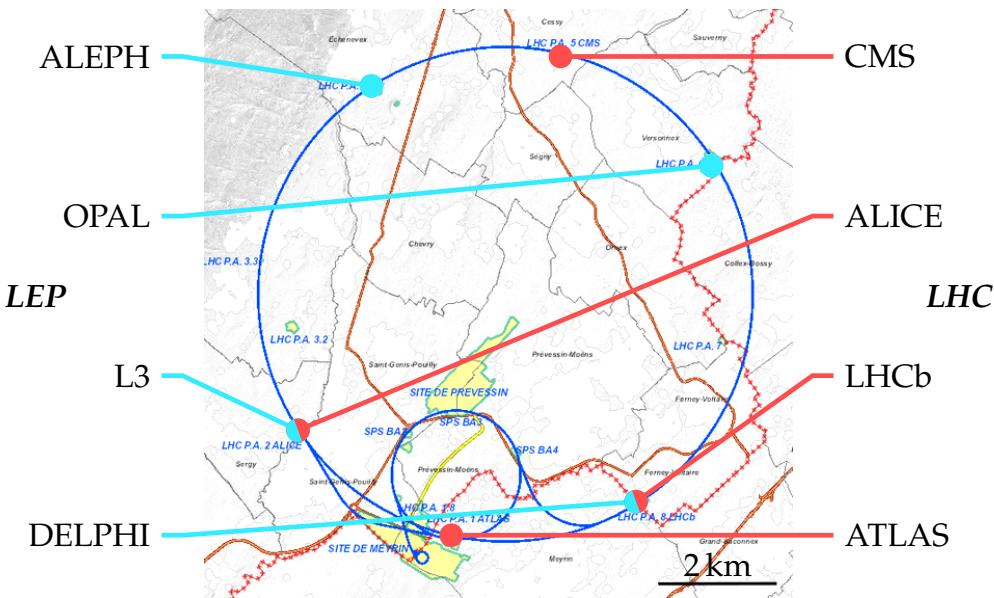


Figure 3.1 – Emplacements des grandes expériences du LEP (1989-2000) et du LHC (depuis 2008) [75]. Les tracés des booster, PS et SPS sont également visibles.

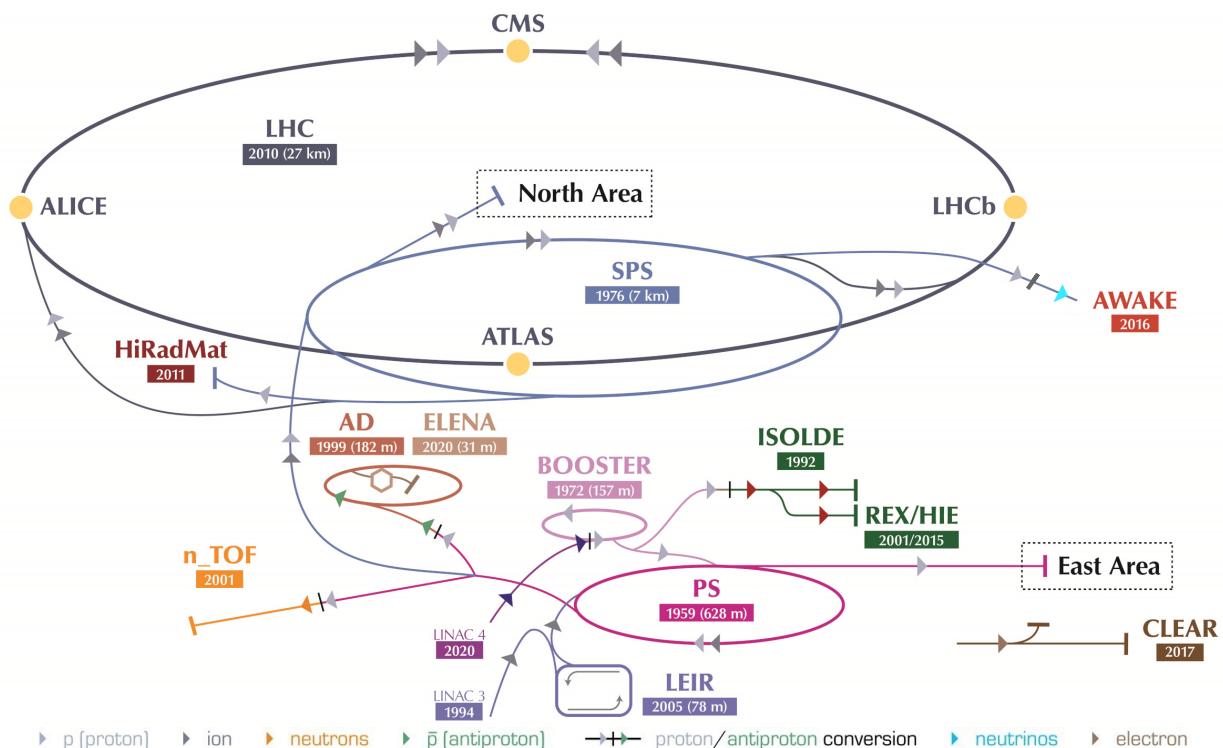


Figure 3.2 – Complexe des accélérateurs du CERN [65]. De nombreuses expériences y sont installées : AD, Décélérateur d'Antiprotons; AWAKE, Advanced WAKEfield Experiment; BOOSTER, Booster du Synchrotron à Protons; CLEAR, CERN Linear Electron Accelerator for Research; ELENA, Extra Low Energy Antiproton; HiRadMat, High-Radiation to Materials; ISOLDE, Isotope mass Separator On-Line; LEIR, Anneau d'Ions de Basse Énergie; LHC, Grand Collisionneur de Hadrons; LINAC 3, Accélérateur Linéaire 3; LINAC 4, Accélérateur Linéaire 4, remplace le LINAC 2; n_TOF, Neutrons Time Of Flight; PS, Synchrotron à Protons; REX/HIE, Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy; SPS, Supersynchrotron à Protons; ALICE, A Large Ion Collider Experiment; ATLAS, A Toroidal LHC ApparatuS; CMS, Compact Muon Solenoid; LHCb, Large Hadron Collider beauty.

Run	Période	Énergie dans le centre de masse	Luminosité proton-proton
I	2011-2012	7 à 8 TeV	30 fb^{-1}
II	2016-2018	13 TeV	190 fb^{-1}
III	2021-2024	13 à 14 TeV	350 fb^{-1} ?
IV	2027-2030	14 TeV	3000 fb^{-1} ?
V	2032-2034	14 TeV	

Tableau 3.1 – Runs du LHC avec les énergies dans le centre de masse et les luminosités correspondantes des collisions de protons [76]. La luminosité est présentée dans la section 3.4.

- le PS permet d'atteindre 25 GeV ;
- le SPS, dernier élément avant le LHC, accélère les protons jusqu'à 450 GeV.

Le LHC accélère alors les protons jusqu'à 6,5 TeV lors du Run II et ira jusqu'à 7 TeV lors du Run III, permettant de réaliser des collisions avec une énergie dans le centre de masse, \sqrt{s} ³, de 13 et 14 TeV, respectivement.

Le gain en énergie des particules, c'est-à-dire l'accélération colinéaire au faisceau, se fait dans le LHC à l'aide de 16 cavités radiofréquences, 8 par faisceau. Ces cavités créent un champ électrique oscillant. Cette technique présente l'avantage d'accélérer les particules différemment selon leurs positions respectives, ce qui permet de les conserver en plusieurs paquets dont l'intérêt est développé dans la section suivante.

Afin de maintenir les particules dans le tube circulaire du LHC, leur trajectoire est courbée, c'est-à-dire qu'une accélération orthogonale au faisceau est appliquée. Cette courbure s'obtient grâce à un champ magnétique de 8,33 T généré par 1232 aimants dipolaires supraconducteurs répartis tout au long des 27 km du LHC et refroidis à l'hélium superfluide à 1,8 K.

3.3 Collisions de protons

3.3.1 Structure du proton

Les protons ne sont pas des particules fondamentales, ils possèdent une sous-structure. En tant que baryons, les protons sont donc des hadrons dont la composition moyenne est de trois quarks, en l'occurrence deux *up* et un *down*. Cependant, ces quarks échangent des gluons virtuels par l'intermédiaire de l'interaction forte. Ces gluons peuvent se matérialiser en paires $q\bar{q}$, comme illustré sur la figure 3.3. Au sein des protons, d'autres partons que les trois quarks *u*, *u* et *d* dits « de valence » peuvent donc être présents. Ces particules additionnelles forment la « mer » dans laquelle se trouvent ainsi des gluons, des antiquarks et des quarks de saveurs lourdes.

Chacun des constituants du proton porte une fraction x de l'énergie totale du proton. La probabilité pour qu'un parton *i* du proton porte une fraction x_i de l'énergie peut être décrite à l'aide des fonctions de densité partoniques (PDF, *Parton Distribution Functions*). Ces fonctions sont obtenues par ajustement des données expérimentales [77, 78] et sont représentées sur la figure 3.4. Les partons de la mer portent généralement une faible fraction de l'énergie. La fraction d'énergie la plus probable portée par un quark de valence est de 10 à 20 % selon l'échelle d'énergie. L'ensemble des quarks de valence porte ainsi 30 à 60 % seulement de l'énergie totale du proton. Dans le cas du proton, les quarks de valence *u* portent environ deux fois plus d'énergie que les quarks de valence *d*, ce qui est cohérent avec la structure moyenne (*uud*) du proton.

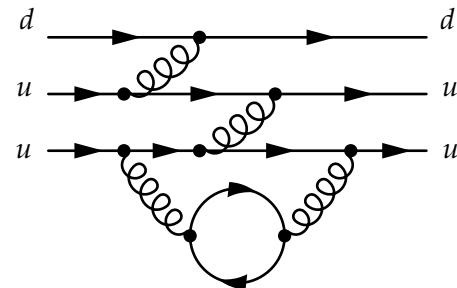


Figure 3.3 – Diagramme de Feynman de la propagation d'un proton avec apparition d'une paire $q\bar{q}$.

3. L'énergie dans le centre de masse est souvent notée \sqrt{s} , s étant une des variables de Mandelstam.

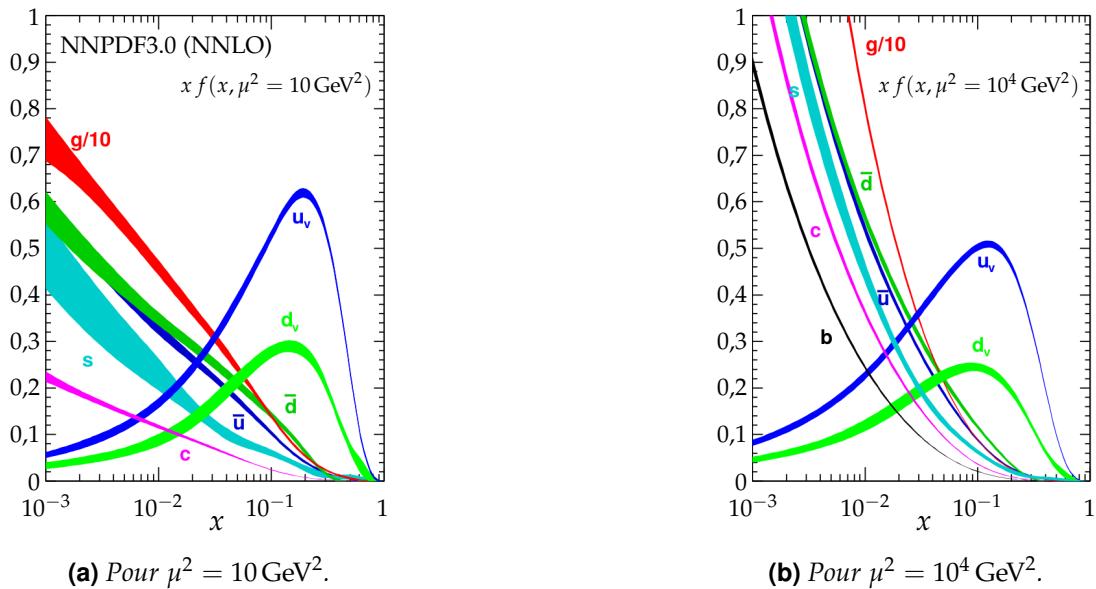


Figure 3.4 – Fonctions de densité partoniques (PDF, Parton Distribution Functions) à différentes échelles d'énergie μ obtenues au NNLO NNPDF3.0 [79] avec $\alpha_s(m_Z^2) = 0,118$ [9]. Les bandes tracées correspondent aux PDF f , avec incertitude, multipliées la fraction d'impulsion x , où f peut être les quarks u et d de valence (u_v , d_v) ou les gluons (g), quarks et antiquarks de la mer (\bar{u} , \bar{d} , $s \simeq \bar{s}$, $c = \bar{c}$, $b = \bar{b}$).

Lorsque deux protons entrent en collision, se sont donc des constituants de ces protons qui interagissent. Or, le constituant du premier proton ne porte pas forcément une fraction x identique à celle que porte le constituant du second proton. Ainsi, bien que les impulsions des deux protons soient opposées l'une à l'autre, c'est-à-dire que le référentiel du centre de masse des protons coïncide avec le référentiel du détecteur, ceci n'est pas vrai pour les partons impliqués dans la collision. Lors des collisions de protons, seule l'impulsion totale dans le plan transverse aux faisceaux est donc nulle et l'impulsion selon l'axe des faisceaux est inconnue. De plus, l'énergie dans le centre de masse des protons n'est pas totalement utilisée dans la collision. Une collision de partons à 13 TeV est ainsi peu probable au LHC, toutefois ces collisions de protons permettent de balayer une large gamme d'énergies effectives de collision, ce qui est favorable aux recherches de nouvelles particules.

3.3.2 Faisceaux et paquets de protons

La dimension spatiale des protons, de l'ordre du femtomètre (10^{-15} m) ne permet pas de les faire se collisionner un à un de manière efficace. Au LHC, deux faisceaux de protons sont ainsi accélérés, chacun dans un sens. Afin de ne pas avoir des collisions en permanence, ce qui rendrait impossible une exploitation des signaux dans les détecteurs, les protons des faisceaux sont regroupés par paquets. Ces paquets sont espacés temporellement de 25 ns lors du Run II, laissant aux instruments de détection un laps de temps suffisant afin de distinguer deux collisions successives.

La formation et le maintien de ces paquets est rendue possible par l'utilisation des cavités radiofréquence. Elles produisent un champ électrique dont la norme est plus importante au niveau des queues des paquets qu'à leurs têtes. Alors, les protons « en queue de peloton » sont plus accélérés que les protons en tête et ils les rattrapent.

Dans chacun des deux faisceaux du LHC, 2808 paquets sont ainsi formés. Avant les premières collisions, un paquet comporte $1,15 \times 10^{11}$ protons. Les paquets font environ 30 cm de long. Lorsqu'ils circulent dans le LHC, leur diamètre est de l'ordre du millimètre mais au niveau des points de collisions, un ensemble de champs magnétiques réduit ce diamètre à 16 μm .

Le passage des $1,15 \times 10^{11}$ protons d'un paquet d'un faisceau du LHC à travers la surface de 16 μm de diamètre, combiné au passage d'un paquet de l'autre faisceau, permet d'obtenir des collisions entre protons. Il s'agit de collisions dans lesquelles les constituants des protons interagissent et créent de nouvelles particules par conservation de l'énergie. Les faisceaux du LHC sont stables une dizaine d'heures, pendant lesquelles des collisions surviennent 40 millions de fois par seconde. La luminosité

permet de rendre compte de la quantité de collisions réalisées.

3.4 Luminosité, nombre d'événements et statistiques

La quantité d'événements par unité de temps dN_i d'un processus physique i de section efficace σ_i s'exprime

$$dN_i = \mathcal{L}_{\text{inst}} \sigma_i dt \quad (3.1)$$

où $\mathcal{L}_{\text{inst}}$ est la luminosité instantanée du dispositif expérimental, exprimée par unité de surface et de temps. La luminosité instantanée est donc une densité de flux, d'où son nom.

La luminosité instantanée au LHC peut s'exprimer en fonction des propriétés des faisceaux selon

$$\mathcal{L}_{\text{inst}} = \frac{\gamma v n_p N_p^2}{4\pi \epsilon_n \beta^*} = \frac{\nu n_p N_p^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (3.2)$$

où γ est le boost de Lorentz des paquets de protons, ν la fréquence de révolution des paquets dans l'anneau du LHC, n_p le nombre de paquets, N_p le nombre de protons par paquet, ϵ_n l'émittance transverse, qui permet de mesurer le parallélisme des faisceaux, β^* la fonction d'amplitude mesurant la distance entre le point de croisement des faisceaux et le lieu où un faisceau est deux fois plus large, σ_x et σ_y les dimensions transverses du faisceau au point d'interaction. La luminosité instantanée est donc favorisée par une faible largeur du faisceau au niveau des points d'interactions.

La luminosité intégrée ou « totale », \mathcal{L} , s'obtient par intégration temporelle de $\mathcal{L}_{\text{inst}}$. La luminosité intégrée s'exprime donc par unité de surface. Elle permet de quantifier statistiquement le nombre d'événements N_i d'un processus physique i de section efficace σ_i par

$$N_i = \mathcal{L} \sigma_i. \quad (3.3)$$

Certaines expériences de physique des particules se ramènent donc à des expériences de comptage où les données sont traitées statistiquement. Dans le cas des recherches de nouvelles particules, l'écart type entre les observations effectives d'une part et attendues dans l'hypothèse où aucun phénomène nouveau n'est présent d'autre part est quantifié en termes de nombre de déviation standard. Il est peu probable d'obtenir un grand écart type uniquement à cause de fluctuations statistiques. Il est ainsi considéré qu'un phénomène, par exemple une nouvelle particule, est observé à partir d'un écart type de cinq déviations standards ou plus, ce qui correspond à une probabilité de réaliser cette observation uniquement à cause de fluctuations d'une sur deux millions.

Pour un même effet, une incertitude moindre donne un écart type plus important. L'incertitude systématique peut être réduite en concevant des expériences les plus précises possibles. L'incertitude statistique relative peut être réduite en augmentant le nombre d'événements correspondant au phénomène étudié. Les conditions favorables aux découvertes sont donc celles où la luminosité ou la section efficace du processus étudié sont importants. Si un tel écart n'est pas observé, il est alors possible de proposer des limites sur les valeurs des sections efficaces des processus en jeu, limites au-delà desquelles l'écart aurait été observé.

Les figures 3.5a, 3.6a et 3.7a présentent les luminosités totales délivrées par le LHC et enregistrées par le détecteur CMS en fonction du temps lors du Run II. Les luminosités y sont exprimées en inverse femtobarn. Le barn ($1 b = 10^{-28} m^2$) est une unité qui permet d'obtenir des valeurs numériques pour la luminosité plus abordables qu'avec les unités usuelles du système international. En effet pour le Run II du LHC, la luminosité totale des collisions de protons est de

$$190 \text{ fb}^{-1} = 190 \times 10^{15} \text{ b}^{-1} = 190 \times 10^{43} \text{ m}^{-2}, \quad (3.4)$$

son expression en m^{-2} n'est donc pas pratique à cause du facteur 10^{43} .

Pendant le Run II, les bonnes performances du détecteur CMS lui ont permis d'enregistrer 92,39 % de la luminosité délivrée par le LHC⁴ [80-82]. Les projets de développements futurs du LHC s'orientent dans un premier temps vers une augmentation de la luminosité, il s'agit du « HL-LHC » (LHC Haute Luminosité). Les performances actuelles du détecteur devront être encore améliorées d'ici-là et la collaboration y travaille d'ores et déjà.

4. 92,22 % en 2016, 90,34 % en 2017 et 93,83 % en 2018.

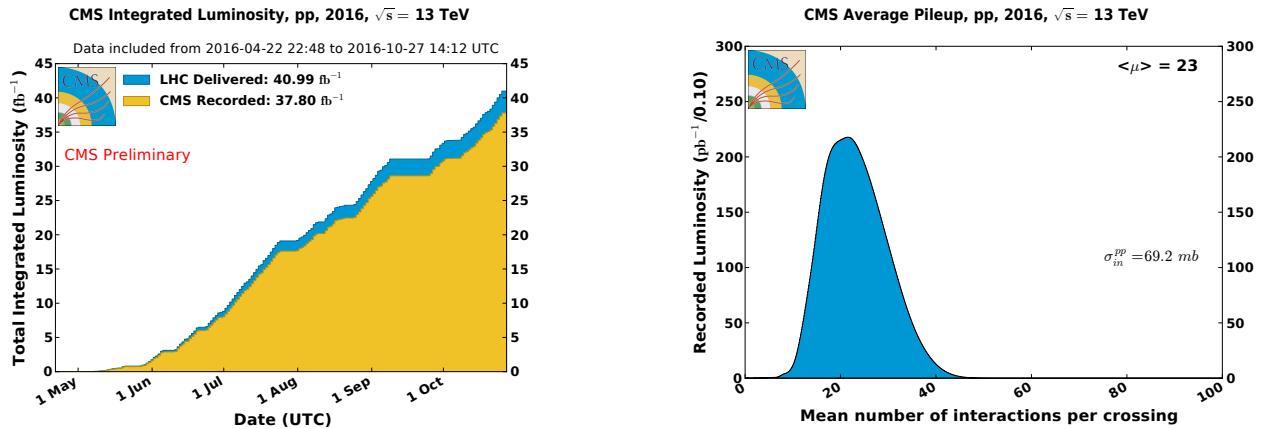


Figure 3.5 – Luminosité totale et empilement en 2016 [80, 83].

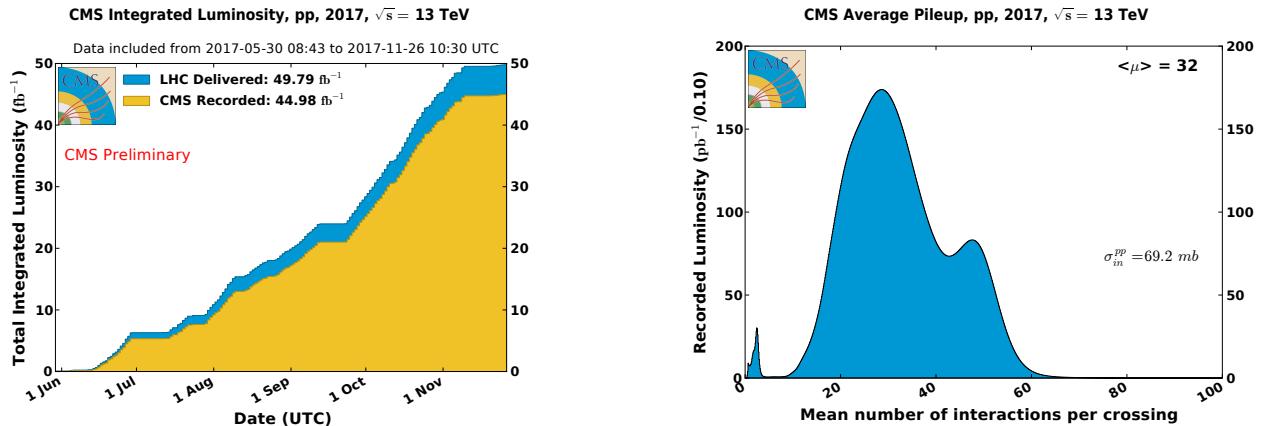


Figure 3.6 – Luminosité totale et empilement en 2017 [81, 83].

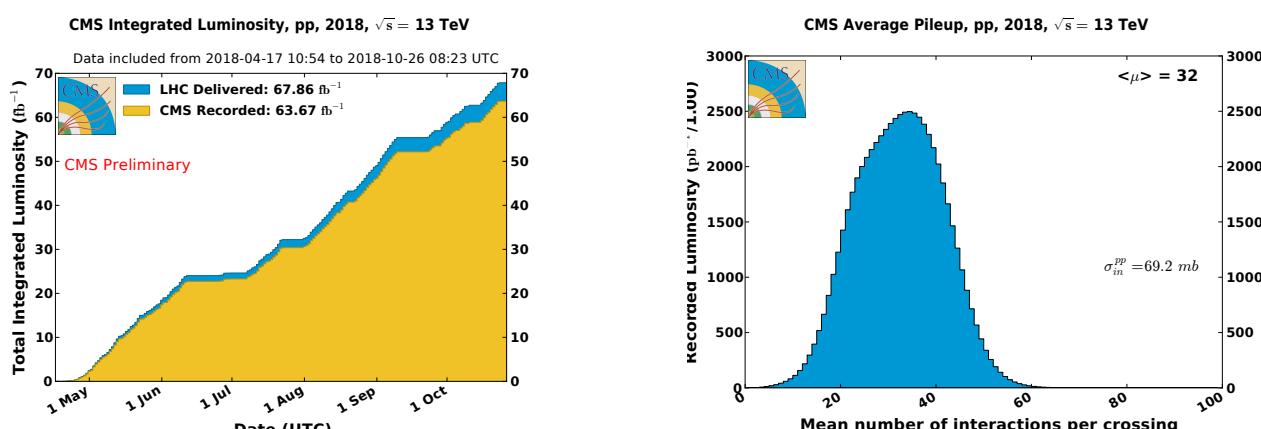


Figure 3.7 – Luminosité totale et empilement en 2018 [82, 83].

3.5 L'empilement

L'empilement (PU, *Pile-Up*) est le phénomène de superposition des signaux issus de différents processus physiques. Il existe deux types d'empilement, synchrone et asynchrone.

3.5.1 L'empilement synchrone

Plusieurs collisions de protons peuvent avoir lieu lors d'un même croisement de paquet de protons ou « événement ». Le nombre d'interactions d'empilement synchrone moyen dépend des conditions du LHC. Les figures 3.5b, 3.6b et 3.7b présentent ces distributions pour les trois années du Run II.

À chaque collision correspond un vertex, lieu effectif de la rencontre entre les deux protons. Pour chacun des vertex de l'événement, la somme des impulsions transverses au carré des traces provenant de ce vertex est calculée. Le vertex principal est choisi comme étant le vertex présentant la plus grande valeur de cette somme. Les autres vertex sont considérés comme des vertex d'empilement et sont en général peu intéressants dans les analyses expérimentales.

Toutefois, les particules provenant des vertex d'empilement laissent elles aussi des signaux dans le détecteur, en plus des signaux d'intérêts. Par conséquent, la reconstruction et l'identification des particules issues du vertex principal est perturbée.

3.5.2 L'empilement asynchrone

L'empilement asynchrone est dû aux temps de réponses des composants du détecteur. Des croisements de paquets ont en effet lieu toutes les 25 ns au LHC. Or, des composants peuvent présenter ponctuellement un temps de réponse supérieur, selon les signaux qu'ils doivent traiter. Les signaux de sortie du détecteur pour un événement donné peuvent donc être superposés avec ceux de l'événement suivant, ou précédent selon le point de vue.

3.6 Les expériences du LHC

Il existe sept expériences au LHC. Parmi elles, quatre sont de « grandes expériences » et se situent chacune aux points d'interactions de l'anneau afin d'étudier les collisions qui y sont produites.

ALICE [84], *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. Elle est installée au point 2 et réutilise l'aimant octogonal rouge très caractéristique de l'expérience L3 du LEP.

ATLAS [85], *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. Ce détecteur se trouve au point 1 du LHC.

CMS [86], *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. Le détecteur CMS est installé au point 5 du LHC, à l'exact opposé d'ATLAS.

LHCb [87], *Large Hadron Collider beauty*, se concentre sur l'étude de la violation de la symétrie *CP* avec le quark *b*, qui lui donne son nom. Cette expérience réalise également des mesures de précision de certains paramètres du modèle standard. L'expérience LHCb se situe au point 8.

Les trois autres expériences du LHC sont LHCf, TOTEM et MoEDAL. L'expérience LHCf (*Large Hadron Collider forward*) [88], installée à 140 m de part et d'autre du détecteur ATLAS, observe les particules issues des collisions et presque alignées avec le faisceau du LHC afin de simuler des rayons cosmiques. La plus « longue » des expériences du CERN, TOTEM (*Total, elastic and diffractive cross-section measurement*) [89], est quant à elle installée sur un demi kilomètre autour de CMS et étudie les protons grâce aux particules alignées avec le faisceau. Enfin, MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector At the LHC*) [90] cherche à détecter l'existence de monopoles magnétiques et de particules ionisantes

massives prédites par certains modèles au-delà du modèle standard grâce à des détecteurs installés près de LHCb.

4 L'expérience CMS : *Compact Muon Solenoïd*

4.1 Vue d'ensemble et système de coordonnées

Le détecteur CMS est installé dans la caverne du point d'interaction numéro 5 du LHC, visible sur la figure 3.1 au Nord de l'installation, dans la commune de Cessy, en France. Il a été pensé avec pour but premier l'étude de la brisure de symétrie électrofaible et la recherche du boson de Higgs [91]. Pour cela, la conception du détecteur repose sur :

- un système de détection des muons de haute performance ;
- le meilleur calorimètre électromagnétique possible compatible avec le point précédent ;
- un système de trajectographie central ;
- un calorimètre hadronique avec une résolution suffisante et une bonne herméticité.

Son design généraliste permet de l'utiliser pour de nombreuses autres analyses de physique, comme des mesures de précision, la recherche d'une nouvelle physique ou encore les collisions d'ions lourds.

La figure 3.8 présente une vue éclatée du détecteur CMS. Il possède une forme cylindrique de 28,7 m de long et 15 m de diamètre pour un poids total de 14 000 tonnes. Il est structuré en couches concentriques, chacune ayant un rôle spécifique détaillé dans les sections qui suivent. À partir du centre du détecteur, lieu des collisions, se trouvent dans l'ordre le trajectographe [93], le calorimètre électronique [94], le calorimètre hadronique [95], le solénoïde [96] donnant son « S » à CMS et les chambres à muons [97] donnant son « M » à CMS, encastrées dans la culasse de fer. Des calorimètres avancés se trouvent aux extrémité du détecteur le long de l'axe du faisceau. Le détecteur propose

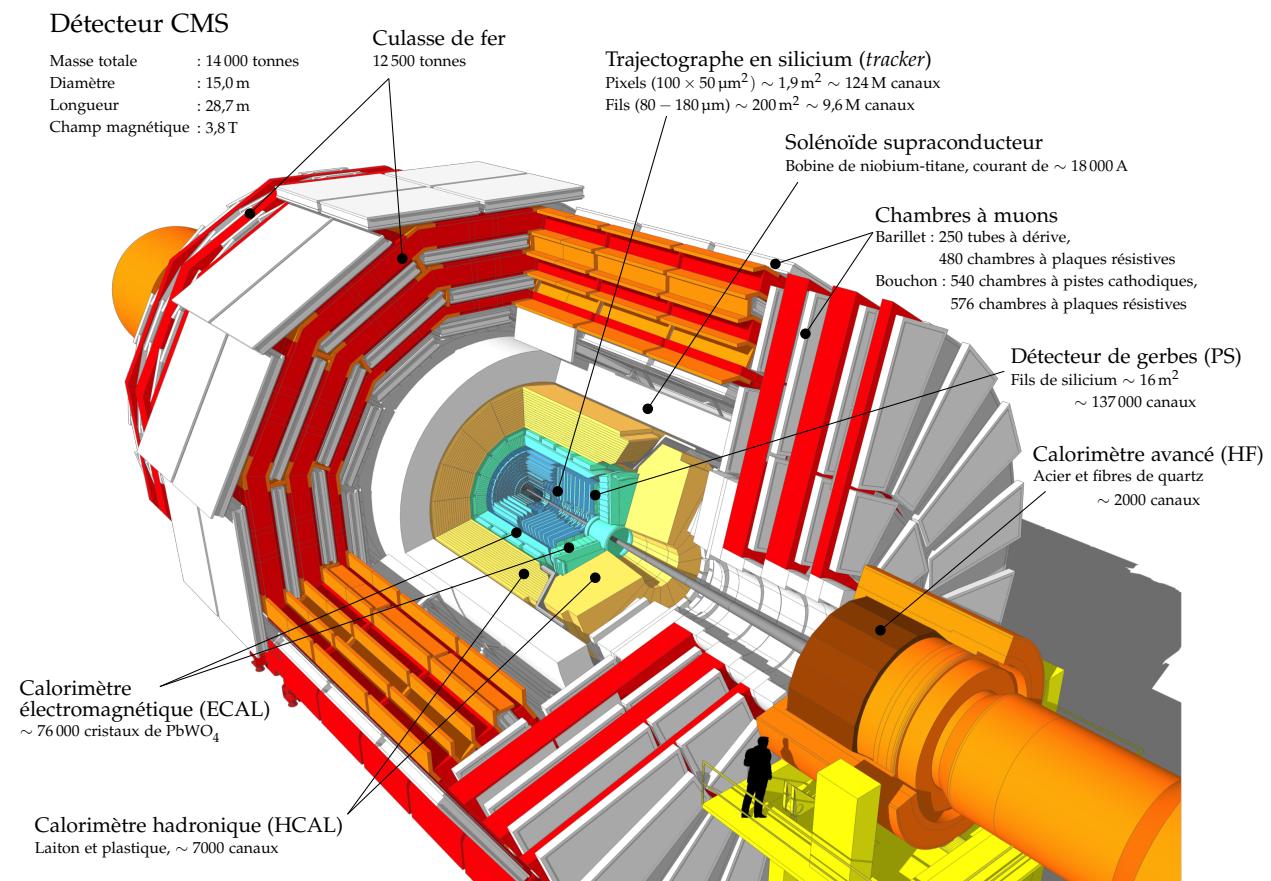


Figure 3.8 – Vue éclatée du détecteur CMS [92].

ainsi une couverture d'un angle solide de presque 4π sr, c'est-à-dire de presque toutes les directions, ce qui est capital afin de reconstruire les collisions.

Le détecteur peut de plus être divisé en trois grandes parties de par sa forme cylindrique. La première, centrale, est le « barillet », dans laquelle les sous-parties ont une géométrie cylindrique. Les parties sensibles du détecteur y sont orientées vers l'axe du faisceau. Aux deux extrémités du détecteur se trouvent les « bouchons », dont l'orientation des parties sensibles du détecteur se fait dans le plan transverse au faisceau. Ces orientations différentes sont bien visibles sur la figure 3.8.

L'acronyme CMS signifie ainsi *Compact Muon Solenoid*, c'est-à-dire Solénoïde Compact à Muons. Son qualificatif de « compact » se comprend par comparaison à d'autres détecteurs de physique des particules, comme son homologue au LHC, ATLAS. Ce détecteur est également cylindrique et fait 40 m de long pour 22 m de diamètre, soit un volume trois fois plus grand que celui de CMS. Pourtant, ATLAS ne pèse « que » 7000 tonnes, deux fois moins que CMS. Il n'y a en effet que peu d'espace vide dans le volume occupé par le détecteur CMS.

La géométrie cylindrique du détecteur pousse à définir un système de coordonnées également cylindriques en complément d'un repère cartésien. Le schéma de la figure 3.9 illustre la définition de ces systèmes de coordonnées. L'origine O des repères est le centre du détecteur où les protons entrent en collision. L'axe (Ox) pointe vers le centre du LHC, l'axe (Oy) vers le haut ($\vec{g} \cdot \vec{e}_y < 0$) et l'axe (Oz) est aligné avec le faisceau tel que $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ forme un trièdre direct. Le système de coordonnées cylindriques est défini par la distance à l'origine et deux angles $\theta \in [0, \pi]$ et $\phi \in [-\pi, \pi]$. L'angle entre les plans (\vec{e}_x, \vec{e}_z) et (\vec{a}, \vec{e}_z) est ϕ , défini dans le plan (\vec{e}_x, \vec{e}_y) à partir de l'axe (Ox). L'angle entre les directions \vec{a} et \vec{e}_z est θ .

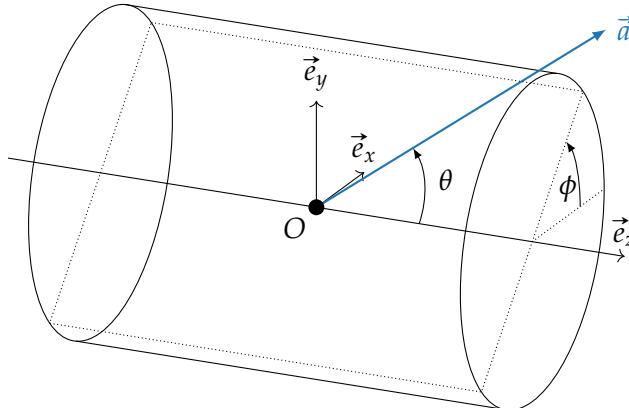


Figure 3.9 – Système de coordonnées du détecteur CMS. L'axe (Ox) pointe vers le centre du LHC, l'axe (Oy) vers le haut ($\vec{g} \cdot \vec{e}_y < 0$) et l'axe (Oz) est aligné avec le faisceau tel que $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ forme un trièdre direct. L'angle entre les plans (\vec{e}_x, \vec{e}_z) et (\vec{a}, \vec{e}_z) est ϕ , défini dans le plan (\vec{e}_x, \vec{e}_y) à partir de l'axe (Ox). L'angle entre les directions \vec{a} et \vec{e}_z est θ .

L'angle θ n'est généralement pas utilisé directement et est remplacé par la « pseudo-rapidité » η définie comme

$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right). \quad (3.5)$$

La pseudo-rapidité est ainsi égale à zéro dans le plan transverse, c'est-à-dire le plan (Oxy). L'usage de cette variable est motivé par la densité de production de particules qui est constante suivant η et non selon θ . De plus, dans la limite « ultra-relativiste » c'est-à-dire $|\vec{p}| \gg m$, condition remplie au LHC, la pseudo-rapidité tend vers la rapidité y (à ne pas confondre avec la coordonnée y) des particules,

$$y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E + p_z c}{E - p_z c}\right). \quad (3.6)$$

Or la rapidité est un invariant de Lorentz, ainsi au LHC η est en très bonne approximation un invariant de Lorentz, contrairement à θ . La figure 3.10 présente un quadrant du détecteur CMS sur lequel figurent quelques valeurs de pseudo-rapidité et les directions correspondantes dans le plan (Oyz).

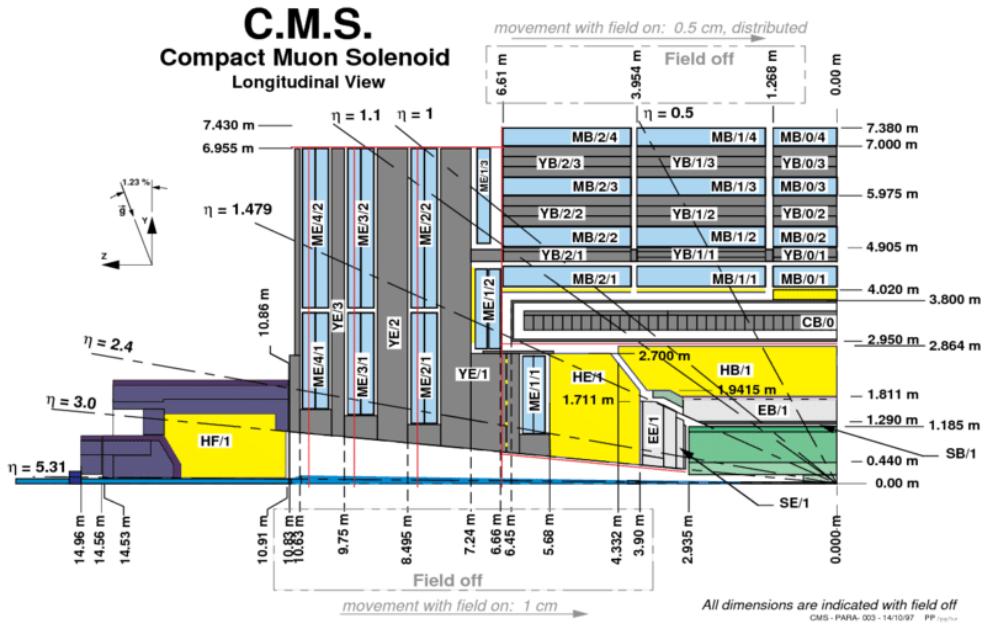


Figure 3.10 – Vue longitudinale d'un quadrant du détecteur CMS [98]. Les directions correspondant à quelques valeurs de pseudo-rapidité sont illustrées et des mesures de distances par rapport au centre du détecteur, lieu des collisions, sont indiquées. Le sol de la caverne présente une inclinaison de 1,23 % par rapport à la direction de la gravité locale \vec{g} , ce que montre le schéma à gauche.

Du fait de la structure des protons discutée dans la section 3.3, lors de la collision, l'impulsion totale selon l'axe des faisceaux est inconnue. Seule l'impulsion totale dans le plan transverse, c'est-à-dire le plan (Oxy), est nulle. C'est pourquoi des variables relatives au plan transverse sont définies, en particulier l'impulsion transverse \vec{p}_T , sa norme p_T et l'énergie transverse E_T ,

$$\vec{p}_T = p_x \vec{e}_x + p_y \vec{e}_y, \quad p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad E_T = E \sin \theta = \frac{E}{\cosh \eta}. \quad (3.7)$$

4.2 Le solénoïde

Le solénoïde supraconducteur est une des parties les plus importantes du détecteur, si bien qu'elle correspond au « S » de l'acronyme CMS. Il aide à caractériser les particules électriquement chargées issues des collisions. En effet, un champ magnétique courbe les trajectoires des particules électriquement chargées. Pour une particule d'impulsion \vec{p} , de charge q et de vitesse \vec{v} soumise à un champ magnétique \vec{B} ,

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \wedge \vec{B}. \quad (3.8)$$

Champ	3,8 T
Diamètre interne	5,9 m
Longueur	12,9 m
Nombre de tours	2168
Courant	19,5 kA
Énergie stockée	2,7 GJ

Tableau 3.2 – Caractéristiques du solénoïde supraconducteur de CMS [99].

Il s'agit de la composante magnétique de la force de Lorentz. Avec un champ magnétique dirigé « vers le haut », une particule chargée positivement est ainsi déviée vers la droite et une particule chargée négativement vers la gauche. Le rayon de courbure r de la trajectoire de la particule est

$$r = \frac{p_T}{|q|B} \quad (3.9)$$

avec p_T l'impulsion dans le plan transverse au champ magnétique. Dans le cas du détecteur CMS, le champ magnétique est aligné avec l'axe du faisceau, il s'agit donc également de l'impulsion transverse définie dans la section 4.1. Les particules chargées se propagent ainsi selon une trajectoire hélicoïdale et les particules neutres en ligne droite.

Afin d'assurer de bonnes performances sur l'identification des particules, en particulier sur la détermination du signe de la charge des muons (permettant de savoir s'il s'agit d'un muon ou d'un antimuon) et de leur impulsion jusqu'à l'ordre du TeV, la collaboration CMS a choisi d'utiliser un solénoïde supraconducteur [86, 96, 99, 100] dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 3.2. Le rapport rayon sur longueur du cylindre défini par le solénoïde permet ainsi une identification efficace des muons de pseudo-rapidité inférieure à 2,4 [96].

À l'extérieur du solénoïde, une culasse de fer, visible en rouge sur la figure 3.8, permet de contenir le retour du champ magnétique. La culasse de fer est composée de plusieurs couches séparées par les chambres à muons. Elle présente ainsi une épaisseur cumulée d'environ 1,5 m. Le champ magnétique, au lieu d'être presque nul hors du solénoïde, atteint ainsi 1 à 2 T dans la culasse de fer, selon l'endroit considéré. Les trajectoires des muons sont alors courbées dans un sens dans le volume interne du solénoïde, puis dans l'autre sens hors du solénoïde. La carte du champ magnétique obtenu est représentée sur la figure 3.11.

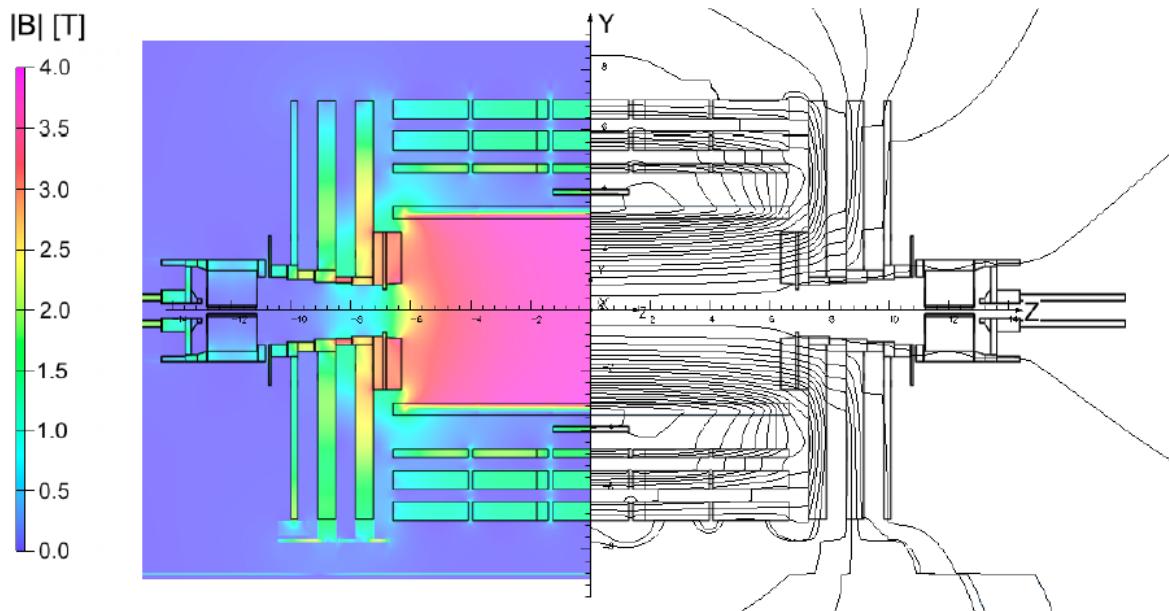


Figure 3.11 – Valeurs de la norme du champ magnétique (à gauche) et lignes de champ (à droite) prédites dans la section longitudinale du détecteur CMS avec une valeur du champ au centre de 3,8 T [101]. Entre deux lignes de champ, l'écart est de 6 Wb.

