

Simulation Monte Carlo par le Programme Geant4 de Prototypes de Modules 2S du Trajectographe de l'Upgrade de l'Experience CMS du LHC

M. Matthieu DUFLOT

Travail de fin d'études

Effectué au sein de l'entreprise :
Inter-University Institute for High Energies
Boulevard du Triomphe, 2
1050 Bruxelles

Présenté en vue de l'obtention du grade
de Master en Sciences de l'Ingénieur Industriel
orientation Physiques Nucléaire et Médicale

ISIB-MPN-TFE-03/2020-21

Classification: Tout public

iihe
BRUXELLES BRUSSEL

ULB UNIVERSITÉ
LIBRE
DE BRUXELLES

VUB VRIJE
UNIVERSITEIT
BRUSSEL

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la rédaction de ce mémoire, et qui m'ont permis de réaliser un stage très intéressant et formateur.

Mon promoteur, Prof. Pascal VANLAER ainsi que mon promoteur académique, Drs. Ir. Jonathan DERRIEN, pour leur support technique et scientifique permanent.

Mon responsable de stage, Dr. Ir. Yannick ALLARD, pour ses nombreux conseils et sa bienveillance, qui m'ont beaucoup appris.

Enfin, l'ensemble de mes proches, pour m'avoir soutenu toutes ces années, et plus particulièrement lors de la réalisation de ce mémoire, et mes collègues de l'ISIB pour leurs conseils.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de la Haute École pour m'avoir permis d'atteindre mes objectifs.

Dans le cadre de la mise à niveau du principal collisionneur du Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (le Large Hadron Collider) en vue d'une phase de haute luminosité, un certain nombre de modifications doivent être apportées à l'ensemble de détecteurs qui compose l'expérience CMS (Compact Muon Solénoïde).

Au sein du trajectographe, responsable de la reconstruction de la trajectoire des particules émises lors des collisions entre paquets de protons à 13 TeV, des milliers de détecteurs à pistes en silicium doivent être remplacés.

Afin de profiter pleinement de l'augmentation de luminosité, ces détecteurs (appelés modules 2S) doivent être capables de détecter les particules dont la quantité de mouvement transversale (p_T) est supérieure à un certain seuil, afin d'en informer le Trigger de niveau 1, chargé de décider de la sauvegarde ou non des données complètes.

En cours de développement depuis plusieurs années, des prototypes miniatures de ces nouveaux modules ont été testés en faisceau dans différents centres à travers le monde afin de valider le concept de discrimination en p_T [1]. L'étape suivante consiste à réaliser des tests similaires sur des modules de taille réelle, en présence d'un champ magnétique d'intensité similaire à celui présent dans CMS.

L'objectif de ce mémoire est de développer un modèle Monte-Carlo via le logiciel Geant4 afin d'anticiper ces tests. À cette fin, les données issues des tests en faisceau effectués sur les prototypes miniatures, en l'absence de champ magnétique, sont utilisées pour valider le modèle.

Un modèle simplifié de partage de charges entre les pistes des capteurs permet de reproduire les principales caractéristiques observées lors des tests faisceau.

La simulation du fonctionnement du module de taille réelle en présence d'un champ magnétique permet d'anticiper les principales différences attendues lors des prochains tests en faisceau. Malgré le fait que la dérive des charges au sein du semi-conducteur sous l'effet combiné des champs électrique et magnétique ne soit pas simulée, les résultats issus des simulations prédisent un fonctionnement correct de la logique de discrimination des particules selon leur p_T .

Le modèle prédit une efficacité de plateau supérieure à 99%, ainsi qu'une meilleure résolution en p_T que celle observée pour les prototypes miniatures.

Lors des tests en faisceau en présence du champ magnétique, une attention toute particulière doit être portée à la dérive des charges, ainsi qu'aux effets de la présence du champ sur l'électronique et les parties mécaniques, non simulées dans le présent modèle.

As part of the upgrade of CERN's main collider, the Large Hadron Collider (LHC), to a high-luminosity phase, a number of changes have been made to the set of detectors that make up the CMS experiment (Compact Muon Solenoid).

In the tracker, responsible for identifying the trajectory of particles emitted during collisions between protons at 13 TeV, thousands of silicon track detectors must be replaced.

In order to take full advantage of the increase in luminosity, these detectors (called 2S modules) must be able to detect particles whose transverse momentum (p_T) is greater than a certain threshold, in order to inform the trigger, which is responsible for deciding whether or not to save the complete data.

Under development for several years, miniature prototypes of these new modules have been tested in various centers around the world in order to validate the concept of p_T discrimination. The next step is to perform similar tests on full-size modules, and in the presence of a magnetic field of similar intensity to the one present in CMS.

The objective of this thesis is to develop a Monte-Carlo model via the Geant4 software in order to anticipate these tests. To this end, data from beam tests performed on miniature prototypes, and in the absence of a magnetic field, are used to validate the model.

A simplified model of charge sharing between the module tracks allows to reproduce the main characteristics observed during the beam tests.

The simulation of the operation of the full size module in the presence of a magnetic field allows to anticipate the main differences expected during the next beam tests. Although the charge drift within the semiconductor under the combined effect of the electric and magnetic fields is not simulated, the results from the simulations predict a correct operation of the particle discrimination logic according to their p_T .

Although many simplifying assumptions are used, the model predicts a plateau efficiency higher than 99%, and a better resolution in p_T than the miniature prototypes.

During beam testing in the presence of the magnetic field, special attention must be paid to charge drift, as well as to the effects of the presence of the field on the electronics and mechanical parts, not simulated in the present model.

Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des Figures	viii
Liste des Tableaux	ix
Liste des Abréviations	xi
Nomenclature	xii
Objectif du Mémoire	1
I Contexte	3
1 Le LHC et l'expérience CMS	4
1.1 Introduction	4
1.2 Le CERN	5
1.3 Le Détecteur CMS	8
1.4 Le <i>Tracker</i> de CMS	10
1.5 Les Modules 2S	15
1.6 Résumé	19
2 Théorie des Détecteurs au Silicium	20
2.1 Introduction	20
2.2 Les Semi-conducteurs	21
2.3 Les Semi-conducteurs comme Détecteurs	23
2.4 Les Détecteurs à Pistes	26
2.5 Spécifications des Capteurs pour les Modules 2S	30
2.6 Résumé	31
3 Description du Stage	32
3.1 Introduction	32
3.2 Description du Lieu de Stage	32
3.3 Tâches Réalisées lors du Stage	33
3.4 Conclusion sur le Stage	48
II Plan de Recherche	49
4 Problématique	51

4.1	Description de la Problématique	51
4.2	État de l'Art	52
5	Méthodologie	57
5.1	Approche du Problème	57
5.2	Validation de la Simulation	58
5.3	Anticipation des Tests à Venir	58
6	Logiciel de Simulation Monte-Carlo	60
6.1	Choix du Logiciel Utilisé	60
6.2	Hypothèses de Départ	61
6.3	Paramètres Utilisés	62
6.4	Biais et Limitations	70
7	Logiciel d'Analyse	71
7.1	Choix du Logiciel	71
7.2	Méthode d'analyse	72
III	Résultats et Analyse	75
8	Validation du Modèle	77
8.1	Variation du Seuil du Comparateur	78
8.2	Rotation du Module	82
8.3	Discussion des Résultats	87
9	Grand Module et Champ Magnétique	88
9.1	Puces CBC3	88
9.2	Influence du Champ Magnétique	89
9.3	Variation du Seuil du Comparateur	90
9.4	Rotation du Module	93
9.5	Discussion des Résultats	97
	Conclusion	98
	Bibliographie	100
	Index Terminologique	103
	Annexes	106
A	Stage - Figures Complémentaires	107
A.1	Protection contre les ESD	107
A.2	Code <i>Python</i> de mesure de diamètre	109
B	Codes <i>Root</i> Reproduisant la Logique CBC	112
B.1	Code pour la version 2	112
B.2	Code pour la version 3	115
C	Résultats Complémentaires	120
C.1	Influence des paramètres de distance et de fenêtre de corrélation	120

1.1	Le complexe accélérateur du CERN	6
1.2	Coupe transversale détaillée de l'ensemble CMS.	9
1.3	Repère de coordonnées de CMS	11
1.4	Vue en coupe du futur trajectographe de CMS	12
1.5	Principe de fonctionnement des modules p_T	13
1.6	Principe de fonctionnement du trigger.	14
1.7	Vue détaillée d'un module 2S	16
2.1	Niveaux d'énergie dans les matériaux	21
2.2	Jonction p-n	22
2.3	Distribution de perte d'énergie dans du silicium	24
2.4	Principe de fonctionnement d'un détecteur au silicium	24
2.5	Résistance en poly-silicium pour le couplage AC des strips	27
2.6	Mise en évidence de l'angle de Lorentz	29
3.1	Gabarit de micro-soudure	35
3.2	Circuit de mesure de résistance	37
3.3	Montage expérimental pour la mesure de résistance haute tension	38
3.4	Résistances mesurées pour les différentes ventouses	39
3.5	Outil de découpe de l'adhésif	41
3.6	Visualisation des grains au microscope numérique	43
3.7	Lame de comptage	43
3.8	Observations au microscope optique	44
3.9	Preuve de concept de la centrifugeuse	45
3.10	Composants électroniques de la centrifugeuse	46
3.11	Vue d'ensemble de la centrifugeuse	47
4.1	Installation pour les tests faisceau	54
4.2	Efficacité de détection des stubs	55
6.1	Comparaison de quatre options différentes pour la physique EM.	64
6.2	Visualisation de la géométrie avec <i>Geant4</i>	65
7.1	Courbe en S d'une piste du mini-module non irradié	73
8.1	Évolution du nombre moyen de hits en fonction du seuil	79
8.2	Erreur relative pour le nombre moyen de hits	79
8.3	Évolution du nombre moyen de clusters en fonction du seuil	80
8.4	Erreur relative pour le nombre moyen de clusters	80

8.5	Modification de l'épaisseur active (zone de déplétion)	81
8.6	Modification de l'énergie moyenne de création de paire	82
8.7	Partage de charges et angle d'incidence	83
8.8	Évolution de la largeur moyenne des clusters	85
8.9	Fraction des clusters de différentes multiplicités	85
8.10	Efficacité de détection des stubs (mini-module)	86
8.11	Erreur relative : efficacité de détection des stubs	86
9.1	Différence entre puces CBC2 et CBC3	89
9.2	Influence du champ B sur les électrons δ	90
9.3	Évolution du nombre moyen de hits en fonction du seuil (grand module)	92
9.4	Évolution du nombre moyen de clusters en fonction du seuil (grand module)	92
9.5	Évolution de la largeur moyenne des clusters (grand module)	94
9.6	Fraction des clusters de différentes multiplicités (grand module)	94
9.7	Comparaison d'efficacité de détection des stubs	96
9.8	Variations de la fenêtre de coïncidence pour le grand module	96
A.1	Photos de l'outil de découpe de l'adhésif	107
A.2	Évolution de la résistance du jig complet	108
C.1	Influence de la fenêtre de corrélation	120
C.2	Influence de la distance entre les capteurs	121

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Caractéristiques des modules 2S	31
3.1	Sélection d'adhésifs anti-statiques	36
4.1	Valeurs issues des tests en faisceau	56
6.1	Options concernant les processus électromagnétiques	63
6.2	Paramètres utilisés pour la simulation des modules	66
8.1	Paramètres issus des régressions pour les mini-modules	84
9.1	Nombre moyen de hits en fonction du champ B	91
9.2	Nombre moyen de clusters en fonction du champ B	91
9.3	Paramètres de régression : grand module et champ magnétique	95

2S	2-Strip. 12, 15, 18, 30, 40, 44, 48, 52, 53, 56–58
AC	Alternating Current. 27, 30, 31
ALICE	A Large Ion Collider Experiment. 6
ASIC	Application Specific Integrated Circuit. 17
ATLAS	A Toroidal LHC Apparatus. 1, 5, 6, 29, 30, 63
CBC	CMS Binary Chip. 14, 17, 18, 52, 54, 58, 59, 71, 73, 74, 78, 88, 89, 95, 97–99
CERN	Centre Européen pour la Recherche Nucléaire. iii, 1, 4, 5, 7, 30, 31, 33, 51, 53, 61, 84, 98
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer. 17
CIC	Concentrator Integrated Circuit. 17
CMS	Compact Muon Solenoïde. iii, iv, 1, 2, 5, 6, 8, 10–15, 17–20, 25, 30–34, 43, 50–54, 61, 63, 71, 89, 95, 98, 99
DC	Direct Current. 27, 45
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron. 53
EM	Electromagnétique. 63, 64, 67
ESD	Electrostatic Discharge. 34
FNAL	Fermi National Accelerator Laboratory. 53
FNRS	Fond National de la Recherche Scientifique. 32
FWO	Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek. 32
HE	Haute Énergie. 63
HL-LHC	High Luminosity LHC. 7, 10, 13, 14, 19, 30, 31, 51, 53
HLT	High Level Trigger. 14
IIHE	Inter-University Institute for High Energies. 32, 33, 44, 99
LCD	Liquid Crystal Display. 42, 45
LED	Light-Emitting Diode. 45
LHC	Large Hadron Collider. iii, iv, 1, 2, 5–8, 10, 12, 13, 33, 51, 89, 98, 99
LHCb	LHC beauty. 6
MC	Monte-Carlo. 52, 57, 59, 60
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor. 27, 28, 30
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor. 27

MPV	Most Probable Value. 78, 90, 93
P-S	Pixel-Strip. 12, 15
PL	Physics List. 62–64
PLA	Poly-Lactic Acid. 40
ppm	partie par million. 15
PRM	Physics Reference Manual. 62
PS	Proton Synchrotron. 6
PSB	Proton Synchrotron Booster. 6
PSoC	Programmable System-on-Chip. 45
R&D	Recherche et Développement. 63
RI	Rayonnements Ionisants. 31, 52, 53, 60, 77, 81, 82
SNR	Signal to Noise Ratio. 29, 30
SPS	Super Proton Synchrotron. 6
TDR	Technical Design Report. 10
ULB	Université Libre de Bruxelles. 32, 33
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 5
VUB	Vrije Universiteit Brussel. 32, 33

cluster	Un <i>cluster</i> représente un groupe de strips adjacentes dont le signal dépasse le seuil lors d'un événement. 13, 17–19, 52, 54, 58, 59, 70, 72, 73, 77, 78, 80–83, 85, 87, 88, 90–95, 97–99
fluence	La <i>fluence</i> correspond au nombre de particules ionisantes ayant traversé un volume élémentaire. Elle s'exprime en nombre de particules par mètre carré. 30
hit	Un <i>hit</i> apparaît lorsque le signal d'une strip dépasse le seuil de rejet (dans le cas binaire). 13, 18, 70, 73, 77–79, 81, 83, 87–92, 97–99
jig	Un <i>jig</i> (ou gabarit en français) est un objet soutenant une pièce, et guidant l'utilisation d'outils sur cette pièce. 34, 36–40
ladder	Une <i>ladder</i> (ou échelle en français) correspond à une structure porteuse permettant de fixer des modules dans une géométrie particulière au sein du trajectographe de CMS. 15
pad	Un <i>pad</i> correspond à une zone de contact entre le gabarit (ou <i>jig</i>) et le capteur qu'il supporte. 34, 36, 40
pitch	Le <i>pitch</i> (ou pas en français) correspond à la distance séparant une strip de la suivante. 15
strip	Une <i>strip</i> est une piste de lecture d'un détecteur au silicium. 12, 19, 34, 52, 54
stub	Une <i>stub</i> est un segment de trajectoire d'une particule identifié par corrélation de deux <i>clusters</i> , un sur chaque capteur en silicium d'un module. 13, 14, 18, 19, 54, 55, 58, 59, 70, 73, 82, 84, 86–88, 95, 96
trigger	Un <i>trigger</i> (ou déclencheur en français) est un mécanisme permettant la mise en route d'un processus sur base de la détection d'un événement particulier. 4, 7, 10, 11, 13, 14, 17–19, 52

Le 4 juillet 2012, les collaborations ATLAS et CMS, deux expériences situées le long du plus grand accélérateur de particules au monde, annonçaient conjointement la découverte d'une nouvelle particule, le boson de Higgs.

Depuis lors, les équipes internationales impliquées dans ces expériences de physique des particules n'ont eu de cesse d'améliorer leurs outils théoriques et expérimentaux, dans le but de répondre à certaines des questions les plus complexes de la science actuelle.

Dans le but d'augmenter son potentiel de découverte, des améliorations importantes vont être apportées au niveau de l'accélérateur, afin d'augmenter sa luminosité et son énergie.

Cette augmentation de luminosité se traduira par un taux de collisions entre paquets de protons plus élevé, impliquant une quantité de données et une irradiation des composants plus importante.

Afin de profiter pleinement de ces nouvelles capacités, des modifications sont prévues sur les détecteurs de l'expérience CMS (Compact Muon Solénoïde), notamment le remplacement de sa partie interne, le trajectographe. Ce dernier est composé de plusieurs milliers de détecteurs au silicium double couches. Son rôle, comme son nom l'indique, est de déterminer la trajectoire des particules chargées issues des collisions entre paquets de protons. À cette fin, il est constitué de plusieurs milliers de détecteurs composés de deux capteurs au silicium recouverts de pistes parallèles. Cette stratégie permet de déterminer le point de passage d'une particule, via l'énergie qu'elle dépose en traversant la fine couche de silicium de chaque capteur (quelques centaines de micromètres). Parmi les différents types de détecteurs situés dans le trajectographe, les modules 2S (pour *dual-strip* ou double piste en français) sont composés de deux capteurs à pistes parallèles, séparés de quelques millimètres.

Du fait de la présence d'un champ magnétique puissant, les particules chargées suivent des trajectoires en hélice, dont le rayon varie selon leur moment cinétique transverse. Les deux capteurs des modules 2S permettent de déterminer localement l'angle d'inclinaison de la trajectoire de chaque particule, et donc d'estimer son moment cinétique transverse.

Cette mesure permet de sélectionner les événements intéressants parmi la quantité phénoménale de données produites chaque seconde au centre de l'expérience. Sans cette discrimination des particules selon leur moment cinétique transverse, les améliorations apportées au niveau du LHC ne sont d'aucun intérêt pour CMS.

En développement depuis plusieurs années, des prototypes miniatures de modules 2S ont été récemment testés en faisceau dans trois laboratoires à travers le monde, et notamment au Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) [1]. Bien qu'ayant présenté des résultats très encourageants, de nouveaux tests en faisceau sont prévus sur des modules

de taille réelle, et en présence d'un champ magnétique, afin de confirmer la capacité des modules à fonctionner dans un environnement similaire à celui régnant au sein de CMS.

L'objectif de ce mémoire est de développer un modèle Monte-Carlo à l'aide du logiciel Geant4, afin de simuler ces tests en faisceau, et de permettre d'anticiper un certain nombre de phénomènes qui pourraient être observés lors des tests sur un module de taille réelle en présence d'un champ magnétique. L'avantage de disposer d'un tel modèle, est de pouvoir rapidement, et à faible coût, réaliser des simulations dans plusieurs configurations, et ainsi permettre des recommandations en vue des tests réels effectués sous contrainte.

Afin de pouvoir donner des résultats fiables, tout modèle doit idéalement être validé par comparaison avec des données expérimentales. Dans ce but, les données issues de l'article de W. ADAM *et al.* de 2020 [1] sont utilisées. La première étape de ce mémoire consiste à reproduire les tests en faisceau décrits dans cet article, et à confronter les prédictions du modèle aux résultats expérimentaux.

Dans un second temps, le modèle validé est utilisé pour simuler un module de taille réelle plongé dans un champ magnétique puissant. Des tests similaires sont alors effectués avec cette géométrie, et les résultats sont discutés et comparés à ceux des modules miniatures, afin de caractériser l'efficacité des modules de taille réelle.

Le mémoire est divisé en trois parties, décrivant respectivement le contexte, le plan de recherche et les résultats.

Dans la première partie, le Large Hadron Collider et l'expérience CMS sont décrits, ainsi que les modules 2S et leurs différents composants. La théorie des détecteurs au silicium, à la base de la fabrication des modules, est exposée, en insistant sur les points nécessaires à la mise en place d'un modèle pertinent. Cette première partie se clôture par une description des activités réalisées lors du stage, liées à la fabrication des modules 2S.

La deuxième partie du mémoire présente en détail la problématique, la méthodologie choisie, et les différents logiciels utilisés pour les simulations et l'analyse des résultats. Les hypothèses faites pour la simplification du modèle, ainsi que la stratégie d'analyse des données sont également décrites.

Enfin, la troisième partie présente les résultats des différentes simulations, ainsi que l'analyse de ces dernières, en veillant à toujours garder en ligne de mire l'objectif du mémoire : développer un modèle pertinent, permettant d'anticiper les tests en faisceau sur des modules 2S en présence d'un champ magnétique.

Première partie

Contexte

Contenu

1.1	Introduction	4
1.2	Le CERN	5
1.2.1	Le Grand Collisionneur de Hadrons	5
1.2.2	Le LHC Haute Luminosité	7
1.3	Le Détecteur CMS	8
1.3.1	La phase 2 de l'upgrade de CMS	8
1.4	Le <i>Tracker</i> de CMS	10
1.4.1	Le <i>Trigger</i> L1	14
1.5	Les Modules 2S	15
1.5.1	Les capteurs silicium	15
1.5.2	Séparateurs en Al-CF	15
1.5.3	Hybride <i>front-end</i>	17
1.5.4	Hybride de service	17
1.5.5	Connecteurs	17
1.5.6	Les puces CBC	17
1.6	Résumé	19

1.1 Introduction

Ce premier chapitre vise à présenter le cadre global dans lequel ce mémoire prend place. En partant du plus général (le centre du CERN) et en allant vers le détail (les différents composants du détecteur étudié), il doit permettre une bonne appréciation des termes et des concepts qui sont indispensables à la compréhension de la suite du travail.

Il va sans dire qu'il n'est pas indispensable au lecteur initié de lire l'entièreté de ce chapitre. Cependant, la description des composants du détecteur, le fonctionnement du trigger, et de manière générale, la mise en place du jargon technique sont indispensables à la bonne compréhension.

Pour ce travail, le choix a été fait de ne pas traduire certains termes techniques propres aux composants et à leur fonctionnement, et ce, afin de permettre au lecteur de se référer aux sources citées sans devoir traduire les termes. Bien évidemment, les termes sont expliqués, et parfois même traduits, lors de leur première apparition. Le lecteur peut se référer à la nomenclature générale page xii à tout moment.

1.2 Le CERN

L'organisation européenne pour la recherche nucléaire[36], historiquement le Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN), est une organisation fondée après la Seconde Guerre mondiale (1949) dans le but de mettre en commun les ressources de différents pays, face au coût toujours grandissant de la recherche nucléaire¹. Pensé initialement en France, en Italie et au Danemark, l'organisation est officiellement fondée lors d'une conférence de l'UNESCO à Paris en décembre 1951. Rapidement rejoint par 11 pays, le CERN compte aujourd'hui 23 membres, dont la majorité sont des pays européens.

De nombreux autres pays sont membres observateurs, et le CERN ne limite pas l'accès de ses installations aux pays membre permanents. D'après l'organisation, ses missions sont les suivantes :

- « *mettre à disposition un complexe unique d'accélérateurs de particules permettant de mener des recherches à la pointe de la connaissance ;*
- *mener des recherches de calibre mondial en physique fondamentale ;*
- *rassembler des personnes du monde entier dans le but de repousser les limites de la science et de la technologie, dans l'intérêt de tous. » [36]*

Le CERN est fortement engagé sur le thème de l'éducation, et ouvre ses portes à de nombreux étudiants et doctorants du monde entier.

Les principales installations de l'organisation se situent le long de la frontière Franco-Suisse, et comprennent un ensemble d'accélérateurs, dont le plus grand collisionneur circulaire au monde, le Large Hadron Collider (LHC), en français le Grand Collisionneur de Hadrons.

Cet ensemble d'accélérateurs (8 circulaires et 2 linéaires) permet la production de données scientifiques utiles à la recherche, dans les domaines de la physique fondamentale et de la cosmologie entre autres. La découverte récente la plus connue est bien évidemment celle du Boson de Higgs, annoncée le 4 juillet 2012 par les collaborations ATLAS et CMS (deux ensembles de détecteurs situés sur le LHC). Le CERN a également grandement contribué à l'émergence du *web* (*toile d'araignée*, analogie représentant le lien que permet de tisser internet entre ses utilisateurs).

1.2.1 Le Grand Collisionneur de Hadrons

Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) est un accélérateur circulaire de grand diamètre (le plus grand du monde avec ses 27 km de circonférence), dernière étape d'accélération pour les particules avant leur collision.

Afin de guider et d'accélérer les différentes particules (principalement des protons), le LHC dispose de plusieurs centaines d'aimants supra-conducteurs refroidis à l'hélium superfluide (2 Kelvin). Depuis son démarrage le 10 septembre 2008, il permet aux physiciens de réaliser des collisions entre particules à des vitesses approchant celle de la lumière, et ce dans quatre grands détecteurs et quelques autres expériences plus petites, situés le long de sa circonférence.

Afin de permettre ces collisions, les particules sont accélérées dans des directions opposées dans deux tubes adjacents dans lesquels règne un vide poussé (ultra-vide). Au niveau de chacun des quatre détecteurs, les faisceaux sont focalisés et croisés, ce qui permet d'observer les collisions par l'intermédiaire des particules qu'elles produisent.

Cependant, le LHC ne peut pas accélérer des particules à vitesse initiale faible, d'où la nécessité d'une chaîne d'accélération composée de plusieurs étages successifs².

1. Il faut comprendre ici le nucléaire au sens large, principalement la recherche fondamentale.

2. Cela permet également de faire usage des précédents accélérateurs plus petits, et d'augmenter le nombre de particules et leur énergie.

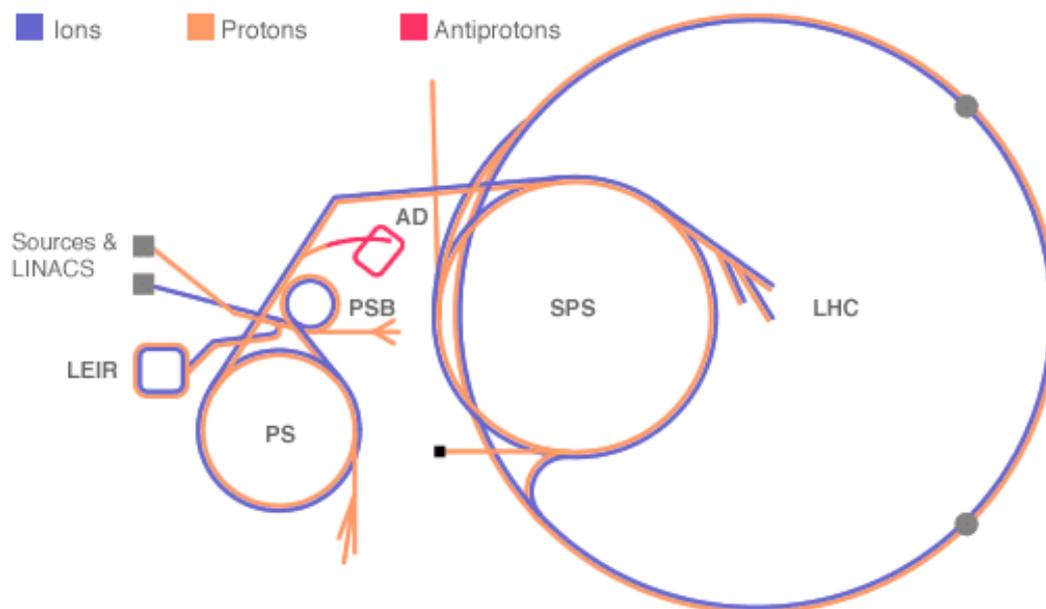


FIGURE 1.1 – Schéma représentant les différents accélérateurs présents au CERN [19].

La chaîne d'accélération du LHC, dans le cas des protons, est la suivante (voir Fig. 1.1) : après avoir créé les protons à l'aide d'une source, à partir d'un gaz d'hydrogène, ces derniers passent dans un premier accélérateur linéaire, le Linac2 pour atteindre une énergie de 50 MeV environ. Les protons sont alors envoyés dans le Booster du Synchrotron (Proton Synchrotron Booster (PSB)) qui les amène à une énergie de 1.4 GeV. Ils sont alors introduits dans le Synchrotron à Protons (Proton Synchrotron (PS)) où ils subissent une nouvelle accélération jusqu'à 25 GeV. La dernière accélération avant l'introduction dans le LHC, est effectuée dans le Super Synchrotron à Protons (Super Proton Synchrotron (SPS)), qui permet d'augmenter l'énergie des protons jusqu'à 450 GeV.

Le LHC en lui-même est capable d'accélérer les protons jusqu'à une énergie de 6.5 TeV, équivalent à une énergie totale lors des collisions de 13 TeV. Cette débauche d'énergie produit des gerbes de particules, qui peuvent renseigner sur les processus à l'œuvre au niveau sub-atomique.

Afin d'analyser les collisions, quatre détecteurs ont été construits le long de la circonférence : deux détecteurs multifonctionnels, ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) et CMS (Compact Muon Solénoïde), dont les objectifs de découverte sont identiques, mais qui mettent en œuvre des technologies différentes. À la manière d'un oignon, ils sont constitués de plusieurs couches, chacune spécialisée dans la détection d'un type de particule, ou d'une propriété particulière (charge, masse, énergie, position, etc.). Bien que très similaires dans leurs objectifs, les deux équipes en charge de ces expériences ont opté pour des stratégies différentes concernant certains choix technologiques (notamment l'aimant principal). Le troisième détecteur, ALICE (A Large Ion Collider Experiment), est spécialisé dans l'étude de la physique des ions lourds, et procède à l'analyse de collisions d'ions de plombs, quand le LHC n'est pas utilisé pour accélérer des protons. La dernière expérience, LHCb (LHC beauty), effectue des expériences sur la physique de l'antimatière à l'aide de l'étude des quarks beauté. Contrairement aux trois autres expériences, LHCb est un ensemble de détecteurs ouvert, et situé au plus près de la ligne de conduite de l'accélérateur, et ce, afin de détecter des particules à très faible angle d'émission.

1.2.2 Le LHC Haute Luminosité

Le LHC Haute Luminosité, ou HL-LHC pour High Luminosity LHC, est un projet visant à améliorer les performances du collisionneur. Débuté en 2011, il doit être mis en opération en 2027 au plus tôt.

Dans le domaine des collisionneurs, on considère deux grandeurs d'intérêt, qui représentent le potentiel de découverte [22] : l'énergie dans le centre de masse³ E_{cm} , et la luminosité L . Le rôle d'un collisionneur est, comme son nom l'indique, de produire des collisions de particules. Le fait de guider deux faisceaux en sens opposés l'un contre l'autre augmente considérablement l'énergie disponible, contrairement au bombardement d'une cible fixe. Dans le cas du LHC, l'énergie des faisceaux de protons est de 6.5 TeV, ce qui conduit à une énergie totale de collision de $E_{cm} = 13$ TeV.

La luminosité, quant à elle, lie le nombre d'événements par unité de temps (dN/dt) et par unité de section efficace (σ), par la formule suivante :

$$L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt} \quad [\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

Plus la luminosité est élevée, plus la probabilité d'observer un événement de section efficace donnée est importante. Or, les interactions étudiées actuellement en physique des particules sont justement associées à des sections efficaces extrêmement faibles.

L'objectif de l'amélioration du LHC est donc d'augmenter de manière non-négligeable sa luminosité, afin d'accroître son potentiel de découverte.

Une autre notion souvent rencontrée est celle de luminosité intégrée, qui correspond simplement à l'intégrale temporelle de la luminosité instantanée, et donc à la quantité totale d'événements détectés sur la période considérée (toujours en fonction de la section efficace considérée). La luminosité intégrée est représentative de la quantité de données que génère un accélérateur de particules.

Dans le cas du HL-LHC, l'objectif est de multiplier la luminosité par un facteur compris entre 5 et 10 [36]. Dans ce cadre, le CERN est épaulé par 13 pays supplémentaires non-membres, dont les États-Unis, le Canada et le Japon.

En pratique, un nouvel accélérateur linéaire (le Linac4) doit venir remplacer le Linac2, et des améliorations doivent être apportées aux différents accélérateurs déjà existants le long de la chaîne. Sur le LHC en particulier, de nouveaux aimants quadrupolaires supraconducteurs vont être ajoutés, ainsi qu'une nouvelle optique faisceaux et divers aimants, visant à améliorer les performances générales. L'énergie dans le centre de masse restera à 14 TeV, mais le nombre de collisions par paquet (intensité du faisceau) va grandement augmenter.

L'objectif est d'atteindre une luminosité instantanée de $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, et une luminosité intégrée sur 10 ans de 3000 fb^{-1} , un barn (b) correspondant à $1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ [13].

Cette augmentation de la luminosité entraîne deux principaux problèmes : une augmentation de la dose déposée dans les détecteurs (jusqu'à 12 MGy de dose totale au centre de CMS [14]), qui implique l'utilisation d'un blindage et le recours à des matériaux et de l'électronique plus résistante, ainsi qu'un débit de données très important, rendant difficile leur extraction et leur analyse. Dans ce cadre, un système ingénieux de réduction de la quantité de données est en cours de développement, afin de sélectionner en temps réel, la part des données à enregistrer (principe du trigger, voir la section 1.4.1).

3. Le référentiel du centre de masse correspond au référentiel dans lequel les deux particules incidentes ont des impulsions égales et opposées.

1.3 Le Détecteur CMS

Comme son nom le laisse présager, le Soleinoïde Compact pour Muons en anglais Compact Muon Solenoïde (CMS), est un détecteur spécialisé dans l'analyse de la trajectoire et de l'énergie des muons émis lors des collisions proton-proton (pp). Cependant, il est également capable d'observer une grande variété d'autres particules, comme les électrons et les hadrons.

Le terme solénoïde renvoie directement à l'utilisation d'un champ magnétique de 3.8 T créé à partir d'un aimant solénoïde supra-conducteur.

À la manière d'un oignon, CMS est constitué de différentes couches, chacune spécialisée dans la réalisation d'une tâche bien précise (voir Fig. 1.2). Les couches les plus profondes sont chargées de déterminer la trajectoire des particules, tandis que les couches externes analysent l'énergie des particules. Une dernière enveloppe, constituée de fer, sert de culasse de retour de flux pour le champ magnétique. Sur les 14 000 tonnes de CMS, 12 500 sont utilisées pour l'aimant et la culasse.

De l'intérieur vers l'extérieur, on retrouve les éléments suivants [11] :

- le trajectographe (ou traceur) silicium : il permet comme son nom l'indique, de suivre la trajectoire des particules le traversant. En combinaison avec le champ magnétique et les calorimètres (voir points suivants), il permet de déterminer la charge et la quantité de mouvement des particules. En effet, à charge et masse égale, plus une particule est énergétique, moins sa trajectoire sera courbée par un champ magnétique ;
- le calorimètre électromagnétique : il permet de déterminer précisément l'énergie des électrons et des photons issus des collisions. Ces derniers sont peu pénétrants, et n'atteignent pas les couches les plus externes ;
- le calorimètre à hadrons : il permet de déterminer l'énergie des autres particules (protons, neutrons, etc.), en dehors des muons⁴. Ce calorimètre est plus épais que le premier ;
- la bobine solénoïde de l'aimant supra-conducteur : à l'origine du puissant champ magnétique (3.8 T), elle permet de courber les trajectoires des particules chargées. Le solénoïde est parcouru par un courant de plus de 18 000 ampères. À ce stade, seuls les muons traversent encore aisément les différentes couches ;
- la dernière couche : elle est constituée d'une superposition de culasses de retour de flux magnétique en fer, et de détecteurs spécifiques à l'analyse de la trajectoire des muons. Ces détecteurs sont au nombre de 14 000, et sont de plusieurs sous-types, afin de réduire le bruit de fond en croisant les données issues des différents capteurs.

CMS est relativement imposant, avec une longueur de 21 m, une largeur de 15 m et une hauteur de 15 m [36].

1.3.1 La phase 2 de l'upgrade de CMS

Le projet CMS a réellement débuté en 1993, lorsque ce dernier a été approuvé, et que les études ont pu commencer. Suite à la décision d'améliorer substantiellement les capacités du LHC, l'augmentation de la luminosité va entraîner une augmentation importante de l'irradiation, ainsi que de la quantité de données produites au niveau des expériences.

Dans ce contexte, CMS doit également évoluer, et une certaine partie de ses détecteurs doit être remplacée afin de pouvoir bénéficier pleinement de l'accroissement de luminosité du LHC.

L'augmentation de la quantité et de la fréquence des collisions proton-proton (abrégié pp) va entraîner un flux de particules plus élevé, qui nécessite une mise à niveau des détecteurs

4. Et des particules interagissant très faiblement, comme les neutrinos par exemple.

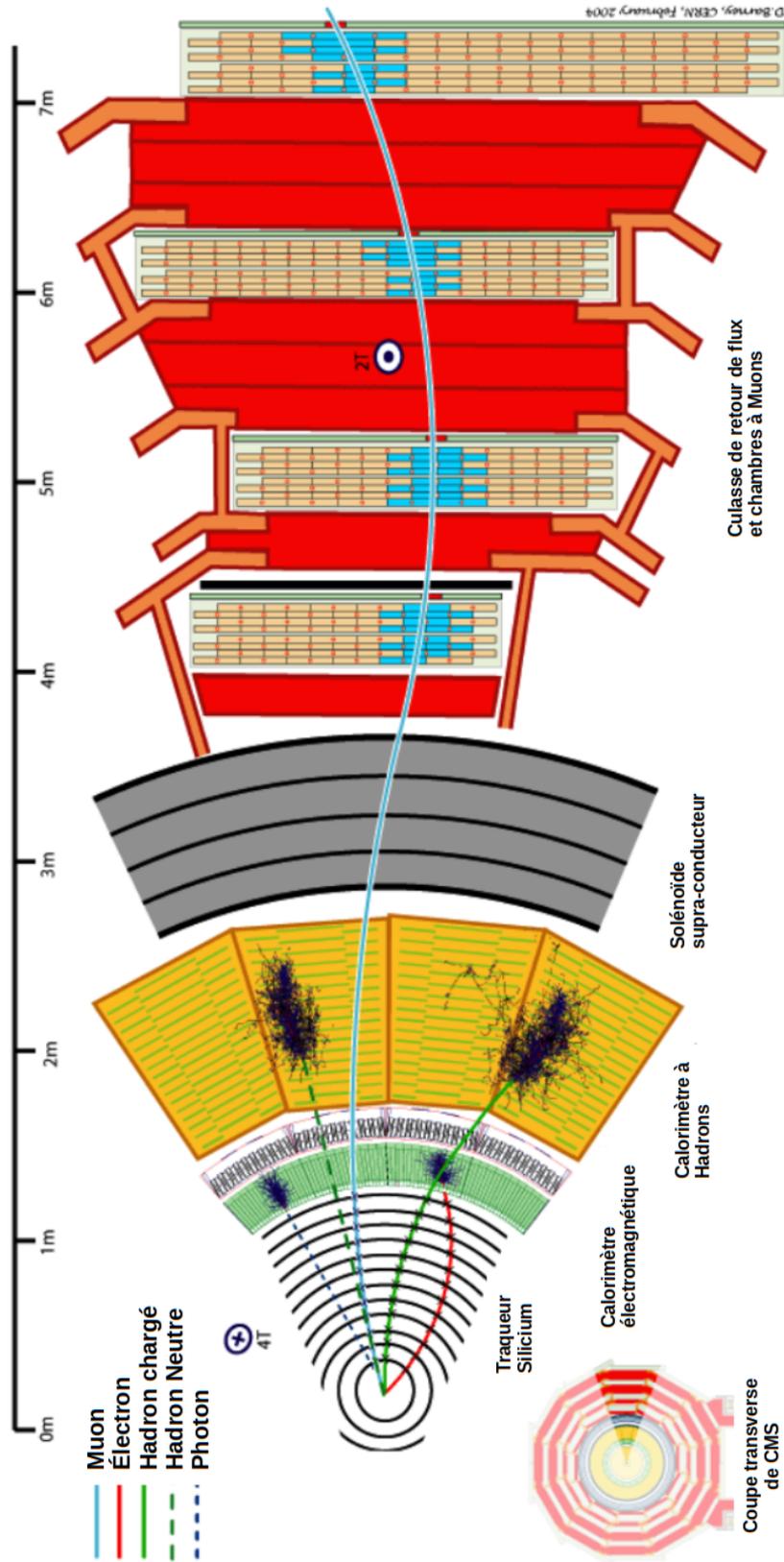


FIGURE 1.2 – Coupe transversale détaillée de l'ensemble CMS. Les collisions pp ont lieu à gauche de l'image. Les particules produites traversent les différentes couches et sont détectées par les instruments. On remarque que les muons sont détectés à l'extérieur du solénoïde, de par leur faible interaction avec la matière [10].

actuels. Il a donc été décidé de remplacer une bonne partie de ces derniers, en visant notamment à améliorer les points suivants [14] :

- augmenter le nombre d'éléments sensibles en diminuant leur taille, afin de pouvoir toujours discerner les particules individuelles, même sous un flux plus élevé ;
- sélectionner des composants et matériaux résistants aux rayonnements, afin de permettre une pleine exploitation de l'expérience pendant toute la durée de la phase HL-LHC ;
- améliorer les capacités de trigger de CMS afin de réduire considérablement la quantité de données à enregistrer et à transmettre pour analyse. En particulier, et comme cela est expliqué en détail dans la section 1.4.1, rendre possible l'utilisation des données issues du trajectographe silicium au niveau du trigger de niveau 1 (trigger L1).

L'ensemble de ces mesures doit permettre de bénéficier pleinement des nouvelles capacités du collisionneur sans sacrifier le potentiel de découverte. De plus, une partie des détecteurs bénéficieront d'améliorations basées sur les retours d'expériences issues de l'exploitation de CMS pendant plus de 10 ans.

Dans les sections suivantes, le projet de nouveau trajectographe silicium et de ces différents composants est exposé en détail. Tout comme depuis le début de ce chapitre, l'accent est mis sur les éléments, composants et caractéristiques dont la compréhension est cruciale pour la suite de ce travail. Le lecteur désirant obtenir de plus amples informations est invité à consulter la littérature abondante, à commencer par le Technical Design Report (TDR) portant sur les améliorations apportées à CMS en vue de la phase HL-LHC [14].

1.4 Le *Tracker* de CMS

Le *tracker* (trajectographe ou traceur en français) de CMS est un ensemble de détecteurs silicium situé au plus près des collisions pp . Ses objectifs sont les suivants : identifier individuellement les particules émanant des collisions, afin de déterminer leur charge (grâce au champ magnétique), leur trajectoire, et donc leur quantité de mouvement transverse. Dans le projet de nouveau trajectographe, qui sera mis en place pour la phase HL-LHC, il sera également chargé d'identifier les particules à haute quantité de mouvement transverse afin de ne transmettre que les signaux de ces particules au trigger de niveau 1, la bande passante entre l'électronique de lecture des détecteurs et l'électronique du trigger étant limitée. Ce dernier décidera, en fonction des informations qu'il reçoit, de déclencher l'enregistrement et le transfert des signaux enregistrés par le détecteur pour une collision de paquets de protons donnée. Ce système permet de réduire considérablement la quantité de données à traiter.

Dans la suite de ce rapport, et à moins que le contraire ne soit spécifié, tous les éléments sont propres à l'upgrade du trajectographe prévu pour fonctionner avec le HL-LHC à partir de 2027. Les caractéristiques sont donc propres au nouveau projet, et peuvent parfois grandement différer de celles du trajectographe actuellement présent dans CMS.

Repère de coordonnées : les conventions utilisées dans ce travail sont identiques à celles utilisées par la collaboration CMS. Ainsi, le repère droitier est défini comme suit (voir Fig. 1.3) :

- c : le centre du repère est situé au point nominal des collisions pp au centre du détecteur CMS ;
- x : l'axe x pointe dans la direction du centre du LHC ;
- y : l'axe y pointe vers le haut ;
- z : l'axe z pointe dans la direction du faisceau ;

- ϕ : l'angle ϕ est mesuré à partir de l'axe x dans le plan $x-y$;
- ψ : l'angle ψ est mesuré par rapport à l'axe z ;
- r : la coordonnée radiale r est mesurée par rapport au centre du repère et dans le plan $x-y$.

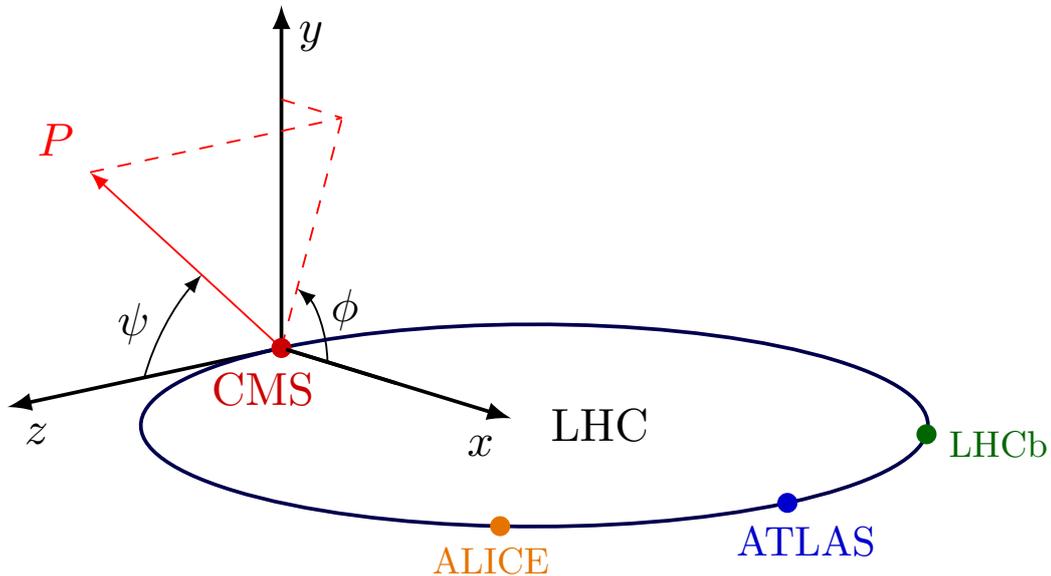


FIGURE 1.3 – Repère de coordonnées de CMS [34].

Concept de quantité de mouvement transverse : la notion de quantité de mouvement transverse, noté p_T , est très importante, car elle est utilisée comme indicateur d'une collision intéressante du point de vue de la Physique. Elle est au cœur du fonctionnement des modules 2S, aussi appelés modules p_T (voir section 1.5).

La quantité de mouvement transverse est tout simplement la projection de la quantité de mouvement dans le plan perpendiculaire au champ magnétique (plan $x-y$ de CMS). Plus une particule a une quantité de mouvement transverse élevée, moins elle est déviée par le champ magnétique de 3.8 teslas. Le rayon r de la trajectoire en hélice d'une particule de quantité de mouvement transverse p , plongée dans un champ magnétique d'intensité B , est donné par la formule suivante :

$$r \text{ [m]} = \frac{p \text{ [eV]}}{c \cdot B \text{ [T]}}, \quad (1.2)$$

avec c , la vitesse de la lumière.

Cette information est utilisée au niveau du trigger L1.

Le trajectographe est composé de très nombreux détecteurs plan au silicium (plusieurs milliers) dont la géométrie diffère selon la position dans l'expérience. Le trajectographe se trouve au plus proche des collisions, et ses modules sont situés entre 0 et 1200 mm de rayon. La Fig. 1.4 présente une vue en coupe dans le plan $r-z$ d'un quart du trajectographe central.

