

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 et nombre d'événements	7
3.5	L'empilement	7
3.6	Les expériences du LHC	9
4	L'expérience CMS : Compact Muon Solenoïd	9
4.1	Vue d'ensemble et système de coordonnées	9
4.2	Le solénoïde	9
4.3	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	9
4.4	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	9
4.5	Le calorimètre hadronique ou HCAL	9
4.6	Les chambres à muons	9
4.7	Prise de données à CMS	9
5	Événements simulés	9
5.1	Génération d'événements	9
5.2	Simulation du détecteur	10
6	Reconstruction des événements	10
6.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	10
6.2	Identification et reconstruction des particules	10
6.3	Objets de haut niveau	10
6.4	Énergie transverse manquante	11
7	Conclusion	11

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

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

2 CHAPITRE X. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

de survenir. Enfin, de nombreux paramètres sont difficiles voir impossibles à obtenir sans connaître les conditions expérimentales de tels événements naturels. La caractérisation des particules de l'Univers ne peut donc se faire uniquement par ces observations.

Le Grand Collisionneur de Hadrons [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. Les protons 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.

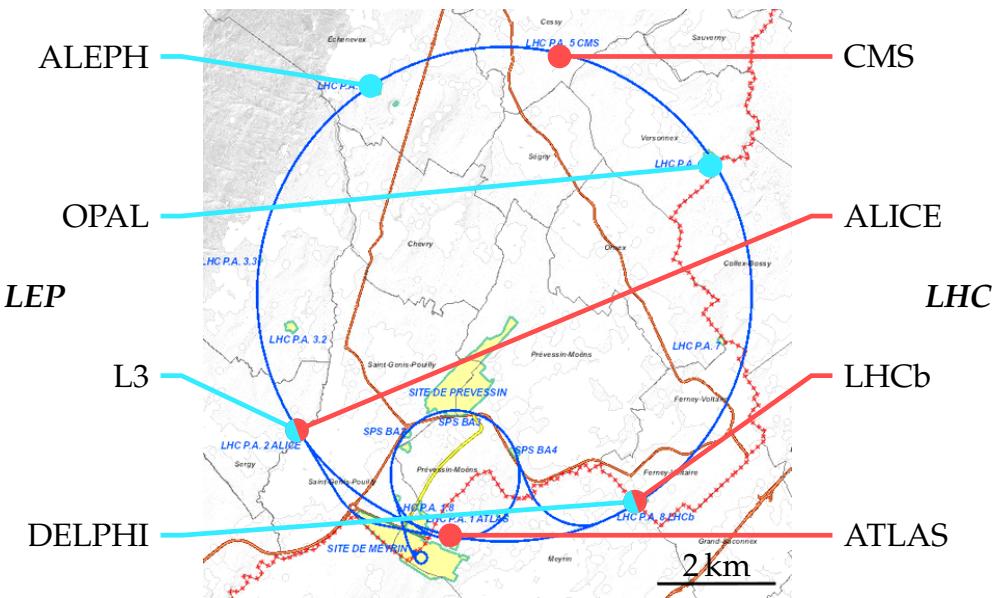


Figure X.1 – Emplacements des grandes expériences du LEP (1989-2000) et du LHC (depuis 2008) [25]. Les tracés des booster, PS et SPS sont également visibles.