4.3 Le trajectographe ou *tracker*

Le trajectographe permet de reconstruire les trajectoires des particules chargées de pseudo-rapidité inférieure à 2,5. Ces particules laissent en effet des signaux de leur passage dans les différents modules du trajectographe. Le trajectographe est ainsi essentiel à la reconstruction des vertex des événements du LHC.

Deux types de modules composent le trajectographe de CMS [86, 93, 102-104]. Dans sa partie la plus centrale, des modules à pixels de silicium sont utilisés. Au début du Run II du LHC, trois couches de pixels sont présentes dans la partie bâillet, à 4,4, 7,3 et 10,2 cm de rayon [86], visibles en rouge sur la figure 3.12. Deux disques de pixels sont présents dans chacun des bouchons. Les cellules des pixels ont une taille de $100 \times 150 \mu\text{m}^2$. La résolution spatiale de cette partie du trajectographe est de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ [86] et permet d'obtenir une bonne reconstruction des vertex. En mars 2017, cette partie du trajectographe est remplacée [104, 105]. Elle comporte alors quatre couches de pixels dans la partie bâillet à 2,9, 6,8, 10,9 et 16,0 cm de rayon. Dans les bouchons, les disques sont également repensés afin d'obtenir quatre points de passage pour les traces telles que $|\eta| \leq 2,5$. Une comparaison des trajectographes à pixels utilisés en 2016 (Phase-0) et à partir de 2017 (Phase-1) est illustrée sur la

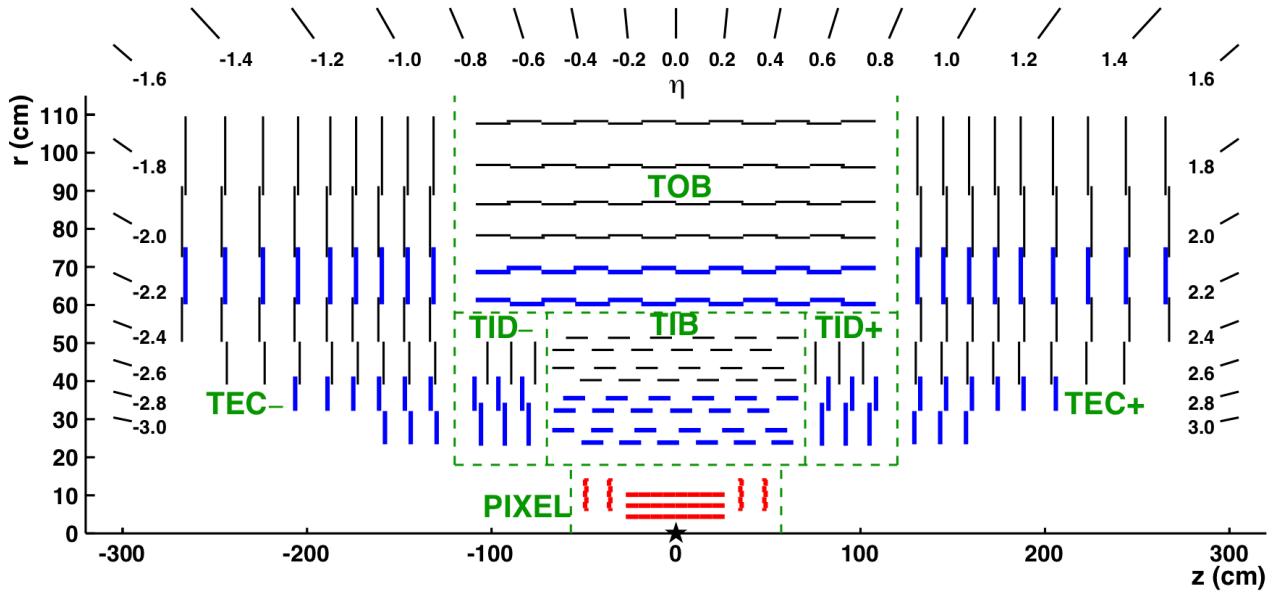


Figure 3.12 – Schéma détaillé du trajectographe du détecteur CMS dans le plan (Orz) [102, 103]. Le trajectographe est symétrique par rapport à l'axe $r = 0$, axe du faisceau. Le centre du trajectographe, correspondant approximativement au lieu des collisions, est indiqué par une étoile. Les différentes sous-parties du trajectographe sont délimitées par les pointillés verts. Les modules à fils donnant des signaux en deux dimensions sont indiqués en lignes noires fines et ceux donnant des signaux en trois dimensions en lignes bleues épaisses. Ces derniers sont en fait constitués de deux modules à fils dos à dos dont l'un est tourné de 90° . Les modules à pixels, en rouge, permettent également d'obtenir des signaux à trois dimensions. Les légers décalages des modules leur permettent d'éviter tout angle mort dans la zone d'acceptance du détecteur.

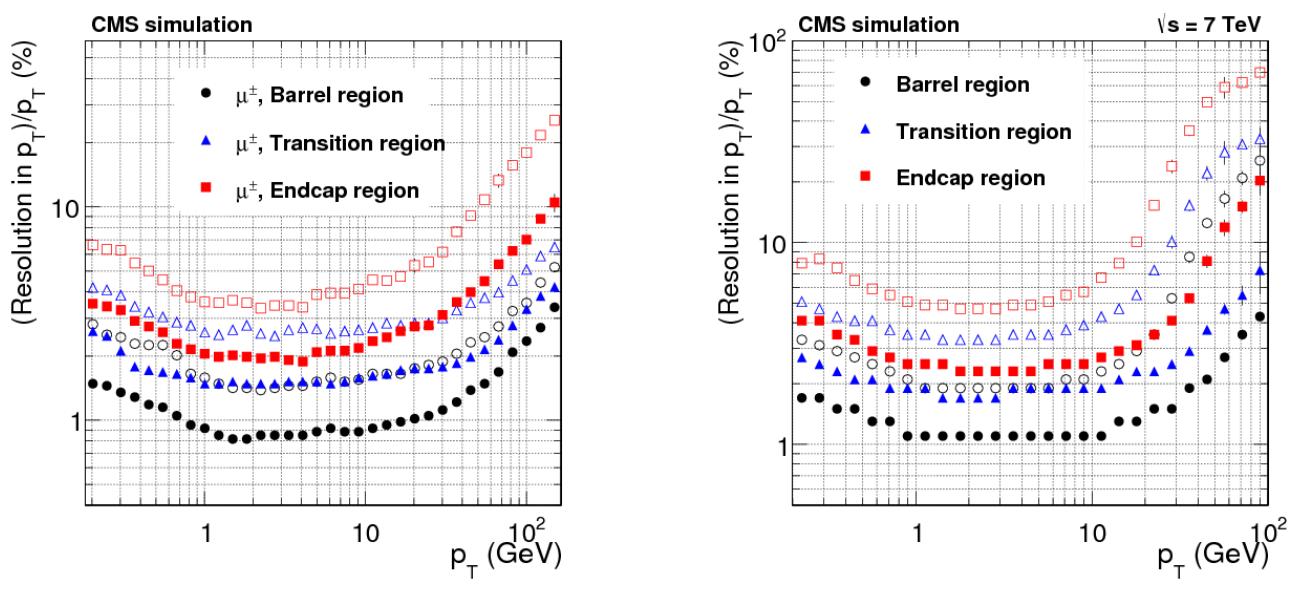


Figure 3.13 – Résolution en p_T , en fonction de p_T , du trajectographe pour différentes particules [102]. Les symboles pleins correspondent à la demi-largeur à 68 % de la distribution, les symboles creux à 90 %.

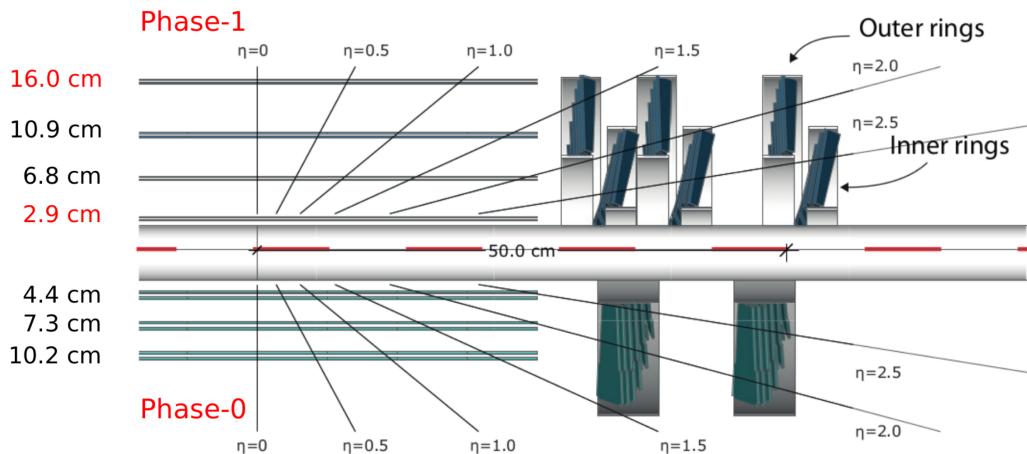


Figure 3.14 – Comparaison des trajectographes à pixels utilisés en 2016 (Phase-0) et à partir de 2017 (Phase-1) [104, 105].

figure 3.14. Cette modification du détecteur permet d'améliorer la reconstruction des vertex ainsi que l'efficacité de l'identification de jets issus de quarks b .

De 20 à 116 cm de rayon se trouve le trajectographe à fils, lui-même composé de trois sous-parties. La première de ces sous-parties comporte le trajectographe interne du barillet (TIB, *Tracker Inner Barrel*) de quatre couches et les trajectographes internes à disques (TID, *Tracker Inner Disks*) de trois couches chacun. Les fils de ces couches sont parallèles au faisceau dans le TIB et axiaux dans les TID. Ils permettent d'obtenir une résolution de 23 μm et 35 μm respectivement [86]. Le TIB et les TID sont entourés par le trajectographe externe du barillet (TOB, *Tracker Outer Barrel*) de six couches. Le TOB a une résolution de 53 μm pour ses quatre premières couches et de 35 μm ensuite [86]. Enfin, les bouchons du trajectographe (TEC, *Tracker EndCaps*) se situent aux extrémités du dispositif.

Les trajectoires des particules chargées sont alors reconstruites par interpolation entre les différents points de passage dans le trajectographe compatibles avec la trajectoire d'une particule. À partir de ces trajectoires, il est possible de déterminer l'impulsion transverse des particules à l'aide de l'équation (3.9). Les résolutions obtenues sur les impulsions transverses des muons et de particules chargées à l'aide du trajectographe sont présentées sur la figure 3.13.

4.4 Le calorimètre électromagnétique ou ECAL

Le calorimètre électromagnétique (ECAL) [86, 94, 106-108] permet de mesurer l'énergie des électrons et des photons par un processus destructif. Le ECAL est composé d'environ 76 000 cristaux de tungstate de plomb (PbWO_4) dans lesquels les électrons et les photons forment une gerbe électromagnétique dont l'intensité du signal lumineux permet d'en obtenir l'énergie.

Le ECAL se divise en trois sous-parties, schématisées sur la figure 3.15. La première, comme pour le trajectographe, constitue la partie barillet du ECAL (EB) et couvre la région $|\eta| < 1,479$. Le front des cristaux du EB se trouvent à 1,29 m du faisceau. Ils sont regroupés en « modules » de 400 à 500 cristaux et quatre de ces modules forment un « supermodule » de 1700 cristaux. Le tour complet du barillet comporte 18 supermodules, chacun couvrant 20° en ϕ et la moitié de l'espace en η du EB. Le EB complet est ainsi formé de 36 supermodules.

Les deux autres parties du ECAL forment les bouchons, couvrant la région $1,479 < |\eta| < 3,0$. Les bouchons du ECAL (EB) se trouvent à 315,4 cm⁵ du point de collision le long de l'axe du faisceau. Sur deux demi-disques (*dee*) par bouchon sont répartis des « supercristaux » formés de 5×5 cristaux.

Devant les EB se trouvent les détecteurs de gerbes (PS, *PreShower*). Leur rôle est d'identifier les pions neutres⁶ dans la région $1,653 < |\eta| < 2,6$. Ils aident également à discriminer les électrons vis-à-vis des particules ionisantes ainsi qu'à la détermination des positions des photons et électrons. Le PS

5. Cette distance prend en compte le mouvement de 1,6 cm de cette partie du détecteur lorsque le champ magnétique de 3,8 T est présent.

6. Les pions neutres se propagent sur des distances moyennes de 26 nm puis se désintègrent dans 99 % des cas en deux photons [9]. Ce sont donc ces deux photons que le PS doit identifier.

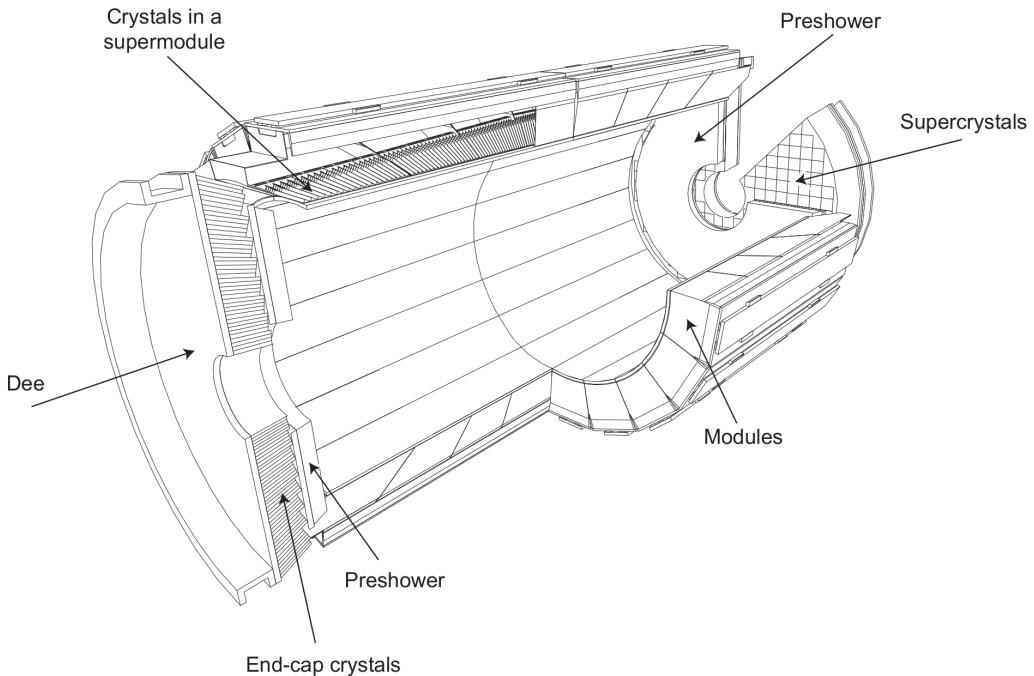


Figure 3.15 – Schéma du calorimètre électronique de CMS [86, 106] montrant le positionnement des cristaux, modules et supermodules dans le bâillet, des supercristaux et du détecteur de gerbes dans les bouchons.

est composé d'une couche de plomb initiant la gerbe électromagnétique suivie d'un détecteur à fils de silicium mesurant les dépôts d'énergie.

Le tungstate de plomb est très dense, $8,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, et transparent. Ce matériau possède également une faible longueur de radiation, $X_0 = 0,89 \text{ cm}$, ainsi qu'un rayon de Molière de $2,19 \text{ cm}$. Le ECAL présente une réponse rapide, une bonne granularité et une résistance suffisante aux radiations. Près de 80 % du signal lumineux émis dans les cristaux du ECAL par les électrons et photons se trouve en effet dans une fenêtre temporelle de 25 ns, la durée entre deux événements successifs au LHC [86]. Dans le cas des hadrons, la traversée des cristaux du ECAL correspond approximativement à une longueur de radiation. Près des deux tiers des hadrons commencent ainsi une gerbe hadronique avant d'arriver dans le calorimètre hadronique, sous-détecteur suivant.

La longueur des cristaux, 23 cm dans le bâillet et 22 dans les bouchons, correspond à 25,8 longueurs de radiation dans le bâillet et 24,7 dans les bouchons, permettant de d'absorber 98 % de l'énergie des électrons et photons jusqu'à 1 TeV. Ces particules ne se propagent donc pas, en bonne approximation, dans les parties suivantes du détecteur.

La réponse des cristaux du ECAL est contrôlée régulièrement à l'aide de lasers [107]. La figure 3.16 présente l'évolution de la réponse des cristaux du ECAL depuis le début de l'exploitation du LHC. La réponse se dégrade au cours du temps car les cristaux, bien que peu sensibles aux radiations, se trouvent dans un environnement à très fortes radiations. Une perte de la transparence des cristaux est ainsi inévitable, diminuant leur réponse. Des corrections sont alors appliquées afin d'assurer une stabilité temporelle de la réponse du ECAL. De plus, la réponse des cristaux présente une forte dépendance thermique, de l'ordre de $2\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Un système de refroidissement assure une stabilité de la température des cristaux à $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

La résolution σ du ECAL est paramétrée selon

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{S}{\sqrt{E}} \oplus \frac{N}{E} \oplus C \quad (3.10)$$

où \oplus désigne une somme quadratique, S est un terme stochastique prenant en compte la largeur latérale de la gerbe électronique, N le terme de bruit des composants électroniques et C une constante rendant compte des erreurs de calibration. Des tests en faisceau réalisés en 2006 [86] ont permis de mesurer $S = 0,028 \text{ GeV}^{1/2}$, $N = 0,12 \text{ GeV}$ et $C = 3,0 \times 10^{-3}$. La figure 3.17 présente ainsi la résolution relative du ECAL sur l'énergie des électrons lors du Run II.

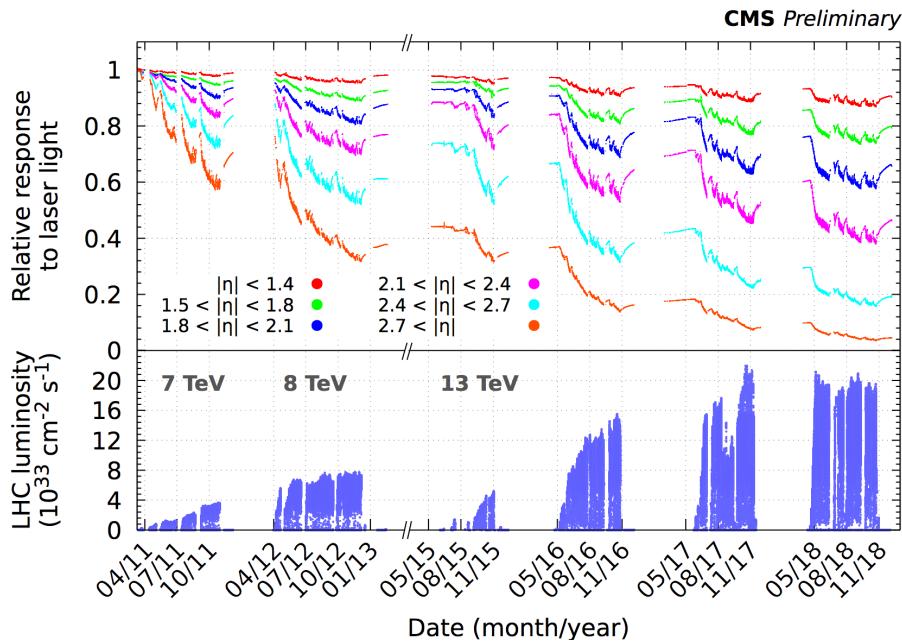


Figure 3.16 – Évolution temporelle de la réponse du ECAL [107] (haut) et luminosité instantanée du LHC (bas).

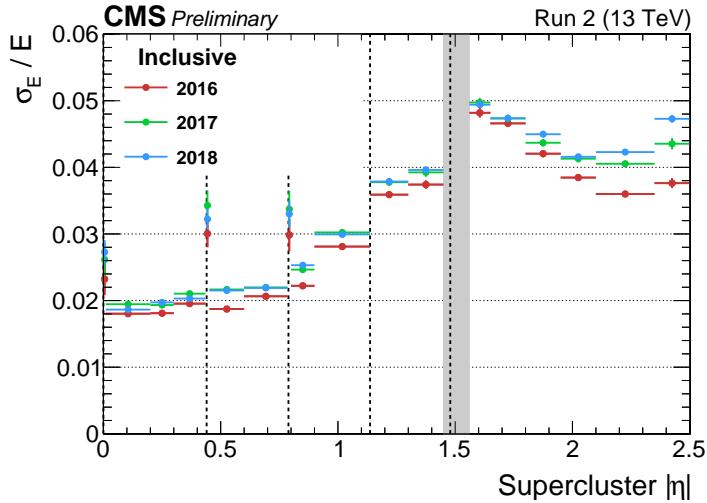


Figure 3.17 – Résolution relative de l'énergie des électrons dans le ECAL lors du Run II en fonction de η [108]. La résolution est obtenue à partir d'événements $Z \rightarrow e^+e^-$.

4.5 Le calorimètre hadronique ou HCAL

Le calorimètre hadronique (HCAL) [86, 95, 109] permet de mesurer l'énergie des hadrons par un processus destructif. Situé à l'intérieur du solénoïde de CMS, les particules déposant leur énergie dans le HCAL ne sont donc pas perturbées par une traversée du solénoïde. La figure 3.18 présente l'agencement du HCAL.

Tout comme le ECAL, il comporte une partie bâillet (HB) couvrant la région $|\eta| < 1,3$ et deux bouchons (HE) couvrant $1,3 < |\eta| < 3$. Ces parties du HCAL sont composées de couches alternées d'absorbeur et de scintillateur. L'absorbeur, du laiton, permet d'initier la gerbe hadronique. Le laiton est paramagnétique, il ne subit donc pas d'effet néfaste de la part du champ magnétique. Les muons interagissent peu avec ce matériau, leur mesure par les chambres à muons situées au-delà du HCAL est donc peu perturbée par leur traversée du HCAL. Le scintillateur est fait en plastique. Des fibres optiques permettent de recueillir la lumière émise par les gerbes hadroniques. La mesure de ce signal lumineux donne une mesure de l'énergie des hadrons.

Cependant, le nombre de longueurs de radiations combinées des ECAL et HCAL dans le bâillet, de l'ordre de dix, est insuffisant pour contenir toutes les gerbes hadroniques [86]. Le HB est ainsi

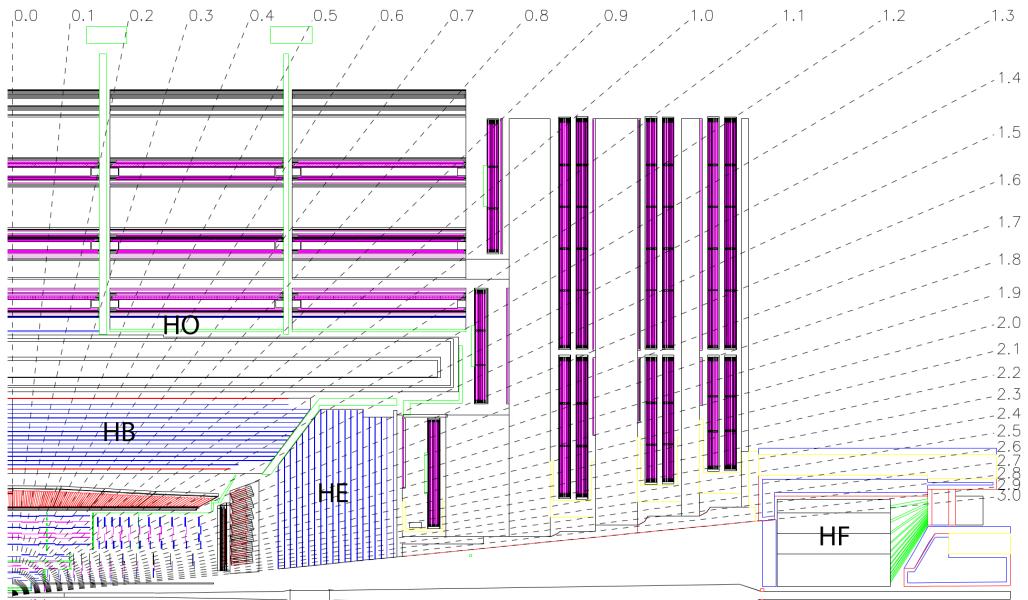


Figure 3.18 – Schéma d'un quadrant du détecteur CMS [86] montrant la localisation des calorimètres hadroniques du barilet (HB), externe (HO), du bouchon (HE) et avancé (HF). Certaines valeurs de η et les directions associées sont indiquées.

complété par un calorimètre hadronique externe (HO) installé sur la face interne de la culasse, c'est-à-dire de l'autre côté du solénoïde et avant les chambres à muons.

Enfin, une couverture plus large en η est assurée par le calorimètre hadronique avancé (HF) couvrant $2,9 < |\eta| < 5,2$. Les deux HF, un à chaque extrémité de CMS, sont des détecteurs cylindriques ayant des absorbeurs en acier auxquels sont connectés des fibres optiques de quartz. Les particules incidentes émettent de la lumière Cherenkov lors de leur passage dans l'acier. Cette lumière est alors recueillie par les fibres optiques.

La réponse relative du HCAL, c'est-à-dire l'énergie reconstruite dans le HCAL par rapport à l'énergie effective du dépôt, est représentée en fonction de l'énergie simulée du dépôt sur la figure 3.19. Elle ne dévie pas de plus de 5 % au-delà de 10 GeV [110] une fois que l'empilement asynchrone, défini dans la section 3.5, est retiré [110, 111]. Comme dans le cas du ECAL, la réponse du HCAL évolue au cours du temps [112] et doit être contrôlée. La résolution σ obtenue sur l'énergie des hadrons, par combinaison avec les signaux du ECAL, a été déterminée à l'aide d'un faisceau test de pions comme étant

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1,1}{\sqrt{E}} + \frac{9}{100} \quad (3.11)$$

où E est l'énergie mesurée en GeV.

4.6 Les chambres à muons

La détection des muons est un enjeu important afin de discriminer les signatures de processus physiques d'intérêt du bruit de fond au LHC [86]. Par exemple, la découverte du boson de Higgs avec

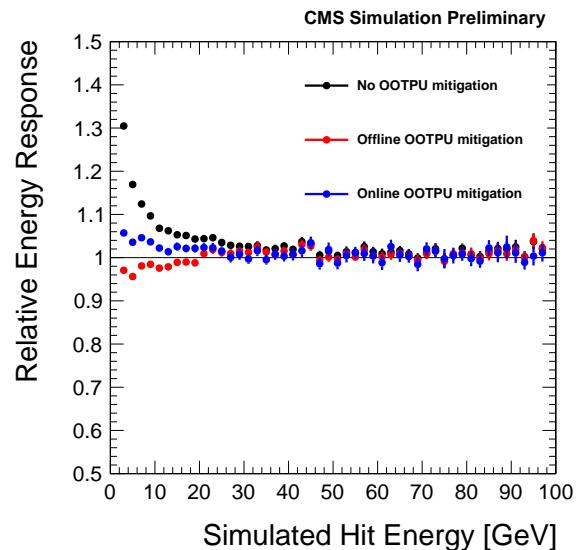


Figure 3.19 – Réponse relative du calorimètre hadronique de CMS [110] en fonction de l'énergie simulée du dépôt. En noir, sans correction de l'empilement asynchrone (OOTPU). En bleu, avec des corrections en ligne, c'est-à-dire un ajustement des amplitudes et temps d'arrivée des signaux en prenant en compte jusqu'à trois signaux avant et après le signal d'intérêt. En rouge, avec l'ensemble des corrections.

le « canal d'or » où ce boson de désintègre en deux bosons Z , eux-mêmes se désintégrant en muons, donne une signature à quatre muons. C'est d'ailleurs ce type d'événement qui a inspiré le logo de la collaboration, figure 3.20. Au-delà de la détection relativement aisée des muons, ils permettent d'obtenir une bien meilleure résolution sur la masse du Higgs qu'avec d'autres particules finales. Bien d'autres processus physiques impliquent des muons. Une mesure la plus précise possible des muons ainsi qu'une large couverture angulaire pour leur détection se trouve donc au cœur de la conception du détecteur CMS, comme l'indique le « M » de l'acronyme.

Les chambres à muons [86, 97, 113, 114], destinées à la mesure de ces particules, sont encastrées dans la culasse de retour du champ magnétique, c'est-à-dire dans la partie la plus externe du détecteur. La culasse de retour, décrite dans la section 4.2, permet d'obtenir à l'aide du solénoïde un champ magnétique de 1 à 2 T dans cette zone [101], donnant une bonne résolution sur l'impulsion des muons. Les autres types de particules ayant été absorbées dans les couches précédentes, seuls les muons atteignent cette partie du détecteur. La figure 3.21 schématise la structure des chambres à muons dans un quadrant du détecteur. De par la forme du solénoïde, cette partie du détecteur se divise également en un bâillet et deux bouchons.

Dans le bâillet (MB), cinq roues le long de l'axe du faisceau (numérotées de -2 à 2) couvrent la région $|\eta| < 1.2$. Une roue est composée de douze segments réalisant un tour complet en ϕ . Chaque segment comporte quatre stations ou couches successives de chambres à muons. Les conditions expérimentales permettent d'y utiliser des chambres à tubes à dérive (DT, Drift Tubes). Les trois premières stations contiennent douze chambres à muons. Deux groupes de quatre chambres mesurent la position du muon dans le plan transverse et sont séparées autant que possible afin d'obtenir la meilleure résolution angulaire. Quatre autres chambres donnent cette mesure le long de l'axe du faisceau. La quatrième station ne comporte pas de mesure selon cet axe.

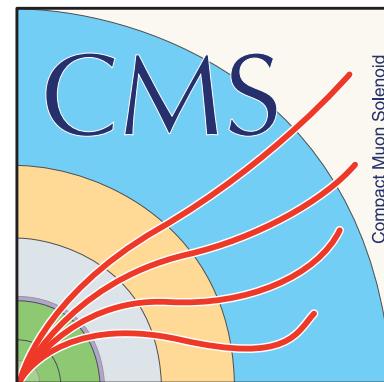


Figure 3.20 – Le logo de la collaboration CMS. Il représente, plié en quatre, un événement $H \rightarrow 4\mu$ dans le plan transverse du détecteur.

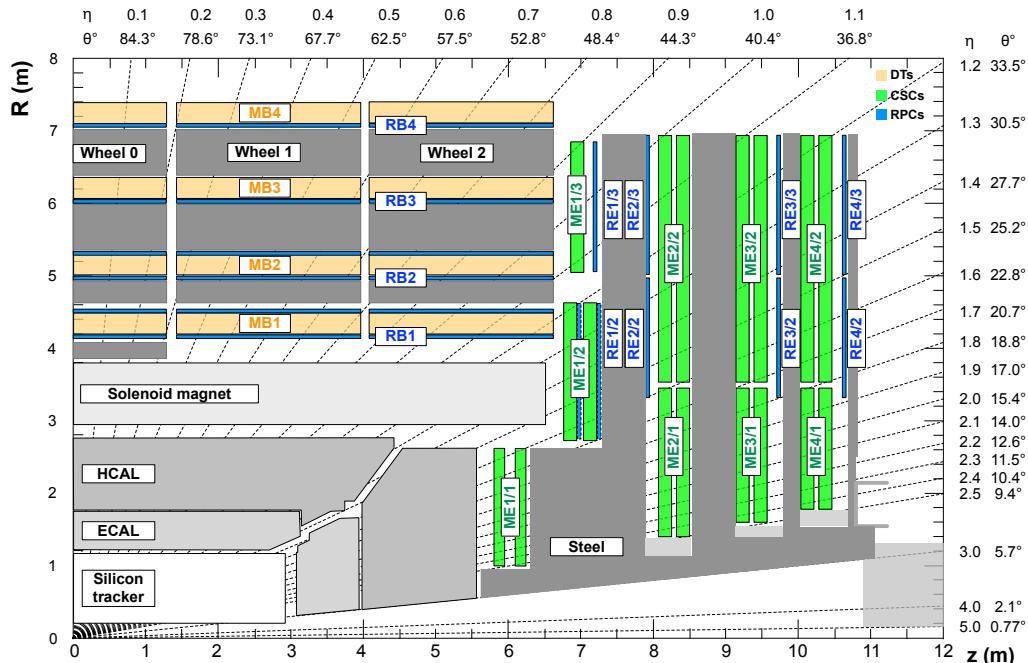


Figure 3.21 – Schéma d'un quadrant du détecteur CMS [114] montrant la localisation des chambres à muons et leur nature : tubes à dérive (DT, en jaune), chambres à pistes cathodiques (CSC, en vert) et chambres à plaques résistives (RPC, en bleu). Certaines valeurs de η et les directions associées sont indiquées.

Les bouchons (MB) sont soumis à une quantité plus importante de muons. Au lieu de tubes à dérives, la technologie utilisée est celle des chambres à pistes cathodiques (CSC, *Cathode Strip Chambers*). Les CSC présentent un temps de réponse plus court, une segmentation fine ainsi qu'une bonne résistance aux radiations. Elles couvrent la région $0,9 < |\eta| < 2,4$. Quatre stations de CSC successives sont installées dans les bouchons et sont orientées radialement par rapport au faisceau, donnant une mesure de précision dans le plan transverse de la position des muons.

Outre l'identification et la mesure des muons, les chambres à muons sont également utilisées afin de déclencher l'enregistrement des données. Les modalités du rejet ou de l'enregistrement d'un événement sont discutées plus en détails dans la section 4.7. Un système de déclenchement complémentaire aux DT et CSC est ajouté, il s'agit du RB dans le barilet et du RE dans les bouchons. Il est composé de chambres à plaques résistives (RPC, *Resistive Plate Chambers*) fournissant des signaux indépendants des DT et CSC, rapides (moins de 25 ns) et proposant une bascule⁷ en fonction de l'impulsion transverse très rapide. La figure 3.22 montre la distribution de la masse invariante des systèmes de deux muons sélectionnés par ce système de déclenchement. Ces résultats montrent la capacité du détecteur CMS à identifier les muons, se déclencher vis-à-vis de leur présence, de reconstruire leurs propriétés cinématiques et d'identifier ainsi sans ambiguïté les particules dont la désintégration donne ces muons sur une large gamme d'énergie [114]. La caractérisation complète des muons, abordée dans la section 6.2, utilise conjointement les informations du trajectographe et des chambres à muons.

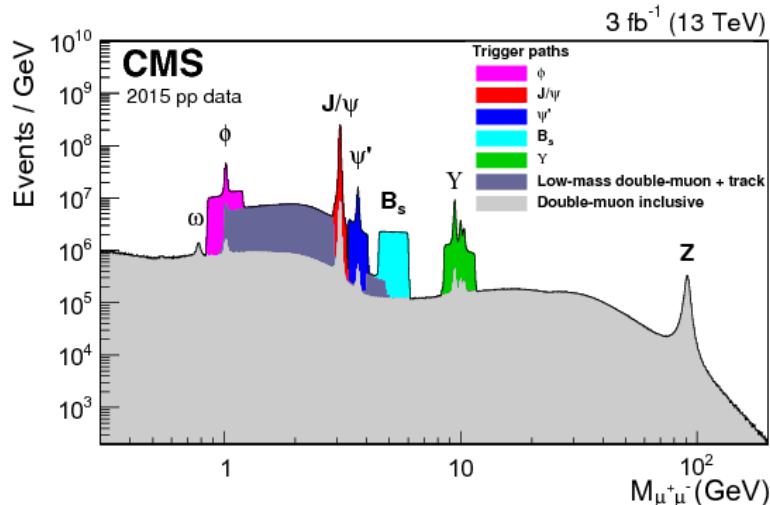


Figure 3.22 – Distribution de la masse invariante du système de deux muons obtenue à partir du système de déclenchement des chambres à muons [114]. Les données ont été récoltées en 2015 à l'aide d'un déclenchement global (gris) ainsi que plusieurs déclenchements spécifiques (en couleur). Les résonances de diverses particules apparaissent distinctement.

4.7 Prise de données à CMS

Pour un événement, le détecteur CMS décrit dans les sections précédentes produit une quantité de données de l'ordre de 1 Mo. Si cette grandeur peut paraître raisonnable, il faut la mettre en relation avec la fréquence des événements. Des collisions ont lieu toutes les 25 ns au LHC, soit à une fréquence de 40 MHz. Le détecteur CMS produit alors un flux de données de $40 \text{ To}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui est bien trop conséquent tant pour l'électronique d'acquisition que pour l'écriture en vue du stockage et la quantité de données à stocker elle-même. Afin de réduire ce débit de données, la collaboration CMS s'appuie sur un système de déclenchement (*trigger*) [86, 115-118] dont le rôle est de supprimer les événements présentant peu d'intérêt physique.

Le système de déclenchement de CMS comporte deux niveaux, le niveau « L1 » (*Level-1*) et le niveau « HLT » (*High Level Trigger*). Le L1 est constitué d'un système électronique programmable utilisant les signaux issus des chambres à muons et des calorimètres pour estimer l'intérêt d'un événement.

7. La bascule est la densité de probabilité de donner un signal ou non. Il est en général favorable d'avoir une bascule rapide à une valeur définie afin de limiter le domaine de réponse aléatoire.

ment, par exemple par la présence de paires de muons. Le L1 conserve ou rejette ainsi un événement en moins de $3,2 \mu\text{s}$ [86] et réduit la fréquence des événements à analyser de 40 MHz à 100 kHz, limite imposée par l'électronique de lecture [117]. La structure du L1 est illustrée sur la figure 3.23.

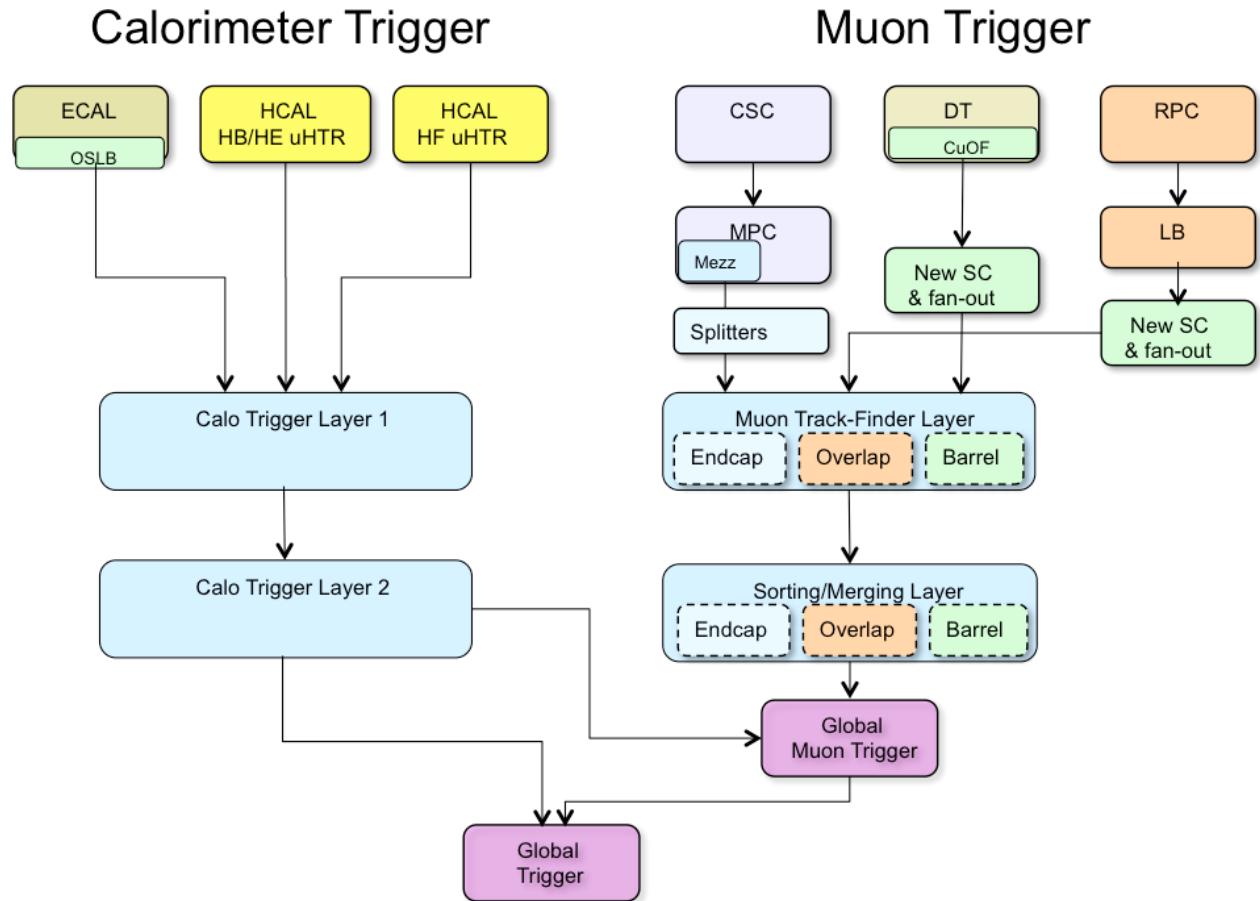


Figure 3.23 – Architecture du système de déclenchement L1 [118].

Le second niveau de déclenchement, le HLT, a accès à l'ensemble des signaux issus du détecteur. Une reconstruction simple des événements est réalisée sur une ferme de calcul et permet d'identifier les photons, muons, électrons et jets de l'événement. Des calculs plus complexes, similaires à ceux utilisés dans les analyses finales, peuvent ainsi être réalisés au besoin [86]. Il est possible de concevoir de nombreuses conditions de sélection sur les particules présentes, leur énergie, etc. Il existe ainsi de nombreux chemins de déclenchement. La reconstruction simple des événements et leur sélection se fait en un temps maximal de 50 ms. La fréquence des événements conservés est ainsi abaissée à 100 Hz [86, 117], fréquence raisonnable pour enregistrer les données.

5 Événements simulés

La simulation d'événements permet de comparer les résultats expérimentaux aux prédictions théoriques. Elle se déroule en deux temps.

Premièrement, les processus physiques prédits par le modèle théorique à tester sont simulés. La nature probabiliste de ces processus mène à utiliser un générateur d'événements Monte-Carlo. Cette étape est détaillée en section 5.1. Les particules issues des collisions sont alors obtenues ainsi que toute l'historique de leurs formations à partir des particules initiales entrant en collision.

Deuxièmement, la propagation de ces particules dans le détecteur, leurs interactions avec ses différents composants et les signaux qui en résultent sont également simulés. Cette simulation du détecteur est l'objet de la section 5.2. Cette méthode permet d'obtenir une estimation des signaux devant être observés avec le détecteur si le modèle testé est le modèle décrivant effectivement l'Univers.

5.1 Génération d'événements

Lorsque deux protons entrent en collision, ce sont leurs constituants respectifs qui interagissent. Ces constituants portent une fraction x de l'énergie totale du proton, comme expliqué dans la section 3.3. Le nombre de constituants différents en jeu ainsi que leurs modes d'interactions peuvent donner une structure de l'événement complexe, comme illustré sur la figure 3.24.

