

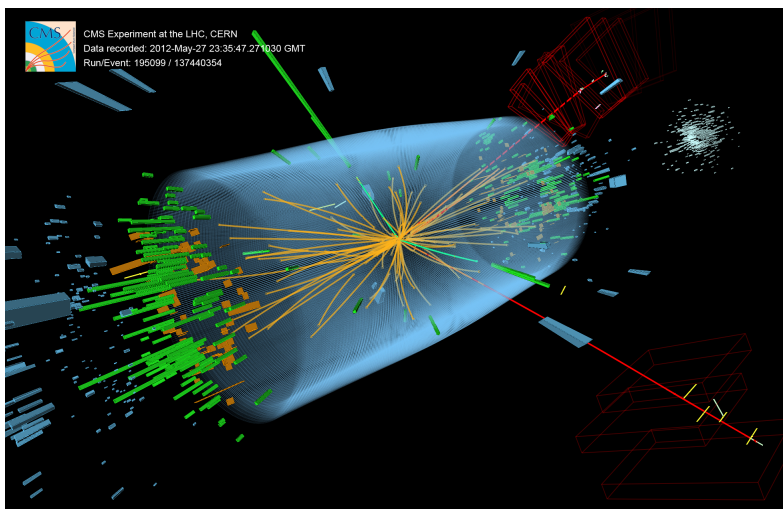
Ecole Centrale de Lyon

Rapport de stage d'application, effectué au sein du Laboratoire Leprince-Ringuet

Maître de Stage : Stéphanie Baffioni

Mesure de l'efficacité de déclenchement des événements Higgs $\rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$

Pauline Soulet



Mai-Juillet 2012

Résumé

L'étude détaillée dans ce rapport a été réalisée pendant 3 mois au sein du laboratoire Leprince-Ringuet de l'École polytechnique (Palaiseau) et a pour objectif la mesure de l'efficacité d'un élément permettant la sélection d'événements intéressants dans l'expérience CMS (Compact Muon Solenoid) du Large Hadron Collider (LHC). Cet élément, nommé *trigger*, est utilisé dans la recherche du boson de Higgs dans son canal de désintégration $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$, qui présente une signature très propre mais a un faible rapport d'embranchement : il est donc nécessaire d'avoir une efficacité maximale. Cette mesure est réalisée en utilisant les données enregistrées en 2012 et comparée aux simulations d'événements Z obtenus par la méthode Monte-Carlo.

Le *trigger* est composé de différents filtres, qui sont des « étapes » permettant son déclenchement. Dans un premier temps, l'efficacité de chacun des 3 filtres du *trigger* étudié a été calculée par lepton, à l'aide la méthode du Tag & Probe et des événements bien connus $Z \rightarrow ll$. A partir des courbes obtenues, l'efficacité du *trigger* a été déduite pour des événements Higgs $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$ de deux manières différentes. Les différences obtenues entre ces deux méthodes ont permis de mettre en avant une perte d'efficacité entre l'année 2011 et 2012 et une solution a été proposée pour contourner ce problème.

Au-delà de cette étude, ce stage a été l'occasion de découvrir le monde de la recherche, qui m'attire particulièrement, ainsi que la collaboration internationale CMS, et de me conforter dans certains projets professionnels futurs, notamment celui de faire une thèse après les 2 années de master en Physique Théorique à Darmstadt (Allemagne).

Abstract

The study described in this report was carried out during a three-month internship within the research laboratory Leprince-Ringuet in the École polytechnique (Palaiseau, France). It aims at measuring the efficiency of a *trigger* which selects interesting events in the Compact Muon Solenoid (CMS) experiment at Large Hadron Collider (LHC). This *trigger* is used in the research of the Higgs boson in its decay channel $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$. This channel has a very clear signature but a low branching ratio ; thus it is necessary to have a maximal efficiency. This measure is carried out by using 2012 data and comparing with Z Monte-Carlo's simulations.

The *trigger* is composed of filters, which are like « steps » . At first, the efficiency of each filter has been studied per lepton, with the Tag & Probe method and well-known $Z \rightarrow ll$ events. From the efficiency curves obtained, the efficiency of Higgs events has been deduced, in two ways. The differences between these two ways highlight a loss of efficiency between 2011 and 2012 and a solution has been suggested to overcome this problem.

Beyond this study, this intership was an opportunity to discover the research's world, which attracts me particularly, as well as the CMS collaboration. It reinforces some of my desires for my future career path, in particular to do a thesis after my Master's Degree in theoretical physics in Darmstadt (Germany).