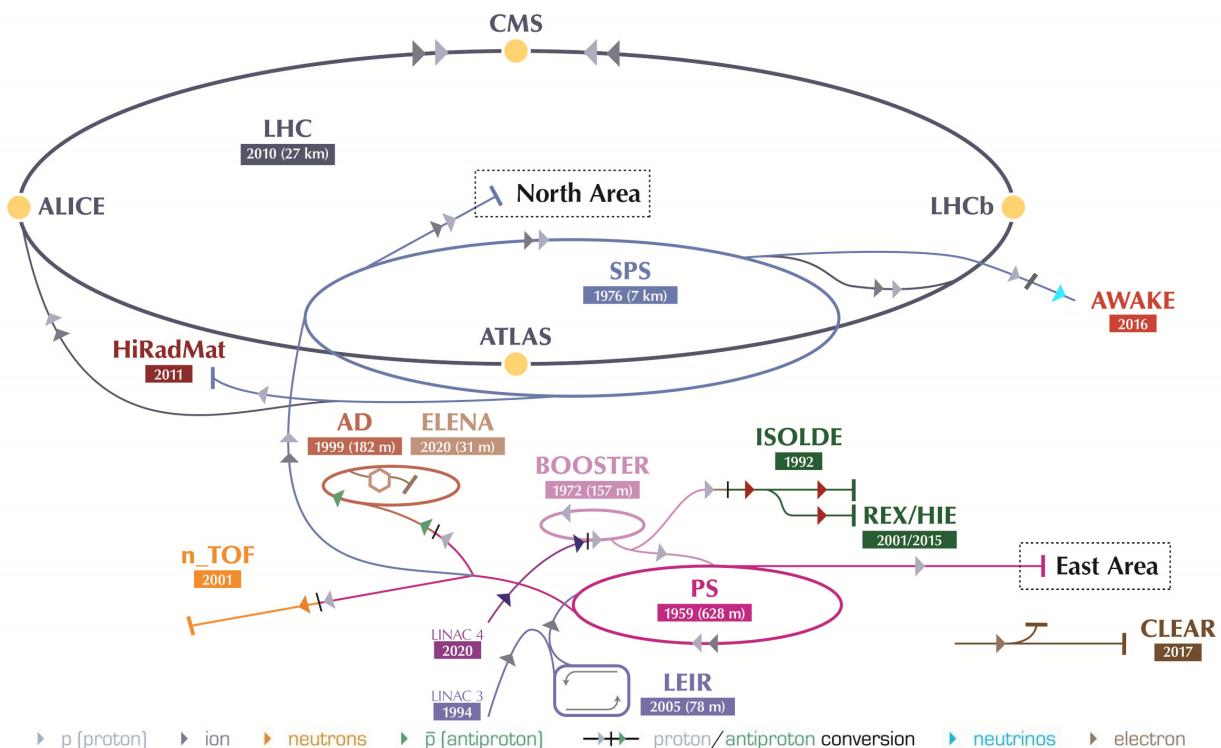


Figure X.2 – Complexe des accélérateurs du CERN [5]. De nombreuses expériences y sont installées : AD, Décélérateur d'Antiprotons ; AWAKE, Advanced WAKEfield Experiment ; BOOSTER, Booster du Synchrotron à Protons ; CLEAR, CERN Linear Electron Accelerator for Research ; ELENA, Extra Low Energy Antiproton ; 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	$350 \text{ fb}^{-1} ?$
IV	2027-2030	14 TeV	$3000 \text{ fb}^{-1} ?$
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 des énergies dans le centre de masse 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.

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

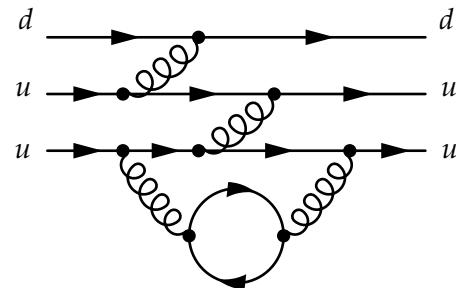


Figure X.3 – Diagramme de Feynman de la propagation d'un proton avec apparition d'une paire $q\bar{q}$.