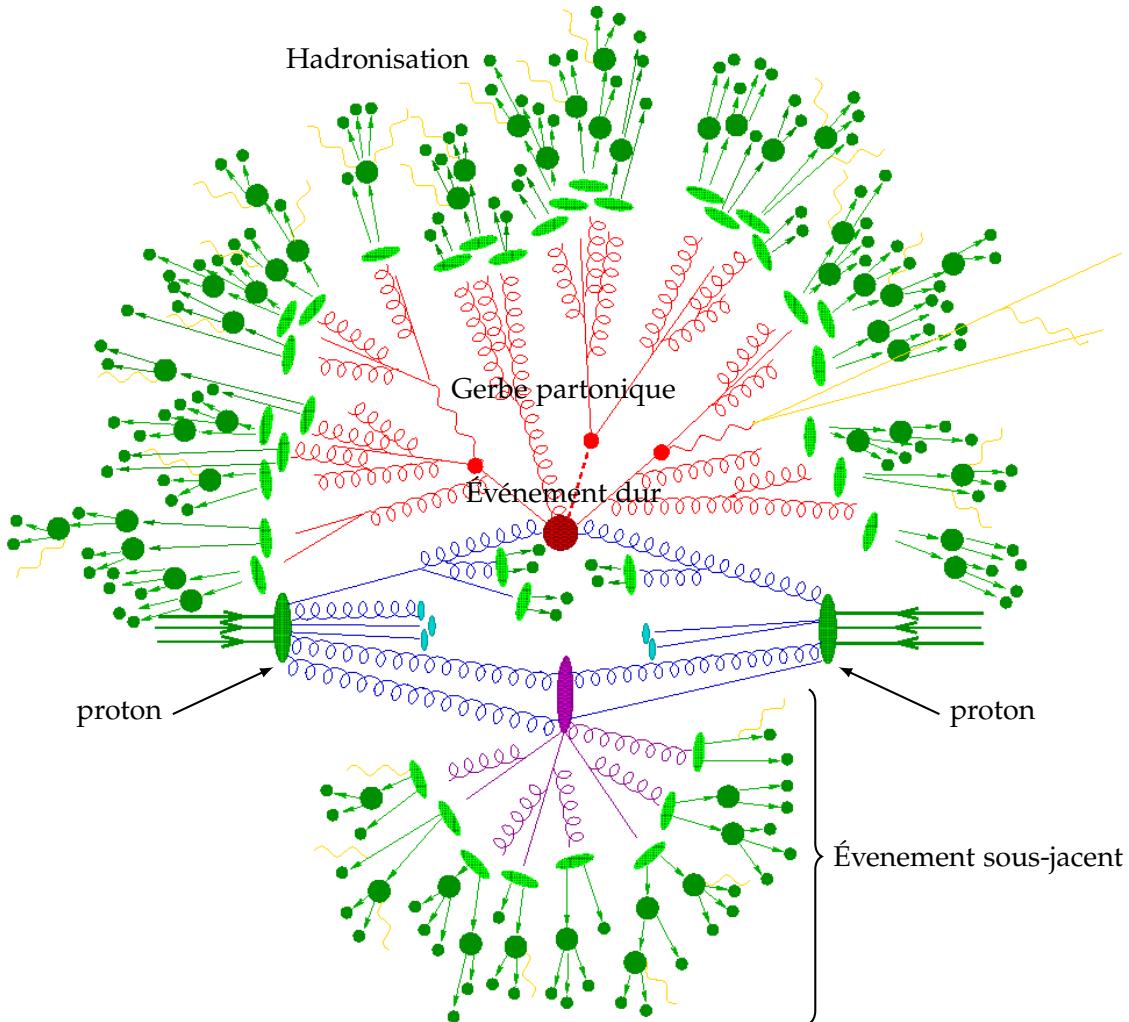


Figure 3.24 – Représentation d'une collision de protons [119].

La description analytique de ces événements est réalisée grâce à la théorie des perturbations. À l'aide des règles de Feynman présentées dans l'annexe B, il est possible de calculer l'*« élément de matrice »* permettant de décrire le passage d'un état initial à un état final. Les événements sont alors générés à un ordre perturbatif donné. La plupart des processus sont ainsi disponibles à l'ordre dominant (LO, *Leading Order*). Leur génération peut se faire par des générateurs [120], comme MADGRAPH [121] et PYTHIA [122, 123]. Dans certains cas, les ordres supérieurs (NLO, *Next-to-Leading Order*, NNLO, *Next-to-Next-to-Leading Order*, etc.) sont également disponibles grâce à des générateurs NLO tels que POWHEG [124] et MC@NLO [125].

Ces générateurs donnent ainsi le processus initial de la collision, duquel sont issues de nouvelles particules. Cependant, les particules possédant une charge de couleur comme les quarks ne peuvent subsister seules à cause du confinement de couleur, phénomène abordé dans le chapitre 2. Des étapes de génération supplémentaires sont alors nécessaires afin de décrire l'évolution ultérieure de ces particules. Il s'agit de la formation de la gerbe partonique et de l'hadronisation, détaillées dans le chapitre 4. Des générateurs comme PYTHIA [122, 123] et HERWIG [126] permettent de simuler le processus initial ainsi que ces étapes ultérieures.

Enfin, lors d'une collision de protons et plus généralement de hadrons, plusieurs interactions entre les constituants des hadrons peuvent survenir. L'interaction emportant la plus grande fraction

de l'énergie des hadrons est l'« interaction dure ». Les autres interactions constituent l'événement sous-jacent.

5.2 Simulation du détecteur

Une fois simulée la physique de l'événement, indépendante du détecteur utilisé, il faut simuler la réponse du détecteur à cet événement. La propagation des particules est alors simulée en prenant en compte la présence du champ magnétique courbant les trajectoires des particules chargées.

Les désintégrations de certaines particules ont lieu dans le volume du détecteur et sont également simulées. La modélisation du détecteur permet de simuler les déviations des particules dues à la traversée de la matière constituant le détecteur [127, 128] ainsi que les interactions propres à la détection de ces particules comme les traces, les gerbes électromagnétiques et hadroniques. Alors, la modélisation de l'électronique et du système de déclenchement donnent une simulation de la réponse complète du détecteur à l'événement physique généré.

Cette simulation du détecteur est basée sur le logiciel GEANT4 [129-131]. La modélisation du câblage interne du détecteur permet d'obtenir des résultats fidèles à la réalité. Les signaux simulés du détecteur ainsi obtenus sont alors traités, comme dans le cas des données réelles, par l'algorithme de *Particle Flow*, abordé dans la section suivante, permettant de reconstruire l'événement physique à partir des signaux du détecteur.

6 Reconstruction des événements

L'analyse des événements à partir des signaux bruts issus du détecteur n'est pas aisée, qu'il s'agisse de données ou de simulations. Une interprétation de ces signaux en termes de particules physiques donne un point de départ beaucoup plus accessible. En effet, ces signaux sont comme des « symptômes » du passage des particules dans le détecteur. La reconstruction des événements consiste donc en un « diagnostic » de l'événement.

Les signaux caractéristiques des différents types de particules dans le plan transverse du détecteur CMS sont illustrées sur la figure 3.25⁸. Il s'agit de la conséquence directe de la description du détecteur de la section 4. La plupart des particules laissent des signaux dans plusieurs sous-détecteurs. Pour une particule donnée, ces signaux doivent donc présenter une corrélation.

La reconstruction des événements se fait ainsi en combinant les informations issues des différents sous-détecteurs. Un algorithme spécialement développé afin d'optimiser cette combinaison, l'algorithme de *Particle Flow* (PF) [132, 133], a pour rôle de réaliser cette reconstruction. Dans un premier temps, l'algorithme PF reconstruit les éléments d'identification des particules à partir des signaux de chaque sous-détecteur. Dans un second temps, ces éléments d'identification sont combinés afin de reconstruire les particules de l'événement. Les sections 6.1 et 6.2 présentent ces deux étapes.

6.1 Éléments d'identification du *Particle Flow*

6.1.1 Traces des particules chargées et vertex

Les particules chargées laissent des traces de leur passage dans le trajectographe et, dans le cas des muons, dans les chambres à muons. La structure du trajectographe présentée en section 4.3 ne donne pas de traces continues mais des points de passage de ces particules.

Les traces des particules sont alors reconstruites à partir de ces points de passage à l'aide d'une méthode itérative [134]. Les traces présentant au moins huit points de passage avec au plus un point manquant le long de l'extrapolation obtenue sont considérées pour la suite de la reconstruction [132]. Il est également requis que les traces proviennent d'un cylindre de quelques millimètres de rayon autour du faisceau et qu'elles correspondent à une impulsion transverse minimale de 0,9 GeV. Les performances de cette méthode sont discutées dans la référence [99].

8. Dans toute la suite de ce manuscrit, les schémas des événements dans le détecteur utilisent la même présentation que sur la figure 3.25, en particulier pour les couleurs des sous-détecteurs et des particules.

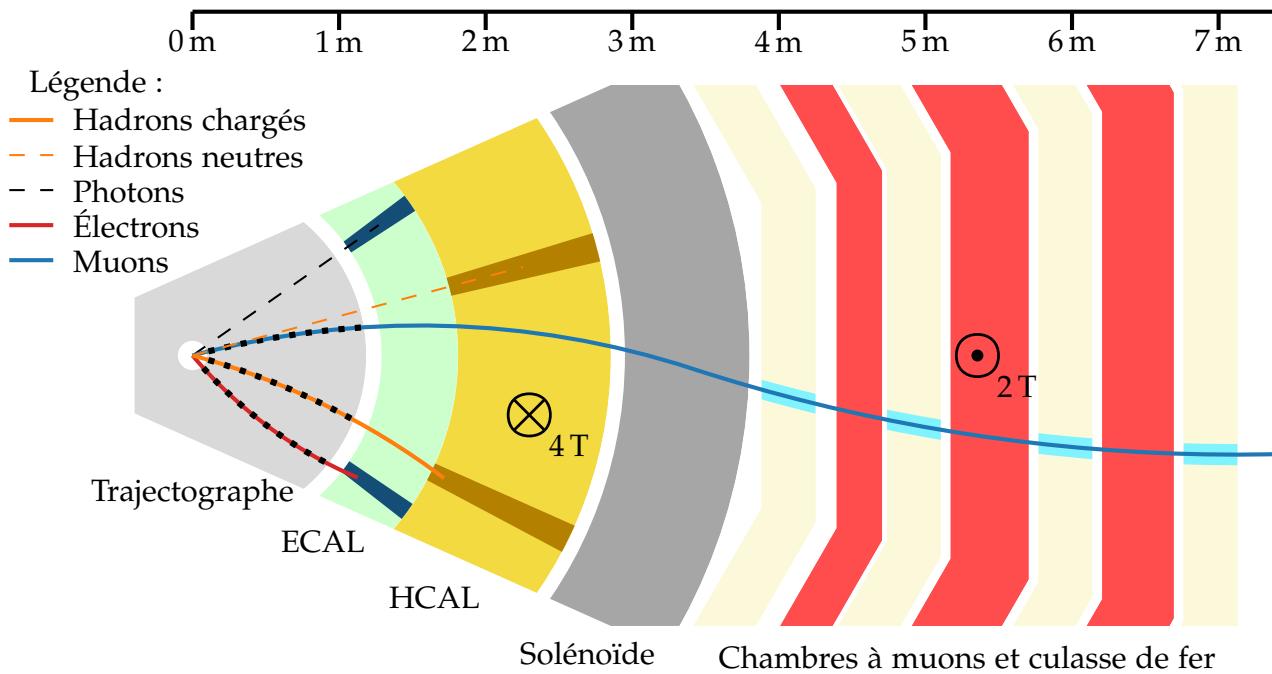


Figure 3.25 – Coupe transverse schématique du détecteur CMS et signaux caractéristiques laissés par les particules. Les hadrons forment un dépôt dans le HCAL. Les hadrons chargés présentent de plus une trace dans le trajectographe dont l'extrapolation doit passer par ce dépôt. De même, les photons et électrons forment un dépôt dans le ECAL et les électrons présentent une trace dans le trajectographe dont l'extrapolation doit passer par ce dépôt. Enfin, les muons se propagent à travers tout le détecteur et laissent une trace dans les chambres à muons dont l'extrapolation doit correspondre à une trace du trajectographe.

La combinaison de ces traces permet de reconstruire les vertex d'interactions de l'événement. Plusieurs vertex sont présents du fait de l'empilement. Le vertex principal est choisi comme étant le vertex dont la somme des impulsions transverses au carré des traces en provenance est la plus élevée, les autres sont considérés comme des vertex de l'empilement. L'efficacité de reconstruction du vertex principal est ainsi de l'ordre de 100 %, celle des vertex de l'empilement de 70 % [135].

Les particules peuvent être déviées par interaction avec la matière du trajectographe [127, 128]. Un algorithme dédié à ce phénomène est utilisé et permet de déterminer les lieux de ces interactions, représentés sur la figure 3.26. La structure du trajectographe se retrouve et le taux de mauvaise reconstruction est réduit par un traitement spécifique des traces présentant de telles déviations.

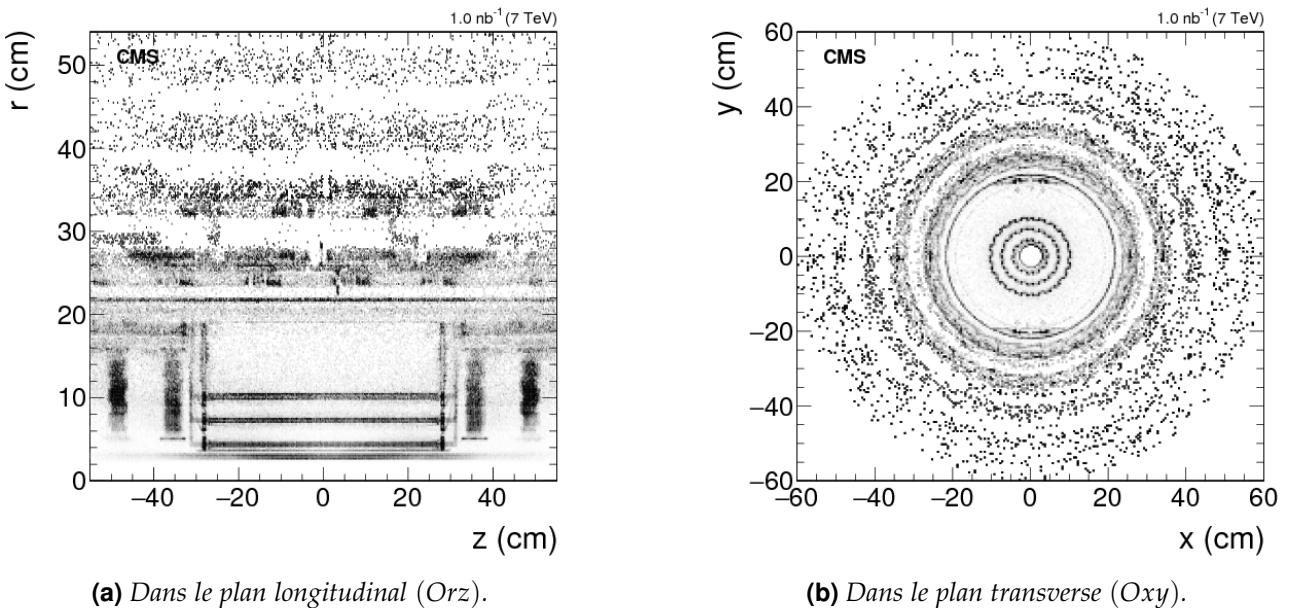
Les traces des électrons et des muons présentent des spécificités particulières. Les électrons émettent avant de parvenir au ECAL une fraction non négligeable de leur énergie par *bremssstrahlung*, c'est-à-dire sous forme de photons. Les performances de reconstruction des électrons dépendent ainsi fortement de la capacité à identifier ces photons et mesurer leurs énergies. Dans le cas des muons, les signaux de leur passage dans le trajectographe et dans les chambres à muons permettent de définir trois types de traces pour les éléments de reconstruction :

- les muons seuls (*standalone muons*), reconstruits uniquement à partir des signaux des chambres à muons ;
- les muons globaux (*global muons*), obtenus par la correspondance d'une trace dans le trajectographe avec l'extrapolation de la trace d'un muon seul ;
- les muons du trajectographe (*tracker muons*) sont les traces du trajectographe d'impulsion transverse supérieure à 0,5 GeV dont l'extrapolation passe par une des chambres à muons ayant détecté le passage d'une particule.

Plus de détails sont disponibles dans les sections 3.2 et 3.3 de la référence [132].

6.1.2 Dépôts dans les calorimètres

Les dépôts dans les calorimètres sont regroupés de proche en proche en agglomérats (*clusters*) [132], indépendamment pour chaque sous-partie des calorimètres. Plusieurs raisons existent



(a) Dans le plan longitudinal (Orz).

(b) Dans le plan transverse (Oxy).

Figure 3.26 – Carte des points d’interactions entre particules des événements et matière composant le détecteur [103, 132] à partir de données prises en 2011 à $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$.

à cette agglomération :

- détecter et mesurer les énergies et directions des particules neutres stables comme les photons et les hadrons neutres ;
- séparer les dépôts des particules neutres de ceux des particules chargées ;
- reconstruire et identifier les électrons et les photons issus du *bremssstrahlung* correspondant ;
- améliorer la mesure de l’énergie des hadrons chargés dont les traces sont imprécises.

La construction de ces agglomérats commence par l’identification des cellules des calorimètres mesurant une énergie supérieure à un seuil, défini pour chaque sous-partie des calorimètres. Les cellules adjacentes sont ajoutées à l’agglomérat. Puis, toute cellule avec au moins un coin en commun avec une cellule déjà dans l’agglomérat et mesurant une énergie supérieure à deux fois le niveau moyen du bruit est ajoutée à l’agglomérat.

Les photons et les hadrons neutres ne peuvent être reconstruits qu’à l’aide de leurs dépôts dans les calorimètres. Des dépôts isolés vis-à-vis des traces de particules chargées sont ainsi une signature claire des particules neutres. Cependant, un dépôt de particule neutre situé au même endroit qu’un dépôt de particule chargée est identifié comme un excès d’énergie par rapport à l’énergie déterminée à l’aide du trajectographe. Les agglomérats obtenus sont alors calibrés afin de pouvoir identifier les dépôts de particules neutres chevauchant un dépôt de particule chargée. Plus de détails sont disponibles dans la section 3.5 de la référence [132].

6.2 Identification et reconstruction des particules

Des éléments d’identification du PF dans différents sous-détecteurs sont généralement dus à une même particule. La reconstruction des particules se fait alors par association de ces éléments. L’association des éléments dus à une particule est uniquement limitée par la granularité des sous-détecteurs et par le nombre de particules par unité d’angle solide [132]. De même, l’association de tous les éléments dus à une seule particule est limitée par la quantité de matière traversée en amont des calorimètres ou, le cas échéant, des chambres à muons, pouvant dévier la particule [127, 128].

Un algorithme teste les paires d’éléments de reconstruction possibles. Afin de limiter les temps de calcul, seules les paires d’éléments les plus proches entre eux dans le plan (η, ϕ) sont considérées. Des conditions supplémentaires sont requises afin d’associer deux éléments et sont détaillées dans les sections suivantes. Lorsque deux éléments sont associés, une distance est définie par l’algorithme afin de quantifier la qualité de cette association. Des « blocs » du PF sont ainsi obtenus par association des éléments de reconstruction. Selon le contenu de ce bloc, un type de particule est reconstruit. Ces

différents types de particules sont détaillés dans les sections qui suivent.

6.2.1 Muons

Les muons sont reconstruits à partir des éléments d'identifications que sont les muons globaux, seuls et du trajectographe définis dans la section 6.1.1.

Tout d'abord, les muons globaux isolés, c'est-à-dire sans autre activité dans le voisinage de la trajectoire correspondante, sont sélectionnés [132]. Les traces additionnelles et les dépôts d'énergie dans les calorimètres se situant dans un cône de rayon ΔR inférieur à 0,3 dans le plan (η, ϕ) , où

$$\Delta R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2, \quad (3.12)$$

sont également associés au muon global. Il est requis que la somme des impulsions transverses et des énergies de ces traces et dépôts n'excède pas 10 % de l'impulsion transverse du muon global. Ce critère est suffisant pour rejeter les hadrons réussissant à traverser le HCAL. Ensuite, les muons globaux non isolés sont sélectionnés à l'aide d'un critère d'identification strict (*Tight muon ID*) [114] auquel la présence d'au moins trois segments de trace compatibles est requise.

Les muons non identifiés à ce stade peuvent l'être en utilisant les muons seuls et les muons du trajectographe. Les muons seuls présentant un grand nombre de signaux dans les chambres à muons, au moins 23 dans les DT (pour un maximum possible de 32) ou 15 dans les CSC (pour un maximum possible de 24), et dont l'ajustement de la trace à ces signaux est de bonne qualité sont ainsi retenus. Les muons du trajectographe sont également retenus s'ils contiennent au moins 13 points de passage dans le trajectographe et que les agglomérats dans les calorimètres sont compatibles avec la traduction de la trace correspondante en tant que muon.

La résolution sur l'impulsion transverse des muons reconstruits est de 1 % dans le bâillet et 3 % dans les bouchons pour les muons d'impulsion transverse inférieure à 100 GeV et inférieure à 7 % dans le bâillet jusqu'à $p_T = 1$ TeV [114]. L'efficacité de reconstruction est de 95 % et le taux d'identification de hadrons en tant que muons inférieur à 1 %. Les éléments d'identification du PF utilisés pour reconstruire les muons sont retirés dans la suite du processus de reconstruction de l'événement.

6.2.2 Électrons et photons isolés

L'identification des électrons et des photons isolés se base sur les éléments d'identification du PF provenant du trajectographe et du ECAL. De par la présence de la matière du trajectographe, les électrons émettent des photons par *bremssstrahlung* et les photons se convertissent en paires e^+e^- , ces électrons étant également sujets au *bremssstrahlung*, etc. C'est pour cela qu'électrons et photons isolés sont traités de manières similaires pour leur reconstruction.

Un candidat électron est défini lorsqu'une trace du trajectographe, extrapolée jusqu'au ECAL, est associée à un dépôt d'énergie, si ce dépôt n'est pas lui-même relié à trois autres traces ou plus. Les candidats photons isolés correspondent aux dépôts du ECAL avec une énergie transverse supérieure à 10 GeV n'étant pas associé à une trace. Pour tous ces candidats, la somme des énergies mesurées dans les cellules du HCAL se situant dans un cône de rayon ΔR inférieur à 0,15 dans le plan (η, ϕ) ne doit pas correspondre à plus de 10 % de l'énergie du dépôt du ECAL. Les traces identifiées comme celles de conversions de photons et les dépôts du ECAL associés sont de plus rattachées au candidat initial.

Les électrons et photons isolés sont alors obtenus en soumettant aux candidats définis précédemment des critères d'identification, prenant en compte jusqu'à 14 variables [132]. Les définitions exactes de ces critères varient d'une année à l'autre en fonction des performances du détecteur et plusieurs niveaux d'exigence existent. Les éléments d'identification du PF utilisés pour reconstruire les électrons et photons isolés sont retirés dans la suite du processus de reconstruction de l'événement.

6.2.3 Hadrons et photons non isolés

Les muons, électrons et photons isolés ayant été reconstruits, seuls les hadrons et les photons non isolés issus de la formation des jets et de l'hadronisation restent à être reconstruits. La formation des

jets ainsi que l'hadronisation sont détaillées dans la section 2 du chapitre 4. Ces particules sont généralement détectées comme des hadrons chargés (π^\pm, K^\pm , protons), des hadrons neutres (K_L , neutrons), des photons non isolés (désintégrations des π^0) et plus rarement comme des muons (désintégrations de hadrons lourds).

Dans la région d'acceptance du trajectographe ($|\eta| < 2,5$), les photons non isolés et les hadrons neutres sont reconstruits respectivement à partir des dépôts d'énergie dans les ECAL et HCAL non associés à une trace. Une priorité est donnée aux photons dans la mesure où 25 % de l'énergie des jets est portée par ces particules alors que seulement 3 % de l'énergie des jets est déposée dans le ECAL par les hadrons neutres. Au-delà de l'acceptance du trajectographe, il n'est pas possible de faire la distinction entre hadrons neutres et chargés. Près de 25 % de l'énergie des jets est ainsi déposée dans le ECAL et les agglomérats du ECAL se situant dans la même région qu'un agglomérat du HCAL sont considérés comme dus à la même gerbe hadronique, c'est-à-dire au même hadron. Les autres dépôts du ECAL sont considérés comme dus à des photons.

Les hadrons chargés sont identifiés à partir des agglomérats restant dans le HCAL, associés aux traces dans le trajectographe non utilisées pour l'identification des particules précédentes. Ces traces peuvent elles-mêmes être reliées à un agglomérat résiduel du ECAL. Pour chaque bloc du PF ainsi construit, l'énergie dans les calorimètres est comparée à la somme des moments des traces. Si un excès est observé avec les calorimètres, il est interprété comme la présence d'une particule neutre supplémentaire. Si cet excès est inférieur à l'énergie dans le ECAL et plus grand que 500 MeV, alors la particule neutre est considérée comme étant un photon d'énergie égale à cet excès. Sinon, l'énergie dans le ECAL donne un photon et si la partie de l'excès dans le HCAL est supérieure à 1 GeV, un hadron neutre est également considéré. Puis, à partir de l'énergie calorimétrique restante, chaque trace du bloc du PF donne un hadron chargé.

6.3 Énergie transverse manquante

Des particules neutres interagissant peu avec le détecteur, en particulier les neutrinos, peuvent être produites lors des collisions et se propager sans laisser de signal dans le détecteur, les rendant ainsi invisibles. Toutefois, lorsque de telles particules sont produites en association avec des particules détectées, leur présence peut être déduite du déséquilibre dans le moment total des particules de l'événement [136].

Les collisions de protons, dont la phénoménologie est discutée section 3.3, présentent une impulsion totale dans le plan transverse nulle dans l'état initial. Par conservation, l'impulsion totale dans le plan transverse est nulle dans l'état final. La somme des impulsions transverses des particules invisibles doit donc compenser celle des particules reconstruites, c'est-à-dire

$$\sum_{\text{toutes les particules}} \vec{p}_T = \vec{0} \Leftrightarrow \sum_{\text{particules invisibles}} \vec{p}_T + \sum_{\text{particules reconstruites}} \vec{p}_T = \vec{0} \Leftrightarrow \sum_{\text{particules invisibles}} \vec{p}_T = - \sum_{\text{particules reconstruites}} \vec{p}_T. \quad (3.13)$$

L'énergie transverse manquante (MET, *Missing Transverse Momentum*) est ainsi définie comme

$$\vec{E}_T^{\text{miss}} = - \sum_{\text{particules reconstruites}} \vec{p}_T, \quad E_T^{\text{miss}} = |\vec{E}_T^{\text{miss}}|, \quad (3.14)$$

et représente l'impulsion transverse totale des particules invisibles. Cette définition correspond à la MET « brute » (*raw MET*) et doit être corrigée des effets de reconstruction de l'événement. C'est en particulier le cas lors de la calibration en énergie des jets, ce qui est abordé dans la section 4 du chapitre 4.

7 Conclusion

Le détecteur CMS, exploité par la collaboration du même nom, est le dispositif expérimental utilisé dans cette thèse. Il s'agit d'une des quatre grandes expériences installées au LHC, le plus puissant des collisionneurs de hadrons au monde à ce jour, qui se trouve au CERN.

L'acronyme « CERN » signifie Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, mais le CERN correspond aujourd'hui à l'organisation européenne pour la recherche nucléaire. Basé au Nord-Ouest de Genève, le CERN s'étend des deux côtés de la frontière franco-suisse et comporte de nombreuses installations expérimentales de physique nucléaire et des particules, entre autres. Des innovations majeures proviennent du CERN, comme les écrans tactiles, le Web et la hadronthérapie.

Le LHC, le Grand Collisionneur de Hadrons, est un accélérateur de hadrons circulaire de 27 km de circonférence. Il permet d'atteindre des énergies de collision dans le centre de masse de 13 TeV pour des protons et il est prévu de passer à 14 TeV dès cette année. Les expériences ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf, TOTEM et MoEDAL y sont installées.

La composition et le fonctionnement du détecteur CMS ont été détaillées. Ce détecteur est de forme cylindrique et possède une structure en couches concentriques, chacune étant un sous-détecteur ayant un rôle précis. Tout d'abord, le trajectographe permet d'obtenir les trajectoires des particules chargées. Puis, le calorimètre électromagnétique stoppe les électrons et les photons en mesurant leurs énergies. Ensuite, le calorimètre hadronique fait de même avec les hadrons. La couche suivante est le solénoïde qui ne détecte pas les particules mais produit un champ magnétique de 4 T afin de courber les trajectoires des particules chargées. Enfin, la couche externe est constituée d'une culasse en fer pour le retour du champ magnétique dans laquelle sont insérées des chambres à muons, détectant le passage de ces particules.

Les 40 millions d'événements par seconde du LHC donnent une quantité de données bien trop importante pour tous les stocker. Un système de déclenchement à deux niveaux est utilisé afin de n'en conserver que 100 par seconde environ. Le premier niveau se base sur les signaux bruts du détecteur tandis que le second procède à une reconstruction simple de l'événement pour l'analyser plus en détails.

Une simulation d'événements physiques et du détecteur lui-même permettent d'obtenir une estimation des observations attendues pour un modèle théorique donné. Les données et les simulations sont alors traitées par un algorithme de reconstruction. Cet algorithme se base sur les signaux du détecteur et leurs corrélations, en particulier spatiales, afin d'estimer la nature et les propriétés des particules présentes lors de l'événement. Certaines particules comme les neutrinos peuvent ne pas laisser de signal dans le détecteur. Dans ce cas, leur présence est déduite du déséquilibre dans le moment total des particules de l'événement qui doit être nul dans le plan transverse.

Les contenus en particules des événements physiques réels et simulés ainsi que les propriétés de ces particules sont ainsi obtenus, permettant de réaliser des analyses de physique des particules. Cependant, la reconstruction des événements n'est pas parfaite en l'état et des corrections doivent être apportées aux différents objets qu'ils contiennent. C'est en particulier le cas des jets, sujets du chapitre suivant dans lequel la phénoménologie de leur formation ainsi que leur calibration en énergie sont détaillées.

Une fois ces corrections appliquées, la comparaison des données aux simulations permet de tester le modèle standard et des modèles allant au-delà comme l'extension supersymétrique minimale du modèle standard (MSSM, *Minimal Supersymmetric extension of Standard Model*) détaillée dans le chapitre 2. Le chapitre 5 présente une analyse expérimentale menée pour la recherche d'un boson de Higgs supplémentaire prédit par ce modèle.

Chapitre 4

Calibration en énergie des jets

Sommaire

1	Introduction	65
2	Formation des jets	66
2.1	Gerbe partonique	66
2.2	Hadronisation	67
3	Reconstruction des jets	68
3.1	Algorithmes de regroupement	69
3.2	Identification des jets dans CMS	70
3.3	Saveur des jets	71
4	Calibration en énergie des jets dans CMS	74
4.1	Correction de l'empilement	77
4.2	Correction de la réponse du détecteur en p_T et en η	78
4.3	Corrections résiduelles	79
4.4	Incertitude sur la correction en énergie des jets	82
4.5	Correction de la résolution en énergie	82
5	Phénoménologie des événements $\gamma + \text{jets}$	84
5.1	Principe des événements $\gamma + \text{jets}$ et réponse balancée	84
5.2	Activité additionnelle des jets	86
6	Correction résiduelle absolue en p_T avec les événements $\gamma + \text{jets}$	86
6.1	Événements utilisés	86
6.2	Analyse	90
6.3	Résultats	95
7	Correction de la résolution en énergie avec les événements $\gamma + \text{jets}$	102
7.1	Définition de la résolution en énergie des jets	103
7.2	Analyse	103
7.3	Résultats	105
8	Conclusion	105

1 Introduction

L'interaction forte est abordée dans le chapitre 2. Les particules portant une charge de couleur non nulle y sont sensibles. Il s'agit des quarks et des gluons, également nommés « partons ». La constante de couplage de l'interaction forte, α_s , décroît avec l'énergie. Ainsi se produit à haute énergie le phénomène de « liberté asymptotique ».

L'échelle d'énergie atteinte au LHC, de l'ordre du TeV, permet de réaliser des calculs perturbatifs car dans ce cas $\alpha_s \rightarrow 0$. Toutefois, cela n'est vrai qu'au moment de la collision initiale entre les protons. En effet, les partons issus de cette collision, du fait de l'interaction forte à laquelle ils sont sensibles, vont émettre d'autres partons. Par conservation de l'énergie, l'énergie portée par une de ces particules diminue au fur et à mesure de ces émissions et α_s augmente. Arrivé à des énergies de l'ordre de la centaine de MeV, il n'est plus possible de réaliser des calculs perturbatifs. Le phénomène de confinement de couleur réapparaît alors et les partons sont ainsi confinés au sein de hadrons, dont

la charge de couleur est nulle. Ce processus est appelé « hadronisation ». Les partons produits lors des collisions de haute énergie se manifestent ainsi sous la forme d'un flux collimé de particules, un « jet ».

Le LHC fait se collisionner des protons, aussi la collision a réellement lieu entre les constituants des protons, c'est-à-dire les quarks et les gluons. Lors des collisions de protons, il y a donc une forte probabilité d'interaction par interaction forte. De plus, les particules lourdes, instables, peuvent émettre des quarks en se désintégrant. De nombreux partons sont ainsi émis lors des collisions de protons au LHC. Il en résulte une omniprésence des jets dans les analyses réalisées dans l'expérience CMS. Leur caractérisation est donc un point essentiel pour la collaboration. Or, les jets sont des objets physiques composés de nombreuses particules. La calibration en énergie des jets est ainsi nécessaire afin d'obtenir une estimation de leur énergie « vraie » la plus fidèle possible.

Le processus de formation des jets est décrit d'un point de vue théorique dans la section 2. Puis, la méthode de reconstruction des jets dans le cadre de l'expérience CMS est présentée dans la section 3. Ensuite, le principe de la calibration en énergie des jets dans l'expérience CMS est abordé dans la section 4. Une des étapes de la calibration en énergie des jets est discutée plus en détails. La section 5 présente la phénoménologie des événements utilisés et la section 6 aborde la calibration en énergie des jets à l'aide de ces mêmes événements. Enfin, la correction de la résolution en énergie des jets à l'aide de ces mêmes événements est présentée dans la section 7.

2 Formation des jets

Lorsqu'un parton est issu de la collision, il possède une haute énergie et émet alors, par interaction forte, d'autres partons. Par conservation, l'énergie portée par chaque parton ainsi obtenu diminue et par conséquent, α_s augmente.

Tant que l'échelle d'énergie est suffisamment grande pour que $\alpha_s \ll 1$, ce qui correspond à des énergies supérieures à la centaine de MeV, il est possible de réaliser des calculs perturbatifs. L'émission de partons crée la « gerbe partonique », sujet de la prochaine section.

Au fur et à mesure des émissions, l'échelle en énergie diminue et en deçà d'une centaine de MeV, il n'est plus possible de réaliser des calculs perturbatifs car α_s augmente. Des modèles paramétriques sont alors utilisés pour caractériser le phénomène d'« hadronisation », abordés ensuite.

2.1 Gerbe partonique

Lorsqu'un parton est issu d'une collision au LHC, il se trouve dans un premier temps dans le régime de liberté asymptotique. Il émet alors d'autres partons. Ainsi, pour un événement $Z \rightarrow q\bar{q}$ comme celui de la figure 4.1a avec deux quarks dans l'état final, il est possible d'obtenir par émission d'un gluon un état $q\bar{q}g$ comme ceux illustrés sur les figures 4.1b et 4.1c, par exemple.

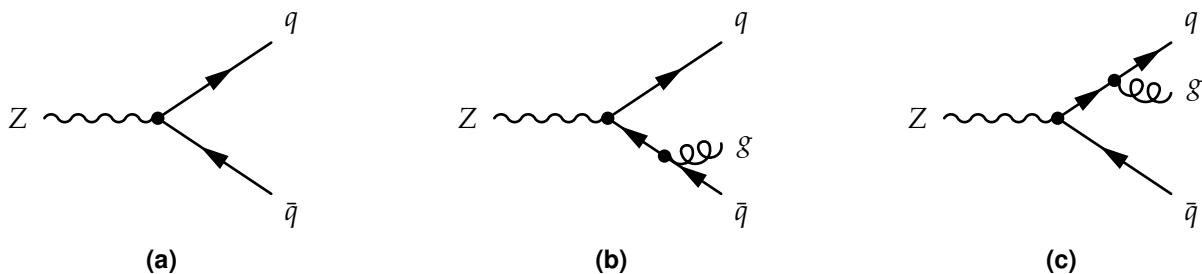


Figure 4.1 – Un boson Z se désintègre en paire quark-antiquark. Dans les cas des figures 4.1b et 4.1c, un gluon supplémentaire est émis.

Il est légitime de se demander quelle est la probabilité d'obtenir un état $q\bar{q}g$ à partir d'un état $q\bar{q}$. Des calculs de section efficace permettent d'obtenir [30], pour un état initialement à X partons dont un parton i émet un parton j ,

$$d\sigma_{X+j} \simeq \sigma_X \sum_{i \in \{X\}} \frac{\alpha_s}{2\pi} \frac{d\theta^2}{\theta^2} dz P_{ij}(z) \quad (4.1)$$

où θ est l'angle entre le parton émis j et le parton émetteur i . La grandeur $P_{ij}(z)$ est la probabilité qu'un parton de type i émette un parton de type j emportant une fraction z de l'énergie initiale de i , qui s'exprime

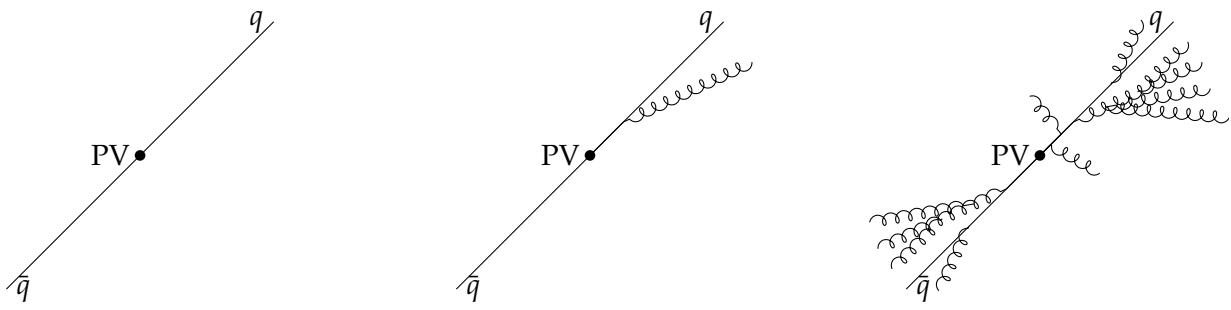
$$P_{qq}(z) = C_F \frac{1+z^2}{1-z}, \quad P_{qg}(z) = C_F \frac{1+(1-z)^2}{z}, \quad (4.2)$$

$$P_{gg}(z) = C_A \frac{z^4 + 1 + (1-z)^4}{z(1-z)}, \quad P_{gq}(z) = T_R(z^2 + (1-z)^2), \quad (4.3)$$

et $P_{g\bar{q}}(z) = P_{gq}(z)$, avec $C_F = \frac{4}{3}$, $C_A = 3$ et $T_R = \frac{1}{2}$. La probabilité d'émettre un parton supplémentaire diverge dans deux cas :

- le parton émis a une énergie faible devant celle du parton émetteur, c'est la limite infrarouge ;
- l'angle entre le parton émis et le parton émetteur est petit, c'est la limite colinéaire.

Les nouveaux partons ainsi émis et les partons initiaux continuent chacun ce processus jusqu'à ce que le phénomène de confinement de couleur réapparaisse. Pour un unique parton directement issu de la collision, une gerbe partonique est formée, c'est-à-dire un ensemble collimé de partons, comme illustré sur la figure 4.2. Ce sont ces particules qui vont participer au phénomène d'hadronisation dû au confinement de couleur.



(a) Deux quarks sont initialement produits, ce qui correspond au diagramme de la figure 4.1a.

(b) Un des quarks peut émettre un gluon, ce qui correspond au diagramme de la figure 4.1c.

(c) Le processus est réitéré, donnant un ensemble de particules colorées.

Figure 4.2 – Formation de deux gerbes partoniques à partir d'une paire de quarks.

2.2 Hadronisation

Lorsque des partons en émettent d'autres, la conservation de l'énergie implique que chaque particule, individuellement, possède une énergie de plus en plus petite. Or, comme cela est discuté dans le chapitre 2, α_s augmente lorsque l'échelle d'énergie diminue et en-deçà de quelques centaines de MeV, α_s diverge. Le phénomène de confinement de couleur réapparaît et la gerbe partonique subit le phénomène d'hadronisation. Un flux collimé de hadrons, particules de charge de couleur nulle composées de partons, est alors obtenu. Certains de ces hadrons peuvent comporter des quarks de deuxième ou troisième génération. Ils sont alors instables et peuvent être amenés à se désintégrer, auquel cas ce sont leurs produits de désintégration qui sont observés dans le détecteur.

Le phénomène d'hadronisation ayant lieu lorsque $\alpha_s \gg 1$, il n'est pas possible de réaliser des calculs perturbatifs. Afin de décrire ce phénomène, il faut avoir recours à des modèles paramétriques. Deux d'entre eux sont décrits ci-après, le modèle des cordes de Lund [137] et le modèle d'agglomération hadronique [138].

2.2.1 Modèle des cordes de Lund

Dans le modèle des cordes de Lund [137], les quarks sont reliés en paires $q\bar{q}$ par des « cordes » de couleur, de tension $\kappa \simeq 1 \text{ GeV}\cdot\text{fm}^{-1}$, comme sur la figure 4.3b. Les gluons sont décrits comme des noeuds des cordes de couleur.

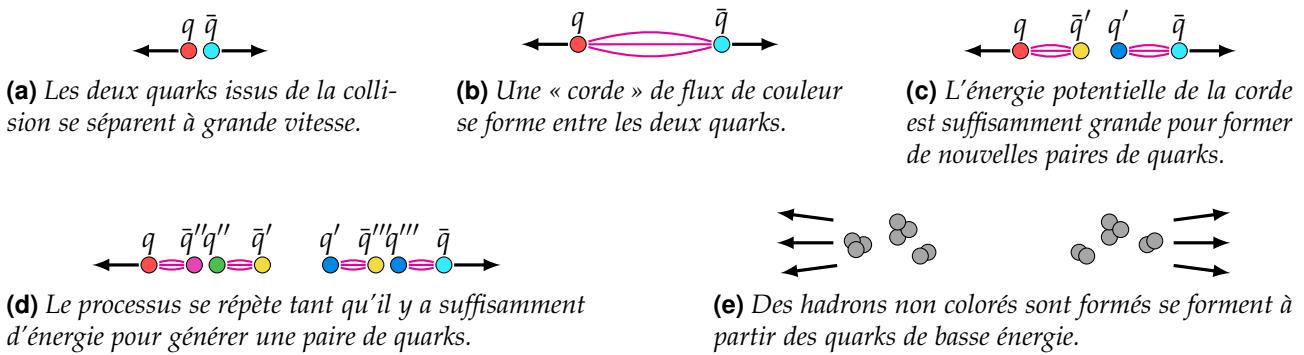


Figure 4.3 – Processus de formation de deux jets dans le cadre du modèle des cordes de Lund.

Lorsque deux charges colorées s'éloignent, l'énergie potentielle augmente. Une fois que l'énergie potentielle est suffisamment grande, une nouvelle paire $q'\bar{q}'$ est créée (fig. 4.3c), avec une probabilité proportionnelle à $\exp(-\frac{\pi}{\kappa} m_{q'})$; la probabilité d'obtenir des quarks lourds par ce processus est donc très faible. Le partage de l'énergie entre les paires de quarks est régi par une fonction de partition dont les paramètres sont estimés expérimentalement.

2.2.2 Modèle d'agglomération hadronique

L'agglomération hadronique [138] repose sur l'hypothèse de conservation des nombres quantiques ainsi que de l'énergie-impulsion entre les partons issus de la gerbe hadronique et les hadrons obtenus après hadronisation.

Dans un premier temps, les gluons de la gerbe partonique se désintègrent en paires $q\bar{q}$. Les partons, uniquement des quarks à ce stade donc, se rassemblent dans un second temps en aggrégats de charge de couleur nulle, c'est le « pré-confinement ». Deux cas de figurent se présentent alors :

- la masse de l'agrégat est proche de celle d'un hadron, l'agrégat produit ce hadron ;
- la masse de l'agrégat n'est pas proche de celle d'un hadron et son énergie est supérieure à un seuil Q_0 , cet agrégat se désintègre en agrégats plus petits et forme plusieurs hadrons.

Ce processus est illustré sur la figure 4.4.

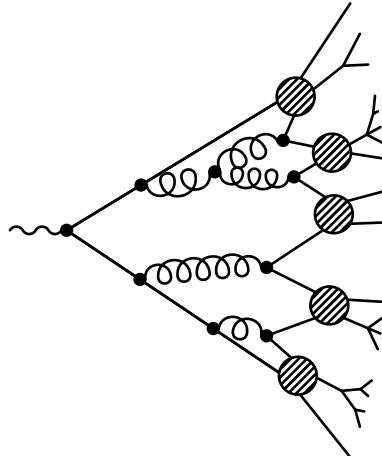


Figure 4.4 – Schématisation de l'hadronisation dans le cadre du modèle d'agglomération hadronique.

