

# Chapitre X

## Dispositif expérimental

### Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Le CERN</b>	<b>2</b>
2.1	Les origines du CERN	2
2.2	Réalisations du CERN	2
2.3	Les accélérateurs du CERN	3
<b>3</b>	<b>Le LHC : <i>Large Hadron Collider</i></b>	<b>4</b>
3.1	Accélération de protons	4
3.2	Collisions de protons	4
3.3	Luminosité et nombre d'événements	4
3.4	L'empilement	4
3.5	Les expériences du LHC	4
<b>4</b>	<b>L'expérience CMS : <i>Compact Muon Solenoïd</i></b>	<b>5</b>
4.1	Vue d'ensemble et système de coordonnées	5
4.2	Le solénoïde	5
4.3	Le trajectographe ou <i>tracker</i>	5
4.4	Le calorimètre électromagnétique ou ECAL	5
4.5	Le calorimètre hadronique ou HCAL	6
4.6	Les chambres à muons	6
4.7	Prise de données à CMS	6
<b>5</b>	<b>Événements simulés</b>	<b>6</b>
5.1	Génération d'événements	6
5.2	Simulation du détecteur	7
<b>6</b>	<b>Reconstruction des événements</b>	<b>7</b>
6.1	L'algorithme de <i>Particle Flow</i>	7
6.2	Identification et reconstruction des particules	7
6.3	Objets de haut niveau	7
6.4	Énergie transverse manquante	8
<b>7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>8</b>

## 1 Introduction

La matière « du quotidien » est constituée des fermions de la première génération<sup>1</sup>. 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. L'étude des rayons cosmique 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. Des processus du modèle standard ont une faible section efficace, c'est-à-dire une faible

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

probabilité de survenir. La caractérisation des particules de l'Univers ne peut donc se faire uniquement par l'observation de phénomènes naturels.

Le Grand Collisionneur de Hadrons [2-4] (LHC, *Large Hadron Collider*) de l'organisation européenne pour la recherche nucléaire ou CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) réalise des collisions entre particules. Les échelles d'énergies atteintes permettent de produire des particules de hautes masses par conservation de l'énergie. Le LHC permet de plus de produire ces particules de nombreuses fois. Ces deux conditions sont nécessaires afin de découvrir des particules fondamentales comme le boson de Higgs [5-9] et pour 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 [10]. Des scientifiques comme Raoul Dautry, Pierre Auger ou Niels Bohr envisagent la création d'un laboratoire européen de physique atomique<sup>2</sup> 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 (1973), les bosons W et Z (1983, Nobel 1984) [11-15] et dernièrement le boson de Higgs (2012, Nobel 2013) [5, 6].

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 [16]. Le Web a également été développé au CERN [17].

---

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-accelérateur.

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 [11-13] et Z [14, 15].

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 :