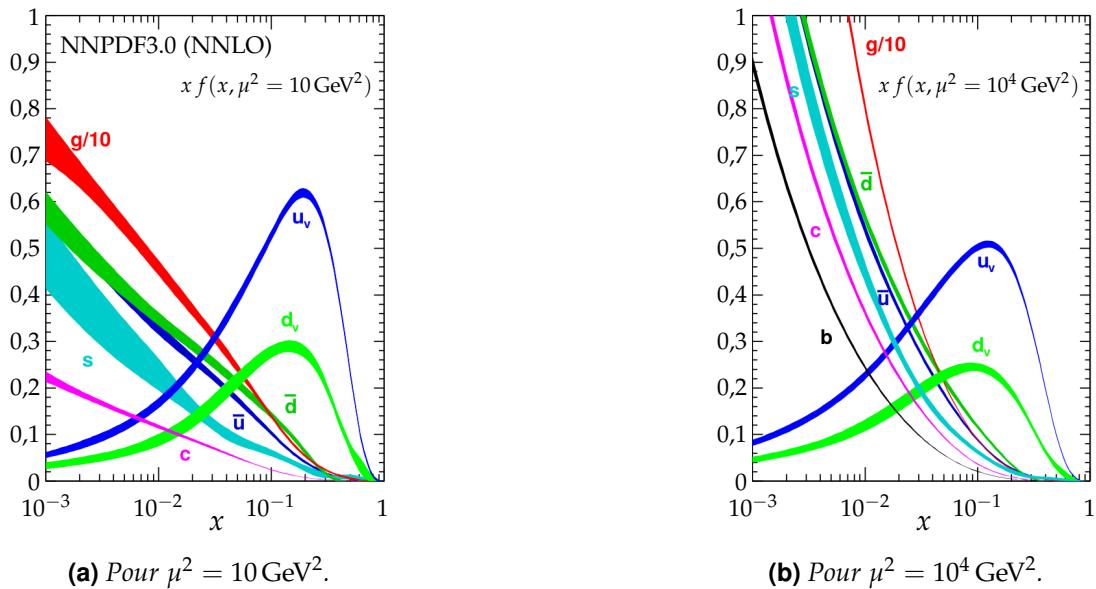


Figure X.4 – Fonctions de densité partoniques (PDF, Parton Distribution Functions) à différentes échelles d'énergie μ obtenues au NNLO NNPDF3.0 [29] avec $g_s(m_Z^2) = 0,118$ [30]. Les bandes tracées correspondent aux PDF f , avec incertitude, multipliées la fraction d'impulsion x , où f peut être les quarks u et d de valence (u_v, d_v) ou les gluons (g), quarks et antiquarks de la mer ($\bar{u}, \bar{d}, s \simeq \bar{s}, c = \bar{c}, b = \bar{b}$).

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 et nombre d'événements

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

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

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 ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$) 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 LHC⁴ [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.

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.

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

8 CHAPITRE X. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

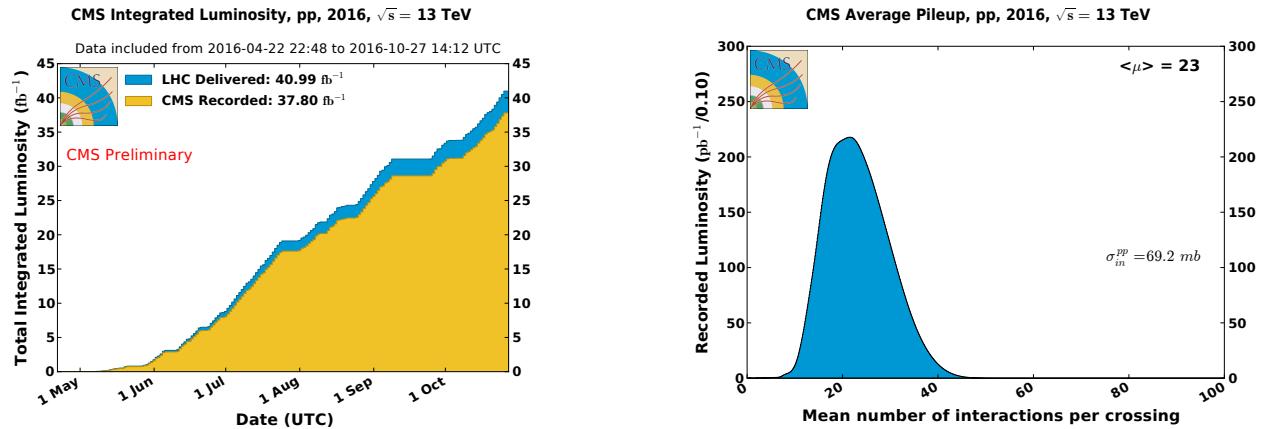


Figure X.5 – Luminosité totale et empilement en 2016 [31, 34].