3 Reconstruction des jets

Les partons ne peuvent donc pas être directement observés dans le détecteur. Leur signature expérimentale est un flux collimé de particules stables composé de hadrons, de leptons et de photons. La présence de hadrons s'explique directement par le processus d'hadronisation décrit dans la section précédente. Les leptons proviennent de la désintégration, par interaction faible, des hadrons de saveur lourde, ou plus précisément des quarks de deuxième et troisième génération composant ces hadrons lourds. Les photons sont émis par les particules électriquement chargées.

Un processus physique comme celui de la figure 4.1a produit seulement quelques particules, en l'occurrence deux, et non des ensembles de particules, comme sur la figure 4.4 qui pourrait correspondre à l'état effectivement observé pour le processus de la figure 4.1a. Afin de pouvoir étudier le processus initial, il est nécessaire de définir une observable décrivant les partons à l'origine de ces flux collimatifs de particules stables.

Cette observable est un « jet ». À partir des particules identifiées à l'aide de l'algorithme de *Particle Flow* (PF) décrit dans la section 6 du chapitre 3, un algorithme de regroupement permet d'obtenir la liste des jets de l'événement. Il existe plusieurs algorithmes de regroupement dont le principe est décrit dans la section suivante.

3.1 Algorithmes de regroupement

Il existe deux catégories d'algorithmes permettant de regrouper les particules en jets, les algorithmes de cônes et les algorithmes de recombinaison séquentielle. Les émissions de partons sont plus importantes pour de basses énergies (limite infrarouge) ou pour un parton émis colinéaire au parton initial (limite colinéaire), comme discuté dans la section 2. Afin de conserver des prédictions de QCD vérifiables sur des jets réels, les algorithmes de regroupement doivent être insensibles à l'ajout d'une particule de basse énergie ou au partage d'une particule en deux particules d'énergies inférieures. C'est ce que l'on appelle l'insensibilité IRC, pour *InfraRed and Colinear*. La plupart des algorithmes de cônes ne sont pas IRC-insensibles, alors que la plupart des algorithmes de recombinaison séquentielle le sont.

3.1.1 Les algorithmes de cônes

Les algorithmes de cônes regroupent toutes les particules ayant une direction \vec{p} telle que la distance ΔR_{pa} à la direction de l'axe du cône \vec{a} dans le plan (η, ϕ) , où η et ϕ sont les coordonnées définies dans la section 4.1 du chapitre 3, est inférieure à une distance de coupure R_c , c'est-à-dire si

$$\Delta R_{pa}^2 = (\eta_p - \eta_a)^2 + (\phi_p - \phi_a)^2 < R_c^2. \quad (4.4)$$

Alors, la direction \vec{a} du cône est redéfinie comme étant la direction moyenne de toutes les particules rassemblées dans ce cône. Ce processus est itéré jusqu'à la stabilisation des cônes. Enfin, les cônes sont séparés en cas de superposition, une particule ne pouvant appartenir qu'à un seul jet.

L'algorithme *Seedless Infrared Safe Cone* ou SISCONE [139] est un exemple d'algorithme de cônes IRC-insensible. Dans un premier temps, tous les cônes stables possibles sont reconstruits. Ces cônes sont alors fusionnés, les cônes ayant l'impulsion transverse la plus grande absorbant des cônes d'impulsion transverse moindre dont ils contiennent déjà une fraction des constituants. Un exemple de reconstruction de jets à l'aide de l'algorithme SISCONE est présenté sur la figure 4.5.

3.1.2 Les algorithmes de recombinaison séquentielle

Les algorithmes de recombinaison séquentielle commencent par considérer que chaque particule forme un pseudo-jet d'une seule particule [140]. Puis, à l'aide d'une métrique donnée, la paire de jets les plus proches entre eux fusionne en un seul jet tant que la distance entre eux est en-deçà d'une valeur seuil. Les jets fusionnés donnent la liste des jets de l'événement. Il est également possible de fixer le nombre de jets à déterminer et non la valeur seuil de la distance entre les jets à fusionner.

Plusieurs métriques de distance peuvent être définies, chacune correspondant à un algorithme de recombinaison séquentielle proposant des regroupements différents.

Algorithme k_T [141] La distance d_{ij} entre deux jets i et j est

$$d_{ij} = \min(p_{T_i}^2, p_{T_j}^2) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}, \quad (4.5)$$

où

$$\Delta R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2 \quad (4.6)$$

avec η_x la pseudo-rapidité, ϕ_x l'angle azimutal et p_{T_x} l'impulsion transverse du jet x et R un paramètre libre. Cet algorithme a l'avantage de regrouper les particules très fidèlement vis-à-vis de la gerbe hadronique, mais les jets obtenus possèdent une géométrie spatiale irrégulière, comme cela se voit sur la figure 4.5.

Algorithme de Cambridge/Aachen [142, 143] La distance d_{ij} entre deux jets i et j est

$$d_{ij} = \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}, \quad (4.7)$$

où ΔR_{ij}^2 est défini par l'équation (4.6) et R est un paramètre libre. Le regroupement des jets est ainsi uniquement basé sur l'écart angulaire.

Algorithme anti- k_T [144] La distance d_{ij} entre deux jets i et j est

$$d_{ij} = \min \left(\frac{1}{p_{T_i}^2}, \frac{1}{p_{T_j}^2} \right) \frac{\Delta R_{ij}^2}{R^2}, \quad (4.8)$$

où ΔR_{ij}^2 est défini par l'équation (4.6), p_{T_x} l'impulsion transverse du jet x et R un paramètre libre. Le regroupement des particules se fait ainsi autour de celles de plus hautes énergies. Cet algorithme propose un regroupement des particules moins fidèle à la gerbe hadronique, mais produit des jets de forme régulière, comme cela se voit sur la figure 4.5.

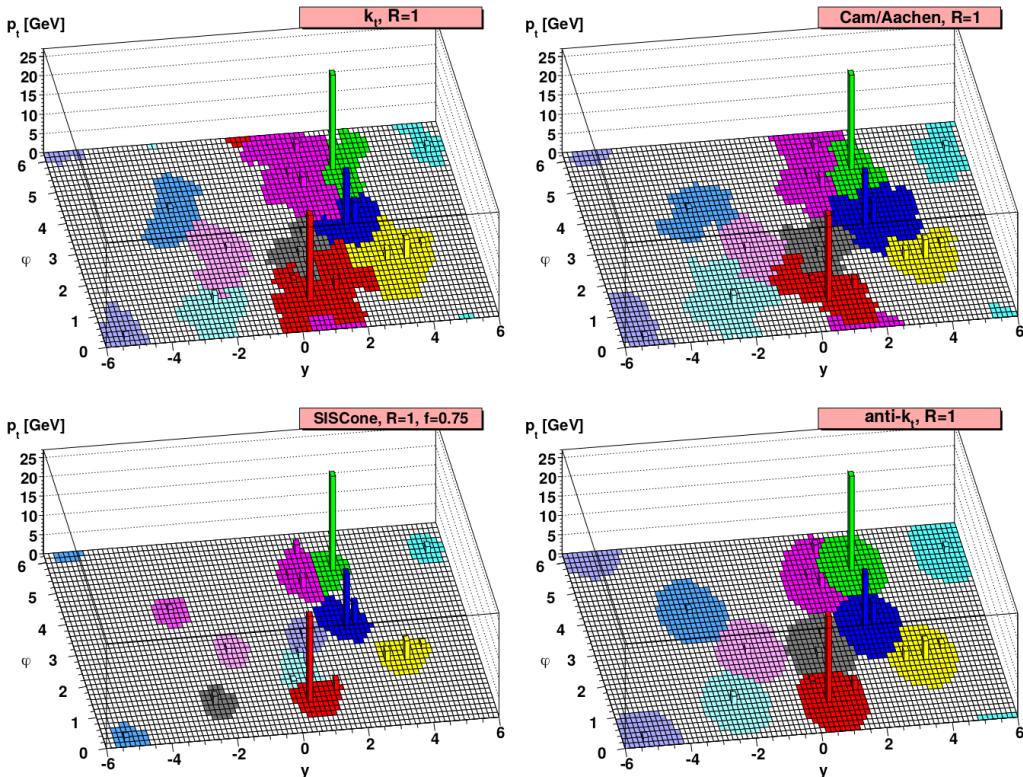


Figure 4.5 – Formes des jets reconstruits à partir de différents algorithmes pour un même événement [144]. En haut à gauche, k_T ; en haut à droite, C/A; en bas à gauche, SIScone; en bas à droite, anti- k_T . L'algorithme anti- k_T permet d'obtenir des jets de forme régulière, conique.

Le temps de calcul de ces algorithmes est un enjeu majeur au LHC. Leurs temps d'exécution sont représentés en fonction du nombre d'interactions d'empilement sur la figure 4.6. L'algorithme anti- k_T se place parmi les algorithmes les plus rapides. Dans les conditions des collisions proton-proton du LHC, il permet le traitement d'un événement en moins d'une milliseconde. C'est cet algorithme de regroupement qui est utilisé dans le cadre de l'expérience CMS. Sur la figure 4.7 sont illustrées les compositions des jets reconstruits lors des trois années du Run II. L'écart entre données et simulations n'excède généralement pas 2 %.

3.2 Identification des jets dans CMS

Les jets ainsi reconstruits à l'aide des algorithmes de recombinaison sont en fait des « candidats » jets. À l'instar des particules individuelles, des critères d'identification leur sont appliqués afin de rejeter le bruit de fond et s'assurer de la qualité des jets utilisés dans les analyses.

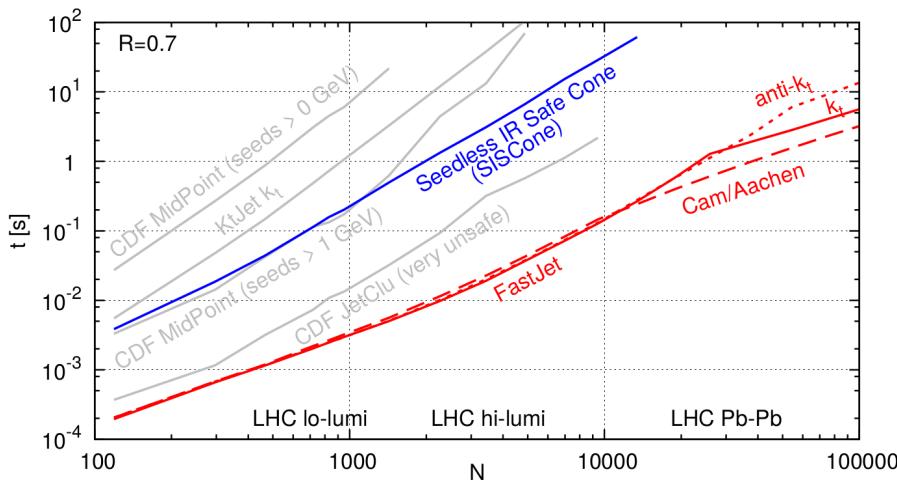


Figure 4.6 – Temps de recombinaison d'un événement dijet simulé de 50 GeV contenant N interactions d'empilement pour différents algorithmes de reconstruction des jets [145].

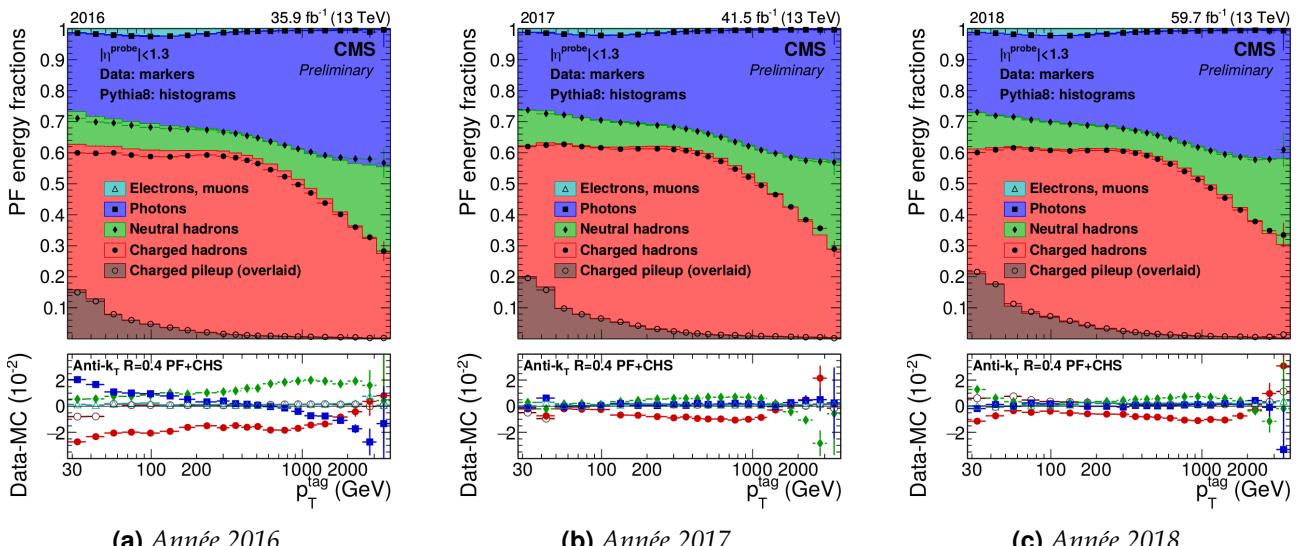


Figure 4.7 – Composition des jets reconstruits à l'aide de l'algorithme anti- k_T lors du Run II [146] en fonction de l'impulsion transverse du jet. La partie Charged pileup (overlaid) en brun correspond à la fraction du jet retirée par la procédure CHS décrite section 4.1.

Ces critères reposent sur les caractéristiques des candidats jets comme la fraction d'énergie provenant de leurs constituants neutres ou encore le nombre de ces constituants. Ces critères dépendent des années de prise de données et de la pseudo-rapidité du jet, c'est-à-dire de la région du détecteur dans laquelle il se trouve.

Les critères utilisés pour les années 2016, 2017, 2018 et 2017-UL¹, listés page 72, permettent d'obtenir une efficacité d'identification des jets supérieure à 99 % dans chacune des régions en η du détecteur. La réjection du bruit de fond est supérieure à 98 % pour $|\eta| \leq 3,0$ et supérieure à 36 % pour $|\eta| > 3,0$.

3.3 Saveur des jets

Pour étudier la physique du processus initial, la connaissance du parton à l'origine d'un jet ainsi identifié dans le détecteur est une information de choix. Il est impossible de connaître avec certitude cette particule, mais sa nature influe directement sur certaines propriétés des jets, permettant de l'estimer.

1. La dénomination « UL » signifie *Ultra-Legacy* et correspond à une réinterprétation des données récoltées une fois que la collaboration peut prendre plus de recul sur l'obtention de celles-ci.

Propriété du jet à identifier	$ \eta \leq 2,4$	$2,4 < \eta \leq 2,7$	$2,7 < \eta \leq 3,0$	$3,0 < \eta $
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$	$< 0,98$	
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$	$> 0,01$	$< 0,90$
— hadronique chargée	> 0			
— électromagnétique chargée	$< 0,99$			
Nombre de constituants				
— neutres	> 1	> 1	> 2	> 10
— chargés	> 0			

Tableau 4.1 – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2016.

Propriété du jet à identifier	$ \eta \leq 2,4$	$2,4 < \eta \leq 2,7$	$2,7 < \eta \leq 3,0$	$3,0 < \eta $
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$		$> 0,02$
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$	$< 0,99$ et $> 0,02$	$< 0,90$
— hadronique chargée	> 0			
Nombre de constituants				
— neutres	> 1	> 1	> 2	> 10
— chargés	> 0			

Tableau 4.2 – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2017.

Propriété du jet à identifier	$ \eta \leq 2,6$	$2,6 < \eta \leq 2,7$	$2,7 < \eta \leq 3,0$	$3,0 < \eta \leq 5,0$
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$		$> 0,02$
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,99$	$< 0,99$ et $> 0,02$	$< 0,90$
— hadronique chargée	> 0			
Nombre de constituants				
— neutres	> 1		> 2	> 10
— chargés	> 0	> 0		

Tableau 4.3 – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2018.

Propriété du jet à identifier	$ \eta \leq 2,6$	$2,6 < \eta \leq 2,7$	$2,7 < \eta \leq 3,0$	$3,0 < \eta \leq 5,0$
Fraction d'énergie				
— hadronique neutre	$< 0,90$	$< 0,90$		$> 0,02$
— électromagnétique neutre	$< 0,90$	$< 0,99$	$< 0,99$ et $> 0,02$	$< 0,90$
— hadronique chargée	> 0			
Nombre de constituants				
— neutres	> 1		> 2	> 10
— chargés	> 0	> 0		

Tableau 4.4 – Critères d'identification des jets à CMS pour l'analyse des données de 2017-UL.

3.3.1 Saveur de la particule initiale et caractéristiques des jets

Le quark t possède une durée de vie trop courte pour participer à l'hadronisation. Il se désintègre alors par interaction faible en un autre quark, très majoritairement un quark b , et un boson W . Le nouveau quark issu de cette désintégration forme alors un jet.

Les autres quarks, d, u, s, c et b , sont plus stables que le top et participent à l'hadronisation. Ils se retrouvent alors confinés au sein des hadrons formés.

Le quark b ne forme pas de hadron stable et se désintègre en quark c ou u par interaction faible. Dans 70 % des cas, cette désintégration se fait avec émission d'une nouvelle paire de quarks $q\bar{q}$ selon

$$b \rightarrow c q_d \bar{q}_d, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{c} q_u \bar{q}_u, \quad b \rightarrow u q_d \bar{q}_d, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{u} q_u \bar{q}_u, \quad (4.9)$$

où q_d et q_u désignent respectivement des quarks d'isospin faible bas et haut. Le nombre de constituants du jet, ainsi que le nombre de traces déplacées, est alors plus important. Dans 30 % des cas, la désintégration du quark b se fait avec émission d'une paire de leptons, un électriquement chargé et le neutrino associé, c'est-à-dire

$$b \rightarrow c \ell^- \bar{\nu}_\ell, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{c} \ell^+ \nu_\ell, \quad b \rightarrow u \ell^- \bar{\nu}_\ell, \quad \bar{b} \rightarrow \bar{u} \ell^+ \nu_\ell. \quad (4.10)$$

Le lepton chargé donne une signature caractéristique lors des collisions proton-proton du LHC.

Ces désintégrations font intervenir les modules des coefficients V_{cb} ou V_{ub} de la matrice CKM, introduite dans la section 2.3.4 du chapitre 2, dont les valeurs sont faibles; elles sont donc fortement supprimées. Les hadrons contenant un quark b ont ainsi une durée de vie τ de l'ordre de la picoseconde [147, 148] et peuvent voyager sur une distance de l'ordre du millimètre. Les traces des particules chargées issues de cette nouvelle désintégration proviennent donc d'un vertex secondaire (SV), différent du vertex primaire (PV). Ces traces sont « déplacées ». Pour chacune d'entre elles, il est possible de déterminer le paramètre d'impact (IP) au vertex primaire, dont la valeur est typiquement plus grande que pour des traces provenant du vertex primaire, comme cela est illustré sur la figure 4.8.

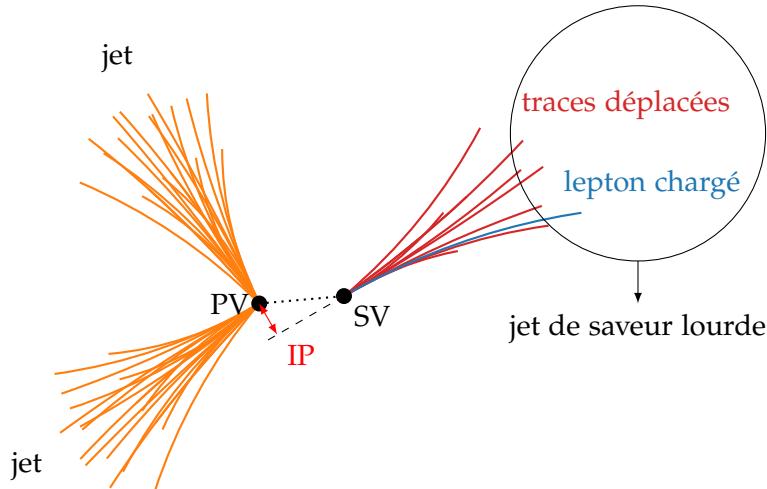


Figure 4.8 – Trois jets, dont un de saveur lourde. Les particules composant ce jet proviennent d'un vertex secondaire (SV), différent du vertex primaire (PV) où a lieu la collision entre les protons et la formation du hadron lourd à l'origine du SV. Le paramètre d'impact (IP) est également indiqué.

Le quark c suit le même schéma que le quark b . Cependant, la désintégration du quark c en quark s selon

$$c \rightarrow s q_u \bar{q}_u, \quad \bar{c} \rightarrow \bar{s} q_d \bar{q}_d, \quad c \rightarrow s \ell^+ \nu_\ell, \quad \bar{c} \rightarrow \bar{s} \ell^- \bar{\nu}_\ell, \quad (4.11)$$

fait intervenir le module du coefficient V_{cs} de la matrice CKM, proche de 1. Les hadrons contenant un quark c ont ainsi une durée de vie τ de inférieure à la picoseconde [148] et il est plus difficile d'identifier les jets issus de quarks c que ceux issus de quarks b .

Les quarks d , u et s forment des hadrons étant :

- très instables, par exemple les π^0 , dont seuls les produits de désintégration sont observés ;
- faiblement instables, par exemple les K^+ et les K^0 , qui se propagent généralement jusque dans les parties sensibles du détecteur et peuvent donc être directement observés ;
- stables, par exemple les protons, qui sont directement observés dans le détecteur.

Dans tous les cas, les traces des particules chargées observées proviennent du PV, lieu de formation du quark initial. Le phénomène décrit précédemment pour les quarks b et c n'est donc pas observable. Les jets issus de ces trois types de quarks, les plus légers, sont ainsi regroupés sous la dénomination de « jets légers ».

Les gluons portent une charge de couleur plus importante que les quarks². Les jets initiés par des gluons comportement typiquement plus de particules électriquement chargées et sont moins collimés que les jets légers [149].

3.3.2 Identification de la saveur des jets

Les jets présentent ainsi des propriétés caractéristiques, selon qu'il s'agisse de jets légers (quarks d , u ou s), de jets lourds (quarks c ou b) ou de jets issus d'un gluon. En utilisant ces propriétés, des algorithmes d'identification de la saveur des jets ont été mis au point par la collaboration CMS [150]. Les avancées récentes dans le domaine du *Deep Learning*, appliquées à l'identification des jets [151], ont permis l'amélioration de ces algorithmes. L'algorithme DEEPCSV [152] a ainsi été développé.

Les variables utilisées dans cet algorithme sont décrites dans la référence [152]. Elles sont traitées par un réseau de neurones profond de quatre couches cachées de 100 nœuds connectés les uns aux autres. Ce réseau est entraîné sur un ensemble d'événements simulés $t\bar{t}$, présentant de nombreux jets de quarks b , et multijet à l'aide des librairies KERAS [153] et TENSORFLOW [154].

Les performances ainsi obtenues pour l'algorithme DEEPCSV sont comparées à d'autres algorithmes d'identification de la saveur des jets sur la figure 4.9. Les algorithmes CMVAV2 et DEEPCSV présentent les meilleures performances en termes d'identification des jets de quark b . Pour le traitement des jets de quark c , l'algorithme DEEPCSV propose les meilleures performances. Dans les analyses présentées dans ce chapitre et le chapitre 5, c'est cet algorithme qui est utilisé afin d'identifier les jets issus de quarks c ou b .

La discrimination entre jet léger et jet initié par un gluon peut être réalisée à l'aide d'une fonction de vraisemblance [149] renvoyant un score entre 0 et 1 pour chaque jet, correspondant à la probabilité que ce jet soit issu d'un quark. La densité de probabilité de cette fonction, selon qu'il s'agisse de jets initiés par des gluons ou des quarks, est représentée sur la figure 4.10.

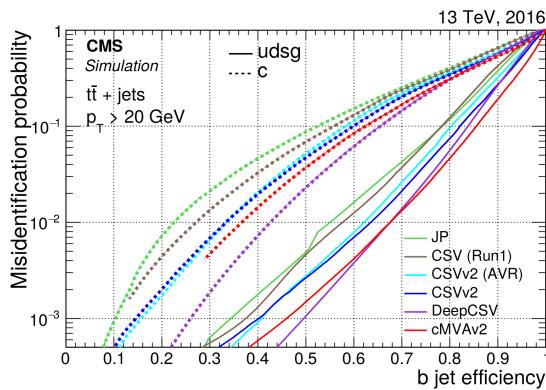
4 Calibration en énergie des jets dans CMS

Les jets sont des objets physiques composites complexes qu'il est nécessaire de calibrer, comme tout autre objet reconstruit. La précision apportée à la mesure des jets est capitale dans de nombreuses analyses, où il s'agit d'une source majeure d'incertitude systématique. Les avancées réalisées récemment sur la calibration des jets ont ainsi permis d'améliorer la précision sur la mesure de la section efficace inclusive de production de jets et de la masse du quark top [135].

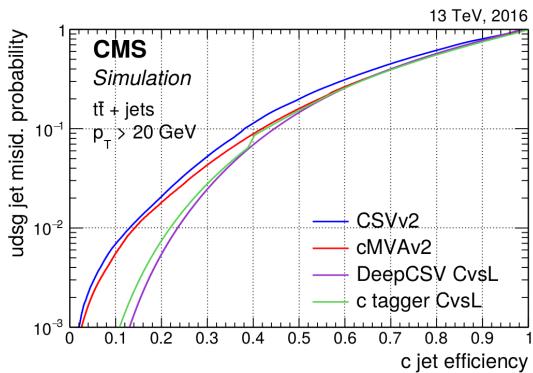
À partir des jets reconstruits par les méthodes décrites précédemment, un procédé de correction de l'énergie des jets (JEC, *Jet Energy Correction*) est réalisé. Il permet de corriger l'échelle en énergie des jets (JES, *Jet Energy Scale*) ainsi que la résolution sur cette énergie (JER, *Jet Energy Resolution*). La collaboration CMS utilise une approche factorisée dans laquelle plusieurs étapes corrigeant chacune un effet en particulier et dépendent des étapes précédentes [135]. La figure 4.11 résume ces étapes, décrites dans les sections qui suivent.

Trois stades ou « niveaux » de correction sur les particules peuvent être définis.

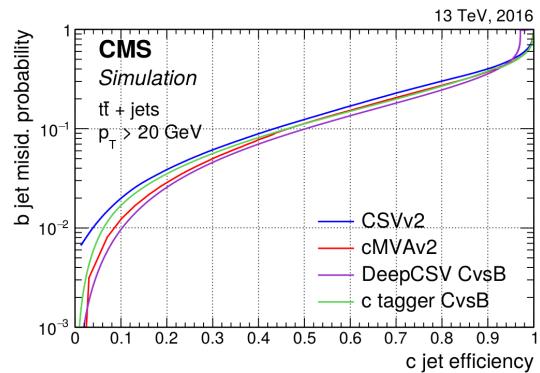
2. Les quarks portent une couleur, les antiquarks une anticolore et les gluons portent une couleur et une anticolore.



(a) Probabilité de mauvaise identification en tant que jet de quark b de jets de gluon ou quarks légers (traits pleins) ou de jets de quark c (pointillés) en fonction de l'efficacité d'identification des jets de quark b .



(b) Probabilité de mauvaise identification en tant que jet de quark c de jets de gluon ou quarks légers en fonction de l'efficacité d'identification des jets de quark c .



(c) Probabilité de mauvaise identification en tant que jet de quark b de jets de quark c en fonction de l'efficacité d'identification des jets de quark c .

Figure 4.9 – Comparaison des performances des algorithmes d'identification de la saveur des jets [152].

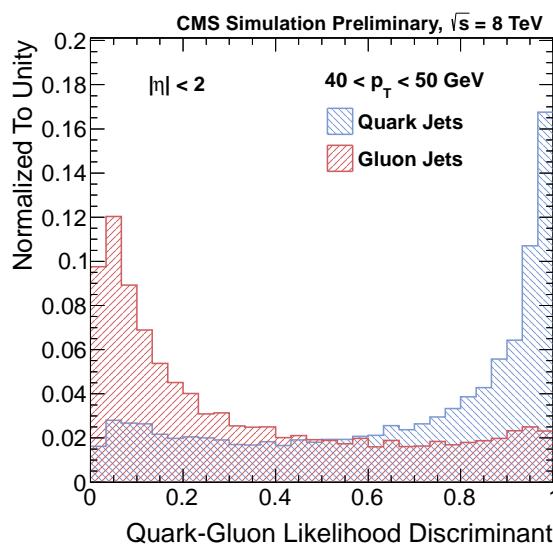


Figure 4.10 – Densité de probabilité de la fonction de vraisemblance utilisée pour discriminer les jets issus de gluons de ceux issus de quarks [149]. En rouge, pour les jets issus de gluons. En bleu, pour des jets issus de quarks.

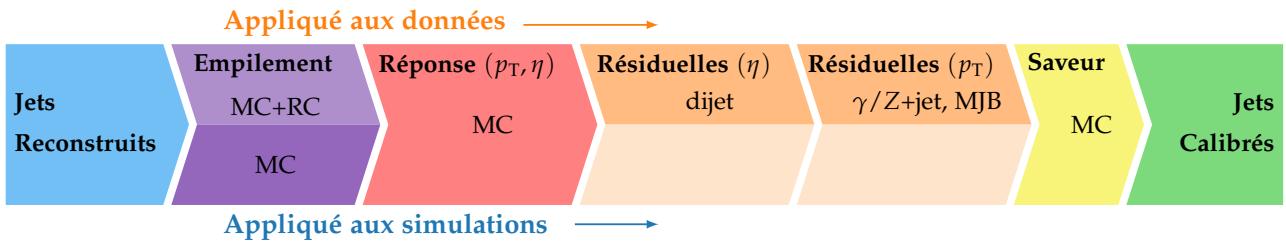


Figure 4.11 – Étapes successives de la JEC pour les données et les simulations [135]. Les corrections des étapes marquées « MC » sont obtenues par l'étude de simulations, celles marquées « RC » par une méthode de cône aléatoire (Random Cone) sur les données. Les types d'événements utilisés dans les corrections résiduelles sont également indiqués.

- Le niveau « particule », noté $p_{\text{T}, \text{ptcl}}$, ou niveau « vrai », se réfère aux objets et variables après hadronisation mais avant interaction avec le détecteur. Il s'agit donc des grandeurs recherchées, uniquement accessibles dans les événements simulés.
- Le niveau « reconstruit », noté reco , correspond aux objets et variables après interaction avec le détecteur et reconstruction par l'algorithme de PF.
- Le niveau « corrigé » ou calibré, noté corr , correspond aux objets et variables corrigés, c'est-à-dire ceux du niveau reconstruit auxquels ont été appliquées les corrections.

La réponse d'un jet, variable importante pour ce chapitre, est définie comme

$$R = \frac{p_{\text{T}}}{p_{\text{T}, \text{ptcl}}} . \quad (4.12)$$

La réponse peut être définie à différents niveaux, et par définition $R_{\text{ptcl}} = 1$. Si la JEC est correcte, alors l'impulsion transverse du jet corrigé doit correspondre sensiblement à l'impulsion transverse au niveau particule, c'est-à-dire $R_{\text{corr}} \simeq 1$. Sur la figure 4.12 sont représentées les réponses de jets d'événements QCD simulés à différentes étapes de la JEC. Après avoir appliqué toutes les corrections, ce qui correspond à la figure 4.12c, la réponse est sensiblement égale à 1, ce qui montre que la JEC est correcte.

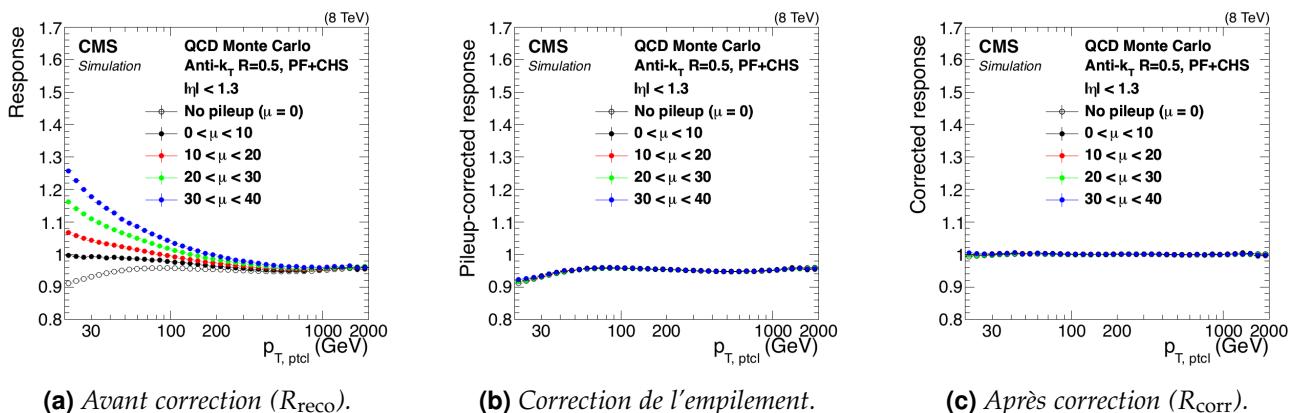


Figure 4.12 – Valeur moyenne de la réponse de jets d'événements QCD simulés en fonction de $p_{\text{T}, \text{ptcl}}$ à différentes étapes de la JEC [135] et pour différentes valeurs d'interactions d'empilement μ .

Les jets au niveau particule sont reconstruits en appliquant la procédure de recombinaison à toutes les particules de durée de vie τ telle que $c\tau > 1 \text{ cm}$ à l'exception des neutrinos [135]. Les hadrons contenant des quarks c ou b ne rentrent pas dans cette catégorie et ce sont donc leurs produits de désintégration qui sont pris en compte pour la recombinaison. Les neutrinos sont exclus pour pouvoir définir la réponse des jets d'une manière qui soit accessible expérimentalement et qui réduise significativement les différences de réponse entre jets lourds et jets légers ou de gluons, à cause des neutrinos produits dans les désintégrations des quarks lourds.

La JEC est déterminée pour chaque année de prise de donnée et pour différentes subdivisions de ces années. En effet, les conditions expérimentales changent au cours du temps. Ce peut être dû au

vieillissement du détecteur, à une modification des caractéristiques des faisceaux de protons ou encore à une modification du détecteur lui-même. Par exemple, entre 2016 et 2017, la partie centrale du trajectographe est remplacée par un système d'architecture différente [104, 105]. De 2017 à 2018, les photodiodes des bouchons du HCAL sont remplacées par des photomultiplicateurs à silicium [109, 155]. La réponse en énergie des jets dépend fortement de la nature du détecteur, c'est pourquoi des évolutions importantes peuvent apparaître sur la JEC d'une année à une autre. C'est en particulier le cas pour la réponse du détecteur dont la correction, présentée dans la section 4.2, est réalisée après la correction de l'empilement abordée ci-après.

4.1 Correction de l'empilement

Des contributions additionnelles à l'énergie et à l'impulsion des jets peuvent apparaître du fait de l'empilement, décrit dans la section 3.5 du chapitre 3. La correction de l'empilement a pour but de soustraire ces contributions et est appliquée dans les données et les événements simulés. Elle permet d'améliorer la résolution en énergie des jets et d'obtenir une JES plus précise.

L'empilement asynchrone est réduit par l'analyse temporelle des signaux des calorimètres, l'empilement synchrone par la méthode de soustraction des hadrons chargés (CHS, *pile-up Charged Hadron Subtraction*), décrite ci-après.

Pour chacun des vertex primaires de l'événement, la somme des impulsions transverses au carré des traces associées au vertex est calculée. Le vertex primaire principal est choisi comme étant le vertex présentant la plus grande valeur de cette somme. Les autres vertex primaires sont considérés comme des vertex d'empilement. Les hadrons chargés dont les traces associées proviennent de vertex d'empilement sont retirés de l'événement. La reconstruction des jets est alors réalisée à partir de l'événement nettoyé, ce qui permet d'améliorer la résolution en p_T des jets.

La correction de l'empilement résiduel \mathcal{C}_{PU} , principalement due aux hadrons neutres, aux photons, aux traces non associées à un vertex et à l'empilement asynchrone qui n'a pas pu être corrigé totalement, s'exprime en fonction de

- l'impulsion transverse du jet avant application de cette correction et après CHS, $p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}$;
- la pseudo-rapidité du jet, η ;
- l'aire du jet dans le plan (η, ϕ) , A ;
- la densité en énergie dans le plan (η, ϕ) de l'événement contenant ce jet, notée ρ ;

sous la forme

$$\mathcal{C}_{\text{PU}}(p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}, \eta, A, \rho) = 1 - \frac{\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle}{p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}} \quad (4.13)$$

où $\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle$ est la contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule, estimée à l'aide de la méthode de l'aire hybride (*hybrid jet area*) à partir d'événements QCD multijet simulés avec et sans empilement, c'est-à-dire

$$\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle(\rho, \eta, p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}) = \langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{avec PU}} - p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{sans PU}} \rangle, \quad (4.14)$$

avec $p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{avec PU}}$ et $p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{sans PU}}$ les impulsions du jet au niveau particule avec et sans empilement. La contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule est alors paramétrée en fonction de $p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}$, η , A et ρ et la correction de l'empilement résiduel \mathcal{C}_{PU} définie par (4.13) peut se réécrire

$$\mathcal{C}_{\text{PU}}(p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}, \eta, A, \rho) = 1 - \frac{[\rho_0(\eta) + \rho \beta(\eta)(1 + \gamma(\eta) \log p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}})] A}{p_{T_{\text{reco}}}^{\text{CHS}}} \quad (4.15)$$

où $\rho_0(\eta)$, $\beta(\eta)$ et $\gamma(\eta)$ sont les paramètres de cette correction, dépendants de η .

La figure 4.13 montre $\langle p_{T_{\text{ptcl}}}^{\text{add}} \rangle$ en fonction de l'impulsion transverse du jet au niveau particule, avant et après application de la correction de l'empilement. Les résultats de la figure 4.13b sont cohérents avec l'absence d'énergie supplémentaire due à l'empilement à $\pm 0,2 \text{ GeV}$ jusqu'à $p_{T_{\text{ptcl}}} = 500 \text{ GeV}$ et à $\pm 0,6 \text{ GeV}$ au-delà.

La correction ainsi décrite doit être légèrement adaptée pour pouvoir l'appliquer aux données à cause des biais de simulation du détecteur. Pour cela, un ajustement en fonction de η est déterminé à l'aide de la méthode de cône aléatoire (RC, *Random Cone*). La méthode RC consiste à placer

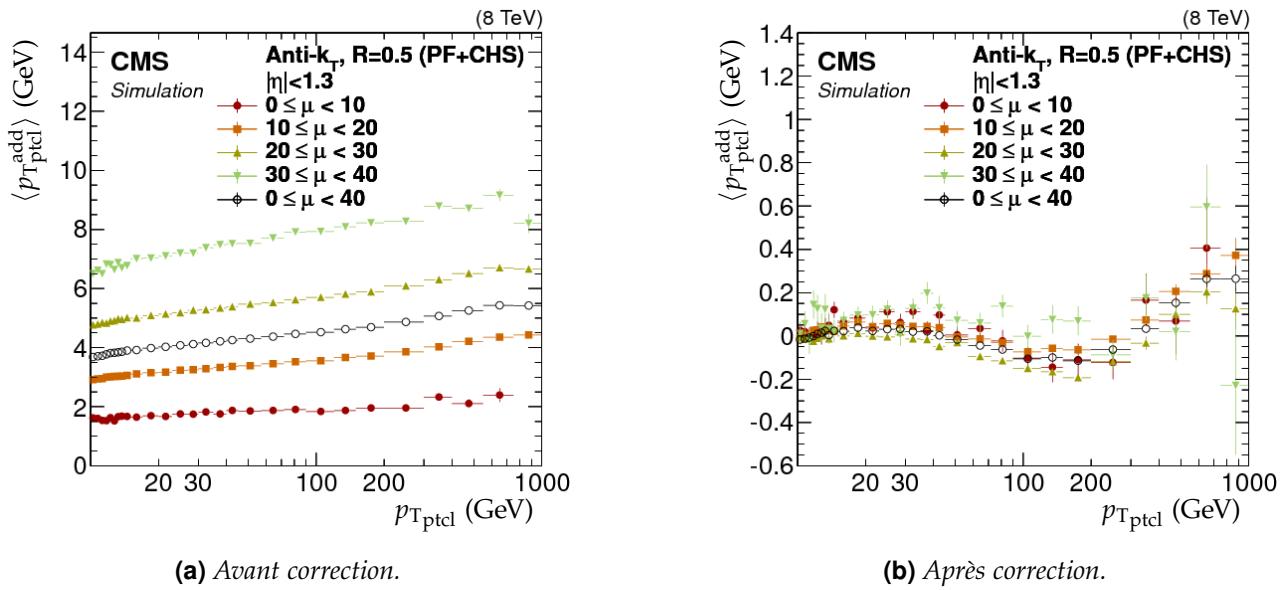


Figure 4.13 – Contribution additionnelle de l’empilement au niveau particule telle que définie dans l’équation (4.14) pour $|\eta| < 1,3$ en fonction de l’impulsion du jet au niveau particule pour différentes valeurs du nombre d’interaction d’empilement (μ) [135].

aléatoirement des cônes couvrant l’ensemble de l’acceptance du détecteur dans le plan (η, ϕ) . La reconstruction des jets se fait alors cône par cône, par regroupement des particules contenues dans le cône. L’impulsion transverse moyenne de ces jets, dans chaque événement, est une mesure de la densité d’énergie moyenne se retrouvant dans les jets [135]. L’étude est réalisée sur des événements dits de « zéro biais ». Il s’agit d’événements sélectionnés par un déclenchement aléatoire pendant que les faisceaux de protons se croisent. Le déclenchement n’étant pas dû à un dépôt d’énergie en particulier, ces événements ne comportent pas, en général, de contribution provenant d’une interaction dure, c’est-à-dire d’une collision effective entre les protons. Dans ce cas, l’impulsion transverse moyenne des jets reconstruits par la méthode RC permet d’estimer la moyenne de la contribution additionnelle de l’empilement, c’est-à-dire

$$\langle p_T^{\text{add}} \rangle^{\text{RC}} = \langle p_{T\text{cône}} \rangle. \quad (4.16)$$

Il est alors possible de définir un facteur d’échelle à appliquer aux paramètres ρ_0 et β de l’équation (4.15) lorsque cette correction est appliquée aux données. Ce facteur d’échelle s’exprime

$$\frac{\langle p_T^{\text{add}} \rangle_{\text{données}}^{\text{RC}}(\eta, \rho_{\text{données}})}{\langle p_T^{\text{add}} \rangle_{\text{simulation}}^{\text{RC}}(\eta, \rho_{\text{simulation}})}. \quad (4.17)$$

La contribution additionnelle de l’empilement est ainsi corrigée dans les simulations et les données.

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

La réponse du détecteur CMS à un jet n’est pas uniforme selon la valeur de p_T et η du jet. La réponse au niveau reconstruit de jets simulés R_{reco} , déterminée grâce à une simulation du détecteur CMS basée sur GEANT4 [129-131], combinée à PYTHIA 6.4 [122] avec les réglages Z2* [156], est représentée sur la figure 4.14 pour les trois années du Run II du LHC. Il apparaît, par exemple, qu’un jet de $p_T = 30$ GeV nécessite une correction allant de 10 % dans la région centrale $|\eta| < 0,7$ à plus de 30 % lorsque $|\eta| \simeq 3$ en 2017 et 2018.

Afin de corriger la réponse du détecteur en p_T et en η , la correction $C_{\text{R}\text{é}p}$ à appliquer s’exprime

$$C_{\text{R}\text{é}p}(p_{T\text{reco}}', \eta) = \frac{\langle p_{T\text{ptcl}} \rangle}{\langle p_{T\text{reco}}' \rangle} = \frac{1}{\langle R'_{\text{reco}} \rangle} \quad (4.18)$$

où $p_{T\text{reco}}'$ est l’impulsion transverse du jet après correction de l’empilement. Les moyennes sont réalisées sur les jets appartenant à la même cellule d’une grille en $(p_{T\text{ptcl}}, \eta)$ prédéfinie [135].