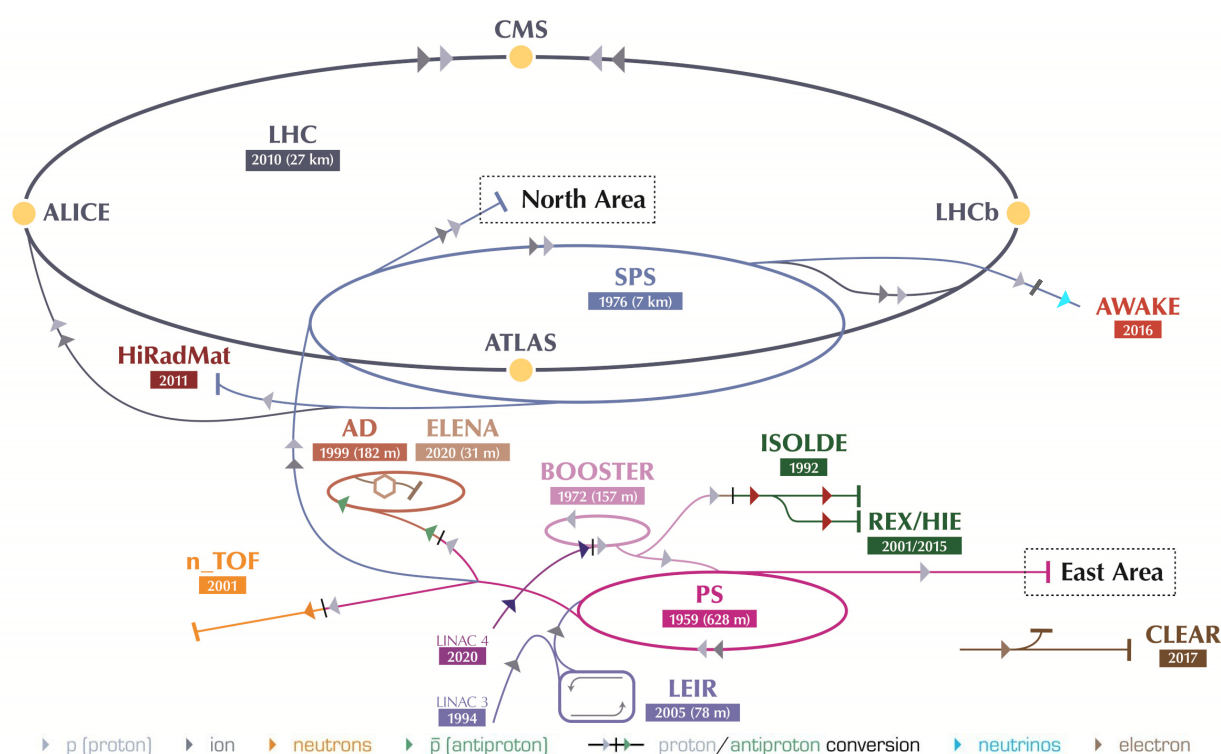
**ALEPH** [18], *Apparatus for LEP PHysics at CERN*, était une expérience installée au point 4<sup>3</sup> et destinée à réaliser des mesures de précision des paramètres du modèle standard ainsi qu'à la recherche de nouvelle physique, comme le sont ATLAS et CMS aujourd'hui ;

**DELPHI** [19], *DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification*, installée au point 8 ;

**L3** [20], détecteur constitué de trois sous-détecteurs principaux au point 2, dont l'aimant octogonal rouge très caractéristique est réutilisé dans le détecteur ALICE ;

**OPAL** [21], *Omni-Purpose Apparatus at LEP*, au point 6.

3. Les points d'interaction du LEP et du LHC sont visibles sur la figure X.2.



**Figure X.1** – Complexe des accélérateurs du CERN [10]. 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.

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.1 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 PS, du SPS et du *Booster* sont illustrés sur la figure X.2. 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 3.5. Dans tous les cas, deux faisceaux de particules sont accélérés en sens inverses. Dans le cadre de cette thèse, seules les collisions de protons sont considérées.

Run I, II, III ...

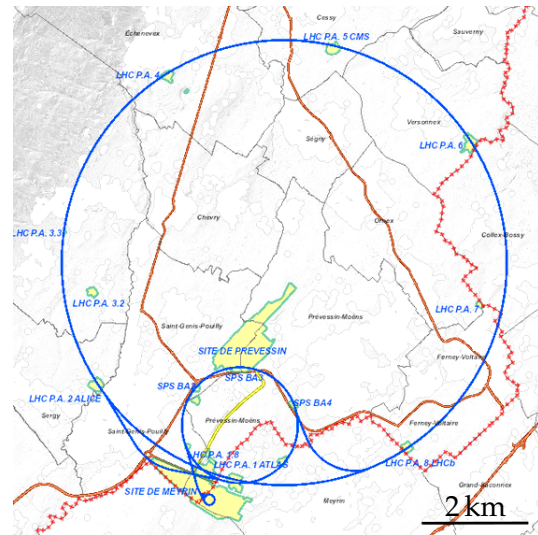


Figure X.2 – Tracés des booster, PS, SPS et du LHC [22].

#### 3.1 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.1, 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)<sup>4</sup> permet d'accélérer les protons à une énergie de 50 MeV ;
- le *Booster*, premier élément circulaire, amène les protons à 1,4 GeV ;
- 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.