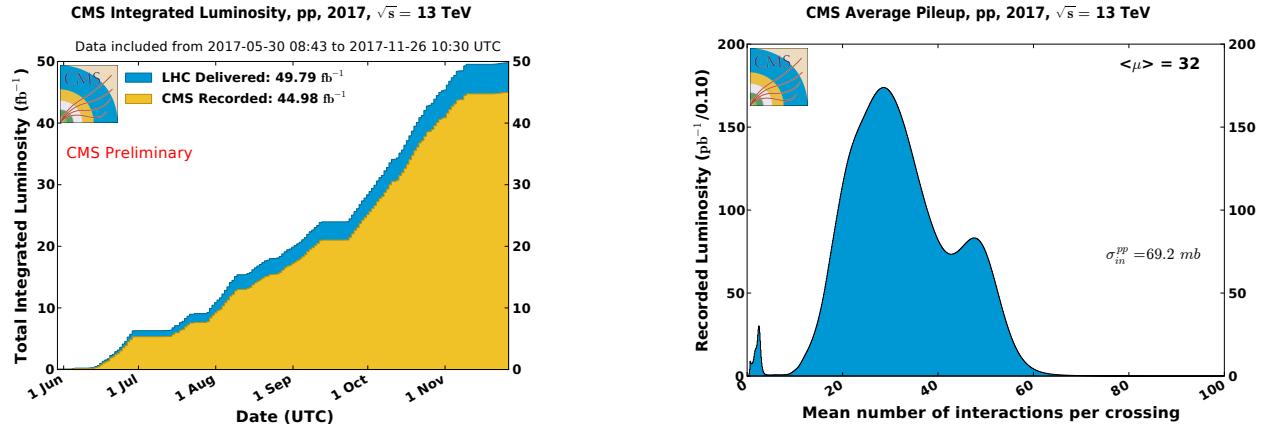


Figure X.6 – Luminosité totale et empilement en 2017 [32, 34].

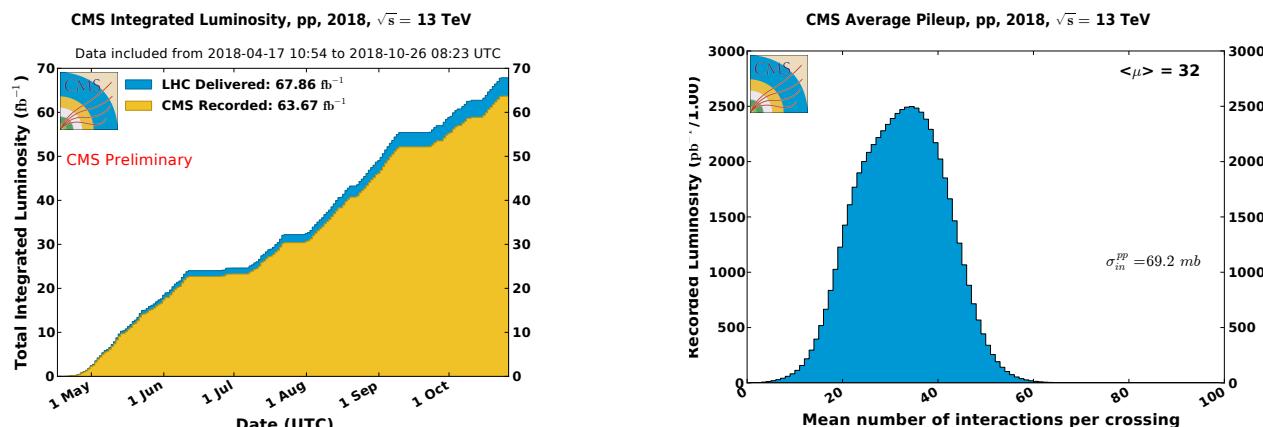


Figure X.7 – Luminosité totale et empilement en 2018 [33, 34].

