

Chapitre X

Dispositif expérimental

Sommaire

1	Introduction	1
2	Le CERN	2
2.1	Les origines du CERN	2
2.2	Réalisations du CERN	2
2.3	Les accélérateurs du CERN	3
3	Le LHC : Large Hadron Collider	3
3.1	Exploitation du LHC	3
3.2	Accélération de protons	3
3.3	Collisions de protons	5
3.4	Luminosité, nombre d'événements et statistiques	7
3.5	L'empilement	9
3.6	Les expériences du LHC	9
4	L'expérience CMS : Compact Muon Solenoïd	10
4.1	Vue d'ensemble et système de coordonnées	10
4.2	Le solénoïde	12
4.3	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	13
4.4	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	15
4.5	Le calorimètre hadronique ou HCAL	17
4.6	Les chambres à muons	18
4.7	Prise de données à CMS	20
5	Événements simulés	20
5.1	Génération d'événements	21
5.2	Simulation du détecteur	22
6	Reconstruction des événements	22
6.1	Éléments d'identification du <i>Particle Flow</i>	23
6.2	Identification et reconstruction des particules	25
6.3	Énergie transverse manquante	27
7	Conclusion	27

1 Introduction

La matière « du quotidien » est constituée des fermions de la première génération¹. 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 [1]. 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

1. Les particules du modèle standard sont présentées dans le chapitre 2.

2 CHAPITRE X. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

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 [2-4] (LHC, *Large Hadron Collider*) de l’organisation européenne pour la recherche nucléaire ou CERN [5] (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) 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 [6-10] 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 [5]. Des scientifiques comme Raoul Dautry, Pierre Auger ou Niels Bohr envisagent la création d’un laboratoire européen de physique atomique² n’ayant aucune motivation militaire. Leur objectif est de stopper la fuite des cerveaux vers l’Amérique, d’unifier l’Europe et 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 [11-13] (1973), les bosons W et Z (1983, Nobel 1984) [14-18] et dernièrement le boson de Higgs (2012, Nobel 2013) [6, 7].

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 [19]. Le Web a également été développé au CERN [20].

2. 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 [14-16] et Z [17, 18].

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 [21] (*Apparatus for LEP PHysics at CERN*), DELPHI [22] (*DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification*) L3 [23] et OPAL [24] (*Omni-Purpose Apparatus at LEP*), dont les emplacements sont visibles sur la figure X.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 X.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 [2-4] (LHC, *Large Hadron Collider*) 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 X.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 étudiée par l'expérience ALICE, une des quatre 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 X.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 X.2, menant les protons à des niveaux d'énergie de plus en plus hauts avant de pouvoir être injectés dans le LHC [4] :

- l'accélérateur linéaire 2 (LINAC 2)³ permet d'accélérer les protons à une énergie de 50 MeV ;
- le *Booster*, premier élément circulaire, amène les protons à 1,4 GeV ;

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



Figure X.1 – Emplacements des grandes expériences du LEP (1989-2000) et du LHC (depuis 2008) [25]. Les tracés des booster, PS et SPS sont également visibles.

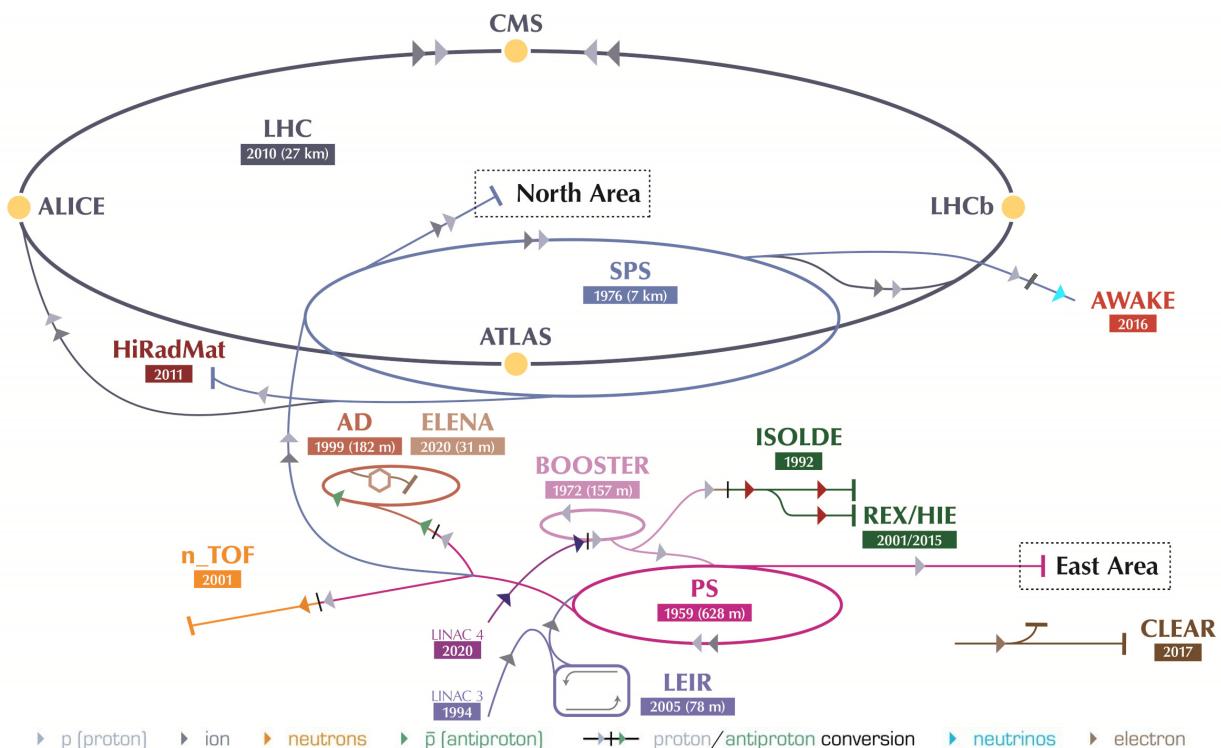


Figure X.2 – Complexe des accélérateurs du CERN [5]. De nombreuses expériences y sont installées : AD, Décélérateur d'Antiprotons ; AWAKE, Advanced WAKEfield Experiment ; BOOSTER, Booster du Synchrotron à Protons ; CLEAR, CERN Linear Electron Accelerator for Research ; ELENA, Extra Low Energy Antiproton ; 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
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 X.1 – Runs du LHC avec les énergies dans le centre de masse et les luminosités correspondantes [26]. 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} ⁴, de 13 et 14 TeV, respectivement.

Le gain en énergie des particules, c'est-à-dire l'accélération colinéaire aux faisceaux, 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 aux faisceaux 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 X.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 [27, 28] et sont représentées sur la figure X.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.

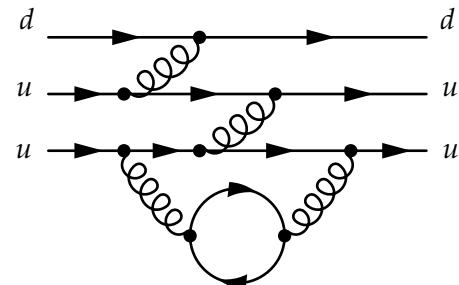


Figure X.3 – Diagramme de Feynman de la propagation d'un proton avec apparition d'une paire $q\bar{q}$.

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



Figure X.4 – Fonctions de densité partoniques (PDF, Parton Distribution Functions) à différentes échelles d'énergie μ obtenues au NNLO NNPDF3.0 [29] avec $g_s(m_Z^2) = 0,118$ [30]. 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 d'énergie 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 magnétique 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

$$dN_i = \mathcal{L}_{\text{inst}} \sigma_i dt \quad (\text{X.1})$$

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

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

où γ le boost de Lorentz des paquets de protons, ν est 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 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

$$N_i = \mathcal{L} \sigma_i. \quad (\text{X.3})$$

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 statistiques 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.

Les figures X.5a, X.6a et X.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 ($1 b = 10^{-28} \text{ m}^2$) 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 est de

$$190 \text{ fb}^{-1} = 190 \times 10^{15} \text{ b}^{-1} = 190 \times 10^{43} \text{ m}^{-2}, \quad (\text{X.4})$$

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 LHC⁵ [31-33]. 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.