#### 3.2 Collisions de protons

#### 3.3 Luminosité et nombre d'événements

#### 3.4 L'empilement

#### 3.5 Les expériences du LHC

Quatre grandes expériences sont présentes sur le LHC. Elles se situent chacune à un des points d'interaction de l'anneau afin d'étudier les collisions qui y sont produites.

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

**ALICE** [23], *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 de l'expérience L3 du LEP.

**ATLAS** [24], *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** [25], *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** [26], *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.

## 4 L'expérience CMS : Compact Muon Solenoid

### 4.1 Vue d'ensemble et système de coordonnées

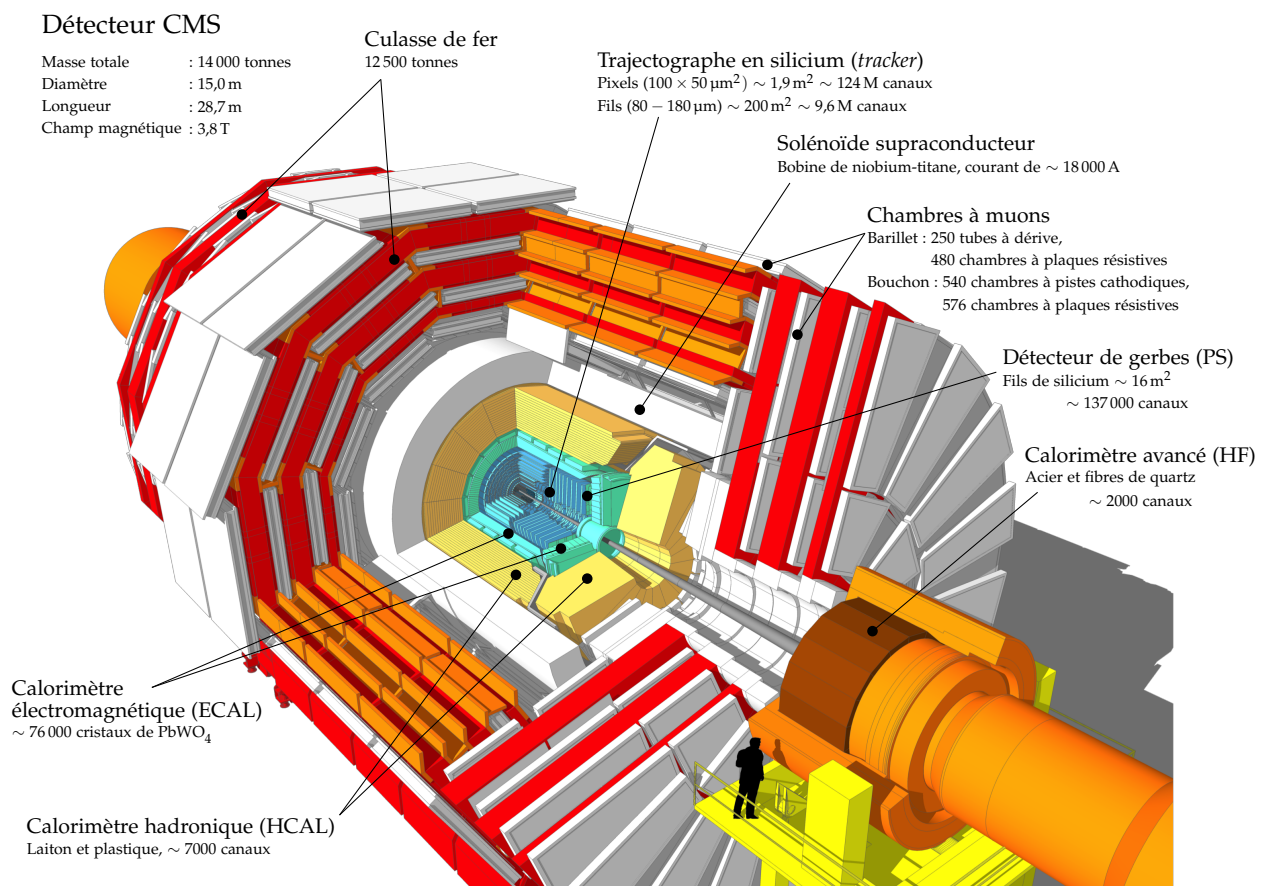


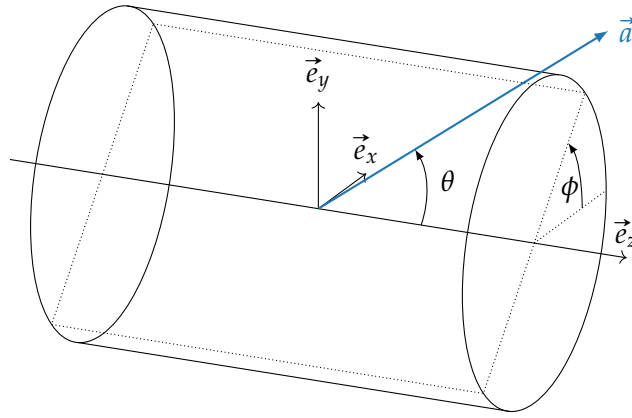
Figure X.3 – Vue éclatée du détecteur CMS [27].