3.5.2 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 prédictes 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

4.2 Le solénoïde

4.3 Le trajectographe ou *tracker*

4.4 Le calorimètre électromagnétique ou ECAL

4.5 Le calorimètre hadronique ou HCAL

4.6 Les chambres à muons

4.7 Prise de données à CMS

5 Événements simulés

5.1 Génération d'événements

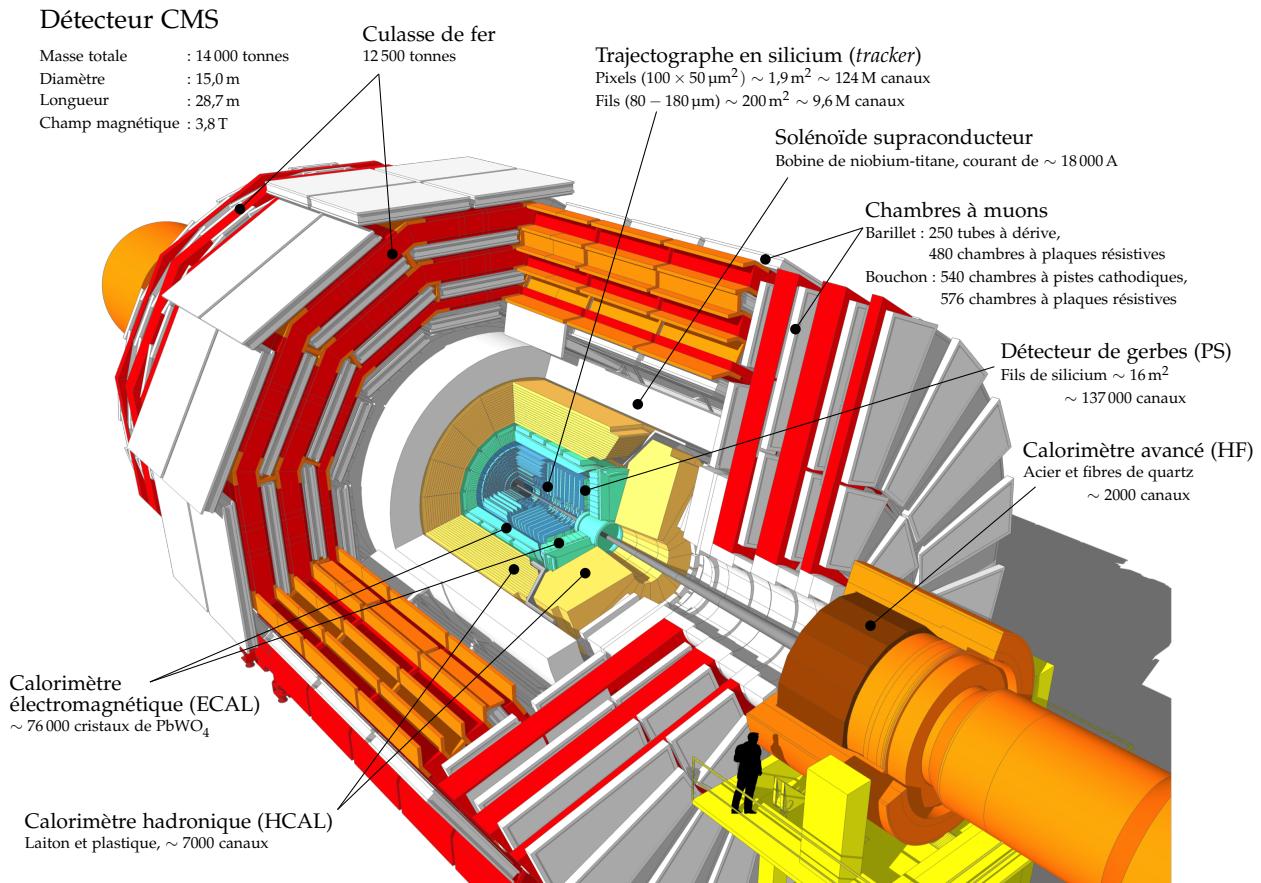


Figure X.8 – Vue éclatée du détecteur CMS [42].

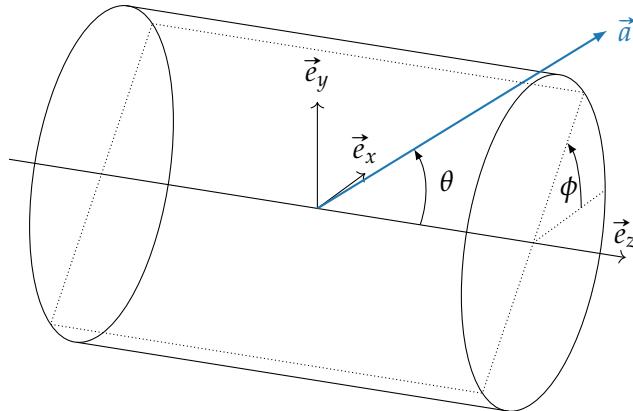


Figure X.9 – Système de coordonnées du détecteur CMS. L'axe x pointe vers le centre du LHC, l'axe y vers le haut ($\vec{g} \cdot \vec{e}_y < 0$) et l'axe z est aligné avec le faisceau tel que $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ forme un trièdre direct. L'angle entre le plan (\vec{e}_x, \vec{e}_z) et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