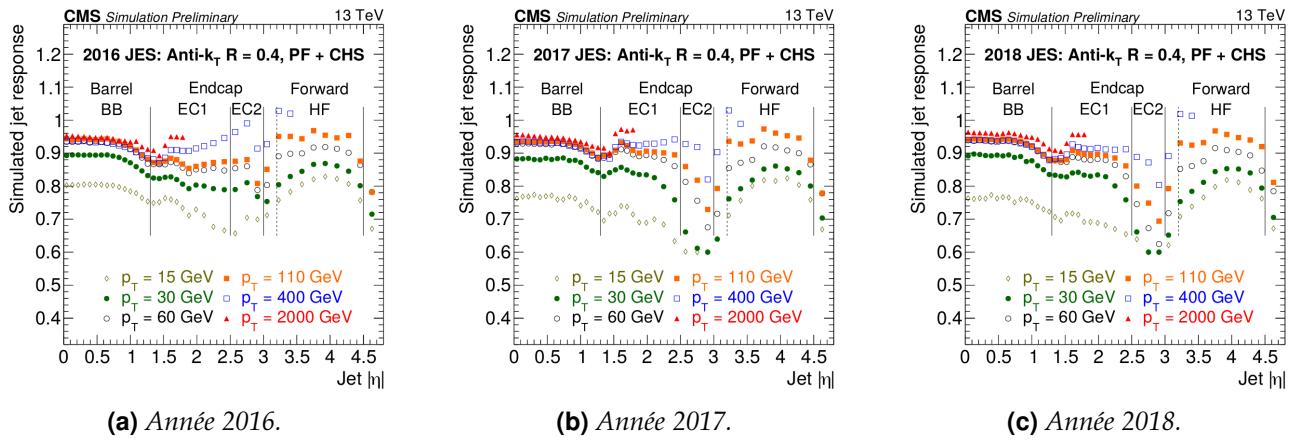


Figure 4.14 – Réponse des jets reconstruits en fonction de p_T et η lors du Run II [146]. La chute de la réponse des jets dans la région $|\eta| \simeq 3$ est due à la transition entre l’endcap et la partie forward du détecteur. Pour $|\eta| > 4,5$, les limites d’acceptance du détecteur expliquent la chute de la réponse des jets. La dégradation au cours du temps du détecteur dans la région « EC2 » s’observe par la baisse de la réponse des jets dans cette région de 2016 à 2017.

4.3 Corrections résiduelles

Les corrections décrites dans les sections précédentes permettent d’obtenir une bonne correction en énergie des jets. Toutefois, des différences dans les réponses des jets, de l’ordre du pourcent, subsistent entre données et simulations. Des corrections résiduelles à appliquer aux données sont ainsi déterminées afin de réduire ces écarts, définies telles que

$$\mathcal{C}_{\text{Res}} = \frac{R_{\text{simulations}}}{R_{\text{données}}} . \quad (4.19)$$

Le principe est d’estimer la réponse du jet en s’appuyant sur un objet de référence pouvant être un boson Z (événements Z + jets), un photon (événements γ + jets) ou un autre jet (événements dijet et multijet). Deux méthodes existent et sont utilisées de manière complémentaire :

la méthode de la balance estime que l’objet de référence et le jet sont balancés au niveau particule, c’est-à-dire d’impulsion transverse totale nulle, soit

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \vec{p}_T^{\text{jet}} = \vec{0} . \quad (4.20)$$

L’objet de référence étant fidèlement reconstruit,

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} \simeq \vec{p}_T^{\text{ref}} = \vec{p}_T^{\text{réf}} . \quad (4.21)$$

Ainsi, l’équation (4.20) peut se réécrire à l’aide de (4.21) sous la forme

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \vec{p}_T^{\text{jet}} = \vec{0} . \quad (4.22)$$

La réponse d’un jet définie par (4.12) permet alors de faire apparaître la réponse balancée du jet, notée R_{bal} ,

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \frac{1}{R_{\text{bal}}} \vec{p}_T^{\text{jet}} = \vec{0} . \quad (4.23)$$

Il en résulte

$$R_{\text{bal}}(p_T, \eta) = \frac{\vec{p}_T^{\text{jet}}}{\vec{p}_T^{\text{réf}}} \quad (4.24)$$

la méthode « MPF » (*MET Projection Fraction*) prend en compte l’ensemble de l’activité hadronique de l’événement et considère l’impulsion de recul vis-à-vis de l’objet de référence, c’est-à-dire

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} + \vec{p}_T^{\text{recul}} = \vec{0} . \quad (4.25)$$

Au niveau reconstruit, l’impulsion transverse manquante (MET) définie dans la section 6.3 du chapitre 3 doit être prise en compte dans le recul. Afin de garder une description cohérente

de l'événement, les corrections précédentes apportées aux jets sont d'abord propagées à \vec{E}_T^{miss} . L'équation précédente, valable au niveau particule, s'écrit alors

$$\vec{p}_{\text{Traco}}^{\text{réf}} + \vec{p}_{\text{Traco}}^{\text{recul}} = -\vec{E}_T^{\text{miss}} \quad (4.26)$$

La réponse d'un jet définie par (4.12) permet alors de faire apparaître la réponse MPF du jet, notée R_{MPF} ,

$$\vec{p}_{\text{Traco}}^{\text{réf}} + R_{MPF} \vec{p}_{\text{Tpcl}}^{\text{recul}} = -\vec{E}_T^{\text{miss}}. \quad (4.27)$$

En appliquant (4.21) et (4.25) à l'équation précédente, il est possible d'écrire

$$\vec{p}_T^{\text{réf}} - R_{MPF} \vec{p}_T^{\text{réf}} = -\vec{E}_T^{\text{miss}}. \quad (4.28)$$

Par produit scalaire avec $\vec{p}_T^{\text{réf}}$, il vient

$$\left| \vec{p}_T^{\text{réf}} \right|^2 (1 - R_{MPF}) = -\vec{p}_T^{\text{réf}} \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}, \quad (4.29)$$

ce qui permet de définir R_{MPF} comme

$$R_{MPF}(p_T, \eta) = 1 + \frac{\vec{p}_T^{\text{réf}} \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}}{|\vec{p}_T^{\text{réf}}|^2}. \quad (4.30)$$

4.3.1 Correction résiduelle relative en η

La première de ces corrections résiduelles, fonction de η , est obtenue à partir de la comparaison données-simulations sur une sélection d'événements dijet. Son but est de rendre indépendant de η le rapport données sur simulations de la réponse des jets. Cette correction s'appuie sur la bonne reconstruction des jets dans le bâillet. Lorsqu'un événement présente un premier jet avec $|\eta| < 1,3$, c'est-à-dire dans la région de référence du bâillet, et un second avec $|\eta| > 1,3$ et de p_T similaire, le premier sert d'objet de référence afin de calibrer le second ; c'est pourquoi cette correction est qualifiée de « relative ». La correction à appliquer aux données ainsi obtenue est illustrée sur la figure 4.15 dans le cas des jets d'impulsion transverse égale à 120 GeV.

4.3.2 Correction résiduelle absolue en p_T

Cette correction, fonction de p_T , a pour but de rendre indépendant de p_T le rapport données sur simulations de la réponse des jets. Elle combine, à l'aide d'un ajustement global, les comparaisons données-simulations de plusieurs types d'événements afin de couvrir un large spectre de valeurs de p_T . Chaque type d'événement est en effet dominant, de par sa statistique, dans une gamme de p_T donnée :

- événements $Z + \text{jets}$: il s'agit d'événements $Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) + \text{jets}$ et $Z(\rightarrow e^+ e^-) + \text{jets}$, sélectionnés par la présence d'une paire de muons ou d'électrons compatibles avec la désintégration d'un Z , ils couvrent la région $p_T < 400$ GeV ;
- événements $\gamma + \text{jets}$: sélectionnés dans les données à l'aide d'un déclenchement basé sur la présence d'un photon, ils permettent de traiter la région $100 \text{ GeV} < p_T < 1000 \text{ GeV}$;
- événements multijet : ces événements contiennent au moins deux jets dans l'état final et couvrent la région $p_T > 200$ GeV.

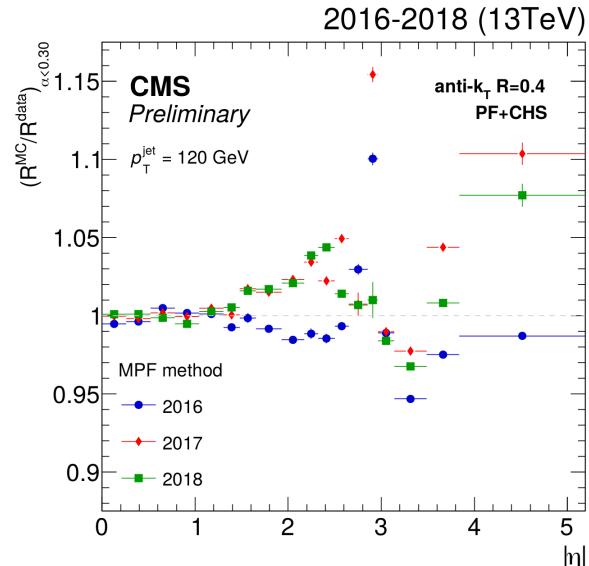


Figure 4.15 – Correction résiduelle relative en η lors du Run II obtenue avec des événements dijet et la méthode MPF [146].

En 2017 et 2018, les événements multijet n'ont pas été exploités et la correction résiduelle absolue en p_T dans la région $p_T > 800 \text{ GeV}$ est contrainte par l'analyse des événements $\gamma + \text{jets}$.

Cette correction corrige l'échelle en énergie absolue des jets, d'où son qualificatif, à partir d'un objet de référence pouvant être un boson Z ($Z + \text{jets}$), un photon ($\gamma + \text{jets}$) ou un autre jet (multijet). La correction à appliquer aux données ainsi obtenue est illustrée sur la figure 4.16 dans le cas des jets de pseudo-rapidité $|\eta| < 1,3$.

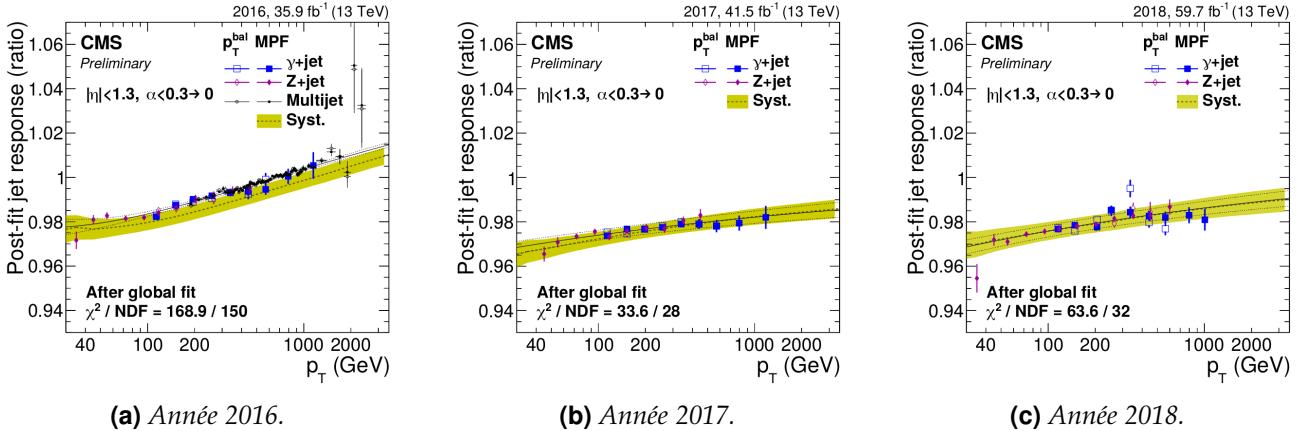


Figure 4.16 – Correction résiduelle absolue en p_T pour $|\eta| < 1,3$ lors du Run II obtenue par ajustement global sur les événements $\gamma + \text{jets}$, $Z + \text{jets}$ et multijet [146].

Durant ma thèse, j'étais responsable de la mesure de cette correction avec les événements $\gamma + \text{jets}$ pour les années 2018, utilisés dans la figure 4.16c afin de réaliser un ajustement global avec les autres analyses, et 2017-UL. Cette responsabilité s'inscrit dans la continuité de ce savoir-faire au sein du groupe CMS de l'IP2I, la mesure de cette correction en 2016 et 2017 y étant déjà réalisée [157]. La phénoménologie de ces événements ainsi que leur analyse sont détaillées dans les sections 5 et 6.

4.3.3 Correction résiduelle de saveur

Il existe une différence de réponse selon la saveur du jet, majoritairement due à la fragmentation en énergie et la composition du jet qui dépendent de cette saveur [135]. Par exemple, les particules de bas p_T se retrouvent hors de l'acceptance du détecteur. Or, des jets initiés par des gluons présentent de nombreuses particules de bas p_T par rapport aux jets issus de quarks légers. Dans une moindre mesure, les jets lourds possèdent également plus de particules de bas p_T que les jets de quarks légers suite à la désintégration du hadron lourd. La proportion de particules neutres dans le jet est également un des paramètres affectant le plus sa réponse.

La correction résiduelle de saveur \mathcal{C}_{Sav} à appliquer aux données et aux simulations est obtenue à l'aide de PYTHIA 6.4 [122] avec les réglages Z2* [156] sur des événements dijet, $Z + \text{jets}$ et $\gamma + \text{jets}$ simulés et est représentée sur la figure 4.17. Elle est de moins de 2 % en-deçà de 100 GeV mais peut atteindre 4 % à bas p_T . Dans les analyses de physique des particules, cette correction ne peut être appliquée qu'à condition de connaître la saveur du jet. Elle n'est donc applicable en pratique qu'aux jets issus de quarks b .

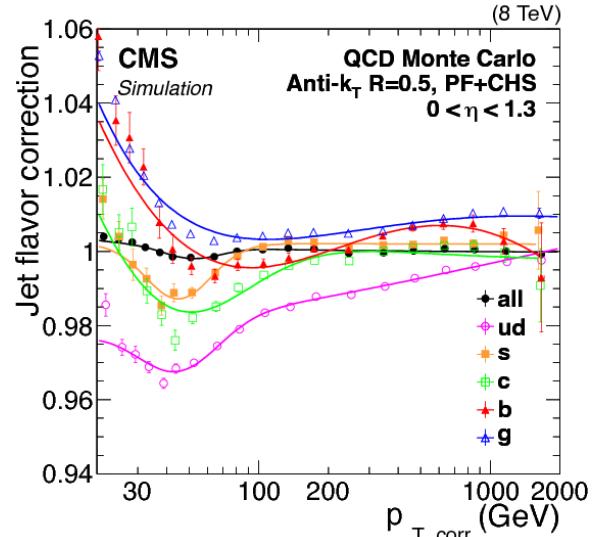


Figure 4.17 – Correction résiduelle de saveur en fonction de l'impulsion du jet préalablement corrigée par les corrections décrites dans les sections précédentes, $p_{T,\text{corr}}$ pour des jets de pseudo-rapidité $|\eta| < 1,3$ [135].

4.4 Incertitude sur la correction en énergie des jets

Chacune des étapes de la JEC comporte des incertitudes liées aux effets systématiques et, dans une moindre mesure, statistiques. La maîtrise de ces incertitudes est un enjeu important pour de nombreuses analyses de la collaboration CMS où elles constituent une des sources d'incertitude les plus importantes. Les sources d'incertitude considérées pour la JEC sont réparties en six groupes [146] :

Échelle absolue ou *Absolute scale* sur les légendes des figures 4.18a à 4.18f. Cette incertitude prend en compte l'échelle en énergie des objets de référence utilisés pour obtenir la correction résiduelle absolue en p_T décrite dans la section 4.3.2 ainsi que les effets de l'ISR (*Initial State Radiation*) et du FSR (*Final State Radiation*) abordés dans la section 5.

Échelle relative ou *Relative scale* sur les légendes des figures 4.18a à 4.18f. Cette incertitude est principalement due à la JER qui s'applique à l'objet de référence dans la correction résiduelle relative en η décrite dans la section 4.3.1 ainsi qu'aux effets de l'ISR et du FSR.

Empilement ou *Pileup* sur les légendes des figures 4.18a à 4.18f. Il s'agit de rendre compte de l'incertitude sur la détermination de la contribution additionnelle de l'empilement au niveau particule. Une incertitude de 5 % sur le rapport données sur simulations de cette contribution, obtenue à l'aide de la méthode de cône aléatoire, est considérée. La différence résiduelle entre la contribution obtenue par cône aléatoire et la contribution réelle extraite des simulations est également prise en compte.

Méthode et jeux de données ou *Method & sample* sur les légendes des figures 4.18a à 4.18f. Cette incertitude correspond aux écarts observés entre les méthodes utilisant les réponses R_{bal} et R_{MPF} d'une part et entre les analyses utilisant les événements Z + jets, γ + jets et dijet d'autre part.

Saveur ou *Jet flavor* sur les légendes des figures 4.18a à 4.18f. L'incertitude sur la dépendance en saveur de la réponse des jets dans les simulations est estimée à partir de la différence entre deux générateurs, PYTHIA [122] et HERWIG [126].

Stabilité temporelle ou *Time stability* sur les légendes des figures 4.18a à 4.18f. La JEC est déterminée pour chaque période de prise de donnée chaque année. Les écarts observés entre ces périodes sont inclus dans cette source d'incertitude.

La figure 4.18 résume les valeurs de ces incertitudes pour les trois années du Run II. L'incertitude globale sur la JEC est généralement inférieure à 2 %, excepté pour les cas $p_T \leq 30 \text{ GeV}$ ou $|\eta| \geq 2$ où elle peut être de l'ordre de 10 %. Pour $|\eta| \in [2,5; 3,0]$, cette incertitude est bien plus importante en 2017 que pour les autres années. Il s'agit de la région de transition entre les bouchons du HCAL (HE) et le HCAL avancé (HF), c'est-à-dire deux parties distinctes du détecteur. Or, la qualité de la modélisation de cette région du détecteur est moindre pour l'année 2017, c'est pourquoi l'incertitude y est plus importante.

4.5 Correction de la résolution en énergie

La résolution en énergie des jets, notée JER, est de l'ordre de 20 % pour des jets à $p_T = 30 \text{ GeV}$ et de 10 % à $p_T = 100 \text{ GeV}$ [135]. Cette résolution est donc bien moins bonne que celles d'autres objets physiques tels que les électrons (2 à 5 %), les muons (1 à 6 %) et les photons (environ 1 %). La JER joue ainsi un rôle important dans les analyses cherchant des résonances étroites, par exemple. Il est donc nécessaire de maîtriser cette grandeur.

La JER est définie comme la largeur de la gaussienne obtenue par un ajustement sur la distribution de R_{corr} des jets, c'est-à-dire $p_{T,corr}/p_{T,ptcl}$. Sa mesure est réalisée à l'aide d'événements γ + jets et Z + jets et les résultats obtenus lors du Run I sont présentés sur la figure 4.19a. Elle dépend de $p_{T,ptcl}$, η et μ .

La JER observée dans les simulations diffère de celle observée dans les données, elle est légèrement meilleure. Afin de pouvoir réaliser des analyses comparant données et simulations, il est nécessaire d'avoir une JER comparable dans ces deux catégories d'événements. La JER des simulations est ainsi détériorée par un facteur d'échelle (JER SF), déterminé à partir d'événements γ + jets et dijet et défini en fonction de η . Les résultats obtenus lors du Run II sont présentés sur la figure 4.19b. Le

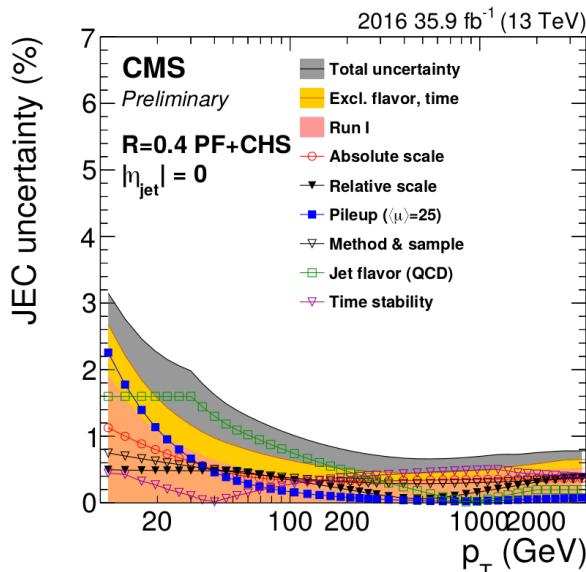
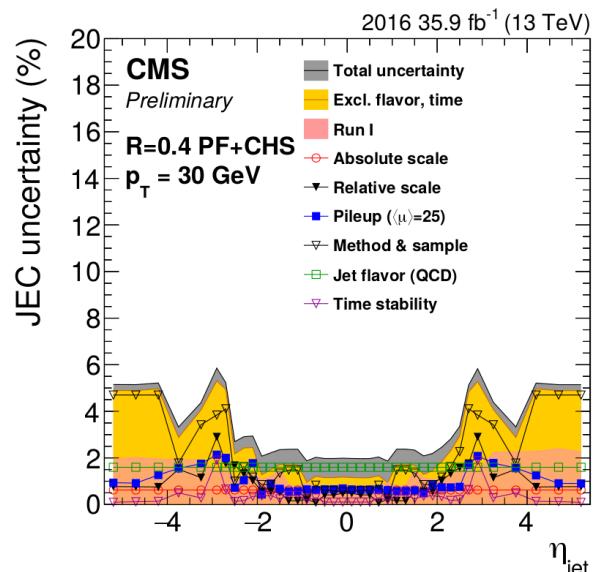
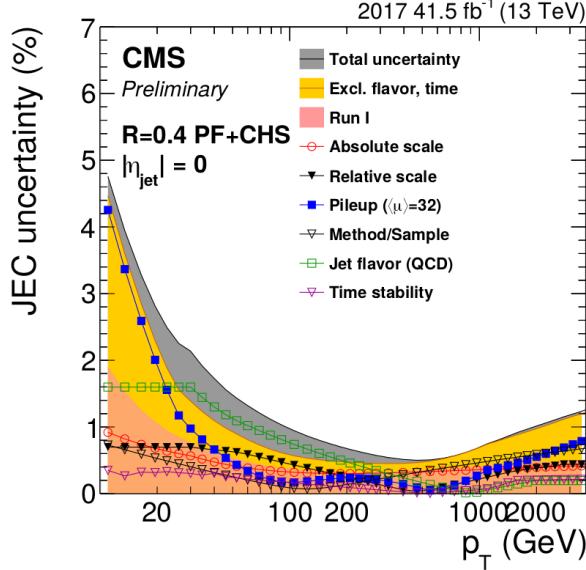
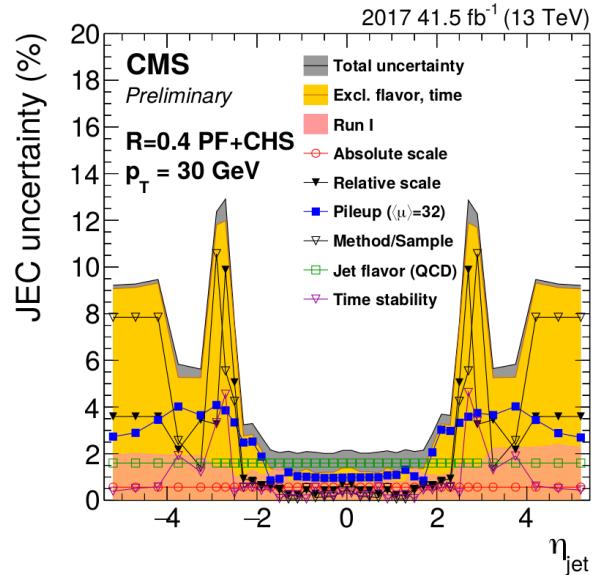
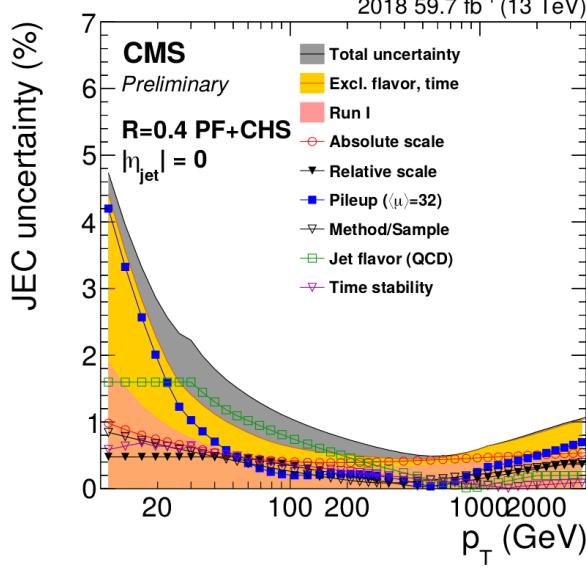
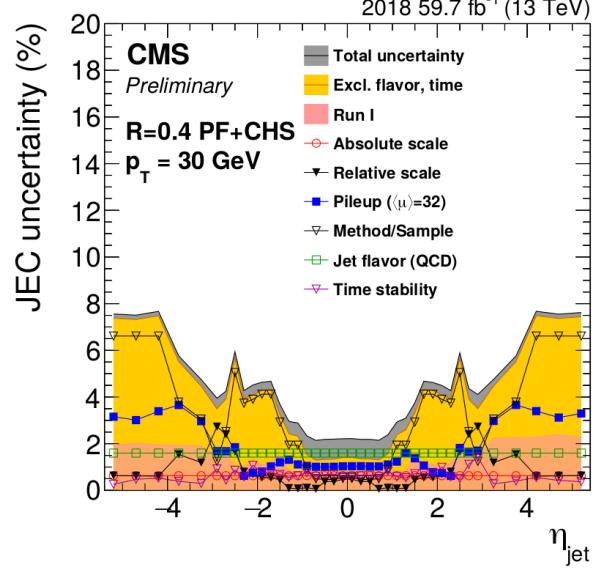
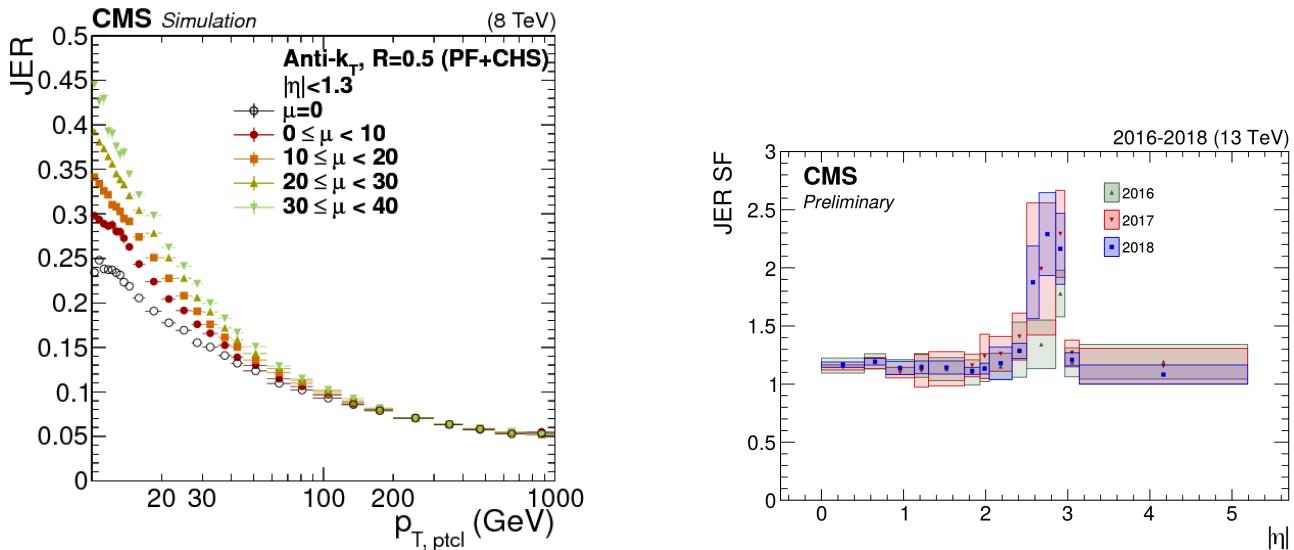
(a) En fonction de p_T pour $|\eta| = 0$ en 2016.(b) En fonction de η pour $p_T = 30 \text{ GeV}$ en 2016.(c) En fonction de p_T pour $|\eta| = 0$ en 2017.(d) En fonction de η pour $p_T = 30 \text{ GeV}$ en 2017.(e) En fonction de p_T pour $|\eta| = 0$ en 2018.(f) En fonction de η pour $p_T = 30 \text{ GeV}$ en 2018.

Figure 4.18 – Incertitudes relatives sur la JEC lors du Run II [146].

principe est le même que pour les corrections résiduelles décrites dans les sections 4.3.1 et 4.3.2. Au lieu de s'intéresser à la moyenne de la distribution, c'est sa largeur qui est étudiée.



(a) *JER en fonction de p_T dans le bâillet de CMS ($|\eta| < 1,3$) pour différentes valeurs d'interactions d'empilement μ lors du Run I [135].*

(b) *Facteurs d'échelle de la résolution en énergie des jets en fonction de η lors du Run II [146].*

Figure 4.19 – Résolution en énergie des jets dans les simulations et facteurs d'échelle à leur appliquer.

5 Phénoménologie des événements $\gamma +$ jets

Les événements $\gamma +$ jets peuvent être utilisés afin d'obtenir la correction résiduelle absolue en p_T des jets, introduite dans la section 4.3.2, ainsi que la résolution en énergie des jets. Les analyses correspondantes sont abordées dans les sections 6 et 7.

5.1 Principe des événements $\gamma +$ jets et réponse balancée

L'état final d'un événement $\gamma +$ jets comporte un jet à calibrer d'une part et un photon utilisé comme objet de référence d'autre part. Sur la figure 4.20, la résolution sur les photons est inférieure à 4 % et de l'ordre du pourcent dans le bâillet. Dans le cas des jets, sur la figure 4.19a, la résolution minimale est de 5 %. L'utilisation de photons comme objet de référence est donc justifiée.

Des diagrammes de Feynman correspondant à des événements $\gamma +$ jets sont présentés sur la figure 4.21. Ces événements ne comportent pas de neutrino issu de l'interaction dure³, il n'y a donc pas d'énergie transverse manquante due à la physique de ces événements. L'impulsion transverse étant nulle dans l'état initial, par conservation, elle est nulle dans l'état final. Le photon et le jet sont donc balancés, c'est-à-dire

$$\vec{p}_{T\text{ptcl}}^\gamma + \vec{p}_{T\text{ptcl}}^{\text{jet}} = \vec{0} \Rightarrow p_{T\text{ptcl}}^\gamma = p_{T\text{ptcl}}^{\text{jet}}. \quad (4.31)$$

L'impulsion transverse du jet doit donc être égale à celle du photon, objet de référence. La bonne résolution en énergie sur les photons permet de considérer que leur impulsion transverse au niveau reconstruit est égale à leur impulsion transverse au niveau particule. Ainsi, la méthode de la balance introduite dans la section 4.3 permet de définir

$$R_{bal} = \frac{p_{T\text{reco}}^{\text{jet}}}{p_{T\gamma}}, \quad (4.32)$$

qui doit valoir 1 après correction. Cette méthode est performante pour les événements à un photon et un jet dont la topologie est représentée sur la figure 4.22a.

3. Des neutrinos peuvent apparaître lors de la formation du jet.

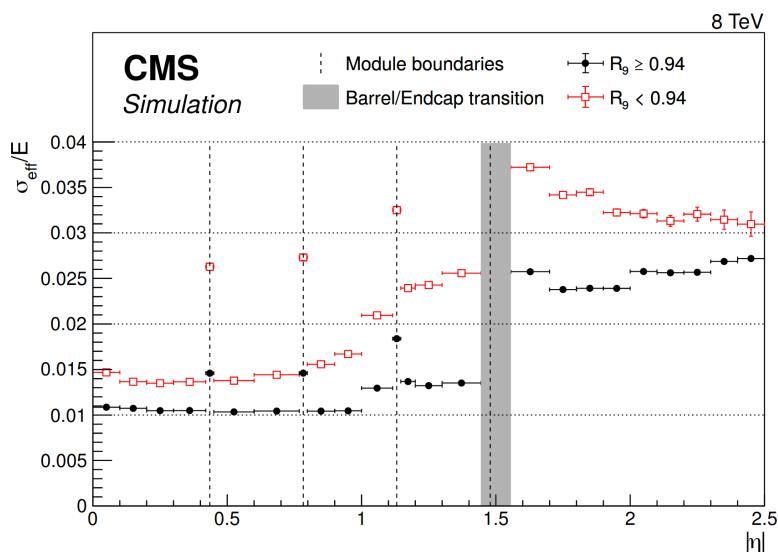


Figure 4.20 – Résolution relative en énergie des photons en fonction de η pour des événements simulés $h \rightarrow \gamma\gamma$ [158]. La variable R_9 est définie page 88.

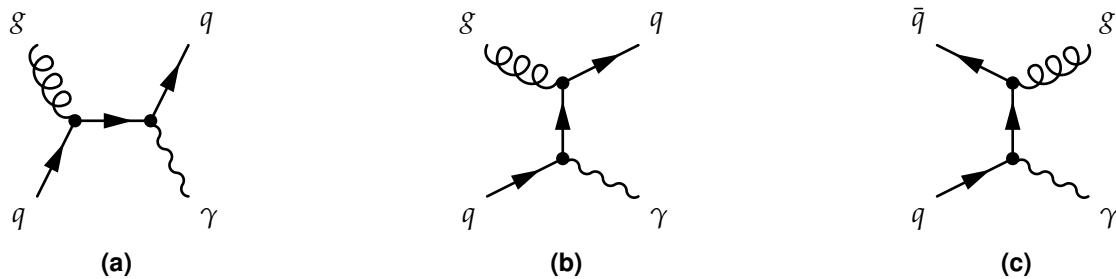
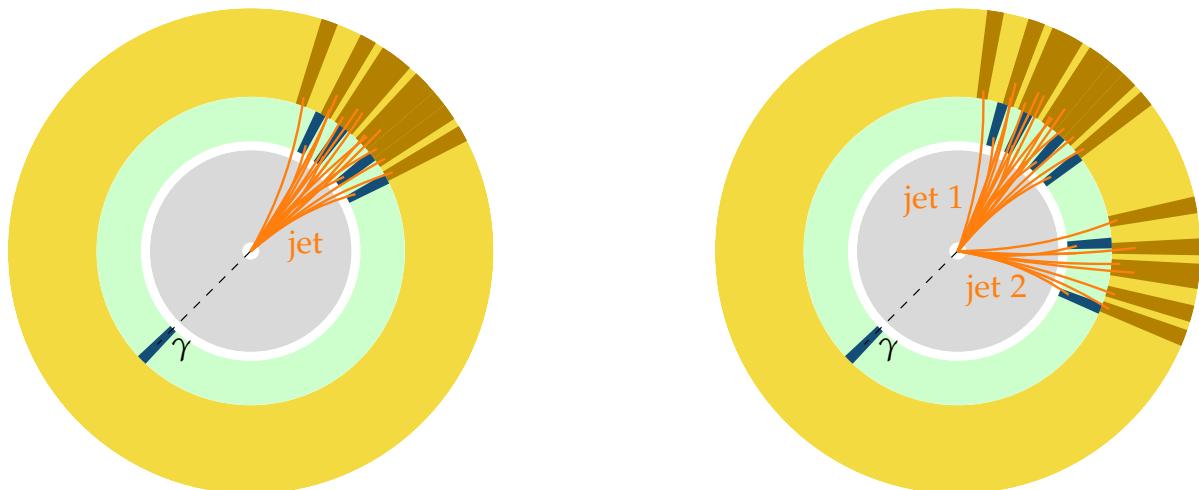


Figure 4.21 – Exemples de diagrammes de Feynman de processus physiques donnant un photon et un jet dans l'état final.



(a) Topologie typique des événements correspondant aux diagrammes de la figure 4.21.

(b) Topologie typique des événements correspondant au diagramme de la figure 4.23d.

Figure 4.22 – Topologies typiques des événements $\gamma + \text{jets}$.

5.2 Activité additionnelle des jets

Une activité additionnelle des jets peut survenir et altérer la topologie des événements $\gamma + \text{jets}$. Un photon peut être émis dans l'état initial (ISR, *Initial State Radiation*) ou dans l'état final (FSR, *Final State Radiation*), ce qui correspond aux diagrammes de Feynman des figures 4.23a et 4.23b. Un système composé d'un des photons et du jet n'est donc pas balancé dans ce cas. Il est possible de supprimer ce biais en imposant la présence d'un seul photon dans l'événement. La section efficace de production d'événements $\gamma + \text{jets}$ à 13 TeV est importante [159], il est donc possible de sélectionner de manière stricte les événements afin d'obtenir une bonne pureté tout en conservant une statistique suffisante.

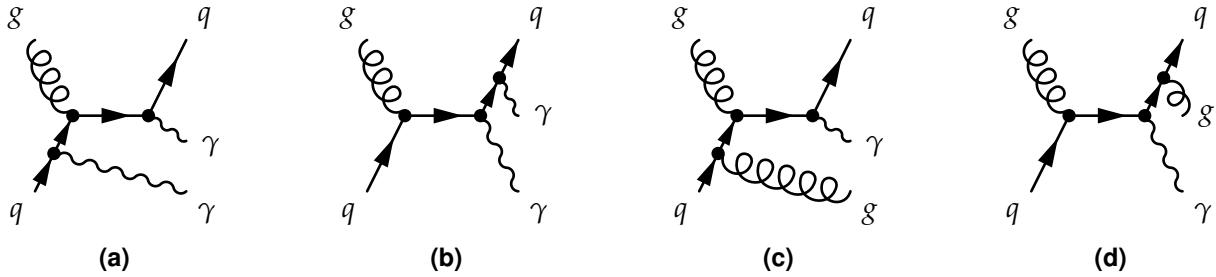


Figure 4.23 – Exemples de diagrammes de Feynman de processus correspondant à des événements avec deux photons (4.23a, 4.23b) ou deux jets (4.23c, 4.23d) dans l'état final, dus à l'ISR (4.23a, 4.23c) ou au FSR (4.23b, 4.23d).

L'ISR et le FSR peuvent aussi produire un gluon, ce qui correspond aux diagrammes de Feynman des figures 4.23c et 4.23d. Plusieurs jets sont alors présents dans l'état final et sont ordonnés par impulsion transverse décroissante. La topologie d'un tel événement est illustrée sur la figure 4.22b. Il est possible de réduire le nombre d'événements avec ISR ou FSR en imposant une condition sur les directions du photon et du premier jet qui doivent être opposées. Toutefois, la plupart des événements présentent plusieurs jets dans la direction opposée au photon. La réponse balancée est alors considérée entre le photon et le premier jet, c'est-à-dire le jet d'impulsion transverse la plus grande. Ainsi,

$$R_{bal} = \frac{p_{T,\text{jet } 1}^{\text{reco}}}{p_{T,\gamma}}. \quad (4.33)$$

En complément de la réponse balancée, la réponse MPF, définie comme

$$R_{MPF} = 1 + \frac{\vec{p}_{T,\gamma} \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}}{|\vec{p}_{T,\gamma}|^2}, \quad (4.34)$$

est également analysée. Les impulsions de toutes les particules présentes étant considérées, R_{MPF} est moins sensible à l'activité additionnelle que R_{bal} . L'utilisation conjointe de R_{MPF} avec R_{bal} permet d'obtenir des résultats complémentaires. Des écarts significatifs observés entre les deux méthodes indiqueraient ainsi des effets incompris, nécessitant de plus amples investigations.

6 Correction résiduelle absolue en p_T avec les événements $\gamma + \text{jets}$

Durant ma thèse, j'étais responsable de la mesure de cette correction avec les événements $\gamma + \text{jets}$ pour les années 2018 et 2017-UL pour la collaboration CMS. Cette section présente la sélection des événements $\gamma + \text{jets}$, leur analyse et les derniers résultats obtenus pour l'année 2018.

6.1 Événements utilisés

6.1.1 Ensembles d'événements analysés

Données Les jeux de données utilisés pour 2018 et 2017-UL sont basés sur la présence d'un photon dans l'état final. Pour chacune de ces années, plusieurs périodes (*runs*) sont considérées, celles des collisions pp , dont la liste et les luminosités correspondantes sont présentées dans le tableau 4.5.

Run	Luminosité (fb^{-1})	
	2018	2017-UL
A	13,65	-
B	7,06	4,79
C	6,89	9,63
D	31,07	4,25
E	-	9,31
F	-	13,54
Total	58,67	41,52

Tableau 4.5 – Liste des périodes de prise de données considérées et luminosités correspondantes.

Simulations Les simulations utilisées contiennent des événements $\gamma + \text{jets}$ de type $qg \rightarrow q\gamma$, comme ceux des figures 4.21a et 4.21b, et $qq \rightarrow g\gamma$, comme celui de la figure 4.21c. Pour l'année 2018, les événements sont générés en un seul jeu de données à l'aide de PYTHIA 8 [123] avec les réglages CP5-Flat [160] et une énergie dans le centre de masse de 13 TeV. Dans l'état final, un photon d'impulsion transverse comprise entre 15 et 6000 GeV est généré. Pour l'année 2017-UL, les événements sont générés conjointement à l'aide de PYTHIA 8 [123] avec les réglages CP5 [160] et MADGRAPH 5 [121] et une énergie dans le centre de masse de 13 TeV. Dans l'état final, la somme scalaire des impulsions transverses des jets, notée HT, appartient à un intervalle, définissant ainsi cinq jeux de données. Les sections efficaces des événements simulés ainsi obtenus sont présentées dans le tableau 4.6.

Année	Caractéristique	Section efficace (pb)
2018	$p_T^\gamma \in [15, 6000] \text{ GeV}$	283 000,0
2017-UL	$\text{HT} \in [40, 100] \text{ GeV}$	18 700,0
2017-UL	$\text{HT} \in [100, 200] \text{ GeV}$	8640,0
2017-UL	$\text{HT} \in [200, 400] \text{ GeV}$	2185,0
2017-UL	$\text{HT} \in [400, 600] \text{ GeV}$	259,9
2017-UL	$\text{HT} > 600 \text{ GeV}$	85,31

Tableau 4.6 – Sections efficaces des différents événements $\gamma + \text{jets}$ simulés.

6.1.2 Sélection des événements

Une sélection des événements à considérer est réalisée lors de l'analyse. En effet, les événements souhaités sont ceux contenant un photon avec un ou plusieurs jets ; un des bruits de fond principal provient d'événements multijet où un des jets est identifié à tort comme un photon. Cette situation peut arriver lorsqu'une fraction importante de l'énergie de ce jet est portée par un ou plusieurs pions neutres, les π^0 . Les π^0 se propagent sur des distances moyennes de 26 nm puis se désintègrent dans 99 % des cas en deux photons [9]. Ces particules ne laissent donc aucune trace dans le trajectographe et un dépôt d'énergie dans le ECAL, tout comme les photons issus de l'interaction initiale. Un tel jet comporte ainsi une signature similaire à un photon d'un événement $\gamma + \text{jet}$ autour duquel une activité hadronique existe.

Sélection sur les photons Une sélection des photons est appliquée afin de réduire le bruit de fond. La collaboration CMS propose des critères d'identification des photons (lâche, moyen et strict) s'appuyant sur diverses propriétés du « candidat » photon :

- H/E est le rapport de l'énergie hadronique sur l'énergie électromagnétique associées au photon. Un photon est sensé déposer son énergie dans le ECAL et ne laisser aucun signal dans le HCAL. Une faible valeur de H/E est donc compatible avec un photon.

- $\sigma_{i\eta i\eta}$ est l'étalement en η du dépôt d'énergie dans le ECAL. Cette observable est reliée à la forme de la gerbe électromagnétique. Un seuil maximal sur $\sigma_{i\eta i\eta}$ est imposé pour l'identification des photons.
- I_{CH} est l'isolation vis-à-vis des hadrons chargés. Elle se définit comme le ratio entre la somme des impulsions transverses de tous les hadrons chargés situés à une distance ΔR du candidat photon dans le plan (η, ϕ) inférieure à 0,3 et l'impulsion transverse du candidat photon lui-même.
- I_{NH} est l'isolation vis-à-vis des hadrons neutres, analogue à I_{CH} .
- I_γ est l'isolation vis-à-vis des photons autres que le candidat lui-même, analogue à I_{CH} .

À cet ensemble de variables dont une valeur maximale est admise pour l'identification des photons s'ajoute R_9 , définie comme

$$R_9 = \frac{E_{3\times 3}}{E_{SC}} \quad (4.35)$$

avec $E_{3\times 3}$ la somme des énergies dans les cristaux du ECAL formant un carré de trois cristaux de côté centré sur le cristal contenant le plus d'énergie dans le *supercluster*, défini dans la section 6.2 du chapitre 3. et E_{SC} l'énergie dans le *supercluster* [158]. Dans l'analyse des événements $\gamma + \text{jets}$, il est demandé que $R_9 > 0,90$.

Les variables d'isolation sont corrigées afin de prendre en compte l'empilement. L'isolation corrigée I^{corr} s'exprime ainsi en fonction de l'isolation I comme

$$I^{\text{corr}} = \max(I - \rho \times \mathcal{E}_A, 0) \quad (4.36)$$

où \mathcal{E}_A est l'aire effective, c'est-à-dire la fraction de l'espace (η, ϕ) correspondant à la zone d'isolation à corriger pour l'empilement. Les valeurs des aires effectives utilisées sont présentées dans le tableau 4.7.