On distingue deux principales zones dans le trajectographe : le trajectographe interne, situé au centre (r compris entre 0 et 200 mm), et le trajectographe externe (r entre 200 et 1200 mm). On différencie également deux zones selon l'axe z : une zone proche de $z = 0$ où les modules sont perpendiculaires au rayon, et une zone plus éloignée, dans laquelle les modules sont perpendiculaires à z . Dans le cas du trajectographe externe (qui nous intéresse ici), on

remarque une zone de transition pour les trois premières couches de modules (en bleu sur la Fig. 1.4), dans laquelle les modules sont progressivement inclinés jusqu'à devenir totalement perpendiculaires à z en s'éloignant du centre. Ces variations d'orientation des modules ont pour but de les orienter au maximum de manière perpendiculaire à la direction d'incidence des particules créées lors de collisions. Dans l'idéal, la normale au plan de chaque module pointerait dans la direction du point nominal de collision. Cependant, dans un souci de simplicité d'assemblage, seuls certains modules sont orientés vers le centre.

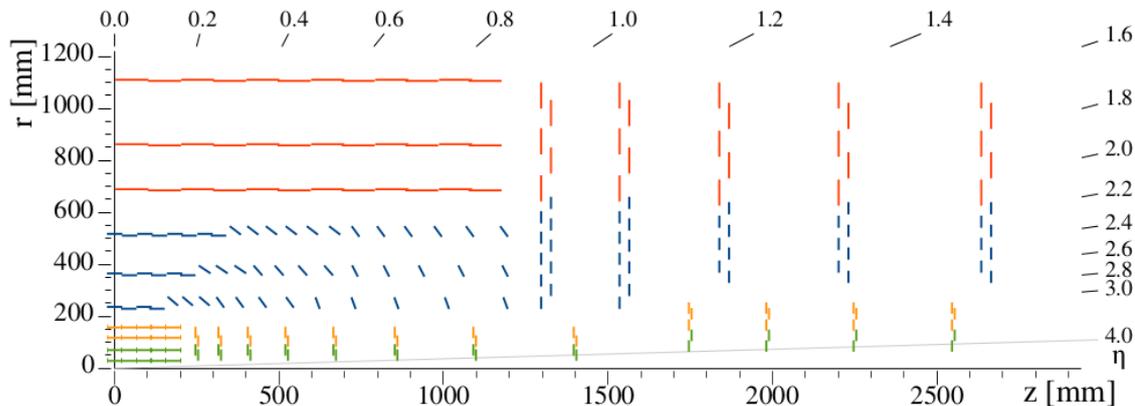


FIGURE 1.4 – Vue en coupe du futur trajectographe de CMS. En vert et jaune, les modules du trajectographe interne. En bleu et rouge, les modules du trajectographe externe. La pseudo-rapacité η est définie par $\eta = -\ln \tan(\psi/2)$ [14].

Le nombre de couches de modules n'est pas arbitraire. L'objectif est de s'assurer que chaque particule émise lors des collisions traverse un certain nombre de modules, et ce, jusqu'à un certain angle d'émission (ou pseudo-rapacité, voir Fig. 1.4). Ainsi, le nombre et la position des modules permettent d'assurer une mesure correcte de la trajectoire et de la quantité de mouvement transverse des particules. Dans la région centrale, il y a quatre couches de modules dans le trajectographe interne, et six dans le trajectographe externe. Grâce à cette disposition, chaque particule traverse en moyenne plus de huit modules jusqu'à $|\eta| = 3.5$, et plus de six jusqu'à $|\eta| = 4.0$ [14].

Le **trajectographe interne**, au plus proche des collisions pp subit le maximum de radiations. Ses modules doivent être particulièrement radio-résistants, et il est d'ailleurs prévu qu'il soit possible de les remplacer au cours de la phase de haute luminosité du LHC. Les modules du trajectographe interne sont constitués de silicium simple couche et constitués de très nombreux pixels de $25 \times 100 \mu\text{m}$. Ces pixels (plus petits que ceux actuellement dans CMS) doivent permettre de discerner les différentes particules et de les localiser de la manière la plus précise possible, dans le plan transversal ($x-y$), mais également selon z (contrairement au trajectographe externe). Les informations récoltées par le trajectographe interne permettent par la suite de reconstruire précisément la trajectoire des particules afin d'estimer la position de leur point de départ. Pour ce faire, les informations du trajectographe externe sont également mises à contribution.

Le **trajectographe externe** quant à lui, est composé de deux types de modules : les modules les plus proches du centre (en bleu sur la Fig. 1.4) sont appelés modules P-S pour Pixel-Strip en anglais. Comme leur nom l'indique, ils sont constitués de deux capteurs plans parallèles très proches l'un de l'autre. L'un est constitué de macro-pixels (1.5 mm de longueur sur $100 \mu\text{m}$ de largeur) et l'autre de pistes (ou strips en anglais) de 2.4 cm de longueur disposées tous les $100 \mu\text{m}$.

Le deuxième type de modules, les plus externes (en rouge sur la Fig. 1.4) sont appelés modules 2S (pour 2-Strip) et sont constitués de deux capteurs plans au silicium rectangulaires d'environ 10 cm x 10 cm de surface, recouverts de pistes parallèles d'environ 5

cm de longueur, isolées au milieu des senseurs, et lues de part et d'autre des senseurs par l'électronique frontale. Les pistes sont distantes de $90 \mu\text{m}$ les unes des autres.

Le rôle des modules du trajectographe externe est double : comme expliqué précédemment, ils permettent, en support au trajectographe interne, de contraindre la trajectoire des particules issues des collisions, ainsi que de déterminer le signe de leur charge. Cependant, du fait de l'augmentation du nombre de collisions lors de l'amélioration du LHC, il est nécessaire de réduire la quantité de données à extraire pour analyse. En effet, la quantité de données brutes produite est tout simplement impossible à extraire en totalité au rythme approprié. Il serait alors inutile d'avoir augmenté les capacités du LHC. Les modules du trajectographe externe jouent sur ce point un rôle crucial, qui leur vaut leur dénomination de modules p_T . Les événements d'intérêt pour la physique étant souvent associés à la production de particules à haute quantité de mouvement transverse (p_T), il est utile de pouvoir repérer "en temps réel"⁵ de tels particules afin de pouvoir déclencher un transfert des données complètes associées à cet événement. C'est là le rôle du trigger L1.

Les particules ayant une quantité de mouvement transverse importante sont associées à un grand rayon de courbure dans le champ magnétique de 3.8 T de CMS, et donc à des trajectoires moins inclinées au niveau des modules. Comme on peut le voir sur la Fig. 1.5 ci-dessous, les modules du trajectographe externe permettent une telle sélection des particules à haut p_T . Chaque piste dont le signal est supérieur au seuil fixé est associée à un hit. Les hits adjacents sont regroupés en clusters sur les deux capteurs parallèles. Les pistes des deux capteurs sont lues par les mêmes puces, afin de permettre une corrélation des clusters entre les deux couches. Pour chaque cluster sur le capteur inférieur, une fenêtre d'acceptation (ou de corrélation) est ouverte sur le capteur supérieur. Si un cluster est détecté dans cette fenêtre, on parle alors de stub.

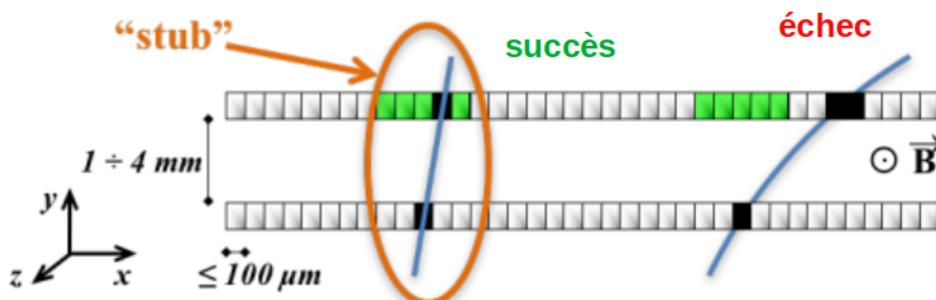


FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement des modules p_T . Les particules traversent les modules et déposent de l'énergie dans les pistes des deux capteurs plan parallèles. Les clusters du capteur inférieur génèrent une fenêtre d'acceptation sur le capteur supérieur, permettant le rejet des particules à faible p_T [14].

Ces informations sur la quantité de mouvement transverse des particules détectées permettent une réduction de la quantité de données d'un facteur 10 environ, rendant possible la gestion de l'énorme quantité de données générée.

Actuellement, dans CMS, ces informations sur la trajectoire des particules ne sont pas disponibles au niveau du trigger L1. C'est là une amélioration majeure pour la phase 2, qui rend possible l'utilisation du plein potentiel du HL-LHC. La stratégie repose donc en grande partie sur la capacité des modules du trajectographe externe à discerner les particules à haut p_T . En fonction du seuil sélectionné ($p_T > 2 \text{ GeV}$ environ), les modules doivent être capables de détecter et identifier les particules dont la quantité de mouvement transverse est supérieure, et ce, avec une efficacité proche de 100%. Dans le même temps,

5. Par temps réel, on entend directement au niveau du *trigger*, et non pas lors de l'analyse des données sauvegardées.

les modules ne doivent pas être submergés par la grande quantité de particules de faible p_T .

La suite de ce premier chapitre est dédiée à la description détaillée du trigger L1 ainsi que des modules 2S. Ces éléments sont indispensables à la bonne compréhension de la suite du travail, et le vocabulaire technique est établi.

1.4.1 Le *Trigger* L1

Comme expliqué précédemment, le rôle du trigger L1 est de déclencher un signal afin de récupérer les données associées à la collision de deux paquets de protons (*bunch crossing* en anglais). Dans CMS, les paquets de protons se croisent à une fréquence de 40 MHz, soit un croisement toutes les 25 ns. Lorsque le HL-LHC entrera en service, chaque croisement de paquets devrait produire entre 140 et 200 collisions pp . Si le seuil de détection des modules du trajectographe externe est fixé entre 2 et 3 GeV, cela correspond à environ 15 000 stubs formées toutes les 25 ns dans l'ensemble du trajectographe.

La tâche du trigger est grandement compliquée lorsque la luminosité est augmentée, car la quantité de données à analyser augmente et que les algorithmes de reconnaissance de trajectoire deviennent de plus en plus complexes lorsque le nombre de stubs augmente (croissance du nombre de combinaisons possibles). Les modules du trajectographe externe envoient des informations concernant les stubs (position et angle) vers le trigger à 40 MHz. Les données de toutes les autres particules (p_T inférieur au seuil) ne sont pas pour autant ignorées, et doivent être stockées sur le module le temps que le trigger L1 prenne une décision les concernant. Le trigger récupère les données des stubs, reconstruit les trajectoires possibles des particules en 5 μs maximum, et détermine si les données complètes doivent être envoyées. Si tel est le cas, il envoie un signal de trigger vers les modules qui transfèrent alors les données correspondantes vers la ferme de processeurs chargée du filtre de haut niveau (High Level Trigger (HLT)). La Fig. 1.6 représente de manière simplifiée la formation des trajectoires des particules à haute quantité de mouvement transverse par le trigger.

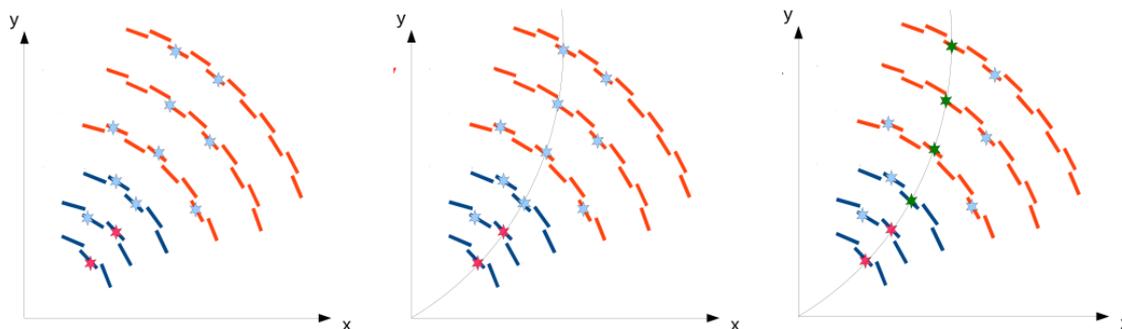


FIGURE 1.6 – Principe de fonctionnement du trigger. En bleu (resp. rouge), les modules PS (resp. 2S) du trajectographe externe. Dans une première étape, des couples de stubs (étoiles sur le schéma) identifiées au niveau des modules PS servent, avec la position nominale des collisions, à former une trajectoire hélicoïdale. La trajectoire est projetée sur les autres couches, et les stubs situés sur cette trajectoire sont sélectionnés (en vert sur le schéma de droite). [14].

Cette stratégie permet de réduire la quantité de données à transférer d'un facteur 10 à 100 en fonction des modules et de leur position dans CMS. Afin de pouvoir envoyer les informations sur les stubs à la fréquence de 40 MHz, les modules utilisent des puces (appelées puces CBC, voir section 1.5.6) qui récupèrent le signal directement sur les pistes des capteurs silicium.

1.5 Les Modules 2S

Dans cette section, l'architecture des modules 2S est détaillée. Les modules P-S ne sont pas détaillés d'avantage, car ils ne sont pas étudiés dans la suite de ce mémoire.

Comme expliqué plus haut, les modules 2S sont constitués de deux capteurs au silicium possédant chacun un grand nombre de pistes parallèles. Une vue schématique d'un module 2S est visible sur la Fig. 1.7, et permet d'identifier les différents composants.

Au total, plus de 15 000 modules 2S sont nécessaires pour l'ensemble de CMS. Ils existent en deux variantes, très similaires, différenciées par la distance nominale entre les deux capteurs silicium : 1.8 ou 4.0 mm de distance.

1.5.1 Les capteurs silicium

Ces capteurs sont constitués d'une couche de silicium dopée, sur laquelle des pistes en aluminium ont été ajoutées. Sur chaque capteur, on distingue la face avant, possédant les pistes, de la face arrière appelée *back-plane* en anglais. D'une épaisseur d'environ $320\mu\text{m}$ au total, la zone de déplétion (ou de dépeuplement) complète est de plus ou moins $290\mu\text{m}$, laissant une zone non dépeuplée du côté du *back-plane*. Le substrat est dopé positivement, et les pistes sont hautement dopées négativement, ce qui donne à ces capteurs la désignation n-in-p. Les pistes sont espacées les unes des autres par une certaine distance, appelée *pitch* en anglais. Dans le cas des modules 2S, le *pitch* est de $90\mu\text{m}$, ce qui donne un total de 1016 pistes sur la largeur du capteur. Dans la longueur, les pistes s'étendent sur une distance de plus ou moins 5cm : deux colonnes de pistes sont présentes sur chaque capteur.

Chaque module 2S complet comporte donc un total de 2 (capteurs) \times 2 (colonnes) \times $1\,016$ (pistes) = $4\,064$ pistes.

Des détails supplémentaires concernant la technologie utilisée dans la confection de ces capteurs silicium sont donnés dans le chapitre traitant de la théorie des trajectographes au silicium (Chapitre 2).

1.5.2 Séparateurs en Al-CF

Afin de les fixer, trois pièces d'alliage de fibre de carbone et d'aluminium sont disposées entre les deux capteurs. Cet alliage présente plusieurs avantages :

- une faible masse
- une conduction de chaleur élevée (d'autant plus dans le sens des fibres de carbone)
- un module de Young élevé
- un faible numéro atomique (densité électronique)
- un faible coefficient d'expansion thermique compatible avec le silicium (4 ppm par °C selon les deux axes, contre 3 ppm pour le silicium [14]).

Les séparateurs servent également de point d'ancrage des modules sur la structure de support (échelle ou ladder en anglais), via des vis situées sur leurs bords. C'est via cette structure de support et leur point d'ancrage, que l'ensemble de la chaleur du module est évacuée.

Les capteurs sont collés de part et d'autre des séparateurs, à l'aide d'une colle spécialement conçue pour permettre un transfert thermique efficace. Afin d'isoler électriquement les capteurs du reste de la structure, des feuillets de Kapton⁶ sont intercalés entre les séparateurs et le capteur.

6. Films polyimide Kapton MT de $25\mu\text{m}$ d'épaisseur.

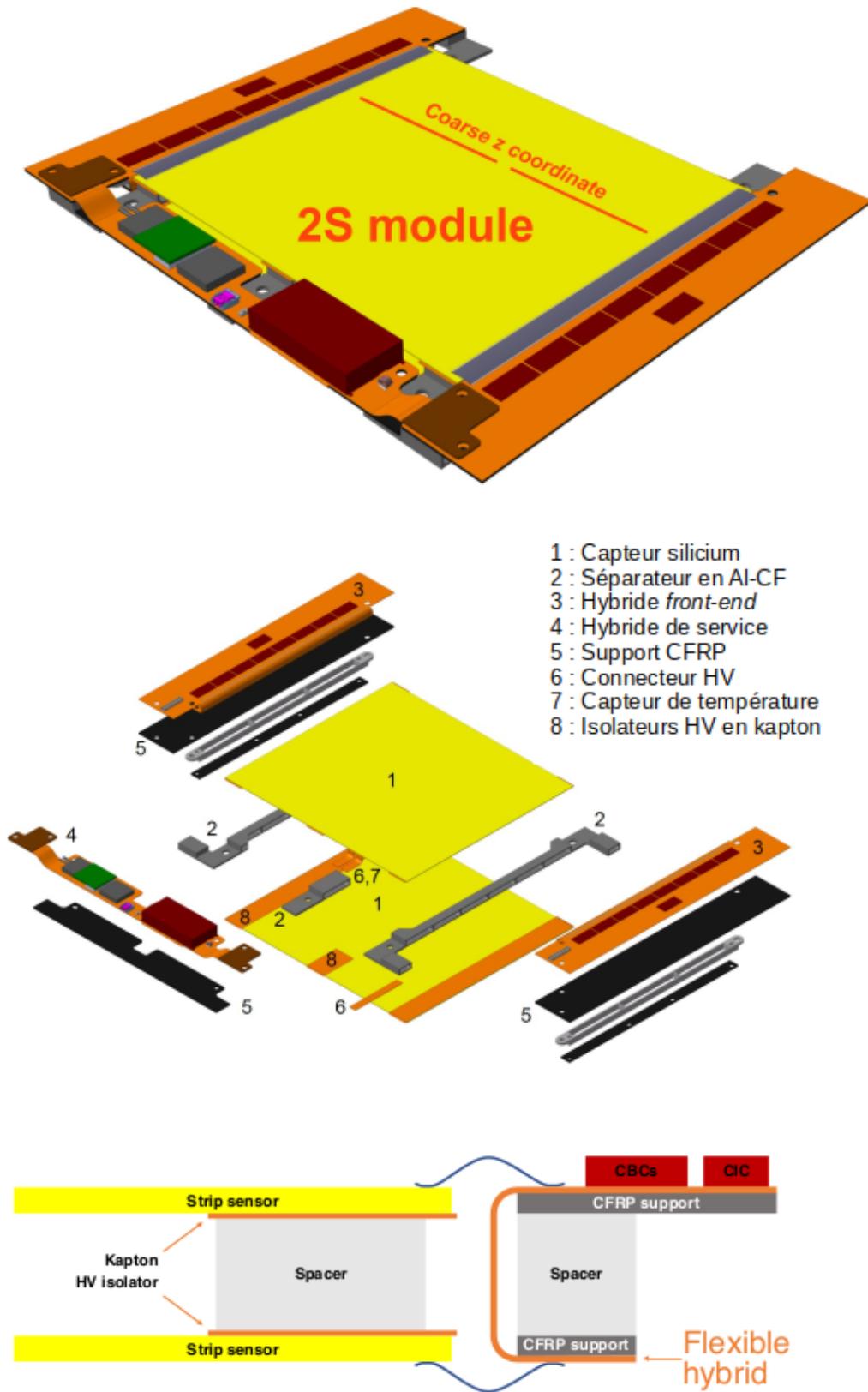


FIGURE 1.7 – Vue détaillée d'un module 2S complet (en haut), vue éclatée des principaux composants (au milieu), et schéma de profil détaillant le raccordement des pistes à l'électronique *front-end* [14].

1.5.3 Hybride *front-end*

Les modules 2S possèdent deux hybrides *front-end*, situés de part et d'autre de l'assemblage (voir Fig. 1.7). Sur ces hybrides, sont présents les ASIC (Application Specific Integrated Circuit) nécessaires à la lecture du signal des pistes, appelées puces CBC (CMS Binary Chip), ainsi que les puces permettant la sérialisation et la communication des données avec l'extérieur, appelées puces CIC (Concentrator Integrated Circuit).

Les puces CBC permettent la lecture des pistes des deux capteurs, ces dernières étant chacune liée par micro-soudure à l'hybride. Une même puce CBC gère des pistes des deux côtés du module, afin de permettre une corrélation entre les deux capteurs. Le fonctionnement de ces puces est détaillé dans une section dédiée (voir section 1.5.6).

Les puces CIC quant à elles, permettent la liaison entre l'ensemble des CBC d'un module et l'hybride de service (voir sous-section suivante).

Les hybrides *front-end* sont fabriqués selon une technologie flexible, permettant à une même nappe de connecter les deux faces du module (voir Fig. 1.7, vue de profil). Pour ce faire, ils sont repliés autour d'un support en fibres de carbone renforcées, ou CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

1.5.4 Hybride de service

Visible sur la Fig. 1.7, l'hybride de service gère d'une part les communications entre le module et la salle de contrôle, et d'autre part l'alimentation électrique, tant pour la logique (bas voltage) que pour la mise en tension des capteurs (haut voltage).

Pour ce faire, il est connecté aux deux hybrides *front-end*. La communication avec les serveurs externes de CMS se fait par câbles optiques pour un plus grand débit de données.

Du fait de la présence des trois hybrides (deux *front-end* et un de service), il existe une certaine surface « morte », non couverte par des pistes, et ne participant donc pas à la détection des particules. Afin de remédier à ce problème, les modules voisins doivent se superposer, et ce, des 4 côtés du module.

1.5.5 Connecteurs

Trois connecteurs sont présents sur les modules 2S : un connecteur de haute tension sur chaque capteur pour l'alimentation, et un connecteur unique pour la mesure de température du module lors du fonctionnement. Ces trois connecteurs sont reliés à l'hybride de service.

1.5.6 Les puces CBC

Comme expliqué dans la section précédente, les puces CBC sont responsables de la corrélation des clusters entre les deux capteurs silicium, afin d'identifier les particules de grande quantité de mouvement transverse.

Ces puces doivent être très rapides dans leur fonctionnement, et minimiser la quantité d'informations qu'elles génèrent pour le trigger L1.

Plusieurs versions ont été développées successivement, chaque version apportant son lot d'améliorations. Pour les besoins de ce mémoire, deux versions sont détaillées, la version 2 et la version 3.1 (version actuelle).

Au centre de CMS, des paquets de protons entrent en collision toutes les 25 ns (40 MHz). Cet intervalle de temps est trop court pour que le trigger puisse reconstruire les trajectoires et décider quoi faire de l'ensemble des données. Il est donc nécessaire de gagner du temps. À cette fin, les modules (via les puces CBC), stockent les données pendant un certain temps. En gardant en mémoire en permanence les 512 précédents croisements de paquets de protons, le trigger dispose alors d'un délai de $25 \text{ ns} \times 512 = 12.8 \mu\text{s}$ pour prendre une décision [38]. Si le trigger estime, via la reconstruction des trajectoires des particules de

grande quantité de mouvement transverse, que l'événement est intéressant, il commande alors l'envoi de l'ensemble des données stockées par les modules et correspondant à cet événement.

Au niveau de la puce CBC, les données suivent deux trajets parallèles :

- un premier trajet permet la reconstruction des stubs, envoyées au trigger ;
- parallèlement, les données brutes sont stockées dans une mémoire tampon, attendant un possible signal du trigger.

Cette architecture permet de trier les données sans temps mort, ainsi qu'une utilisation optimale de la grande quantité de données produites lors des nombreuses collisions.

1.5.6.1 Logique des corrélation

La détection du signal est binaire : chaque piste dont le signal dépasse le seuil est reconnu comme un hit. Lorsque plusieurs pistes adjacentes dépassent le seuil, elles sont regroupées pour former un cluster.

Afin d'informer correctement le trigger, les puces CBC doivent reconstruire des segments de trajectoires (appelées stubs) correspondant à la détection du passage d'une particule de grande quantité de mouvement transverse. Une stub est nécessairement constituée de deux clusters, un sur chaque capteur en silicium. La Fig. 1.5 page 13 illustre cette logique de détection. Le capteur le plus proche du centre de CMS, premier impacté par les particules provenant des collisions, est appelée couche génératrice (ou *seed layer* en anglais). Chaque cluster identifié sur ce premier capteur ouvre une fenêtre de corrélation sur le second capteur (en vert sur la Fig. 1.5). Si un cluster est identifié dans cette fenêtre, une stub est formée.

Afin d'optimiser le processus, chaque puce CBC est reliée en même temps aux deux capteurs : sur les 254 pistes que possède chaque puce, une moitié (127) est connectée au premier capteur, et l'autre moitié au second capteur. Les pistes impaires sont connectées à la couche génératrice (premier capteur), tandis que les pistes paires sont connectées au second capteur. Chaque module 2-Strip (2S) possède donc 16 puces CBC (8 sur chaque hybride *font-end*).

La fenêtre de corrélation est réglable, ce qui permet de modifier la sélection en quantité de mouvement transverse (p_T) ; une fenêtre de corrélation plus grande permet à des particules de plus faible p_T (donc de rayon de courbure plus petit) d'être détectées comme valides pour la formation des stubs.

Afin de compenser l'effet de parallaxe dû à la planéité des capteurs, un *offset* permet de décaler la fenêtre de corrélation de quelques pistes dans un sens ou dans l'autre.

La puce permet également de sélectionner la taille maximum des clusters acceptés. Au-dessus de cette limite, les clusters ne sont pas pris en compte, et sont simplement ignorés. Cette fonctionnalité permet de réduire l'impact des particules de faible p_T , souvent associées à la formation de clusters plus larges.

1.5.6.2 Différences entre les versions 2 et 3.1

La principale différence entre les versions 2 et 3.1 de la puce réside dans le passage à la précision en demi-piste : à partir de la version 3.0, l'*offset*, la position du centre d'un cluster ou encore la fenêtre de corrélation, peuvent être réglée/lues en valeur de demi-piste. Par exemple, en version 2, dans le cas d'un cluster formé par deux pistes adjacentes, la puce considère le centre du cluster comme étant la piste de plus petite adresse. Dans la nouvelle version, le centre est défini comme le milieu du cluster, donc entre les deux pistes. La deuxième différence se situe au niveau des informations envoyées par la puce au trigger : depuis la version 3.0, la puce envoie également la position du centre des clusters et l'angle de la stub à la demi-piste près (la version 2 n'envoyait que la position de la stub, à la piste

près, considérée comme étant la position du cluster de la couche génératrice).

1.5.6.3 Limitations

Les puces ne peuvent pas envoyer ou détecter un nombre arbitraire d'informations. Dans le cas où plusieurs clusters sont présents dans une fenêtre de corrélation, seul le cluster dont le centre est le plus proche du centre de la fenêtre est retenu (plus haut p_T). Lorsque plusieurs stubs sont détectés par une même puce lors d'un cycle de 25 ns, seuls les trois stubs dont l'adresse du centre est la plus faible sont retenues.

Le réglage de l'*offset* n'est possible que pour 4 régions distinctes par puces. Il existe donc une erreur de parallaxe résiduelle pour chaque groupe de pistes.

Dans certains cas, des pistes individuelles peuvent présenter un bruit particulièrement élevé, ou être défectueuses. Un masque permet de supprimer leur signal pour la logique de corrélation. Certains clusters peuvent être coupés en deux par une piste masquée, ce qui entraîne la formation de deux clusters distincts, et donc un décalage du centre.

1.6 Résumé

Le HL-LHC, dont l'entrée en service est prévue en 2027, est un projet de grande envergure à portée internationale. Depuis 2011, un certain nombre de technologies clé sont évaluées, afin de pouvoir profiter pleinement de l'augmentation de la luminosité du collisionneur.

Au coeur de CMS, un détecteur de plusieurs centaines de tonnes situé sur l'un des quatre points de collision pp , on retrouve un trajectographe constitué de plusieurs milliers de capteurs au silicium, dont le rôle est d'identifier et de suivre le trajet des particules chargées qui émanent du point de collision. Pour réduire la quantité de données phénoménale issue de l'expérience CMS, le trajectographe doit informer le trigger de niveau 1 du passage de particules de grande quantité de mouvement transverse, ces dernières étant généralement associées à un événement d'intérêt pour les physiciens.

Constitué de deux capteurs au silicium, disposés parallèlement et espacés de quelques millimètres, les modules 2S sont au centre du dispositif. Possédant chacun plusieurs milliers de pistes (ou strips), ces derniers guettent des corrélations entre leurs deux couches sensibles, afin de détecter le passage de particules d'intérêt.

Dans la suite de cette première partie, la théorie nécessaire à la réalisation de ce travail est brièvement exposée, principalement dans le domaine des détecteurs au silicium.

CHAPITRE 2

THÉORIE DES DÉTECTEURS AU SILICIUM

Contenu

2.1	Introduction	20
2.2	Les Semi-conducteurs	21
2.2.1	Dopage	21
2.2.2	Jonction p-n	22
2.3	Les Semi-conducteurs comme Détecteurs	23
2.3.1	Le Choix du Silicium	25
2.3.2	Mobilité des Porteurs de Charge	25
2.3.3	Profondeur de Déplétion	26
2.4	Les Détecteurs à Pistes	26
2.4.1	Couplage des pistes	27
2.4.2	Isolation Inter-pistes	28
2.4.3	Diffusion et Effet du Champ Magnétique	28
2.4.4	Traitement du Signal et Bruit	29
2.4.5	Effets des Radiations	30
2.5	Spécifications des Capteurs pour les Modules 2S	30
2.6	Résumé	31

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, les principales notions théoriques liées à la fabrication et à l'utilisation des détecteurs au silicium sont décrites.

Après une brève introduction aux semi-conducteurs, le fonctionnement simplifié d'un détecteur de particules au silicium est expliqué. Dans un second temps, le cas des trajectographes (ou traceurs) est abordé, et les principales équations nécessaires à la suite de ce travail sont détaillées, avec leurs hypothèses simplificatrices et leurs limites.

Enfin, les spécifications propres aux capteurs silicium qui seront utilisés dans l'*upgrade* de CMS sont présentées, et les choix sont critiqués au regard des notions théoriques exposées plus tôt.

L'influence du champ magnétique et électrique, ainsi que quelques notions de base de bruit et de signal sont abordées lorsque cela se révèle nécessaire. Il est important de garder à l'esprit que ce chapitre vise à poser les bases nécessaires à l'étude et la simulation d'un trajectographe au silicium ; les notions théoriques sont donc limitées à ce cadre précis.

2.2 Les Semi-conducteurs

Parmi les matériaux solides, on distingue généralement trois types de matériaux, selon leurs propriétés de conduction de l'électricité. La Fig. 2.1 présente les trois cas possibles, et illustre la bande d'énergie de valence et la bande de conduction.

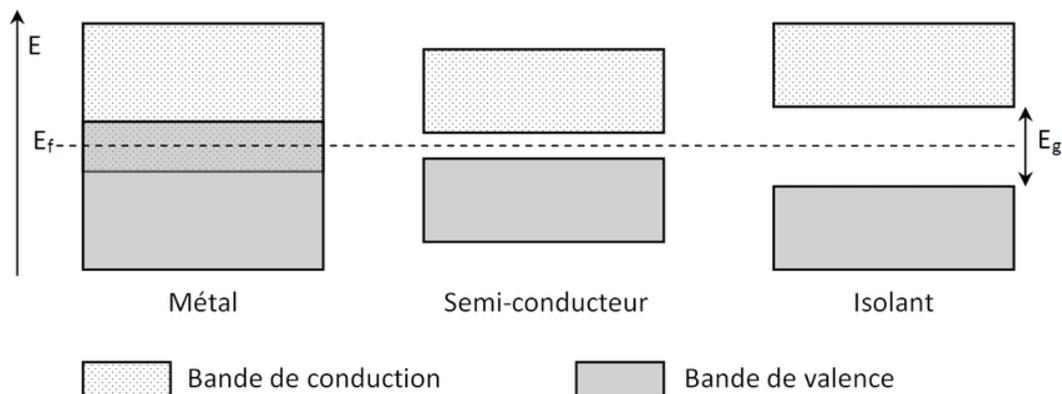


FIGURE 2.1 – Niveaux d'énergie et bande interdite (ou gap) dans les métaux (conducteurs), les semi-conducteurs et les isolants [28].

Les matériaux isolants, dont la bande de valence et la bande de conduction sont séparées par un gap d'énergie important, ne conduisent pas l'électricité.

De l'autre côté du spectre, on retrouve les matériaux conducteurs, dont les bandes de valence et de conduction se chevauchent. Dans ce cas, les électrons de la couche externe sont libres de se déplacer entre les atomes : le matériau conduit l'électricité.

Le troisième cas, celui qui nous intéresse ici, est celui des semi-conducteurs. Ces matériaux sont des isolants, dont le gap en énergie séparant la bande de valence de la bande de conduction est suffisamment faible pour permettre, dans certains cas, le passage d'un électron vers la bande de conduction. Des électrons sont donc libres de se déplacer. À 0 Kelvin, aucun électron ne se trouve la bande de conduction, et le matériau est isolant. Plus la température augmente, plus la probabilité est élevée qu'un électron saute dans la bande de conduction. À température ambiante (≈ 300 Kelvin), seul un électron sur 10^{12} est libre dans du silicium [26].

Les trous laissés vacants dans la zone de valence peuvent à leur tour se déplacer, en attirant un électron, acquérant ainsi un mouvement propre. Dans le cadre de l'étude des semi-conducteurs, les trous sont considérés comme des particules à part entière, et non pas simplement comme une absence d'électron.

Les matériaux semi-conducteurs, dont le silicium est le plus connu, sont à la base de l'électronique moderne. Il est possible de modifier leurs propriétés électriques en y ajoutant des impuretés (dopage), et la mise en contact de zones possédant des dopages différents permet la formation de jonctions, principe à la base de la création des diodes, transistors, et autres.

2.2.1 Dopage

Dans le cas idéal d'un matériau semi-conducteur parfaitement pur (donc sans dopage), on parle de semi-conducteur intrinsèque. Le nombre d'électrons dans la bande de conduction est parfaitement compensé par le nombre de trous dans la bande de valence. Les semi-conducteurs intrinsèques, bien que théoriquement utilisables, le sont rarement dans la pratique, du fait de la grande difficulté à obtenir des matériaux de pureté suffisante [29]. Dans le cas de matériaux dopés, on parle de semi-conducteur extrinsèque. L'ajout d'impuretés (pendant la cristallisation ou par implantation) entraîne un déséquilibre entre porteurs

de charge, selon le type de dopage. Dans le cas d'un dopage par noyaux trivalents (Bore, Gallium, etc.), un électron manque pour la formation de l'une des doubles liaisons. Ce manque est comblé par un électron provenant de la bande de valence, laissant un trou dans cette même bande, sans contre partie dans la bande de conduction. On parle alors de semi-conducteur de type p pour positif, car le trou est associé à une charge positive. Dans le cas d'un dopage par atomes pentavalents (Phosphore, Arsenic, etc.), la situation est opposée. L'électron supplémentaire apporté par le dopant n'est pas fixé dans une double liaison ; il est libre de se déplacer dans la bande de conduction. On parle de semi-conducteur de type n, pour négatif.

Les électrons et les trous sont appelés porteurs de charge, tandis que les atomes de dopage sont appelés accepteurs (pour les trivalents) et donneurs (pour les pentavalents), d'après leur capacité à accepter ou à donner des électrons.

2.2.2 Jonction p-n

Lorsque deux semi-conducteurs, l'un de type p et l'autre de type n, sont mis en contact, on parle de jonction p-n. Dès la mise en contact, un équilibre s'opère. Via un mécanisme de diffusion, les électrons de la zone n vont venir combler des trous de la zone p. Si l'on ne tenait pas compte du champ électrique, ce phénomène se poursuivrait. Cependant, étant donné le déplacement des porteurs de charge, les atomes de dopant, qui eux sont fixés au matériau, se retrouvent ionisés. L'équilibre des charges est rompu, et un champ électrique apparaît au niveau de la jonction. La zone dépourvue de porteurs de charge est appelée zone de déplétion. Le champ ainsi formé fini par entraîner un état d'équilibre : la diffusion est terminée. Étant donné que la formation de la zone de déplétion (ou de dépeuplement) fait appel aux porteurs de charge des deux côtés de la jonction, la taille de cette zone de chaque côté dépend des concentrations relatives en ions. Dans le cas où les dopages sont asymétriques, le côté le plus dopé verra sa zone de déplétion plus fine que celle de l'autre côté. La Fig. 2.2 illustre la formation d'une jonction p-n.

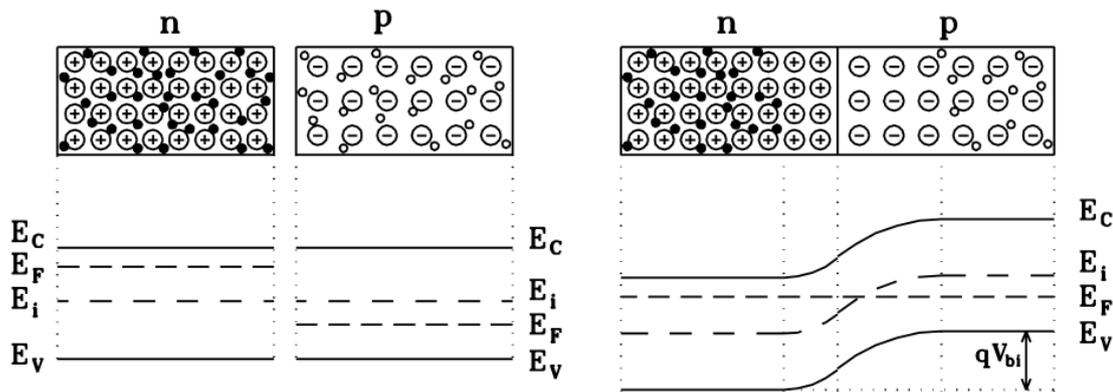


FIGURE 2.2 – Création d'une jonction p-n par mise en contact d'un semi-conducteur de type n et d'un semi-conducteur de type p. À gauche avant la mise en contact, à droite après mise en contact. E_V : énergie de valence, E_i : énergie de Fermi intrinsèque, E_F : énergie de Fermi, E_C : énergie de conduction, qV_{bi} : *built-in voltage* [29].

Lorsqu'on applique une tension aux bornes d'une jonction p-n, deux cas de figure sont possibles. Soit la tension est appliquée en polarisation direct, soit en polarisation inverse. Dans le premier cas, la tension appliquée vient réduire la zone de déplétion, entraînant des recombinaisons électron-trou. Si la tension continue d'augmenter, la jonction finit par permettre le passage du courant, de plus en plus élevé à mesure que la tension monte. Dans le cas où la polarisation est inverse, la zone de déplétion augmente de plus en plus.

C'est dans cette configuration que les semi-conducteurs sont utilisés dans les détecteurs de particules. Si une certaine tension inverse est dépassée, des décharges peuvent finir par se produire, détériorant le matériau.

2.3 Les Semi-conducteurs comme Détecteurs

Comme cela vient d'être présenté, la mise en contact de deux semi-conducteurs au dopage différent crée une jonction, et entraîne une diffusion des porteurs de charge et l'apparition d'un champ électrique. Ce champ électrique force les porteurs de charge présents autour de la jonction à quitter la zone, créant de fait une zone de déplétion. Tout porteur de charge créé dans la zone de déplétion subit alors une accélération par la présence du champ électrique.

Lorsqu'une tension en polarisation inverse est appliquée, la zone de déplétion augmente en taille. Les électrons sont accélérés vers la zone n, et les trous vers la zone p. Lorsqu'une particule chargée traverse la zone de déplétion, des électrons sont arrachés à leur noyau, et on assiste à la formation de paires électron-trou le long de la trajectoire de la particule (voir Fig. 2.4.b). Les charges en mouvement modifient la tension aux bornes de la jonction p-n, c'est le signal.

La modélisation de la perte d'énergie des particules chargées dans la matière a été théorisée par Bethe, Bloch et Landau (voir Fig. 2.3). Pour les particules chargées de haute énergie, et pour des épaisseurs négligeables de matière, la vitesse de la particule n'est quasiment pas modifiée. La densité de paires électron-trou générées le long de la trajectoire de la particule incidente est à peu près indépendante de son énergie, mais augmente par contre avec le carré de sa charge [29].

On remarque que la distribution dépend peu de la masse des particules. Cette distribution de Landau est asymétrique : elle possède une queue plus étalée vers les hautes énergies. L'énergie perdue la plus probable est donc inférieure à l'énergie moyenne perdue. La perte moyenne d'énergie dans le silicium pour les particules chargées de haute énergie est d'environ $300 \text{ eV}/\mu\text{m}$ [30].

Un calcul approximatif permet alors de retrouver l'ordre de grandeur du nombre de paires électron-trou formées par le passage d'une telle particule dans un détecteur au silicium. Si l'on considère une zone de déplétion de $270 \mu\text{m}$, on obtient une perte d'énergie de $270 \times 300 = 81 \text{ keV}$. Si une paire électron-trou nécessite en moyenne 3.6 eV , on obtient le nombre moyen de paires créées, soit $81 \text{ keV} / 3.6 \text{ eV} = 22\,500$. On comprend mieux la nécessité de former une zone de déplétion, le nombre de porteurs de charge intrinsèques étant bien plus important dans un volume identique ! Sans la zone de déplétion, le signal est tout simplement noyé dans le bruit [26].

Dans la pratique, on cherche à obtenir une zone de déplétion de taille suffisante, tout en limitant la quantité de matière qui n'est pas sensible au passage des particules. Pour ce faire, on fabrique en premier lieu une zone faiblement dopée n (n-Si sur la Fig. 2.4.a). Dans un second temps, une implantation positive de forte concentration est effectuée sur une face (p⁺-Si sur la figure). La différence de concentration en dopant permet une grande zone de déplétion dans la zone n, tout en diminuant l'épaisseur de la couche p⁺ qui n'est pas sensible au passage des particules. Afin de pouvoir appliquer une tension, il est encore nécessaire d'appliquer une couche d'aluminium au-dessus de la couche p⁺. Sur la deuxième face, un contact en aluminium est également appliqué. Afin de faciliter le contact ohmique entre le métal et la zone n faiblement dopée, un dopage n de forte concentration est effectué (n⁺-Si sur la figure).

Il est important de comprendre que le signal n'est pas dû à la collecte des charges, mais à leur mouvement dans la zone de déplétion. Les détecteurs illustrés dans la Fig. 2.4

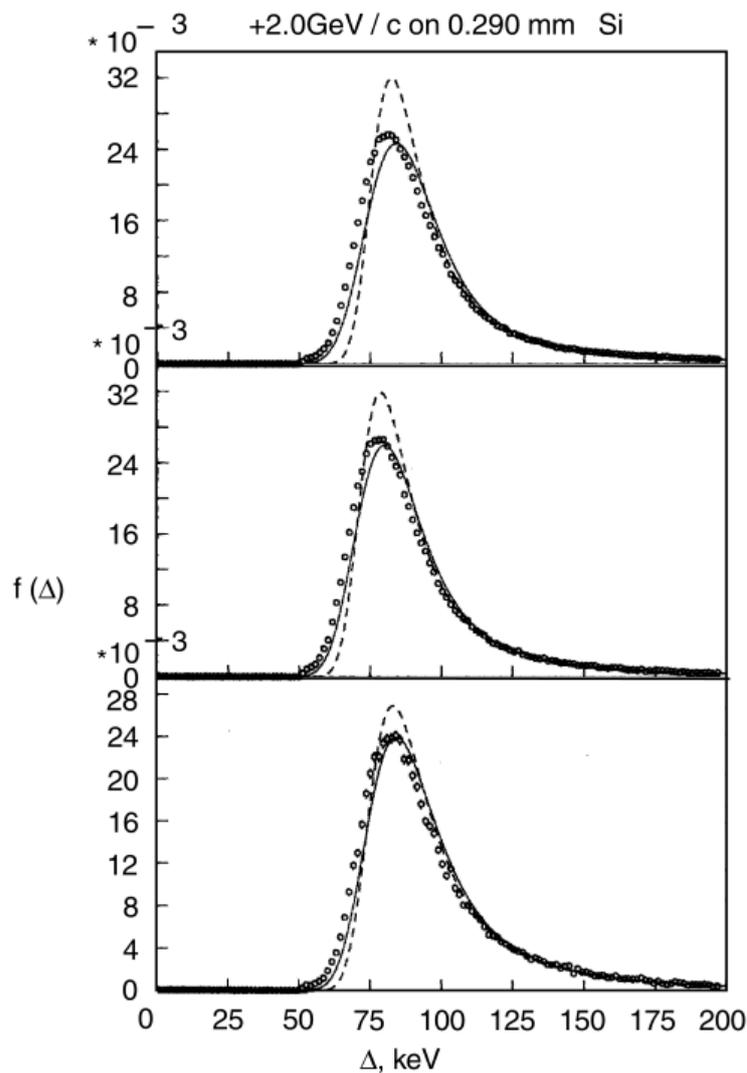


FIGURE 2.3 – Distribution de perte d'énergie dans du silicium pour des positrons, pions et protons de 2 GeV/c. Épaisseur du Si, 290 μm . Points : valeurs expérimentales. Ligne pointillée : Landau. Ligne pleine : Bak et al. 1987. On remarque la queue de distribution étalée vers les hautes énergie [29].

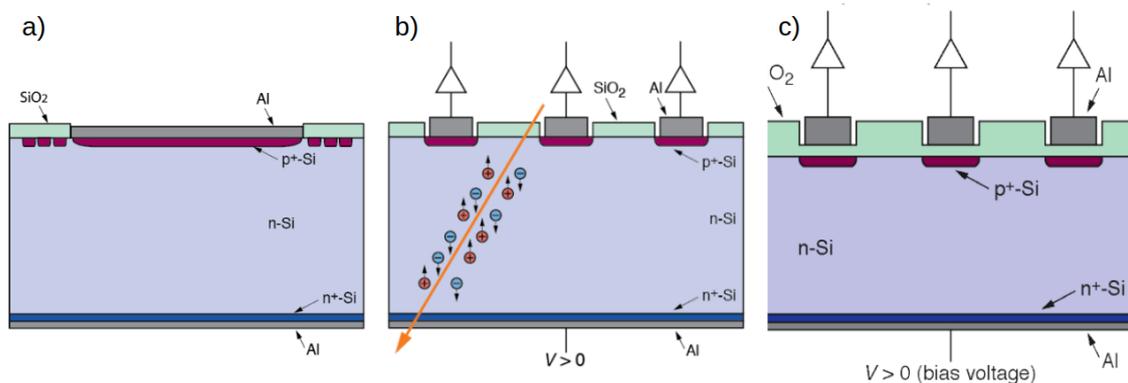


FIGURE 2.4 – Principe de fonctionnement d'un détecteur au silicium. a) Détecteur au silicium le plus simple (diode de surface, p-in-n) ; b) passage d'une particule ionisante dans la zone de déplétion d'un détecteur à pistes connecté en DC ; c) détecteur à pistes connecté en AC [26].

sont de type p-in-n, c'est-à-dire qu'ils sont constitués d'implantations positives (p^+) dans un substrat (ou *bulk*) de type n. L'inverse (implants de type n^+ dans un substrat de type p) est tout à fait possible, et c'est d'ailleurs le choix qui a été fait pour les capteurs au silicium des modules 2S de CMS. Les raisons de ce choix sont expliquées plus loin.