### 4.2 Le solénoïde

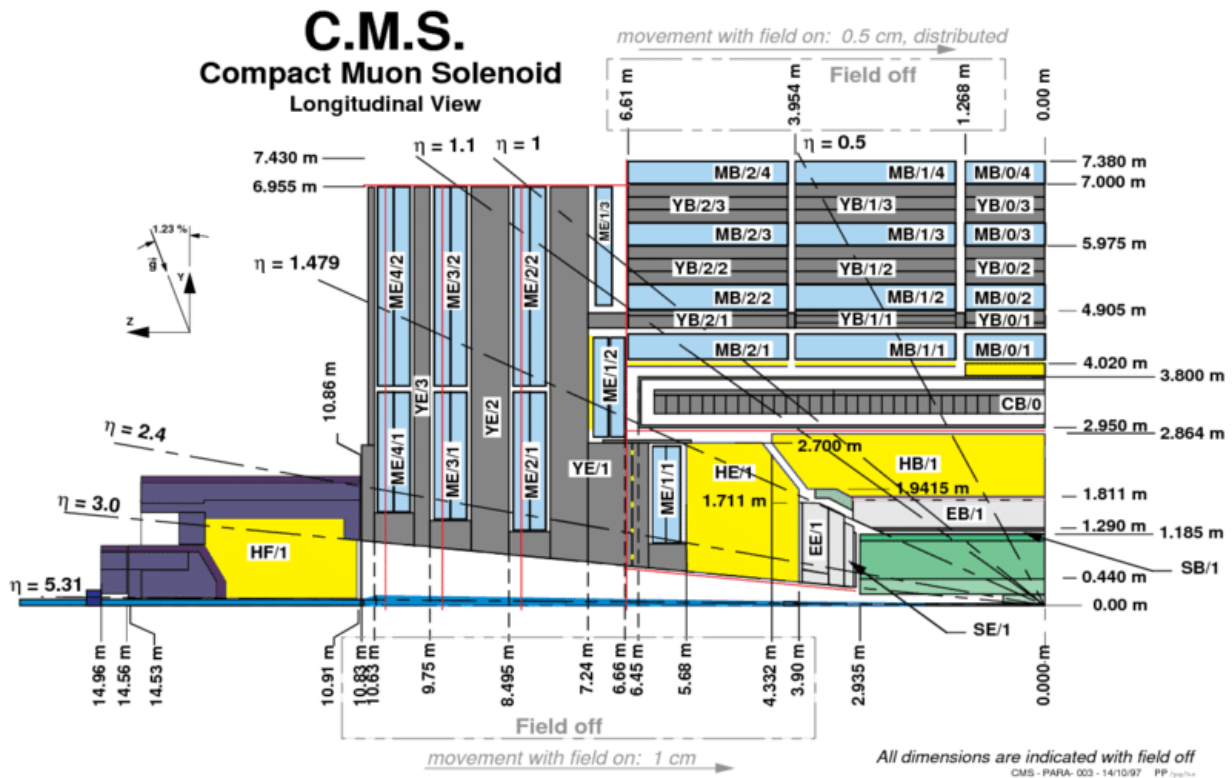
### 4.3 Le trajectographe ou *tracker*

### 4.4 Le calorimètre électromagnétique ou ECAL





**Figure X.4** – 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  $\phi$ , défini dans le plan  $(y, z)$  à partir de l'axe  $x$ . L'angle entre la direction  $\vec{a}$  et  $\vec{e}_z$  est  $\theta$ .