Région	Hadrons chargés	Hadrons neutres	Photons
$ \eta \leq 1,0$	0,0112	0,0668	0,1113
$1,0 < \eta \leq 1,479$	0,0108	0,1054	0,0953
$1,479 < \eta \leq 2,0$	0,0106	0,0786	0,0619
$2,0 < \eta \leq 2,2$	0,010 02	0,0233	0,0837
$2,2 < \eta \leq 2,3$	0,0098	0,0078	0,1070
$2,3 < \eta \leq 2,4$	0,0089	0,0028	0,1212
$ \eta > 2,4$	0,0087	0,0137	0,1466

Tableau 4.7 – Valeurs de l'aire effective \mathcal{E}_A utilisée pour corriger la contribution de l'empilement aux isolations des photons vis-à-vis des autres particules.

De plus, un veto est appliqué aux photons pouvant être reliés à une trace dans le trajectographe. Ce veto permet de limiter la contamination des photons considérés dans l'analyse par des électrons reconstruits à tort comme des photons. Les coupures correspondant aux différents critères d'identification des photons ainsi que leurs efficacités d'identification et de réjection sont résumées dans le tableau 4.8.

Le critère d'identification des photons retenu dans l'analyse est le critère strict. Seuls les photons situés dans le bâillet sont utilisés car ils présentent la meilleure résolution. Une coupure sur leur pseudo-rapidité est donc appliquée telle que $|\eta| < 1,3$, excluant également les bords du bâillet proches des bouchons.

Une étude interne a montré que l'utilisation des photons des bouchons ($|\eta| > 1,479$) permettrait de rajouter près de 30 % d'événements dans les données et de réduire ainsi les incertitudes statistiques. Les corrections résiduelles obtenues pourraient alors être plus précises. Toutefois, la résolution en énergie des photons, représentée en fonction de $|\eta|$ sur la figure 4.20 en page 85, est de l'ordre de 1 % dans le bâillet contre 2,5 % dans les bouchons. Cette différence sur la résolution en énergie de l'objet de référence rend délicate la combinaison des photons du bâillet et des bouchons dans cette analyse. Des travaux sont actuellement menés dans cette direction.

Critère	Lâche		Moyen		Strict	
	Bariplet	Bouchon	Bariplet	Bouchon	Bariplet	Bouchon
Efficacité	90,08 %	90,65 %	80,29 %	80,08 %	70,24 %	70,13 %
Réjection	86,25 %	76,72 %	89,36 %	81,85 %	90,97 %	84,55 %
H/E	0,045 96	0,0590	0,021 97	0,0326	0,021 48	0,0321
$\sigma_{i\eta i\eta}$	0,0106	0,0272	0,010 15	0,0272	0,009 96	0,0271
I_{CH}^{corr}	1,694	2,089	1,141	1,051	0,65	0,517
I_{NH}^{corr}	{ 24,032 +0,015 12 p_T +2,259 $p_T^2/10^5$	{ 19,722 +0,011 p_T +2,3 $p_T^2/10^5$	{ 1,189 +0,015 12 p_T +2,259 $p_T^2/10^5$	{ 2,718 +0,0117 p_T +2,3 $p_T^2/10^5$	{ 0,317 +0,015 12 p_T +2,259 $p_T^2/10^5$	{ 2,716 +0,0117 p_T +2,3 $p_T^2/10^5$
I_γ^{corr}	{ 2,876 +0,004 017 p_T	{ 4,162 +0,0037 p_T	{ 2,08 +0,004 017 p_T	{ 3,867 +0,0037 p_T	{ 2,044 +0,004 017 p_T	{ 3,032 +0,0037 p_T

Tableau 4.8 – Valeurs maximales des observables considérées pour l’identification des photons selon le critère utilisé et la région du détecteur dans laquelle se trouve le candidat photon (barillet pour $|\eta| < 1,479$, bouchon sinon).

Sélection sur les jets Les événements présentant un unique photon sélectionné d’après les critères précédents sont retenus. Avec ce photon doit être présent au moins un jet reconstruit à l’aide de l’algorithme anti- k_T [144] avec un paramètre $R = 0,4$ et respectant les critères définis dans le tableau 4.3 pour les données de 2018 et ceux du tableau 4.4 pour les données de 2017-UL. Ces critères permettent de rejeter les jets issus du bruit de fond avec une efficacité de 99 %.

Les jets ainsi sélectionnés sont calibrés en énergie en suivant la procédure décrite dans la section 4 jusqu’à la correction résiduelle relative en η incluse. Ils sont alors triés par impulsion transverse décroissante. Pour s’assurer d’une bonne balance dans le plan transverse entre le photon et le premier jet, c’est-à-dire celui d’impulsion transverse la plus grande, seuls les événements proposant un écart angulaire $\Delta\phi$ entre le photon et ce jet supérieur à 2,8 rad sont considérés dans la suite. Le photon et le jet sont donc dos à dos dans le plan transverse.

Si un second jet d’impulsion transverse supérieure à 10 GeV et à 30 % de p_T^γ est présent, l’événement est rejeté. L’événement est également rejeté si un lepton (électron ou muon) isolé, en pratique hors des jets, est présent.

Il a été observé que des régions des calorimètres produisent des signaux menant à des reconstructions biaisées de jets. De plus, un système de lecture expérimental « SiPM » a été installé dans le bouchon du HCAL [155]. Il en résulte des calibrations qui ne sont pas optimales dans les régions correspondantes du détecteur. Afin d’éviter ces effets, tout événement est rejeté s’il comporte, dans ces régions des calorimètres, un jet utilisé dans l’analyse. Ces régions sont résumées sur la figure 4.24.

Sélection sur le chemin de déclenchement Comme expliqué dans la section 4.7 du chapitre 3, un événement observé par le détecteur CMS est sauvegardé si un chemin de déclenchement est activé. Dans cette analyse, seuls les événements dont le photon servant d’objet de référence pour la calibration des jets correspond au photon ayant activé le chemin de déclenchement pour cet événement sont retenus. Or, plus l’impulsion transverse du photon est faible, plus le nombre d’événements pouvant être sauvegardés est importante, si bien que la chaîne d’acquisition arrive à saturation. Pour pallier à cette saturation, il existe différents chemins de déclenchement en fonction de l’impulsion transverse du photon et pour chacun d’entre eux, seule une fraction des événements les déclenchant est effectivement sauvegardée. Cette fraction est nommée *prescale*. À chaque chemin de déclenchement correspond ainsi un *prescale*. Un intervalle d’impulsion transverse du photon retenu est alors défini pour chaque chemin de déclenchement utilisé. Cet intervalle permet de se placer au plateau d’efficacité du chemin de déclenchement. Les différents chemins de déclenchement, leurs *prescales* et intervalles d’impulsion transverse sont présentés dans le tableau 4.9. Par exemple, un photon d’impulsion transverse 95 GeV doit avoir déclenché le chemin nommé HLT_Photon75_R9Id90_HE10_IsoM.

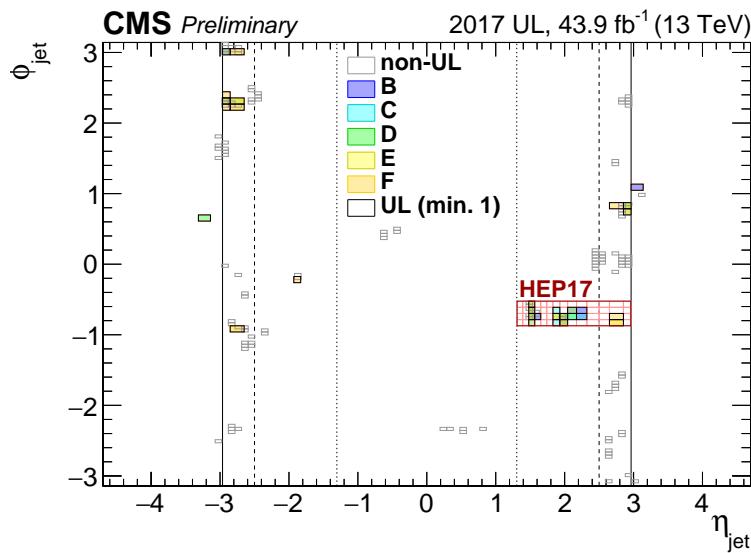


Figure 4.24 – Régions des calorimètres à exclure de l’analyse dans le plan (η, ϕ) pour les événements de 2017-UL. Certaines régions ne concernent que certaines périodes de l’année (en couleur). La région « HEP17 » correspond à l’emplacement du système de lecture expérimental « SiPM » [155].

Chemin de déclenchement	p_T^γ (GeV)	Prescale 2018	Prescale 2017-UL
HLT_Photon33	[40, 60[$4,011\,54 \times 10^{-5}$	$3,434\,86 \times 10^{-4}$
HLT_Photon50_R9Id90_HE10_IsoM	[60, 85[$3,947\,37 \times 10^{-3}$	$7,404\,66 \times 10^{-3}$
HLT_Photon75_R9Id90_HE10_IsoM	[85, 105[0,015 665 6	0,031 955 2
HLT_Photon90_R9Id90_HE10_IsoM	[105, 130[0,031 290 0	0,063 632 3
HLT_Photon120_R9Id90_HE10_IsoM	[130, 175[0,125 036	0,187 872
HLT_Photon165_R9Id90_HE10_IsoM	[175, 230[0,250 031	0,682 358
HLT_Photon200	[230, +∞[1	1

Tableau 4.9 – Chemins de déclenchement, intervalles d’impulsion transverse du photon et prescales utilisés.

6.2 Analyse

Intervalles de p_T^γ L’analyse a pour but de déterminer la correction résiduelle absolue en p_T des jets, définie dans la section 4.3. Pour cela, l’écart à l’unité du rapport moyen des réponses des jets dans les données et les simulations est déterminé dans différents intervalles de p_T^γ , listés dans le tableau 4.10. Ils sont une subdivision des intervalles définis pour les chemin de déclenchement dans le tableau 4.9, ce qui permet de séparer le traitement des événements correspondant à différents chemins de déclenchement.

[40, 50[[50, 60[[60, 85[[85, 105[
[105, 130[[130, 175[[175, 230[[230, 300[
[300, 400[[400, 500[[500, 700[[700, 1000[
[1000, 3000]			

Tableau 4.10 – Intervalles de p_T^γ en GeV.

Intervalles de $|\eta^{\text{jet}}|$ La calibration en énergie des jets dépend fortement de la région du détecteur dans laquelle le jet laisse un signal, comme le montre la figure 4.14 en page 79. Cet effet est dû aux différentes technologies utilisées ainsi qu’au vieillissement non uniforme du détecteur. Des intervalles de pseudo-rapidité du jet sont ainsi définis dans le tableau 4.11 afin de séparer le traitement de ces différentes régions.

[0; 0,783[[0,783; 1,305[[1,305; 1,93[[1,93; 2,5[
[2,5; 2,964[[2,964; 3,2[[3,2; 5,191[

Tableau 4.11 – Intervalles larges de $|\eta^{\text{jet}}|$.

Pondération par l’empilement Le profil d’empilement, c’est-à-dire la densité de probabilité du nombre d’interactions d’empilement, dépend de la période de la prise de données et du chemin de déclenchement par lequel l’événement est retenu. Ces dépendances sont illustrées sur les graphiques des figures 4.25 et 4.26. Les événements simulés sont ainsi pondérés pour faire correspondre leur profil d’empilement à celui des données, en prenant en compte la double dépendance avec la période de prise de donnée et le chemin de déclenchement.

Accord données-simulations Pour comparer les distributions des observables dans les événements, les distributions des événements simulés sont normalisées à la luminosité mesurée pour le jeu de données considéré. Les comparaisons étant faites entre les données et les événements simulés $\gamma + \text{jets}$, un désaccord dû à la contamination à bas p_T d’événements multijet est attendu, ces événements n’étant pas présents dans les simulations utilisées. De plus, l’utilisation d’une simulation au premier ordre perturbatif seulement influe sur le nombre de jets dans l’état final qui s’en trouve plus faible, en particulier dans les queues des distributions. Ces désaccords se constatent sur les graphiques de la figure 4.27 présentant les distributions de l’impulsion transverse du photon, l’énergie transverse manquante et les impulsions transverses du premier et du second jet. Afin de déterminer la correction résiduelle absolue en p_T des jets ainsi que la correction de leur résolution en énergie, seule la comparaison des distributions de R_{bal} et R_{MPF} est nécessaire. L’accord ainsi obtenu entre données et simulations est considéré comme suffisant.

Activité additionnelle des jets supplémentaires La présence d’un jet secondaire, comme sur la figure 4.22b, crée un déséquilibre dans R_{bal} dû à la physique de l’événement et non à la JES. Il ne faut donc pas corriger cet effet. Pour cela, il faut pouvoir se ramener au cas où un seul jet est présent, comme dans l’événement de la figure 4.22a. L’activité additionnelle liée aux jets supplémentaires est quantifiée par la variable

$$\alpha = \frac{p_{T,\text{jet 2}}^{\text{reco}}}{p_{T,\gamma}^{\text{jet}}} . \quad (4.37)$$

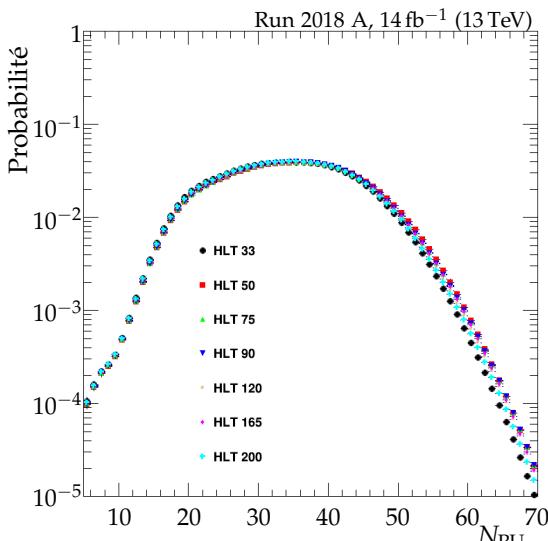
L’analyse des événements $\gamma + \text{jets}$ est alors réalisée pour différents intervalles de α afin de pouvoir réaliser par la suite une extrapolation à $\alpha = 0$, correspondant au cas idéal d’événements $\gamma + \text{jet}$. Les intervalles utilisés sont présentés dans le tableau 4.12. Il s’agit d’intervalles inclusifs, c’est-à-dire que chaque intervalle contient l’intervalle précédent. L’évolution des réponses moyennes en fonction de α y étant linéaire *a posteriori*, ce qui se retrouve dans les résultats de la figure 4.29, page 96, ce choix rend possible une extrapolation simple vers $\alpha = 0$.

[0; 0,10[[0; 0,15[[0; 0,20[[0; 0,25[[0; 0,30[
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

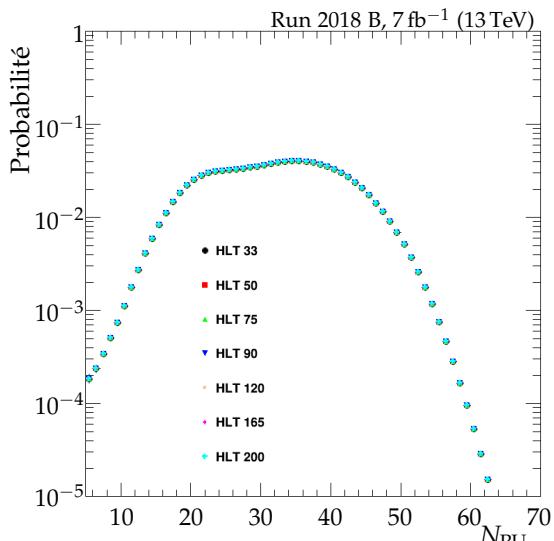
Tableau 4.12 – Intervalles de α utilisés pour la JES.

Des études sont en cours afin d’inclure des valeurs de α allant jusqu’à 1. L’exploitation des événements tels que $\alpha > 0,3$ est doublement motivée. Ces événements permettraient d’améliorer les corrections vis-à-vis du FSR introduit page 86 et les corrections à bas p_T . En effet, pour $p_{T,\gamma} < 100 \text{ GeV}$, imposer $\alpha < 0,3$ implique $p_{T,\text{jet}}^{\text{jet}} < 30 \text{ GeV}$, ce qui limite fortement le nombre d’événements exploitables.

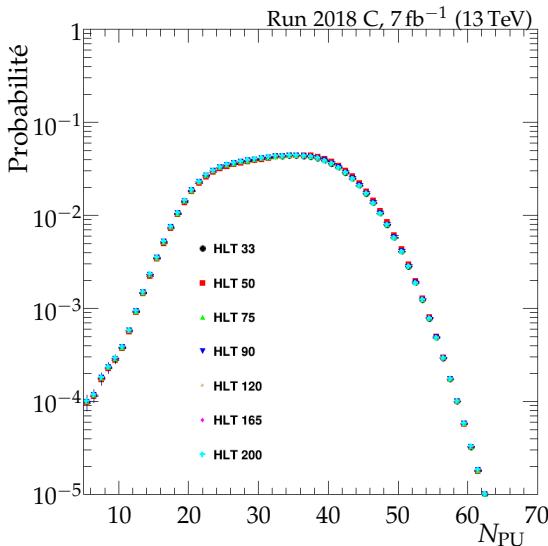
Obtention des corrections pour $p_{T,\gamma}, \eta^{\text{jet}}, (\alpha^{\text{max}})$ donnés Pour chaque domaine de $p_{T,\gamma}$ défini dans le tableau 4.10, de η^{jet} défini dans le tableau 4.11 et de α défini dans le tableau 4.12, les distributions des réponses balancée et MPF des données et des simulations sont déterminées. Certaines de ces distributions sont représentées sur la figure 4.28.



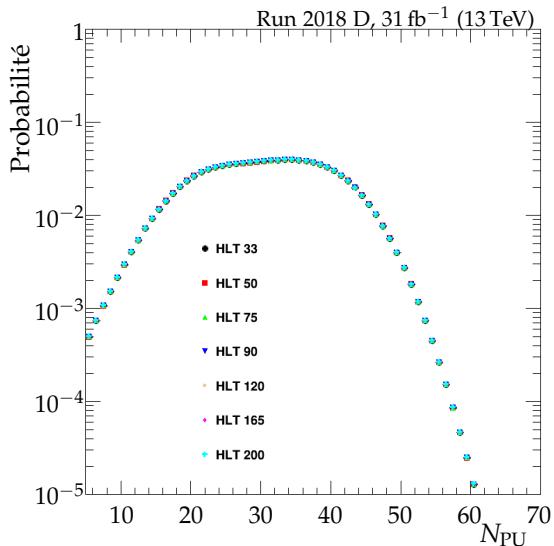
(a) Run 2018 A.



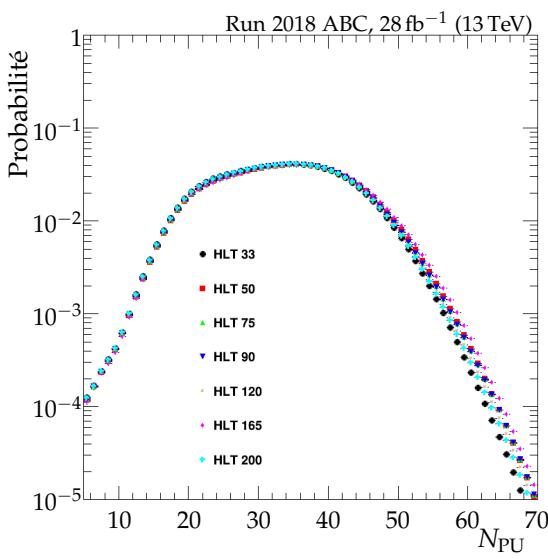
(b) Run 2018 B.



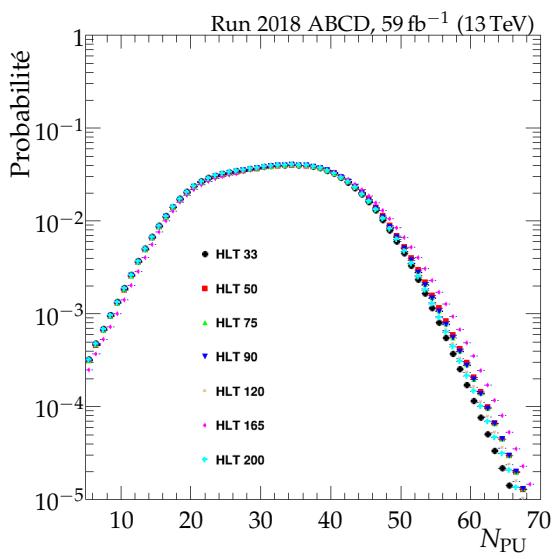
(c) Run 2018 C.



(d) Run 2018 D.



(e) Run 2018 ABC.



(f) Run 2018 ABCD.

Figure 4.25 – Densités de probabilité du nombre d’interactions d’empilement N_{PU} pour les périodes de prises de données de 2018.

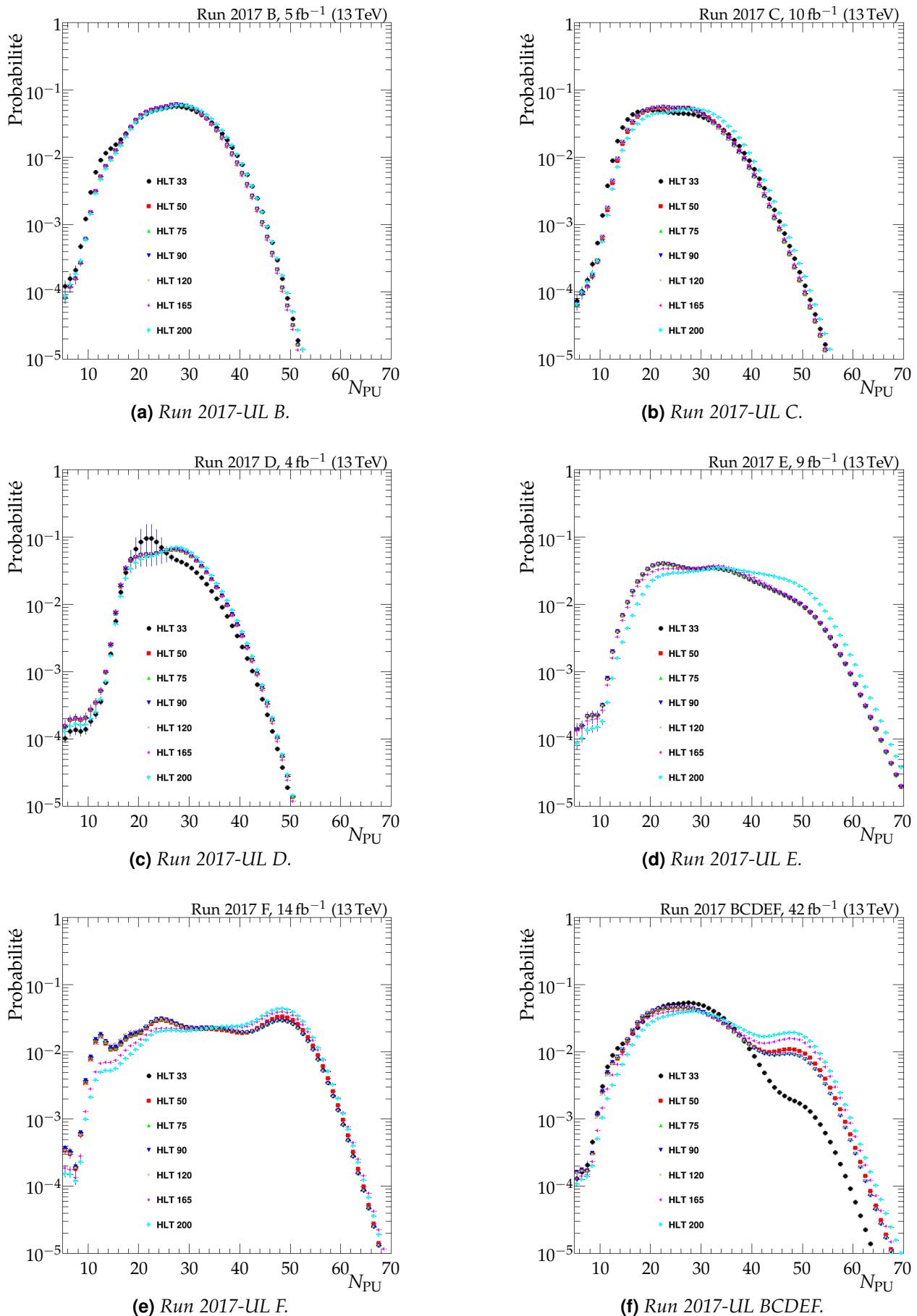


Figure 4.26 – Densités de probabilité du nombre d’interactions d’empilement N_{PU} pour les périodes de prises de données de 2017-UL.

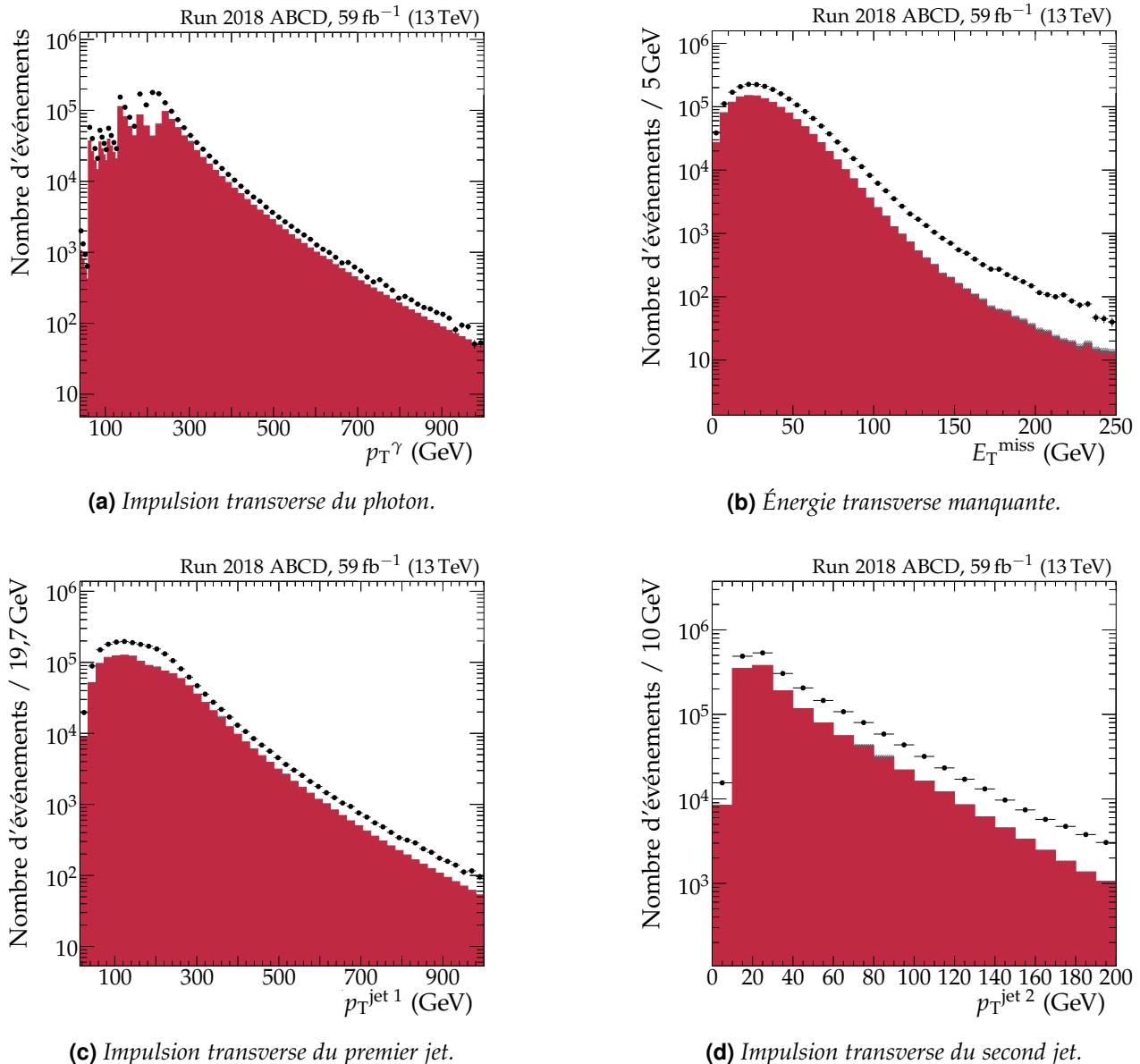
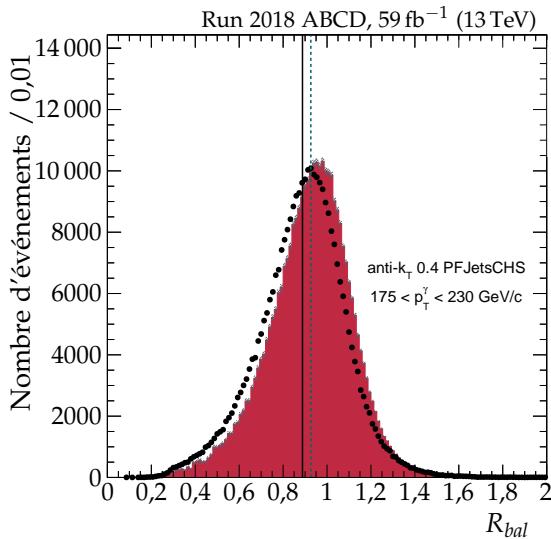
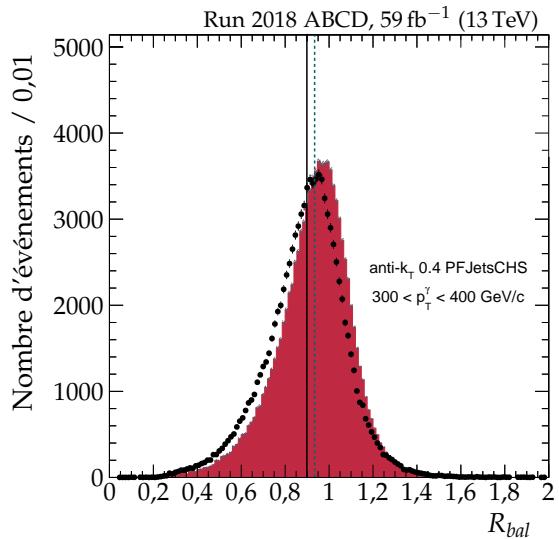
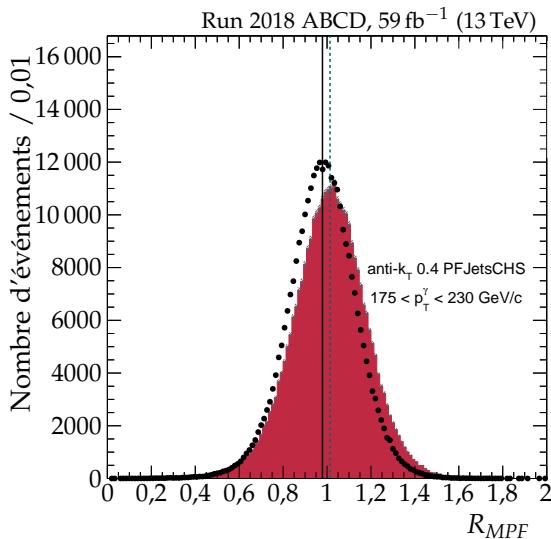
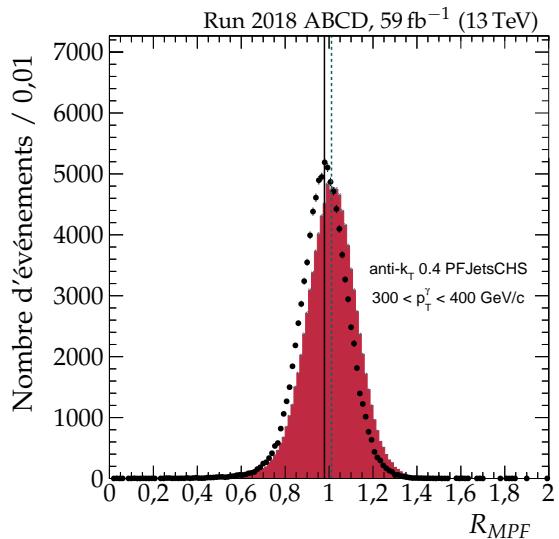


Figure 4.27 – Distributions d’observables dans les données (points noirs) et les simulations (histogramme en rouge) pour l’année 2018. Sur la figure 4.27a, l’effet des prescales (voir page 90) donnant une distribution en dents de scie est clairement visible.

Afin de limiter les effets des queues de ces distributions, en particulier dans le cas de la réponse balancée, une troncature leur est appliquée pour n’en conserver que les parties centrales. Pour cela, un ajustement à une gaussienne est réalisé pour chaque distribution. Les points considérés dans la suite sont alors ceux appartenant à un intervalle $[\bar{R} - \Delta R, \bar{R} + \Delta R]$ où \bar{R} est le centre de la gaussienne obtenue et ΔR est fixé tel que l’intégrale de la distribution tronquée représente 98,5 % de l’intégrale de la distribution initiale. Une estimation des moyennes de ces distributions tronquées est alors obtenue ; ces moyennes sont représentées sur la figure 4.28. Un écart est effectivement observé entre données et simulations. Il s’agit précisément de l’écart que la correction résiduelle absolue en p_T des jets doit corriger.

Extrapolation vers $\alpha = 0$ Une extrapolation vers $\alpha = 0$ est réalisée afin de s’affranchir de l’activité additionnelle des jets décrite dans la section 5.2. Les intervalles de α utilisés pour la JES sont présentés dans le tableau 4.12. L’utilisation des ces intervalles inclusifs permet une extrapolation linéaire en α , ce qui est réalisé sur la figure 4.29.

(a) Réponse balancée pour $p_T^\gamma \in [175, 230]$ [GeV].(b) Réponse balancée pour $p_T^\gamma \in [300, 400]$ [GeV].(c) Réponse MPF pour $p_T^\gamma \in [175, 230]$ [GeV].(d) Réponse MPF pour $p_T^\gamma \in [300, 400]$ [GeV].**Figure 4.28** – Réponses balancée et MPF dans les données (points noirs) et simulations (histogramme en rouge) pour $\alpha < 0,3$, $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ et deux intervalles de p_T^γ en 2018.

6.3 Résultats

La correction à appliquer aux données, définie par la formule (4.19) d'après la démarche exposée dans la section 4.3, s'obtient en calculant la valeur moyenne des réponses R_{bal} ou R_{MPF} pour les données et les simulations dans chacun des intervalles de p_T^γ défini dans le tableau 4.10 et de η^{jet} défini dans le tableau 4.11. Elle permet de ramener la réponse moyenne des jets dans les données à celle constatée dans les simulations.

Les résultats ainsi obtenus à l'aide des méthodes de la balance et MPF, avant et après extrapolation vers $\alpha = 0$, sont présentés dans les sections 6.3.1 et 6.3.2. Les distributions moyennes des réponses en fonction de p_T^γ dans les données et les simulations, ainsi que leurs rapports, y sont représentés. Un ajustement constant est réalisé dans chaque intervalle de η^{jet} afin d'obtenir un ordre de grandeur de la correction à appliquer dans cet intervalle. La dépendance en p_T de la correction est déterminée grâce à un ajustement global réalisé avec les résultats d'autres analyses, présenté dans la section 6.3.3. Enfin, une vérification de la bonne mise en œuvre de la correction ainsi déterminée est présentée dans la section 6.3.4.

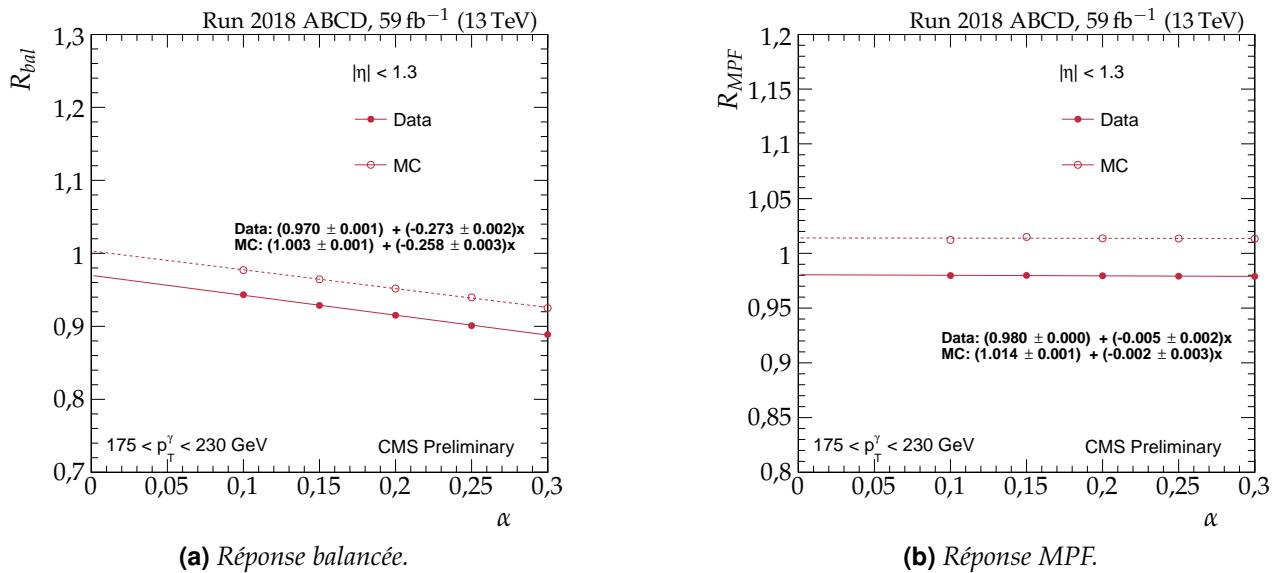


Figure 4.29 – Extrapolation vers $\alpha = 0$ de la réponse des jets pour $|\eta| < 1,3$ et $175 < p_T\gamma < 230 \text{ GeV}$ en 2018.

6.3.1 Résultats avant extrapolation

Les distributions des réponses balancées avant extrapolation se trouvent figure 4.30, page 97. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 4 % pour $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$, de 6 % pour $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$ et de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$.

Les distributions des réponses MPF avant extrapolation se trouvent figure 4.31, page 98. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$, de 5 % pour $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$, soit environ 1 % de moins qu'avec la méthode balancée, et de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$,

Il est à noter que ces résultats sont obtenus avant extrapolation vers $\alpha = 0$. Or, cette extrapolation a un effet beaucoup plus important sur la réponse balancée que sur la réponse MPF, comme le montre la figure 4.29.

6.3.2 Résultats après extrapolation

L'extrapolation des réponses vers $\alpha = 0$ est réalisée comme expliqué dans la section 6.2.

Les distributions des réponses balancées après extrapolation se trouvent figure 4.32, page 99. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$, de 5 % pour $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$, soit environ 1 % de moins qu'avant extrapolation, et de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$.

Les distributions des réponses MPF après extrapolation se trouvent figure 4.33, page 100. Les corrections à appliquer sont de l'ordre de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$, de 5 % pour $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$ et de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| > 2,5$, soit du même ordre qu'avant extrapolation. L'extrapolation a donc bien un effet très faible sur R_{MPF} .

Les valeurs des rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus sont résumés dans le tableau 4.13. L'extrapolation vers $\alpha = 0$ permet de rétablir l'accord entre les rapport des réponses balancée et MPF. Cet accord permet de valider l'utilisation de ces méthodes afin d'estimer la JES.

6.3.3 Ajustement global

Les événements $\gamma + \text{jets}$ ne permettent pas à eux seuls de couvrir avec une statistique suffisante l'ensemble de la gamme d'impulsions transverses à calibrer. De plus, l'utilisation de différentes catégories d'événements permet de valider *a posteriori* les résultats des analyses entre elles. Un ajustement global est alors réalisé sur les événements $Z + \text{jets}$, $\gamma + \text{jets}$ et multijet afin d'obtenir la correction finale à appliquer aux données.

Cet ajustement est réalisé en minimisant un χ^2 prenant en compte les contraintes de chaque catégorie d'événements. La correction résiduelle absolue en p_T des jets correspond ainsi à l'ajustement

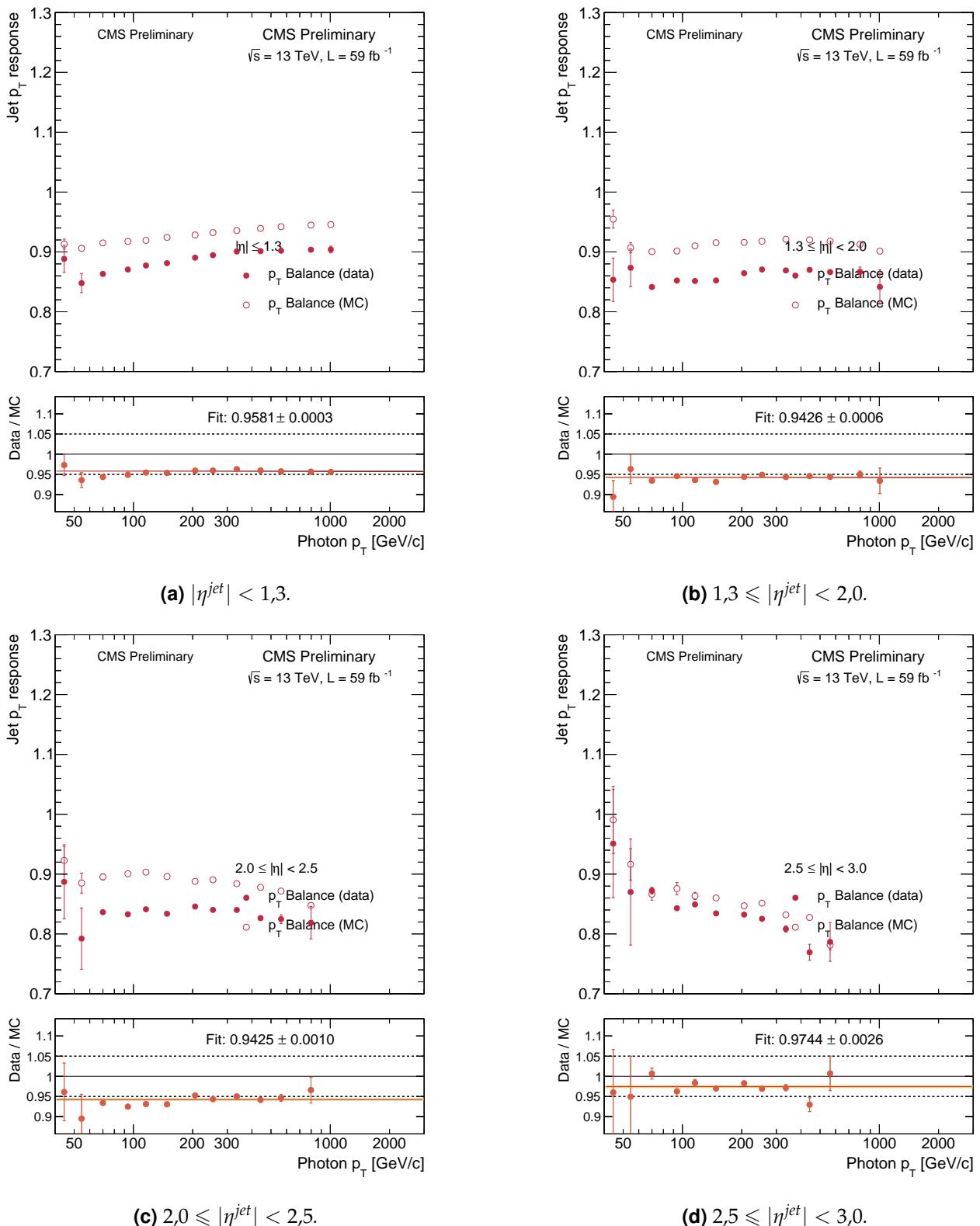


Figure 4.30 – Distributions des réponses balancées moyennes en fonction de p_T^γ pour différents intervalles de $|\eta^{\text{jet}}$ en 2018 avant extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.