5. 92,22 % en 2016, 90,34 % en 2017 et 93,83 % en 2018.

8 CHAPITRE X. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL



Figure X.5 – Luminosité totale et empilement en 2016 [31, 34].



Figure X.6 – Luminosité totale et empilement en 2017 [32, 34].



Figure X.7 – Luminosité totale et empilement en 2018 [33, 34].

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 X.5b, X.6b et X.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 [35], *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 [36], *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 [37], *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 [38], *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 [39] (*Large Hadron Collider forward*), 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 [40] (*Total, elastic and diffractive cross-section measurement*), 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 [41] (*Monopole and Exotics*

Detector At the LHC) 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 X.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 [42]. 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 X.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 [44], le calorimètre électronique [45], le calorimètre hadronique [46], le solénoïde [47] donnant son « S » à CMS et les chambres à muons [48] donnant son « M » à CMS, encastrées dans la culasse de fer. Des calorimètres

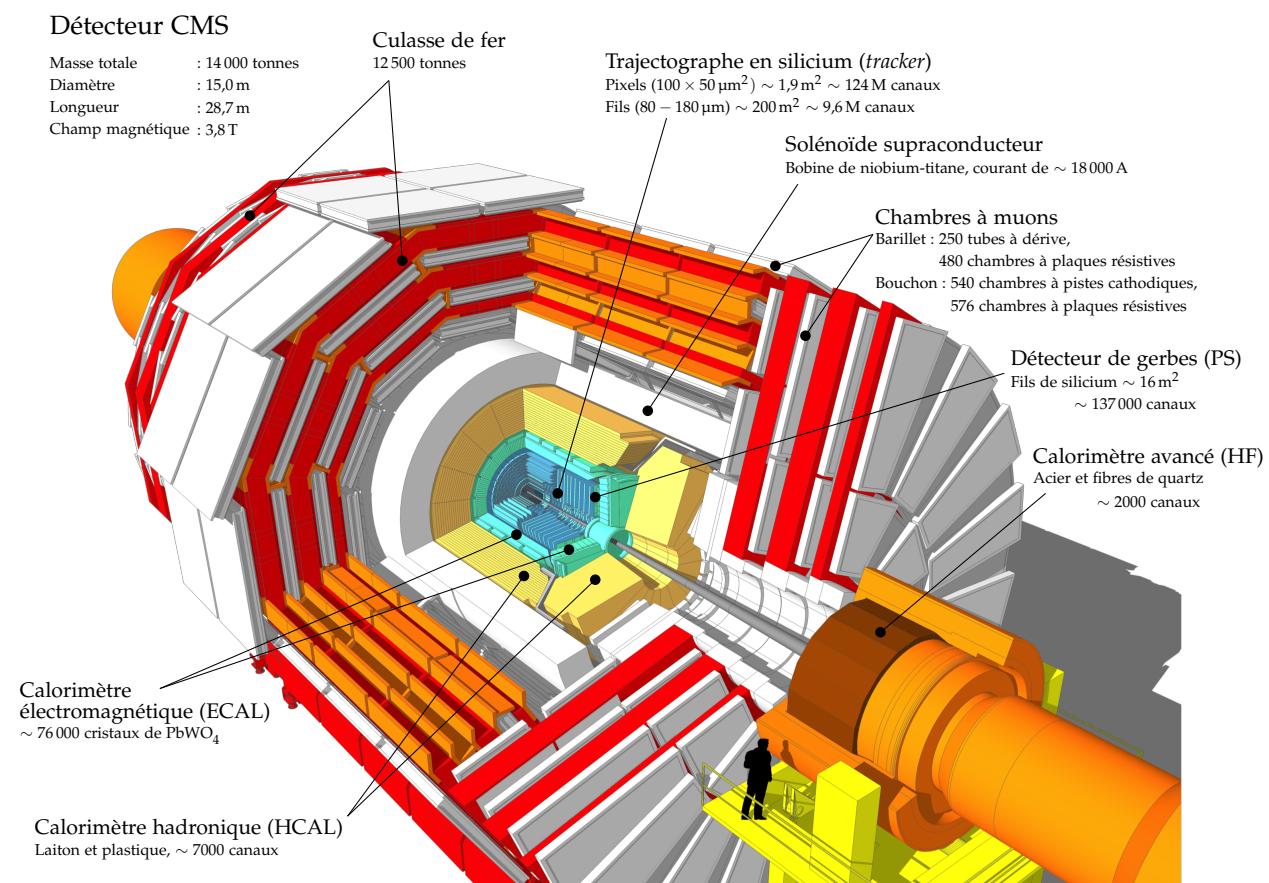


Figure X.8 – Vue éclatée du détecteur CMS [43].

avancés se trouvent aux extrémités du détecteur le long de l'axe du faisceau. Le détecteur propose 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 X.8.

L'acronyme CMS signifie ainsi *Compact Muon Solenoid*, c'est-à-dire Solénôde 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 cylindrique en complément d'un repère cartésien. Le schéma de la figure X.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}_y, \vec{e}_z) à partir de l'axe (Ox). L'angle entre les directions \vec{a} et \vec{e}_z est θ .

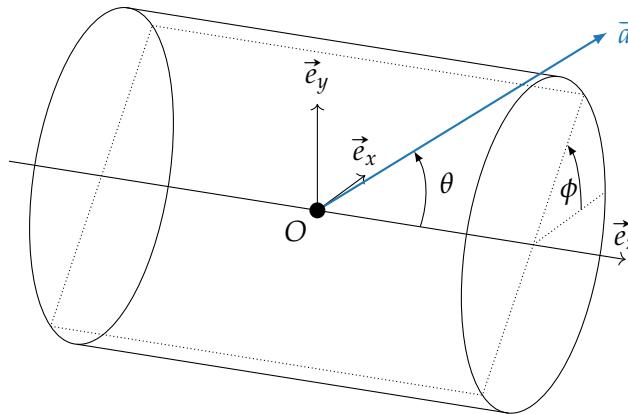


Figure X.9 – Système de coordonnées du détecteur CMS. L'axe (Ox) pointe vers le centre du LHC, l'axe (Oy) vers le haut ($\vec{g} \cdot \vec{e}_y < 0$) et l'axe (Oz) est aligné avec le faisceau tel que $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ forme un trièdre direct. L'angle entre les plans (\vec{e}_x, \vec{e}_z) et (\vec{a}, \vec{e}_z) est ϕ , défini dans le plan (\vec{e}_y, \vec{e}_z) 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

$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right). \quad (\text{X.5})$$

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,

$$y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E + p_z c}{E - p_z c}\right). \quad (\text{X.6})$$

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 X.10 présente un quadrant du détecteur CMS sur lequel figurent quelques valeurs de pseudo-rapidité et les directions correspondantes dans le plan (Oyz).

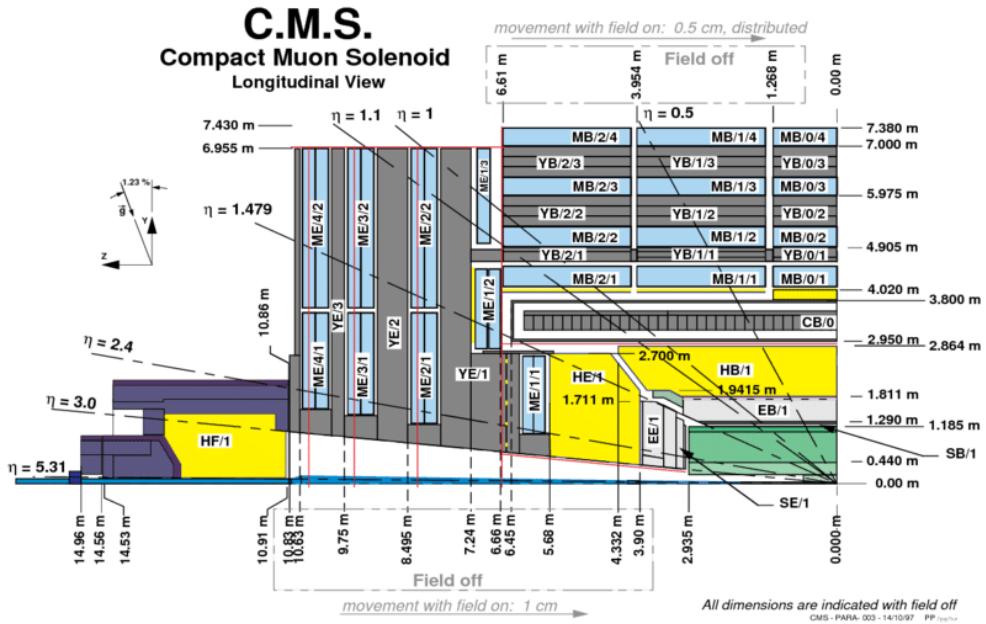


Figure X.10 – Vue longitudinale d'un quadrant du détecteur CMS [49]. Les directions correspondant à quelques valeurs de pseudo-rapidité sont illustrées et des mesures de distances par rapport au centre du détecteur, lieu des collisions, sont indiquées. Le sol de la caverne présente une inclinaison de 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 ,