2.3.1 Le Choix du Silicium

Parmi les différents types de matériaux semi-conducteurs, c'est le silicium qui a été historiquement choisi pour fabriquer des détecteurs de particules. Ce choix s'explique principalement par la disponibilité de ce matériau, son prix raisonnable, et son utilisation très importante dans l'industrie de l'électronique, qui implique une connaissance très poussée de ces caractéristiques.

Si l'on compare les détecteurs silicium aux autres types de détecteurs (gaz et scintillateurs), on constate un certain nombre d'avantages du semi-conducteur [30] :

- le silicium possède une haute densité, ce qui augmente la quantité d'énergie perdue par les particules par unité de distance, et donc augmente le signal à taille de détecteur équivalente ;
- il présente également une grande mobilité des porteurs de charge (électrons et trous), ce qui réduit le temps de collecte, et donc la résolution temporelle du signal ;
- il est rigide, ce qui permet la fabrication de structures de petite taille sans support ;
- l'énergie nécessaire à la formation d'une paire électron-trou dans le silicium est d'environ 3.6 eV, à comparer aux 30 eV des détecteurs à gaz et aux 100 eV des scintillateurs.
- il est naturellement relativement résistant aux dommages causés par les radiations ;
- il est simple à utiliser en présence de champs magnétiques puissants, qui sont souvent présents dans les expériences de physique des particules (voir section 2.4.3 pour les effets indésirables).

Pour toutes ces raisons, les détecteurs au silicium sont grandement utilisés aujourd'hui dans un grand nombre d'applications, et particulièrement en physique des particules.

2.3.2 Mobilité des Porteurs de Charge

Dans la zone de déplétion, les porteurs de charge (électrons et trous) subissent l'accélération du champ électrique. Entre chaque collision, ils sont à nouveau accélérés. D'un point de vue macroscopique, si l'on regarde non pas une particule mais un ensemble, on peut définir une vitesse propre aux électrons et aux trous.

Cette vitesse de déplacement dépend de deux paramètres, que sont l'intensité du champ électrique \vec{E} et la mobilité des porteurs de charge, μ_n pour les électrons et μ_p pour les trous.

On définit la vitesse de dérive des porteurs de charge (*drift velocity* en anglais) de la manière suivante [26] :

$$\vec{v}_n = -\mu_n \cdot \vec{E} \quad (2.1)$$

pour les électrons, et :

$$\vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

pour les trous.

La mobilité, qui dépend de la charge e et de la masse m de la particule, ainsi que du temps de libre parcours moyen entre deux collisions τ , est décrite par l'équation :

$$\mu_n = \frac{e \cdot \tau_n}{m_n} \quad \text{et} \quad \mu_p = \frac{e \cdot \tau_p}{m_p} \quad (2.3)$$

À titre d'exemple, les mobilités des électrons et des trous à température ambiante dans le silicium sont d'environ $1450 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $450 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ respectivement. On remarque

que les électrons sont beaucoup plus mobiles que les trous (plus de trois fois plus). Cette différence de mobilité entraîne une différence équivalente dans les vitesses effectives de déplacement des charges, et donc une contribution à la forme du signal différente.

Les formules données ici ne sont qu'une approximation du comportement réel des porteurs de charges. En présence d'un champ électrique de forte intensité, d'autres facteurs entrent en compte, et la vitesse n'augmente plus linéairement avec l'accroissement de la valeur du champ.

2.3.3 Profondeur de Déplétion

L'épaisseur de la zone de déplétion est un paramètre très important pour les détecteurs, car elle représente la zone sensible de ce dernier. C'est dans cette zone que le mouvement des charges créées par la particule incidente induit un signal.

En première approximation, on peut calculer l'épaisseur W de cette zone de déplétion dans le substrat (partie faiblement dopée), qui dépend avant tout de la tension appliquée et de la densité du dopage, de la manière suivante [26] :

$$W = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_r\mu\rho|V|} \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{1}{e\mu N_{eff}} \quad (2.4)$$

Avec ϵ_0 et ϵ_r la permittivité du vide et la permittivité relative du silicium, μ la mobilité des porteurs de charge majoritaires, ρ la résistance spécifique du substrat, N_{eff} la concentration du dopage dans le substrat et V la tension externe appliquée.

On remarque bien ici que la concentration du dopage a un effet direct sur l'épaisseur de la zone de déplétion, ce qui explique les dopages asymétriques dans les détecteurs, afin de contrôler ce paramètre, et limiter la quantité de matière non-utile à la formation du signal. Afin de s'assurer que l'ensemble de l'épaisseur du substrat du détecteur est correctement déplétée, on peut calculer la tension nécessaire, appelée tension de déplétion complète (ou *full depletion voltage* en anglais), à l'aide de la formule suivante :

$$V_{FD} = \frac{D^2}{2\epsilon_0\epsilon_r\mu\rho} \quad (2.5)$$

Avec D , l'épaisseur du substrat.

À la tension de déplétion complète, toute l'épaisseur du substrat est déplétée, mais le champ électrique est nul du côté du backplane. Hors, un champ électrique nul rend impossible la collecte des charges. Dans la pratique, la tension d'utilisation est donc légèrement plus élevée que la tension de déplétion complète [42].

2.4 Les Détecteurs à Pistes

Les détecteurs à strips (ou à pistes en français), sont une évolution du détecteur simple présenté dans la section précédente. Le principe de fonctionnement est le même, cependant au lieu de récupérer l'ensemble du signal dans une unique jonction couvrant toute la surface du détecteur, on segmente cette jonction en plusieurs zones séparées. Cette division en de multiples zones permet d'augmenter la résolution spatiale, raison pour laquelle les détecteurs à pistes sont avant tout utilisés dans les trajectographes. On retrouve sur la Fig. 2.4.b une illustration de cette segmentation en pistes.

Chaque piste possède son propre canal électronique de lecture. La lecture est possible en analogique ou en binaire. Dans le cas d'une lecture binaire, si le signal de la piste dépasse un certain seuil, on considère que la réponse est un 1. Sinon, la réponse est un 0. Dans le cas d'une lecture analogique, la résolution spatiale peut être améliorée en corrélant les réponses des pistes adjacentes. En effet, en fonction de l'espacement entre les pistes et de

la trajectoire de la particule, il arrive souvent que le signal soit partagé entre plusieurs pistes voisines. L'analyse du signal analogique permet alors de situer plus précisément le point de passage de la particule, en pondérant des intensités du signal de chaque piste. La lecture binaire, bien que moins précise dans certaines situations, permet de réduire considérablement la complexité et le temps de traitement du signal.

2.4.1 Couplage des pistes

Afin de pouvoir recueillir le signal provenant des pistes, la méthode historique consiste simplement, comme dans le cas du détecteur silicium mono-cellule, à relier directement la piste, via un contact métallique, à l'électronique d'amplification. Dans cette situation, l'amplificateur n'est cependant pas isolé du détecteur, ce qui permet au courant de fuite résiduel de l'atteindre, et donc d'être amplifié (cas de la Fig.2.4.b). On parle alors de couplage DC (Direct Current).

Une évolution de ce système propose de découpler le détecteur de l'électronique d'amplification, via la séparation de la zone d'implantation et de la piste métallique par un isolant, le plus souvent un oxyde de silicium (SiO_2). C'est le cas visible sur la Fig. 2.4.c. On parle de couplage AC (Alternating Current). Dans cette situation, l'association des trois couches de matériau crée un condensateur. Afin d'optimiser la jonction, il est nécessaire d'utiliser une couche d'oxyde aussi faible que possible, tout en assurant une bonne isolation. L'épaisseur est généralement de l'ordre de 100 à 200 nm [30]. La technologie, dont l'acronyme est MOS pour Metal-Oxide-Semiconductor, est grandement utilisée aujourd'hui dans les transistors à effet de champ (MOSFET). En masquant le courant de fuite, le signal est de meilleure qualité, avec un bruit réduit¹. Cependant, cette méthode entraîne un découplage de la tension de déplétion, le contact étant coupé au niveau du condensateur. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'ajouter une connexion à haute résistance entre la zone d'implantation et la tension de polarisation². Pour ce faire, une possibilité est d'ajouter en bout de piste une résistance en poly-silicium (silicium poly-cristallin) de plusieurs $\text{M}\Omega$. De telles résistances sont visibles sur la Fig. 2.5.

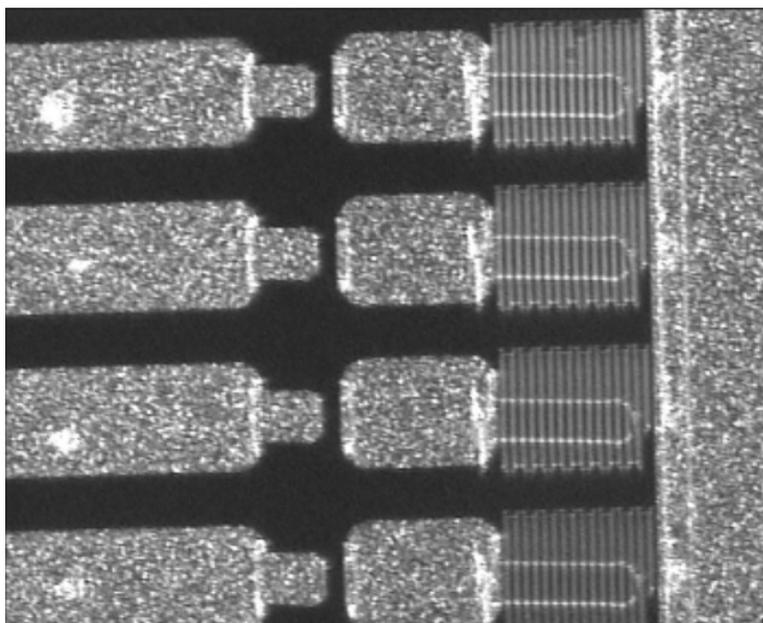


FIGURE 2.5 – Résistance en poly-silicium pour le couplage AC des pistes. De gauche à droite dans l'image : le bout des pistes, les zones de test, les résistances poly-silicium (zig-zag) et enfin le connecteur de polarisation [11].

1. Ce n'est pas la seule contribution au bruit, qui n'est donc jamais entièrement éliminé.

2. La haute résistance est nécessaire afin d'isoler les strips les uns des autres, malgré leur connexion au niveau de la tension d'alimentation.

Avec des résistances en bout de piste, ces dernières sont toujours connectées à la haute tension, ce qui assure la formation de la zone de déplétion. Le signal est bien lu par les pistes métalliques de l'autre côté de la jonction MOS par l'effet de la charge induite par les porteurs de charge en mouvement.

2.4.2 Isolation Inter-pistes

Après avoir ajouté un oxyde de silicium (en vert sur la Fig. 2.4.c) à des fins d'isolation, apparaît un nouveau problème : au niveau de la jonction Si-SiO₂, du côté oxyde, une charge positive est présente en permanence. Dans le cas d'un détecteur n-in-p (pour rappel, pistes n⁺ dans substrat de type p) ou n-in-n, les électrons créés dans le substrat sont attirés vers la zone d'implantation des pistes. Cette accumulation d'électrons entraîne une baisse de la résistance inter-pistes, ce qui dégrade le signal de manière rédhibitoire.

Afin de rétablir le signal, il est nécessaire de briser cette couche d'accumulation d'électrons. La stratégie principale consiste à ajouter entre chaque piste une zone fortement implantée positivement (p⁺) : on parle de structure p-stop. Plusieurs géométries sont possibles, mais la géométrie dite en atoll semble donner les meilleurs résultats, avant et après irradiation [41].

L'ajout de ces atolls permet de rétablir une résistance inter-pistes de l'ordre du GΩ, autorisant de nouveau la lecture du signal sur chaque piste individuellement.

2.4.3 Diffusion et Effet du Champ Magnétique

Immédiatement après le passage de la particule ionisante dans la zone de déplétion, les paires électron-trou sont situées le long de la trajectoire. Les deux nuages (celui des électrons et celui des trous) commencent alors à se déplacer vers leur électrode respective. Du fait des collisions aléatoires avec les atomes du réseau, le nuage s'étale au cours de sa progression. La moyenne quadratique de la largeur du nuage après un temps de diffusion t , est donné par la formule suivante [30] :

$$\sigma_D = \sqrt{2Dt} \quad \text{avec} \quad D = \frac{kT}{e} \mu \quad (2.6)$$

On remarque que malgré leur vitesse de diffusion différente, la largeur du nuage des trous est identique à celui des électrons (car leur faible mobilité compense leur durée de diffusion plus élevée).

Le temps de diffusion étant directement lié à la distance séparant le nuage de l'électrode vers laquelle il se dirige, la largeur de ce dernier dépend donc de la distance de la charge à l'électrode. Le long de la trajectoire de la particule incidente, chaque groupe de charge va donc atteindre l'électrode avec une distribution gaussienne dont l'écart-type dépend de la distance parcourue. Le signal total est donc une combinaison de plusieurs distributions gaussiennes.

En présence d'un champ magnétique, le déplacement des électrons et des trous n'est plus uniquement dicté par le champ électrique. La force subie par les charges est alors :

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

La force n'est donc plus uniquement orientée vers les électrodes (selon le champ \vec{E}), ce qui entraîne une déviation latérale des charges. Cet effet modifie la collecte des charges par les pistes, et donc fausse le signal.

À partir de l'équation 2.7, on peut retrouver l'angle de déviation des particules par rapport aux lignes de champ lors de leur diffusion. L'angle de Lorentz s'écrit (pour les électrons) :

$$\tan\theta_n = \mu_n^H B \quad \text{soit} \quad \theta_n = \tan^{-1}(\mu_n^H B) \quad (2.8)$$

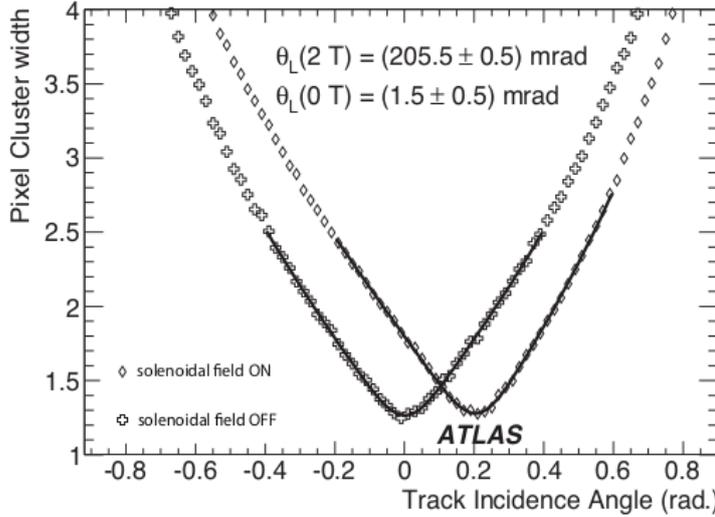


FIGURE 2.6 – Mise en évidence de l’angle de Lorentz dans l’expérience ATLAS. En présence du champ magnétique de 2 T, on observe clairement un décalage de l’angle d’incidence minimisant la largeur des clusters. En l’absence de champ magnétique, l’angle de Lorentz mesuré est d’environ 0.09° , contre 11.8° en présence du champ B [27].

On remarque que la mobilité, μ , est différente en présence d’un champ magnétique. Pour le silicium à température ambiante, $\mu_n^H = 1670\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ et $\mu_p^H = 370\text{cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ [29], ce qui nous donne pour un champ magnétique de 1 tesla : $\theta_n = 9.5^\circ$ et $\theta_p = 2.1^\circ$ [29].

La déviation est donc plus importante pour les électrons que pour les trous, du fait de leur plus grande mobilité. Le fait que les électrons et les trous soient de charge opposées, entraîne une direction le long des lignes de champ électrique opposée, mais leur décalage latéral dû au champ magnétique se produit dans la même direction.

Ce décalage des nuages de porteurs de charge est bien visible dans les expériences de physique des particules qui font appel à des champs magnétiques puissants, comme on peut le voir dans le cas de l’expérience ATLAS sur la Fig. 2.6.

Dans certaines situations, il est possible de minimiser l’impact de cette déviation, en donnant aux capteurs une inclinaison identique à l’angle de Lorentz dans le détecteur. Cependant, cette stratégie entraîne une plus grande complexité d’assemblage des modules dans l’expérience (géométrie plus complexe).

2.4.4 Traitement du Signal et Bruit

Le signal produit au niveau des pistes dépend principalement de l’épaisseur de la zone de déplétion, ainsi que de la perte d’énergie par unité de distance de la particule incidente (dE/dx). Comme expliqué plus haut, l’énergie perdue suit une loi de probabilité donnée par la courbe de Landau-Gauss.

Afin de pouvoir analyser le signal, il est crucial de conserver un rapport signal/bruit élevé (SNR en anglais pour Signal to Noise Ratio). On cherche généralement à conserver un SNR supérieur à 15, voire même plus [30]. En pratique, le seuil est un paramètre très important, qui permet de rejeter une grande partie du bruit. Il doit être ajusté avec précaution. Si il est trop bas, une partie importante du bruit va être retenue. À l’inverse si il est trop élevé, il masque une partie du signal.

Lors du processus de développement et de fabrication des détecteurs, il est capital de veiller à maintenir le bruit total sous un certain niveau, afin que ce dernier n’empiète pas de manière importante sur le signal. Le bruit est généralement mesuré pour chaque piste individuellement, et dépend de nombreux facteurs :

- la capacité du détecteur à l’entrée du pré-amplificateur (préférer des pistes courtes) ;
- le courant de fuite (augmente avec l’irradiation) ;
- la résistance parallèle, reliée à la tension d’alimentation (résistance poly-silicone, préférer une résistance élevée) ;

- la résistance série, liée à la connexion entre le détecteur et l'électronique d'amplification (préférer des connexions courtes, des pistes en aluminium épaisses).

Toutes ces contributions au bruit doivent être diminuées lors de la phase de conception. Elles s'ajoutent en quadrature pour former le bruit total.

2.4.5 Effets des Radiations

De manière générale, l'irradiation des détecteurs au silicium dégrade, parfois de manière importante, le SNR, la résistance inter-pistes et la tension de déplétion complète V_{FD} [44]. Au niveau de la surface des détecteurs, l'irradiation crée des dommages au niveau de la couche d'oxyde, ce qui entraîne une accumulation de charge à cet endroit [30]. Au niveau du substrat, les dégâts sont causés par les particules de haute énergie, souvent des hadrons (pions, protons, neutrons, etc.). Les défauts créés dans le substrat agissent comme des accepteurs d'électrons, ce qui a pour effet de transformer les substrats de type n en type p [40]. C'est l'une des raisons qui explique la résistance aux radiations des détecteurs de type n-in-p [20]. Cependant, comme expliqué précédemment, les n-in-p présentent le désavantage de nécessiter une isolation active des pistes via des implantations p^+ .

Au niveau de la surface, les jonctions MOS sont également sensibles aux radiations. Au niveau de la jonction Si-SiO₂, le dépôt d'énergie crée des paires électron-trou. Ces dernières sont déplacées par l'action du champ, et certains trous sont piégés par des atomes d'oxygène, la plupart au niveau de l'interface avec le substrat [43].

La tension de déplétion augmente de manière importante avec l'irradiation, ce qui pousse à trouver des stratégies de réduction de cette tension dès le développement des capteurs : on cherche la tension de déplétion la plus faible possible au départ, avec un facteur d'accroissement avec l'irradiation le plus faible possible. Une fois de plus, les n-in-p présentent l'avantage de pouvoir être opérés en dessous de la tension de déplétion complète, car la jonction p-n est toujours du côté de la collecte du signal (implantation des pistes) [20].

Au niveau des expériences, comme ATLAS ou CMS, les zones subissant le plus l'irradiation sont les parties les plus proches du point nominal des collisions pp . Dans CMS, cette zone est occupée par le trajectographe interne. Les modules 2S, qui nous intéressent ici, sont situés à un rayon légèrement plus élevé, ce qui réduit les contraintes sur l'irradiation.

Alors que la fluence envisagée est de $2.3 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}.\text{cm}^{-2}$ (fluence en équivalent de neutrons de 1 MeV) au plus près du point de collision (trajectographe interne), cette dernière sera au maximum de $3.0 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}.\text{cm}^{-2}$ pour les modules 2S.

2.5 Spécifications des Capteurs pour les Modules 2S

Dans cette section, les caractéristiques des modules 2S sont décrites, telles que spécifiées dans le document du CERN ouvrant l'appel d'offres aux producteurs [12].

Du fait de la nécessité pour les modules de résister à de hauts niveaux de radiation pendant les 10 années d'opération prévues du HL-LHC, le choix du CERN s'est tourné vers des détecteurs au silicium n-in-p, couplés en AC avec une résistance élevée du substrat (tension de déplétion complète plus faible).

Les demandes du CERN sont un détecteur n-in-p de 320 μm d'épaisseur physique, dont 290 μm d'épaisseur active (déplétion complète), avec un implant p^+ épais au dos (20-30 μm) afin d'assurer un bon contact ohmique.

Les pistes sont de type n^+ , couplées en capacitif (couplage AC) à des pistes en aluminium. Les pistes implantées doivent être chacune connectée à une résistance de type poly-silicium de 1.5 $\text{M}\Omega$.

Le Tableau 2.1 reprend les principales spécifications demandées, en mettant l'accent sur

les caractéristiques abordées dans ce chapitre.

Caractéristique	Valeur avant irradiation	Valeur après irradiation
Nombre de capteurs	17050	-
Nombre de pistes	2×1016	-
Pitch	$90 \mu\text{m}$	-
Largeur / pitch	0.25	-
Longueur des pistes	$50205 \mu\text{m}$	-
Couplage	AC	-
T° de fonctionnement	-20°C	-
Champ magnétique	4.0 T	-
Précision de découpe	$10 \mu\text{m}$	-
Isolation des pistes	p-stop	-
Résistance inter-strip	$> 10 \text{ G}\Omega.\text{cm}$	$> 100 \text{ M}\Omega.\text{cm}$
Tension de déplétion comp.	$< 350 \text{ V}$	-
Résistance du substrat	$> 3.5 \text{ k}\Omega.\text{cm}$	-
Courant à 600 V	$< 7.25 \mu\text{A}$	-
Breackdown voltage	$> 800 \text{ V}$	$> 800 \text{ V}$
Face avant	passivée	-

Tableau 2.1 – Caractéristiques des modules 2S, telles que précisées dans l’appel d’offres du CERN [12].

Ces spécifications doivent permettre aux fournisseurs potentiels d’évaluer leur capacité à réaliser les capteurs, ainsi qu’à produire une offre chiffrée. Dans la réalité, les spécifications demandées étant relativement complexes, seul un fournisseur (Hamamatsu Photonics) a répondu à l’appel d’offres.

2.6 Résumé

La technologie des détecteurs au silicium a connu de nombreuses avancées ces dernières décennies, en lien avec l’évolution des technologies informatiques et de micro-électronique. Cependant, afin de pouvoir pleinement bénéficier de l’accroissement de luminosité prévue pour le HL-LHC, des détecteurs de nouvelle génération, plus résistants aux effets des rayonnements ionisants (RI), ont dû être développés.

Comme expliqué dans ce chapitre, parmi les nombreuses possibilités offertes par ce type de détecteur, c’est la technologie n-in-p couplée en AC qui a été sélectionnée, avant tout pour sa grande résistance aux RI.

De nombreuses autres technologies existent dans le domaine des détecteurs à semi-conducteurs, comme les détecteurs double-face, les détecteurs dotés de pixels, etc. Les détecteurs dotés de pixels sont utilisés dans l’expérience CMS, et seront également remplacés pour la phase de haute luminosité. Leur description n’est cependant pas utile dans le cadre de ce travail. Les détecteurs double-face, dont la face inférieure possède également des pistes, orientées perpendiculairement à celles sur le dessus, permettent en théorie une meilleure résolution, grâce à une mesure selon deux axes. Cependant, ils sont beaucoup plus complexes et coûteux, et nécessitent la présence d’électronique sur les deux faces des modules, ce qui complexifie grandement la fabrication. Dans le cas de CMS, ce sont les couches internes, proches du point nominal de collision, qui possèdent des modules munis de pixels, permettant une résolution dans les deux directions.

Contenu

3.1	Introduction	32
3.2	Description du Lieu de Stage	32
3.2.1	Principales activités actuelles	33
3.2.2	Participation à la Collaboration CMS	33
3.3	Tâches Réalisées lors du Stage	33
3.3.1	Protection contre les ESD	34
3.3.2	Mesure de grains de colle	40
3.3.3	Centrifugeuse	44
3.4	Conclusion sur le Stage	48

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la description du lieu de stage ainsi qu'aux activités qui y ont été réalisées.

Dans une première section, l'institut et ses partenaires sont présentés. Les différents groupes et projets sont brièvement passés en revue, puis laissent place à la description plus précise de la participation de l'institut au sein de la collaboration CMS et plus particulièrement de l'*upgrade* du trajectographe de ce dernier, en tant que centre de production d'une partie des modules de détection.

Dans un second temps, les différentes tâches réalisées au sein de l'équipe sont décrites, en mettant en avant les liens avec les différentes matières abordées lors des cours. Ce résumé ne se veut pas exhaustif, et se concentre sur les tâches menées à leur terme.

3.2 Description du Lieu de Stage

Le stage s'est déroulé à l'Inter-University Institute for High Energies (IIHE) situé sur le campus de la plaine à Bruxelles. Il résulte de la collaboration, en 1972, entre l'Université Libre de Bruxelles (ULB) et la Vrije Universiteit Brussel (VUB). L'institut est spécialisé dans la physique des particules élémentaires, et possède une longue expérience de recherche et développement dans la physique des détecteurs et les systèmes informatiques.

Il est financé par la Belgique et les différentes régions, principalement via le Fond National de la Recherche Scientifique (FNRS) et le Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek (FWO). L'ULB et la VUB participent également au financement.

À la tête de l'institut, on retrouve les Professeurs Jorgen D'HONDT (VUB) et Laurent FAVART (ULB).

3.2.1 Principales activités actuelles

L'IIHE est composé de nombreux chercheurs, ingénieurs et personnel administratifs, regroupés en entités, chacune participant à différentes expériences scientifiques internationales.

Parmi les expériences auxquelles l'institut participe, on retrouve principalement deux grandes catégories. Premièrement, l'étude des neutrinos, via plusieurs séries de détecteurs, situés au Pôle Sud et dans d'autres pays. Chaque expérience possède son propre moyen de détection et ses propres limites et spécialisations. On peut brièvement nommer les expériences IceCube (détecteur kilométrique situé au Pôle Sud), JUNO (spécialisée dans la détection et la caractérisation des masses des neutrinos issus de réacteurs nucléaires), LOFAR (large réseau d'antennes formant le plus grand radiotélescope au monde), AUGER (détection des rayons cosmiques de très haute énergie, située en Argentine) et bien d'autres. Le deuxième sujet d'étude concerne l'utilisation d'accélérateurs de particules, via la participation à la collaboration CMS du CERN. L'institut participe également à des recherches ayant lieu sur l'accélérateur DESY en Allemagne.

3.2.2 Participation à la Collaboration CMS

Au sein de l'institut, le stage a été réalisé dans une équipe de la Collaboration CMS. L'équipe en question est chargée de produire une partie des modules de détection qui seront installés dans l'*upgrade* du détecteur CMS, sur un point de collision proton-proton le long de l'anneau principal du LHC.

Ces modules (qui sont ceux simulés dans ce mémoire), feront partie du futur trajectographe de l'ensemble CMS. Plus de précisions à ce sujet sont données dans le Chapitre 1.

Actuellement, les différents centres de production à travers le monde travaillent à mettre au point les processus de fabrication, afin de permettre la production de plusieurs milliers de détecteurs à la pointe de la technologie en quelques années.

Étant donné le nombre de détecteurs, et le prix des différentes pièces, il est crucial de développer des procédures fiables, rapides, et simples, afin de faciliter les opérations lors de la phase de production. Chaque centre développe actuellement des prototypes fonctionnels l'un après l'autre. Pour le moment, chaque module prend plusieurs semaines voire plusieurs mois à fabriquer, avec pour objectif, lors de la phase de production, d'en fabriquer plusieurs par jour.

Dans les grandes lignes, le processus de fabrication consiste à assembler les différentes pièces à l'aide de différentes colles spécialisées. Certaines doivent permettre la conduction de la chaleur, être électriquement isolante ou non, etc. Les modules sont construits autour des deux capteurs au silicium constitués de plusieurs milliers de pistes. Les autres éléments regroupent des pièces de supports, d'électronique, et de gestion d'énergie. Les capteurs doivent être testés (caractéristique courant/tension) à plusieurs reprises, afin de s'assurer de leur bon fonctionnement, et de pouvoir situer, en cas de dommage, l'étape incriminée. Les capteurs silicium sont extrêmement fragiles, d'une épaisseur de 300 micromètres environ, pour une surface de l'ordre de $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

3.3 Tâches Réalisées lors du Stage

Pendant toute la durée du stage, différentes tâches ont été réalisées, en lien avec le groupe appelé *Glue Systems*, et chargé de la réalisation d'un robot permettant de dispen-

ser précisément de la colle sur les capteurs lors de différentes phases de l'assemblage. Trois principales tâches ont été réalisées, à savoir l'étude et la protection contre les décharges électrostatiques d'un gabarit de micro-soudure, la détermination de la taille des grains d'une colle bi-composants et la fabrication d'un prototype de centrifugeuse permettant de retirer les bulles d'air présentes dans une autre colle.

3.3.1 Protection contre les ESD

Les décharges électrostatiques, ou ESD de l'anglais Electrostatic Discharge, représentent un défi majeur pour l'industrie, en particulier lors de l'utilisation de matériel électronique sensible. Il est très difficile d'appréhender la menace que représentent les ESD : les composants les plus sensibles peuvent être irrémédiablement détériorés par des décharges qu'un humain ne peut pas même ressentir.

Il est également très compliqué d'identifier toutes les sources possibles de décharges, afin de les éliminer. Il existe néanmoins plusieurs moyens de s'en prémunir. La première précaution, est d'éviter les matériaux pouvant se charger facilement, de porter des chaussures et des gants spécifiques, et d'éviter tout contact avec les composants. Une seconde étape, consiste à relier à la masse les différentes pièces et outils utilisés, afin d'empêcher toute accumulation de charges. Dans le cas où une charge est présente, il est nécessaire de la dissiper via un matériau dont la résistance est appropriée. Une trop faible résistance, et le courant est trop important. Une trop grande résistance, et les charges s'accumulent (jusqu'à décharge rapide). Il est également important de garder à l'esprit que l'air est un conducteur d'électricité sur de très courtes distances, ce qui permet des décharges dans certains cas de figure.

Dans le cas des modules du trajectographe de CMS, la production nécessite une phase de micro-soudures, consistant en la mise en place de fils en alliage aluminium-silicium (Al-Si) entre les différentes pistes des capteurs (les strips), et l'électronique de traitement du signal. Ces fils ne font que $25 \mu\text{m}$ de diamètre, et sont espacés de $90 \mu\text{m}$ seulement. Plusieurs milliers de soudures doivent être effectuées à des précisions micrométriques. Pour ce faire, les modules sont disposés sur un gabarit dédié, retenus à l'aide d'un groupe de six ventouses reliées à un système de vide.

L'ensemble gabarit/détecteur est alors disposé dans un automate afin de réaliser les micro-soudures.

Un gabarit de micro-soudure (jig en anglais) est visible sur la Fig. 3.1.

On distingue plusieurs zones de contact entre le capteur et le jig :

- les pads métalliques (4 petits sur les bords et deux grands autour des ventouses),
- les ventouses servant à fixer le capteur par succion.

Afin d'éviter toute décharge rapide entre le jig et le capteur (dans un sens comme dans l'autre), il est donc nécessaire d'augmenter la résistance électrique de toute zone de contact entre les deux. Typiquement, la résistance doit être de l'ordre de 10^6 à $10^{12} \Omega$ pour dissiper les charges en toute sécurité.

Le jig étant métallique, sa résistance est proche de 0Ω . Les ventouses, après des tests réalisés lors du stage, se sont quant à elles révélées avoir une résistance diminuant rapidement avec l'augmentation de la tension (voir section 3.3.1.3).

3.3.1.1 Spray anti-statique

La première stratégie envisagée lors du début du stage pour augmenter la résistance du jig consistait à appliquer un spray anti-statique sur toutes les surfaces en contact avec le détecteur.

Le spray proposé est le Licron CrystalTM de la marque TECHSPRAY [39]. D'après le fabricant, ce spray anti-statique est applicable sur les métaux, plastiques, verres, peintures,

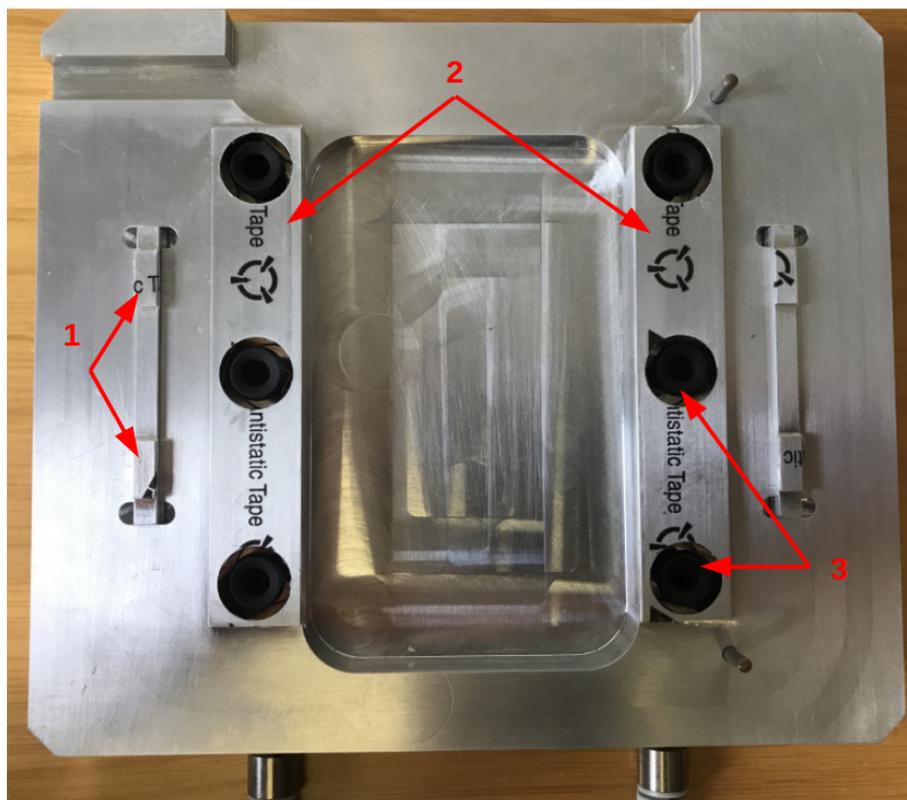


FIGURE 3.1 – Gabarit de micro-soudure utilisé pour la production des modules 2S (prototype). 1 : petits supports (*small pads*), 2 : grands supports (*large pads*), 3 : ventouses.

et d'autres surfaces. Il ajoute une couche fine, homogène, censé présenter une résistance de surface entre 10^6 et $10^9 \Omega$, parfaitement dans la gamme recherchée. Il peut fonctionner jusqu'à 155°C et n'est pas altéré par l'humidité.

Afin de valider ses propriétés, plusieurs tests ont été réalisés. Le premier test consiste à valider la méthode d'application, la bonne tenue sur les métaux, et enfin à vérifier la résistance électrique résultante sur l'ensemble de la surface traitée. Pour ce faire, 12 lames d'aluminium de $150 \times 30 \times 1 \text{ mm}^3$ sont préparées. Les échantillons sont nettoyés à l'hydroxyde de sodium (NaOH 1M), rincés abondamment à l'eau distillée, puis séchés. Les échantillons sont alors répartis en trois groupes :

- 6 échantillons pour application au spray
 - 2 en une couche
 - 2 en double couche
 - 2 en triple couche
- 4 échantillons pour application au pinceau
- 2 échantillons témoins

L'application au spray suit les recommandations du fabricant. L'application au pinceau consiste d'abord à recueillir du liquide via le spray dans un bêcher, puis d'appliquer de manière homogène au pinceau sur la surface concernée.

Sur chaque échantillon, le spray est appliqué sur une demi-face de la lame, afin de laisser une zone pour la manipulation et plus tard les prises de mesures de résistance. Les deux témoins servent pour soustraire la résistance de l'installation de mesure, et la résistance éventuelle des échantillons eux-mêmes.

Des photos sont prises des échantillons à différents moments pendant la phase de séchage : juste après application ($t = 0$), à $t = 10'$, $t = 20'$, $t = 30'$, $t = 60'$ et après 72h.

Résultats : immédiatement après application du produit (spray et pinceau), la couche est uniforme et translucide. Toute la zone semble couverte. Après seulement 10' de séchage à température ambiante, certaines zones semblent plus épaisses que d'autres, et une couleur bleu-grise apparaît. La couche ne semble plus uniforme. Au cours de la période de séchage, le phénomène s'intensifie légèrement. Après 72h, la couleur est renforcée, et des inhomogénéités importantes sont visibles. Les échantillons recouverts au pinceau présentent une couche légèrement plus homogène.

Les mesures à l'ohmmètre révèlent des zones de faible résistance (5.7Ω) et des zones de plus haute résistance ($> 1 M\Omega$). Ces difficultés d'application et d'homogénéité sont rédhibitoires pour une utilisation au contact des capteurs. Si un point de la surface présente une résistance presque nulle, toute charge accumulée pourra engendrer un pic de courant lors de la mise en contact.

Différentes solutions sont envisagées pour remédier à ce problème. Le fabricant est contacté sans succès. Un concurrent proposant un produit similaire est contacté, et semble proposer un produit présentant une bonne tenue homogène sur les métaux.

Cependant, un test de résistance à l'alcool de la couche se révèle infructueux : la couche appliquée, même après plusieurs jours de séchage, est rapidement diluée dans l'alcool. Or, les jigs doivent pouvoir être nettoyés régulièrement à l'alcool.

D'après les précisions du concurrent, leur produit ne résiste pas non plus à l'alcool. La solution utilisant un spray anti-statique est alors définitivement écartée.

3.3.1.2 Adhésif anti-statique

Une deuxième solution est envisagée : utiliser un adhésif anti-statique afin de recouvrir la surface métallique du jig sur les zones de contact avec le capteur (pads). Un premier adhésif transparent, visible sur la Fig. 3.1, était déjà utilisé lors du début du stage. Cet adhésif présente cependant plusieurs désavantages :

- il est transparent, ce qui rend difficile l'identification des zones non recouvertes, ou des points de fuite potentiels ;
- il est difficile à appliquer. Les adhésifs étant très fins, il est impératif de recouvrir toute la zone de contact. Une zone non recouverte présente un risque de passage du courant à travers l'air sur les quelques micromètres séparant les deux conducteurs ;
- sa résistance est proche de la limite basse désirée (de l'ordre du $M\Omega$).

Il est donc décidé de commander et tester plusieurs adhésifs similaires afin de sélectionner le plus adéquat. Trois sont finalement commandés et testés :

- l'adhésif déjà utilisé
- un adhésif noir
- un adhésif blanc plus épais

Le Tableau 3.1 présente les principales caractéristiques de ces différentes options.

Caractéristique	option 1	option 2	option 3
Fabricant	DESCO Europe	Multicomp Pro	DESCO Europe
Référence	242271	MP004375	242280
Couleur	transparent	noir	blanc
Résistance de surface [$G\Omega$]	1-100	0.001-1	100
Largeur [mm]	18	19	24
Longueur [m]	65.8	40	54.8
Prix (unité)	12.03 €	8.43 €	7.33 €

Tableau 3.1 – Sélection d'adhésifs anti-statiques. Les valeurs de résistance données sont celles indiquées par le fabricant.

Plusieurs tests sont effectués sur les trois types d'adhésifs : premièrement, la résistance est évaluée via un ohmmètre sur des échantillons appliqués sur des lames d'aluminium. Cette mesure ne représente cependant qu'une indication, car elle est réalisée à bas voltage. Des mesures de résistance à haut voltage (jusqu'à 1000 V) sont réalisées. L'option numéro 3 est rapidement écartée, car la surface de l'adhésif n'est pas lisse. D'aspect rugueux, il présente un risque pour la surface des capteurs.

Résultats : pour les deux options restantes, les tests révèlent une résistance de l'ordre du $M\Omega$ pour l'option 1, et de l'ordre du $G\Omega$ pour l'option 2.

Sur base de ces résultats, et des autres inconvénients de l'option 1 (transparence, difficulté d'application), l'option 2 est sélectionnée pour des tests plus poussés.

Pour ce faire, l'adhésif est appliqué sur le jig. Une lame d'aluminium est alors disposée sur les ventouses afin de simuler le capteur en silicium (voir Fig. 3.3). Le système de vide est enclenché, et la résistance entre la lame d'aluminium et le jig est mesurée pour différentes valeurs de tension entre 0 et 1000 V.

Le système de mesure haute tension est un simple circuit série composé d'une alimentation, d'une résistance $100\text{ k}\Omega$ et de la charge, ici le jig et la lame d'aluminium (voir Fig. 3.2).

En mesurant la tension d'alimentation et la tension à la résistance, il est possible d'en déduire la tension à la charge :

$$V_C = V_S - V_R . \quad (3.1)$$

Le courant est déduit de la tension aux bornes de la résistance :

$$i = \frac{V_R}{R} . \quad (3.2)$$

Les valeurs de tension et de courant permettent enfin d'estimer la résistance de la charge R_C , de la manière suivante :

$$R_C = \frac{V_C}{i} = 10^5 \times \left(\frac{V_S}{V_R} - 1 \right) \quad (3.3)$$

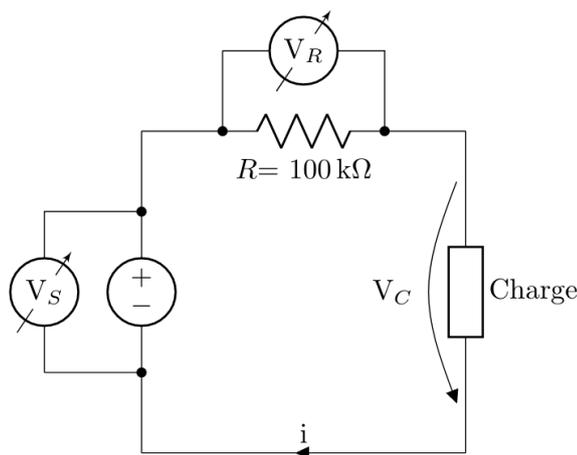


FIGURE 3.2 – Circuit de mesure de résistance.

Cette stratégie permet de se mettre au plus près des conditions réelles. C'est à l'occasion de ces tests, que le caractère conducteur des ventouses a été identifié. Il s'avère que le caoutchouc des ventouses est conducteur, particulièrement à haute tension. Alors que la résistance à basse tension donne environ $1\text{ k}\Omega$, elle diminue exponentiellement, pour atteindre une valeur proche de 0 avant 200 V.

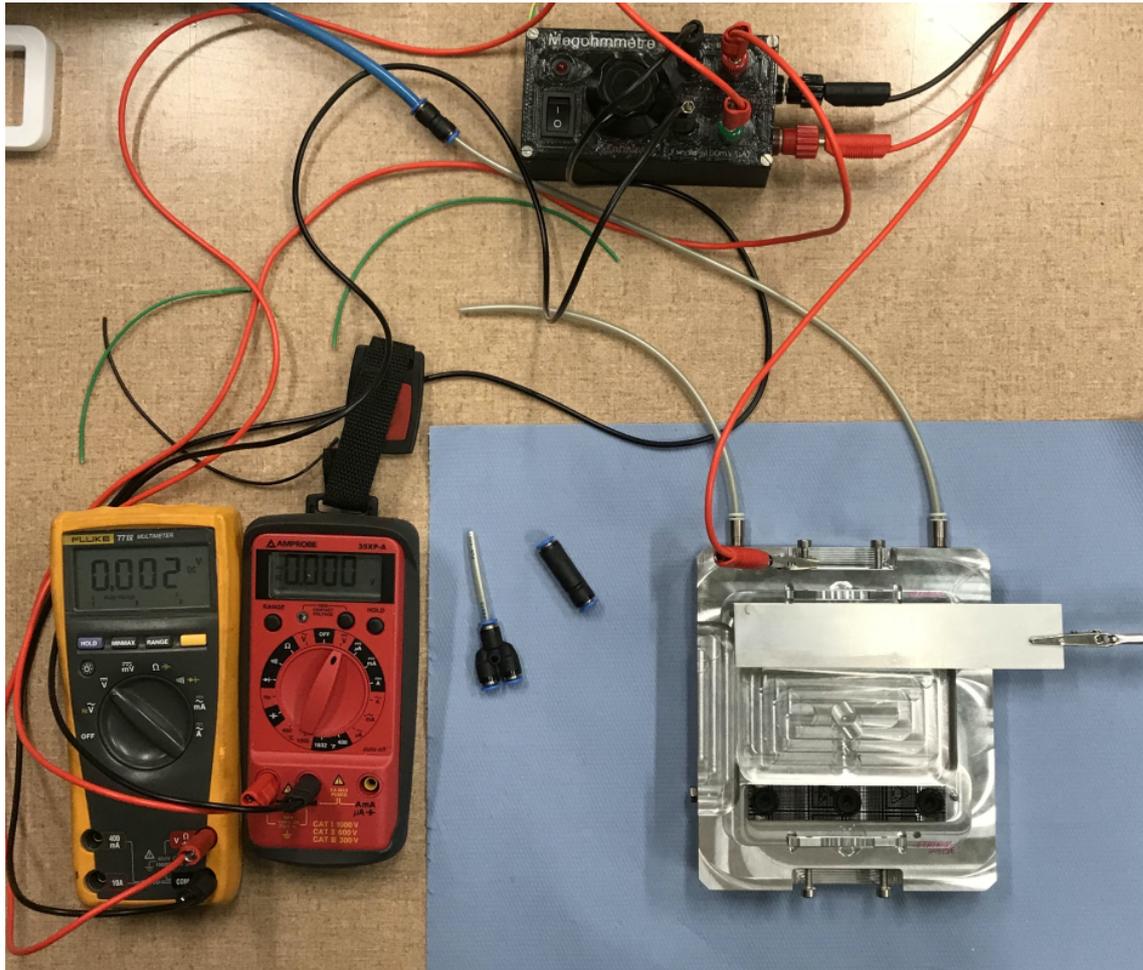


FIGURE 3.3 – Montage expérimental pour la mesure de résistance haute tension. À gauche, les deux voltmètres utilisés pour les mesures de tension d’alimentation et aux bornes de la résistance du circuit de charge (boîtier noir en haut). En bas à droite, le jig avec la lame d’aluminium simulant le capteur. Seul la moitié du système de vide est utilisé.

Les valeurs de résistance pour l’adhésif (option 2) sont entre 10 et 100 G Ω et ce jusqu’à 1000 V. Des tests de résistance à l’alcool ont également donné de bons résultats, sans modification mesurable des propriétés d’adhésion ou de résistance électrique. Cette option est donc retenue pour laminer la surface des jigs. Le problème de la découpe et de l’application précise sont traités dans la section 3.3.1.4.

3.3.1.3 Ventouses

Après avoir consulté le catalogue du fournisseur des ventouses, il s’avère qu’il propose 6 matériaux différents pour cette géométrie. Les 6 différents caoutchoucs sont donc commandés (2 exemplaires de chaque matériau), et des tests sont effectués pour mesurer la résistance entre 0 et 1000 V, ainsi que la résistance à l’alcool.

Résultats : les mesures de résistance sont visibles sur la Fig. 3.4.