5.2 Simulation du détecteur

6 Reconstruction des événements

6.1 L'algorithme de *Particle Flow*

6.2 Identification et reconstruction des particules

6.3 Objets de haut niveau

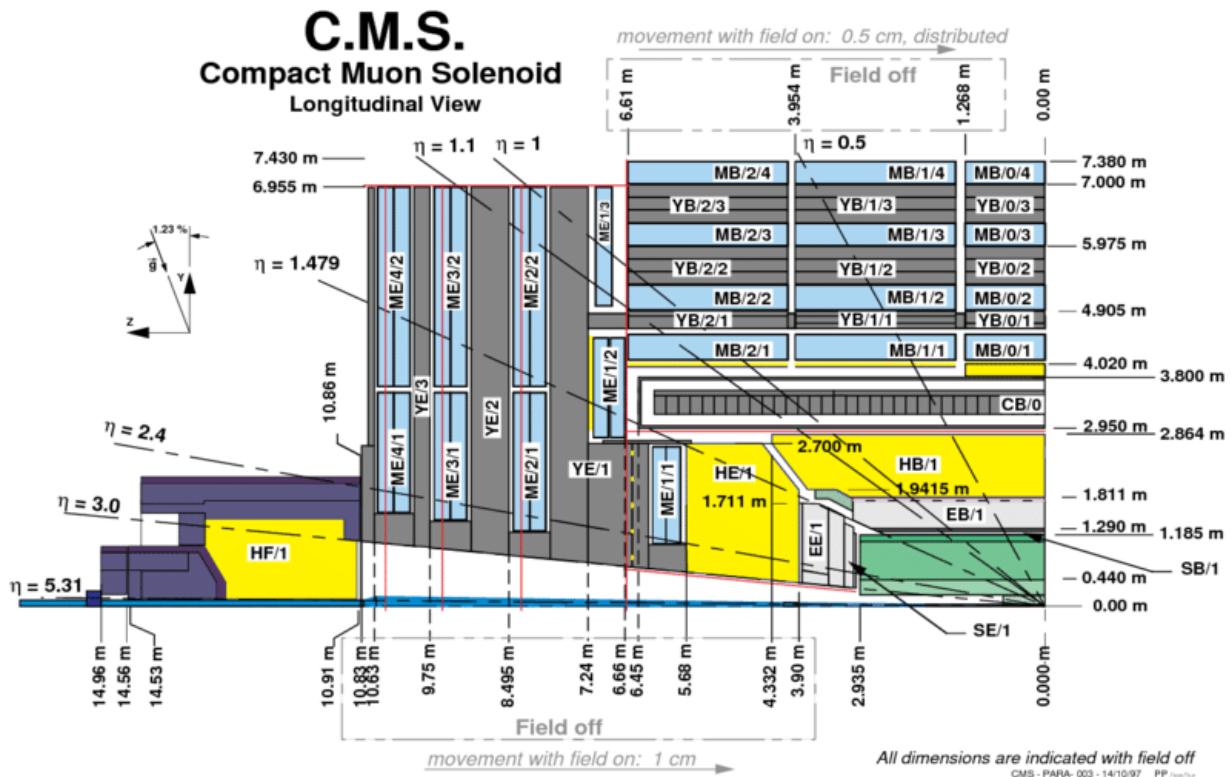


Figure X.10 – Vue longitudinale d'un quadrant du détecteur CMS [43]. Les directions correspondant à quelques valeurs de pseudo-rapidité sont illustrées et des mesures de distances par rapport au centre du détecteur, lieu des collisions, sont indiquées. Le sol de la caverne présente