$$\vec{p}_T = p_x \vec{e}_x + p_y \vec{e}_y, \quad p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad E_T = E \sin \theta = \frac{E}{\cosh \eta}. \quad (\text{X.7})$$

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 de 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} ,

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \wedge \vec{B}. \quad (\text{X.8})$$

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

$$r = \frac{p_T}{|q|B} \quad (\text{X.9})$$

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 X.2 – Caractéristiques du solénoïde supraconducteur de CMS [50].

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 [37, 47, 50, 51] dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau X.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 [47].

À l'extérieur du solénoïde, une culasse de fer, visible en rouge sur la figure X.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 X.11.

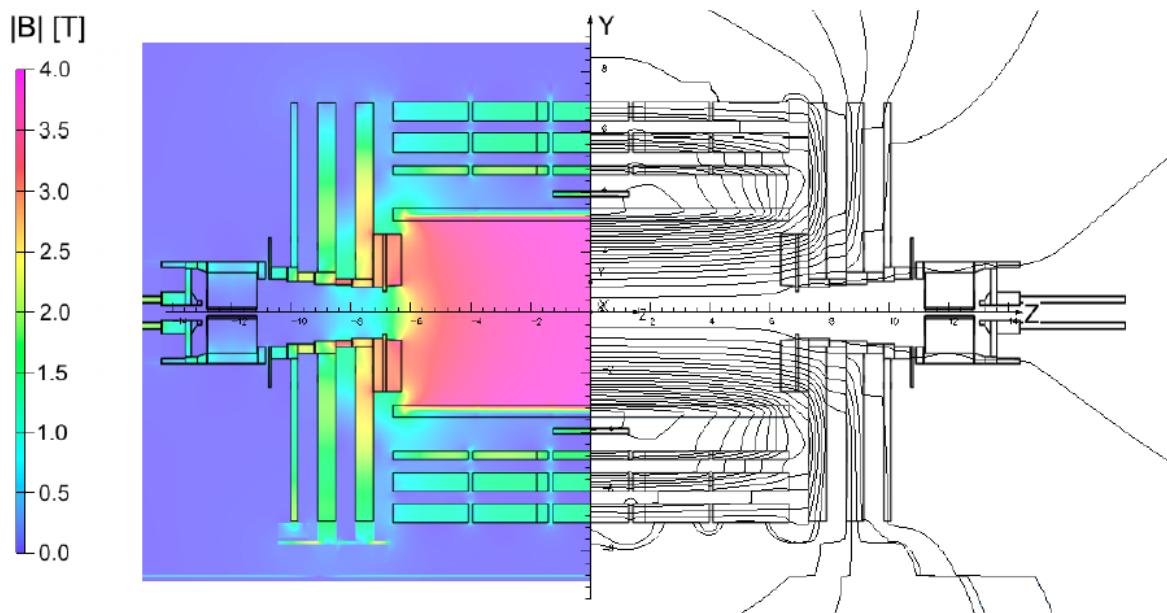


Figure X.11 – Valeurs de la norme du champ magnétique (à gauche) et lignes de champ (à droite) prédites dans la section longitudinale du détecteur CMS avec une valeur du champ centre de 3,8 T [52]. Entre deux lignes de champ, l'écart est de 6 Wb.

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 [37, 44, 53-55]. Dans sa partie la plus centrale, des modules à pixel de silicium sont utilisés. Il y en a trois couches dans la partie bâillet, à 4,4, 7,3 et 10,2 cm de rayon [37], visibles en rouge sur la figure X.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 $10 \mu\text{m}$ [37] et permet d'obtenir une bonne reconstruction des vertex.

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 bâillet (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 $23 \mu\text{m}$ et $35 \mu\text{m}$ respectivement [37]. Le TIB et les TID

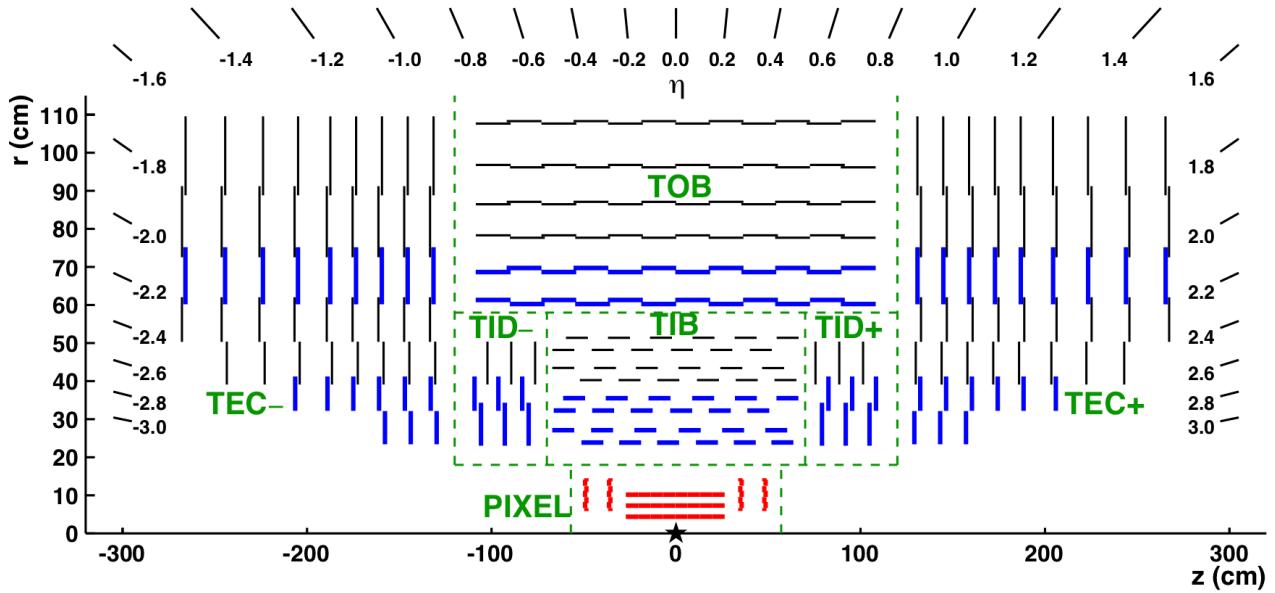
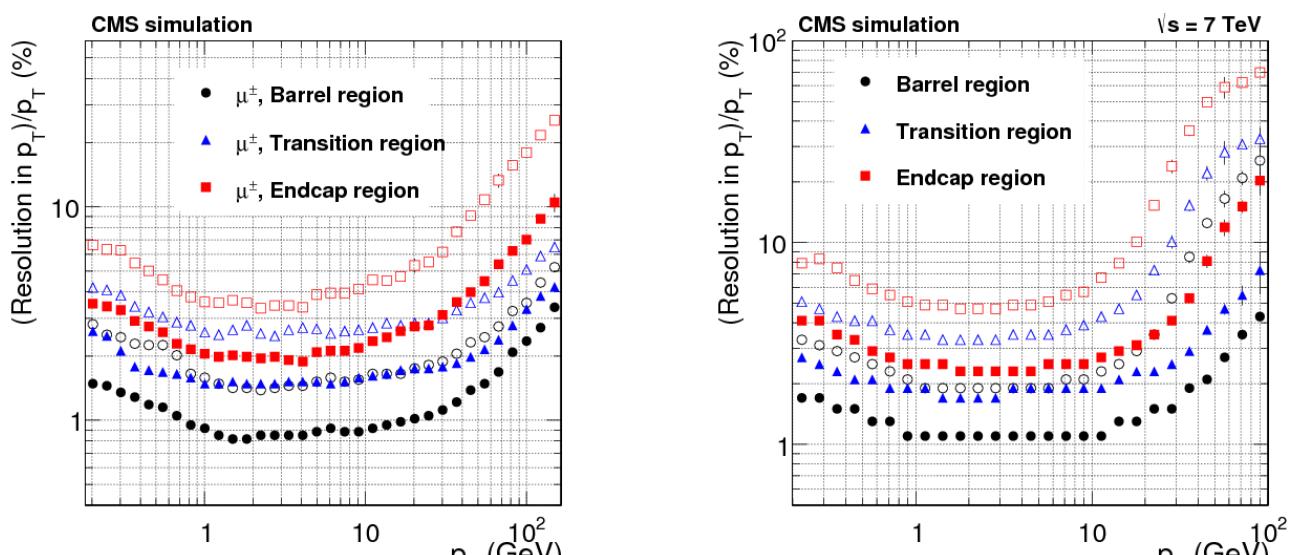