**Figure X.5** – Vue longitudinale d'un quadrant du détecteur CMS [28]. Les directions correspondant à quelques valeurs de pseudo-rapacité 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.

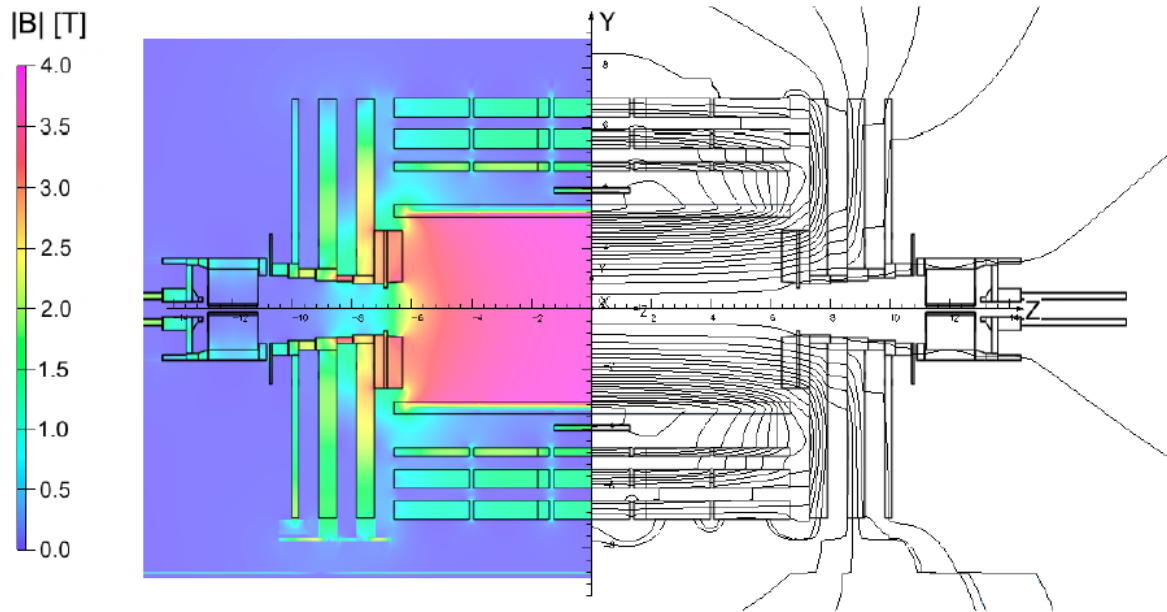
#### 4.5 Le calorimètre hadronique ou HCAL