On remarque que deux types de ventouses (BS et BF) ne conduisent pas l’électricité, ou présentent une résistance supérieure à 10^{12} Ω . Un type (BGN) est totalement conducteur (résistance inférieure à 10 Ω). Le type précédemment utilisé (BGS, en bleu sur le graphique), présente une décroissance rapide.

Deux matériaux, BN et BU (en vert et rouge sur le graphique) présentent cependant une résistance adéquate, entre 10 et 100 G Ω . Trois points de mesure de l'adhésif sélectionné sont également visibles (en noir sur le graphique).

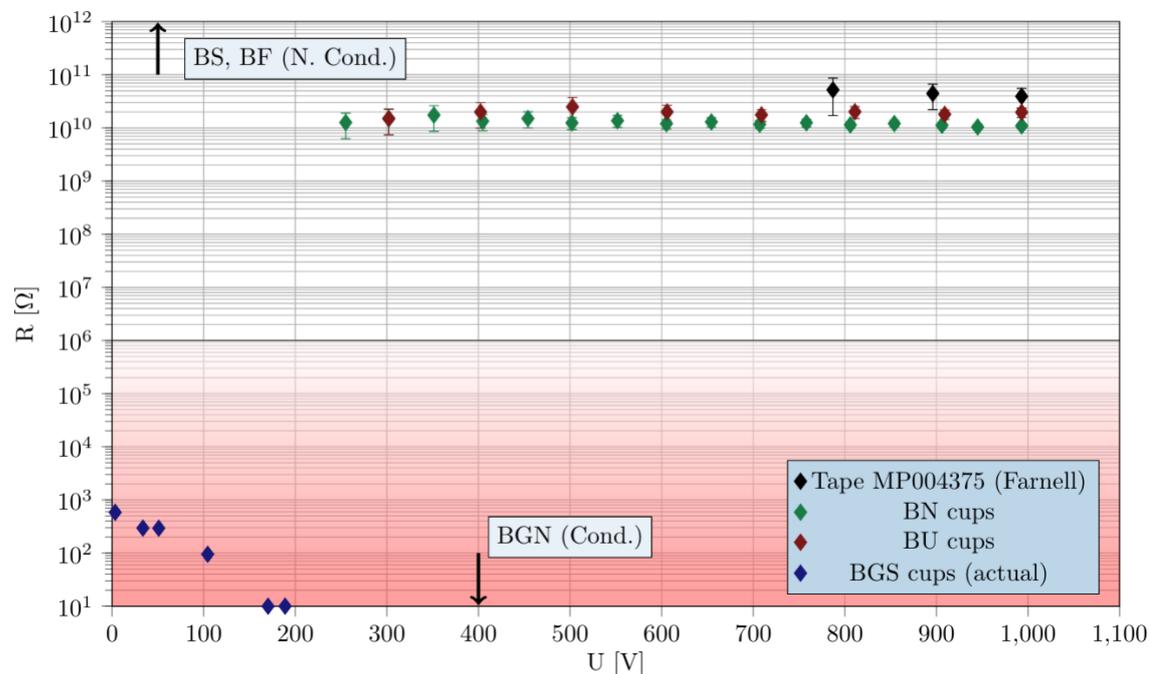


FIGURE 3.4 – Résistances mesurées pour les différentes ventouses

Afin de départager les deux derniers candidats, les propriétés de résistance chimique, en particulier la résistance à l'alcool, ont été testées. Les ventouses BN sont en caoutchouc au nitrile, tandis que les BU sont en caoutchouc à l'uréthane.

D'après des professionnels du secteur, la résistance à l'alcool éthylique ou méthylique n'est pas satisfaisante pour l'uréthane [17, 32, 33]. Concernant le nitrile, les conseils sont plus mitigés.

Afin de tester la résistance à l'alcool de ces deux matériaux, un dernier test a été effectué. Après une courte immersion dans un mélange de méthanol et d'éthanol n'ayant pas montré de modifications des propriétés, une ventouse de chaque matériau a été plongée dans l'alcool pendant une semaine complète.

Après plusieurs heures de séchage, les échantillons ont été analysés. Bien que plus faibles (10 M Ω à 1 G Ω) les valeurs de résistance sont toujours acceptables. Du point de vue de l'aspect, de l'élasticité et de la résistance mécanique, aucune différence n'a pu être mise en évidence. Les deux types de caoutchouc sont donc adaptés.

Dans la pratique, et en raison de la suspicion concernant la résistance chimique du caoutchouc uréthane, c'est la version en caoutchouc au nitrile qui a été recommandée.

3.3.1.4 Outils de découpe de l'adhésif

Maintenant que l'adhésif et le type de ventouse sont sélectionnés, il reste à trouver comment appliquer l'adhésif sur le jig de manière efficace et en évitant toute fuite.

Après avoir réalisé des essais d'application manuelle, plusieurs problèmes ont été mis au jour :

- il est difficile de découper de manière précise l'adhésif, principalement autour des cavités des ventouses ;
- il est nécessaire de retirer les ventouses avant l'application, afin d'éviter de déposer de l'adhésif sur le sommet des ventouses qui seront par la suite en contact avec le

capteur ;

- il est difficile de disposer l'adhésif précisément sur le jig.

Chaque erreur lors de la découpe nécessite généralement de recommencer depuis le départ, après avoir retiré l'entièreté de l'adhésif et nettoyé à l'alcool.

Afin de simplifier la procédure, un outil de découpe personnalisé et modulaire a été développé.

Cet outil doit permettre d'appliquer l'adhésif sur le jig, plus précisément sur les grands pads (zone des ventouses). Au total, trois versions de cet outil ont été réalisées : un premier prototype, ou *proof of concept*, une première version complète, et enfin une seconde version complète apportant quelques améliorations, issues des tests réalisés avec la version précédente.

On retrouve une vue 3D de l'ensemble des pièces sur la Fig. 3.5.

Le processus de découpe est le suivant :

1. les pièces rouge et orange sont superposées ;
2. l'adhésif est appliqué sur la pièce orange, à l'aide des 4 guides situés dans les coins ;
3. la pièce jaune est ajoutée au-dessus, et six pièces de maintien (non visibles sur la Fig. 3.5) permettent de serrer l'ensemble ;
4. la pièce de découpe (en vert) avec la lame(en gris) est alors utilisée pour percer les trois trous ;
5. toutes les pièces sont alors séparées, et la pièce orange est disposée sur le jig ;
6. à l'aide des guides situés sur les bords, le contour est découpé.

L'ensemble de l'opération ne prend que quelques minutes, et permet de laisser les ventouses en place lors de l'application de l'adhésif. Toutes les pièces ont été imprimées en plastique Poly-Lactic Acid (PLA).

Le mécanisme a été pensé pour laisser une marge de sécurité au niveau de la découpe. Au niveau des ventouses, une marge d'environ 1 mm est prévue. Sur les contours extérieurs, cette marge est légèrement plus petite (0.5 mm). Ces marges sont présentes afin d'éviter la présence de métal apparent du point de vue du capteur. Une découpe trop proche du bord implique un risque en cas de décalage, même léger, lors de l'application.

Des photos des résultats sont visibles en Annexe A.1 page 107. On remarque que la découpe est nette, et que la couverture est uniforme. Quelques légers défauts sont parfois visibles au point d'insertion de la lame, ou en début de découpe au niveau du contour externe, mais la marge de sécurité permet d'éviter de devoir recommencer la pose.

En dernier lieu, des tests complets, avec l'adhésif et les ventouses sélectionnées, ont été réalisés afin de valider les valeurs de résistance. Les résistances électriques mesurées sont très semblables avec les deux types de ventouses, et les valeurs sont proches de $10\text{ G}\Omega$ (voir Annexe A.1 page 107).

3.3.2 Mesure de grains de colle

Comme expliqué dans le Chapitre 1, les modules 2S sont fabriqués par assemblage de différentes pièces de support en alliage d'aluminium et de fibres de carbone et de pièces de Kapton. Ces composants sont collés sur les capteurs silicium. Afin de permettre une évacuation optimale de la chaleur générée lors du fonctionnement, les colles utilisées doivent posséder des propriétés de conduction de la chaleur et d'isolation électrique spécifiques.

À cette fin, une colle époxy bi-composants, la Polytec TC437 (P437), est utilisée. Les colles époxy sont généralement constituées de deux composants : une résine (éventuellement chargée) et un durcisseur, qui doivent être mélangés afin d'entraîner la prise.

Dans le cas de la P437, la partie A comporte des micro-particules en nitrure de bore afin d'améliorer les propriétés de conduction thermique de la colle. Le fabricant spécifie une

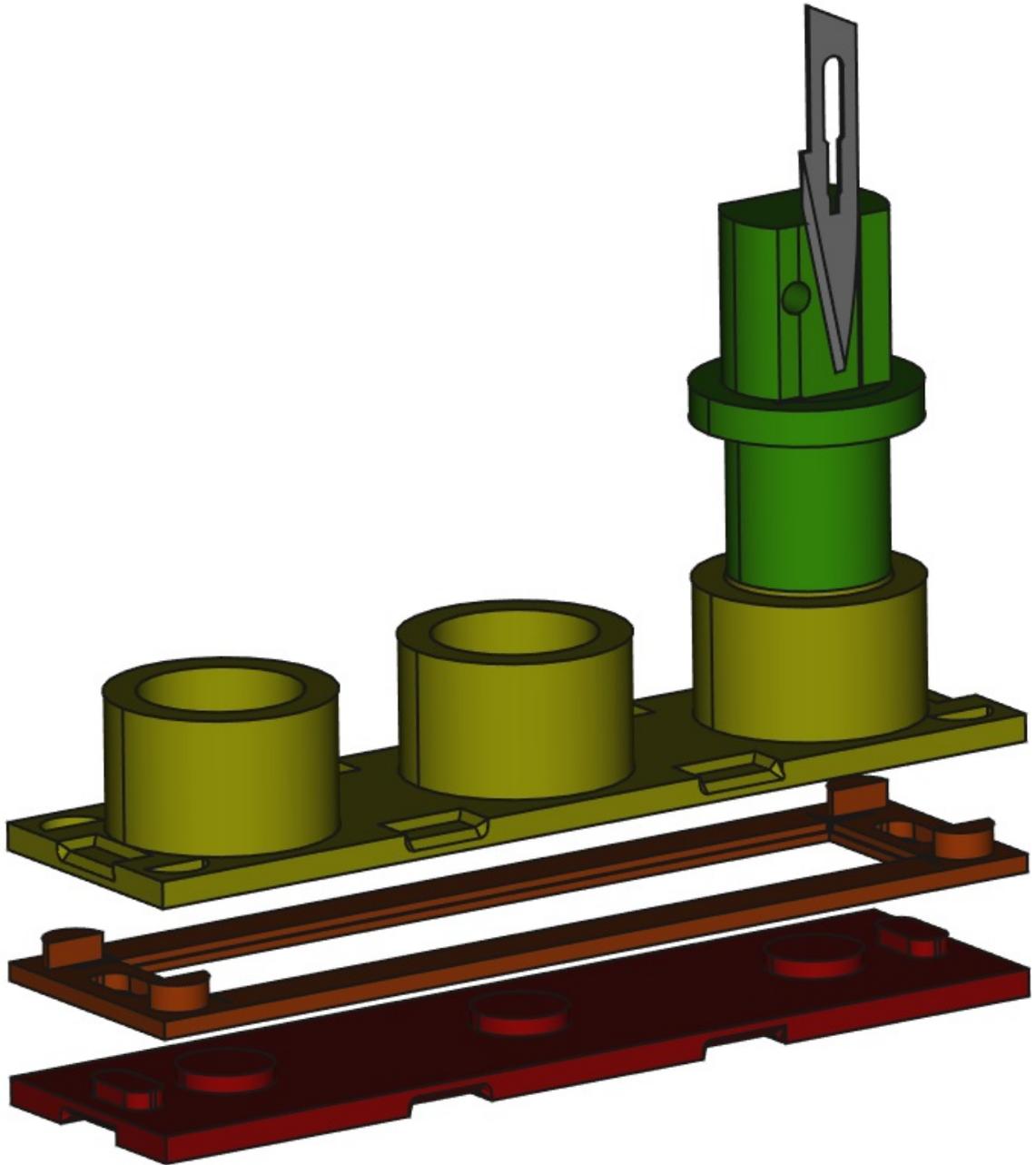


FIGURE 3.5 – Outil de découpe de l'adhésif. En rouge, la pièce consiste en un négatif de la surface du jig. En orange, la pièce sur laquelle l'adhésif est déposé, qui sert également en fin de découpe l'application sur le jig. En jaune, le guide pour la découpe des trous pour les ventouses. En vert, le support rotatif de la lame. En gris, la lame de bistouri permettant la découpe.

taille de particules inférieure à $20 \mu\text{m}$.

La taille de ces particules est d'une importance cruciale : s'il s'avère que des particules de plus gros diamètre sont présentes, elles pourraient entraîner une couche de colle d'une épaisseur trop importante, mettant alors en péril l'assemblage des modules.

Il est donc capital de pouvoir vérifier la taille de ces particules, et ce de façon régulière, afin de s'assurer de la conformité des lots successifs.

La partie A de la colle est thixotropique, plus dense que l'eau (1.38 g.cm^{-3}) et de couleur blanche laiteuse. L'objectif premier est donc de diluer la colle, de manière à pouvoir isoler des grains pour pouvoir les observer et mesurer leur taille.

Microscopes : deux microscopes sont disponibles au laboratoire : un microscope numérique, et un microscope optique. Le second permet un plus fort grossissement, mais ne permet pas de prendre des photos facilement. Le microscope numérique possède lui un écran LCD, et permet la prise de photos et l'enregistrement sur carte micro-SD ou directement connecté à un ordinateur. La seconde différence majeure réside dans leur mode de fonctionnement. Le microscope optique fonctionne en transmission, tandis que le numérique fonctionne en réflexion ou transmission.

Le mode réflexion permet d'observer la surface d'objets qui ne sont pas assez minces pour laisser passer la lumière.

Méthode de dilution de la colle : afin de diluer la colle, plusieurs méthodes ont été testées. La simple dilution dans l'eau distillée s'est révélée laborieuse. L'observation au microscope indique la présence d'agglomérats de grande taille (plus de $100 \mu\text{m}$). Il est indispensable de confirmer que ces agglomérats sont solubles, et effectivement composés de particules plus petites.

L'ajout d'alcool n'améliore pas grandement le processus de dilution.

La meilleure solution trouvée consiste à diluer la colle dans de l'acétone. La dilution est quasiment immédiate. Étant donné la taille et le nombre de grains présents, il est plus intéressant de ne diluer qu'une toute petite quantité de colle dans plusieurs millilitres d'acétone. Du fait de l'évaporation rapide de l'acétone, le mélange est instable au niveau microscopique. Lors de l'observation entre deux lames, les particules se déplacent rapidement, et des agglomérats se forment également. Afin de diminuer ce taux d'évaporation, de l'eau distillée est ajoutée en fin de dilution (environ cinq fois plus d'eau que d'acétone). De manière à éviter la formation des agglomérats, un surfactant est ajouté, ici du simple savon de cuisine. Il permet d'éviter la formation des agglomérats. Afin de s'assurer que le savon n'apporte pas des particules, un échantillon blanc (sans colle) est observé.

Méthode de mesure : deux méthodes de mesure ont été utilisées, une avec chaque microscope. Avec le microscope numérique, des images ont été prises, converties en niveaux de gris, puis en noir et blanc (à l'aide d'un seuil). Sur base de ces images binaires (voir Fig. 3.6), un algorithme écrit en *Python*, spécialement développé pour l'occasion, a permis de mesurer la taille de plusieurs milliers de grains.

Lors de la prise de ces images, la formation d'agglomérats n'était pas encore bien comprise. La résolution des images est de $4.20 \mu\text{m}$ par pixel. L'algorithme (dont le code est disponible en Annexes A.2 page 109) mesure le diamètre des grains de trois manières différentes :

- mesure de la largeur des groupes de pixels ;
- mesure de la hauteur des groupes de pixels ;
- mesure de la surface de l'ensemble des pixels de chaque groupe et calcul du diamètre du disque de même surface.

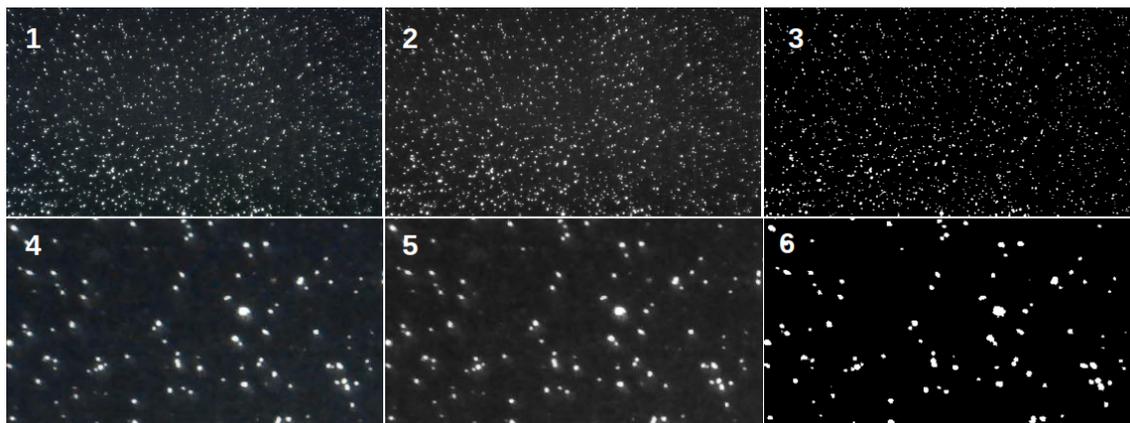


FIGURE 3.6 – Visualisation des grains au microscope numérique. À gauche, les images couleurs originales, au centre les images en niveaux de gris et à droite les images en noir et blanc après application du seuil. Les images 4,5 et 6 sont un zoom de l'image supérieure.

Ces trois méthodes donnent des résultats proches, avec des diamètres moyens de 20.0, 18.8 et 19.3 μm respectivement (écart-type autour de 10.0 μm pour les trois mesures).

Le code est donc fonctionnel, mais l'observation au microscope optique indique la présence d'agglomérats, et une taille de grains de l'ordre de quelques μm seulement. La résolution du microscope numérique n'est donc plus suffisante.

Une fois les agglomérats dilués, des mesures sont prises au microscope optique, à l'aide d'une lame de comptage, habituellement utilisée pour compter des globules rouges (voir Fig. 3.7).

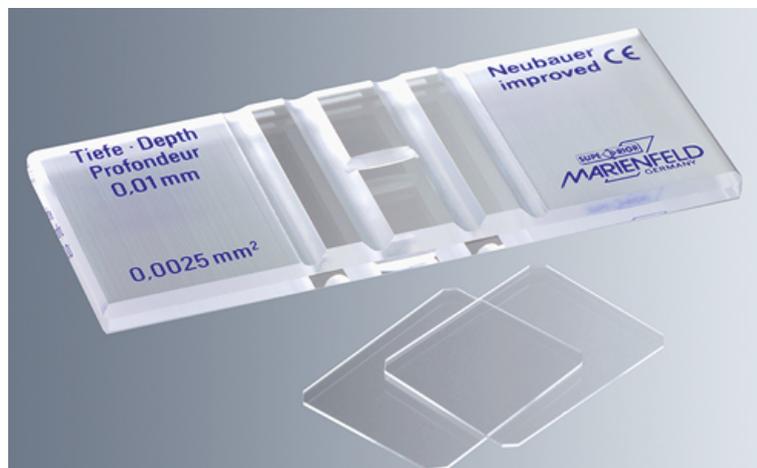


FIGURE 3.7 – Lame de comptage pour globules rouges.

Cette lame permet d'estimer la taille des particules. L'espace entre la lame de comptage et la contre-lame est de 100 μm . Des lignes espacées de 50 μm forment un quadrillage permettant les mesures.

Des photos prises à travers l'objectif du microscope optique sont visibles sur la Fig. 3.8. En modifiant la mise au point, il est possible d'apercevoir la grille de mesure sur la photo. L'inspection visuelle confirme bien une taille des particules inférieure à 20 μm . Cependant, la méthode ne permet pas de conserver des échantillons pour archivage ou analyse future. Lors de la présentation des résultats en réunion générale de l'*upgrade* de CMS (réunion regroupant environ 50 chercheurs issus des différents centres de recherche impliqués à travers le monde), une méthode complémentaire est proposée, consistant à presser la colle entre

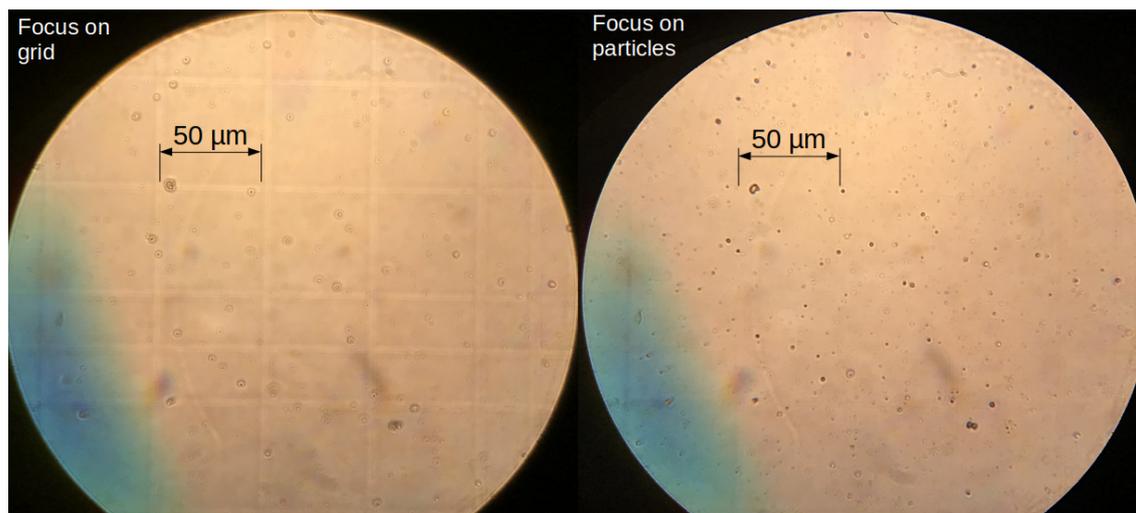


FIGURE 3.8 – Observations au microscope optique. À gauche, la mise au point laisse voir la grille de mesure. À droite la mise au point permet d’identifier les particules individuelles.

deux plaques planes, d’appliquer une pression identique aux paramètres de production, et de mesurer l’épaisseur fonctionnelle de la colle. Cette méthode a l’avantage de donner une preuve fonctionnelle, et un échantillon pouvant être conservé. La méthode est de plus assez simple et rapide à mettre en place.

La méthode d’analyse par microscope a cependant permis de donner une idée de la taille des particules, et a mis en évidence la formation d’agglomérats solubles.

3.3.3 Centrifugeuse

Comme expliqué précédemment, plusieurs colles sont nécessaires à l’assemblage des modules 2S. Deux de ces colles doivent être dispensées très précisément. Dans ce but, un robot est en cours de développement à l’IIHE. Ce robot utilise un pousse seringue pour appliquer précisément de la colle sur les différentes pièces à coller. Comme souvent, ces colles sont bi-composants, et nécessitent donc d’être préparées au laboratoire avant utilisation. Le problème rencontré ici est le suivant : lors de la préparation de la colle, les deux composants sont ajoutés dans des proportions précises, puis le tout est mélangé pendant un certain temps par un mélangeur robotisé. Lorsque la préparation est prête, la colle est transférée dans des seringues. Lors de ce transfert, il est très difficile d’éviter la formation de bulles dans la colle. Ces bulles d’air peuvent poser problème lors de l’utilisation avec le robot. La colle étant relativement visqueuse, les bulles ne remontent pas à la surface par la simple action de la gravité, du moins pas en un temps raisonnable.

Il est donc nécessaire de trouver un moyen de retirer ces bulles d’air. Deux solutions sont envisagées :

- un transfert de la colle sous vide (ou du moins à pression réduite) afin de limiter la quantité d’air présente dans les bulles. Lors du retour à la pression ambiante, les bulles devraient alors grandement diminuer en volume ;
- utiliser une centrifugeuse pour accélérer le processus de remontée des bulles.

Après analyse des deux options, il semble que la première soit plus complexe à mettre en place, qui plus est pour un résultat imparfait (diminution des bulles en taille). La deuxième méthode est donc sélectionnée pour des tests plus poussés.

Preuve de concept : afin de valider l’hypothèse (possibilité de retirer les bulles en utilisant une centrifugeuse), et trouver l’accélération et la durée nécessaire, un premier

prototype simple a été mis au point : une pièce imprimée en 3D permet de maintenir une seringue en place dans une essoreuse à salade (voir Fig. 3.9).



FIGURE 3.9 – Preuve de concept de la centrifugeuse. Une simple essoreuse à salade est utilisée pour centrifuger la seringue de colle.

Les résultats indiquent clairement qu'il est possible de retirer efficacement les bulles de la colle. Cependant, le temps nécessaire pour arriver à un résultat satisfaisant est relativement élevé, et la prise n'est pas très bonne sur le dessus de l'appareil.

Il faut donc trouver un moyen de tourner à vitesse plus élevée, et de réaliser l'opération de manière automatique. Après avoir recherché une centrifugeuse adéquate sur le marché, il ressort que les prix sont élevés, et que les options demandent le plus souvent des modifications afin de permettre l'utilisation des seringues, dont la taille n'est pas habituelle dans le domaine de la centrifugation.

La fabrication d'une centrifugeuse « maison » débute donc, avec la possibilité de récupérer de nombreuses pièces déjà présentes dans le laboratoire. Cette centrifugeuse sera spécifiquement pensée pour l'application concernée, et donc optimisée par rapport à une solution commerciale.

La centrifugeuse s'articule autour d'un moteur DC 24 V et 3000 tours par minute. Les seringues sont fixées à l'arbre via une pièce imprimée en 3D. Le moteur est commandé par un *driver* de type BTS7960 (voir Fig. 3.10). L'ensemble de la gestion est effectué sur un Programmable System-on-Chip (PSoC) en version 5LP (Cypress).

Afin de stabiliser la vitesse, un ensemble émetteur/récepteur infrarouge détecte une alternance de bandes sombres et claires sur la partie inférieure de l'arbre du moteur. Enfin, un certain nombre de boutons et de LED sont prévus ainsi qu'un écran LCD pour l'affichage d'état.

Au niveau de l'alimentation, elle est assurée par une alimentation DC 24 V branchée sur secteur. La partie logique, nécessitant du 5 V, est alimentée via un régulateur de tension branché sur l'alimentation 24 V.

L'ensemble du dispositif est fixé sur une plaque de support.

Au niveau de la sécurité, plusieurs systèmes ont été mis en place :

- l'alimentation principale dispose d'une prise terre, branchée sur la carcasse métallique de l'appareil ;
- une grille en acier est installée tout autour du moteur et des parties rotatives ;
- un capteur détecte la position fermée/ouverte du couvercle. Si le couvercle est ouvert, ou le fil coupé, le démarrage du moteur est impossible (fonction implémentée en *hardware* au niveau du PSoC) ;

- un bouton d'arrêt d'urgence (type champignon) est ajouté au dispositif, et contrôle la partie puissance. La partie logique n'est pas affectée par ce bouton.

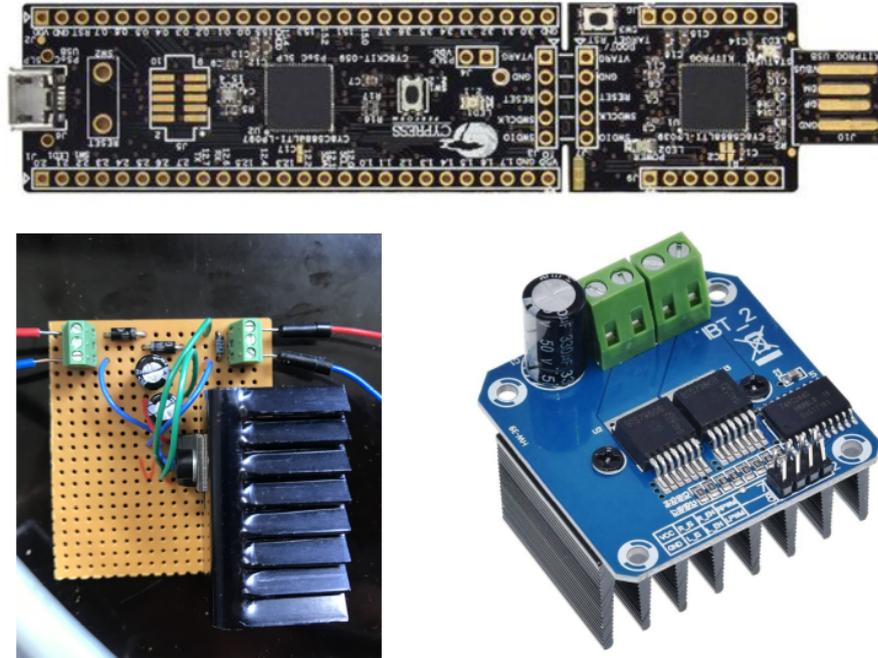


FIGURE 3.10 – Composants électroniques de la centrifugeuse. En haut le PSoC 5LP (Cypress), en bas à gauche le régulateur soudé pour l'occasion et son radiateur. En bas à droite le *driver* BTS7960.

L'ensemble de ces mesures doit permettre une utilisation sans risque du dispositif, y compris par une personne ne connaissant pas le matériel. Le moteur est automatiquement coupé si le couvercle est ouvert pendant l'utilisation. En cas de défaut de la pièce supportant les seringues, la structure en acier empêche la sortie des débris ou de la seringue effectuant environ 30 rotations par seconde.

Une vue d'ensemble du prototype fonctionnel est visible sur la Fig. 3.11.

Arrivé en fin de stage, il reste encore un certain nombre de tâches à réaliser sur le prototype, notamment au niveau de l'arrangement des câbles, de la programmation et de diverses autres améliorations. Cependant, le prototype est fonctionnel et permet de retirer efficacement les bulles de la colle en moins d'une minute.

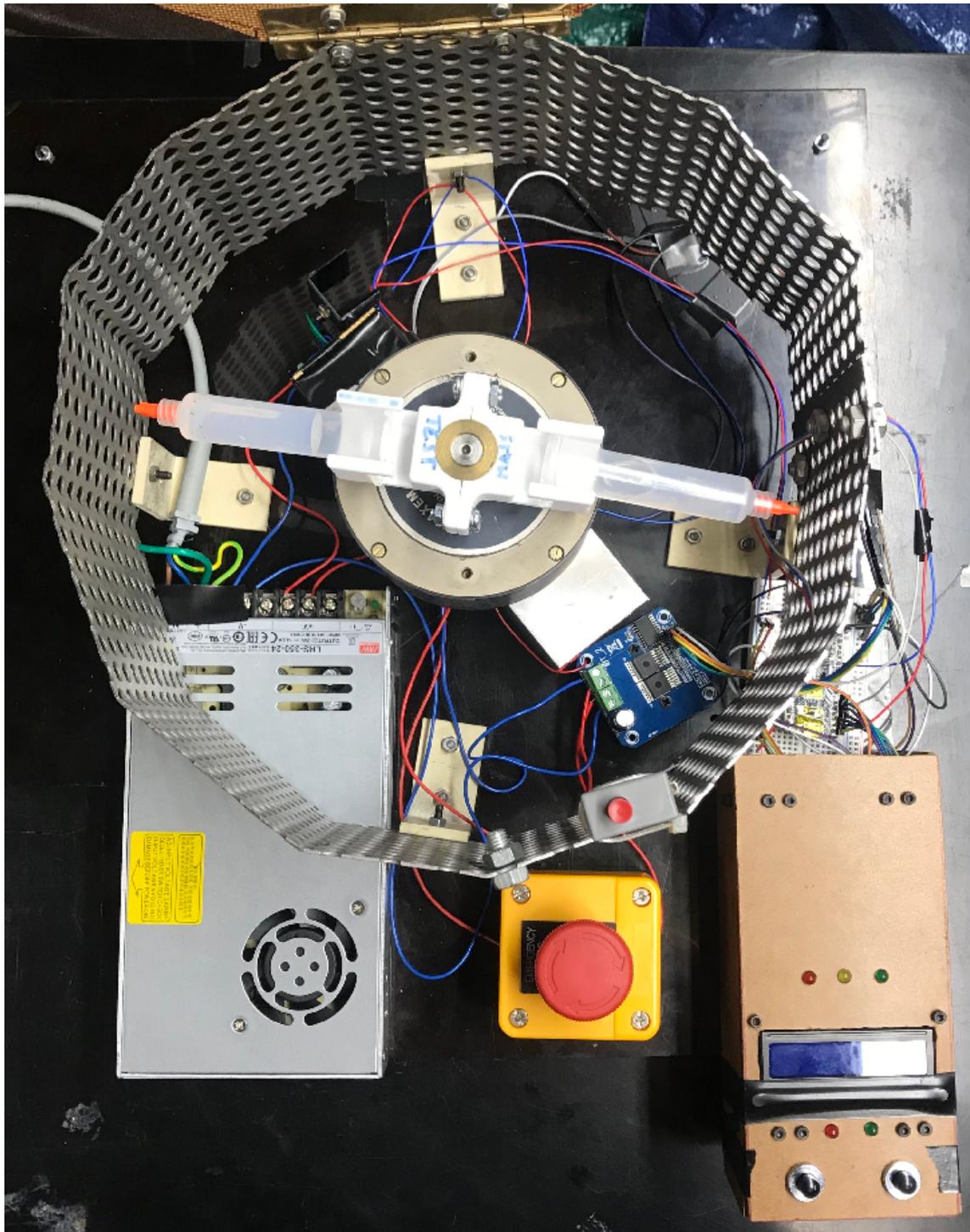


FIGURE 3.11 – Vue d'ensemble de la centrifugeuse. On remarque en bas à gauche le bloc d'alimentation. En bas à droite le panneau de commande avec l'écran et les boutons de contrôle. Au milieu le moteur DC avec deux seringues en place.

3.4 Conclusion sur le Stage

Tout au long de ce stage, de nombreuses disciplines ont été abordées : de la chimie, de l'optique, de l'informatique, de la mécanique et de l'électronique.

Dans un premier temps, le stage s'est concentré sur la gestion et la protection contre les décharges électrostatiques au niveau des gabarits de micro-soudure utilisés pour la fabrication des modules 2S. Une solution a été trouvée permettant de protéger le capteur silicium du contact avec les parties métalliques conductrices du gabarit. L'application d'un adhésif anti-statique ainsi qu'une modification du matériau sélectionné pour les ventouses du système de vide ont permis d'atteindre les objectifs fixés en matière de résistance.

Dans un second temps, l'analyse des grains d'une colle bi-composants a permis la mise au point d'un algorithme d'analyse d'image, ainsi que le développement d'un processus chimique visant à dissoudre la colle, tout en évitant la formation d'agglomérats. Il a été confirmé que les grains sont bien inférieurs à 20 μm de diamètre, et donc conformes aux exigences en la matière.

Enfin, une centrifugeuse maison a été développée à partir de matériel récupéré dans le laboratoire. Cette solution s'est révélée efficace dans le retrait des bulles d'air présentes dans une autre colle. L'ensemble de la centrifugeuse a été développé en interne, afin de proposer un outil hautement spécialisé et efficace.

Deuxième partie

Plan de Recherche

Introduction

Dans cette seconde partie du mémoire, la problématique ainsi que la méthodologie sont présentées. L'objectif est de donner une vision claire des enjeux liés à l'*upgrade* de CMS, et de proposer une approche pertinente, à même d'apporter un éclairage nouveau sur une partie des problèmes rencontrés.

Le premier chapitre est consacré à la définition de la problématique dans le détail, en se basant sur les notions théoriques et de mise en contexte développées dans la première partie du mémoire.

Le deuxième chapitre propose une méthodologie appropriée afin de répondre aux questions soulevées dans le chapitre précédent. L'accent est mis sur la stratégie de résolution du problème, ainsi que sur les limites et biais potentiels de la méthode utilisée.

Le troisième chapitre discute du choix du logiciel de simulation, et présente en détail les paramètres sélectionnés, les hypothèses simplificatrices ainsi que les biais potentiels liés à la simulation.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre présente les outils et méthodes utilisés pour l'analyse des données issues des simulations. Une fois de plus, les biais et limitations sont explorés, afin de permettre une vision claire du cadre de validité de l'étude.

Contenu

4.1 Description de la Problématique	51
4.2 État de l'Art	52
4.2.1 Choix de la Technologie des Capteurs	53
4.2.2 Tests des Mini Modules	53

Ce chapitre a pour but de présenter les problématiques traitées dans le cadre de ce mémoire. L'objectif est d'identifier la chaîne causale d'événements menant au problème, afin de pouvoir, dans le prochain chapitre, proposer une approche de résolution adéquate. La description de la problématique prend place dans la première section, suivie par une synthèse bibliographique, détaillant et résumant les derniers résultats publiés, liés au domaine cible.

4.1 Description de la Problématique

Comme expliqué dans la première partie de ce mémoire, le CERN est, depuis plusieurs années maintenant, engagé dans un programme de modernisation de son collisionneur principal, le Large Hadron Collider. Cette modernisation, qui doit permettre d'augmenter significativement le potentiel de découverte du complexe de recherche, s'accompagne d'une modification conséquente des expériences y prenant place.

Parmi les différentes expériences réalisées au CERN, la collaboration CMS gère un ensemble de détecteurs du même nom, dont une grande partie des éléments vont devoir être remplacés.

Deux problèmes majeurs ont montré à la nécessité de remplacer les modules du trajectographe de l'expérience CMS :

1. l'accroissement de la luminosité du collisionneur dans la phase de HL-LHC va grandement augmenter l'irradiation des composants, principalement ceux situés au plus près de la zone nominale de collision (trajectographe interne). Les détecteurs actuellement présents dans CMS ayant déjà reçu une dose importante, et n'ayant pas été pensés pour des doses plus élevées, ils doivent nécessairement être remplacés.
2. l'accroissement du nombre de collisions lors de chaque croisement de paquets de protons augmente considérablement la quantité de données à traiter. La straté-

gie actuellement utilisée dans l'expérience CMS ne permet pas de traiter une telle quantité de données. Afin de pouvoir bénéficier pleinement de l'accroissement de luminosité, il est donc indispensable de proposer une stratégie de réduction de la quantité de données.

Afin de répondre à la première problématique, l'ensemble des éléments du trajectographe (interne et externe) vont être remplacés. Les modules actuellement dans CMS, déjà fortement irradiés, vont être retirés, et de nouveaux modules vont être installés. En plus de remplacer les modules, les nouvelles versions comporteront un certain nombre d'améliorations censées les rendre moins sensibles aux Rayonnements Ionisants (RI). Comme expliqué dans le Chapitre 2, la technologie n-in-p permet une meilleure résistance aux RI. Au niveau du trajectographe interne, la dose de RI est telle, qu'il est prévu pour être facilement remplacé en cas de nécessité.

Pour répondre à la seconde problématique, une stratégie innovante, consistant à augmenter les capacités du trigger de niveau 1, a été développée. Cette stratégie repose en grande partie sur la capacité du trigger à identifier les événements d'un intérêt scientifique supérieur. Ces événements d'intérêt sont souvent associés à la création de particules de grande quantité de mouvement transverse (p_T). Afin d'identifier de telles particules, les modules du trajectographe externe doivent être capables de les séparer de la quantité importante de particules de plus faible p_T . Si cette séparation n'est pas possible, l'accroissement de luminosité du collisionneur perd son intérêt.

Au niveau des modules 2S du trajectographe interne, cette discrimination en p_T est réalisée par la corrélation des clusters détectés sur les deux détecteurs à pistes (ou strips) situés de part et d'autre du module (voir le Chapitre 1 pour plus de détails).

L'objectif de ce mémoire consiste en l'étude des performances de discrimination en p_T des modules 2S de l'upgrade de CMS, à l'aide de simulations Monte-Carlo (MC).

Dans ce cadre, plusieurs questions se posent :

- quelle est l'efficacité de rejet des particules dont le p_T est inférieur au seuil ?
- quelle est l'efficacité de détection des particules dont le p_T est supérieur au seuil ?
- quelle est l'efficacité de détection des particules dont le p_T est proche du seuil ?
- quelle est l'influence du champ magnétique sur l'efficacité de rejet/de détection des particules ?
- quelle est l'influence des électrons δ sur l'efficacité de rejet/de détection ?
- quelle est l'influence d'un mauvais alignement des deux capteurs au silicium ?
- quelle est l'influence de la version de la puce CBC (version 2 ou 3) ?
- quels sont les différences entre les mini-modules et les modules de taille réelle ?

La méthodologie présentée dans ce mémoire (voir chapitre suivant), vise à apporter des éléments de réponse à ces questions, à l'aide de simulations MC des modules 2S.

Avant de mettre au point cette méthodologie, il est nécessaire de réaliser une revue de la littérature existante sur le sujet, afin de tirer profit des études déjà réalisées sur le sujet.

4.2 État de l'Art

Cette section a pour but de faire un état des lieux des connaissances et des résultats des expériences réalisées, en lien avec la problématique exposée précédemment. Un certain nombre d'articles de ces dernières années traitent du développement des modules 2S de l'upgrade de CMS.

Depuis le début des années 2010, un certain nombre de tests en faisceaux ont été effectués, à la fois sur des prototypes miniatures (appelés *mini-modules*) et sur des modules de taille réelle (appelés *full-size modules*).

Deux principales phases se sont succédées : la première consistait à sélectionner et valider l'utilisation d'une technologie de capteurs au silicium. De nombreux tests ont été effectués en ce sens.

Une fois la technologie sélectionnée, le fabricant a pu commencer la production de capteurs, d'abord de petite taille, puis de taille réelle. Du côté des centres de production des modules, le travail a commencé en amont, avec la fabrication de modules factices (*dummy modules*) servant à valider les processus de fabrication.

Rapidement après l'arrivée des premiers capteurs fonctionnels, la fabrication de mini-modules fonctionnels a pu commencer. Une fois les premiers modules terminés, ceux-ci ont pu être testés en faisceau dans divers laboratoires.

4.2.1 Choix de la Technologie des Capteurs

Comme expliqué dans le Chapitre 2, plusieurs technologies sont envisageables pour la fabrication des détecteurs à pistes au silicium.

Dans le cadre de l'*upgrade* de CMS, trois technologies ont été testées pour le silicium :

- des détecteurs n-in-p
- des détecteurs p-in-n
- des détecteurs n-in-n

Les trois variantes ont été testées avant et après irradiation lors de différentes recherches [6, 7, 31]. Il ressort de ces différentes études que les détecteurs p-in-n présentent une composante de bruit non-gaussienne après irradiation [3, 6]. De plus, cette technologie ne peut pas être utilisée en dessous de la tension de déplétion complète, ce qui oblige à augmenter davantage la tension après irradiation, afin de toujours collecter les charges.

Concernant les n-in-p, il a été confirmé que l'isolation des pistes était possible même après irradiation, à l'aide de p-stop ou p-spray. La résistance est toujours très importante [3].

Les n-in-n, également envisagés, se révèlent plus complexes à mettre en œuvre, plus coûteux, et plus fragiles au niveau de la face arrière (*backside*), sans présenter d'avantages particuliers comparativement aux n-in-p.

À faible irradiation, les détecteurs p-in-n présentent un meilleur signal, mais la tendance s'inverse après une irradiation plus importante [6]. Les n-in-p se sont montrés capables de fonctionner correctement jusqu'à des doses totales de l'ordre du double de celles qui seront expérimentées tout au long de la durée de vie du HL-LHC [6].

Des tests ont également été réalisés pour valider plus spécifiquement l'effet des dommages liés aux RI sur des capteurs de différentes épaisseurs (240 ou 290 μm d'épaisseur) [31]. Les résultats sont positifs, et confirment que dans les deux cas, les capteurs seront fonctionnels même après une irradiation aux neutrons et aux rayons X à une dose équivalente au double de celle reçue pendant toute la phase du HL-LHC.

Pour toutes ces raisons, la technologie n-in-p a été sélectionnée par la Collaboration CMS pour la fabrication des modules 2S.

4.2.2 Tests des Mini Modules

Une fois les premiers mini-modules fonctionnels produits, ces derniers ont pu être testés en faisceau de particules lors de différents tests réalisés au Fermilab (FNAL) aux États-Unis, au centre DESY en Allemagne ainsi qu'au CERN, dans la seconde moitié des années 2010 [1, 4, 21].

Ces tests en faisceau consistent à placer un mini-module dans un ensemble de détecteurs silicium, constitués de pixels (voir Fig. 4.1).

Les particules incidentes traversent toutes les couches sensibles, dont le mini-module 2S. À l'aide du trajectographe, la trajectoire de la particule est reconstruite, avec une précision de quelques micromètres. Les données sont alors comparées aux données issues

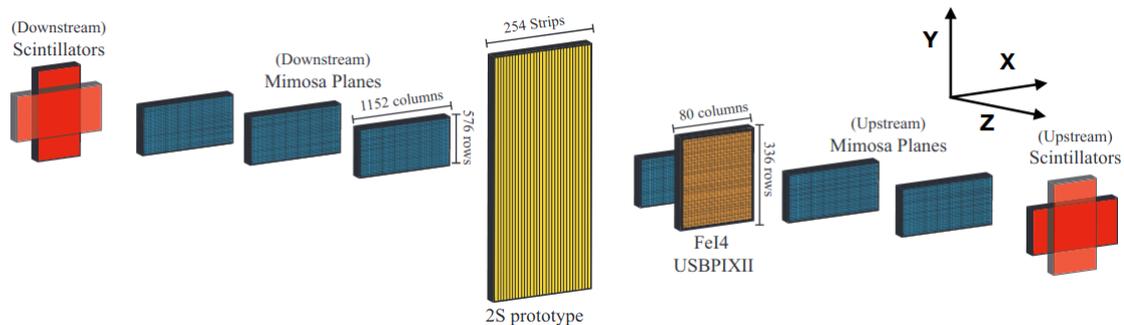


FIGURE 4.1 – Schéma de l'installation expérimentale utilisée pour les tests en faisceau des premiers mini-modules. On remarque le module au milieu en jaune [1].

des deux capteurs du module, afin de vérifier la réponse de ce dernier au passage d'une particule.

Différentes propriétés des modules et des pistes sont alors vérifiées, comme le bruit dans chaque piste, la largeur des clusters, etc.

Une rotation du module par rapport à l'ensemble de détection permet de simuler la présence d'un champ magnétique. Selon les cas, la logique de formation des stubs est réalisée via les puces CBC et/ou cette logique est simulée hors ligne, sur base des données brutes récupérées.

L'article de W. ADAM *et al.* de 2020 [1] détail un certain nombre de tests réalisés sur des mini-modules et sur un module de taille réelle.

Comme expliqué lors de la description de la problématique, l'objectif de ces études est avant tout de valider la logique de discrimination en p_T des modules, et leur bon fonctionnement avant et après irradiation. À ce titre, la courbe caractéristique, visible sur la Fig. 4.2, représente l'évolution de l'efficacité de détection des stubs (*stub efficiency*) en fonction de l'angle d'incidence des particules (pour rappel, cet angle simule des particules de p_T différent, dont la trajectoire est courbée par le champ magnétique de CMS).

Pour rappel, chaque cluster situé sur le premier capteur ouvre une fenêtre de corrélation sur le second capteur. Si un cluster est détecté dans cette fenêtre, on considère qu'une stub est formée.

L'efficacité de détection des stubs correspond au rapport entre le nombre d'événements pour lesquels une stub est détectée et le nombre d'événements. Dans les deux cas, seuls les événements où une seule trajectoire a été identifiée par le dispositif de test sont pris en compte.