Figure X.12 – Schéma détaillé du trajectographe du détecteur CMS dans le plan (Orz) [53, 54]. Le trajectographe est symétrique par rapport à l'axe $r = 0$, axe du faisceau. Le centre du trajectographe, correspond approximativement au lieu des collisions, est indiqué par une étoile. Les différentes sous-parties 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'acceptation du détecteur.



(a) Résolution pour des muons seuls et isolés.

(b) Résolution pour des particules chargées.

Figure X.13 – Résolution en p_T , en fonction de p_T , du trajectographe pour différentes particules [53]. Les symboles pleins correspondent à la demi-largeur à 68 % de la distribution, les symboles creux à 90 %.

sont entourés par le trajectographe externe du bâillet (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 [37]. 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 (X.9). Les résolutions obtenues sur les impulsions transverses des muons et de particules chargées à l'aide du trajectographe sont présentées sur la figure X.13.

4.4 Le calorimètre électromagnétique ou ECAL

Le calorimètre électromagnétique (ECAL) [37, 45, 56-58] 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.

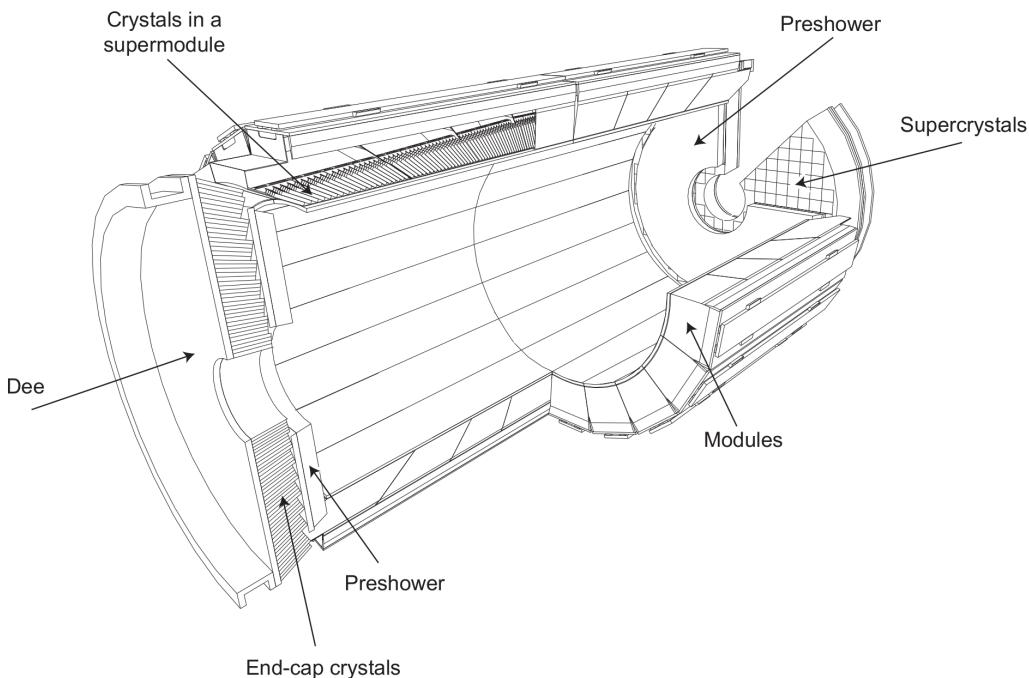


Figure X.14 – Schéma du calorimètre électromagnétique de CMS [37, 56] montrant le positionnement des cristaux, modules et supermodules dans le bâillet, des supercristaux et du détecteur de gerbes dans les bouchons.

Le ECAL se divise en trois sous-parties, schématisées sur la figure X.14. La première, comme pour le trajectographe, constitue la partie bâillet 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 bâillet 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 cm⁶ 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 neutres⁷ 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

6. 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.

7. Les pions neutres se propagent sur des distances moyennes de 26 nm puis se désintègrent dans 99 % des cas en deux photons [30]. Ce sont donc ces deux photons que le PS doit identifier.

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 [37]. 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 électromagnétique 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 laser afin d'évaluer leur réponse [57]. La figure X.15 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 $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

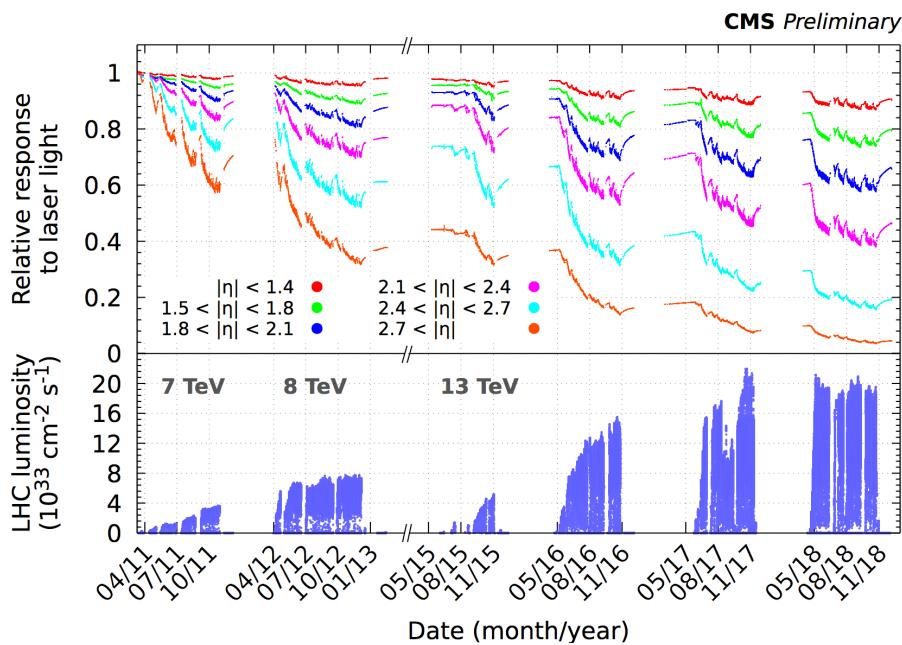


Figure X.15 – Évolution temporelle de la réponse du ECAL [57] (haut) et luminosité instantanée du LHC (bas).

La résolution σ du ECAL est paramétrée selon

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{S}{\sqrt{E}} \oplus \frac{N}{E} \oplus C \quad (\text{X.10})$$

où \oplus désigne une somme quadratique, c'est-à-dire $(a \oplus b)^2 = a^2 + b^2$, S 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 [37] 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 X.16 présente ainsi la résolution relative du ECAL sur l'énergie des électrons lors du Run II.