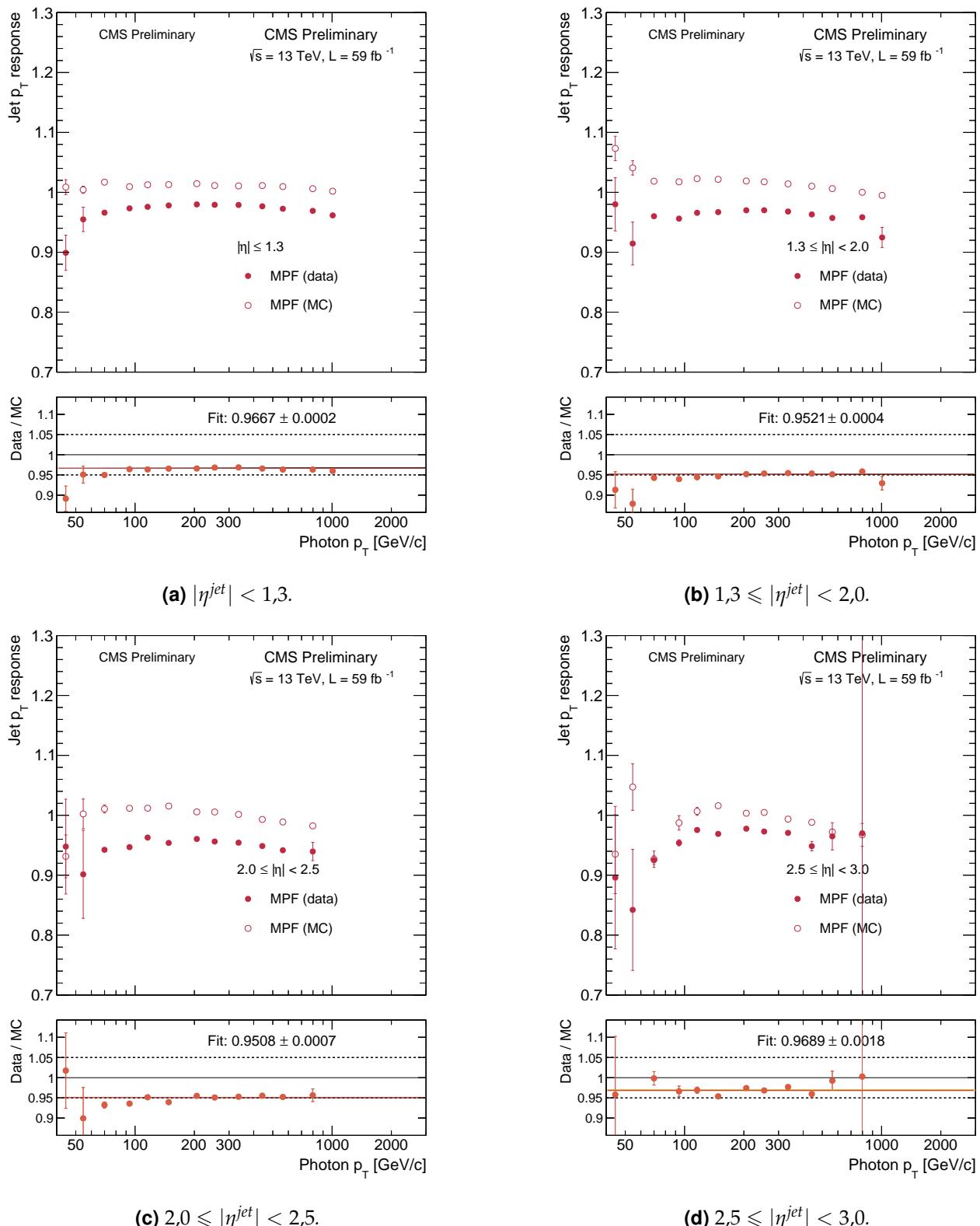


Figure 4.31 – Distributions des réponses MPF moyennes en fonction de p_T^γ pour différents intervalles de $|\eta^{jet}|$ en 2018 avant extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.

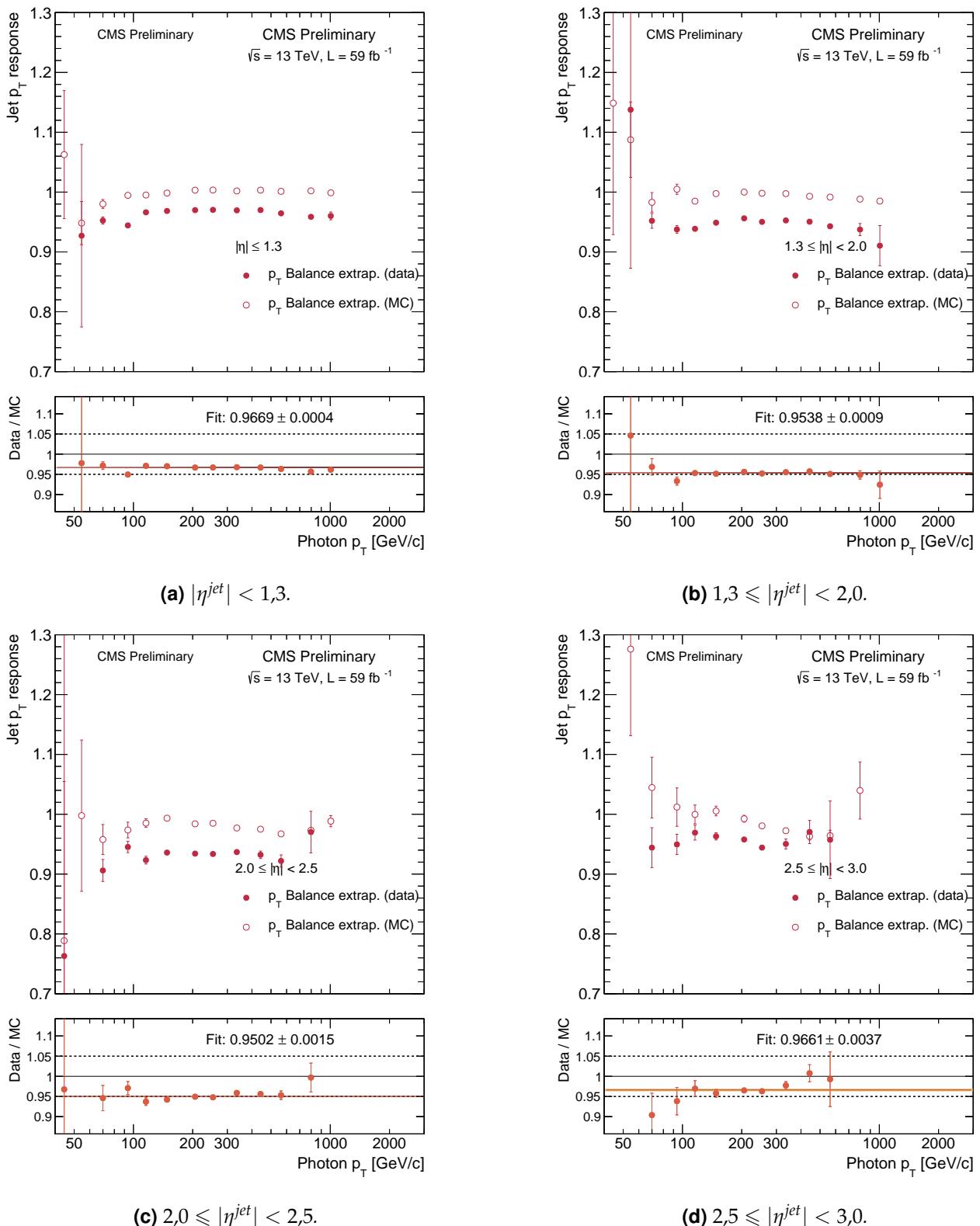


Figure 4.32 – Distributions des réponses balancées moyennes en fonction de p_T^γ pour différents intervalles de $|\eta^{jet}|$ en 2018 après extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.

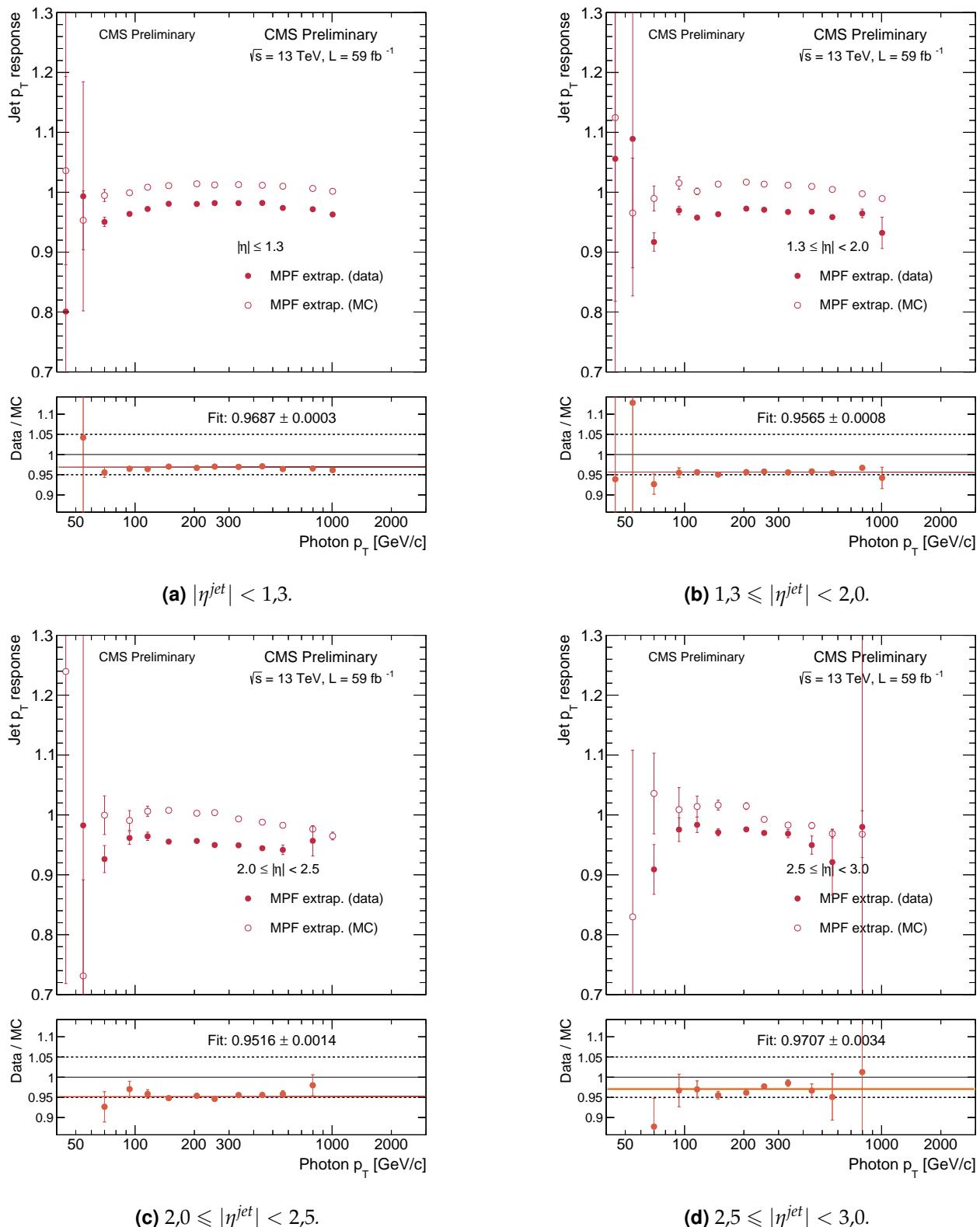


Figure 4.33 – Distributions des réponses MPF moyennes en fonction de p_T^γ pour différents intervalles de $|\eta^{jet}|$ en 2018 après extrapolation. Le rapport données sur simulations est présenté dans chaque cas ainsi qu'un ajustement à une constante donnant l'ordre de grandeur de la correction résiduelle à appliquer.

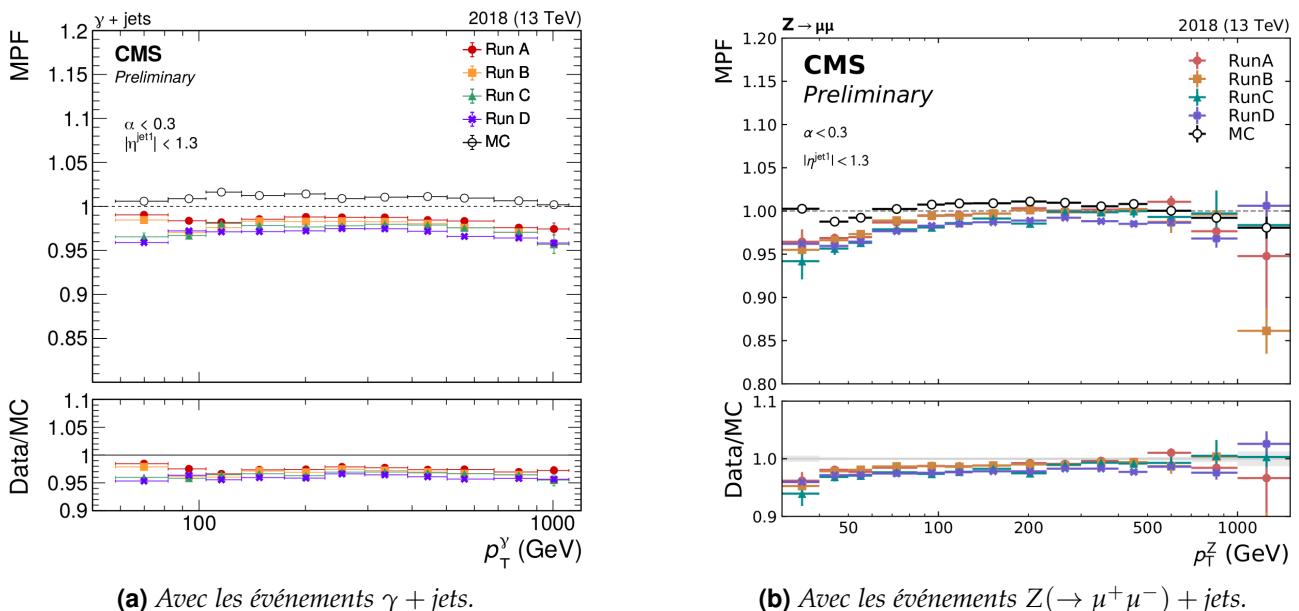
$ \eta^{\text{jet}} \in$	Réponse balancée		Réponse MPF	
	$\alpha < 0,3$	$\alpha \rightarrow 0$	$\alpha < 0,3$	$\alpha \rightarrow 0$
[0; 1,3[$0,9581 \pm 0,0003$	$0,9669 \pm 0,0004$	$0,9667 \pm 0,0002$	$0,9687 \pm 0,0003$
[1,3; 2,0[$0,9426 \pm 0,0006$	$0,9538 \pm 0,0009$	$0,9521 \pm 0,0004$	$0,9565 \pm 0,0008$
[2,0; 2,5[$0,9425 \pm 0,0010$	$0,9502 \pm 0,0015$	$0,9508 \pm 0,0007$	$0,9516 \pm 0,0014$
[2,5; 3,0[$0,9744 \pm 0,0026$	$0,9661 \pm 0,0037$	$0,9689 \pm 0,0018$	$0,9707 \pm 0,0034$

Tableau 4.13 – Rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus en 2018.

d'une fonction paramétrique. Les incertitudes présentes dans les différentes analyses sont considérées comme des paramètres de nuisance pour l'ajustement. Ces incertitudes sont :

- 4,6 % sur la section efficace de collision inélastique pp utilisée pour estimer les profils d'empilement;
- les incertitudes de la JEC, décrites section 4.4, page 82;
- l'échelle en énergie des objets de référence, 0,2 % pour les photons et les muons, 0,5 % pour les électrons;
- les effets de l'ISR et du FSR se retrouvant dans l'incertitude de l'extrapolation en α ;
- la propagation des calibrations des photons et des électrons dans l'énergie transverse manquante.

La figure 4.34 compare les résultats produits lors de ma thèse avec les événements $\gamma + \text{jets}$ à ceux de l'analyse basée sur les événements $Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) + \text{jets}$ pour l'année 2018. La réponse des jets dans les données diminue du Run A au Run D dans les deux analyses, ce qui est dû à l'évolution des conditions d'acquisition des données au cours du temps. Le vieillissement du détecteur est une des sources de dépendance temporelle de la réponse des jets. La calibration en énergie des jets est ainsi déterminée à la fois pour une année entière, pour les différents *runs* individuellement et éventuellement pour des ensembles de *runs* successifs, ce qui permet d'améliorer la précision obtenue sur l'énergie des jets.

**Figure 4.34** – Distributions de la réponse MPF moyenne en fonction de p_T dans les événements avec $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ et $\alpha < 0,3$ pour chaque période de prise de données et pour les simulations en 2018 [146].

L'ajustement global sur les résultats des différentes analyses est illustré, pour les trois années du Run II, sur la figure 4.16 en page 81. La correction résiduelle absolue en p_T des jets utilisée par la collaboration CMS est ainsi obtenue.

6.3.4 Test d'intégrité

Il est possible de vérifier que la correction résiduelle absolue en p_T des jets déterminée permet bien de rapprocher les réponses des jets entre données et simulations. Pour cela, l'analyse est à nouveau réalisée en appliquant la correction résiduelle absolue en p_T des jets lors de leur calibration. Les valeurs des rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus avant et après utilisation de cette correction sont présentés dans le tableau 4.14. Ces rapports se rapprochent de 1, ce qui montre que la correction améliore l'accord données-simulations. Cette amélioration peut également se constater sur les distributions des réponses des jets, dont une comparaison est proposée sur la figure 4.35 où les deux distributions sont plus proches l'une de l'autre après correction complète.

$ \eta^{\text{jet}} \in$	Réponse balancée		Réponse MPF	
	avant \mathcal{C}_{Res}	après \mathcal{C}_{Res}	avant \mathcal{C}_{Res}	après \mathcal{C}_{Res}
$[0; 1,3[$	$0,9669 \pm 0,0004$	$0,9867 \pm 0,0004$	$0,9687 \pm 0,0003$	$0,9877 \pm 0,0003$
$[1,3; 2,0[$	$0,9538 \pm 0,0009$	$0,9739 \pm 0,0009$	$0,9565 \pm 0,0008$	$0,9753 \pm 0,0008$
$[2,0; 2,5[$	$0,9502 \pm 0,0015$	$0,9698 \pm 0,0016$	$0,9516 \pm 0,0014$	$0,9724 \pm 0,0014$
$[2,5; 3,0[$	$0,9661 \pm 0,0037$	$0,9884 \pm 0,0039$	$0,9707 \pm 0,0034$	$0,9922 \pm 0,0035$

Tableau 4.14 – Rapports données sur simulations des réponses balancée et MPF obtenus en 2018 après extrapolation vers $\alpha = 0$.

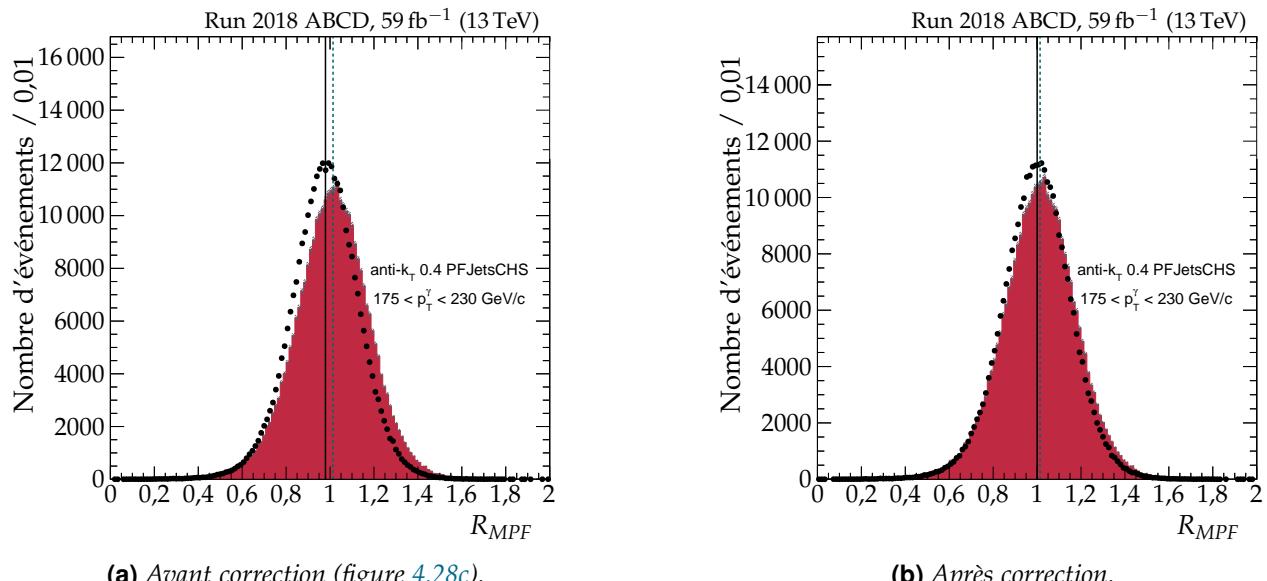


Figure 4.35 – Comparaison des réponses MPF avant et après correction résiduelle absolue pour $p_T^\gamma \in [175, 230[\text{ GeV}$ et $|\eta| < 1,3$ en 2018.

7 Correction de la résolution en énergie avec les événements $\gamma + \text{jets}$

Déterminer la correction de la résolution en énergie des jets, ou JER, en 2018 et 2017-UL avec les événements $\gamma + \text{jets}$ a été un des mes travaux de thèse. La méthode est sensiblement la même que pour déterminer la correction résiduelle absolue en p_T des jets, ou JES.

Dans le cas de la JES, la moyenne de la distribution des réponses des jets est corrigée. Pour la JER, c'est la largeur de cette distribution qui doit être corrigée. La sélection des événements est ainsi faite comme dans le cas de la JES décrite section 6.1, à ceci près que la correction résiduelle absolue en p_T des jets est appliquée.

7.1 Définition de la résolution en énergie des jets

La résolution en énergie des jets se détermine à l'aide de leur réponse balancée R_{bal} . À partir de la définition de R_{bal} en page 79, il est possible d'écrire dans le cas des événements $\gamma + \text{jets}$

$$R_{bal} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^\gamma} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{reco}}} = \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{jet } 1}} \times \frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{ptcl}}} \times \frac{p_T^\gamma}{p_T^{\text{reco}}}, \quad (4.38)$$

ce qui se traduit en terme des largeurs des distributions de chacune de ces fractions sous la forme

$$\sigma_{R_{bal}} = \sigma \left(\frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{jet } 1}} \right) \oplus \sigma \left(\frac{p_T^{\text{jet } 1}}{p_T^{\text{ptcl}}} \right) \oplus \sigma \left(\frac{p_T^\gamma}{p_T^{\text{reco}}} \right), \quad (4.39)$$

où \oplus désigne une somme quadratique. Des termes de cette dernière équation, le premier rend compte de la résolution en énergie des jets au niveau reconstruit et est noté σ_{JER} dans la suite. Il s'agit de la grandeur d'intérêt dans cette analyse. Le second terme est lié à la physique de l'événement sous-jacent, c'est-à-dire de l'empilement, des émissions de particules secondaires et des neutrinos. Après extrapolation vers $\alpha = 0$, la contribution des émissions de particules secondaires devient négligeable. Ce terme est noté σ_{PLI} dans la suite ; « PLI » signifie interaction au niveau particule (*Particle Level Interaction*). Enfin, le dernier terme est lié à la résolution en énergie des photons, noté σ_γ .

L'équation (4.39) se réécrit alors, en utilisant les notations introduites,

$$\sigma_{R_{bal}} = \sigma_{\text{JER}} \oplus \sigma_{\text{PLI}} \oplus \sigma_\gamma, \quad (4.40)$$

ce qui peut se réarranger afin d'exprimer σ_{JER} sous la forme

$$\sigma_{\text{JER}} = \sigma_{R_{bal}} \ominus \sigma_{\text{PLI}} \ominus \sigma_\gamma. \quad (4.41)$$

La bonne qualité de reconstruction des photons permet de négliger le terme σ_γ dans la suite.

7.2 Analyse

Similitudes avec l'analyse menée pour la JES L'analyse des événements $\gamma + \text{jets}$ dans le cas de la JER est semblable à celle pour la JES, décrite dans la section 6.2. Les intervalles de p_T^γ , $|\eta^{\text{jet}}|$ et α sont toutefois différents. Les intervalles de ces grandeurs utilisés pour la JER sont définis dans les tableaux 4.15, 4.16 et 4.17. En particulier, les intervalles de α sont exclusifs, contrairement aux intervalles inclusifs utilisés pour la JES.

[105, 130[[130, 175[[175, 200[[200, 230[[230, 300[
[300, 400[[400, 500[[500, 700[[700, 3000[

Tableau 4.15 – Intervalles de p_T^γ en GeV utilisés pour la JER.

[0,0; 0,522[[0,522; 0,783[[0,783; 1,131[[1,131; 1,305[[1,305; 1,740[
[1,740; 1,930[[1,930; 2,043[[2,043; 2,322[[2,322; 2,5[[2,5; 2,853[
[2,853; 2,954[[2,954; 3,139[[3,139; 5,191[

Tableau 4.16 – Intervalles fins de $|\eta^{\text{jet}}|$ utilisés pour la JER.

[0; 0,10[[0,10; 0,15[[0,15; 0,20[[0,20; 0,25[[0,25; 0,30[
-----------	--------------	--------------	--------------	--------------

Tableau 4.17 – Intervalles de α utilisés pour la JER.

Obtention de $\sigma_{R_{bal}}$ et σ_{PLI} pour ($p_T^\gamma, \eta^{\text{jet}}, \alpha$) donnés Pour chaque domaine de p_T^γ défini dans le tableau 4.15, de η^{jet} défini dans le tableau 4.16 et de α défini dans le tableau 4.17, les distributions de la réponse balancée dans les données et les simulations sont déterminées.

Comme dans le cas de la JES, seuls les centres de ces distributions sont considérés afin de limiter les effets des leurs queues. Alors, $\sigma_{R_{bal}}$ s'obtient à partir des points restant comme étant le rapport de la variance de la distribution de ces points divisée par leur valeur moyenne.

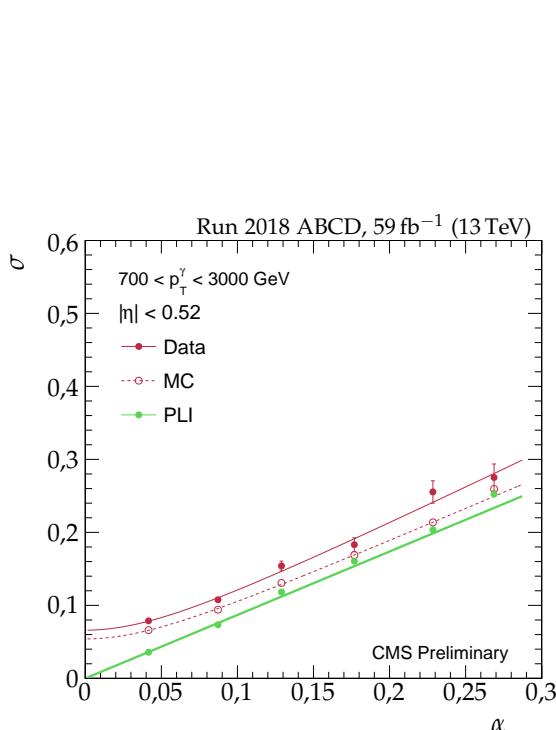
Dans ces mêmes domaines de p_T^γ , η^{jet} et α , les distributions de $p_T^{\text{jet}1}$ et p_T^{γ} sont estimées à partir des événements simulés. Il est alors possible d'obtenir σ_{PLI} .

Extrapolation vers $\alpha = 0$ Une extrapolation vers $\alpha = 0$ est réalisée afin de s'affranchir de l'activité additionnelle des jets décrits dans la section 5.2. Les intervalles de α utilisés pour la JER sont présentés dans le tableau 4.17. L'extrapolation n'est plus linéaire comme dans le cas de la JES. Une fonction de la forme

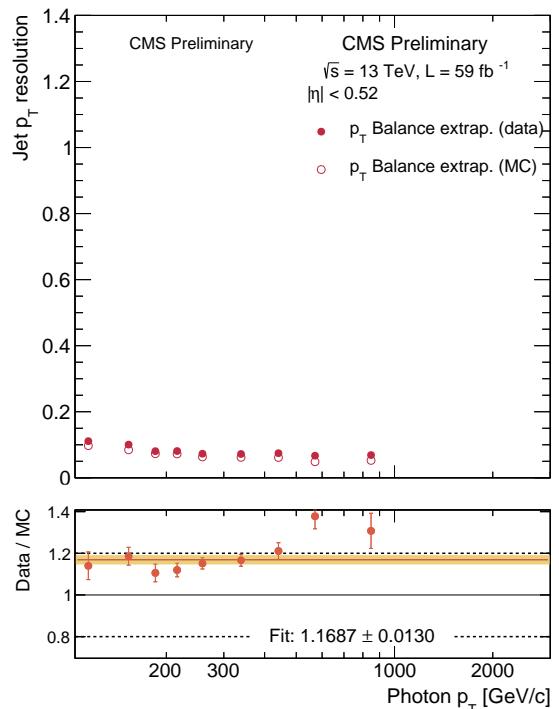
$$\sigma_i = \sqrt{(a_i\alpha)^2 + b_i^2} \quad (4.42)$$

est utilisée pour $\sigma_{R_{bal}}^{\text{données}}$, $\sigma_{R_{bal}}^{\text{simulations}}$ et σ_{PLI} . L'extrapolation est illustrée sur la figure 4.36a.

Détermination de σ_{JER} en fonction de η^{jet} Dans chacun des intervalles de p_T^γ et η^{jet} , pour les données et les simulations, la contribution estimée de l'événement sous-jacent est soustraite en quadrature à $\sigma_{R_{bal}}$ afin d'obtenir σ_{JER} en suivant l'équation (4.41). Puis, un ajustement constant en p_T des rapports de σ_{JER} extrapolés à $\alpha = 0$ entre données et simulations est déterminé dans chaque intervalle de η^{jet} , comme sur la figure 4.36b. La valeur de cet ajustement correspond au facteur à appliquer à la JER dans l'intervalle de η^{jet} .



(a) Extrapolation vers $\alpha = 0$ de la résolution des jets pour $|\eta| < 0,52$ et $700 < p_T^\gamma < 3000 \text{ GeV}$ en 2018.



(b) Résolution en énergie des jets extrapolée à $\alpha = 0$ pour $|\eta| < 0,52$ en 2018.

Figure 4.36 – Détermination de la résolution en énergie des jets.

Incertitudes Les incertitudes prises en compte dans la mesure de la JER sont :

- 4,6 % sur la section efficace de collision inélastique pp utilisée pour estimer les profils d'empilement;

— les incertitudes de la JEC, décrites section 4.4, page 82.

Les incertitudes sur l'échelle en énergie des photons ainsi que leur résolution sont négligées face aux autres incertitudes considérées.

7.3 Résultats

Les résultats issus de l'analyse des événements $\gamma + \text{jets}$ pour l'année 2018 sont présentés sur la figure 4.37a. La combinaison avec l'analyses des événements dijet permet d'obtenir les facteurs correctifs utilisés par la collaboration, présentés sur la figure 4.37b. Ces facteurs sont de l'ordre de 1,2 dans le bâillet et peuvent atteindre 2,3 dans les bouchons.

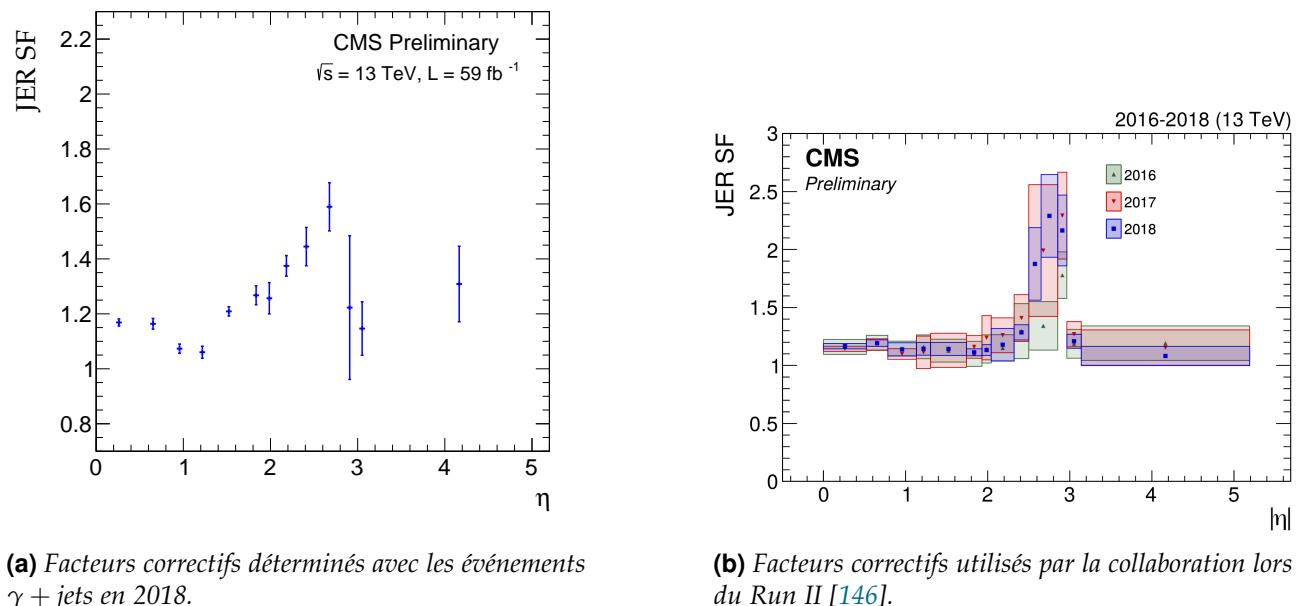


Figure 4.37 – Facteurs correctifs de la résolution en énergie des jets.

L'effet de l'application des facteurs correctifs de la résolution en énergie des jets est particulièrement visible dans la région $2,5 \leq |\eta| < 3,0$ où sa valeur est de l'ordre de 2. Les distributions des réponses balancées des jets dans les données et les simulations avant et après application de ces facteurs sont illustrées pour cette région sur la figure 4.38. Les réponses des jets dans les données ne sont pas modifiées par la correction de la résolution en énergie des jets, ces distributions sont donc identiques dans les figures 4.38a et 4.38b.

8 Conclusion

Ce chapitre a abordé le sujet des jets.

Dans un premier temps, leur mécanisme de formation a été décrit. Leur apparition est due à l'interaction forte, d'abord dans un régime de haute énergie menant à une gerbe partonique, puis dans un régime de basse énergie donnant lieu au phénomène d'hadronisation.

Dans un second temps, la reconstruction des jets a été abordée. Plusieurs algorithmes permettent de regrouper les particules individuellement reconstruites en jets. La forme exacte des jets reconstruits dépend de la méthode utilisée. Au sein de la collaboration CMS, l'algorithme de regroupement principalement utilisé est l'algorithme « anti- k_T ». Une liste de « candidats » jets est ainsi obtenue. Ces candidats doivent alors remplir des critères d'identification afin d'être effectivement considérés comme des jets.

La saveur des jets a brièvement été discutée. En effet, selon le type de particule initiant le jet, ce dernier présente des caractéristiques variables. Bien qu'il soit impossible de remonter à coup sûr à cette particule initiale, ces caractéristiques permettent de l'estimer.

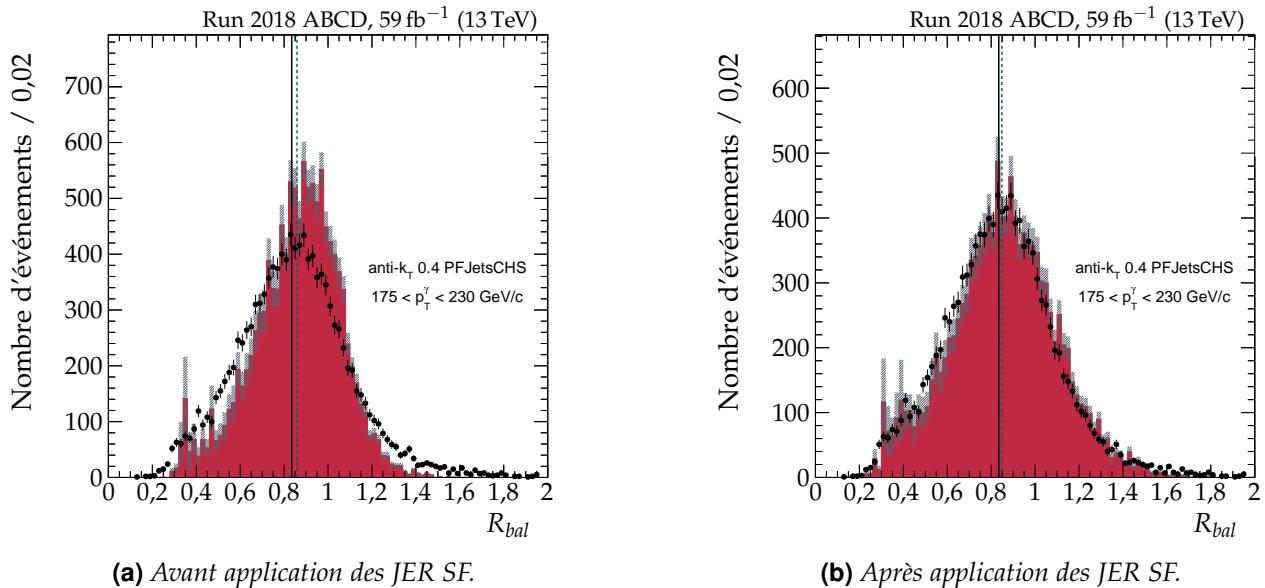


Figure 4.38 – Comparaison des réponses balancées avant et après correction de la résolution en énergie des jets pour $p_{\text{T}}^{\gamma} \in [175, 230] \text{ GeV}$ et $2,5 \leq |\eta| < 3,0$ en 2018.

Les jets ainsi reconstruits et identifiés sont des objets dits de « haut niveau » qu'il est nécessaire de calibrer, comme tout autre objet reconstruit. La procédure de calibration en énergie des jets utilisée dans la collaboration CMS a été présentée. Elle permet d'obtenir des jets de la meilleure qualité possible pour les analyses de physique menées par l'ensemble de la collaboration. Il s'agit d'une approche factorisée de plusieurs corrections, chacune ayant pour but de corriger un effet en particulier.

L'obtention d'une de ces corrections pour les années 2018 et 2017-UL a fait partie de mon travail de thèse et a été développée plus en détails, ainsi que la phénoménologie des événements utilisés. Il s'agit d'événements $\gamma + \text{jets}$ dans lesquels la balance entre le photon et un jet permet d'estimer l'échelle en énergie du jet connaissant celle du photon. Pour l'année 2018, la réponse des jets dans ces événements est inférieure dans les données par rapport aux simulations de 3 % pour $|\eta^{\text{jet}}| < 1,3$ à 5 % pour $1,3 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,5$. L'incertitude absolue sur ces mesures est inférieure à 0,3 %.

La résolution en énergie des jets doit également être corrigée. À l'aide d'une étude similaire menée sur les mêmes événements, également détaillée dans ce chapitre, les facteurs d'échelle ont été obtenus lors de ma thèse pour les années 2018 et 2017-UL.

Pour l'année 2018, la résolution en énergie des jets dans ces événements est inférieure dans les données par rapport aux simulations de $(6 \pm 3) \%$ pour $1,131 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 1,305$ à $(60 \pm 9) \%$ pour $2,5 \leq |\eta^{\text{jet}}| < 2,8$.

Les jets sont omniprésents dans les collisions du LHC. Ces travaux permettent la bonne caractérisation des jets et sont donc essentiels pour réaliser des analyses de physique de qualité. Parmi ces analyses se trouve celle des événements $h \rightarrow \tau\tau$, sujet du chapitre 5.

Chapitre 5

Recherche d'un boson de Higgs de haute masse

Sommaire

1	Introduction	107
2	Sélection d'événements et catégorisation	107
2.1	Données	107
2.2	Simulation	108
2.3	Catégorisation	108
3	Chaîne d'analyse	108
4	Estimation du bruit de fond	108
4.1	Estimations de bruits de fond à partir de simulations	108
4.2	Estimations de bruits de fond à partir de données	108
5	Incertitudes systématiques	108
5.1	Incertitudes de normalisation	108
5.2	Incertitudes de forme	108
6	Résultats et interprétations	108
7	Conclusion	108

Citer The CMS Collaboration. « Search for additional neutral MSSM Higgs bosons in the di-tau final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ». *Journal of High Energy Physics* **09**.007 (sept. 2018). DOI : [10.1007/JHEP09\(2018\)007](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2018)007)

et aussi nouvelle version full runII si possible

Citer la thèse de Gaël :

G. TOUQUET. « Search for an additional neutral MSSM Higgs boson decaying to tau leptons with the CMS experiment ». Thèse de doct. Université Claude Bernard Lyon 1, oct. 2019. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02526393>

Citer également la thèse d'Artur ?

A. GOTTMANN. « Global Interpretation of $\tau\tau$ Events in the Context of the Standard Model and Beyond ». Thèse de doct. Fakultät für Physik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), juin 2020

Études déjà menées au LEP [163] et au Tevatron [164, 165]

LHC : aussi avec $b\bar{b}$ [166, 167]

ATLAS $\mu\mu$ et $\tau\tau$ [168, 169]

CMS $\mu\mu$ [170] $\tau\tau$ [52, 53, 171]

reconstruction τ_h [172]

1 Introduction

2 Sélection d'événements et catégorisation

2.1 Données

gen_match	Type de particule	Propriétés de l'objet au niveau générateur
1	électron natif	$ pdgID = 11, p_T > 8 \text{ GeV}$, IsPrompt == True
2	muon natif	$ pdgID = 13, p_T > 8 \text{ GeV}$, IsPrompt == True
3	$\tau \rightarrow e$	$ pdgID = 11, p_T > 8 \text{ GeV}$, IsDirectPromptTauDecayProduct == True
4	$\tau \rightarrow \mu$	$ pdgID = 13, p_T > 8 \text{ GeV}$, IsDirectPromptTauDecayProduct == True
5	$\tau \rightarrow \tau_h$	Tau hadronique généré
6	Faux τ_h , τ_h de l'empilement	Tout objet ne rentrant pas dans les catégories 1 à 5

Tableau 5.1 – Valeurs prises par `gen_match`, variable de correspondance des taus hadroniques à l'objet généré dans les événements simulés.

2.2 Simulation

2.3 Catégorisation

3 Chaîne d'analyse

`tau_h ID and reco?`

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'encapsulement 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

Reconstruction de la masse d'une résonance grâce au *Machine Learning*

Sommaire

1	Introduction	110
2	Le Machine Learning	110
2.1	Généralités	110
2.2	Le Gradient Boosting	110
2.3	Le Deep Learning	110
3	Application du Machine Learning aux événements $H \rightarrow \tau\tau$	110
3.1	Génération des événements	110
3.2	Variables d'entrées	110
3.3	Performances sur les événements de test	110
3.4	Performances sur les événements de l'analyse CMS	110
4	Prise en compte de l'empilement	110
4.1	Génération des événements	110
4.2	Performances	110
4.3	Variables d'entrées supplémentaires	110
4.4	Performances	110
5	Effets sur les résultats de l'analyse MSSM HTT	110
6	Conclusion	110

☞ Citations incontournables :

- DELPHES 3.4.2 [173, 174]?
- CMS Fast Simulation (FASTSIM) [175-178]
- PYTHIA 8.235 [123]
- FASTJET [140, 179]
- KERAS [153]
- TENSORFLOW [154]
- XGBOOST [180]
- [151] for an example of nn use in HEP
- [181]
- [182]
- SVFIT [183]

Citer également la thèse de Gaël :

G. TOUQUET. « Search for an additional neutral MSSM Higgs boson decaying to tau leptons with the CMS experiment ». Thèse de doct. Université Claude Bernard Lyon 1, oct. 2019. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02526393>

- type of samples/events
- preselection (small HTT analysis)
- inputs
- performances : métrique ?

- mass range + plots
- METcov + plots
- PU + plots

1 Introduction

2 Le *Machine Learning*

2.1 Généralités

2.2 Le *Gradient Boosting*

2.3 Le *Deep Learning*

3 Application du *Machine Learning* aux événements $H \rightarrow \tau\tau$

3.1 Génération des événements

3.2 Variables d'entrées

3.3 Performances sur les événements de test

3.4 Performances sur les événements de l'analyse CMS

4 Prise en compte de l'empilement

4.1 Génération des événements

4.2 Performances

(sur ces nouveaux événements)

4.3 Variables d'entrées supplémentaires

4.4 Performances

(avec les nouvelles variables)

5 Effets sur les résultats de l'analyse MSSM HTT

(remplacement de mttot par les prédictions du meilleur modèle, nouveaux plots d'exclusion, comparaison)

6 Conclusion

Chapitre 7

Conclusion

Annexe A

Notions mathématiques

Convention de sommation d'Einstein Il s'agit d'un raccourci de notation allégeant les équations. Ainsi, pour un espace de Minkowski de métrique η ,

$$a_\mu b^\mu = a^\mu b_\mu = a^\mu \eta_{\mu\nu} b^\nu = a_\mu \eta^{\mu\nu} b_\nu = a^0 b^0 - \sum_{i=1}^3 a^i b^i \quad (\text{A.1})$$

car la métrique de Minkowski est ici

$$\eta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.2})$$

Matrices de Pauli

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.3})$$

Matrices de Dirac ou matrices gamma

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} \mathbb{1}_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & -\mathbb{1}_{2 \times 2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \gamma^1 = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 2} & \sigma_1 \\ -\sigma_1 & 0_{2 \times 2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\gamma^2 = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 2} & \sigma_2 \\ -\sigma_2 & 0_{2 \times 2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma^3 = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 2} & \sigma_3 \\ -\sigma_3 & 0_{2 \times 2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.4})$$

Projecteur chiral

$$\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

Matrices de Gell-Mann

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

Annexe B

Diagrammes de Feynman

R. P. FEYNMAN. « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics ». *Physical Review* **76**.6 (sept. 1949), p. 769-789. DOI : [10.1103/PhysRev.76.769](https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.769). URL : <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.76.769>

Il s'agit de représentations graphiques des interactions entre particules. Dans ce manuscrit, le temps s'écoule de gauche à droite sur un diagramme de Feynman, ainsi l'état initial se trouve à gauche, et l'état final à droite.