On remarque sur la Fig. 4.2 que les mini-modules sont capables de discriminer en fonction de l'angle (du p_T simulé) de la particule incidente. Plus l'angle augmente, plus la probabilité est faible qu'un cluster soit détecté dans la fenêtre de corrélation. À l'inverse, lorsque l'angle est faible, le cluster du second capteur est presque toujours situé dans la fenêtre de corrélation.

La correspondance entre l'angle et le moment transverse simulé de la particule se calcule de la manière suivante [1] :

$$p_T[\text{GeV}] = \frac{0.57 \times R[\text{m}]}{\sin(\alpha)} \quad (4.1)$$

avec R la position du module dans CMS par rapport au point nominal de collision, et α l'angle d'impact de la particule par rapport au capteur. Dans le cas de la Fig. 4.2, un rayon de 0.6 m a été utilisé pour les calculs.

Une fenêtre de corrélation de ± 5 strips a été utilisée. Le décalage important visible entre les courbes des deux modules (irradié et non-irradié) est dû en grande partie à la différence

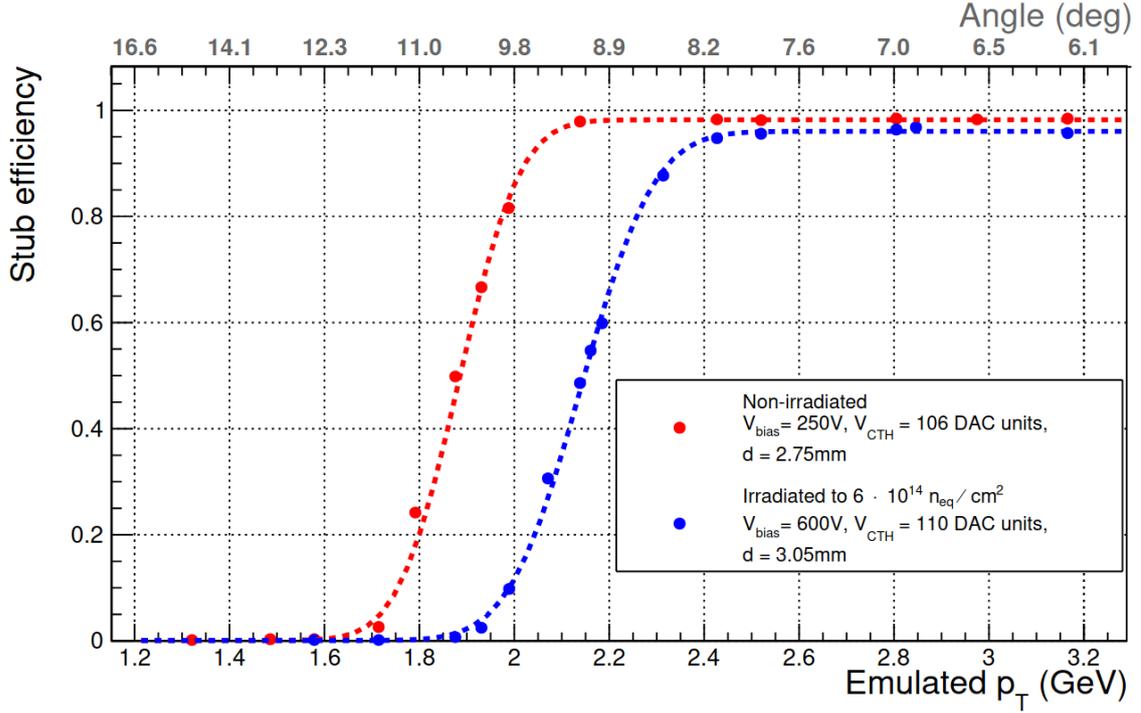


FIGURE 4.2 – Efficacité de détection des stubs en fonction de l'angle d'incidence des particules, pour un mini-module non-irradié (en rouge) et un mini-module irradié (en bleu) [1].

de séparation entre les deux capteurs de chaque module.

Les deux lignes pointillées proviennent d'une régression à partir d'une fonction d'erreur de la forme [1] :

$$f(p_T) = 0.5 \times A \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{p_T - p_{T_\mu}}{\sigma_{p_T}} \right) \right). \quad (4.2)$$

Avec A l'efficacité au plateau, p_{T_μ} le moment transverse correspondant à 50% d'efficacité, et σ_{p_T} la largeur de la Gaussienne de la fonction erreur [1].

On définit finalement la résolution en quantité de mouvement transversal comme le ratio σ_{p_T}/p_{T_μ} .

On possède donc trois indicateurs pour l'efficacité de la discrimination en p_T :

1. l'efficacité de plateau, A : elle informe sur la capacité du module à détecter correctement les particules qui possèdent un p_T supérieur au seuil ;
2. le p_T correspondant à 50% d'efficacité, p_{T_μ} (appelé *turn-on* p_T en anglais) : il informe sur la valeur effective du seuil de rejet ;
3. la résolution en p_T : elle informe sur la largeur de la zone de transition.

Dans un cas idéal, les modules seraient capables de donner une valeur de plateau $A = 1$ (ou 100%), un $p_{T_\mu} = 2$ GeV (ou à une autre valeur de seuil décidée), et une résolution nulle (transition instantanée de 0% à 100% d'efficacité).

Dans la réalité, l'objectif est de se rapprocher le plus possible de ces valeurs idéales, et de vérifier que les valeurs ne changent pas de manière trop importante après irradiation, afin que les modules puissent continuer de jouer leur rôle.

Le Tableau 4.1 reprend les valeurs issues des tests en faisceau de l'étude de W. ADAM *et al.* de 2020.

	Module non-irradié	Module irradié	Unité
Valeur plateau (A)	0.99	0.97	-
Seuil (p_{T_μ}) [GeV]	1.88	2.14	GeV
Résolution	5	6	%

Tableau 4.1 – Valeurs issues des tests en faisceau [1].

On remarque que l'efficacité de plateau est très proche de 100% avant irradiation, et reste acceptable après irradiation à deux fois la dose maximale prévue pour la couche la plus exposée des modules 2S.

Comme expliqué plus haut, la grande différence dans la valeur de p_{T_μ} provient de la différence d'espacement entre les deux capteurs de chaque mini-module, à savoir 2.75 mm et 3.05 mm pour le mini-module non-irradié et le mini-module irradié respectivement.

La résolution est considérée comme acceptable dans les deux cas par les auteurs.

L'étude conclut à l'efficacité des mini-modules dans la discrimination en p_T des particules, tant avant qu'après une irradiation à deux fois la dose maximale prévue.

Plusieurs autres caractéristiques de ces modules ont été testées, et seront détaillées dans la Partie III.

Un module 2S complet (*full-size*) a également été en partie testé en faisceau. Cependant plusieurs données manquent quant à l'efficacité des modules complets. Pour cette raison, de nouveaux tests en faisceau sont prévus dans un avenir proche, cette fois en présence d'un champ magnétique.

La présence du champ magnétique va très certainement affecter les mesures des modules. Comme expliqué dans le Chapitre 2, l'effet Hall entraîne une dérive des porteurs de charge, et donc une distribution du signal entre les pistes différentes.

La dérive des électrons, du fait de la présence du champ magnétique, est à peu près quatre fois plus importante que celle des trous, du fait de leur mobilité. En dessous de la tension de déplétion complète, l'angle de Lorentz augmente. Si la tension dépasse la tension de déplétion complète et continue d'augmenter (sur-déplétion), l'angle de Lorentz commence à diminuer, car l'intensité du champ électrique augmente.

Plus l'irradiation est importante, plus la profondeur de déplétion diminue, ce qui entraîne une diminution de l'angle de Lorentz. La déviation peut être importante, de l'ordre de grandeur de la distance inter-pistes [35].

La méthodologie de ce mémoire, développée dans le chapitre suivant, propose de simuler de manière anticipative le test en faisceau qui aura lieu en présence d'un champ magnétique sur un module de taille réelle.

Contenu

5.1	Approche du Problème	57
5.2	Validation de la Simulation	58
5.3	Anticipation des Tests à Venir	58

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie mise en place afin de répondre à la problématique évoquée dans le précédent chapitre.

5.1 Approche du Problème

Étant donné que les tests en faisceau sont rares et demandent beaucoup de préparation, de matériel et de temps, il peut être intéressant d’avoir une idée des données qui vont être récupérées, de façon à pouvoir anticiper l’analyse de celles-ci, et au besoin, de modifier le protocole expérimental.

Lors de l’analyse des données, il est courant que des interrogations émergent, appelant à d’autres tests plus spécifiques. Dans le cas présent, les tests en faisceau avec présence de champ magnétique sur des modules de taille réelle n’ont pas encore été réalisés, mais vont l’être dans un avenir proche. Bien que de nombreux effets soient théorisés, comme l’effet Hall, il reste de nombreuses inconnues. Une simulation anticipative de ces tests peut donc se révéler utile.

Cependant, toute simulation repose sur des simplifications et des hypothèses précises, qui peuvent, selon les cas, rendre les résultats impossibles à interpréter, ou tout simplement faux.

Dans le cas présent, les tests réalisés sur des mini-modules sont très similaires à ceux qui vont bientôt l’être sur des modules de taille réelle. Des données sont donc disponibles, et peuvent permettre de valider une partie du modèle.

Étant données les considérations précédentes, la méthode choisie pour répondre à la problématique, est divisée en deux grandes étapes :

1. la validation du modèle Monte-Carlo, par la reproduction et la comparaison des résultats avec ceux issus de l’article de W. ADAM *et al.* de 2020 [1] ;
2. la simulation des tests en faisceau qui vont avoir lieu sur des modules 2S de taille réelle, en présence d’un champ magnétique.

Ces deux étapes sont décrites plus en détail dans les deux sections suivantes, tandis que la simulation et l'analyse de données sont décrites en détail dans les prochains chapitres.

5.2 Validation de la Simulation

Bien que l'utilisation de logiciels de simulation soit aujourd'hui très courante dans les sciences en général, il ne faut pas oublier que la validation est une étape très importante du processus. Dans certains cas, cette dernière est rendue difficile voire impossible par une absence de données expérimentales pertinentes.

Dans le cas présent, les données issues des premiers tests en faisceau permettent de comparer les résultats de la simulation à la réalité, ce qui est un atout indéniable.

La première partie du travail de simulation consiste donc à tenter de reproduire les tests en faisceau effectués sur le mini-module 2S non irradié. La justesse¹ de la simulation va donc pouvoir être évaluée par la comparaison avec les données expérimentales.

Pour cette première partie, les objectifs sont les suivants :

1. simuler une géométrie simplifiée du mini-module 2S utilisé dans l'article ;
2. simuler l'interaction des particules incidentes sur le module (type de particule, énergie, angle d'incidence) ;
3. simuler la réponse du détecteur, de manière simplifiée ;
4. récupérer les données, et leur appliquer l'algorithme de corrélation de la puce CBC2, afin de reconstruire les clusters et les stubs ;
5. analyser les résultats de la même manière que dans l'article ;
6. comparer les résultats de la simulation avec les résultats expérimentaux.

L'analyse des résultats issus de cette première étape va permettre de valider le modèle utilisé dans la simulation.

5.3 Anticipation des Tests à Venir

Une fois sa fidélité connue, il est possible d'utiliser la simulation pour tenter de donner des indications sur les résultats des prochains tests.

Cependant, plusieurs différences apparaissent à cette étape. Les données utilisées pour la validation du modèle proviennent de tests sur des mini-modules 2S (épaisseur du substrat différente, séparation entre les capteurs, etc.), et en l'absence de champ magnétique. Certains paramètres de la simulation, comme la géométrie des capteurs silicium, doivent être modifiés, et le champ magnétique ajouté. Le modèle étant modifié, il s'écarte de son domaine de validation.

De manière générale, l'interprétation des résultats issus de cette seconde simulation ne pourra se faire que de manière qualitative, et non quantitative. L'objectif est de donner des pistes de réflexion permettant de préparer l'analyse des données de ce futur test en faisceau, en mettant en avant les phénomènes méritant de plus amples recherches.

Dans cette seconde partie, les objectifs sont les suivants :

1. modifier la géométrie de la simulation, afin de correspondre à un module 2S de taille réelle ;
2. ajouter un champ magnétique global, tel qu'utilisé dans le futur test ;
3. simuler l'interaction des particules incidentes sur le module (type de particule, énergie, angle d'incidence) ;

1. La justesse correspond à l'accord entre les résultats de la simulation et la valeur de référence (ici les données expérimentales).

4. simuler la réponse du détecteur, de manière simplifiée ;
5. récupérer les données, et leur appliquer l'algorithme de corrélation de la puce CBC3, afin de reconstruire les clusters et les stubs ;
6. faire varier certains paramètres (direction du champ, distance entre les capteurs, alignement des capteurs, etc.) ;
7. analyser les résultats, et émettre des recommandations quant à l'analyse des résultats du prochain test en faisceau.

Cette méthode en deux temps permet de donner une idée de la confiance à accorder aux conclusions de la seconde partie.

Les deux prochains chapitres traitent en détail de la simulation Monte-Carlo et du processus d'analyse des données.

CHAPITRE 6

LOGICIEL DE SIMULATION MONTE-CARLO

Contenu

6.1	Choix du Logiciel Utilisé	60
6.2	Hypothèses de Départ	61
6.3	Paramètres Utilisés	62
6.3.1	Physics List	62
6.3.2	Description de la Géométrie	64
6.3.3	Partage des charges entre les pistes	66
6.3.4	Champs électromagnétiques	67
6.3.5	Génération des particules primaires	69
6.3.6	Données récupérées lors des simulations	70
6.4	Biais et Limitations	70

Dans ce chapitre, la simulation Monte-Carlo développée dans le cadre de ce mémoire est décrite en détail. Du fait de sa taille, le code complet n'est pas détaillé ligne par ligne, mais les principaux éléments sont décrits ici. Le code complet est disponible en accès libre sur le site GitHub [18].

Dans un premier temps, le choix du logiciel de simulation Monte-Carlo utilisé est expliqué et défendu. Dans un second temps, les hypothèses de départ sont présentées en détail. Ensuite, les paramètres utilisés dans la simulation sont décrits, toujours en accord avec les hypothèses de départ choisies. Enfin, les biais potentiels ainsi que les limitations de cette simulation sont évoqués.

Lors de la description des paramètres utilisés, une distinction claire est faite entre les paramètres utilisés pour la simulation des mini-modules, et ceux utilisés pour la simulation des prochains tests en faisceau sur un module de taille réelle.

6.1 Choix du Logiciel Utilisé

Dans les domaines de la physique nucléaire et de la physique des particules, il existe un certain nombre de logiciels de simulation, permettant de simuler une grande variété de phénomènes, de la décroissance radioactive jusqu'au transport de charge, en passant par la simulation des dégâts causés par les RI au niveau cellulaire.

De manière générale, chaque logiciel possède ses domaines de prédilection, certains étant plus spécialisés, et d'autres, au contraire, plus généralistes.

Dans le domaine de la simulation des détecteurs de particules, on peut citer FLUKA et *Geant4*. Ce dernier possède de nombreuses applications, dans plusieurs domaines. Différents programmes permettent de simplifier son utilisation dans des domaines spécifiques, comme GATE pour la simulation d'appareils de médecine nucléaire et de radiothérapie, ou encore Allpix Squared utilisé pour la micro-électronique et la simulation des détecteurs au silicium. Étant donné qu'il est développé et utilisé par la collaboration CMS, et plus largement par le CERN, le logiciel *Geant4* est sélectionné pour les simulations réalisées dans ce mémoire. Un cours d'initiation au logiciel *Geant4* a été suivi lors de la première année de master, ce qui permet également d'accélérer la phase d'apprentissage de ce logiciel complexe écrit en C++.

Note : le programme Allpix Squared, qui semble tout indiqué pour ce mémoire, a été découvert trop tard dans l'année pour pouvoir être utilisé. Il récupère les données issues de *Geant4*, et simule le transport des porteurs de charge dans le silicium, en fonction des champs électriques et magnétiques choisis.

6.2 Hypothèses de Départ

Toute simulation fait appel à un certain nombre d'hypothèses, permettant de la simplifier, le cas réel étant souvent extrêmement complexe et impossible à reproduire dans ses moindres détails. Dans le cadre de ce mémoire, les hypothèses simplificatrices suivantes sont faites concernant la simulation des modules, par ordre décroissant d'importance :

Hypothèse 1 : le partage des charges (électrons et trous) entre les pistes adjacentes est simulé de manière simplifiée. Le transport des charges n'est pas simulé. La dérive de Lorentz n'est donc pas simulée. Dans la réalité, le signal est partagé entre les pistes adjacentes en fonction de nombreux paramètres. La simulation précise de ce partage de charge aurait demandé l'utilisation, par exemple, du logiciel Allpix Squared.

Hypothèse 2 : la zone de déplétion est supposée faire $270 \mu\text{m}$ d'épaisseur pour le mini-module. C'est la valeur théorique renseignée dans l'article. L'épaisseur réelle n'est pas connue avec précision.

Hypothèse 3 : la distance séparant le plan médian des deux capteurs du mini-module est supposée être de 2.63 mm . La distance renseignée dans l'article est de 2.75 mm (distance cible lors de la fabrication). Aucune donnée métrologique n'a pu être retrouvée. La distance de 2.63 mm provient de l'analyse des données des tests faisceau. Cette dernière provient d'un rapport interne non publié.

Hypothèse 4 : sauf mention contraire, l'alignement et la séparation entre les capteurs sont considérés comme parfaits. Les deux capteurs au silicium sont donc parfaitement parallèles, et les pistes parfaitement alignées. Ce n'est pas le cas dans la réalité, mais aucune donnée ne permet de connaître avec précision les valeurs réelles.

Hypothèse 5 : toutes les pistes sont identiques et fonctionnelles.

Hypothèse 6 : la concentration en dopant est considérée comme homogène dans tout le substrat (simplification du calcul du champ électrique), et vaut $3 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$.

Hypothèse 7 : du fait de leur très faible épaisseur et de la complexité de leur géométrie, les pistes en aluminium ainsi que l'isolant en SiO_2 ne sont pas inclus dans la simulation.

Hypothèse 8 : toutes les caractéristiques utilisées pour la simulation du module de taille réelle, sont issues des spécifications pré-fabrication, et non pas de la métrologie du module qui sera utilisé lors des tests.

Hypothèse 9 : l'ensemble des structures entourant les capteurs (supports en aluminium, pièces de Kapton, électronique frontale, etc.) ne sont pas simulées. Seuls les deux capteurs sont simulés.

Hypothèse 10 : les impuretés (y compris les dopants) ne sont pas simulées. Le capteur est donc constitué de silicium totalement pur. Dans la réalité, des atomes d'oxygène et de dopant sont présents. Leur fraction est cependant très inférieure à celle des atomes de silicium.

L'ensemble de ces hypothèses simplificatrices doit permettre de réaliser une simulation simple et robuste des modules. Cependant, du fait de ces simplifications, un certain nombre de phénomènes ne pourront pas être étudiés, ou seulement de manière approximative. L'hypothèse la plus forte réalisée ci-dessus concerne la simplification du partage des charges entre les pistes adjacentes. L'impact de ces différentes hypothèses est difficile à évaluer au préalable, et les effets seront discutés lors de l'analyse des résultats.

La section suivante détaille les différentes parties du code *Geant4* réalisé lors du mémoire.

6.3 Paramètres Utilisés

La simulation *Geant4* réalisée dans ce mémoire est basée sur l'ExempleB1, fourni lors de l'installation du logiciel. Cet exemple a, par la suite, été grandement modifié.

Dans la suite de cette section, les principales parties du code sont décrites, en précisant les paramètres choisis et la (ou les) raison(s) de ces choix. Les parties les plus critiques sont :

- le choix de la Physics List (PL), qui gère la simulation des processus physiques (interactions particules/matière, etc.) ;
- la réalisation de la géométrie du détecteur, et de ces parties sensibles ;
- la simulation du partage des charges ;
- l'ajout des champs magnétique et électrique ;
- la génération des particules primaires ;
- le type de données récupérées lors de la simulation.

6.3.1 Physics List

La Physics List (PL) est l'une des trois classes indispensables au bon fonctionnement du logiciel *Geant4*. Elle est responsable de la description de toutes les particules ainsi que des processus d'interaction de ces particules [15].

La PL contient donc toutes les informations nécessaires au logiciel pour calculer les interactions. Pour effectuer des prédictions, elle se base sur différents modèles de physique théorique selon la PL sélectionnée, le type de particule ou d'interaction, et l'énergie du processus. Tous les détails sur les modèles physiques utilisés sont disponibles dans le Physics Reference Manual (PRM) de la collaboration [16].

Il existe un grand nombre de PLs de référence, proposées par la collaboration. Elles sont (depuis la dernière version du logiciel *Geant4*) entièrement modulaires. L'utilisateur peut décider de créer une PL, d'en modifier une existante, ou d'en sélectionner une sans la modifier.

Le choix de la PL est donc crucial : il va déterminer les modèles physiques utilisés, leur précision, les gammes d'énergie accessible ainsi que la vitesse de la simulation. Une PL très précise demandera plus de temps de calcul qu'une moins précise. Il est donc question ici de trouver un optimum entre la précision et la vitesse de calcul. Étant donné la complexité et le nombre de PLs disponibles (sans compter les paramètres optionnels, il en existe plusieurs dizaines), il est important de se conformer aux recommandations de la collaboration et des spécialistes afin de sélectionner une PL pertinente. Idéalement, dans un second temps, la PL doit être confrontée aux résultats expérimentaux afin d'en valider la pertinence dans le domaine spécifique de son utilisation.

6.3.1.1 Choix de la Physics List

Il y a plusieurs questions à se poser lors de la sélection d'une PL : quelles sont les particules et interactions simulées ? Quelles sont les énergies ? Quelle est la précision souhaitée ? Quelles sont les limitations en matière de puissance de calcul ?

Dans le cas présent, les dimensions de la géométrie sont de l'ordre de grandeur du micromètre. Les particules simulées sont des leptons (e^- , muons) et des hadrons (pions, protons) interagissant avec la matière (principalement silicium et aluminium). De plus, la principale information d'intérêt concerne la localisation et la quantité d'énergie déposée, dans des structures micrométriques.

Étant donné ces considérations, il semble important d'utiliser une PL précise et possédant les options nécessaires à la simulation des processus Electromagnétique (EM) avec une précision suffisante.

Les deux PLs les plus utilisées sont la FTFP_BERT et la QGSP_BERT, utilisées respectivement par les collaborations CMS et ATLAS. Ces deux PLs sont recommandées pour les trajectographes de Haute Énergie (HE), et la FTFP_BERT plus particulièrement pour les détecteurs de collisionneurs de particules de HE [37].

La PL FTFP_BERT est aujourd'hui la liste par défaut dans le logiciel *Geant4*. Elle utilise un modèle en cascade de BERTINI en dessous de 10 GeV et le modèle *Fritiof* au-dessus¹ [16]. La PL est valable de 100 eV à 100 TeV, et présente les meilleurs résultats en comparaison des données expérimentales. En dessous de 1 keV, le modèle est cependant beaucoup moins précis [15].

Étant donné que la liste FTFP_BERT est utilisée par la collaboration CMS et qu'elle présente les meilleurs résultats, elle est sélectionnée pour le travail présenté dans ce mémoire.

6.3.1.2 Options pour les processus EM

Il reste maintenant à sélectionner l'option concernant les interactions EM. Une dizaine d'options sont disponibles, chacune spécifique à une application particulière. Le Tableau 6.1 présente les principales options disponibles ainsi que leurs spécificités : L'Option 0 est

Nom	Spécificités
Option 0	option par défaut, la plus rapide, moins précise
Option 1 (EMV)	option utilisée par la collaboration CMS
Option 2 (EMX)	variante
Option 3 (EMY)	intermédiaire entre l'option 0 et l'option 4
Option 4 (EMZ)	meilleure précision, plus lente

Tableau 6.1 – Récapitulatif des différentes options concernant les processus électromagnétiques.

la plus rapide, mais manque de précision, principalement pour les faibles énergies [15, 25]. À l'opposé, l'Option 4 (EMZ) présente les meilleurs résultats et utilise les modèles les plus précis [5, 23]. C'est l'option recommandée pour l'étude des performances des détecteurs et la Recherche et Développement (R&D) [23].

L'Option 3 (EMY) est proposée dans certains cas comme alternative à l'Option 4 (EMZ), car plus rapide et néanmoins plus précise que l'option par défaut (option 0). Toutes les autres options² ne sont pas recommandées, et sont utilisées uniquement pour étudier de

1. Une zone de transition existe vers 10 GeV. Les deux modèles sont alors utilisés conjointement selon une pondération variable.

2. En dehors des Options 0 à 4 incluses.

nouveaux modèles [25].

Un exemple des différences de prédiction entre les options EM est visible sur la Fig. 6.1. On remarque immédiatement la très grande précision de l'Option 4 (EMZ) par rapport aux autres modèles. Le modèle *standard* (FTFP_BERT option 0) s'écarte de plus de 5% en-dessous de 10 keV environ, et sa précision aux alentours du keV semble diverger. Les modèles Penelope et Livermore sont spécialisés dans la physique électromagnétique aux très faibles énergies.

Étant données les considérations précédentes, trois options sont sélectionnées pour être testées : l'Option 1 (EMV) utilisée par la collaboration CMS pour sa rapidité, l'Option 4 (EMZ) pour sa précision élevée et l'Option 3 (EMY) pour son caractère intermédiaire.

Étant donné sa grande précision et les recommandations de la collaboration, la PL FTFP_BERT_EMZ (option 4) est choisie pour la suite du travail pour toutes les simulations.

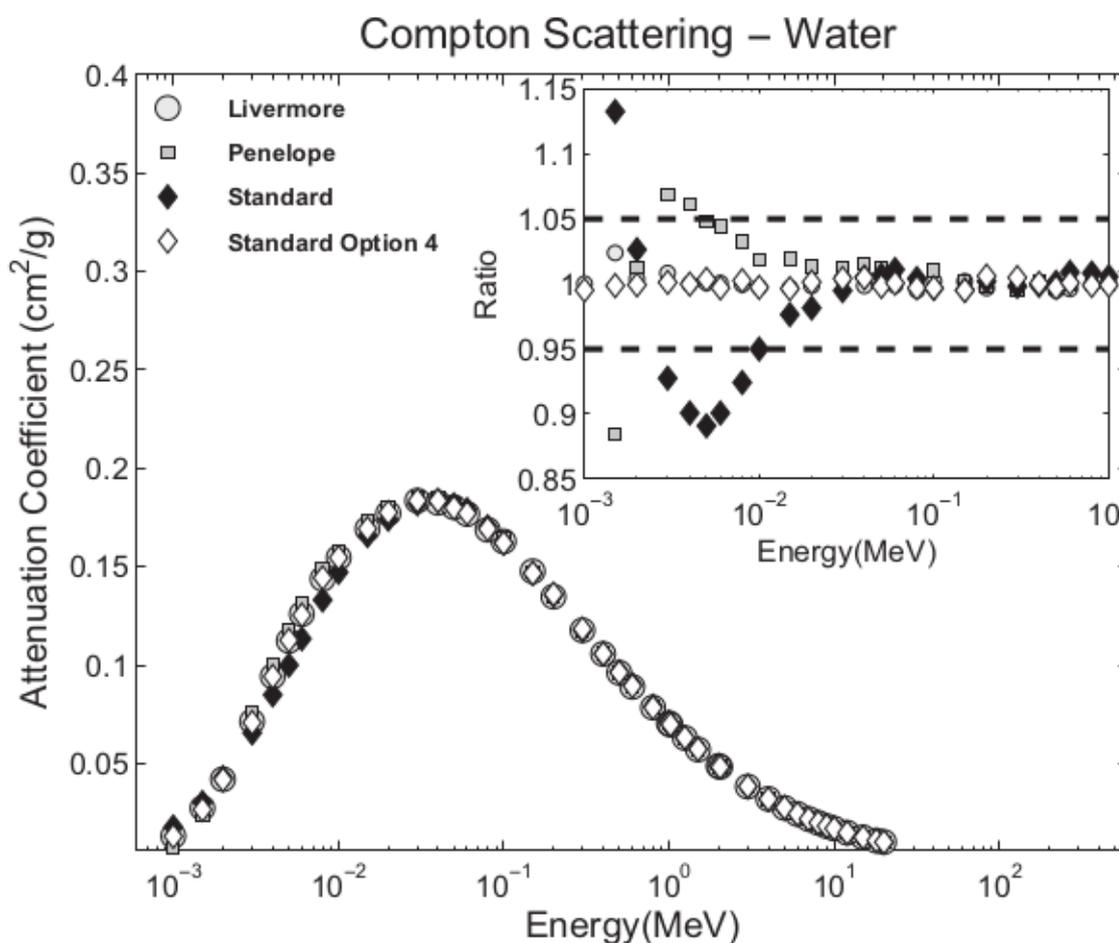


FIGURE 6.1 – Comparaison de quatre options différentes pour la physique EM. Les simulations concernent des mesures de coefficient d'atténuation pour la diffusion Compton dans l'eau. Les modèles *Livermore* et *Penelope* sont du même type que l'Option 3 (EMY). Le modèle *Standard* correspond à l'Option 0 [5].

6.3.2 Description de la Géométrie

La description de la géométrie est un autre élément central de la simulation. Comme expliqué dans la section détaillant les hypothèses, les deux capteurs sont simulés de la

manière simplifiée suivante :

1. une première couche de silicium pur, de l'épaisseur de la zone de déplétion, est créée. Elle est découpée en sous-volumes, dont la largeur est définie par l'écart inter-pistes ;
2. Une deuxième couche de silicium pur est ajoutée au dos de la première, afin de simuler la zone de diffusion non-déplétée ;
3. une dernière couche d'aluminium pur est ajoutée au dos, et représente le contact pour l'application de la tension.

Cette opération est répétée deux fois (une fois pour chaque capteur). Les deux copies sont disposées à distance égale, de part et d'autre du centre du monde simulé. Les pistes (zone sensible) sont orientées vers l'extérieur, et donc le dos des capteurs (côté aluminium) est orienté vers le centre.

Le monde est créé de manière à englober les deux capteurs. Il est composé d'air sec. La géométrie est visible sur la Fig. 6.2.

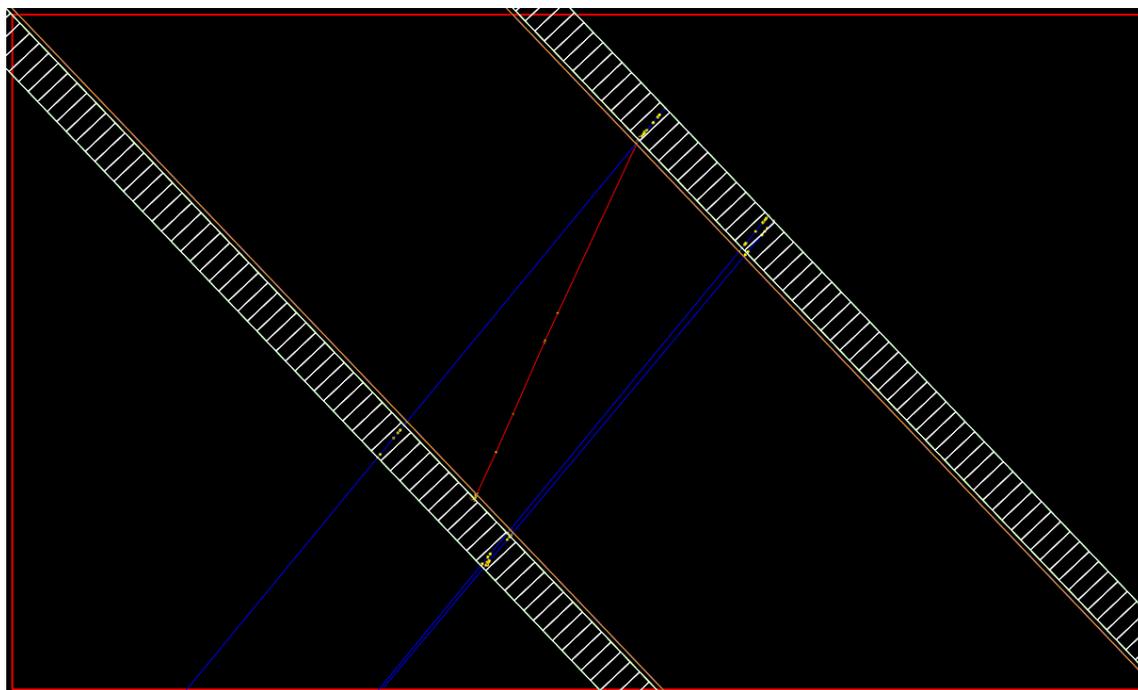


FIGURE 6.2 – Visualisation de la géométrie avec *Geant4*. On remarque les deux capteurs, divisés en volumes (pistes). Trois pions de 120 GeV (en bleu), originaires du coin supérieur droit de l'image, traversent les deux capteurs. On aperçoit un électron δ (en rouge).

Seuls trois matériaux sont utilisés dans la géométrie : du silicium, de l'aluminium et de l'air sec. Ces trois matériaux sont récupérés directement dans la base de données des matériaux de la collaboration *Geant4*.

Les paramètres géométriques utilisés sont présentés dans le Tableau 6.2.

On remarque que les paramètres géométriques varient grandement entre les deux versions du module. La longueur des pistes réelle n'est pas exactement de 5 cm, mais ce paramètre n'est pas décisif pour la simulation, étant donnée la zone restreinte centrale impactée par le faisceau de particules.

6.3.2.1 Zones sensibles

Une fois la géométrie définie, il est encore nécessaire de préciser au logiciel les zones sensibles de la géométrie, qui vont servir à récupérer des données.

Paramètre	Mini-module	Grand module	Unité
Nombre de pistes	254	1016	-
Écart inter-pistes	90	90	μm
Épaisseur totale (Si)	300	320	μm
Épaisseur active	270	290	μm
Longueur des pistes	5	5	cm
Largeur totale	2.29	9.14	cm
Épaisseur contact backplane (Al)	1	1	μm
Sép. des capteurs (centre à centre)	2.63	1.80	mm
Tension d'alimentation	250	250	volt
Champ magnétique global	aucun	3.0	tesla

Tableau 6.2 – Paramètres utilisés pour la simulation des modules.

Dans le cas présent, les pistes sont les parties sensibles. Un détecteur multifonctionnel (*G4MultiFunctionalDetector*) est créé et attaché à chaque piste. Il est alors possible de récupérer un grand nombre d'informations facilement lors de la simulation.

L'information importante est ici l'énergie déposée par les particules primaires incidentes, ainsi que par toutes les particules secondaires créées lors de l'interaction des particules primaires dans la géométrie. Cette dose déposée totale, $E_{dep,tot}$, permet de connaître approximativement le nombre de paires électron/trou formées dans chaque piste. Dans le silicium, l'énergie déposée moyenne nécessaire à la formation d'une paire est de 3.62 eV. Une fois l'énergie totale déposée dans chaque piste connue, il est possible de retrouver le nombre moyen de paires formées \overline{N}_p de la manière suivante, dans la limite d'une énergie totale déposée élevée par rapport à 3.62 eV :

$$\overline{N}_p = \frac{E_{dep,tot} \text{ [eV]}}{3.62} \quad (6.1)$$

Il est ensuite possible d'ajouter un bruit simulé, et d'appliquer un seuil sur le signal total, afin de déterminer si la piste renvoie un 0 (signal inférieur au seuil) ou un 1 (signal supérieur au seuil). La condition d'énergie élevée par rapport à 3.62 eV est respectée, du fait de l'application d'un seuil aux alentours de 19 keV (≈ 5200 électrons).

La logique de corrélation est ensuite appliquée, et l'analyse des données peut débuter.

6.3.2.2 Modification de l'alignement des capteurs

Dans la définition de la géométrie, des fonctions ont été ajoutées afin de permettre des décalages ou des rotations selon les trois axes des deux capteurs de manière simple.

Dans le cas où l'impact d'un de ces paramètres devrait être évalué, la simulation le permet.

6.3.3 Partage des charges entre les pistes

La simulation du transport des charges dans le substrat est relativement complexe à réaliser. À moins d'utiliser un logiciel spécialisé, il est très difficile d'implémenter une telle fonction dans *Geant4*.

Afin de permettre un partage des charges entre les pistes, un code simplifié a été mis au point :

1. dès qu'une particule (primaire ou secondaire) dépose de l'énergie dans une piste, la position $(x_0; y_0; z_0)$ ainsi que l'énergie déposée δE_{dep} sont récupérées ;
2. la position permet de déterminer la localisation de l'interface entre deux pistes la plus proche x_{lim} , ainsi que la profondeur dans le substrat z_p ($z_p = 0$ au niveau des pistes en aluminium) ;

3. à partir de la profondeur z_p , il est possible de calculer approximativement le temps de dérive t_{drift} des charges ;
4. ce temps de dérive permet de calculer approximativement la largeur du nuage d'électrons (approximé par une gaussienne) une fois arrivé au niveau des pistes en aluminium ;
5. l'énergie déposée est alors partagée avec la piste la plus proche selon la gaussienne obtenue précédemment.

Le temps de dérive peut être approximé par l'équation suivante [29] :

$$t_{drift} = \frac{z_p \cdot d}{\mu_e \cdot V_{dep}} = \frac{z_p \cdot d}{\mu_e \cdot \frac{q \cdot N_{eff} \cdot d^2}{2 \cdot \epsilon_0}} = \frac{2 \cdot z_p \epsilon \epsilon_0}{\mu_e q N_{eff} d} . \quad (6.2)$$

La largeur du nuage d'électrons, correspondant à l'écart-type de la gaussienne de la distribution spatiale, est approximée par [29] :

$$\sigma_x = \sqrt{2 \cdot \frac{kT}{q} \cdot \mu_e \cdot t_{drift}} = \sqrt{\frac{4kT\epsilon\epsilon_0}{q^2 N_{eff} d}} \times z_p . \quad (6.3)$$

Une fois la forme approximative du nuage d'électrons connue, une gaussienne de variable aléatoire Y et de paramètres $N(x_0, \sigma_x^2)$, il est possible de déterminer un facteur de partage F_p avec la piste la plus proche, à partir des propriétés de la loi normale centrée réduite de variable aléatoire X et de paramètres $N(0,1)$:

$$F_p = P(Y > x_{lim}) \quad (6.4)$$

$$= 1 - P(Y \leq x_{lim}) \quad (6.5)$$

$$= P\left(X \leq \frac{x_{lim} - x_0}{\sigma_x}\right) \quad (6.6)$$

$$= 0.5 + 0.5 \cdot erf\left(\frac{x_{lim} - x_0}{\sqrt{2} \cdot \sigma_x}\right) \quad (6.7)$$

Cette méthode consiste simplement à partager l'énergie entre la piste où a lieu le dépôt d'énergie et la piste voisine la plus proche, suivant la répartition gaussienne du nuage d'électrons.

Cette méthode est approximative, et ne prend pas en compte la variation du champ électrique en fonction de la profondeur dans le substrat. De plus, le signal est induit par le déplacement des charges, et non pas par leur collecte au niveau des pistes. Cependant, la méthode permet de simuler de manière très simple un partage de charge rudimentaire.

6.3.4 Champs électromagnétiques

Le transport des porteurs de charge dans les semi-conducteurs n'est pas simulé nativement dans *Geant4*. Par conséquent, la simulation des champs électromagnétiques (EM) ne pourra pas influencer sur le partage des charges entre les pistes, ou induire un effet Hall (angle de Lorentz).

L'ajout des champs EM influence néanmoins directement sur les particules primaires et secondaires. Du fait de l'énergie des particules (quelques keV à plusieurs GeV), l'influence du champ électrique est faible. Cependant, l'influence du champ magnétique (uniquement présent dans la simulation du module taille réelle) est non-négligeable, notamment au niveau des électrons δ .

6.3.4.1 Champ électrique

Comme expliqué dans le Chapitre 2, le champ électrique présent dans la zone de déplétion provient de la différence de potentiel appliqué à la jonction p-n. Du côté des pistes, le champ électrique est maximum, et son intensité diminue en approchant du bord de la zone déplétée vers le dos du capteur. Dans le cas où la tension d'alimentation est supérieure à la tension de déplétion complète (V_{FD}), le champ électrique est non nul dans l'ensemble de la zone déplétée.

La formule permettant de calculer la tension de déplétion complète (équation 2.5), peut être développée comme suit, à l'aide de l'équation 2.4 :

$$V_{FD} = \frac{D^2}{2\epsilon_0\epsilon_r\mu\rho} = \frac{N_{eff}\cdot q\cdot D^2}{2\epsilon_0\epsilon_r} \quad (6.8)$$

Avec, pour rappel, N_{eff} la concentration du dopage dans le substrat et D l'épaisseur du substrat.

En supposant un $N_{eff} = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ [2] (concentration des atomes de Bore dans le substrat), on retrouve pour le mini-module :

$$V_{FD} = \frac{3 \cdot 10^{18} \times 1.602 \cdot 10^{-19} \times (270 \cdot 10^{-6})^2}{2 \times 8.854 \cdot 10^{-12} \times 11.7} \approx 169.1 \text{ V}. \quad (6.9)$$

Il est également possible de calculer la profondeur de déplétion théorique pour ce même substrat à une tension V (équation 2.4) :

$$W = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_r\mu\rho|V|} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r|V|}{q\cdot N_{eff}}} \quad (6.10)$$

Une fois de plus, l'application numérique pour le mini-module et les 250 V simulés donne une profondeur de déplétion de :

$$W_{250V} = x_0 = \sqrt{\frac{2 \times 8.854 \cdot 10^{-12} \times 11.7 \times 250}{1.602 \cdot 10^{-19} \times 3 \cdot 10^{18}}} \approx 328.3 \text{ } \mu\text{m}. \quad (6.11)$$

Cette profondeur est supérieure à l'épaisseur du substrat, ce qui n'est pas possible. Elle indique cependant que la tension appliquée est supérieure à la tension V_{FD} .

La loi de Poisson nous permet de calculer, sous réserve des hypothèses d'un profil de dopage abrupte et si chaque particule de dopant est ionisée, la variation du champ électrique dans le substrat :

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{q\cdot N_{eff}}{\epsilon_0\epsilon_r} \quad (6.12)$$

On remarque que cette variation ne dépend pas de la profondeur x dans le substrat. Selon cette approximation, le champ électrique varie donc linéairement.

Afin de connaître la valeur du champ électrique en fonction de la profondeur, et en posant $x = 0$ à la jonction, on a :

$$E(x) = \int -\frac{q\cdot N_{eff}}{\epsilon_0\epsilon_r} = -\frac{q\cdot N_{eff}}{\epsilon_0\epsilon_r} \cdot x + C. \quad (6.13)$$

On retrouve la valeur de la constante C en sachant que $E(x = W_{250V}) = 0$.

On a :

$$C = \frac{q\cdot N_{eff}}{\epsilon_0\epsilon_r} \cdot x_0 \quad (6.14)$$

On arrive finalement à l'expression du champ E en fonction de la profondeur x dans le substrat :

$$E(x) = -\frac{q\cdot N_{eff}}{\epsilon_0\epsilon_r} \cdot (x - x_0) \quad (6.15)$$

Avec une épaisseur de substrat de $270 \mu\text{m}$, on retrouve les valeurs extrêmes suivantes pour le mini-module :

$$E(x = 0) \approx 1523 \text{ kV/m} \quad \text{et} \quad E(x = 270\mu\text{m}) \approx 270 \text{ kV/m} \quad (6.16)$$

Le même processus est utilisé pour calculer la valeur du champ électrique dans le substrat du module de taille réelle.

Il est important de garder à l'esprit que ces calculs font appel à des hypothèses simplificatrices, et sont donc des approximations.

Le champ électrique est implémenté dans *Geant4* au niveau des pistes en silicium.

6.3.4.2 Champ magnétique

Dans le cas de la simulation des futurs tests en faisceau d'un module taille réelle, il est nécessaire d'ajouter un champ magnétique global de 3 teslas dans la direction parallèle aux pistes.

Ce champ magnétique vient s'ajouter au champ électrique dans les pistes. Dans *Geant4*, le champ électrique pur situé dans les pistes est remplacé par un champ électromagnétique. Dans le reste de la simulation, un champ magnétique simple est ajouté.

Pour tous les champs simulés, qu'ils soient électriques ou magnétiques, *Geant4* fait appel à un *stepper* chargé d'estimer, par une méthode itérative, la trajectoire des particules dans les volumes (transport). Le *stepper* utilisé ici est le *G4DormandPrince745*, recommandé par la collaboration *Geant4* pour les champs simples.

Étant données les dimensions de la simulation (de l'ordre du micromètre au millimètre), la précision demandée au *stepper* est modifiée en conséquence. Les paramètres sont fixés entre 10 et 100 nm, afin de s'assurer que les volumes devant être interceptés ne soient pas manqués.

6.3.5 Génération des particules primaires

Les particules primaires sont générées à la surface de l'un des deux capteurs (du côté des pistes), et sont dirigées perpendiculairement au plan des capteurs³, de manière à les traverser tous les deux.

Selon les paramètres choisis pour la simulation, l'angle d'incidence peut varier pour simuler des particules de quantité de mouvement perpendiculaire différente.

Dans le cas de base, les particules sont dirigées perpendiculairement au plan des capteurs. Leur point d'émission est choisi aléatoirement dans un plan perpendiculaire aux capteurs, et situé à 1 micromètre de la surface du premier capteur.

Ne connaissant pas exactement la distribution des impacts lors des tests faisceau, les particules primaires sont générées dans un carré, centré au milieu du capteur, dont le côté c est calculé comme suit (dans le cas des mini-modules) :

$$c = \frac{90 \mu\text{m} \times 254 \text{ pistes}}{2} = 11.43 \text{ mm} \quad (6.17)$$

Cette stratégie permet d'éviter que des particules ne soient générées trop près des bords (ce qui fausse les données par la fuite possible des électrons δ , entre autres), tout en permettant de simuler un grand nombre de positions de départ différentes.

Comme expliqué dans la partie théorique, à haute énergie, et pour des épaisseurs de matériau faibles, la masse des particules importe peu, c'est surtout la charge qui compte. Dans

3. Dans le cas de base, les particules sont émises perpendiculairement. Par la suite, les particules sont inclinées afin de simuler l'effet du champ magnétique sur la trajectoire des particules depuis leur point d'origine (collision pp , en fonction de leur moment cinétique).

le cas de l'article de W. ADAM *et al.*[1], trois types de particules ont été utilisés : des pions, des positrons et des protons. Afin d'être au plus proche de la réalité, les particules utilisées pour générer les données analysées dans l'article sont simulées : des pions de 120 GeV.

Lorsqu'une certaine quantité de mouvement perpendiculaire doit être simulée, les particules incidentes sont inclinées d'un certain angle, dont la valeur est calculée de la même manière que dans l'article (voir équation 4.1).

Afin de faciliter les simulations, des commandes interactives ont été ajoutées, de manière à pouvoir modifier le p_T simulé. Trois cas sont alors possibles :

1. aucune commande n'est renseignée concernant le p_T : toutes les particules sont émises perpendiculairement au plan des capteurs (correspond à une absence de rotation du module dans le montage expérimental) ;
2. génération du p_T aléatoire : l'angle est calculé sur base de la génération aléatoire d'une valeur de p_T entre deux bornes. Les deux bornes peuvent être modifiées ;
3. p_T fixe : ce mode permet de générer des particules possédant toutes le même p_T simulé, donc toutes le même angle d'incidence.

Une combinaison de ces commandes permet de réaliser rapidement un grand nombre de simulations aux paramètres différents.