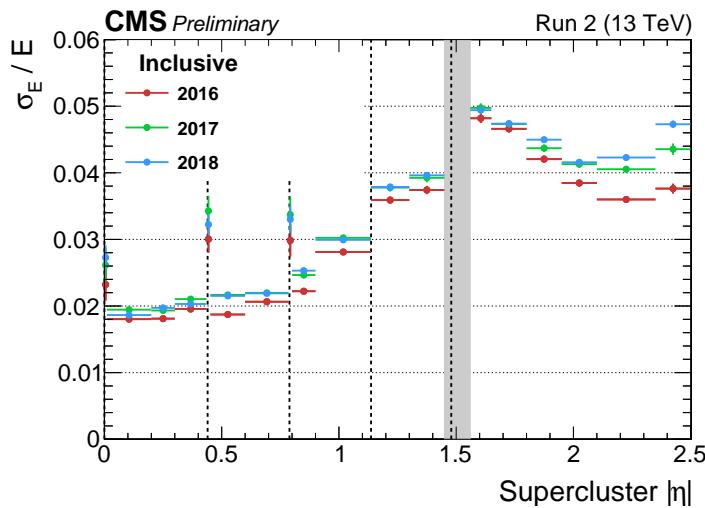


Figure X.16 – Résolution relative de l'énergie des électrons dans le ECAL lors du Run II en fonction de η [58]. La résolution est obtenue à partir d'événements $Z \rightarrow e^+e^-$.

4.5 Le calorimètre hadronique ou HCAL

Le calorimètre hadronique (HCAL) [37, 46] 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 X.17 présente l'agencement du HCAL.

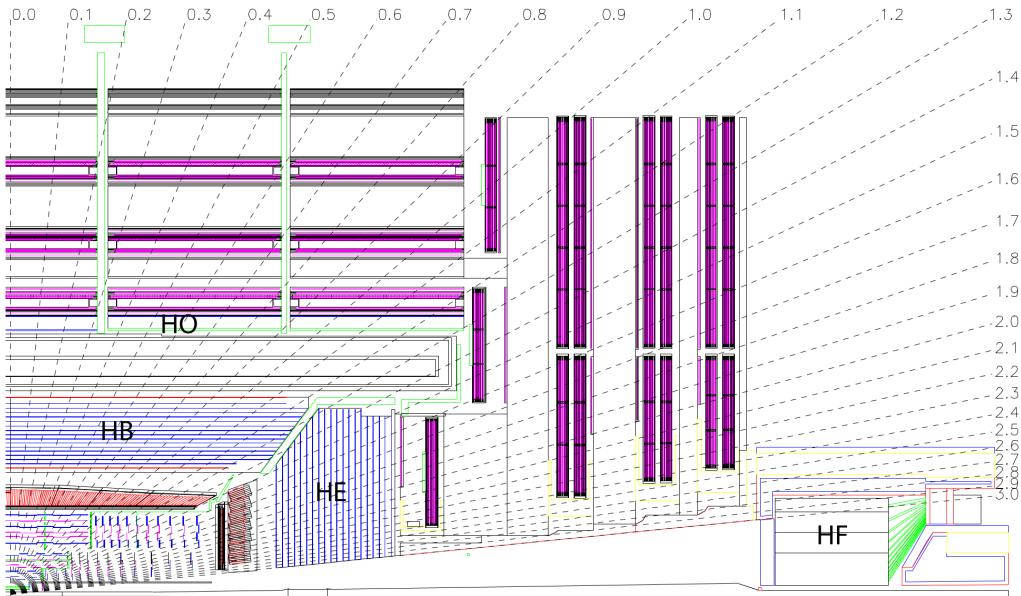


Figure X.17 – Schéma d'un quadrant du détecteur CMS [37] montrant la localisation des calorimètres hadroniques du barilet (HB), externe (HO), du bouchon (HB) et avancé (HF). Certaines valeurs de η et les directions associées sont indiquées.

Tout comme le ECAL, il comporte une partie barilet (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 n'est donc pas 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 barilet, de l'ordre de dix, est insuffisant pour contenir toutes les gerbes hadroniques [37]. Le HB est ainsi 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 X.18. Elle ne dévie pas de plus de 5% [59] une fois l'empilement asynchrone⁸ retiré [59, 60] au-delà de 10 GeV. Comme dans le cas du ECAL, la réponse du HCAL évolue au cours du temps [61] 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

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1,1}{\sqrt{E}} + \frac{9}{100} \quad (\text{X.11})$$

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 [37]. Par exemple, la découverte du boson de Higgs avec 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 X.19. 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 [37, 48, 62, 63], 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 [52], donnant une bonne résolution sur l'impulsion des muons.

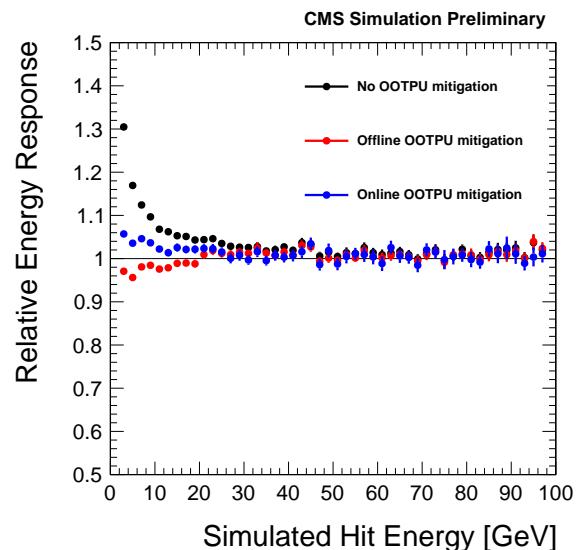


Figure X.18 – Réponse relative du calorimètre hadronique de CMS [59] en fonction de l'énergie simulée du dépôt. En noir, sans correction de l'empilement asynchrone (OOTPU). En bleu, avec des corrections en ligne, c'est-à-dire un ajustement des amplitudes et temps d'arrivée des signaux en prenant en compte jusqu'à trois signaux avant et après le signal d'intérêt. En rouge, avec l'ensemble des corrections.

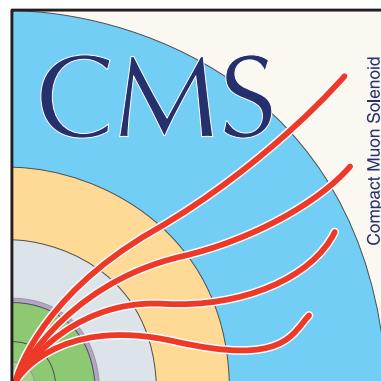


Figure X.19 – Le logo de la collaboration CMS. Il représente, plié en quatre, un événement $H \rightarrow 4\mu$ dans le plan transverse du détecteur.

8. L'empilement asynchrone est défini dans la section 3.5.

Les autres types de particules ayant été absorbées dans les couches précédentes, seuls les muons atteignent cette partie du détecteur. La figure X.20 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.