Table des matières

Introduction	5
I Présentation et organisation du laboratoire Leprince-Ringuet	6
1 Présentation générale du laboratoire	7
2 Organisation du travail au sein du laboratoire	8
2.1 Organisation temporelle	8
2.2 Organisation spatiale	8
2.3 Communication	9
2.3.1 Interactions au sein du laboratoire	9
2.3.2 Les réunions	9
2.3.3 Hiérarchie	9
2.3.4 Collaboration entre chercheurs	9
2.4 Investissement dans le travail	10
3 La gestion d'une grande découverte	11
II Mesure de l'efficacité de déclenchement d'un événement Higgs dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$	12
Introduction	13
1 Cadre théorique : Le Modèle Standard	14
1.1 Les particules élémentaires et forces fondamentales	14
1.1.1 Les fermions	14
1.1.2 Les bosons	15
1.2 Le boson de Higgs	15
1.2.1 Les canaux de désintégration du Higgs	16
1.2.2 La recherche du boson de Higgs	17
2 Cadre expérimental : Présentation générale du LHC et du détecteur CMS	19
2.1 Le Large Hadron Collider	19
2.1.1 Généralités sur le Large Hadron Collider	19
2.1.2 Les différentes expériences du LHC	19
2.2 Le détecteur CMS (Compact Muon Solenoid)	20
2.2.1 Les caractéristiques du détecteur	20
2.2.2 Le système de coordonnées utilisé	21
2.2.3 Les différents constituants du détecteur CMS	21

2.2.4	Le système de déclenchement	24
2.2.5	Reconstruction et identification des électrons	24
2.3	Traitement des données	26
3	Mesure de l'efficacité de déclenchement par lepton	27
3.1	Démarche adoptée	27
3.1.1	Echantillons utilisés pour l'étude	27
3.1.2	La méthode du Tag & Probe	27
3.1.3	Triggers et filtres	28
3.1.4	Coupures appliquées	30
3.2	Efficacité des filtres du <i>trigger</i> di-électrons	31
3.2.1	Efficacité du filtre Ele17	31
3.2.2	Efficacité du filtre Ele17Ele8	32
3.2.3	Efficacité du filtre Ele17Ele8dZ	33
3.2.4	Comparaison de l'efficacité des filtres Ele8Ele17 et Ele8Ele17dZ	33
3.3	Analyse des résultats	34
3.3.1	Comparaison données et simulation Monte-Carlo	34
3.3.2	Problème d'efficacité au niveau des données 2012A	35
4	Application des coupures d'analyse sur les probes	38
4.1	Les coupures d'analyse 2012	38
4.2	Efficacité des filtres du trigger di-électrons	39
4.2.1	Efficacité du filtre Ele17	39
4.2.2	Efficacité du filtre Ele17Ele8dZ	39
4.3	Analyse des résultats	40
4.3.1	Comparaison des efficacités avec les <i>probes</i> passant les <i>Working Point</i> et les <i>probes</i> passant les coupures d'analyse	40
4.3.2	Comparaison données et simulation Monte-Carlo	41
5	Efficacité de déclenchement des événements Higgs, dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$	44
5.1	Démarche	44
5.2	Coupures pour la sélection d'un événement Higgs	44
5.3	Efficacité d'un événement Higgs	46
5.3.1	Méthode avec les <i>turn-on</i>	46
5.3.2	Méthode directe	46
5.3.3	Problème au niveau de l'isolation des leptons	47
5.4	Comparaison entre l'efficacité directe et évaluée par les <i>turn-on</i>	48
5.5	Le <i>trigger</i> tri-électrons	50
	Conclusion	52
III	Apport du stage dans la construction du projet professionnel	53
	Développement du projet professionnel lors de la deuxième année	54
	La découverte du métier de chercheur au sein de l'expérience CMS	54
	Impact du stage sur la construction du projet professionnel	55
	Conclusion	56
A	Valeurs significatives des courbes d'efficacité	57
B	Diapositives de présentation du meeting E-gamma du 24 juillet	60

Introduction Générale

Étudiante en deuxième année à l'École Centrale de Lyon, j'ai effectué mon stage d'application au sein du laboratoire Leprince-Ringuet de l'École polytechnique (Palaiseau) pendant une durée de trois mois. Les activités de ce laboratoire portent sur l'astrophysique et la physique des particules. J'ai ainsi intégré l'équipe de chercheurs du laboratoire travaillant sur le détecteur Compact-Muon Solenoid (CMS) du Large Hadron Collider (LHC).