6.3.6 Données récupérées lors des simulations

Les données sont extraites sous forme de *ntuple* (l'équivalent d'un tableau de données, organisé en lignes et en colonnes). Les informations extraites sont les suivantes :

1. les coordonnées d'émission de la particule primaire (x,y,z) ;
2. l'angle initial et le p_T simulé ;
3. l'énergie déposée (en MeV) dans chaque piste, et pour les deux capteurs.

Pour le mini-module, le tableau comporte donc $3 + 2 + (2 \times 254) = 513$ colonnes, et autant de lignes que de particules simulées.

6.4 Biais et Limitations

Comme expliqué précédemment, un certain nombre d'hypothèses et de simplifications ont été effectuées afin de permettre la simulation des modules. Ces simplifications entraînent nécessairement l'apparition de biais, dont il faudra tenir compte lors de la conclusion.

Au niveau de la simulation en elle-même, les principaux biais découlent des simplifications apportées à la géométrie (voir les hypothèses en début de chapitre), et de l'absence de la simulation du transport des charges au sein du silicium.

La différence la plus flagrante entre la simulation et les tests effectués en faisceau est sans aucun doute l'absence de partage de charge entre les pistes adjacentes. Cette simplification a nécessairement un impact direct sur les éléments étudiés, à savoir la formation des hits, clusters et stubs.

Ce biais est cependant inévitable dans les circonstances de ce travail, la simulation du transport des charges étant complexe à mettre en place.

Les conclusions tirées de l'analyse des données, devront prendre ce fait en considération.

Contenu

7.1	Choix du Logiciel	71
7.2	Méthode d'analyse	72
7.2.1	Simulation du bruit	72
7.2.2	Simulation du seuil	73
7.2.3	Simulation de la logique de corrélation	73
7.2.4	Incertitudes	74

Ce chapitre se concentre sur la description de l'analyse des données effectuée dans le cadre de ce mémoire. Dans une première section, le choix du logiciel d'analyse est justifié. Ensuite, la méthode d'analyse, et notamment la simulation de la logique de corrélation des puces CBC, est décrite. Enfin, les biais et limitations liés à cette stratégie d'analyse de données sont présentés.

7.1 Choix du Logiciel

Le choix du logiciel utilisé pour l'analyse des données n'est pas un choix à prendre à la légère, particulièrement dans les cas où la quantité de données à traiter est importante. Les possibilités sont nombreuses, et une fois de plus, chaque option présente des avantages et des inconvénients.

Au cours de ce mémoire, plusieurs logiciels ont été utilisés. En début d'année, des outils plus classiques ont été utilisés : les données étaient extraites sous forme de fichier texte (.txt), les colonnes séparées par des tabulations. Ces fichiers de données étaient alors analysés via un code *Python*.

Cette méthode, bien que fonctionnelle, s'est très vite révélée totalement dépassée par la grande quantité de données à traiter. Les fichiers .txt sont vite très volumineux (plusieurs Go), et le code d'analyse demande un temps très long (plus long que la simulation elle-même).

Face à ce constat, le choix est fait de changer de méthode d'analyse. Le logiciel d'analyse tout désigné, nativement supporté par *Geant4*, est *Root*. Ce logiciel est codé en langage C++ et est utilisé dans un grand nombre de domaines, principalement en physique des particules. Il est utilisé par la collaboration CMS. *Root* est un logiciel libre, gratuit, et très puissant. Il a notamment été utilisé pour analyser les données ayant amené à la découverte

du fameux Boson de Higgs.

Son utilisation demande cependant des connaissances en langage C++, et un certain temps d'apprentissage. Il est nativement supporté comme format de sortie de *Geant4*, ce qui simplifie le stockage et le traitement des données.

Contrairement aux fichiers .txt, qui ne sont pas optimisés pour le stockage de grandes quantités de données, *Root* propose un format de stockage puissant. Les fichiers .txt de plusieurs Go sont remplacés par des fichiers .root de quelques Mo. La vitesse d'exécution du code d'analyse passe de plusieurs minutes à quelques secondes.

Root permet également de créer des graphiques. Étant écrit en C++, il est possible d'y intégrer des parties de code d'analyse directement dans ce langage.

7.2 Méthode d'analyse

L'analyse des données est divisée en plusieurs étapes successives, dont le contenu peut varier selon la simulation. De manière générale, les étapes sont les suivantes :

1. la simulation *Geant4* produit les données, et les stocke directement sous forme d'un *ntuple* dans un fichier .root ;
2. les données sont récupérées par le programme *Root*, le bruit est simulé, et la logique de corrélation des clusters est appliquée ;
3. le même programme *Root* récupère les résultats pertinents, et les présente sous forme de graphiques et/ou de fichiers texte.

Le code d'analyse existe donc en plusieurs versions, selon le type de données étudiées. Dans la première partie de l'étude, consistant à reproduire les résultats de l'article, l'objectif est de reproduire les mêmes graphiques, en superposant les données expérimentales avec les données issues de la simulation.

Dans la seconde partie, visant à anticiper les résultats des tests qui seront effectués sur le module de taille réelle, la comparaison avec des données expérimentales n'est pas possible. Cependant, dans certains cas, la comparaison avec les données issues des mini-modules est pertinente.

7.2.1 Simulation du bruit

Un point important concerne la simulation du bruit dans les pistes. La meilleure source d'information provient de l'article lui-même, qui précise les valeurs de piédestal p , et de bruit σ , mesurées dans les différentes pistes.

En pratique, le bruit est simulé par une gaussienne de paramètre $\mu = 0$, dont le σ est calculé à partir des données de l'article.

Ce dernier précise les mesures suivantes, issues de l'analyse de la courbe en S (voir Fig. 7.1) :

$$p_1 = 120 \pm 0.1 V_{CTH} \quad \sigma_1 = 2.12 \pm 0.06 V_{CTH} , \quad (7.1)$$

et de son histogramme différentiel :

$$p_2 = 119.3 \pm 0.2 V_{CTH} \quad \sigma_2 = 2.14 \pm 0.15 V_{CTH} . \quad (7.2)$$

Les unités V_{CTH} correspondent aux unités du seuil du comparateur, utilisé pour la génération de la courbe en S . L'article précise qu'une unité V_{CTH} correspond à 375 électrons. La moyenne pondérée des incertitudes de ces valeurs, permet de calculer le piédestal et le bruit qui peuvent être considérés comme références pour les simulations.

On obtient les valeurs suivantes :

$$p = 119.86 \pm 0.09 V_{CTH} \quad \sigma = 2.12 \pm 0.06 V_{CTH} . \quad (7.3)$$

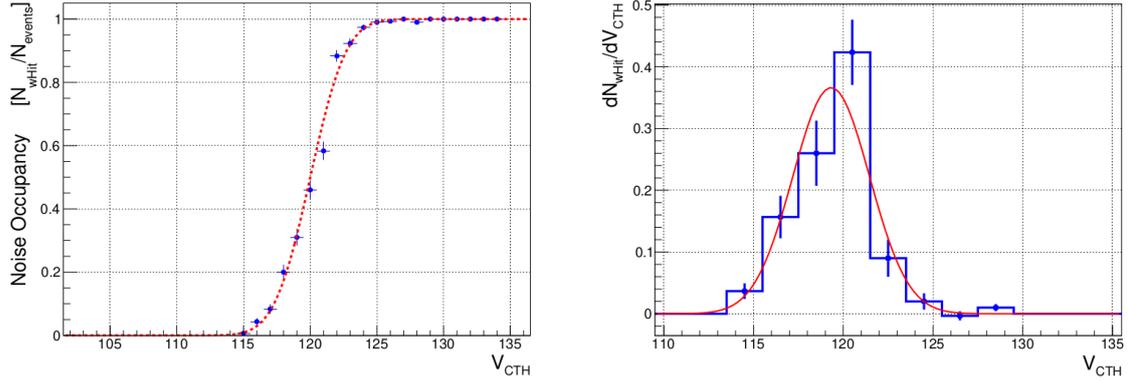


FIGURE 7.1 – Courbe en S d'une piste du mini-module non irradié. À gauche les données mesurées, et à droite l'histogramme différentiel. Les paramètres des équations 7.1 et 7.2 sont issus des courbes de régression (en rouge sur les graphiques) [1].

Dans cette approximation, le bruit simulé correspond donc à une gaussienne de paramètres $\mu = 0$ et $\sigma = 2.12 \times 375 = 795$ électrons, soit $\sigma = 795 \times 3.62 \text{ eV} \approx 2.88 \text{ keV}$.

Une seconde approximation, plus précise, consiste à simuler le σ_{piste} de chaque piste individuelle à partir des informations issues de l'article. Il est précisé que le bruit moyen dans les pistes des deux puces CBC2 présentes sur le mini-module sont de 1.36 ± 0.06 et 2.38 ± 0.60 unités V_{CTH} .

Dans la simulation, une première valeur aléatoire, générée sur base de ces données, permet d'obtenir le σ_{piste} (loi normale $N(1.36, 0.06)$ ou $N(2.38, 0.60)$). Sur base de cette valeur, le bruit dans la piste est simulé par la génération d'un nouveau nombre aléatoire basé sur une loi normale $N(0, \sigma_{piste})$.

7.2.2 Simulation du seuil

De la même manière que dans la section précédente, le seuil en keV (T_{keV}) est calculé à partir du piédestal et de la correspondance entre unités V_{CTH} et électrons. Par exemple, si lors des tests en faisceau, un seuil de $106 V_{CTH}$ a été appliqué, le seuil simulé est calculé de la manière suivante :

$$T_{keV} = |p - T_{V_{CTH}}| \times 375 \times 3.62 \quad (7.4)$$

$$T_{keV} = |119.86 - 106| \times 375 \times 3.62 \approx 18.8 \text{ keV} \quad (7.5)$$

7.2.3 Simulation de la logique de corrélation

À titre d'exemple, la fonction reproduisant la logique de corrélation des puces CBC2, est détaillée dans le code en Annexe B page 112. Le code reproduit la logique de la puce [8], avec les principales étapes suivantes :

- (ajout du bruit - uniquement simulation ;)
- application du seuil ;
- formation des clusters à partir des hits sur les deux capteurs ;
- rejet des clusters dont la largeur est supérieure au seuil fixé dans les deux capteurs ;
- recherche des stubs potentielles, sur base des clusters valides identifiés sur le premier capteur, selon la fenêtre de corrélation fixée.

Cette fonction renvoie directement des informations statistiques pouvant être utilisées pour la création des graphiques. Elle est appelée pour chaque événement. Si 10^9 particules ont été simulées, pour un module de 1016 pistes par capteur, la boucle de détection des clusters devra être effectuée $10^9 \times 1016 \times 2 \approx 10^{12}$ fois, soit mille milliards de fois, d'où l'importance

de disposer d'un code efficace, afin de permettre une analyse en un temps raisonnable. Cette fonction de simulation des puces CBC est commune à la plupart des analyses, pour la reproduction des données de l'article. Dans certains cas, le code est légèrement modifié pour permettre l'analyse plus rapide d'un paramètre.

Les codes d'analyse complets ne sont pas détaillés ici, du fait de leur taille (500 lignes de code par graphique en moyenne), mais l'ensemble du code est disponible sur GitHub [18].

7.2.4 Incertitudes

Dans toute analyse statistique, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes, afin de pouvoir exprimer des résultats avec un certain intervalle de confiance.

La norme ISO 5725-1 [24] définit deux termes pour décrire l'exactitude de mesure :

- la justesse, correspond à l'accord entre la moyenne arithmétique des valeurs mesurées et la valeur de référence ;
- la fidélité, correspond à l'étroitesse de l'accord entre les résultats d'un essai.

Il est donc nécessaire de posséder un point de comparaison, afin de pouvoir estimer la justesse. La valeur réelle de l'élément mesuré étant le plus souvent inconnue (et impossible à connaître), une valeur de référence est souvent définie.

Dans le cas présent, la valeur de référence des mesures est définie comme le résultat issu des tests en faisceau. Les valeurs issues de la simulation seront donc comparées à cette référence.

Afin de pouvoir estimer la fidélité des résultats de simulation, les résultats issus de la simulation sont systématiquement divisés en 100 parts égales. L'analyse est effectuée sur chaque part, puis la moyenne arithmétique ainsi que l'écart-type sont évalués pour l'ensemble.

Le résultat final est donc présenté en deux parties : une première partie précise la valeur moyenne ainsi que l'écart-type, tandis qu'une seconde précise l'écart de cette moyenne avec la valeur de référence.

Bien évidemment, dans le cas de la simulation des tests à venir, aucune valeur de référence n'est disponible, et seuls la moyenne et l'écart-type peuvent être renseignés.

Troisième partie

Résultats et Analyse

Introduction

Dans cette troisième et dernière partie du mémoire, les résultats des simulations sont présentés, analysés et discutés. La présentation des résultats suit la méthodologie détaillée dans les précédents chapitres, et est donc divisée en deux grandes parties.

Dans la première partie, les résultats de la reproduction des tests en faisceau sur le mini-module non-irradié de l'article de W. ADAM *et al.* 2020 [1] sont présentés et discutés.

Dans la seconde partie, les résultats des simulations du module de taille réelle (grand module) sont présentés et analysés.

Les résultats sont tout d'abord présentés de manière neutre, avant d'être analysés et remis dans leur contexte.

Contenu

8.1	Variation du Seuil du Comparateur	78
8.2	Rotation du Module	82
8.2.1	Largeur Moyenne des Clusters et Multiplicité	82
8.2.2	Discrimination des Particules	84
8.3	Discussion des Résultats	87

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter les résultats des simulations reproduisant les tests en faisceau effectués sur un mini-module non-irradié [1].

Afin de valider le modèle, il est important de reproduire un maximum de tests, afin de pouvoir comparer les prédictions de la simulation avec les données expérimentales, et ce pour différents paramètres et dans différentes situations.

Les résultats présentés dans ce chapitre, consistent en la reproduction de deux principaux tests :

1. dans le premier test, le mini-module n'est pas incliné, et toutes les particules incidentes sont perpendiculaires au plan du mini-module. En faisant varier le seuil du comparateur, on peut observer l'évolution du nombre moyen de hits et de clusters sur chacun des capteurs du mini-module. Ce premier test permet de sélectionner le seuil optimal, qui sera utilisé pour les autres tests, séparant au mieux le bruit du signal ;
2. dans le second test, le mini-module est progressivement incliné autour de l'axe des pistes, afin de simuler l'impact de particules de différents p_T . La largeur moyenne des clusters, ainsi que l'efficacité de la discrimination des particules selon leur p_T , sont alors analysées.

Dans les deux cas, et pour tous les graphiques, trois séries de données sont présentées et comparées :

1. les données issues de l'article concernant le mini-module non-irradié,
2. les données issues de l'article concernant le mini-module irradié,
3. les données issues de la simulation du mini-module non-irradié.

Le module irradié n'a pas été simulé, du fait de la complexité de la simulation des effets des RI sur la formation du signal et le partage des charges.

8.1 Variation du Seuil du Comparateur

Les puces CBC produisant en sortie un signal binaire, un hit est détecté dans une piste donnée si la charge induite dans cette piste est supérieure au seuil du comparateur $T_{V_{CTH}}$. Il est important de noter qu'une augmentation du seuil du comparateur (en unités V_{CTH}) correspond en réalité à une limite plus basse pour la détection des hits. Dans les graphiques suivants, le seuil est donné en électrons et en keV, après conversion depuis les unités V_{CTH} via l'équation 7.5 page 73.

Les Fig. 8.1 et 8.3 page 79, présentent respectivement l'évolution du nombre moyen de hits et de clusters en fonction de la valeur du seuil du comparateur. Pour cette simulation, 10^5 particules ont été simulées, émises perpendiculairement au plan du mini-module. La logique de corrélation des puces CBC2 est alors simulée pour chaque valeur de seuil, à partir du même fichier de données.

On remarque trois zones différentes dans ces graphiques, pour les données issues de la simulation :

1. lorsque le seuil du comparateur en électrons est bas ($\lesssim 4000$ électrons), le bruit dépasse le seuil dans de nombreuses pistes, même lorsqu'aucune particule n'y a déposé de l'énergie : le nombre moyen de hits et de clusters par événement est très supérieur à 1. Dans ce régime, le signal est noyé dans le bruit ;
2. pour des valeurs de seuil comprises entre ≈ 4000 et ≈ 15000 électrons, le nombre moyen de hits et de clusters par événement est stable, aux alentours de 1 hit et 1 cluster par événement. Le nombre moyen de hits est légèrement supérieur sur le second capteur (*bottom sensor*), du fait des électrons δ pouvant se former sur le premier capteur (*top sensor*). C'est dans ce régime que l'on fixe généralement le seuil du comparateur ;
3. lorsque le seuil augmente encore (au-delà d'environ 15000 électrons), le signal commence à être atténué. Du fait de la distribution de Landau (voir Fig. 2.3 page 24), certaines pistes ayant été traversées par une particule ne génèrent plus un signal supérieur au seuil du comparateur. Plus le seuil augmente, plus le signal est masqué. Cette situation doit être évitée, car elle correspond à une perte du signal.

L'incertitude sur les résultats (fidélité), est inférieure à 1% pour toutes les valeurs de seuil simulées.

L'accord entre les valeurs simulées et les données expérimentales (justesse), est estimé en calculant l'erreur relative entre la valeur donnée par la simulation et la valeur cible (expérimentale). Les graphiques reprenant les erreurs relatives sont présentés sur les Fig. 8.2 et 8.4.

L'écart relatif est inférieur à 10% dans les deux cas pour des valeurs de seuil comprises entre 5000 et 16000 électrons environ. Sur cette plage, les valeurs sont sous-estimées, de manière plus prononcée pour le nombre moyen de hits par événement. Au-delà de 16500 électrons, la simulation surestime le nombre moyen de hits et de clusters détectés.

L'écart important pour les valeurs de seuil élevées peut s'expliquer de plusieurs manières : cette zone du graphique correspond à un balayage (ou scan) de la fonction cumulative de la distribution de Landau. Les trois paramètres suivants (entre autres) peuvent modifier (décaler) l'allure de la distribution de Landau associée au passage des particules dans le silicium :

1. l'épaisseur active : l'épaisseur active détermine la Most Probable Value (MPV) (énergie la plus probable) de l'énergie déposée par les particules incidentes. Plus l'épaisseur active (zone de déplétion) est petite, plus la distribution de Landau se décale vers les faibles énergies. À l'inverse, une augmentation de l'épaisseur active décale la distribution de Landau vers des valeurs plus élevées. Plus l'énergie déposée

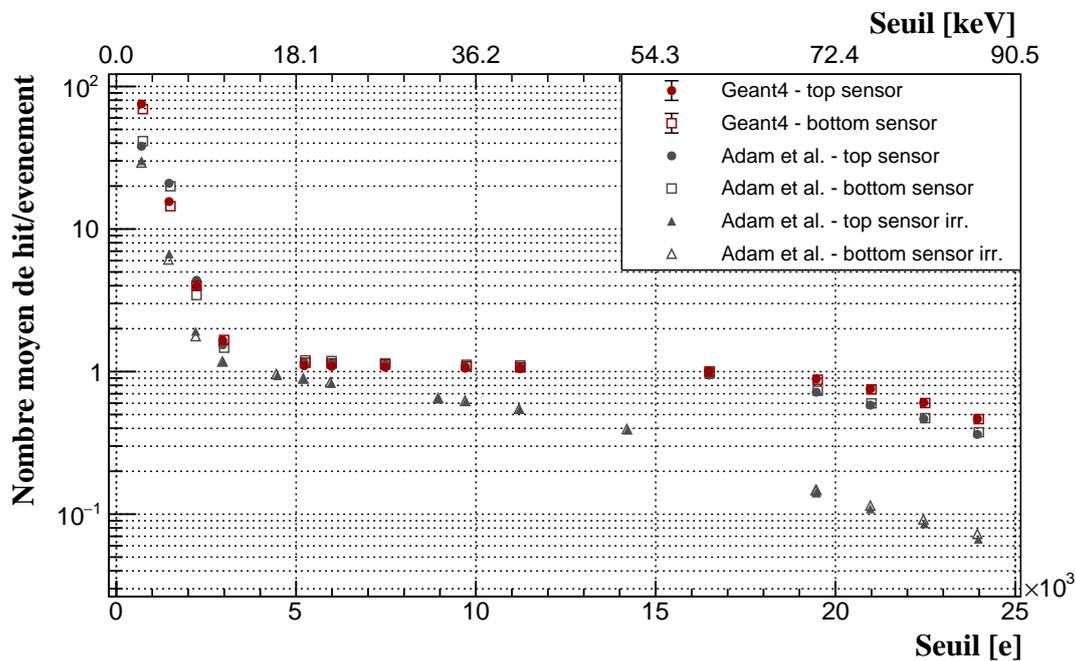


FIGURE 8.1 – Évolution du nombre moyen de hits en fonction du seuil du comparateur appliqué. Le mini-module n'est pas incliné, toutes les particules incidentes sont donc perpendiculaires au plan des capteurs. Comparaison avec les données expérimentales [1].

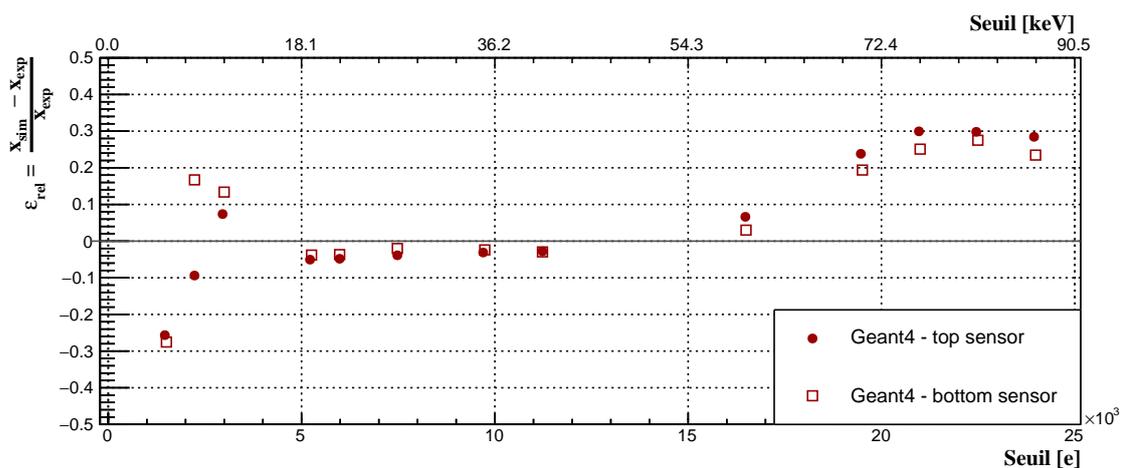


FIGURE 8.2 – Erreur relative pour la Fig. 8.1. Comparaison avec les données expérimentales [1].

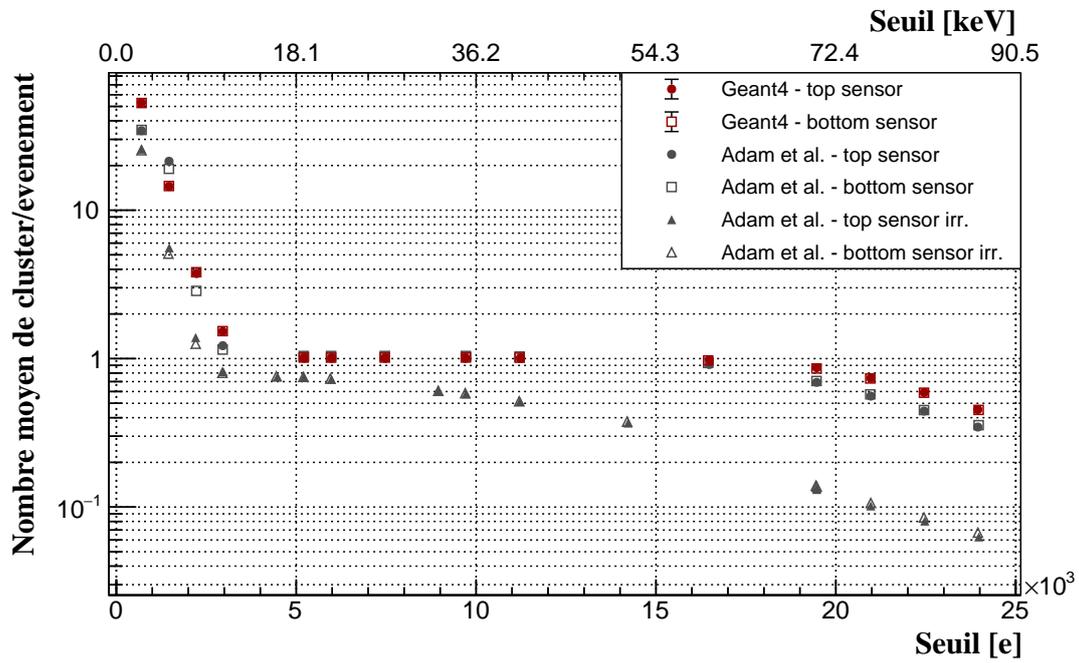


FIGURE 8.3 – Évolution du nombre moyen de clusters en fonction du seuil du comparateur appliqué. Le mini-module n’est pas incliné, toutes les particules incidentes sont donc perpendiculaires au plan des capteurs. Comparaison avec les données expérimentales [1].

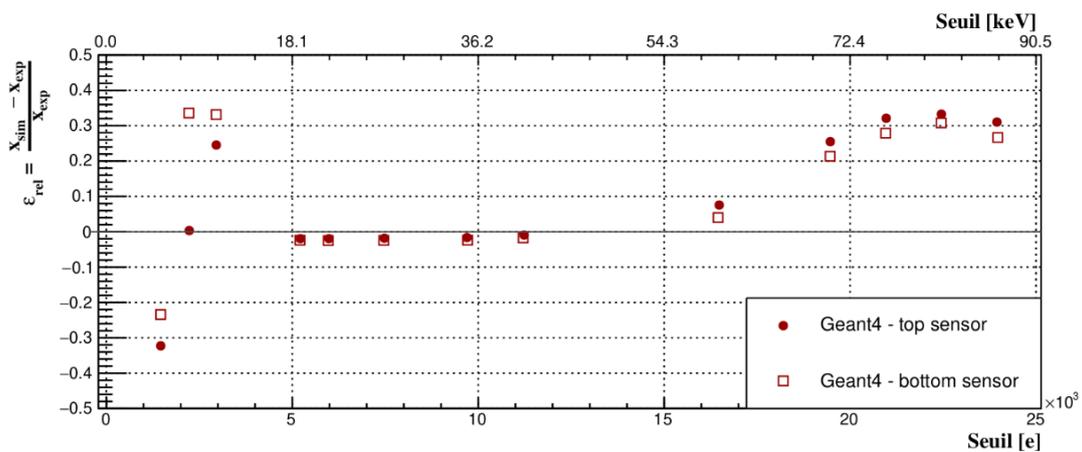


FIGURE 8.4 – Erreur relative pour la Fig. 8.3. Comparaison avec les données expérimentales [1].

- moyenne est élevée, plus le nombre de hits et de clusters sera élevé, pour une valeur de seuil de comparateur donnée ¹ ;
2. l'énergie déposée moyenne nécessaire à la formation d'une paire électron/trou \bar{w} : la valeur choisie de 3.62 eV par paire est une approximation, la valeur réelle n'étant pas connue dans les conditions de l'expérience. Une valeur plus élevée conduit à moins de paires formées, et donc à un signal plus faible. L'inverse est vrai également ;
 3. un partage de charge plus important entre les pistes : si le signal est partagé de manière plus prononcée entre les pistes (principalement pour des particules traversant le capteur proche de l'interface entre deux pistes), le signal moyen par piste est plus faible, ce qui conduit à la formation de moins de hits et de clusters pour un seuil donné.

Afin d'illustrer l'influence des deux premiers paramètres, plusieurs simulations ont été effectuées, en modifiant l'épaisseur active (par pas de $5\mu\text{m}$) ou l'énergie moyenne de création de paire (par pas de 0.02 eV/paire).

Comme on peut le voir sur la Fig.8.5, une épaisseur active de $250\mu\text{m}$ donne des résultats plus justes. Une modification de l'énergie moyenne de création de paire, passant de 3.62 eV/paire à 3.86 eV/paire, améliore également les résultats (voir Fig. 8.6).

La simulation du partage des charges n'a pas été modifiée, du fait de la complexité des modèles entrant en jeu.

La réalité consiste probablement en une combinaison de ces trois facteurs, c'est-à-dire une épaisseur active différente de $270\mu\text{m}$, un partage de charge plus important entre les pistes, et un \bar{w} différent de 3.62 eV. Dans la suite, la valeur cible issue de l'article est utilisée pour l'épaisseur active ($270\mu\text{m}$), et la valeur de $\bar{w} = 3.62\text{ eV}$ est conservée. Le modèle simplifié de partage des charges n'est pas modifié.

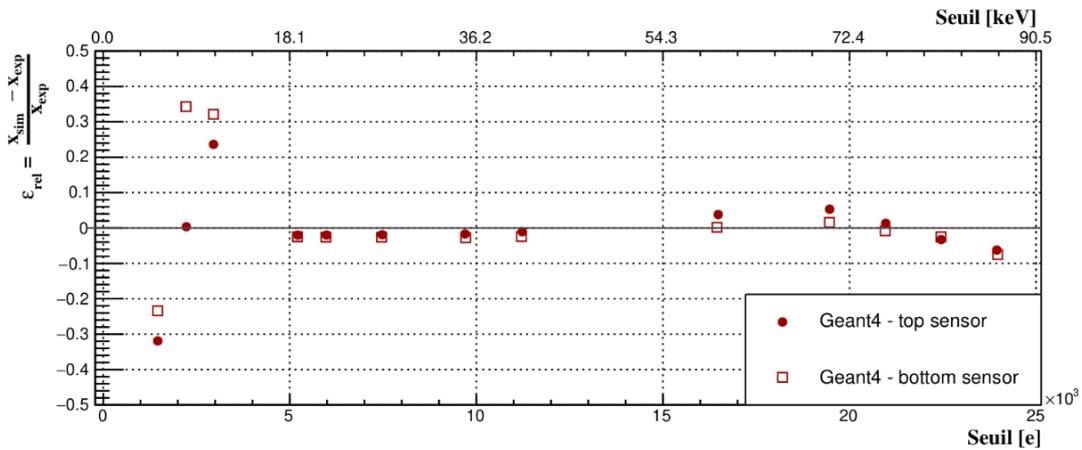


FIGURE 8.5 – Erreur relative pour une diminution de l'épaisseur active (zone de déplétion), de 270 à $250\mu\text{m}$. Comparaison avec les données expérimentales [1].

Concernant les résultats pour le mini-module irradié, l'article précise que le plus faible nombre moyen de hits et de clusters pour un seuil donné est dû aux dégâts des RI, ainsi qu'à l'épaisseur active plus faible ($240\mu\text{m}$) des capteurs de ce mini-module [1].

Sur base de ces résultats, l'article précise que le seuil du comparateur utilisé pour la suite des expériences est de 106 (resp. 110) unités V_{CTH} pour le mini-module non-irradié (resp. irradié). Ces valeurs sont choisies afin de séparer au mieux le bruit du signal utile. Les mêmes valeurs sont utilisées dans les simulations.

1. Uniquement valable pour les valeurs de seuil élevées, atténuant le signal.

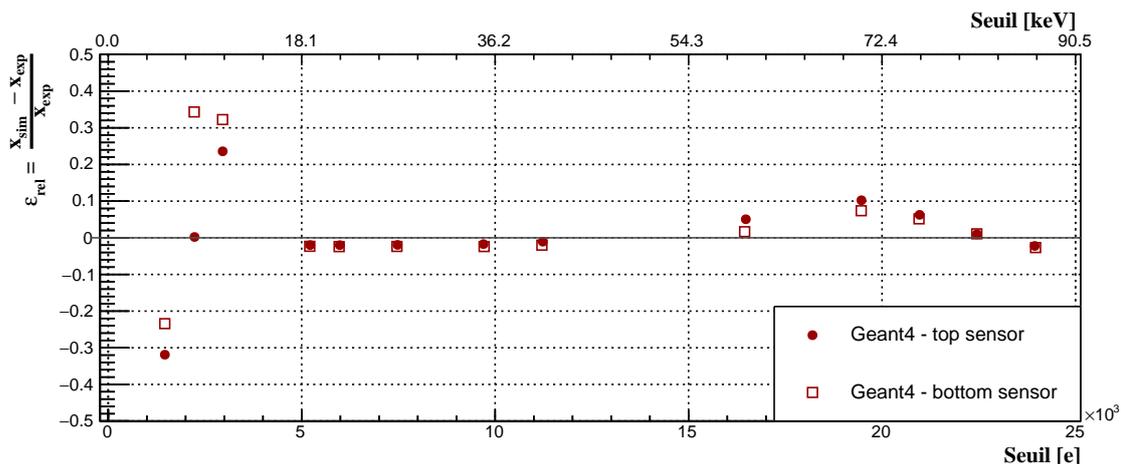


FIGURE 8.6 – Erreur relative pour une augmentation de l'énergie moyenne de création de paire, de $w = 3.62$ à $w = 3.86$ eV/paire. Comparaison avec les données expérimentales [1].

8.2 Rotation du Module

Dans cette seconde étape, le mini-module est progressivement incliné par rapport au faisceau incident de particules, via une rotation autour de l'axe des pistes. Cette inclinaison simule l'angle d'incidence de particules de p_T décroissant.

L'évolution de la largeur moyenne des clusters est alors suivie en fonction du p_T simulé. Cette méthode permet également de suivre le nombre moyen de stubs formées en fonction de la fenêtre de corrélation choisie, et donc de vérifier la capacité du mini-module à discriminer les particules selon leur p_T .

8.2.1 Largeur Moyenne des Clusters et Multiplicité

La Fig. 8.8 présente l'évolution de la largeur moyenne des clusters en fonction de l'angle de rotation, pour la simulation et pour les deux mini-modules utilisés dans l'article. On remarque un comportement à tendance linéaire. Pour le mini-module non-irradié, comme pour la simulation, on observe une augmentation progressive de la largeur moyenne des clusters avec l'angle de rotation. En effet, plus le module est incliné, plus la probabilité augmente pour les particules incidentes de traverser plusieurs pistes adjacentes. On remarque que la simulation présente des résultats similaires, avec cependant une augmentation plus franche de la largeur moyenne des clusters. À faible angle d'inclinaison (haut p_T), la simulation prédit une largeur moyenne plus faible. À l'inverse, à angle d'inclinaison élevé (p_T faible), la simulation prédit une largeur moyenne plus élevée que ce qui est relevé au niveau du mini-module non-irradié.

La fidélité (incertitude) sur les résultats de la simulation est inférieure à 1.5% pour l'ensemble des points de mesure. La justesse (valeur absolue de l'écart relatif par rapport aux résultats du test en faisceau), est inférieure à 1.5% pour l'ensemble des points. Cet écart relatif est asymétrique, comme on peut le voir sur la Fig. 8.8, avec un point d'écart minimum autour de 2.5 GeV (angle de 8°).

Pour le mini-module irradié, les dégâts liés aux RI induisent une modification de champ électrique et du partage de charge. Cela induit une largeur moyenne des clusters plus élevée à faible inclinaison, et une augmentation moins franche avec l'angle [1].

Les différences entre la simulation et les résultats expérimentaux peuvent une fois de plus s'expliquer par le partage des charges et une épaisseur active plus élevée dans la simulation. À faible angle d'incidence, un partage de charge plus faible conduit à une largeur moyenne des clusters moins élevée. À angle d'incidence plus élevé, une épaisseur active plus élevée

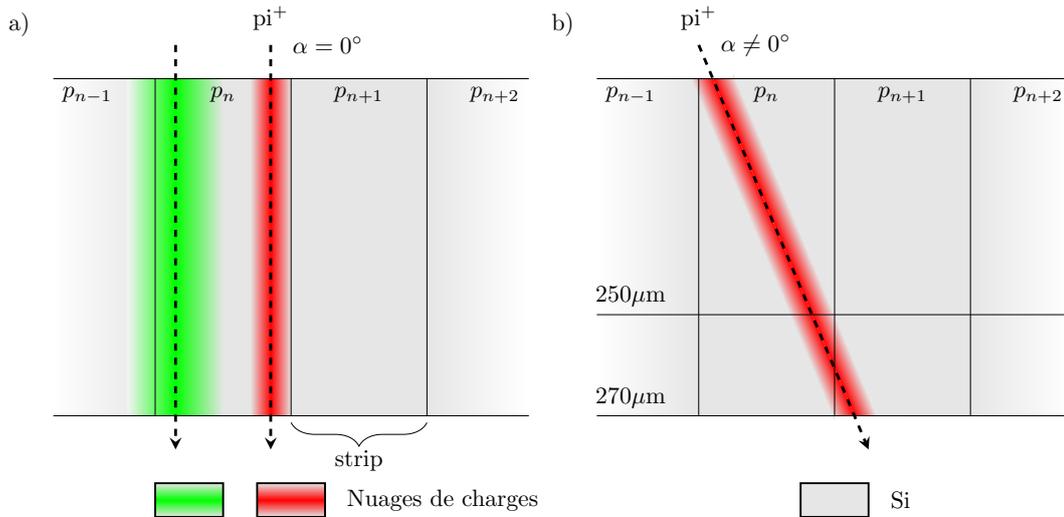


FIGURE 8.7 – Illustration de l’impact du modèle de partage des charges et de l’épaisseur active sur la largeur des clusters. a) pour deux particules passant à la même distance du centre d’une piste, si le partage de charge est plus élevé (en vert), la probabilité de former un hit dans la piste adjacente est plus élevée. Dans le cas d’un partage de charge faible, cette probabilité diminue (en rouge). b) Dans le cas de particules inclinées, la probabilité de traverser plusieurs pistes dépend de l’angle et de l’épaisseur de la zone de déplétion. Dans le cas représenté ici, des pistes de $250\ \mu\text{m}$ ne produiront qu’un seul hit, tandis que des pistes de $270\ \mu\text{m}$ en produiront 2. Le graphique n’est pas à l’échelle.

augmente la probabilité de traverser plusieurs pistes, ce qui augmente la largeur moyenne des clusters. Ces deux phénomènes sont illustrés sur la Fig. 8.7.

La Fig. 8.9 présente quant à elle la fraction de clusters de différentes multiplicités, c’est-à-dire la proportion de clusters d’une piste, deux pistes, ou plus de deux pistes de largeur, en fonction de l’angle d’incidence des particules. On remarque que la proportion de clusters de plus de 2 pistes est relativement faible et stable à ces angles d’incidence. La proportion de clusters d’une piste de largeur diminue progressivement avec l’augmentation de l’angle d’incidence, tandis que la proportion de clusters de deux pistes de largeur augmente en conséquence.

On observe la même tendance d’inversion autour de $5\ \text{GeV}$ (4°) que pour la largeur moyenne des clusters : pour des angles plus faibles, la simulation prédit moins de clusters de deux pistes, et plus de clusters d’une piste de largeur. La situation est inversée pour les valeurs d’angle supérieures à environ 4° .

Pour les clusters d’une piste de largeur, la simulation présente un écart relatif inférieur à 4% pour tous les points. La fidélité est également inférieure à 4%.

Pour les clusters de deux pistes de largeur, l’écart relatif atteint près de 10% pour les faibles valeurs d’angle. La fidélité est inférieure à 11%.

La simulation sous-estime systématiquement la proportion de clusters de plus de 2 pistes de largeur, de 18% en moyenne (écart relatif). La fidélité est ici relativement faible, de l’ordre de 30 à 40%, du fait de la faible occurrence de ce type d’événements.

Pour le mini-module irradié (non visible sur ces graphiques, voir la figure 18, partie de droite, dans [1]), les proportions sont approximativement stables quel que soit l’angle d’incidence.

Dans l’ensemble, la tendance générale est très similaire et le modèle s’accorde bien avec les

données expérimentales. La simplification du partage des charges entre les pistes induisant nécessairement une différence rédhibitoire.

8.2.2 Discrimination des Particules

La dernière étape consiste à étudier l'efficacité de détection des stubs en fonction de l'angle d'incidence des particules, afin de confirmer la capacité du mini-module à discriminer les particules selon leur p_T .

La distance qui sépare les deux capteurs joue un rôle crucial dans la discrimination des particules. À fenêtre de corrélation égale, une distance plus grande implique un seuil plus élevé (en GeV). Le seuil en p_T est donc très sensible à cette distance.

Dans l'article, il est précisé que la séparation des capteurs est de 2.75 mm. Lors des premières simulations, effectuées avec cette même distance, les résultats n'étaient pas du tout en accord. Deux solutions sont alors possibles : soit le modèle est incorrect, soit la distance entre les capteurs n'est pas de 2.75 mm.

La distance donnée dans l'article correspond à la séparation visée lors de la fabrication, et ne résulte pas de mesures métrologiques.

Après plusieurs simulations, et en modifiant la distance entre les deux capteurs (voir la Fig. C.2 en annexes page 121), le modèle prédit une séparation aux alentours de 2.65 mm (et non 2.75 mm).

La différence est importante, et non négligeable. Il est capital d'identifier la source de cet écart important avant de poursuivre les simulations. Les auteurs de l'article sont contactés, mais aucune information n'est trouvée concernant la distance réelle entre les deux capteurs. Après avoir cherché dans les archives du CERN, une présentation interne datant de novembre 2016 (dans le *Beam Test Analysis Meeting*) expose une méthode de mesure de la distance séparant les capteurs, directement à partir des données issues des tests en faisceau de l'article de W. ADAM [1]. Par la minimisation de l'erreur d'alignement entre les capteurs, une séparation de 2.63 mm est calculée [9].

Cette valeur étant en accord avec les prédictions du modèle, et en l'absence d'une mesure plus fiable, elle est choisie pour la suite des simulations avec le mini-module.

La Fig. 8.10 compare les résultats de l'article avec ceux de la simulation *Geant4*.

Les régressions sont effectuées à partir de la même équation que celle utilisée dans l'article (voir équation 4.2 page 55).

On remarque que l'allure de la courbe est très similaire, mais possède une pente plus forte et une valeur de plateau plus élevée. Les paramètres des courbes de régression sont présentés dans le Tableau 8.1, accompagnés de leur incertitude :

Paramètre	Geant4	Mini-module	Mini-module irradié	Unité
Sép. entre capteurs	2.63	2.75 (?)	3.05 (?)	mm
Eff. de plateau (A)	99.3 ± 0.1	98.4 ± 0.3	96.1 ± 0.5	%
p_{T_μ}	1.878 ± 0.003	1.877 ± 0.003	2.139 ± 0.003	GeV
Résolution (σ_{p_T}/p_{T_μ})	7.8 ± 0.2	8.4 ± 0.3	8.3 ± 0.3	%

Tableau 8.1 – Paramètres issus de la régression pour les mini-modules. La séparation entre les capteurs des mini-modules n'est pas connue avec précision, en dehors de la valeur cible lors de la production.

On remarque que la valeur de 50% d'efficacité (p_{T_μ}) issue de la simulation est très proche du résultat expérimental, avec un écart relatif de l'ordre de 0.1% seulement. Cette proximité des valeurs renforce l'hypothèse selon laquelle la séparation entre les capteurs du mini-module non-irradié est plus proche de 2.63 mm que des 2.75 mm visés lors de la fabrication.

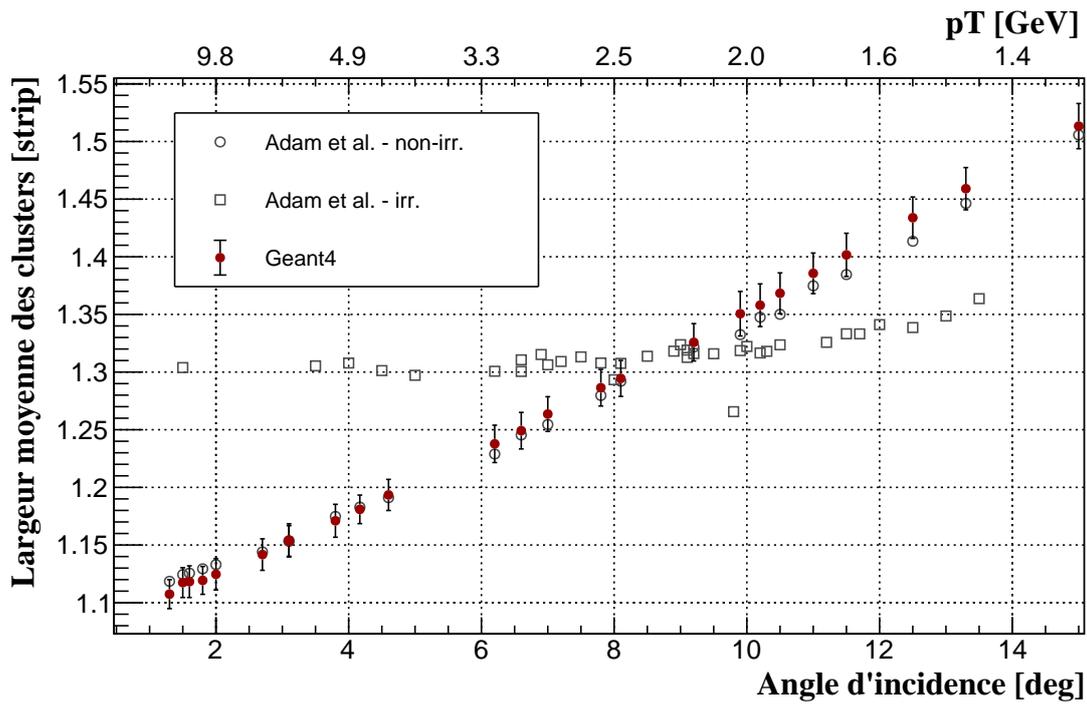


FIGURE 8.8 – Évolution de la largeur moyenne des clusters en fonction de l'angle d'incidence des particules (du p_T simulé). Comparaison avec les données expérimentales [1].

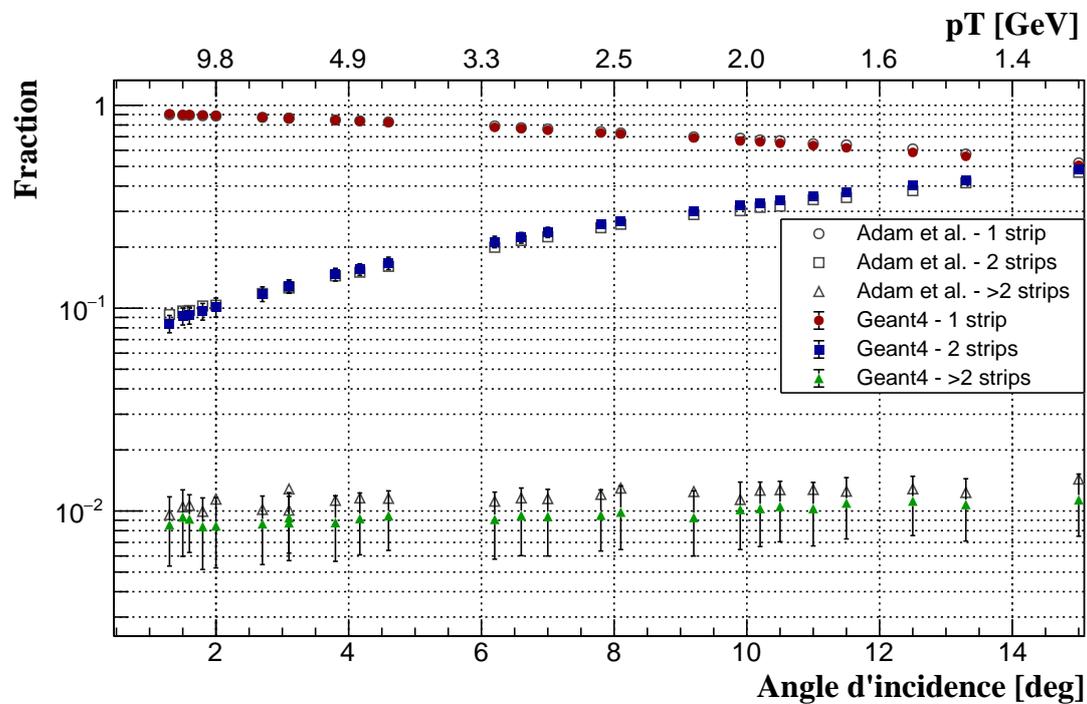


FIGURE 8.9 – Évolution de la fraction des clusters de différentes multiplicités. Comparaison avec les données expérimentales [1].