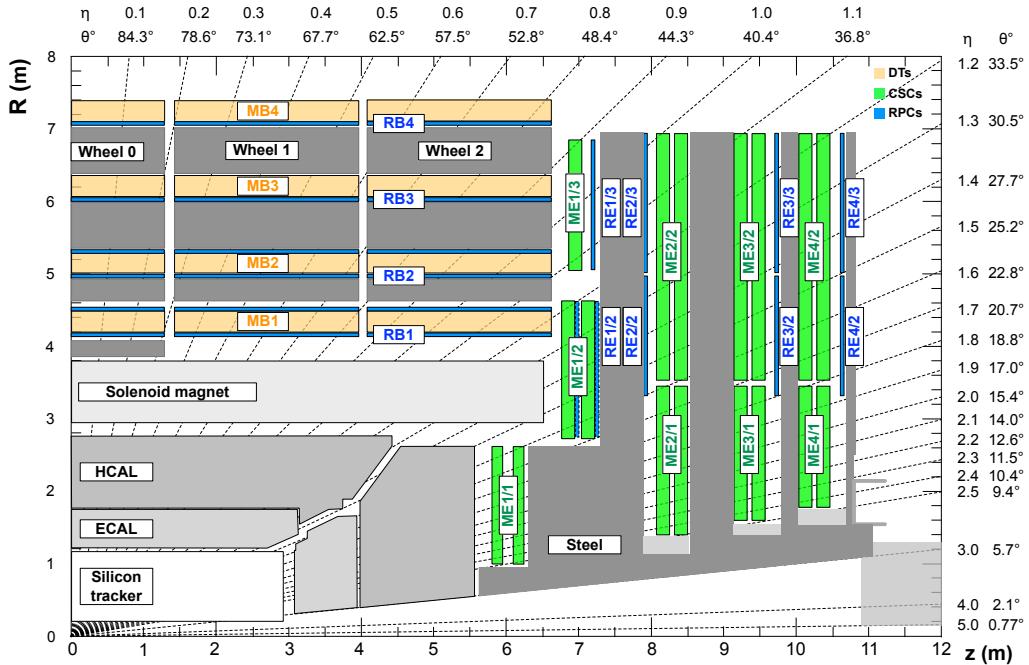


Figure X.20 – Schéma d'un quadrant du détecteur CMS [63] montrant la localisation des chambres à muons et leur nature : tubes à dérive (DT, en jaune), chambres à pistes cathodiques (CSC, en vert) et chambres à plaques résistives (RPC, en bleu). Certaines valeurs de η et les directions associées sont indiquées.

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.

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 données⁹. Un système de déclenchement complémentaire aux DT et CSC est ajouté, il s'agit du RB dans le bâillet 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 bascule¹⁰ en fonction de l'impulsion transverse très rapide. La figure X.21 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

9. Les modalités du rejet ou de l'enregistrement d'un événement sont discutées plus en détails dans la section 4.7.

10. 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.

muons sur une large gamme d'énergie [63]. La caractérisation complète des muons, abordée dans la section 6.2, utilise conjointement les informations du trajectographe et des chambres à muons.

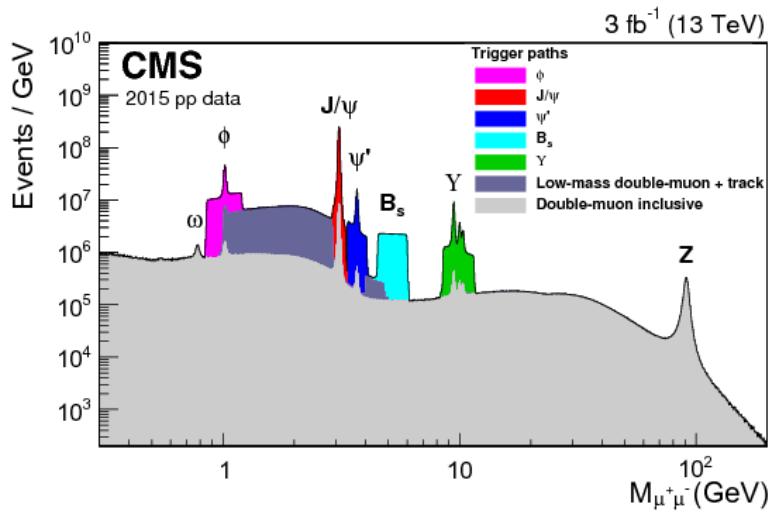


Figure X.21 – Distribution de la masse invariante du système de deux muons obtenue à partir du système de déclenchement des chambres à muons [63]. Les données ont été récoltées en 2015 à l'aide d'un déclenchement global (gris) ainsi que plusieurs déclenchements spécifiques (en couleur). Les résonances 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*) [37, 64–66] 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, par exemple par la présence de paires de muons. Le L1 conserve ou rejette ainsi un événement en moins de 3,2 μs [37] et réduit la fréquence des événements à analyser de 40 MHz à 100 kHz, limite imposée par l'électronique de lecture [66]. La structure du L1 est illustrée sur la figure X.22.

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 [37]. 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 [37, 66], 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 des ces processus mène à utiliser un générateur d'événements Monte-Carlo. Cette

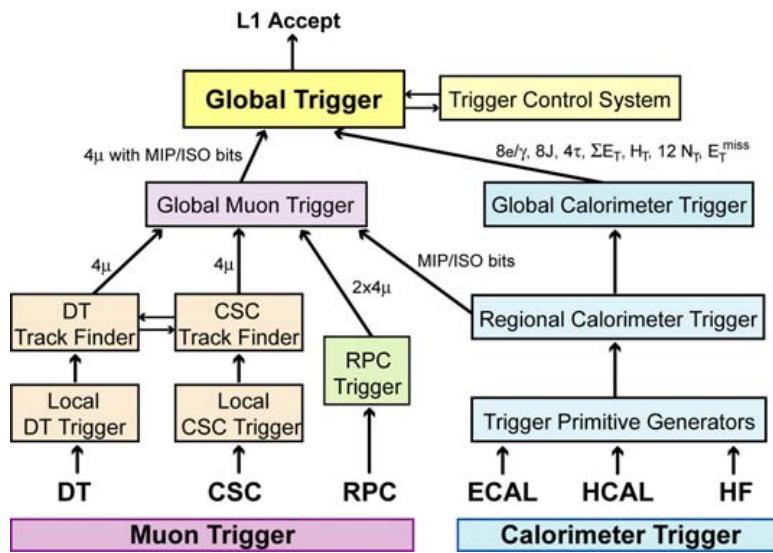


Figure X.22 – Architecture du système de déclenchement L1 [37].

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 de sortie 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 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 X.23.

La description analytique de ces événements est réalisée grâce à la théorie des perturbations. À l'aide des règles de Feynman¹¹, 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 [68], comme MADGRAPH [69] et PYTHIA [70, 71]. 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 [72] et MC@NLO [73].

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 couleur¹². 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 [70, 71] et HERWIG [74] 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.

11. Les règles de Feynman sont les traductions mathématiques des différents vertex pouvant apparaître dans les diagrammes de Feynman, décrits dans l'annexe B.