Ce stage a tout d'abord été l'occasion d'intégrer une équipe de chercheurs et de découvrir le monde de la recherche, qui m'était jusqu'à présent totalement inconnu. La première partie de ce rapport présente le laboratoire, ainsi que l'organisation du travail des chercheurs au sein du laboratoire et de la collaboration CMS. Elle aborde de plus la gestion de la découverte d'une nouvelle particule, à laquelle j'ai eu la chance d'assister lors de ces trois mois.

L'étude menée durant ce stage, et détaillée en deuxième partie, consiste en la mesure de l'efficacité de déclenchement des événements $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$ dans l'expérience CMS auprès du LHC. Le nombre d'événements issus des collisions dans le LHC est trop important pour pouvoir être stocké entièrement. Il est donc nécessaire d'effectuer un tri, efficace et rapide, de ce flot d'informations, afin de ne conserver que les événements les plus importants. Le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$ de désintégration du Higgs est très intéressant dans la mesure où il est très propre et présente peu de bruit de fond. Il permet également la reconstruction complète du Higgs. Il a cependant l'inconvénient d'avoir un faible rapport d'embranchement, ce qui nécessite donc une très grande efficacité pour toutes les étapes de l'analyse, dont le déclenchement est la toute première.

L'objectif de cette étude est de calculer les efficacités d'un des éléments (le *trigger*) permettant la sélection de ces événements, pour les données réelles provenant de l'expérience CMS en 2012 ainsi que pour les simulations, afin de pouvoir comparer ces deux cas et d'en déduire les erreurs systématiques liées à ce déclenchement dans l'analyse.

Finalement, la dernière partie de rapport présente la manière dont ce stage s'est inscrit dans la continuité de la construction de mon projet professionnel et son impact sur la continuité de mes études.

Première partie

Présentation et organisation du laboratoire Leprince-Ringuet

Chapitre 1

Présentation générale du laboratoire

Le Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR) est une unité mixte de recherche (UMR 7638) de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'École polytechnique. Ce laboratoire est implanté sur le site de l'École polytechnique à Palaiseau (91).

Le laboratoire Leprince-Ringuet emploie 115 personnes, dont 63 chercheurs et 52 ITA (métiers d'accompagnement à la recherche), ce à quoi s'ajoutent de nombreux thésards et post-doctorants. Les recherches effectuées au sein de ce laboratoire portent sur la physique des particules et l'astronomie gamma de très haute énergie. Le laboratoire est ainsi composé de différents groupes, travaillant chacun dans des domaines spécifiques [1].

L'astronomie gamma permet l'observation du ciel via des photons d'énergie voisine du TeV, afin de comprendre le mécanisme de production de ces photons et leur origine. Un certain nombre de chercheurs du laboratoire travaille ainsi en lien avec l'observatoire HESS, situé en Namibie, qui observe ces photons via leurs interactions avec les noyaux de l'atmosphère, ainsi que sur le Large Area Telescope du satellite Fermi Gama Ray Space Telescope, qui est un télescope à rayon gamma couvrant une gamme en énergie allant de 20 MeV à plus de 300 GeV, complémentaire à celle de H.E.S.S. qui observe les rayons gamma au-delà de 100 GeV.

La physique des particules faite au laboratoire s'intéresse tant aux interactions fortes (avec notamment l'étude du plasma de quarks et gluons à Brookhaven, aux USA) qu'aux interactions faibles. Un des groupes du laboratoire, celui au sein duquel j'ai réalisé mon stage, travaille sur l'expérience Compact-Muon Solenoid (CMS), une des 4 principales expériences du Large Hadron Collider (LHC), le fameux accélérateur de particules situé à la frontière franco-suisse, s'intéressant notamment à la recherche du boson de Higgs et à la physique au-delà du Modèle Standard. Un autre groupe travaille sur l'expérience BaBar, qui étudie notamment les mésons beaux B, des mésons qui contiennent un quark beau b.

Le laboratoire Leprince-Ringuet dispose de 4 services d'appui administratif et techniques ainsi que d'une cellule de valorisation pour soutenir les expériences et projets scientifiques auxquels il participe. Ainsi, les services techniques sont composés d'un service électronique, qui a pour mission de concevoir et réaliser des électroniques tant numériques qu'analogiques, d'un service informatique et d'un service mécanique.

J'ai effectué mon stage au sein du groupe de chercheurs travaillant sur le détecteur CMS. L'expérience CMS est l'une des 4 expériences principales effectuées au LHC. Ce détecteur a été optimisé en particulier pour la recherche du boson de Higgs, dernière pièce manquante du Modèle Standard, le modèle physique théorique décrivant l'ensemble des particules élémentaires ainsi que leurs interactions, et de la Supersymétrie. La collaboration internationale CMS regroupe environ 3000 membres (physiciens et ingénieurs) appartenant à 38 pays du monde entier. Les chercheurs du laboratoire du groupe CMS sont particulièrement impliqués dans la recherche du boson de Higgs dans le canal de désintégration $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$ et ainsi que dans le canal $H \rightarrow \tau\tau$.