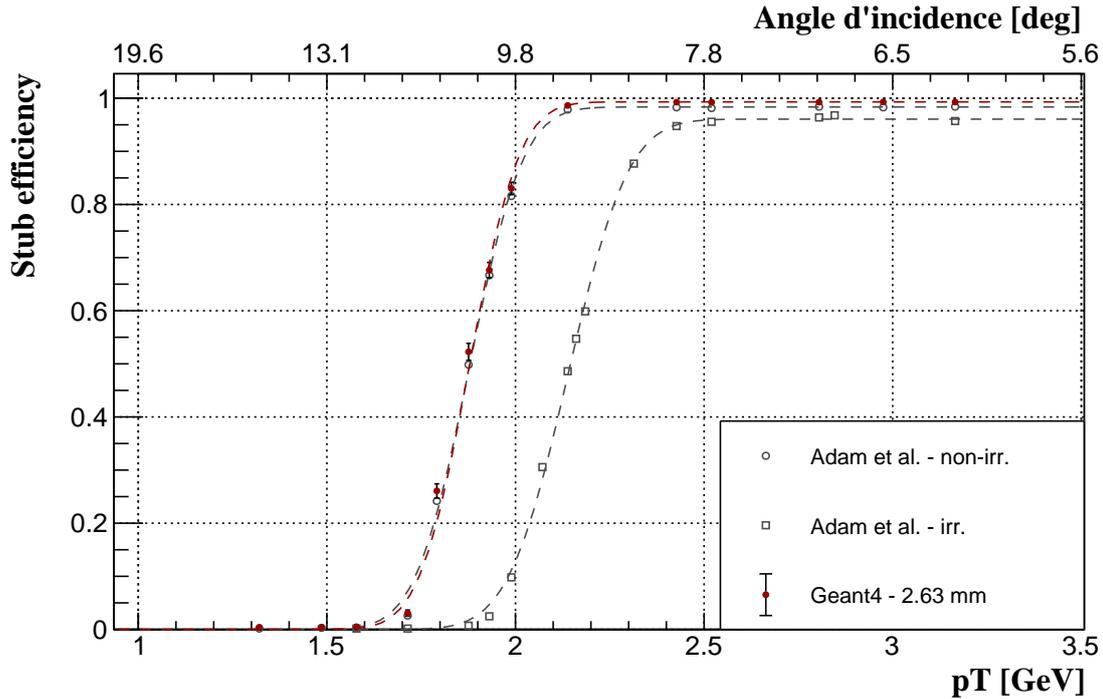


FIGURE 8.10 – Évolution de l'efficacité de détection des stubs en fonction de l'angle d'incidence des particules. Comparaison avec les données expérimentales [1].

Les valeurs d'efficacité de plateau sont relativement proches (écart relatif de 1%). L'efficacité légèrement supérieure de la simulation peut s'expliquer par la non-prise en compte des pistes masquées sur le mini-module, car présentant un bruit trop élevé. Ne connaissant pas la position de ces pistes, elles n'ont pas été masquées dans la simulation. Ce phénomène contribue à améliorer la résolution en p_T , qui diminue de près de 8% (écart relatif) dans la simulation par rapport au résultat expérimental.

Comme on peut le voir sur la Fig. 8.11, la simulation rejette légèrement moins efficacement les particules de faible p_T , sans que cela soit statistiquement significatif (écart de l'ordre d'un sigma).

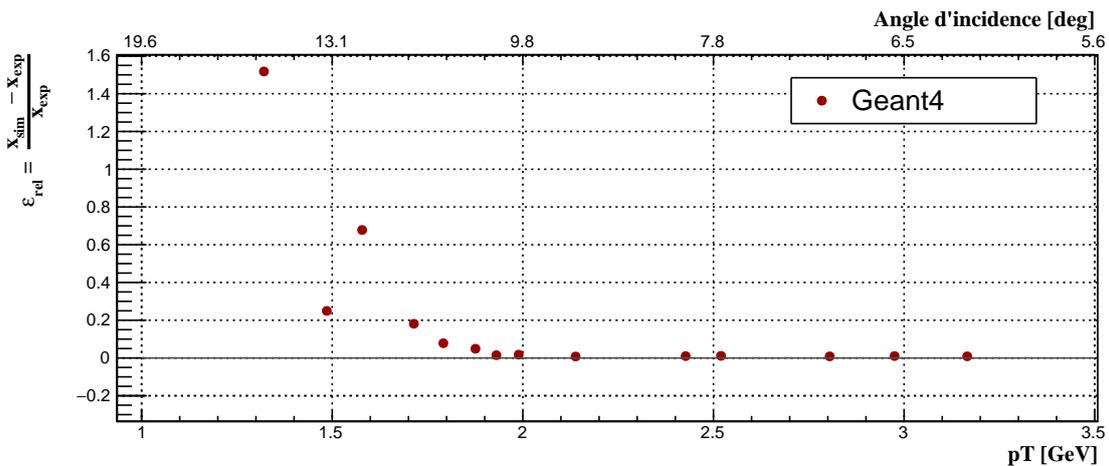


FIGURE 8.11 – Erreur relative pour la Fig. 8.10. Comparaison avec les données expérimentales [1].

Cependant, l'écart absolu reste inférieur à 0.025, correspondant à un écart d'efficacité inférieur à 2.5% pour tous les points simulés. Il est important de rappeler que la sépara-

tion réelle entre les capteurs n'est pas connue. La simulation surestime systématiquement l'efficacité, de 1% en moyenne (écart relatif), ce qui plaide en faveur d'une séparation légèrement supérieure à 2.63 mm, sans que cela puisse être confirmé, ou qu'une valeur précise puisse être donnée.

L'influence d'une modification de la fenêtre de corrélation et de la distance entre les deux capteurs, sont visibles sur les Fig.C.1 et C.2 en Annexe C.1 page 120. On remarque la possibilité de modifier le seuil de discrimination en p_T via le réglage de la fenêtre de corrélation, et ce sans modification de la géométrie du module. Cependant, un réglage plus fin passe nécessairement par une modification de la distance entre les capteurs, qui ne peut être réglée que lors de l'assemblage du module.

8.3 Discussion des Résultats

Il ressort des résultats de ces simulations, que le modèle présente les mêmes tendances que celles issues des tests en faisceau. Un certain nombre de différences sont cependant visibles. Le nombre de hits et de clusters détectés sur les deux capteurs est systématiquement sous-estimé, avec un écart relatif de 5% pour les hits et de 2.5% pour les clusters.

La simulation de l'évolution de la largeur moyenne des clusters en fonction de l'angle d'incidence présente un très bon accord avec les données expérimentales, avec un écart relatif inférieur à 1.5% pour tous les angles simulés. Cet écart est cependant asymétrique, ce qui résulte possiblement d'une différence de partage des charges et d'une épaisseur active différente de 270 μm .

La fraction moyenne de clusters de plus de 2 pistes est sous-estimée d'environ 20% par le modèle. Pour les clusters d'une et deux pistes de largeur, l'écart relatif est inférieur à 4% et 10% respectivement.

Pour finir, la formation des stubs est très bien reproduite par le modèle. Pour une séparation entre capteurs de 2.63 mm dans la simulation, l'écart relatif sur la valeur du seuil (p_{T_μ}) est de l'ordre de 0.1%. Du fait de la présence de pistes masquées sur le mini-module testé, l'efficacité de plateau est supérieure d'environ 1% dans la simulation. La résolution en p_T est sous-estimée d'environ 8% (meilleure résolution), bien que les deux valeurs soient en accord à $\pm 2\sigma$.

L'ensemble des résultats plaide en faveur d'une épaisseur active légèrement inférieure à 270 μm , un partage de charge plus élevé que dans la simulation, ainsi qu'une séparation entre les capteurs inférieure à 2.75 mm, plus proche des 2.63 mm.

La précision du modèle est relativement bonne, et les écarts relatifs observés permettront d'estimer la justesse des résultats qui seront obtenus pour la simulation du module de taille réelle.

CHAPITRE 9

GRAND MODULE ET CHAMP MAGNÉTIQUE

Contenu

9.1	Puces CBC3	88
9.2	Influence du Champ Magnétique	89
9.3	Variation du Seuil du Comparateur	90
9.4	Rotation du Module	93
9.4.1	Largeur Moyenne des Clusters et Multiplicité	93
9.4.2	Discrimination des Particules	95
9.5	Discussion des Résultats	97

Dans cette seconde partie de l'analyse, plusieurs changements sont effectués. Premièrement, le passage de la version 2 à la version 3 des puces CBC permet une meilleure précision dans la détermination de la position des clusters. Deuxièmement, le passage à la géométrie du grand module apporte de nombreuses modifications, les plus notables étant une épaisseur active passant de 270 à 290 μm , et un nombre de pistes passant de 254 à 1016. Enfin, l'ajout du champ magnétique de 3 teslas modifie le comportement des particules, notamment celui des électrons δ .

Une fois ces paramètres modifiés, les mêmes simulations que pour le mini-module sont réalisées, afin d'étudier le nombre moyen de hits et de clusters, la largeur moyenne des clusters, et l'efficacité de discrimination des particules selon leur p_T .

9.1 Puces CBC3

La première différence majeure réside dans le passage à la version 3 des puces CBC. La précision en demi-piste permet théoriquement d'améliorer la résolution en p_T . Afin de pouvoir comparer leurs résultats, il est possible de comparer l'efficacité de détection des stubs pour un même set de données, avec les deux versions des puces. Une telle comparaison est visible sur la Fig. 9.1.

On remarque immédiatement que la résolution est meilleure dans le cas de la puce CBC3. La régression donne une valeur de résolution de $\sigma_{p_T, CBC3} = 5.7 \pm 0.2 \%$, à comparer aux $\sigma_{p_T, CBC2} = 7.8 \pm 0.2 \%$ de résolution pour la version 2. Le simple fait de modifier la puce responsable des corrélations, améliore la résolution en p_T de 25% environ, et ce avec le même mini-module.

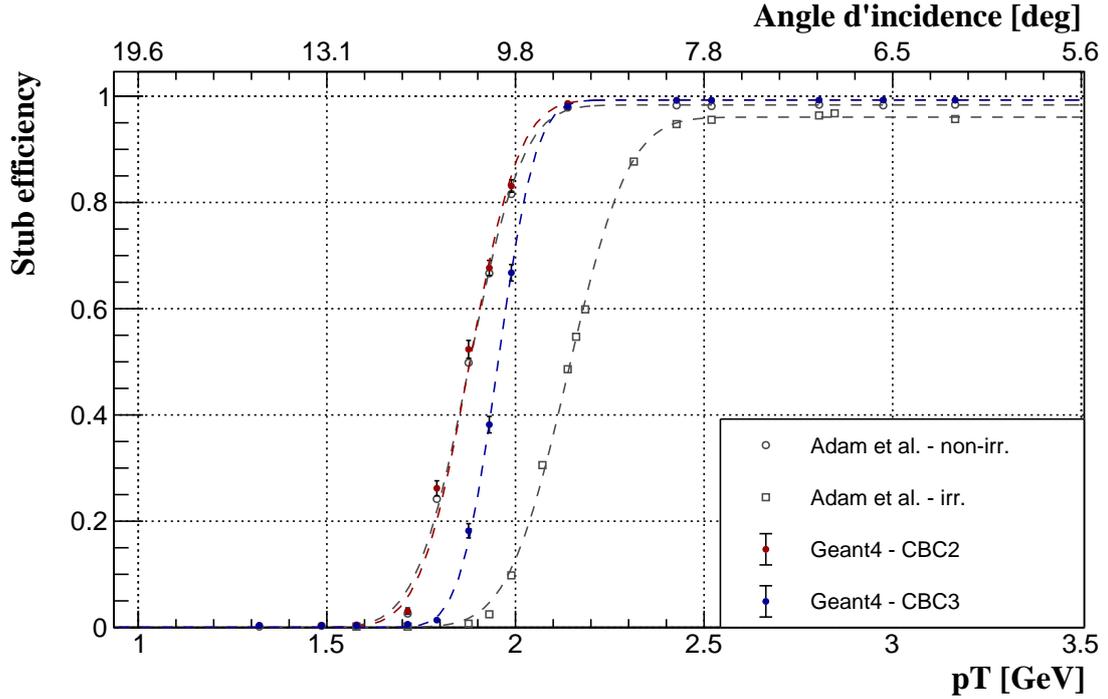


FIGURE 9.1 – Efficacité des puces CBC versions 2 et 3 sur un mini-module identique, dans la discrimination en p_T des particules incidentes. La précision en demi-piste de la version 3 permet une meilleure résolution en p_T . La fenêtre de coïncidence utilisée est de ± 5 pistes dans les deux cas. Comparaison avec les données expérimentales [1].

Dans la suite des simulations, la version 3 est utilisée pour la corrélation sur le grand module.

9.2 Influence du Champ Magnétique

Comme expliqué dans la partie théorique de ce mémoire, un champ magnétique puissant est nécessaire afin de caractériser les particules issues des collisions pp au sein du LHC. Dans le cas présent, le module qui sera testé cette année, sera plongé dans un champ magnétique de 3 teslas environ, soit du même ordre de grandeur que celui présent dans CMS (3.8 teslas).

Théoriquement, plusieurs effets sont attendus, du fait de la présence de ce champ. Le premier effet concerne la dérive des charges par effet Hall, qui n'est pas prise en compte dans le modèle développé dans le cadre de ce mémoire. Le deuxième effet concerne la trajectoire des particules secondaires suffisamment énergétiques pour parcourir plusieurs dizaines de micromètres dans le silicium du capteur. Ces particules, d'une énergie bien plus faible que les primaires, vont parcourir des trajectoires en forme d'hélice de petit rayon. Elles sont donc susceptibles de traverser plusieurs fois les capteurs, et de produire des hits dans des pistes distantes du point de passage de la particule primaire qui les a produites.

Un exemple de trajectoire d'une telle particule (un électron δ) est visible sur la Fig. 9.2. On remarque que l'action combinée du champ électrique et magnétique permet à cet électron de rebondir plusieurs fois sur le deuxième capteur, déposant de l'énergie dans de nombreuses pistes. Heureusement, ce type de particules n'est pas présent à chaque passage d'une particule primaire, et la probabilité que des pistes dans les deux capteurs et dans la même fenêtre de coïncidence soient touchées est très faible.

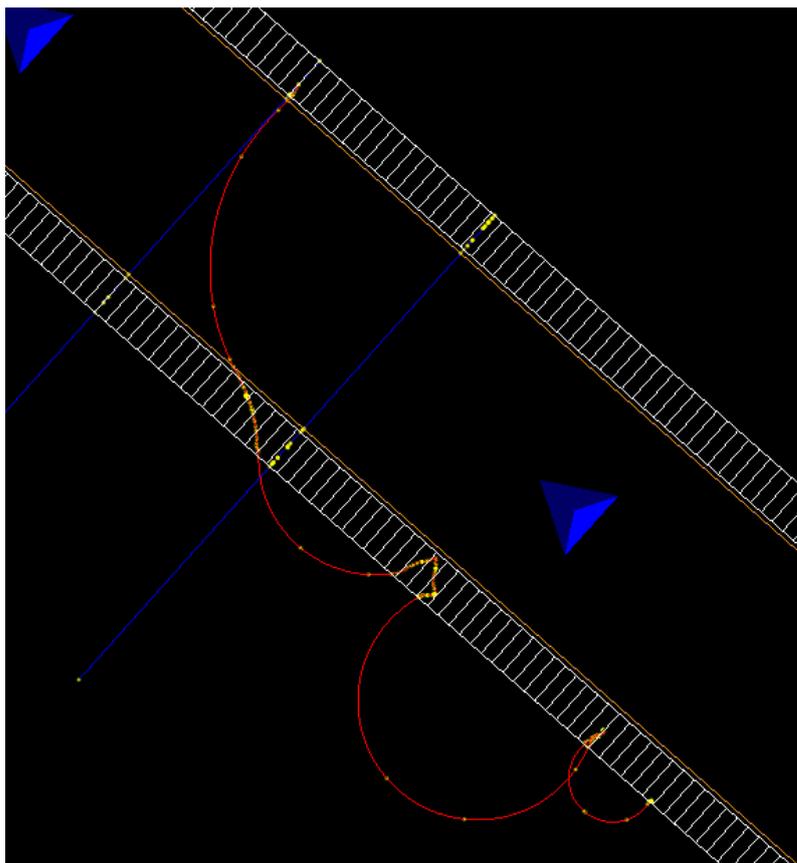


FIGURE 9.2 – Influence du champ magnétique sur la trajectoire des électrons δ . On remarque deux particules primaires (en bleu) ainsi qu'un électron δ (en rouge). Du fait de la présence du champ magnétique (pointé vers le haut) et du champ électrique (dirigé vers le dos des capteurs), il impacte plusieurs fois le module, ce qui augmente le nombre moyen de hits et de clusters relevés. L'image provient d'une simulation avec le logiciel *Geant4*.

9.3 Variation du Seuil du Comparateur

De la même manière que pour le mini-module, une variation du seuil du comparateur permet d'observer l'évolution du nombre moyen de hits et de clusters par événement.

Les résultats sont visibles sur les Fig. 9.3 et 9.4 page 92. On remarque que l'allure est similaire à celle observée pour le mini-module. Le bruit est cependant plus élevé (visible pour les valeurs de seuil inférieures à 4000 électrons), car la simulation se base sur une loi normale $N(0, 1.0)$ (donc un bruit de 1 kilo-électrons), valeur maximale de bruit envisagée pour les grands modules [12].

Du fait de l'épaisseur active plus importante, la MPV est plus élevée, ce qui amène à un nombre moyen de hits et de clusters plus élevé pour des valeurs de seuil supérieures à environ 15000 électrons.

Afin de caractériser l'influence potentielle du champ magnétique sur ces valeurs, trois simulations ont été réalisées :

1. grand module sans champ magnétique,
2. grand module avec champ magnétique de 3 teslas orienté parallèlement aux pistes (\vec{y}),
3. grand module avec champ magnétique de 3 teslas orienté perpendiculairement au plan des capteurs (\vec{z}).

Les valeurs de nombre moyen de hits par événement sont présentées dans le Tableau 9.1, et comparées aux valeurs obtenues pour la simulation du mini-module. On remarque que sans champ magnétique, le grand module présente un nombre moyen de hits par événement très proche du mini-module (légèrement supérieur, mais non-significatif).

Dans tous les cas, le nombre de hits est plus élevé sur le capteur inférieur, qui est impacté par un plus grand nombre de particules secondaires provenant du capteur supérieur.

Quand le champ magnétique est ajouté en \vec{y} (parallèle aux pistes), le nombre moyen de

Module	\vec{B}	capteur	valeur ($\pm\sigma$)	unité
Mini module	aucun	supérieur	1.059 ± 0.005	hits/événement
		inférieur	1.095 ± 0.004	
Grand module	aucun	supérieur	1.067 ± 0.004	
		inférieur	1.102 ± 0.004	
	3 teslas en \vec{y}	supérieur	1.133 ± 0.007	
		inférieur	1.160 ± 0.008	
	3 teslas en \vec{z}	supérieur	1.067 ± 0.003	
		inférieur	1.100 ± 0.004	

Tableau 9.1 – Nombre moyen de hits par événement en fonction de l'intensité et de la direction du champ magnétique. Le capteur supérieur est le premier atteint par la particule primaire (*top sensor*). Le seuil du comparateur est fixé à 106 unités V_{CTH} , et est identique pour toutes les simulations.

hits augmente significativement, d'environ 6% pour le capteur supérieur, et d'environ 5% pour le capteur inférieur.

Le même champ magnétique, s'il est orienté selon \vec{z} , n'implique plus d'augmentation significative du nombre moyen de hits.

De la même manière, les valeurs de nombre moyen de clusters par événement sont présentées dans le Tableau 9.2, et comparées aux valeurs obtenues pour la simulation du mini-module.

Module	\vec{B}	capteur	valeur ($\pm\sigma$)	unité
Mini module	aucun	supérieur	1.006 ± 0.001	clusters/événement
		inférieur	1.016 ± 0.001	
Grand module	aucun	supérieur	1.005 ± 0.001	
		inférieur	1.016 ± 0.001	
	3 teslas en \vec{y}	supérieur	1.030 ± 0.002	
		inférieur	1.039 ± 0.002	
	3 teslas en \vec{z}	supérieur	1.005 ± 0.001	
		inférieur	1.016 ± 0.001	

Tableau 9.2 – Nombre moyen de clusters par événement en fonction de l'intensité et de la direction du champ magnétique. Le capteur supérieur est le premier atteint par la particule primaire (*top sensor*). Le seuil du comparateur est fixé à 106 unités V_{CTH} , et est identique pour toutes les simulations.

Comme pour le nombre moyen de hits, on remarque une augmentation du nombre moyen de clusters par événement dans le cas d'un champ magnétique orienté selon l'axe des pistes (axe \vec{y}). Dans ce cas, la différence est de 2.5% pour le capteur supérieur, et de 2.3% pour le capteur inférieur. Cette augmentation est plus faible que celle des hits, ce qui indique que les clusters supplémentaires sont, en partie du moins, constitués de plusieurs pistes.

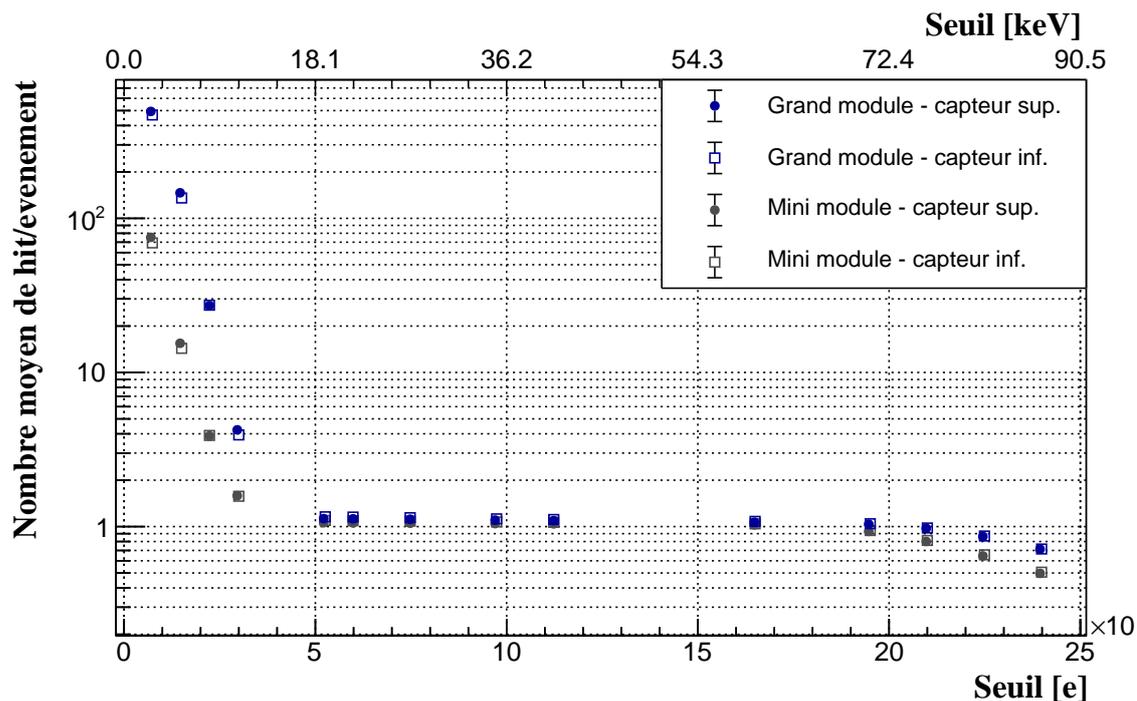


FIGURE 9.3 – Évolution du nombre moyen de hits en fonction du seuil du comparateur appliqué pour le grand module. Le module n’est pas incliné, toutes les particules incidentes sont donc perpendiculaires au plan des capteurs. Comparaison avec les données issues de la simulation du mini-module.

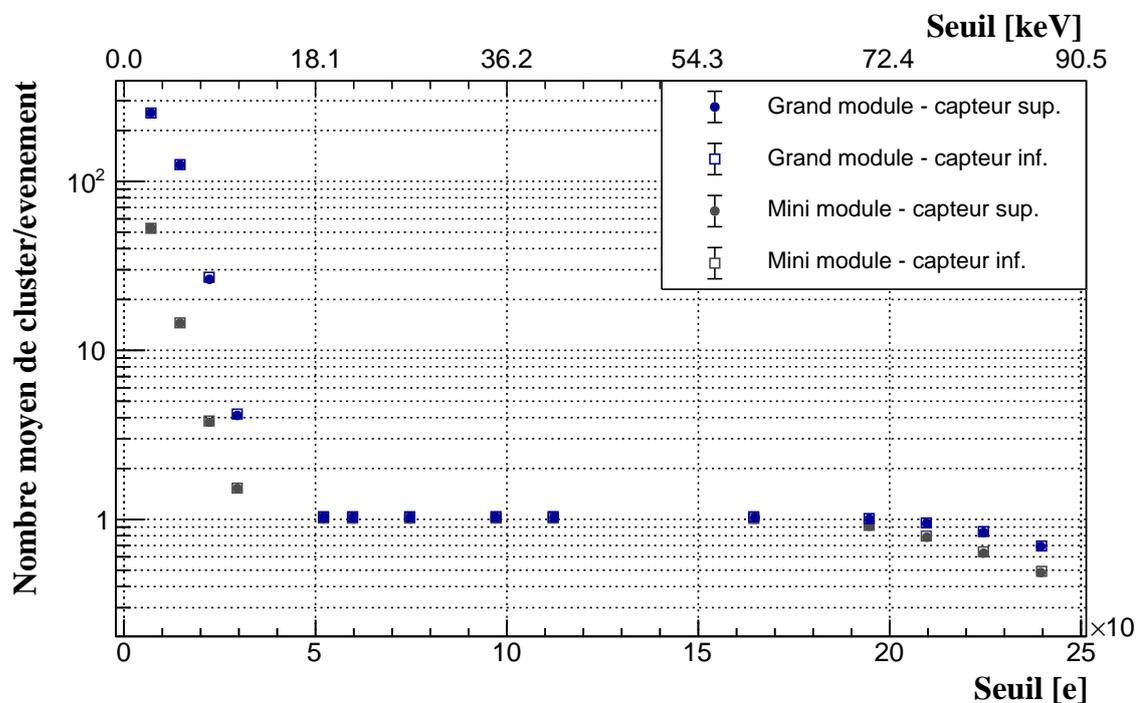


FIGURE 9.4 – Évolution du nombre moyen de clusters en fonction du seuil du comparateur appliqué, pour le grand module. Le module n’est pas incliné, toutes les particules incidentes sont donc perpendiculaires au plan des capteurs. Comparaison avec les données issues de la simulation du mini-module.

9.4 Rotation du Module

De la même façon que pour le mini-module, les particules incidentes sont progressivement inclinées afin de simuler des p_T décroissants. Afin de simplifier la comparaison, les mêmes angles que ceux testés en faisceau sont simulés.

9.4.1 Largeur Moyenne des Clusters et Multiplicité

Les Fig. 9.5 et 9.6 page 94 représentent respectivement la largeur moyenne des clusters et la fraction de clusters de différentes multiplicités en fonction de l'angle d'incidence des particules.

On remarque immédiatement sur la Fig. 9.5 que la largeur moyenne des clusters est plus élevée pour le grand module que pour le mini-module. L'épaisseur active plus importante entraîne une probabilité plus élevée pour les particules de traverser plusieurs pistes, ce qui explique la largeur moyenne plus élevée, quel que soit l'angle.

La largeur moyenne des clusters est de 3 à 7% plus élevée que pour le mini-module simulé (5% à 2 GeV/10 degrés). Cet écart augmente lorsque l'angle d'incidence augmente.

Sur la Fig. 9.6, on remarque que la proportion de clusters de plus de deux pistes de largeur est environ deux fois plus importante pour le grand module que pour le mini-module. Cette différence s'explique en partie par la différence d'épaisseur de la zone active, ainsi que par un bruit simulé légèrement plus élevé dans le grand module.

Pour les clusters d'une piste de largeur, les deux modules présentent sensiblement la même fraction pour des angles d'incidence très faibles. En effet, lorsque les particules sont perpendiculaires au module, l'impact de l'épaisseur de la zone active est moins important, si ce n'est pour augmenter la MPV, et décaler la distribution de Landau vers les hautes énergies. Lorsque l'angle augmente, la proportion de clusters de deux pistes augmente plus rapidement pour le grand module, la fraction de clusters d'une piste diminuant en conséquence.

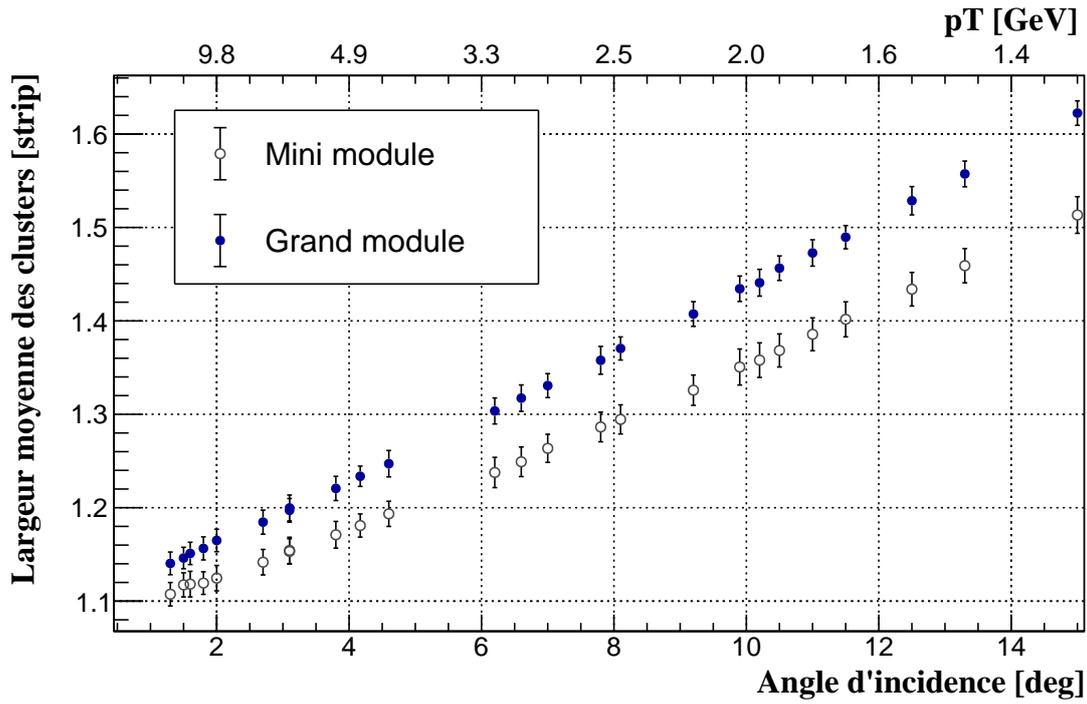


FIGURE 9.5 – Évolution de la largeur moyenne des clusters en fonction de l’angle d’incidence des particules (du p_T simulé), pour le module de taille réelle, en présence d’un champ de 3 teslas. Comparaison avec les données issues de la simulation du mini-module. Seuil de 106 unités V_{CTH} dans les deux cas.

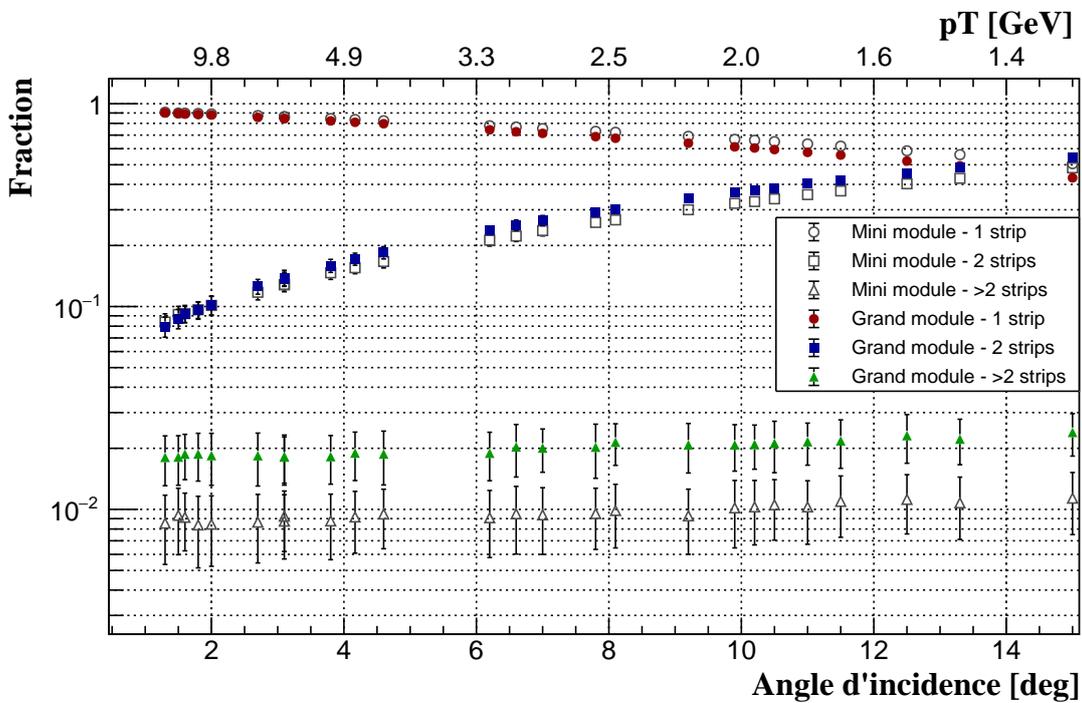


FIGURE 9.6 – Évolution de la fraction des clusters de différentes multiplicités pour le module de taille réelle en présence d’un champ de 3 teslas. Comparaison avec les données issues de la simulation du mini-module. Seuil de 106 unités V_{CTH} dans les deux cas.

9.4.2 Discrimination des Particules

La dernière étape consiste à suivre l'évolution du nombre de stubs formées en fonction de l'angle d'incidence, afin de s'assurer que le grand module pourra jouer son rôle dans CMS.

La Fig. 9.7 représente cette évolution, et compare les données du grand module avec celles du mini-module simulé et des résultats expérimentaux pour le mini-module non-irradié et le mini-module irradié. Du fait de la distance différente entre les capteurs du grand module par rapport aux mini-modules, la fenêtre de coïncidence doit être adaptée afin de retrouver un seuil en p_T similaire (autour de 2 GeV). Pour ce graphique, la fenêtre de coïncidence est fixée à ± 3.5 pistes.

Les paramètres suivants proviennent de la régression sur les données du grand module (voir Tableau 9.3) :

Paramètre	Valeur	Unité
Eff. de plateau (A)	99.0 ± 0.1	%
$p_{T\mu}$	1.895 ± 0.003	GeV
Résolution ($\sigma_{p_T}/p_{T\mu}$)	7.1 ± 0.2	%

Tableau 9.3 – Paramètres issus de la régression sur les résultats de la simulation pour le grand module en présence de champ magnétique.

En comparant avec les résultats pour les autres modules (voir Tableau 8.1 page 84), on remarque que l'efficacité de plateau (A) est légèrement inférieure à celle du mini-module simulé (99.0% contre 99.3%). Cette différence est probablement due à la présence du champ magnétique, ainsi qu'à la différence de distance entre les capteurs (la distance plus faible entre les capteurs du grand module augmente la probabilité pour les électrons δ d'impacter les deux capteurs dans une fenêtre de coïncidence, et donc de former une stub valide, alors même que la particule primaire n'en a pas formé).

Au niveau du seuil en p_t (valeur à 50% d'efficacité), on remarque une valeur proche, mais légèrement plus élevée. Cette différence est tout à fait attendue, car la géométrie des deux modules n'est pas la même. Cependant, pour la résolution en p_T , on remarque une nette amélioration avec le grand module par rapport au mini-module simulé (7.1% contre 7.8%). Cette amélioration est due à la précision en demi-piste des puces CBC3 du grand module : dans le cas d'un cluster de deux pistes, le centre de ce dernier sera considéré comme la piste de numéro le plus bas par la puce CBC2 du mini-module, ce qui diminue sa résolution.

La distance entre les capteurs joue également un rôle important dans la valeur de la résolution en p_T . Plus les capteurs sont distants, meilleure est la résolution. Pour le mini-module, la distance est de 2.63 mm, et de seulement 1.8 mm pour le grand module. Afin de vérifier l'impact de la distance sur la résolution, une simulation a été effectuée avec le grand module, une distance de 2.63 mm et une fenêtre de corrélation de ± 5 pistes. La résolution passe alors de 7.1% à 5.5%, démontrant l'impact de la distance sur la résolution.

L'avantage de la précision en demi-piste est visible sur la Fig. 9.8, qui représente l'efficacité de détection des stubs pour cinq valeurs de fenêtre de coïncidence différentes, entre ± 2.5 et ± 4.5 pistes.

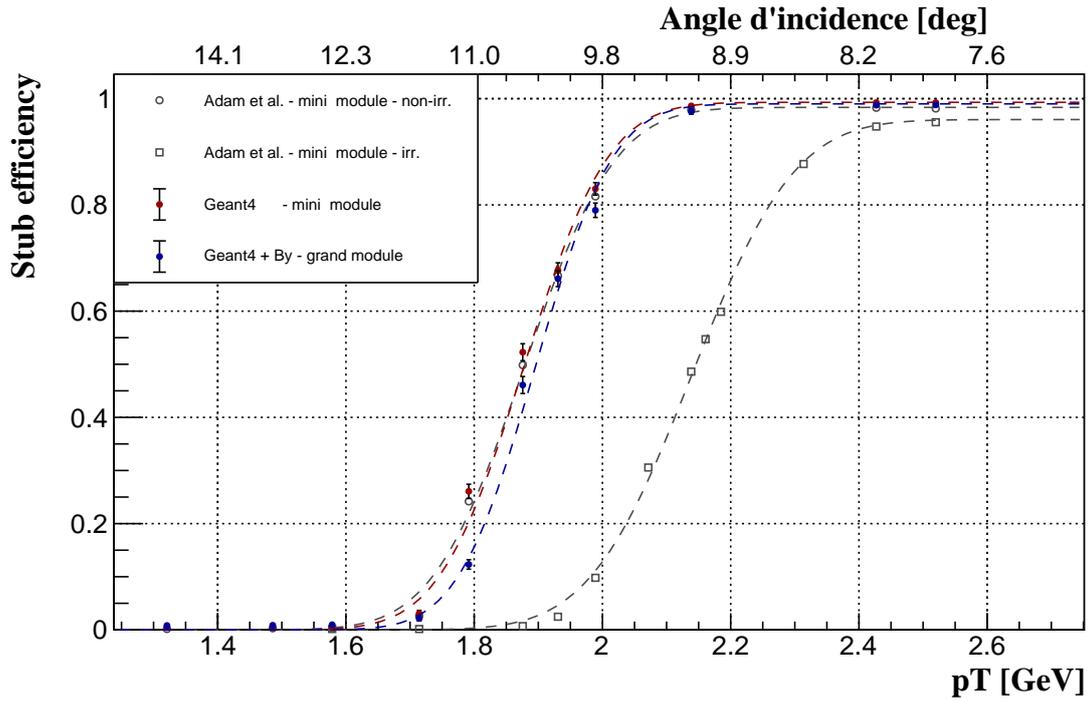


FIGURE 9.7 – Efficacité de détection des stubs en fonction de l’angle d’incidence des particules. Pour le grand module, un champ magnétique de 3 teslas selon \vec{y} est présent, la fenêtre de coïncidence est ± 3.5 pistes. Comparaison avec les données expérimentales [1].

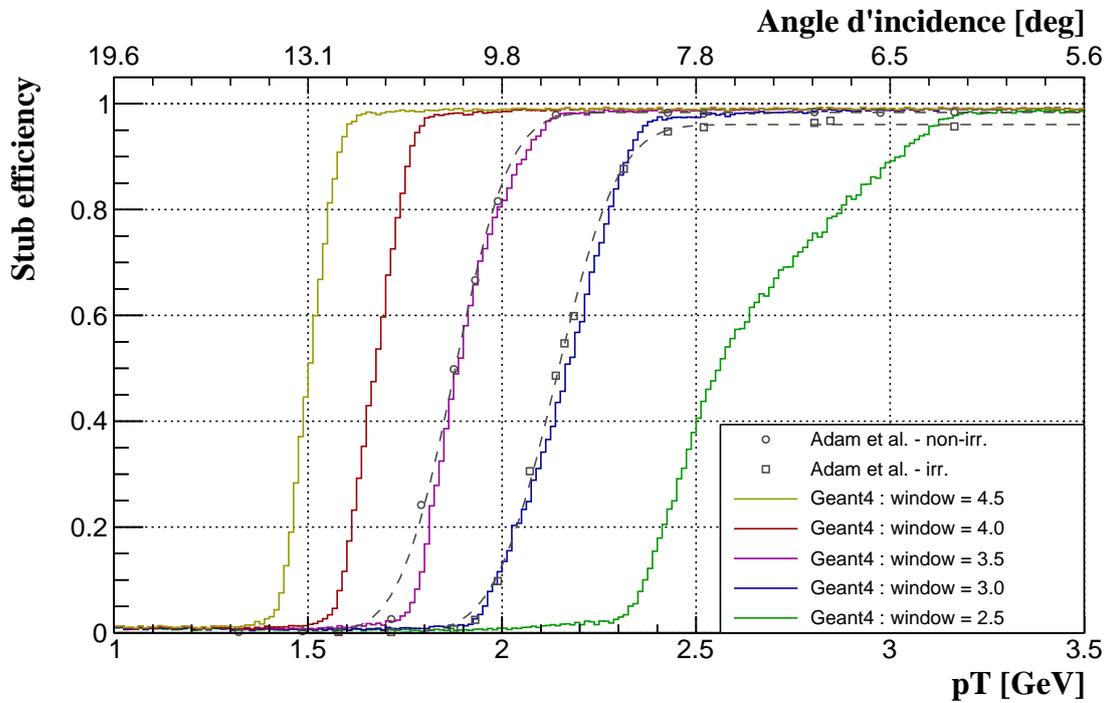


FIGURE 9.8 – Variations de la fenêtre de coïncidence pour le grand module. Un champ magnétique de 3 teslas selon \vec{y} est présent. Comparaison avec les données expérimentales [1].

9.5 Discussion des Résultats

Les résultats issus des simulations des puces CBC3 et du grand module apportent un certain nombre d'informations. Tout d'abord, la logique de corrélation de la version 3 des puces permet un gain important dans la résolution en p_T , comme le prouve la simulation effectuée sur un mini-module en comparaison de la version 2. Cet effet est dû à la précision en demi-piste de cette nouvelle version.

L'ajout d'un champ magnétique de 3 teslas selon la direction perpendiculaire au plan des capteurs ne perturbe pas significativement les résultats. Au contraire, lorsqu'un champ magnétique de même intensité est appliqué selon la direction parallèle aux pistes, on note une augmentation du nombre moyen de hits par événement (5 à 6% selon le capteur) et du nombre moyen de clusters par événement (2.3 à 2.5%). Cette différence est due à l'effet du champ sur la trajectoire des électrons δ , qui ont une probabilité augmentée d'impacter plusieurs fois les capteurs.

Il est important de garder à l'esprit que toutes ces simulations ne tiennent pas compte de l'effet Hall, qui a en réalité un impact important sur les nuages de charges à ces valeurs élevées de champ magnétique. Lors des tests en faisceau, il est donc très probable que les résultats soient fort différents. Cependant, la simulation a l'avantage de permettre une estimation de l'effet des électrons δ de manière isolée, ce qui est difficile à réaliser en faisceau (à moins d'orienter le module précisément selon l'angle de Lorentz).

En l'absence de champ magnétique, le nombre moyen de hits et de clusters par événement est similaire pour le grand module et le mini-module simulé.

Cependant, la largeur moyenne des cluster est significativement plus élevée pour le grand module, quelle que soit la valeur ou la direction du champ magnétique. Cette différence est principalement due à l'épaisseur active plus importante du grand module, et au bruit simulé plus élevé. La fraction de clusters de deux pistes et de plus de 2 pistes est alors significativement plus élevée.

Enfin, le grand module s'est révélé efficace dans la séparation des particules selon leur p_T , en conservant une efficacité de plateau de 99%, même en présence d'un champ magnétique de 3 teslas parallèle aux pistes. La résolution en p_T est meilleure que celle du mini-module équipé de puces CBC2, et une fenêtre de coïncidence de ± 3.5 pistes permet d'obtenir un seuil proche de 2 GeV. Ce seuil est modifiable entre environ 1.5 GeV et 2 GeV, par modification de la valeur de la fenêtre.

Le principal accélérateur du CERN, le LHC, est depuis quelques années en cours d'amélioration, en vue d'une augmentation drastique de son potentiel de découverte. Installée sur l'un des points de collisions proton-proton, l'expérience CMS, via son équipe internationale de chercheurs, est également en cours de développement d'un nouvel ensemble de détecteurs, afin de profiter des nouvelles capacités offertes par le collisionneur géant.

Au sein du trajectographe, des détecteurs constitués de deux fines couches de silicium séparées de quelques millimètres, et recouvertes de pistes parallèles (les modules 2S), doivent permettre de déterminer la trajectoire des particules et de réduire de manière importante la quantité de données à extraire de l'expérience.

En développement depuis de nombreuses années, des prototypes miniatures de ces modules ont été testés en faisceau de particules, afin de valider leur capacité de discrimination des particules selon leur moment cinétique transverse. Depuis lors, des prototypes de module de taille réelle ont été assemblés, et seront bientôt testés en faisceau, pour la première fois en présence d'un champ magnétique puissant.

Le modèle Monte-Carlo développé dans le cadre de ce mémoire à l'aide du logiciel Geant4 a permis de simuler les tests en faisceau sur les prototypes miniatures. La comparaison des données issues de la simulation avec les données expérimentales de W. ADAM *et al.* [1] confirme la validité du modèle. Les mêmes tendances sont observées, bien que la simulation sous-estime légèrement le nombre de hits et de clusters sur les deux capteurs. La largeur moyenne des clusters présente un très bon accord avec les données expérimentales (erreur relative inférieure à 1.5% quel que soit l'angle). Les résultats indiquent une épaisseur active probablement inférieure à 270 μm , et un partage de charge entre les pistes voisines légèrement supérieur à celui simulé.

L'hypothèse d'une distance entre les capteurs de 2.63 mm est confirmée par la simulation, avec une erreur relative inférieure à 0.1% dans la mesure du seuil de discrimination en moment transverse (p_T).

La simulation de la logique de corrélation indique un gain important en résolution lors du passage de la version 2 à la version 3.1 des puces CBC.

Une fois le modèle validé, la simulation d'un module de taille réelle en présence d'un champ magnétique de 3 teslas parallèle aux pistes, a permis d'anticiper les prochains tests en faisceau.