une倾inlaison de 1,23 % par rapport à la direction de la gravité locale \vec{g} , ce que montre le schéma à gauche.

6.4 Énergie transverse manquante

7 Conclusion

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>.

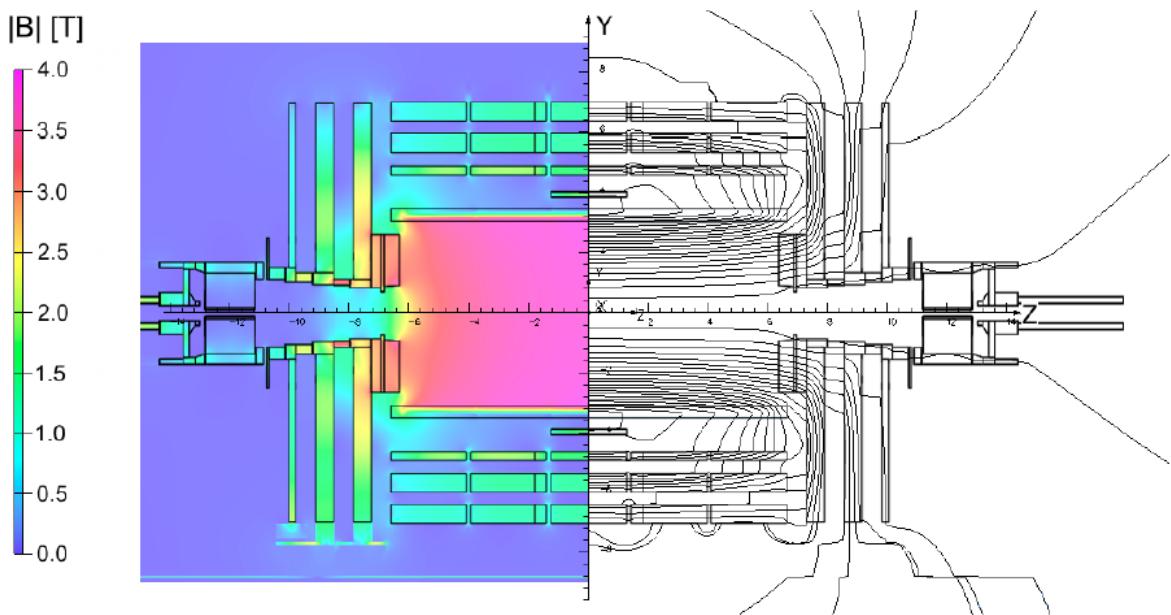


Figure X.11 – Valeurs de la norme du champ magnétique (à gauche) et lignes de champ (à droite) prédictes dans la section longitudinale du détecteur CMS avec une valeur du champ centre de 3,8 T [44]. Entre deux lignes de champ, l'écart est de 6 Wb.