#### 4.6 Les chambres à muons

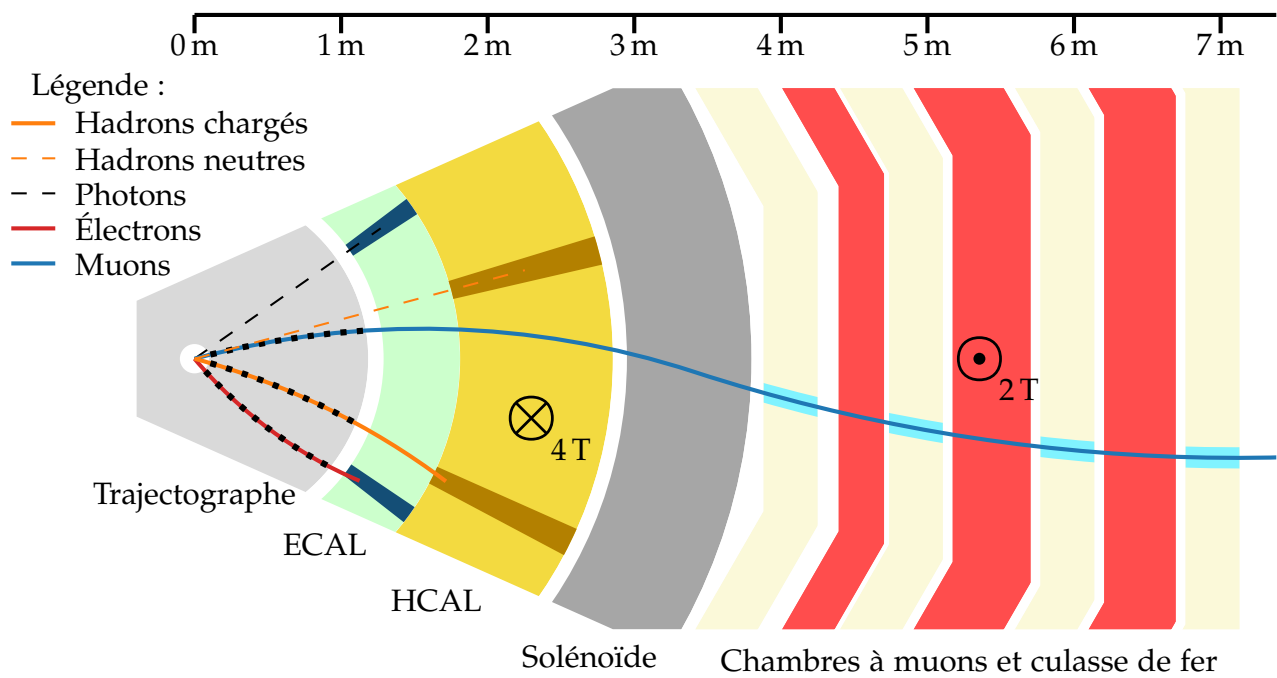
#### 4.7 Prise de données à CMS

### 5 Événements simulés

#### 5.1 Génération d'événements



**Figure X.6** – 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 [29]. Entre deux lignes de champ, l'écart est de 6 Wb.



**Figure X.7** – Coupe transverse schématique du détecteur CMS et signaux caractéristiques laissés par les particules.

## 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

## 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] 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 B* **716.1** (2012), p. 1-29. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037026931200857X>.
- [6] The CMS Collaboration. « Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC ». *Physics Letters B* **716.1** (2012), p. 30-61. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312008581>.
- [7] 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).
- [8] 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>.
- [9] 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).
- [10] Site internet du CERN. URL : <https://home.cern/>.
- [11] G. ARNISON & coll. « Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at  $\sqrt{s} = 540$  GeV ». *Physics Letters B* **122.1** (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>.
- [12] 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 B* **122.5** (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>.
- [13] G. ARNISON & coll. « Further evidence for charged intermediate vector bosons at the SPS collider ». *Physics Letters B* **129.3** (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>.



- [14] G. ARNISON & coll. « Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around  $95\text{ GeV}\cdot\text{c}^{-2}$  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>.
- [15] 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>.
- [16] CERN. *The first touchscreen used at CERN*. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=tQe5dlzScwU>.
- [17] CERN. *The World Wide Web Project*. 1989. URL : <http://info.cern.ch/hypertext/WWW/TheProject.html>.
- [18] 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>.
- [19] 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>.
- [20] 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>.
- [21] A. MICHELINI. « OPAL Detector Performance ». *Philosophical Transactions : Physical Sciences and Engineering* **336.1642** (1991), p. 237-246. URL : <http://www.jstor.org/stable/53786>.
- [22] CERN. *MapCERN*. URL : <https://maps.web.cern.ch/>.
- [23] 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>.
- [24] 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>.
- [25] 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>.
- [26] 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>.
- [27] 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>.
- [28] 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>.
- [29] 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>.