L'ajout du champ magnétique implique une augmentation du nombre moyen de hits (5 à 6%) et de clusters (2.3 à 2.5%), du fait de l'impact du champ magnétique sur la trajectoire des électrons δ . La largeur moyenne des clusters est plus élevée que pour le module miniature, du fait de l'épaisseur active plus importante, et du bruit simulé plus élevé. La

simulation confirme que le module de taille réelle est efficace dans la discrimination des particules selon leur p_T , y compris en présence d'un champ magnétique de 3 teslas parallèle aux pistes. L'efficacité de plateau est supérieure à 99%, et la résolution en p_T est meilleure que celle du module miniature équipé de puces CBC2 (7.1% contre 7.8% pour le module miniature).

Une fenêtre de corrélation de ± 3.5 pistes permet un seuil en p_T proche de 2 GeV, objectif fixé par la collaboration.

L'ensemble de ces résultats confirme la capacité des modules de taille réelle à opérer en présence d'un champ magnétique d'une intensité comparable à celui présent au sein de CMS. L'impact du champ magnétique sur le nombre de hits et de clusters ne dégrade pas significativement l'efficacité de plateau.

Ces résultats encourageants doivent maintenant être confirmés lors des tests en faisceau de particules, notamment afin de vérifier l'impact du champ magnétique sur l'électronique embarquée et les parties mécaniques des modules, non simulées dans le présent modèle. Du fait de l'absence de la simulation du transport des charges au sein du semi-conducteur, l'impact de l'effet Hall n'a pas pu être évalué. Un modèle plus précis est donc nécessaire, et apporterait des précisions concernant l'angle de Lorentz.

Un nombre important d'étapes restent à franchir avant la mise en service du LHC de haute luminosité. En attendant les prochains tests en faisceau, ce mémoire permet de mettre en lumière un certain nombre de phénomènes liés à la présence du champ magnétique sur le fonctionnement des modules 2S.

Le stage, effectué dans un centre de production des modules 2S (Inter-University Institute for High Energies), a permis de constater la complexité de la mise au point de nouveaux détecteurs en physique des particules. La collaboration CMS et ses milliers de chercheurs à travers le monde, est en bonne voie pour atteindre ses objectifs : mettre à niveau son ensemble de détecteurs, qui permettra peut-être, d'ici quelques années, d'apporter les preuves de l'existence d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard.

- [1] W. ADAM et al. « Beam test performance of prototype silicon detectors for the Outer Tracker for the Phase-2 Upgrade of CMS ». In : 15 (2020), P03014.
- [2] W. ADAM et al. « Experimental study of different silicon sensor options for the upgrade of the CMS Outer Tracker ». In : *Journal of Instrumentation* 15 (2020), P04017.
- [3] W. ADAM et al. « P-Type Silicon Strip Sensors for the new CMS Tracker at HL-LHC ». In : *Journal of Instrumentation* 12 (2017), P06018.
- [4] W. ADAM et al. « Test beam demonstration of silicon microstrip modules with transverse momentum discrimination for the future CMS tracking detector ». In : *Journal of Instrumentation* 13 (2018), P03003.
- [5] J. ALLISON et al. « Recent developments in Geant4 ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 835 (2016), p. 186-225. ISSN : 0168-9002. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>.
- [6] H. BEHNAMIAN. « Sensor R&D for the CMS outer tracker upgrade for the HL-LHC ». In : *Journal of Instrumentation* 9 (2014), p. C04033.
- [7] T. BERGAUER. « Silicon sensor prototypes for the Phase II upgrade of the CMS tracker ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 831 (2016), p. 161-166.
- [8] D. BRAGA. « CBC2 (CMS Binary Chip 2) User Guide 1.1 ». In : *CBC2 Specification* 1.1 (2013), p. 1-71.
- [9] N. CHANON et J. ANDREA. « Alignment for angular scans in May16 runs ». In : *BT Analysis meeting* (2016), p. 1-11.
- [10] COLLABORATION CMS. « CMS Physics Technical Design Report : Addendum on High Density QCD with Heavy Ions ». In : *J. Phys. G : Nucl. Part. Phys.* 34 (2007), p. 2307-2455.
- [11] COLLABORATION CMS. *Detector*. URL : <https://cms.cern/detector>. Date de consultation : 11 février 2021.
- [12] COLLABORATION CMS. « Technical Specification for the Supply of Silicon Sensors for the CMS Outer Tracker upgrade project ». In : *IT-4504/EP/CMS* (2019), p. 1-24.
- [13] COLLABORATION CMS. « The Phase-2 Upgrade of the CMS Level-1 Trigger - Technical Design Report ». In : *CERN-LHCC-2020-004* (2020), p. 1-387.

- [14] COLLABORATION CMS. « The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker - Technical Design Report ». In : *CERN-LHCC-2017-009* (2017), p. 1-353.
- [15] COLLABORATION GEANT4. *Guide for a Physics List*. URL : <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/index.html>. Date de consultation : 5 Décembre 2020.
- [16] COLLABORATION GEANT4 - RELEASE 10.7 - REV5.0. *Physics Reference Manual*. 2020.
- [17] CUSTOM ADVANCED CONNECTIONS. *Manufacturing & Distributing*. URL : <https://www.customadvanced.com/>. Date de consultation : 15 mai 2021.
- [18] M. DUFLOT. *Master Thesis at IIHE*. URL : <https://github.com/Matthieu68910/thesis>. Date de consultation : 23 mai 2021.
- [19] S. FRANZ. « Réalisations instrumentales pour le contrôle fonctionnel de l'infrastructure et des détecteurs de l'expérience ATLAS ». 2009.
- [20] K. HARA et al. « Testing of bulk radiation damage of n-in-p silicon sensors for very highradiation environments ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 636 (2011), S83-S89.
- [21] A. HARB, A. MUSSGILLER et J. HAUKE. « Test beam results of the first CMS double-sided strip module prototypes using the CBC2 read-out chip ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 845 (2017). Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2016, p. 93-96. ISSN : 0168-9002. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.027>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216305691>.
- [22] W. HERR et B. MURATORI. *Concept of luminosity*. URL : <https://cds.cern.ch/record/941318/files/p361.pdf>. Date de consultation : 9 février 2021.
- [23] I. HRIVNACOVA. *Geant4 electromagnetic physics progress*. Institut de Physique Nucléaire (IPNO), Université Paris-Sud, CNRS-IN2P3. 4 déc. 2019. URL : https://indico.cern.ch/event/773049/contributions/3474766/attachments/1937617/3211571/G4EmCHEP2019_v6.pdf (visité le 05/12/2020).
- [24] ISO ONLINE BROWSING PLATFORM. *ISO 5725-1 :1994(fr)*. URL : <https://www.iso.org/obp/ui/%5C#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:fr>. Date de consultation : 25 mai 2021.
- [25] V. IVANCHENKO. *Geant4 Electromagnetic Physics : Status and Perspectives*. CERN & Tomsk State University, Russia. 23 oct. 2019. URL : <https://indico.esa.int/event/304/contributions/5120/attachments/3670/4977/Geant4EMPhysics.pdf> (visité le 05/12/2020).
- [26] M. KRAMMER et F. HARTMANN. *Silicon Detectors*. URL : <https://indico.cern.ch/event/124392/contributions/1339904/attachments/74582/106976/IntroSilicon.pdf>. Date de consultation : 12 mai 2021.
- [27] J. LLORENTE. *Lorentz angle in the ATLAS pixel detector :Effects of operating parameters andradiation damage*. URL : <https://indico.cern.ch/event/777112/contributions/3323390/attachments/1801154/2937932/lorentzAngle.pdf>. Date de consultation : 12 mai 2021.
- [28] A. LONJON. « Nanocomposite conducteur polymère/nanofils métalliques : élaboration et analyse de propriétés physiques ». diplomathesis. Université de Toulouse, 2010.

- [29] G. LUTZ. *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2007. ISBN : 978-3-540-71678-5.
- [30] V. MANZARI. *Silicon Detectors*. URL : https://indico.cern.ch/event/453690/sessions/99350/attachments/1184199/1726998/2015-11%5C_SiliconDetectors%5C_manzari%5C_Lecture2.pdf. Date de consultation : 12 mai 2021.
- [31] V. MARIANI et al. « Measurements of surface and bulk radiation damage effects in silicon detectors for Phase-2 CMS Outer Tracker ». In : *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 980 (2020), p. 164423.
- [32] MINOR RUBBER. *Leading Extruded & Molded Rubber Part Manufacturer*. URL : <https://www.minorrubber.com/>. Date de consultation : 15 mai 2021.
- [33] MY KIN INC. *Global Leader in Rubber/Seal Engineering and Manufacturing*. URL : <https://mykin.com/>. Date de consultation : 15 mai 2021.
- [34] I. NEUTELINGS. *Simple example of 3D axes with spherical coordinates*. URL : https://wiki.physik.uzh.ch/cms/latex:example%5C_spherical%5C_coordinates. Date de consultation : 5 juin 2021.
- [35] A. NÜRNBERG et T. SCHNEIDER. « Lorentz angle measurements as part of the sensor R&D for the CMS Tracker upgrade ». In : *Journal of Instrumentation* 8 (2013), p. C01001.
- [36] ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE (CERN). *CERN Accélérateur de science*. URL : <https://home.cern/fr>. Date de consultation : 9 février 2021.
- [37] ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE (CERN). *Geant4 - a Simulation Toolkit*. URL : <https://geant4.web.cern.ch/>. Date de consultation : 5 Décembre 2020.
- [38] M. PRYDDERCH. « CBC3.1 User Manual ». In : *ASIC Design Group* 1.4 (2019), p. 1-83.
- [39] TECHSPRAY. *Licron Crystal ESD-Safe Coating - Technical Data Sheet*. URL : <https://docs.rs-online.com/18a0/0900766b8172a9e3.pdf>. Date de consultation : 15 mai 2021.
- [40] Y. UNNO et al. « Development of n-on-p silicon sensors for very high radiation environments ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 636 (2011), S24-S30.
- [41] M. VALENTAN, T. BERGAUER et M. DRAGICEVIC. « Optimization of Strip Isolation for Silicon Sensors ». In : *Physics Procedia* 37 (2012), p. 891-898.
- [42] P. VANLAER. « Tracking lecture 2 ». In : *Belgium-Nederland-Deutschland doctoral school of particule physics* (2019), p. 1-55.
- [43] J. ZHANG et al. « Investigation of X-ray induced radiation damage at the Si-SiO₂ interface of silicon sensors for the European XFEL ». In : *Journal of Instrumentation* 7 (2012), p. C12012.
- [44] J. ZHANG et al. « Study of X-ray Radiation Damage in Silicon Sensors ». In : *Journal of Instrumentation* 6 (2011), p. C11013.

F	
Faisceau	5, 52, 53, 55–61, 65, 69, 70, 73, 74, 76, 77, 82, 87, 93, 97
Fenêtre de corrélation	18, 73
Ferme de processeurs	14
Fibre de carbone	15, 40
Fidélité	74, 78
Fluence	30

G	
Gabarit	34, 48
Gallium (Ga)	22
Gaussienne	28, 29, 53, 55, 67, 72, 73
Geant4	62
Globule rouge	43

H	
Hadron	5, 8, 30, 63
Haute tension	28, 37
Hybride	17
Hélice	11
Hélium superfluide	5

I	
Implantation	21, 27, 28, 30
Impureté	21, 62
Infrarouge	45
Intensité (faisceau)	7
Internet	5
Intrinsèque (s.c.)	21
Ion lourd	6
Ionisation	22
Irradiation	8, 28, 30, 31, 51, 53–56
Isolant	21, 27, 28, 30, 33, 61

J	
Jonction	21–23, 26–28, 30
Justesse	74, 78

K	
Kapton	15, 40, 61
Kelvin	21

L	
Lepton	63
Luminosité	7, 8, 14, 31, 51, 52
Luminosité intégrée	7

M	
Mico-SD	42
Micro-soudure	17, 34, 48
Micro-électronique	31, 61
Microscope	42–44
Mobilité	28, 29, 56
Module de Young	15
Moteur	45, 46
Muon	8, 63
Mémoire tampon	18

N	
Neutrino	33
Neutron	8, 30, 53
Nitrile	39
Nitruure de bore	40
Nuage de charges	28, 29, 67
Nucléaire	5
Numéro atomique	15

O	
Offset	18
Ohmmètre	36, 37
Optique (faisceau)	7
Oxygène (O)	30, 62

P	
P-stop	28, 53
Paquet de protons	7, 14, 51
Parallaxe	18, 19
Pentavalent (noyau)	22
Phosphore (P)	22
Photon	8
Physics List	62
Physique fondamentale	5
Pion (particule)	30, 63, 70
Pixel	12, 53
Piédestal	72, 73
Plomb	6
Point d'ancrage	15
Polarisation inverse	22, 23
Porteur de charge	22, 23, 25, 26, 28, 29, 56, 61, 67
Positron	70
Potentiel de découverte	7
Proton	5, 30, 33, 63, 70
Précision	18, 62, 63
Pseudo-rapacité	12
Puissance de calcul	63
Pureté	21

Q	
Quadrupolaire	7
Quantité de mouvement	10, 11
Quark	6

R	
Radiation	12
Radiotélescope	33
Rayon cosmique	33
Rayon de courbure	13
Recombinaison	22
Retour d'expérience	10
Réacteur nucléaire	33
Régulateur de tension	45
Réseau (atomes)	28
Résistance	27–30, 34–40, 48, 53
Résolution	31
Résolution spatiale	26

S	
Section efficace	7
Seed layer	18
Semi-conducteur	20–23, 25, 31, 67
Seringue	44–46
Seuil	14, 18, 26, 29, 66, 72, 73, 77, 78, 81, 87, 90, 95, 97
Signal	20, 23, 25–30, 34
Silicium (Si)	11, 15, 21, 23, 25–31, 33, 34, 37, 40, 48, 52, 53, 58, 61–63, 65, 66, 69, 70
Sodium (Na)	35
Solénoïde	8
Spray	34–36
Sub-atomique	6
Substrat	15, 28, 30, 58, 61, 66–69
Supra-conductivité	5
Surfactant	42
Séparateur	15
Sérialisation	17

T	
Temps mort	18
Tension	22, 33, 34, 37, 53, 56, 65, 68
Thixotropique	42
Trajectographe	8, 10, 11, 20, 30, 33, 34, 51–53, 63
Transfert thermique	15
Transistor	21, 27
Trigger	4, 52
Trivalent (noyau)	22

U	
Ultra-vide	5
Uréthane	39

V	
Valence (énergie)	21
Ventouse	34, 37–40, 48
Vitesse de calcul	62
Vitesse de la lumière	5

Annexes

A.1 Protection contre les ESD

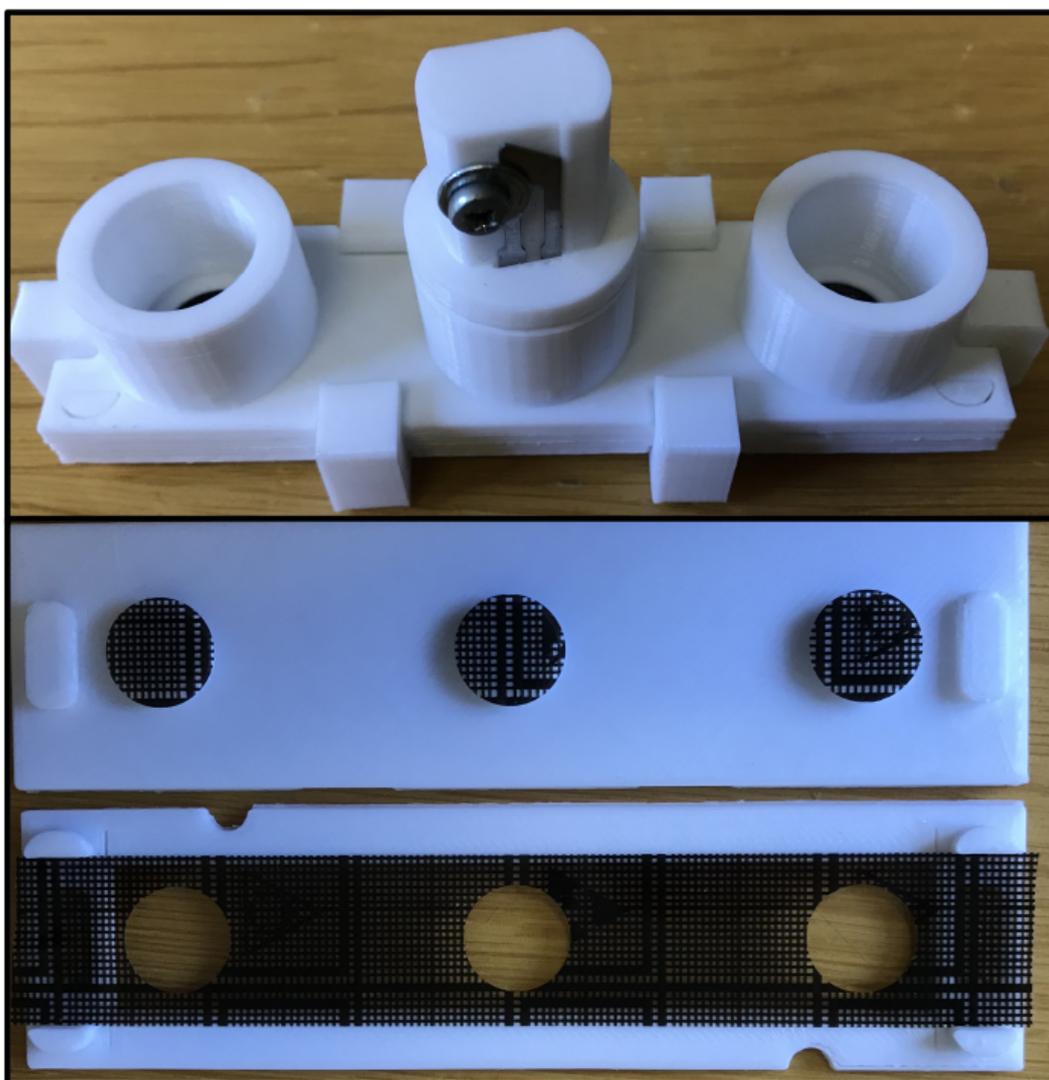


FIGURE A.1 – Photos de l'outil de découpe de l'adhésif. En haut, l'étape de découpe des trous. En bas, le résultat de la découpe, avant application sur le jig.

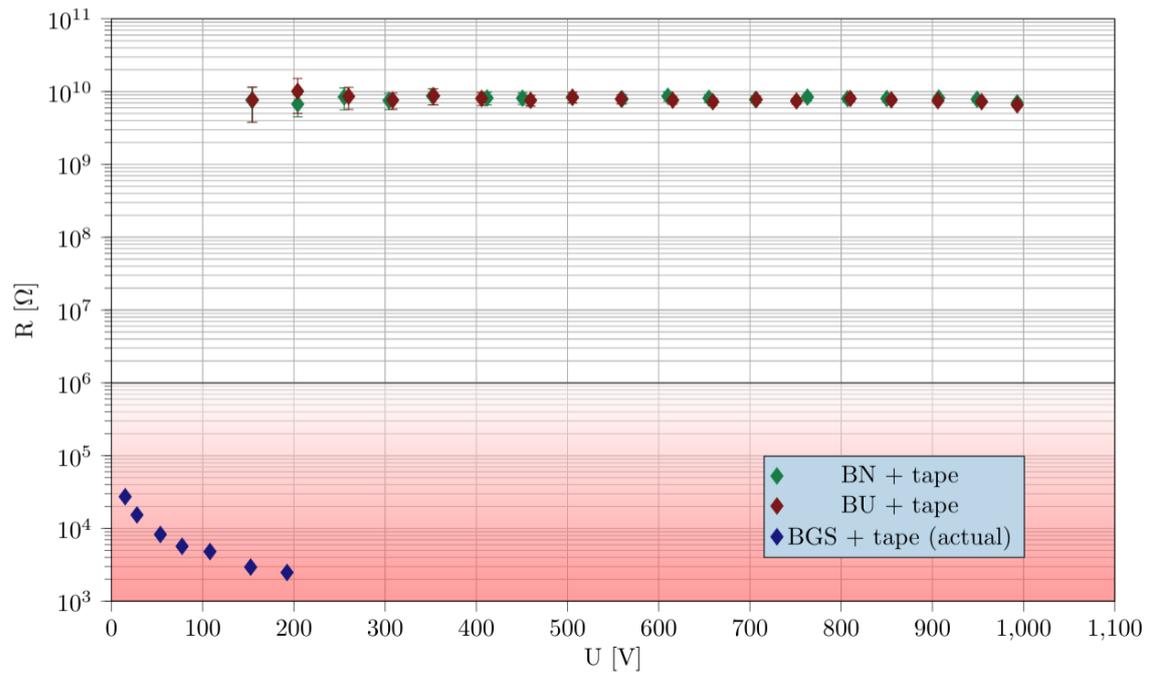


FIGURE A.2 – Évolution de la résistance du jig complet. L'adhésif noir est testé avec les trois types de matériaux pour les ventouses.

A.2 Code *Python* de mesure de diamètre

```
1 from PIL import Image
2 import numpy as np
3 import math
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import statistics
6
7 np.set_printoptions(threshold=np.inf)
8 ratio = 4.2055555
9
10 img = np.array(Image.open('pictures/24.BMP').convert('L'))
11
12 for x in range(720):
13     for y in range(1280):
14         if img[x][y] >= 110:
15             img[x][y] = 255
16         else:
17             img[x][y] = 0
18
19 for x in range(720):
20     img[x][1279] = 0
21
22 img2 = Image.fromarray(img, 'L')
23 img2.save('BW21.png')
24
25
26 out = True
27 lines = []
28 length = 0
29 start_x = 0
30 start_y = 0
31
32 for x in range(720):
33     for y in range(1280):
34         if img[x][y] == 255 and out:
35             start_x = x
36             start_y = y
37             length = 1
38             out = False
39             # print(1)
40         elif img[x][y] == 255 and not out:
41             length += 1
42             # print(2)
43         elif img[x][y] == 0 and not out:
44             lines.append([start_x, start_y, start_y+length, length, False])
45             length = 0
46             out = True
47             # print(3)
48         else:
49             # print(4)
50             pass
51
52 print(len(lines))
53
54 array = []
55 for x in range(719):
56     array.append([])
57
58 for x in lines:
59     array[x[0]].append(x)
60
61 couples = []
```

```

62
63 for x in range(len(array)): # pour chaque ligne
64     print("Ligne " + str(x))
65     for y in range(len(array[x])): # pour chaque élément de la ligne x
66         if not array[x][y][4]:
67             print("Element numéro " + str(y))
68             couple = []
69             couple.append(array[x][y])
70             array[x][y][4] = True
71             fin = False
72             iter = 0
73             y_pos = y
74             try:
75                 while not fin:
76                     flag = False
77                     print("Recherche dans la ligne numéro " + str(x+iter+1)
78 )
79                     for a in range(len(array[x+iter+1])): # on cherche dans
80 la ligne en dessous
81                         print(str(array[x + iter][y_pos][1]) + "<=" + str(
82 array[x + iter + 1][a][1])
83                             + "<=" + str(array[x+iter][y_pos][2]) + "?")
84                         if array[x+iter][y_pos][2] >= array[x + iter + 1][a
85 ][1] >= array[x + iter][y_pos][1] \
86                             and not array[x + iter + 1][a][4]:
87                             y_pos = a
88                             array[x+iter+1][a][4] = True
89                             couple.append(array[x + iter+1][a])
90                             flag = True
91                             print("A vrai!")
92                             break
93                         elif array[x+iter][y_pos][2] >= array[x + iter +
94 1][a][2] >= array[x + iter][y_pos][1] \
95                             and not array[x + iter + 1][a][4]:
96                             y_pos = a
97                             array[x+iter+1][a][4] = True
98                             couple.append(array[x + iter+1][a])
99                             flag = True
100                             print("B vrai!")
101                             break
102                         elif array[x+iter+1][a][2] >= array[x + iter][y_pos
103 ][1] >= array[x + iter+1][a][1] \
104                             and not array[x + iter + 1][a][4]:
105                             y_pos = a
106                             array[x+iter+1][a][4] = True
107                             couple.append(array[x + iter+1][a])
108                             flag = True
109                             print("C vrai!")
110                             break
111                         elif array[x+iter+1][a][2] >= array[x + iter][y_pos
112 ][2] >= array[x + iter+1][a][1] \
113                             and not array[x + iter + 1][a][4]:
114                             y_pos = a
115                             array[x+iter+1][a][4] = True
116                             couple.append(array[x + iter+1][a])
117                             flag = True
118                             print("D vrai!")
119                             break
120                     else:
121                         pass
122                     print("faux!")
123             if flag:
124                 iter += 1

```

```

118         print("Passage à la ligne suivante... (iter+=1)")
119     else:
120         fin = True
121     except:
122         pass
123     couples.append(couple)
124
125 print(len(couples))
126 print(couples[0:20])
127
128 L = []
129 S = []
130 H = []
131 D = []
132
133 for x in range(len(couples)):
134     l = []
135     s = 0
136     h = 0
137     for y in range(len(couples[x])):
138         l.append(couples[x][y][3])
139         s += couples[x][y][3]
140         h += 1
141     L.append(max(l) * ratio)
142     H.append(h * ratio)
143     S.append(s * ratio * ratio)
144     r = math.sqrt(s / math.pi)
145     D.append(2 * r * ratio)
146
147 print("Data length - mean = " + str(statistics.mean(L)) + "  $\mu\text{m}$ , std = " +
148       str(statistics.stdev(L)) + "  $\mu\text{m}$ ." )
149 print("Data height - mean = " + str(statistics.mean(H)) + "  $\mu\text{m}$ , std = " +
150       str(statistics.stdev(H)) + "  $\mu\text{m}$ ." )
151 print("Data section - mean = " + str(statistics.mean(S)) + "  $\mu\text{m}^2$ , std = " +
152       str(statistics.stdev(S)) + "  $\mu\text{m}^2$ ." )
153 print("Data diameter - mean = " + str(statistics.mean(D)) + "  $\mu\text{m}$ , std = " +
154       str(statistics.stdev(D)) + "  $\mu\text{m}$ ." )
155
156 a = plt.hist(L, bins=30, density=True, range=(0, 126.1666))
157 plt.xlabel('Length [ $\mu\text{m}$ ']')
158 plt.ylabel('Probability')
159 plt.title('Histogram of max length in x direction')
160 plt.text(40, .025, r'$\mu=20.4, \sigma=11.0$')
161 plt.savefig('L24.png')
162 plt.close()
163
164 b = plt.hist(H, bins=30, density=True, range=(0, 126.1666))
165 plt.xlabel('Length [ $\mu\text{m}$ ']')
166 plt.ylabel('Probability')
167 plt.title('Histogram of max length in y direction')
168 plt.text(40, .025, r'$\mu=19.3, \sigma=12.6$')
169 plt.savefig('H24.png')
170 plt.close()
171
172 d = plt.hist(D, bins=30, density=True)
173 plt.xlabel('Diameter [ $\mu\text{m}$ ']')
174 plt.ylabel('Probability')
175 plt.title('Histogram of the diameter (computed from cross section)')
176 plt.text(30, .025, r'$\mu=19.6, \sigma=10.0$')
177 plt.savefig('D24.png')
178 plt.close()

```

ANNEXE B

CODES *ROOT* REPRODUISANT LA LOGIQUE CBC

B.1 Code pour la version 2

```
1 #include <iostream>
2 #include <random>
3
4 std::default_random_engine generator;
5 std::uniform_real_distribution<> distribution1(0.0, 1.0);
6
7 bool CBC2(
8     const vector<double> &strip_A,
9     const vector<double> &strip_B,
10    vector<double> &res_A, // [0:4]-> 1-5 strip wide clusters, [5]-> number of
11    vector<double> &res_B, // clusters (tot), [6]-> mean cluster width (tot), [7:8]-> accepted
12    const int MAX_CLUSTER_WIDTH = 3,
13    const int CLUSTER_WINDOW = 5,
14    const double THRESHOLD = 5.1975
15 ){
16
17     const int NBR_STRIP = strip_A.size();
18
19     double noise = 0.;
20     // Clusters in sensor A
21     std::vector<double> clus_pos_A;
22     std::vector<double> clus_size_A;
23     bool inside = false;
24     int size = 0;
25     // Loop on sensor A strips
26     for (int i = 0; i < NBR_STRIP; ++i)
27     {
28         // noise parameters determination
29         if (distribution1(generator) >= 0.5)
30         {
31             std::normal_distribution<double> dist(1.36, 0.06);
32             noise = abs(dist(generator)) * 0.375;
33         } else
34         {
35             std::normal_distribution<double> dist(2.38, 0.6);
36             noise = abs(dist(generator)) * 0.375;
37         }
38         // noise value determination
39         std::normal_distribution<double> dist1(0., noise);
40         // noise creation
```

```

41     double strip_energy = (strip_A[i] / 0.00362) + abs(dist1(generator));
42     if (strip_energy < THRESHOLD && !inside)
43     {} else if (strip_energy < THRESHOLD && inside)
44     {
45         clus_size_A.push_back(size);
46         if(size <= 5) res_A.at(size - 1) += 1;
47         clus_pos_A.push_back(floor((i - 1) - (size / 2) + 0.5));
48         size = 0;
49         inside = false;
50     } else if (strip_energy >= THRESHOLD && !inside)
51     {
52         size = 1;
53         inside = true;
54         if (i == (NBR_STRIP - 1))
55         {
56             clus_size_A.push_back(1);
57             res_A.at(0) += 1;
58             clus_pos_A.push_back(i);
59             size = 0;
60             inside = false;
61         }
62     } else if (strip_energy >= THRESHOLD && inside)
63     {
64         size += 1;
65         if (i == (NBR_STRIP - 1))
66         {
67             clus_size_A.push_back(size);
68             if(size <= 5) res_A.at(size - 1) += 1;
69             clus_pos_A.push_back(floor(i - (size / 2) + 0.5));
70             size = 0;
71             inside = false;
72         }
73     }
74 }
75
76 // Clusters in sensor B
77 std::vector<double> clus_pos_B;
78 std::vector<double> clus_size_B;
79 inside = false;
80 size = 0;
81 // Loop on sensor B strips
82 for (int i = 0; i < NBR_STRIP; ++i)
83 {
84     // noise parameters determination
85     if (distribution1(generator) >= 0.5)
86     {
87         std::normal_distribution<double> dist(1.36, 0.06);
88         noise = abs(dist(generator)) * 0.375;
89     } else
90     {
91         std::normal_distribution<double> dist(2.38, 0.6);
92         noise = abs(dist(generator)) * 0.375;
93     }
94     // noise value determination
95     std::normal_distribution<double> dist1(0., noise);
96     // noise creation
97     double strip_energy = (strip_B[i] / 0.00362) + abs(dist1(generator));
98     if (strip_energy < THRESHOLD && !inside)
99     {} else if (strip_energy < THRESHOLD && inside)
100    {
101        clus_size_B.push_back(size);
102        if(size <= 5) res_B.at(size - 1) += 1;
103        clus_pos_B.push_back(floor((i - 1) - (size / 2) + 0.5));

```

```

104     size = 0;
105     inside = false;
106 } else if (strip_energy >= THRESHOLD && !inside)
107 {
108     size = 1;
109     inside = true;
110     if (i == (NBR_STRIP - 1))
111     {
112         clus_size_B.push_back(1);
113         res_B.at(0) += 1;
114         clus_pos_B.push_back(i);
115         size = 0;
116         inside = false;
117     }
118 } else if (strip_energy >= THRESHOLD && inside)
119 {
120     size += 1;
121     if (i == (NBR_STRIP - 1))
122     {
123         clus_size_B.push_back(size);
124         if(size <= 5) res_B.at(size - 1) += 1;
125         clus_pos_B.push_back(floor(i - (size / 2) + 0.5));
126         size = 0;
127         inside = false;
128     }
129 }
130 }
131
132 // fill results (tot)
133 if(clus_pos_A.size() != 0){res_A.at(5) = clus_pos_A.size();}else{res_A.
134 at(5) = 0;}
135 if(clus_pos_B.size() != 0){res_B.at(5) = clus_pos_B.size();}else{res_B.
136 at(5) = 0;}
137 if(clus_size_A.size() != 0){res_A.at(6) = std::accumulate(clus_size_A.
138 begin(), clus_size_A.end(), 0.0) / clus_size_A.size();}else{res_A.at(6)
139 = 0;}
140 if(clus_size_B.size() != 0){res_B.at(6) = std::accumulate(clus_size_B.
141 begin(), clus_size_B.end(), 0.0) / clus_size_B.size();}else{res_B.at(6)
142 = 0;}
143
144 // Clean clusters in both sensors depending on MAX_CLUSTER_WIDTHH
145 // for A
146 for (int i = clus_size_A.size() - 1; i >= 0; --i)
147 {
148     if (clus_size_A.at(i) > MAX_CLUSTER_WIDTHH)
149     {
150         clus_size_A.erase(clus_size_A.begin() + i);
151         clus_pos_A.erase(clus_pos_A.begin() + i);
152     }
153 }
154 // for B
155 for (int i = clus_size_B.size() - 1; i >= 0; --i)
156 {
157     if (clus_size_B.at(i) > MAX_CLUSTER_WIDTHH)
158     {
159         clus_size_B.erase(clus_size_B.begin() + i);
160         clus_pos_B.erase(clus_pos_B.begin() + i);
161     }
162 }
163
164 // fill results (accepted)
165 res_A.at(7) = clus_pos_A.size();
166 res_B.at(7) = clus_pos_B.size();

```

```

161     res_A.at(8) = std::accumulate(clus_size_A.begin(), clus_size_A.end(),
162     0.0) / clus_size_A.size();
163
164     // return false if no possible stub
165     if (clus_pos_A.size() == 0 || clus_pos_B.size() == 0)
166     {
167         return false;
168     }
169
170     // stub finding logic
171     for (int i = 0; i < clus_pos_A.size(); ++i)
172     {
173         for (int j = 0; j < clus_pos_B.size(); ++j)
174         {
175             if (abs(clus_pos_A.at(i) - clus_pos_B.at(j)) <= CLUSTER_WINDOW)
176             {
177                 return true;
178             }
179         }
180     }
181     return false;
182 }

```

B.2 Code pour la version 3

```

1 #include <iostream>
2 #include <random>
3
4 std::default_random_engine generator;
5 std::uniform_real_distribution<> distribution1(0.0, 1.0);
6
7 bool CBC3(
8     const vector<double> &strip_A,
9     const vector<double> &strip_B,
10    vector<double> &res, // global results for sensors (
11                          // [0] -> nbr stubs
12                          // [1] -> mean bend
13    information
14    vector<double> &res_A, // results for sensor A
15                          // [0:4]-> 1-5 strip wide
16    clusters
17                          // [5] -> number of
18    clusters (tot)
19                          // [6] -> mean cluster
20    width (tot)
21                          // [7:8]-> idem accepted
22                          // [9] -> nbr hits
23    vector<double> &res_B, // results for sensor B
24                          // [0:4]-> 1-5 strip wide
25    clusters
26                          // [5] -> number of
27    clusters (tot)
28                          // [6] -> mean cluster
29    width (tot)
30                          // [7:8]-> idem accepted
31                          // [9] -> nbr hits
32    const int MAX_CLUSTER_WIDTH = 4, // max 4
33    const double CLUSTER_WINDOW = 7., // max +/- 7 en 1/2 strip

```

```

27     const double THRESHOLD = 0, // default to 0 (in killo
    -electrons)
28     double NOISE = 1., // noise in killo-elctrons
29     double PAIR_CREATION_ENERGY = 0.00362 // pair creation energy in keV
30     ){
31
32     // find number of strips
33     const int NBR_STRIP = strip_A.size();
34
35     // noise distribution deternmination
36     std::normal_distribution<double> dist1(0., NOISE);
37
38     // Clusters in sensor A
39     std::vector<double> clus_pos_A;
40     std::vector<double> clus_size_A;
41     bool inside = false;
42     int size = 0;
43     int nbr_hits_A = 0;
44
45     // Loop on sensor A strips
46     for (int i = 0; i < NBR_STRIP; ++i)
47     {
48         // convert strip signal to killo-electrons and add noise
49         double strip_energy = (strip_A[i] / PAIR_CREATION_ENERGY) + abs(
    dist1(generator));
50
51         // cluster finding logic
52         if (strip_energy < THRESHOLD && !inside)
53         {
54             // do nothing
55         }
56         else if (strip_energy < THRESHOLD && inside)
57         {
58             clus_size_A.push_back(size);
59             if(size <= 5) res_A.at(size - 1) += 1;
60             clus_pos_A.push_back((double) (i - 1) - ((double) size / 2) +
    0.5);
61             size = 0;
62             inside = false;
63         }
64         else if (strip_energy >= THRESHOLD && !inside)
65         {
66             nbr_hits_A += 1;
67             size = 1;
68             inside = true;
69             if (i == (NBR_STRIP - 1))
70             {
71                 clus_size_A.push_back(1);
72                 res_A.at(0) += 1;
73                 clus_pos_A.push_back((double) i);
74                 size = 0;
75                 inside = false;
76             }
77         }
78         else if (strip_energy >= THRESHOLD && inside)
79         {
80             nbr_hits_A += 1;
81             size += 1;
82             if (i == (NBR_STRIP - 1))
83             {
84                 clus_size_A.push_back(size);
85                 if(size <= 5) res_A.at(size - 1) += 1;
86                 clus_pos_A.push_back((double) i - ((double) size / 2) +

```

```

0.5);
87         size = 0;
88         inside = false;
89     }
90 }
91 }
92
93 // Clusters in sensor B
94 std::vector<double> clus_pos_B;
95 std::vector<double> clus_size_B;
96 inside = false;
97 size = 0;
98 int nbr_hits_B = 0;
99
100 // Loop on sensor B strips
101 for (int i = 0; i < NBR_STRIP; ++i)
102 {
103     // convert strip signal to killo-electrons and add noise
104     double strip_energy = (strip_B[i] / PAIR_CREATION_ENERGY) + abs(
dist1(generator));
105
106     // cluster finding logic
107     if (strip_energy < THRESHOLD && !inside)
108     {
109         // do nothing
110     }
111     else if (strip_energy < THRESHOLD && inside)
112     {
113         clus_size_B.push_back(size);
114         if(size <= 5) res_B.at(size - 1) += 1;
115         clus_pos_B.push_back((double) (i - 1) - ((double) size / 2) +
0.5);
116         size = 0;
117         inside = false;
118     }
119     else if (strip_energy >= THRESHOLD && !inside)
120     {
121         nbr_hits_B += 1;
122         size = 1;
123         inside = true;
124         if (i == (NBR_STRIP - 1))
125         {
126             clus_size_B.push_back(1);
127             res_B.at(0) += 1;
128             clus_pos_B.push_back((double) i);
129             size = 0;
130             inside = false;
131         }
132     }
133     else if (strip_energy >= THRESHOLD && inside)
134     {
135         nbr_hits_B += 1;
136         size += 1;
137         if (i == (NBR_STRIP - 1))
138         {
139             clus_size_B.push_back(size);
140             if(size <= 5) res_B.at(size - 1) += 1;
141             clus_pos_B.push_back((double) i - ((double) size / 2) +
0.5);
142             size = 0;
143             inside = false;
144         }
145     }

```

```

146     }
147
148     // fill results (tot)
149     if(clus_pos_A.size() != 0){res_A.at(5) = clus_pos_A.size();}else{res_A.
at(5) = 0;}
150     if(clus_pos_B.size() != 0){res_B.at(5) = clus_pos_B.size();}else{res_B.
at(5) = 0;}
151     if(clus_size_A.size() != 0){res_A.at(6) = std::accumulate(clus_size_A.
begin(), clus_size_A.end(), 0.0) / clus_size_A.size();}else{res_A.at(6)
= 0;}
152     if(clus_size_B.size() != 0){res_B.at(6) = std::accumulate(clus_size_B.
begin(), clus_size_B.end(), 0.0) / clus_size_B.size();}else{res_B.at(6)
= 0;}
153
154     // Clean clusters in both sensors depending on MAX_CLUSTER_WIDTHH
155     // for A
156     for (int i = clus_size_A.size() - 1; i >= 0; --i)
157     {
158         if (clus_size_A.at(i) > MAX_CLUSTER_WIDTHH)
159         {
160             clus_size_A.erase(clus_size_A.begin() + i);
161             clus_pos_A.erase(clus_pos_A.begin() + i);
162         }
163     }
164     // for B
165     for (int i = clus_size_B.size() - 1; i >= 0; --i)
166     {
167         if (clus_size_B.at(i) > MAX_CLUSTER_WIDTHH)
168         {
169             clus_size_B.erase(clus_size_B.begin() + i);
170             clus_pos_B.erase(clus_pos_B.begin() + i);
171         }
172     }
173
174     // fill results (accepted)
175     res_A.at(7) = clus_pos_A.size();
176     res_B.at(7) = clus_pos_B.size();
177     res_A.at(8) = std::accumulate(clus_size_A.begin(), clus_size_A.end(),
0.0) / clus_size_A.size();
178     res_B.at(8) = std::accumulate(clus_size_B.begin(), clus_size_B.end(),
0.0) / clus_size_B.size();
179     res_A.at(9) = nbr_hits_A;
180     res_B.at(9) = nbr_hits_B;
181
182     // return false if no possible stub
183     if (clus_pos_A.size() == 0 || clus_pos_B.size() == 0)
184     {
185         res.at(0) = 0.;
186         res.at(1) = 0.;
187         return false;
188     }
189
190     // stub finding logic
191     std::vector<double> stub_pos;
192     std::vector<double> stub_bend;
193
194     // loop over all identified clusters
195     for (int i = 0; i < clus_pos_A.size(); ++i) // for each seed in sensor
A ....
196     {
197         for (int j = 0; j < clus_pos_B.size(); ++j) // .... look for
correlation in sensor B.
198         {

```

```

199         if (abs(clus_pos_A.at(i) - clus_pos_B.at(j)) <= CLUSTER_WINDOW)
200             // correlation only if inside window
201             {
202                 stub_pos.push_back(clus_pos_A.at(i));
203                 stub_bend.push_back(abs((double) clus_pos_A.at(i) -
clus_pos_B.at(j)));
204             }
205     }
206     if (stub_pos.size() != 0)
207     {
208         res.at(0) = stub_pos.size();
209         res.at(1) = std::accumulate(stub_bend.begin(), stub_bend.end(),
0.0) / stub_pos.size();
210         return true;
211     }
212     else
213     {
214         res.at(0) = 0.;
215         res.at(1) = 0.;
216         return false;
217     }
218 }

```

C.1 Influence des paramètres de distance et de fenêtre de corrélation

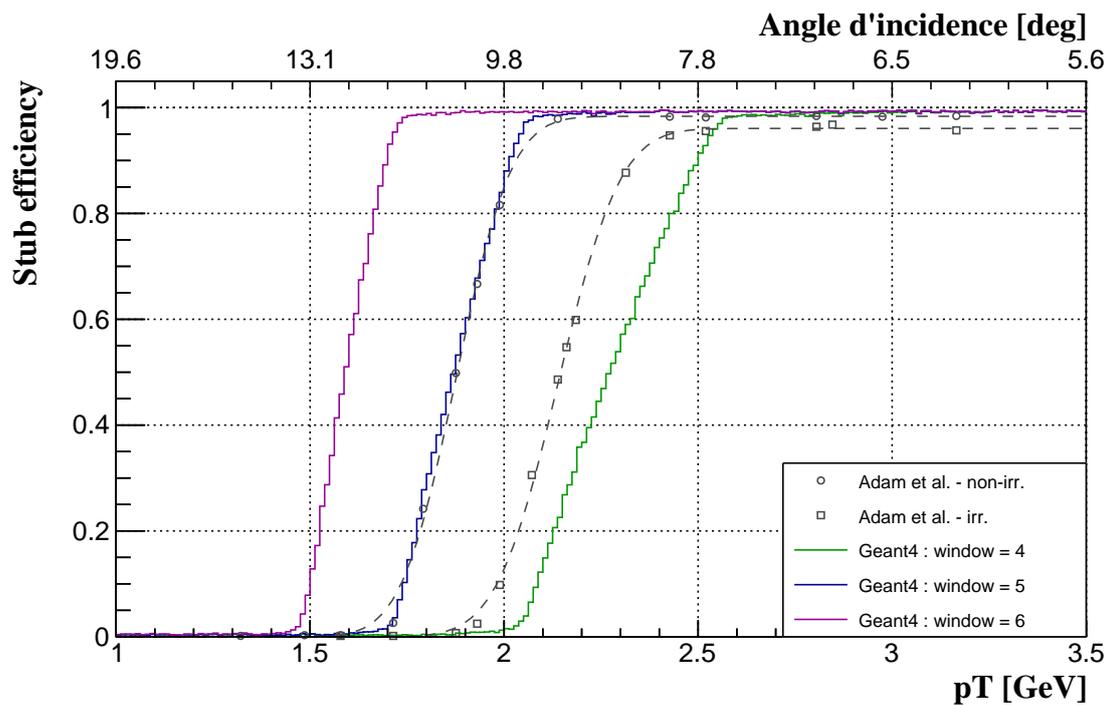


FIGURE C.1 – Influence de la fenêtre de corrélation. Comparaison avec les données expérimentales [1].

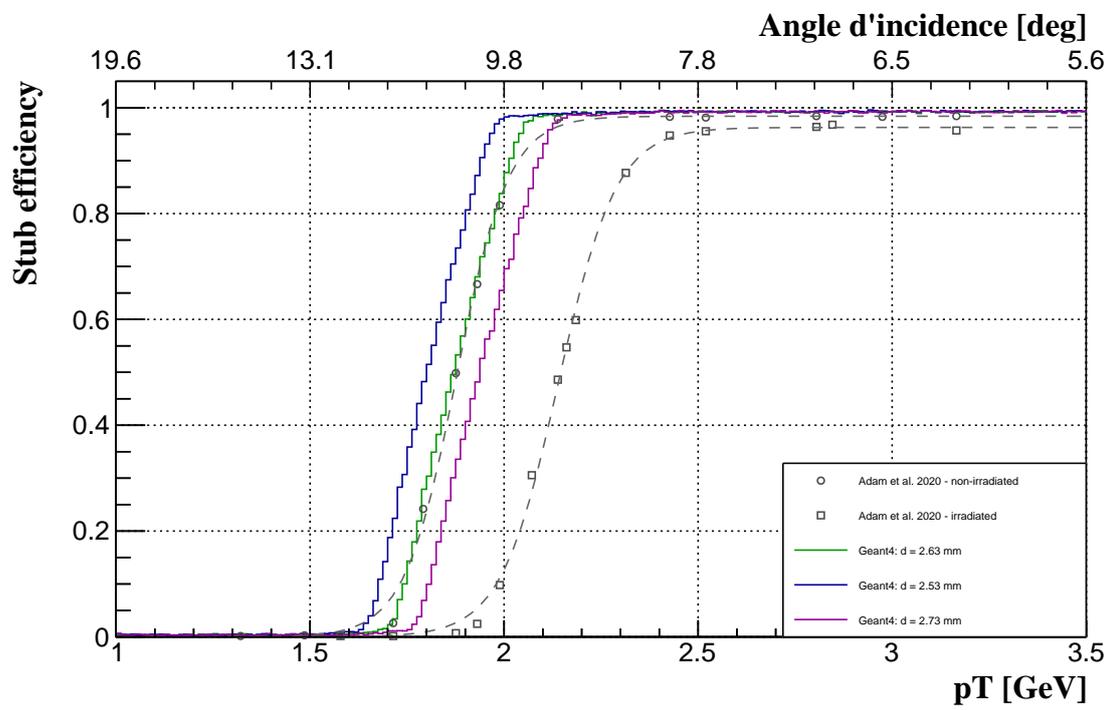


FIGURE C.2 – Influence de la distance entre les capteurs. Comparaison avec les données expérimentales [1].