La propagation d'une particule est modélisée par un trait et une interaction a lieu au niveau des connexions entre ces traits, nommés « vertex ».

Cas de l'interaction électromagnétique.

$$\bar{\psi} \gamma^\mu e Q A_\mu \psi = \bar{\psi}_a [\gamma^\mu]_{ab} e Q A_\mu \psi_b \quad (\text{B.1})$$

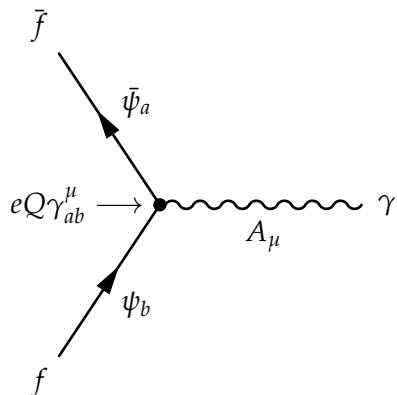


Figure B.1 – Diagramme de Feynman issu du terme du lagrangien du modèle standard de l'équation (B.1). Un fermion f et un antifermion \bar{f} sont présents dans l'état initial et sont décrits par un champ fermionique ψ et son adjoint $\bar{\psi}$. Le champ ψ interagit par ses composantes a et b avec le champ vectoriel A_μ au vertex, avec un couplage donné par $eQ\gamma^\mu_{ab}$. Il en résulte un photon γ , décrit par ce champ A_μ .

Bibliographie

- [1] S. L. GLASHOW. « The renormalizability of vector meson interactions ». *Nuclear Physics* **10** (1959), p. 107-117. doi : [10.1016/0029-5582\(59\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0029-5582(59)90196-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029558259901968>.
- [2] A. SALAM & J. WARD. « Weak and electromagnetic interactions ». *Nuovo Cim* **11** (fév. 1959), p. 568-577. doi : [10.1007/BF02726525](https://doi.org/10.1007/BF02726525). URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02726525>.
- [3] S. WEINBERG. « A model of leptons ». *Physical Review Letters* **19** (21 nov. 1967), p. 1264-1266. doi : [10.1103/PhysRevLett.19.1264](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1264). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.19.1264>.
- [4] C. S. WU & coll. « Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay ». *Physical Review* **105** (4 fév. 1957), p. 1413-1415. doi : [10.1103/PhysRev.105.1413](https://doi.org/10.1103/PhysRev.105.1413). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.105.1413>.
- [5] J. H. CHRISTENSON & coll. « Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson ». *Physical Review Letters* **13** (4 juil. 1964), p. 138-140. doi : [10.1103/PhysRevLett.13.138](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.138). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138>.
- [6] M. KOBAYASHI & T. MASKAWA. « CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction ». *Progress of Theoretical Physics* **49.2** (fév. 1973), p. 652-657. doi : [10.1143/PTP.49.652](https://doi.org/10.1143/PTP.49.652). eprint : <https://academic.oup.com/ptp/article-pdf/49/2/652/5257692/49-2-652.pdf>. URL : <https://doi.org/10.1143/PTP.49.652>.
- [7] N. CABIBBO. « Unitary Symmetry and Leptonic Decays ». *Physical Review Letters* **10** (12 juin 1963), p. 531-533. doi : [10.1103/PhysRevLett.10.531](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.531). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.10.531>.
- [8] N. CABIBBO. « Unitary Symmetry and Nonleptonic Decays ». *Physical Review Letters* **12** (2 jan. 1964), p. 62-63. doi : [10.1103/PhysRevLett.12.62](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.62). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.12.62>.
- [9] Particle Data Group. « Review of Particle Physics ». *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **8** (août 2020). doi : [10.1093/ptep/ptaa104](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104).
- [10] F. ENGLERT & R. BROUT. « Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons ». *Physical Review Letters* **13.9** (9 août 1964), p. 321-323. doi : [10.1103/PhysRevLett.13.321](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.321>.
- [11] P. W. HIGGS. « Broken symmetries, massless particles and gauge fields ». *Physics Letters* **12.2** (sept. 1964). doi : [10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9). URL : <https://cds.cern.ch/record/641590>.
- [12] P. W. HIGGS. « Broken symmetries and the masses of gauge bosons ». *Physics Letters* **13.16** (oct. 1964). doi : [10.1103/physrevlett.13.508](https://doi.org/10.1103/physrevlett.13.508).
- [13] G. S. GURALNIK, C. R. HAGEN & T. W. B. KIBBLE. « Global Conservation Laws and Massless Particles ». *Physical Review Letters* **13.20** (20 nov. 1964), p. 585-587. doi : [10.1103/PhysRevLett.13.585](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.585). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.585>.
- [14] S. L. GLASHOW. « Partial-symmetries of weak interactions ». *Nuclear Physics* **22.4** (1961), p. 579-588. doi : [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(61\)90469-2](https://doi.org/10.1016/0029-5582(61)90469-2).

- [15] G. ARNISON & coll. « Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ ». *Physics Letters* **B122**.1 (1983), p. 103-116. DOI : [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)91177-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91177-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383911772>.
- [16] M. BANNER & coll. « Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN pp collider ». *Physics Letters* **B122**.5 (1983), p. 476-485. DOI : [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)91605-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)91605-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383916052>.
- [17] G. ARNISON & coll. « Further evidence for charged intermediate vector bosons at the SPS collider ». *Physics Letters* **B129**.3 (1983), p. 273-282. DOI : [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90860-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90860-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383908602>.
- [18] G. ARNISON & coll. « Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around $95 \text{ GeV} \cdot c^{-2}$ at the CERN SPS collider ». *Physics Letters* **B126**.5 (1983), p. 398-410. DOI : [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90188-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90188-0). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269383901880>.
- [19] P. BAGNAIA & coll. « Evidence for $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ at the CERN pp collider ». *Physics Letters* **B129**.1 (1983), p. 130-140. DOI : [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(83\)90744-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(83)90744-X). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037026938390744X>.
- [20] The ATLAS Collaboration. « Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ». *Physics Letters* **B716**.1 (2012), p. 1-29. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026931200857X>.
- [21] The CMS Collaboration. « Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC ». *Physics Letters* **B716**.1 (2012), p. 30-61. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312008581>.
- [22] The CMS Collaboration. « Observation of a new boson with mass near 125 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV ». *Journal of High Energy Physics* **06** (juin 2013). DOI : [10.1007/jhep06\(2013\)081](https://doi.org/10.1007/jhep06(2013)081).
- [23] G. AAD & coll. « Combined measurement of the Higgs boson mass in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments ». *Physical Review Letters* **114**.19 (mai 2015). DOI : [10.1103/physrevlett.114.191803](https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.191803). URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.191803>.
- [24] G. AAD & coll. « Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV ». *Journal of High Energy Physics* **08** (août 2016). DOI : [10.1007/jhep08\(2016\)045](https://doi.org/10.1007/jhep08(2016)045). URL : [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2016\)045](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2016)045).
- [25] T. M. HAHN & coll. « Neutrons and Gamma-Rays from the Proton Bombardment of Beryllium ». *Physical Review* **85**.5 (mar. 1952), p. 934. DOI : [10.1103/PhysRev.85.934](https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.934). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.85.934>.
- [26] H. L. ANDERSON & coll. « Total Cross Sections of Negative Pions in Hydrogen ». *Physical Review* **85**.5 (mar. 1952), p. 934-935. DOI : [10.1103/PhysRev.85.934.2](https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.934.2). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.85.934.2>.
- [27] H. L. ANDERSON & coll. « Total Cross Sections of Positive Pions in Hydrogen ». *Physical Review* **85**.5 (mar. 1952), p. 936. DOI : [10.1103/PhysRev.85.936](https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.936). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.85.936>.
- [28] V. E. BARNES & coll. « Observation of a Hyperon with Strangeness Minus Three ». *Physical Review Letters* **12**.8 (fév. 1964), p. 204-206. DOI : [10.1103/PhysRevLett.12.204](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.204). URL : [http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.12.204](https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.12.204).

- [29] S. DÜRR & coll. « Ab Initio Determination of Light Hadron Masses ». *Science* **322**.5905 (nov. 2008), p. 1224-1227. doi : [10.1126/science.1163233](https://doi.org/10.1126/science.1163233).
- [30] G. P. SALAM. *Elements of QCD for hadron colliders*. 2010. arXiv : [1011.5131 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/pdf/1011.5131.pdf). URL : <https://arxiv.org/pdf/1011.5131.pdf>.
- [31] D. J. GROSS & F. WILCZEK. « Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories ». *Physical Review Letters* **30** (26 juin 1973), p. 1343-1346. doi : [10.1103/PhysRevLett.30.1343](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.1343). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.30.1343>.
- [32] H. D. POLITZER. « Reliable Perturbative Results for Strong Interactions ? » *Physical Review Letters* **30** (26 juin 1973), p. 1346-1349. doi : [10.1103/PhysRevLett.30.1346](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.1346). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.30.1346>.
- [33] The CDF Collaboration. « Observation of top quark production in $p\bar{p}$ collisions with the collider detector at Fermilab ». *Physical Review Letters* **74**.14 (avr. 1995), p. 2626-2631. doi : [10.1103/physrevlett.74.2626](https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.2626). URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.2626>.
- [34] The DØ Collaboration. « Observation of the top quark ». *Physical Review Letters* **74**.14 (avr. 1995), p. 2632-2637. doi : [10.1103/physrevlett.74.2632](https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.2632). URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.2632>.
- [35] S. MELE. « The Measurement of the Number of Light Neutrino Species at LEP ». *Advanced Series on Directions in High Energy Physics* **23** (2015), p. 89-106. doi : [10.1142/9789814644150_0004](https://doi.org/10.1142/9789814644150_0004). URL : <http://cds.cern.ch/record/2103251>.
- [36] The Super-Kamiokande Collaboration. « Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos ». *Physical Review Letters* **81** (8 août 1998), p. 1562-1567. doi : [10.1103/PhysRevLett.81.1562](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.81.1562>.
- [37] The SNO Collaboration. « Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory ». *Physical Review Letters* **89** (1 juin 2002). doi : [10.1103/PhysRevLett.89.011301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.011301). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.89.011301>.
- [38] J. SCHECHTER & J. W. F. VALLE. « Neutrino masses in $SU(2) \times U(1)$ theories ». *Physical Review* **D22** (9 nov. 1980), p. 2227-2235. doi : [10.1103/PhysRevD.22.2227](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.22.2227). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.22.2227>.
- [39] A. DAVIDSON & K. C. WALI. « Family mass hierarchy from universal seesaw mechanism ». *Physical Review Letters* **60** (18 mai 1988), p. 1813-1816. doi : [10.1103/PhysRevLett.60.1813](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.1813). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.60.1813>.
- [40] R. N. MOHAPATRA & G. SENJANOVIĆ. « Neutrino masses and mixings in gauge models with spontaneous parity violation ». *Physical Review* **D23** (1 jan. 1981), p. 165-180. doi : [10.1103/PhysRevD.23.165](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.165). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.23.165>.
- [41] R. N. MOHAPATRA & G. SENJANOVIĆ. « Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation ». *Physical Review Letters* **44** (14 avr. 1980), p. 912-915. doi : [10.1103/PhysRevLett.44.912](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.44.912). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.44.912>.
- [42] M. GELL-MANN, P. RAMOND & R. SLANSKY. « Complex Spinors and Unified Theories » (1979). URL : <http://cds.cern.ch/record/133618>.
- [43] Z. MAKI, M. NAKAGAWA & S. SAKATA. « Remarks on the Unified Model of Elementary Particles ». *Progress of Theoretical Physics* **28**.5 (nov. 1962), p. 870-880. doi : [10.1143/PTP.28.870](https://doi.org/10.1143/PTP.28.870). eprint : <https://academic.oup.com/ptp/article-pdf/28/5/870/5258750/28-5-870.pdf>. URL : <https://doi.org/10.1143/PTP.28.870>.
- [44] Y. NAGASHIMA. *Beyond the Standard Model of Elementary Particle Physics*. Weinheim : Wiley-VCH, juin 2014. URL : <http://cds.cern.ch/record/1620277>.
- [45] D. CLOWE & coll. « A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter ». *Astrophysical Journal* **648**.2 (août 2006). doi : [10.1086/508162](https://doi.org/10.1086/508162). URL : <http://dx.doi.org/10.1086/508162>.

- [46] P. A. R. ADE & coll. « Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results ». *Astronomy & Astrophysics* **571** (oct. 2014). doi : [10.1051/0004-6361/201321529](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321529). URL : <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321529>.
- [47] S. P. MARTIN. « A Supersymmetry primer ». *Advanced Series on Directions in High Energy Physics* (juil. 1998), p. 1-98. doi : [10.1142/9789812839657_0001](https://doi.org/10.1142/9789812839657_0001). URL : http://dx.doi.org/10.1142/9789812839657_0001.
- [48] J. F. GUNION & coll. *The Higgs hunter's guide*. T. **80**. Upton, NY : Brookhaven Nat. Lab., 1989. URL : <https://cds.cern.ch/record/425736>.
- [49] J. F. GUNION & coll. *Errata for "The Higgs Hunter's Guide"*. Rapp. tech. hep-ph/9302272. Fév. 1993. URL : <https://cds.cern.ch/record/559892>.
- [50] M. CARENA & coll. « MSSM Higgs boson searches at the LHC : benchmark scenarios after the discovery of a Higgs-like particle ». *European Physical Journal* **C73.9** (sept. 2013). doi : [10.1140/epjc/s10052-013-2552-1](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2552-1). URL : <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2552-1>.
- [51] E. BAGNASCHI & coll. « MSSM Higgs boson searches at the LHC : benchmark scenarios for Run 2 and beyond ». *The European Physical Journal* **C79.7** (juil. 2019). doi : [10.1140/epjc/s10052-019-7114-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7114-8).
- [52] The CMS Collaboration. « Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to a pair of tau leptons in pp collisions ». *Journal of High Energy Physics* **10** (oct. 2014). doi : [10.1007/jhep10\(2014\)160](https://doi.org/10.1007/jhep10(2014)160). URL : [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP10\(2014\)160](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP10(2014)160).
- [53] The CMS Collaboration. « Search for additional neutral MSSM Higgs bosons in the di-tau final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ». *Journal of High Energy Physics* **09.007** (sept. 2018). doi : [10.1007/JHEP09\(2018\)007](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2018)007).
- [54] G. RIDOLFI, G. ROSS & F. ZWIRNER. « Supersymmetry ». *Large Hadron Collider Workshop Proceedings. II*. CERN. Geneva : CERN, oct. 1990, p. 606-683.
- [55] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Inclusive Observables ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 1*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2011. doi : [10.5170/CERN-2011-002](https://doi.org/10.5170/CERN-2011-002). URL : <https://cds.cern.ch/record/1318996>.
- [56] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Differential Distributions ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 2*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2012. doi : [10.5170/CERN-2012-002](https://doi.org/10.5170/CERN-2012-002). URL : <https://cds.cern.ch/record/1416519>.
- [57] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Higgs Properties ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 3*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2013. doi : [10.5170/CERN-2013-004](https://doi.org/10.5170/CERN-2013-004). URL : <https://cds.cern.ch/record/1559921>.
- [58] LHC Higgs Cross Section Working Group. « Deciphering the Nature of the Higgs Sector ». *Handbook of LHC Higgs Cross Sections. 4*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, oct. 2016. doi : [10.23731/CYRM-2017-002](https://doi.org/10.23731/CYRM-2017-002). URL : <http://cds.cern.ch/record/2227475>.
- [59] P. BOLZONI & coll. « Vector boson fusion at next-to-next-to-leading order in QCD : Standard model Higgs boson and beyond ». *Physical Review* **D85** (3 fév. 2012). doi : [10.1103/PhysRevD.85.035002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.035002). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.85.035002>.
- [60] S. DAWSON, A. DJOUADI & M. SPIRA. « QCD Corrections to Supersymmetric Higgs Boson Production : The Role of Squark Loops ». *Physical Review Letters* **77.1** (juil. 1996), p. 16-19. doi : [10.1103/physrevlett.77.16](https://doi.org/10.1103/physrevlett.77.16). URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.16>.
- [61] S. H. NEDDERMEYER & C. D. ANDERSON. « Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles ». *Physical Review* **51** (10 mai 1937), p. 884-886. doi : [10.1103/PhysRev.51.884](https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.884). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.51.884>.
- [62] O. S. BRÜNING & coll. « The LHC Main Ring ». *LHC Design Report. 1*. CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2004. doi : [10.5170/CERN-2004-003-V-1](https://doi.org/10.5170/CERN-2004-003-V-1). URL : <https://cds.cern.ch/record/782076>.

- [63] O. S. BRÜNING & coll. « The LHC Infrastructure and General Services ». *LHC Design Report. 2.* CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2004. doi : [10.5170/CERN-2004-003-V-2](https://doi.org/10.5170/CERN-2004-003-V-2). URL : <https://cds.cern.ch/record/815187>.
- [64] M. BENEDIKT & coll. « The LHC Injector Chain ». *LHC Design Report. 3.* CERN Yellow Reports : Monographs. Geneva : CERN, 2004. doi : [10.5170/CERN-2004-003-V-3](https://doi.org/10.5170/CERN-2004-003-V-3). URL : <https://cds.cern.ch/record/823808>.
- [65] Site internet du CERN. URL : <https://home.cern/>.
- [66] F. J. HASERT & coll. « Search for elastic muon neutrino electron scattering ». *Physics Letters* **B46.1** (1973), p. 121-124. doi : [10.1016/0370-2693\(73\)90494-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90494-2). URL : [http://cds.cern.ch/record/243640](https://cds.cern.ch/record/243640).
- [67] F. HASERT & coll. « Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the gargamelle neutrino experiment ». *Physics Letters* **B46.1** (1973), p. 138-140. doi : [10.1016/0370-2693\(73\)90499-1](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90499-1). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269373904991>.
- [68] F. J. HASERT & coll. « Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment ». *Nuclear Physics* **B73.1** (1974), p. 1-22. doi : [10.1016/0550-3213\(74\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0550-3213(74)90038-8). URL : [http://cds.cern.ch/record/203096](https://cds.cern.ch/record/203096).
- [69] CERN. *The first touchscreen used at CERN*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=tQe5dlzScwU>.
- [70] CERN. *The World Wide Web Project*. 1989. URL : <http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>.
- [71] P. J. DORNAN. « The ALEPH Experiment ». *Philosophical Transactions : Physical Sciences and Engineering* **336.1642** (1991), p. 201-211. URL : <http://www.jstor.org/stable/53783>.
- [72] P. S. L. BOOTH. « The DELPHI Experiment ». *Philosophical Transactions : Physical Sciences and Engineering* **336.1642** (1991), p. 213-222. URL : <http://www.jstor.org/stable/53784>.
- [73] D. P. STICKLAND. « The L3 Experiment ». *Philosophical Transactions : Physical Sciences and Engineering* **336.1642** (1991), p. 223-236. URL : <http://www.jstor.org/stable/53785>.
- [74] A. MICHELINI. « OPAL Detector Performance ». *Philosophical Transactions : Physical Sciences and Engineering* **336.1642** (1991), p. 237-246. URL : <http://www.jstor.org/stable/53786>.
- [75] CERN. *MapCERN*. URL : <https://maps.web.cern.ch/>.
- [76] *Long term LHC schedule*. URL : <https://lhc-commissioning.web.cern.ch/>.
- [77] J. GAO, L. HARLAND-LANG & J. Rojo. « The structure of the proton in the LHC precision era ». *Physics Reports* **742** (mai 2018). doi : [10.1016/j.physrep.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.03.002). URL : [http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.03.002).
- [78] R. D. BALL & coll. « Parton distributions for the LHC Run II ». *Journal of High Energy Physics* **4** (avr. 2015). doi : [10.1007/jhep04\(2015\)040](https://doi.org/10.1007/jhep04(2015)040). URL : [http://dx.doi.org/10.1007/jhep04\(2015\)040](https://doi.org/10.1007/jhep04(2015)040).
- [79] J. Rojo & coll. « The PDF4LHC report on PDFs and LHC data : results from Run I and preparation for Run II ». *Journal of Physics* **G42.10** (sept. 2015). doi : [10.1088/0954-3899/42/10/103103](https://doi.org/10.1088/0954-3899/42/10/103103). URL : <https://doi.org/10.1088/0954-3899/42/10/103103>.
- [80] The CMS Collaboration. *CMS Luminosity Measurements for the 2016 Data Taking Period*. Rapp. tech. CMS-PAS-LUM-17-001. Geneva : CERN, 2017. URL : [http://cds.cern.ch/record/2257069](https://cds.cern.ch/record/2257069).
- [81] The CMS Collaboration. *CMS luminosity measurement for the 2017 data-taking period at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* . Rapp. tech. CMS-PAS-LUM-17-004. Geneva : CERN, 2018. URL : [http://cds.cern.ch/record/2621960](https://cds.cern.ch/record/2621960).

- [82] The CMS Collaboration. *CMS luminosity measurement for the 2018 data-taking period at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* . Rapp. tech. CMS-PAS-LUM-18-002. Geneva : CERN, 2019. URL : <http://cds.cern.ch/record/2676164>.
- [83] The CMS Collaboration. *CMS Luminosity – Public Results*. URL : <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>.
- [84] 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>.
- [85] 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>.
- [86] 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>.
- [87] 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>.
- [88] The LHCf Collaboration. « The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider ». *Journal of Instrumentation* 3.S08006 (2008). doi : [10.1088/1748-0221/3/08/S08006](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08006). URL : <http://cds.cern.ch/record/1129808>.
- [89] The TOTEM Collaboration. « The TOTEM Experiment at the CERN Large Hadron Collider ». *Journal of Instrumentation* 3.S08007 (2008). doi : [10.1088/1748-0221/3/08/S08007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08007). URL : <http://cds.cern.ch/record/1129807>.
- [90] The MoEDAL Collaboration. *Technical Design Report of the MoEDAL Experiment*. Rapp. tech. CERN-LHCC-2009-006. MoEDAL-TDR-001. Juin 2009. URL : <https://cds.cern.ch/record/1181486>.
- [91] The CMS Collaboration. *CMS : letter of intent by the CMS Collaboration for a general purpose detector at LHC*. Rapp. tech. CERN-LHCC-92-003. LHCC-I-1. Geneva : CERN, 1992. URL : <https://cds.cern.ch/record/290808>.
- [92] T. SAKUMA. *3D SketchUp images of the CMS detector*. CMS Document Database. Sept. 2018. URL : <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB>ShowDocument?docid=13631>.
- [93] The CMS Collaboration. *The CMS tracker system project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <https://cds.cern.ch/record/368412>.
- [94] The CMS Collaboration. *The CMS electromagnetic calorimeter project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <https://cds.cern.ch/record/349375>.
- [95] The CMS Collaboration. *The CMS hadron calorimeter project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <https://cds.cern.ch/record/357153>.
- [96] The CMS Collaboration. *The CMS magnet project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <http://cds.cern.ch/record/331056>.
- [97] The CMS Collaboration. *The CMS muon project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <https://cds.cern.ch/record/343814>.
- [98] P. ARCE & coll. « The network of photodetectors and diode lasers of the CMS Link alignment system ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* A896 (2018), p. 1-23. doi : [10.1016/j.nima.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.04.004). URL : <http://cds.cern.ch/record/2637152>.
- [99] The CMS Collaboration. « Detector Performance and Software ». *CMS Physics : Technical Design Report. 1.* Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 2006. URL : <http://cds.cern.ch/record/922757>.

- [100] The CMS Collaboration. « The CMS detector magnet ». *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **10**.1 (2000). doi : [10.1109/77.828255](https://doi.org/10.1109/77.828255). URL : <http://cds.cern.ch/record/438917>.
- [101] The CMS Collaboration. « Precise mapping of the magnetic field in the CMS barrel yoke using cosmic rays ». *Journal of Instrumentation* **5** (mar. 2010). doi : [10.1088/1748-0221/5/03/T03021](https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03021). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/5/03/T03021>.
- [102] The CMS Collaboration. « Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker ». *Journal of Instrumentation* **9** (mai 2014). doi : [10.1088/1748-0221/9/10/P10009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/P10009). URL : <http://cds.cern.ch/record/1704291>.
- [103] The CMS Collaboration. « Precision measurement of the structure of the CMS inner tracking system using nuclear interactions ». *Journal of Instrumentation* **13** (juil. 2018). doi : [10.1088/1748-0221/13/10/P10034](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/10/P10034). URL : <https://cds.cern.ch/record/2629890>.
- [104] A. DOMINGUEZ & coll. *CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade*. Rapp. tech. Sept. 2012. URL : <https://cds.cern.ch/record/1481838>.
- [105] The CMS Collaboration. *The Phase-1 Upgrade of the CMS Pixel Detector*. Rapp. tech. CMS-CR-2017-135. 06. Geneva : CERN, mai 2017. doi : [10.1088/1748-0221/12/07/C07009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/C07009). URL : <https://cds.cern.ch/record/2265423>.
- [106] The CMS Collaboration. « Energy calibration and resolution of the CMS electromagnetic calorimeter in pp collisions at $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$ ». *Journal of Instrumentation* **8** (juin 2013). doi : [10.1088/1748-0221/8/09/P09009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/09/P09009). URL : <https://cds.cern.ch/record/1554142>.
- [107] The CMS Collaboration. « CMS ECAL Response to Laser Light » (mar. 2019). URL : <https://cds.cern.ch/record/2668200>.
- [108] The CMS Collaboration. « ECAL 2016 refined calibration and Run2 summary plots » (avr. 2020). URL : <https://cds.cern.ch/record/2717925>.
- [109] J. MANS & coll. *CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter*. Rapp. tech. Sept. 2012. URL : <https://cds.cern.ch/record/1481837>.
- [110] The CMS Collaboration. « HCAL Energy Reconstruction Performance » (nov. 2016). URL : <https://cds.cern.ch/record/2235509>.
- [111] The CMS Collaboration. « HCAL Out Of Time Pileup Subtraction and Energy Reconstruction » (mai 2018). URL : <https://cds.cern.ch/record/2320408>.
- [112] The CMS Collaboration. « HCAL Calibration Status in Summer 2017 » (mai 2017). URL : <https://cds.cern.ch/record/2281146>.
- [113] The CMS Collaboration. « The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7\text{ TeV}$ at the LHC ». *Journal of Instrumentation* **8** (juin 2013). doi : [10.1088/1748-0221/8/11/P11002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/11/P11002). URL : <https://cds.cern.ch/record/1558674>.
- [114] The CMS Collaboration. « Performance of the CMS muon detector and muon reconstruction with proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ ». *Journal of Instrumentation* **13** (avr. 2018). doi : [10.1088/1748-0221/13/06/P06015](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/06/P06015). URL : <https://cds.cern.ch/record/2313130>.
- [115] The CMS Collaboration. *CMS TriDAS project : Technical Design Report*. T. **1**. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN. URL : <http://cds.cern.ch/record/706847>.
- [116] The CMS Collaboration. *CMS TriDAS project : Technical Design Report*. T. **2**. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 2002. URL : <http://cds.cern.ch/record/578006>.
- [117] The CMS Collaboration. « The CMS trigger system ». *Journal of Instrumentation* **12**.1 (jan. 2017). doi : [10.1088/1748-0221/12/01/P01020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/P01020). URL : <https://cds.cern.ch/record/2212926>.
- [118] A. TAPPER & D. ACOSTA. *CMS Technical Design Report for the Level-1 Trigger Upgrade*. Rapp. tech. Juin 2013. URL : <https://cds.cern.ch/record/1556311>.
- [119] A. SCHÄLICKE & coll. « An event generator for particle production in high-energy collisions ». *Progress in Particle and Nuclear Physics* **53**.1 (2004), p. 329-338. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2004.02.031>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014664100400047X>.

- [120] A. BUCKLEY & coll. « General-purpose event generators for LHC physics ». *Physics Reports* **504** (jan. 2011). DOI : [10.1016/j.physrep.2011.03.005](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2011.03.005). URL : <http://cds.cern.ch/record/1322340>.
- [121] J. ALWALL & coll. « MADGRAPH 5 : Going Beyond ». *Journal of High Energy Physics* **06** (2011). DOI : [10.1007/jhep06\(2011\)128](https://doi.org/10.1007/jhep06(2011)128). arXiv : [1106.0522 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1106.0522).
- [122] T. SJÖSTRAND, S. MRENNA & P. SKANDS. « PYTHIA 6.4 physics and manual ». *Journal of High Energy Physics* **05** (mai 2006). DOI : [10.1088/1126-6708/2006/05/026](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026>.
- [123] T. SJÖSTRAND & coll. « An Introduction to PYTHIA 8.2 ». *Computer Physics Communications* **191** (2015), p. 159-177. DOI : [10.1016/j.cpc.2015.01.024](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024). arXiv : [1410.3012 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1410.3012).
- [124] S. ALIOLI & coll. « A general framework for implementing NLO calculations in shower Monte Carlo programs : the POWHEG BOX ». *Journal of High Energy Physics* **06** (2010). DOI : [10.1007/jhep06\(2010\)043](https://doi.org/10.1007/jhep06(2010)043). arXiv : [1002.2581 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1002.2581).
- [125] S. FRIXIONE, P. NASON & B. R. WEBBER. « Matching NLO QCD and parton showers in heavy flavour production ». *Journal of High Energy Physics* **8** (août 2003). DOI : [10.1088/1126-6708/2003/08/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2003/08/007). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2003/08/007>.
- [126] J. BELLM & coll. « HERWIG 7.0/HERWIG++ 3.0 release note ». *European Physical Journal* **C76**.196 (avr. 2016). DOI : [10.1140/epjc/s10052-016-4018-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4018-8).
- [127] H. A. BETHE. « Molière's Theory of Multiple Scattering ». *Physical Review* **89** (6 mar. 1953). DOI : [10.1103/PhysRev.89.1256](https://doi.org/10.1103/PhysRev.89.1256). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.89.1256>.
- [128] B. P. NIGAM, M. K. SUNDARESAN & T.-Y. WU. « Theory of Multiple Scattering : Second Born Approximation and Corrections to Molière's Work ». *Physical Review* **115** (3 août 1959). DOI : [10.1103/PhysRev.115.491](https://doi.org/10.1103/PhysRev.115.491). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.115.491>.
- [129] S. AGOSTINELLI & coll. « GEANT4 – A simulation toolkit ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A506**.3 (2003), p. 250-303. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [130] J. ALLISON & coll. « GEANT4 developments and applications ». *IEEE Transactions on Nuclear Science* **53**.1 (fév. 2006), p. 270-278. DOI : [10.1109/tns.2006.869826](https://doi.org/10.1109/tns.2006.869826).
- [131] J. ALLISON & coll. « Recent developments in GEANT4 ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A835** (2016), p. 186-225. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216306957>.
- [132] The CMS Collaboration. « Particle-flow reconstruction and global event description with the CMS detector ». *Journal of Instrumentation* **12**.10 (juin 2017). DOI : [10.1088/1748-0221/12/10/P10003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/P10003). arXiv : [1706.04965v2 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1706.04965v2). URL : <http://stacks.iop.org/1748-0221/12/i=10/a=P10003>.
- [133] The CMS Collaboration. « The CMS Particle Flow Algorithm ». *EPJ Web of Conferences* **191** (2018). DOI : [10.1051/epjconf/201819102016](https://doi.org/10.1051/epjconf/201819102016). URL : [https://cds.cern.ch/record/2678077](http://cds.cern.ch/record/2678077).
- [134] T. SPEER & coll. *Track Reconstruction in the CMS Tracker*. Rapp. tech. CMS-CR-2005-014. Geneva : CERN, juil. 2005. DOI : [10.1016/j.nima.2005.11.207](https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.207). URL : <http://cds.cern.ch/record/884424>.
- [135] The CMS Collaboration. « Jet energy scale and resolution in the CMS experiment in pp collisions at 8 TeV ». *Journal of Instrumentation* **12**.02 (fév. 2017). DOI : [10.1088/1748-0221/12/02/p02014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/p02014). URL : <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/02/p02014>.
- [136] The CMS Collaboration. *Performance of missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV using the CMS detector*. Rapp. tech. Geneva : CERN, 2018. URL : [https://cds.cern.ch/record/2628600](http://cds.cern.ch/record/2628600).
- [137] B. ANDERSSON & coll. « Parton fragmentation and string dynamics » (avr. 1983). URL : <http://cds.cern.ch/record/143980>.

- [138] J.-C. WINTER, F. KRAUSS & G. SOFF. « A modified cluster-hadronisation model ». *European Physical Journal C*36.3 (août 2004), p. 381-395. doi : [10.1140/epjc/s2004-01960-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s2004-01960-8). URL : <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s2004-01960-8>.
- [139] G. P. SALAM & G. SOYEZ. « A practical seedless infrared-safe cone jet algorithm ». *Journal of High Energy Physics* 05 (mai 2007). doi : [10.1088/1126-6708/2007/05/086](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2007/05/086). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2007/05/086>.
- [140] M. CACCIARI, G. P. SALAM & G. SOYEZ. « FASTJET user manual ». *European Physical Journal C*72 (nov. 2012). doi : [10.1140/epjc/s10052-012-1896-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1896-2). arXiv : [1111.6097 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1111.6097).
- [141] S. CATANI & coll. « New clustering algorithm for multijet cross sections in e^+e^- annihilation ». *Physics Letters* B269.3 (1991), p. 432-438. doi : [10.1016/0370-2693\(91\)90196-W](https://doi.org/10.1016/0370-2693(91)90196-W).
- [142] Y. L. DOKSHITZER & coll. « Better Jet Clustering Algorithms » (1997). arXiv : [hep-ph/9707323 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9707323).
- [143] M. WOBISCH & T. WENGLER. « Hadronization Corrections to Jet Cross Sections in Deep-Inelastic Scattering » (1999). arXiv : [hep-ph/9907280 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9907280).
- [144] M. CACCIARI, G. P. SALAM & G. SOYEZ. « The Anti- k_T jet clustering algorithm ». *Journal of High Energy Physics* 04 (avr. 2008). doi : [10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063). arXiv : [0802.1189 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/0802.1189).
- [145] G. P. SALAM. « Towards jetography ». *European Physical Journal C*67.3-4 (mai 2010), p. 637-686. doi : [10.1140/epjc/s10052-010-1314-6](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1314-6). URL : <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1314-6>.
- [146] The CMS Collaboration. « Jet energy scale and resolution performance with 13 TeV data collected by CMS in 2016-2018 » (avr. 2020). URL : <https://cds.cern.ch/record/2715872>.
- [147] The DØ Collaboration. « Measurement of the B_s^0 lifetime in the exclusive decay channel $B_s^0 \rightarrow J/\Psi\phi$ ». *Physical Review Letters* 94 (2005).
- [148] G. BELLINI, I. BIGI & P. DORNAN. « Lifetimes of charm and beauty hadrons ». *Physics Reports* 289.1 (1997), p. 1-155. doi : [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(97\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(97)00005-7). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157397000057>.
- [149] The CMS Collaboration. *Performance of quark/gluon discrimination in 8 TeV pp data*. Rapp. tech. CMS-PAS-JME-13-002. Geneva : CERN, 2013. URL : [http://cds.cern.ch/record/1599732](https://cds.cern.ch/record/1599732).
- [150] The CMS Collaboration. « Identification of b-quark jets with the CMS experiment ». *Journal of Instrumentation* 8.04 (avr. 2013). doi : [10.1088/1748-0221/8/04/p04013](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/p04013). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/P04013>.
- [151] D. GUEST & coll. « Jet flavor classification in high-energy physics with deep neural networks ». *Physical Review* D94.11 (déc. 2016). doi : [10.1103/physrevd.94.112002](https://doi.org/10.1103/physrevd.94.112002). URL : <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.112002>.
- [152] The CMS Collaboration. « Identification of heavy-flavour jets with the CMS detector in pp collisions at 13 TeV ». *Journal of Instrumentation* 13.05 (mai 2018). doi : [10.1088/1748-0221/13/05/p05011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/p05011). URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05011>.
- [153] F. CHOLLET & coll. KERAS. <https://keras.io>. 2015.
- [154] M. ABADI & coll. TENSORFLOW : Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems. Software available from tensorflow.org. 2015. URL : <https://www.tensorflow.org/>.
- [155] The CMS Collaboration. « First results from the CMS SiPM-based hadronic endcap calorimeter ». Geneva, août 2018. doi : [10.1088/1742-6596/1162/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1162/1/012009). URL : <https://cds.cern.ch/record/2636475>.
- [156] The CMS Collaboration. « Event generator tunes obtained from underlying event and multi-parton scattering measurements ». *European Physical Journal C*76.3 (2016). doi : [10.1140/epjc/s10052-016-3988-x](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-3988-x). arXiv : [1512.00815 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1512.00815).

- [157] H. LATTAUD. « Photon et jets avec l'expérience CMS du LHC : de la calibration à la mesure ». Thèse de doct. Université Claude Bernard Lyon 1, sept. 2019. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02422226>.
- [158] The CMS Collaboration. « Performance of photon reconstruction and identification with the CMS detector in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ ». *Journal of Instrumentation* **10** (fév. 2015). DOI : [10.1088/1748-0221/10/08/P08010](https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/08/P08010). URL : <https://cds.cern.ch/record/1988093>.
- [159] The CMS Collaboration. « Measurement of differential cross sections for inclusive isolated-photon and photon+jets production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ». *European Physical Journal* **C79**.20 (juil. 2018). DOI : [10.1140/epjc/s10052-018-6482-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6482-9). URL : [http://cds.cern.ch/record/2628267](https://cds.cern.ch/record/2628267).
- [160] The CMS Collaboration. « Extraction and validation of a new set of CMS PYTHIA 8 tunes from underlying-event measurements ». *European Physical Journal* **C80** (mar. 2019). DOI : [10.1140/epjc/s10052-019-7499-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7499-4). URL : <https://cds.cern.ch/record/2669320>.
- [161] G. TOUQUET. « Search for an additional neutral MSSM Higgs boson decaying to tau leptons with the CMS experiment ». Thèse de doct. Université Claude Bernard Lyon 1, oct. 2019. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02526393>.
- [162] A. GOTTMANN. « Global Interpretation of $\tau\tau$ Events in the Context of the Standard Model and Beyond ». Thèse de doct. Fakultät für Physik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), juin 2020.
- [163] DELPHI, OPAL, ALEPH, LEP Working Group for Higgs Boson Searches, L3. « Search for neutral MSSM Higgs bosons at LEP ». *European Physical Journal* **C47** (2006), p. 547-587. DOI : [10.1140/epjc/s2006-02569-7](https://doi.org/10.1140/epjc/s2006-02569-7). arXiv : [hep-ex/0602042 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0602042).
- [164] The CDF Collaboration. « Search for Higgs bosons predicted in two-Higgs-doublet models via decays to tau lepton pairs in $1,96 \text{ TeV } p\bar{p}$ collisions ». *Physical Review Letters* **103** (2009). DOI : [10.1103/PhysRevLett.103.201801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.201801). arXiv : [0906.1014 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/0906.1014).
- [165] The DØ Collaboration. « Search for Higgs bosons decaying to $\tau\tau$ pairs in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$ ». *Physics Letters* **B707** (2012), p. 323-329. DOI : [10.1016/j.physletb.2011.12.050](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2011.12.050). arXiv : [1106.4555 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1106.4555).
- [166] The CMS Collaboration. « Search for a Higgs boson decaying into a b -quark pair and produced in association with b quarks in proton-proton collisions at 7 TeV ». *Physics Letters* **B722** (2013), p. 207-232. DOI : [10.1016/j.physletb.2013.04.017](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.04.017). arXiv : [1302.2892 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1302.2892).
- [167] The CMS Collaboration. « Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying into a pair of bottom quarks ». *Journal of High Energy Physics* **11** (2015). DOI : [10.1007/JHEP11\(2015\)071](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2015)071). arXiv : [1506.08329 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1506.08329).
- [168] The ATLAS Collaboration. « Search for the neutral Higgs bosons of the Minimal Supersymmetric Standard Model in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ». *Journal of High Energy Physics* **02** (2013). DOI : [10.1007/JHEP02\(2013\)095](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2013)095). arXiv : [1211.6956 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1211.6956).
- [169] The ATLAS Collaboration. « Search for additional heavy neutral Higgs and gauge bosons in the ditau final state produced in 36 fb^{-1} of pp collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector ». *Journal of High Energy Physics* **1** (jan. 2018). DOI : [10.1007/jhep01\(2018\)055](https://doi.org/10.1007/jhep01(2018)055). URL : [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2018\)055](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2018)055).
- [170] The CMS Collaboration. « Search for neutral MSSM Higgs bosons decaying to $\mu^+\mu^-$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV ». *Physics Letters* **B752** (2016), p. 221-246. DOI : [10.1016/j.physletb.2015.11.042](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.11.042). arXiv : [1508.01437 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1508.01437).
- [171] The CMS Collaboration. « Search for neutral Higgs bosons decaying to tau pairs in pp collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ ». *Physics Letters* **B713** (2012), p. 68-90. DOI : [10.1016/j.physletb.2012.05.028](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.05.028). arXiv : [1202.4083 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1202.4083).

- [172] The CMS Collaboration. « Reconstruction and identification of tau lepton decays to hadrons and tau neutrino at CMS ». *Journal of Instrumentation* **11**.1 (2016). DOI : [10.1088/1748-0221/11/01/P01019](https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/P01019). arXiv : [1510.07488 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/1510.07488).
- [173] J. de FAVREAU & coll. « DELPHES 3 : a modular framework for fast simulation of a generic collider experiment ». *Journal of High Energy Physics* **2** (fév. 2014). DOI : [10.1007/jhep02\(2014\)057](https://doi.org/10.1007/jhep02(2014)057). URL : [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP02\(2014\)057](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP02(2014)057).
- [174] A. MERTENS. « New features in DELPHES 3 ». *Journal of Physics : Conference Series* **608**.1 (2015). Sous la dir. de L. FIALA, M. LOKAJICEK & N. TUMOVA. DOI : [10.1088/1742-6596/608/1/012045](https://doi.org/10.1088/1742-6596/608/1/012045).
- [175] S. ABDULLIN & coll. « The Fast Simulation of the CMS Detector at LHC ». *Journal of Physics : Conference Series* **331**.3 (déc. 2011). DOI : [10.1088/1742-6596/331/3/032049](https://doi.org/10.1088/1742-6596/331/3/032049).
- [176] A. GIAMMANCO. « The Fast Simulation of the CMS Experiment ». *Journal of Physics : Conference Series* **513**.2 (juin 2014). DOI : [10.1088/1742-6596/513/2/022012](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/2/022012).
- [177] M. KOMM. « Fast emulation of track reconstruction in the CMS simulation ». *Journal of Physics : Conference Series* **898** (oct. 2017). DOI : [10.1088/1742-6596/898/4/042034](https://doi.org/10.1088/1742-6596/898/4/042034).
- [178] S. SEKMEN. *Recent Developments in CMS Fast Simulation*. 2017. arXiv : [1701.03850](https://arxiv.org/abs/1701.03850).
- [179] M. CACCIARI & G. P. SALAM. « Dispelling the N^3 myth for the k_T jet-finder ». *Physics Letters B* **641**.1 (sept. 2006), p. 57-61. DOI : [10.1016/j.physletb.2006.08.037](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2006.08.037). URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2006.08.037>.
- [180] T. CHEN & C. GUESTRIN. « XGBOOST : A Scalable Tree Boosting System ». *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (août 2016). DOI : [10.1145/2939672.2939785](https://doi.org/10.1145/2939672.2939785).
- [181] W. SARLE. « Neural Networks and Statistical Models ». 1994.
- [182] P. BÄRTSCHI & coll. « Reconstruction of τ lepton pair invariant mass using an artificial neural network ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A929** (2019), p. 29-33. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.029>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900219303377>.
- [183] L. BIANCHINI & coll. « Reconstruction of the Higgs mass in $H \rightarrow \tau\tau$ Events by Dynamical Likelihood techniques ». *Journal of Physics : Conference Series* **513**.2 (juin 2014). DOI : [10.1088/1742-6596/513/2/022035](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/2/022035). URL : <https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F513%2F2%2F022035>.
- [184] R. P. FEYNMAN. « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics ». *Physical Review* **76**.6 (sept. 1949), p. 769-789. DOI : [10.1103/PhysRev.76.769](https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.769). URL : <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.76.769>.