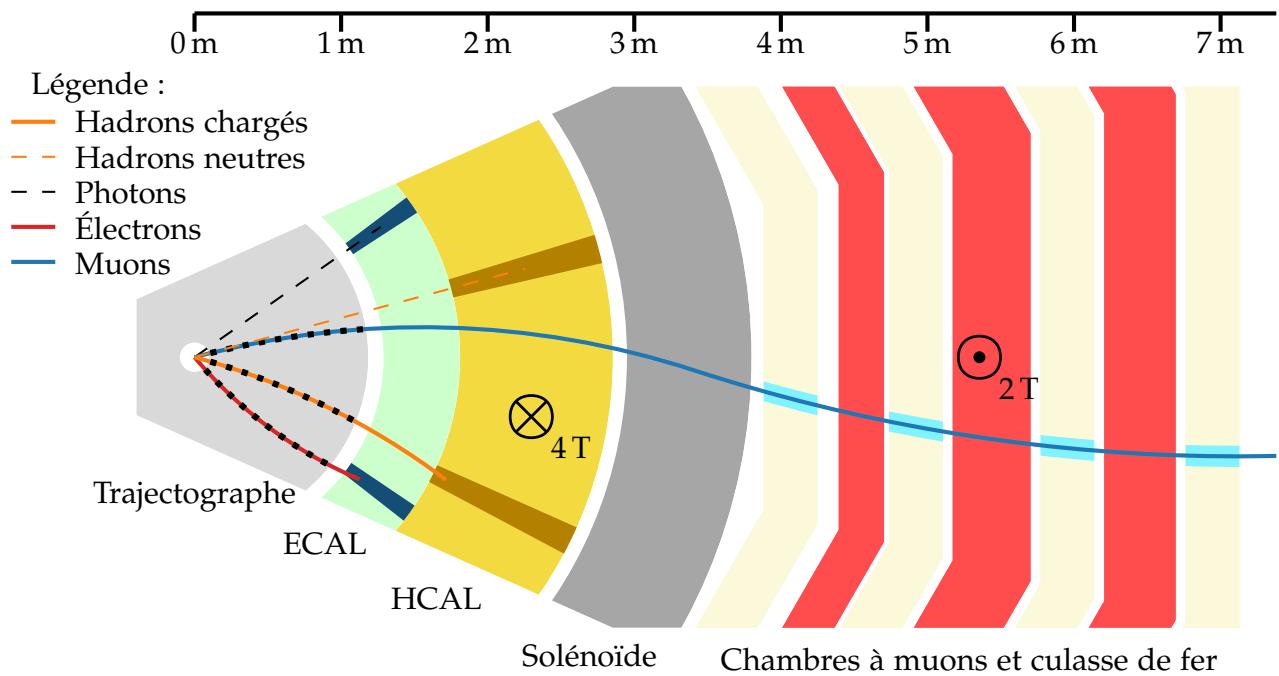


Figure X.12 – Coupe transverse schématique du détecteur CMS et signaux caractéristiques laissés par les particules.

- [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 $\sqrt{s} = 540$ 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] 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>.
- [43] P. ARCE & coll. « The network of photodetectors and diode lasers of the CMS Link alignment system ». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A896** (2018), p. 1-23. doi : [10.1016/j.nima.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.04.004). URL : <http://cds.cern.ch/record/2637152>.
- [44] 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>.