12. Le confinement de couleur est abordé dans le chapitre 2.

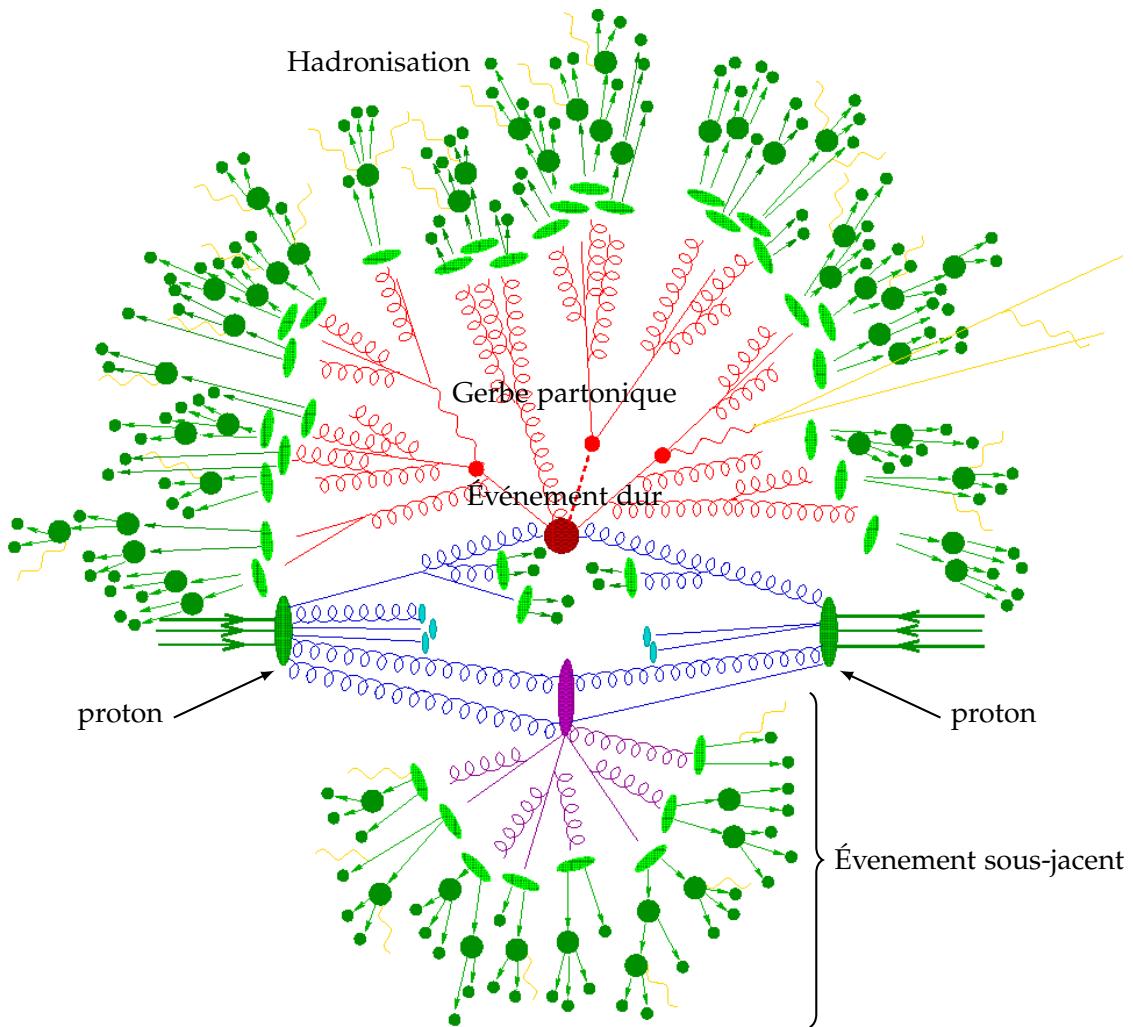


Figure X.23 – Représentation d'une collision de protons [67].

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 [75, 76] 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 [77]. 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

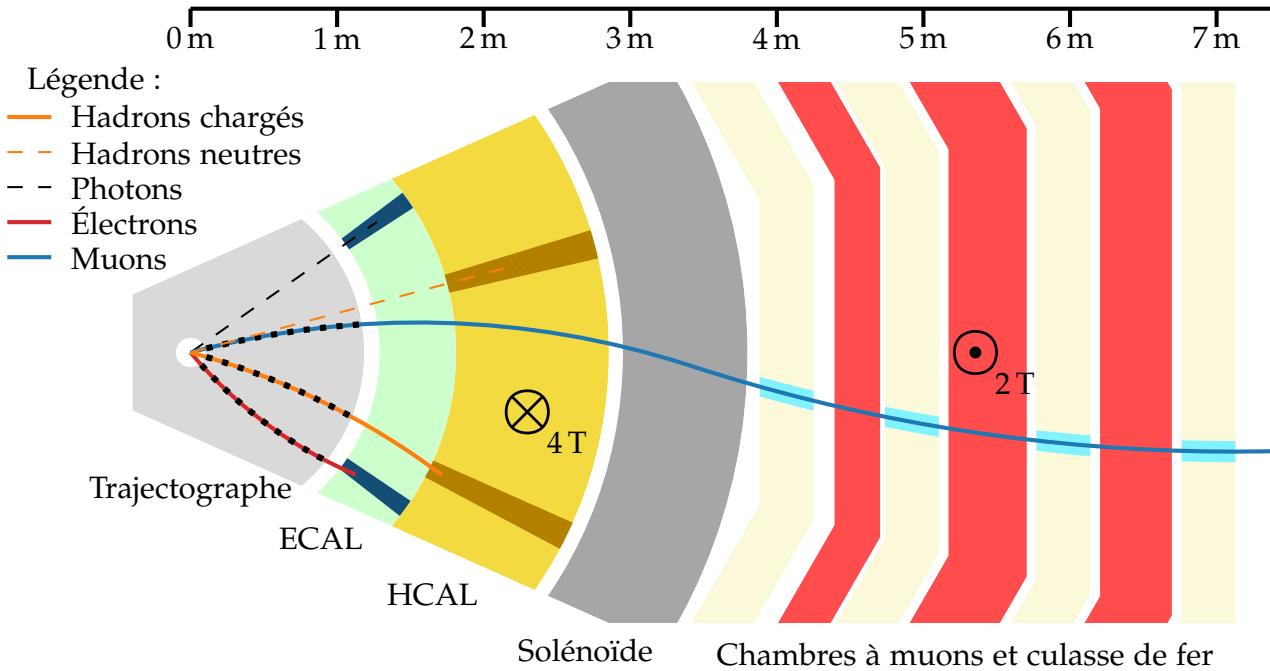


Figure X.24 – Coupe transverse schématique du détecteur CMS et signaux caractéristiques laissés par les particules. Les hadrons forment un dépôt dans le HCAL. Les hadrons chargés présentent de plus une trace dans le trajectographe dont l'extrapolation doit passer par ce dépôt. De même, les photons et 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.

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 X.24¹³. 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) [78, 79], 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 [80]. 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 [78]. 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 [50].

13. Dans toute la suite de ce manuscrit, les schémas des événements dans le détecteur utilisent la même présentation que sur la figure X.24, en particulier pour les couleurs des sous-détecteurs et des particules.

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 provenant 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 % [81].

Les particules peuvent être déviées par interaction avec la matière du trajectographe [75, 76]. Un algorithme dédié à ce phénomène est utilisé et permet de déterminer les lieux de ces interactions, représentés sur la figure X.25. La structure du trajectographe se retrouve et le taux de mauvaise reconstruction est réduit par un traitement spécifique des traces présentant de telles déviations.

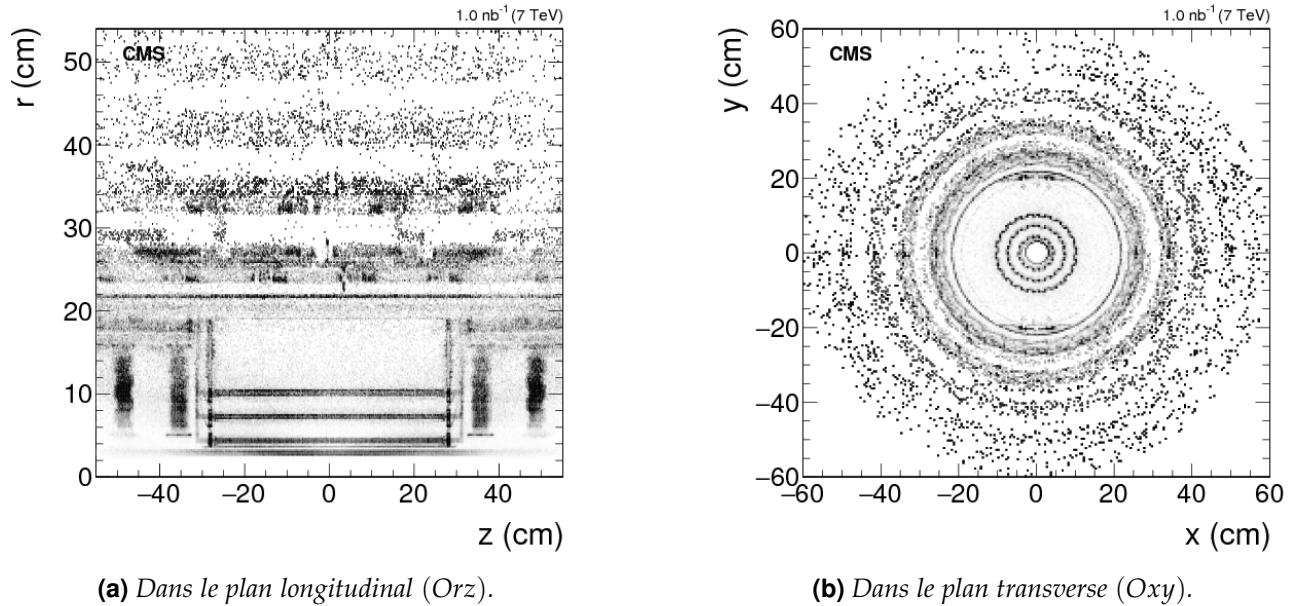


Figure X.25 – Carte des points d’interactions entre particules des événements et matière composant le détecteur [78] à partir de données prises en 2011 à $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$.

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 $0,5 \text{ GeV}$ 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 [78].

6.1.2 Dépôts dans les calorimètres

Les dépôts dans les calorimètres sont regroupés de proche en proche en agglomérats (*clusters*) [78], indépendamment pour chaque sous-partie des calorimètres. Plusieurs raisons existent à cette aggrégation :

- 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 [78].

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 [78]. 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 [75, 76].

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 [78]. 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

$$\Delta R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2, \quad (\text{X.12})$$

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*) [63] 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.

Jusqu'à $p_T = 100 \text{ GeV}$, la résolution en énergie des muons reconstruits par cette méthode est de 1 % dans le barilet et de 3 % dans les bouchons [63]. 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 regroupées 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 [78]. 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'hadronisation¹⁴ restent à être reconstruits. Ces particules sont généralement détectées comme des hadrons chargés (π^\pm, K^\pm , protons), de hadrons neutres (K_L , neutrons), des photons non isolés (désintégration de π^0) et plus rarement comme des muons (désintégration de hadrons lourds¹⁵).

Dans la région d'acceptation 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'acceptation 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.

14. La formation des jets ainsi que l'hadronisation sont détaillées 2 du chapitre « Calibration en énergie des jets ».

15. La phénoménologie de la désintégration des hadrons lourds est abordée dans la section 2 du chapitre « Calibration en énergie des jets ».

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 [82].

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

$$\sum_{\text{toutes les particules}} \vec{p}_T = \vec{0} \Leftrightarrow \sum_{\text{particules invisibles}} \vec{p}_T + \sum_{\text{particules reconstruites}} \vec{p}_T = \vec{0} \Leftrightarrow \sum_{\text{particules invisibles}} \vec{p}_T = - \sum_{\text{particules reconstruites}} \vec{p}_T. \quad (\text{X.13})$$

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

$$\vec{E}_T^{\text{miss}} = - \sum_{\text{particules reconstruites}} \vec{p}_T, \quad E_T^{\text{miss}} = |\vec{E}_T^{\text{miss}}|, \quad (\text{X.14})$$

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 ¹⁶.

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

16. C'est en particulier le cas lors de la calibration en énergie des jets, ce qui est détaillé dans la section 4.3 du chapitre 4.

sont alors traitées par un algorithme de reconstruction. Cet algorithme se base sur les signaux du détecteur et leurs corrélations, en particulier spatiale, 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.

Références

- [1] 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>.
- [2] 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>.
- [3] 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>.
- [4] 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>.
- [5] Site internet du CERN. URL : <https://home.cern/>.
- [6] 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>.
- [7] 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>.
- [8] 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).
- [9] 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>.
- [10] 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).

- [11] 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>.
- [12] 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>.
- [13] 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>.
- [14] 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>.
- [15] 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>.
- [16] 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>.
- [17] 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>.
- [18] 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>.
- [19] CERN. *The first touchscreen used at CERN*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=tQe5dlzScwU>.
- [20] CERN. *The World Wide Web Project*. 1989. URL : <http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>.
- [21] 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>.
- [22] 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>.
- [23] 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>.
- [24] A. MICHELINI. « OPAL Detector Performance ». *Philosophical Transactions : Physical Sciences and Engineering* **336**.1642 (1991), p. 237-246. URL : <http://www.jstor.org/stable/53786>.
- [25] CERN. *MapCERN*. URL : <https://maps.web.cern.ch/>.
- [26] *Long term LHC schedule*. URL : <https://lhc-commissioning.web.cern.ch/>.
- [27] 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>.
- [28] R. D. BALL & coll. « Parton distributions for the LHC Run II ». *Journal of High Energy Physics* **2015**.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](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP04(2015)040).

- [29] 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%2F0954-3899%2F42%2F10%2F103103>.
- [30] Particle Data Group. « Review of Particle Physics ». *Physical Review* **D98** (août 2018). doi : [10.1103/PhysRevD.98.030001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001).
- [31] 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>.
- [32] 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>.
- [33] 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>.
- [34] The CMS Collaboration. *CMS Luminosity – Public Results*. URL : <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/LumiPublicResults>.
- [35] 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>.
- [36] 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>.
- [37] 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>.
- [38] 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>.
- [39] 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>.
- [40] 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>.
- [41] 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>.
- [42] 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>.
- [43] 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>.
- [44] 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>.
- [45] 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>.
- [46] 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>.

- [47] The CMS Collaboration. *The CMS magnet project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <http://cds.cern.ch/record/331056>.
- [48] The CMS Collaboration. *The CMS muon project : Technical Design Report*. Technical Design Report CMS. Geneva : CERN, 1997. URL : <https://cds.cern.ch/record/343814>.
- [49] P. ARCE & coll. « The network of photodetectors and diode lasers of the CMS Link alignment system ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **896** (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>.
- [50] 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>.
- [51] 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>.
- [52] 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>.
- [53] 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>.
- [54] 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>.
- [55] A. DOMINGUEZ & coll. *CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade*. Rapp. tech. Sept. 2012. URL : <https://cds.cern.ch/record/1481838>.
- [56] 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>.
- [57] The CMS Collaboration. « CMS ECAL Response to Laser Light » (mar. 2019). URL : <https://cds.cern.ch/record/2668200>.
- [58] The CMS Collaboration. « ECAL 2016 refined calibration and Run2 summary plots » (avr. 2020). URL : <https://cds.cern.ch/record/2717925>.
- [59] The CMS Collaboration. « HCAL Energy Reconstruction Performance » (nov. 2016). URL : <https://cds.cern.ch/record/2235509>.
- [60] The CMS Collaboration. « HCAL Out Of Time Pileup Subtraction and Energy Reconstruction » (mai 2018). URL : <https://cds.cern.ch/record/2320408>.
- [61] The CMS Collaboration. « HCAL Calibration Status in Summer 2017 » (mai 2017). URL : <https://cds.cern.ch/record/2281146>.
- [62] 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>.
- [63] 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>.
- [64] The CMS Collaboration. *CMS TriDAS project : Technical Design Report. T. 1.* Technical Design Report CMS. Geneva : CERN. URL : <http://cds.cern.ch/record/706847>.
- [65] 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>.
- [66] The CMS Collaboration. « The CMS trigger system ». *Journal of Instrumentation* **12** (sept. 2016). 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>.

- [67] 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>.
- [68] A. BUCKLEY & coll. « General-purpose event generators for LHC physics ». *Physics Reports* **504** (jan. 2011). DOI : <10.1016/j.physrep.2011.03.005>. URL : <http://cds.cern.ch/record/1322340>.
- [69] J. ALWALL & coll. « MADGRAPH 5 : Going Beyond ». *Journal of High Energy Physics* **06** (2011). DOI : [10.1007/jhep06\(2011\)128](10.1007/jhep06(2011)128). arXiv : [1106.0522 \[hep-ph\]](1106.0522 [hep-ph]).
- [70] 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>. URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2006/05/026>.
- [71] 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>. arXiv : [1410.3012 \[hep-ph\]](1410.3012 [hep-ph]).
- [72] 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](10.1007/jhep06(2010)043). arXiv : [1002.2581 \[hep-ph\]](1002.2581 [hep-ph]).
- [73] 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>. URL : <http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2003/08/007>.
- [74] 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>.
- [75] H. A. BETHE. « Molière's Theory of Multiple Scattering ». *Physical Review* **89** (6 mar. 1953). DOI : <10.1103/PhysRev.89.1256>. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.89.1256>.
- [76] 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>. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.115.491>.
- [77] 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>.
- [78] 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>. arXiv : [1706.04965v2 \[physics.ins-det\]](1706.04965v2 [physics.ins-det]). URL : <http://stacks.iop.org/1748-0221/12/i=10/a=P10003>.
- [79] CMS. « The CMS Particle Flow Algorithm ». *EPJ Web of Conferences* **191** (2018). DOI : <10.1051/epjconf/201819102016>. URL : <https://cds.cern.ch/record/2678077>.
- [80] 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>. URL : <http://cds.cern.ch/record/884424>.
- [81] 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>. URL : <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F12%2F02%2Fp02014>.
- [82] 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>.