Chapitre 2

Organisation du travail au sein du laboratoire

Le groupe CMS du laboratoire LLR est composé de 12 chercheurs permanents (dont un est en permanence au LHC à Genève), 5 post-doc et 7 doctorants.

2.1 Organisation temporelle

Les chercheurs sont libres de choisir les horaires de travail leur correspondant le mieux : cela permet à chacun de s'adapter à ses contraintes personnelles. Il existe des horaires théoriques, mais ceux-ci ne sont pas respectés, ni même vraiment connus, des chercheurs. Le temps de travail et la présence des chercheurs ne sont pas vérifiés par l'administration du laboratoire, ce qui constitue une différence majeure avec ce que j'avais pu observer lors de mon stage d'exécution en première année, effectué dans une usine de Zodiac Aerospace à Niort (79) fabriquant des coeurs d'avion : les ouvriers devaient « badger » à leur arrivée et départ, et le temps était compté à la minute près. Il est aussi tout à fait possible pour un chercheur de travailler de chez lui.

Le métier de chercheur est un métier où on ne compte pas ses heures de travail : il arrive assez fréquemment qu'ils travaillent chez eux le soir ou le week-end. Lors de l'effervescence de l'analyse des résultats en lien avec la découverte de la nouvelle particule, certaines réunions ont même eu lieu pendant le week-end (par le système de visio-conférence).

2.2 Organisation spatiale

La laboratoire dispose d'une aile au premier étage des laboratoires de l'École polytechnique, ainsi que de quelques bureaux au rez-de-chaussée pour le service informatique et d'un atelier mécanique. Les chercheurs sont entre 3 et 5 (voire 6 lors des périodes de stage) par bureau. Il y a aussi une *cafeteria* (contenant une machine à café et des canapés), permettant aux chercheurs de se retrouver, pour parler travail ou autres, lors des pauses café. Le groupe CMS du laboratoire dispose également d'une salle équipée de nombreux écrans et d'une webcam, appelée le *CMS Center*, et qui est notamment utilisée par les réunions via le système de visio-conférence EVO. Cette salle est aussi à la disposition des autres groupes.

2.3 Communication

2.3.1 Interactions au sein du laboratoire

Les chercheurs communiquent au sein du laboratoire via des mailing-list. Cependant, lorsqu'il s'agit pour un chercheur de poser une question spécifique à un autre chercheur du laboratoire, le contact direct est privilégié : une rapide conversation vaut toujours mieux qu'un long mail ! Chaque chercheur dispose de plus sur son bureau d'un téléphone avec un numéro personnel. Néanmoins ce moyen de communication est relativement peu utilisé comparé aux mails et à Skype.

Deux réunions regroupant tous les membres du groupe CMS se sont tenues lors de mon stage : elles regroupaient à la fois les membres du groupe présents au laboratoire et ceux en-dehors, via le système de visio-conférence. Ces réunions permettent de faire un rapide bilan des avancées de chacun, des différentes études à mener et d'aborder diverses questions relatives au groupe (budget ...).

2.3.2 Les réunions

Pour communiquer avec les autres membres du groupe CMS, mis à part les mails, les chercheurs du laboratoire du groupe CMS disposent d'un système de visio-conférence, nommé EVO. Ce système est utilisé aussi bien pour des réunions entre petits groupes que pour les grandes réunions regroupant toute la collaboration, comme cela a été notamment le cas lors de l'annonce des résultats de l'analyse des données « unblind » (voir le chapitre 3 de cette partie) ou encore pour les différentes conférences. À l'aide d'un nom d'utilisateur, d'un mot de passe, chaque membre du groupe peut se connecter et participer à une réunion (qui dispose d'un nom et d'un mot de passe spécifique transmis souvent par mail auparavant).

Toutes les réunions se font en anglais, comme la plupart des communications, que ce soit au sein du laboratoire (beaucoup de doctorants et post-doctorants ne sont pas français) ou lors des réunions avec des personnes extérieures au laboratoire : l'anglais est, sans surprise, la langue officielle de CMS.

Le groupe du laboratoire s'occupant du canal de désintégration du Higgs $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$ se réunit de manière hebdomadaire : chaque personne le souhaitant peut faire une présentation de ses avancées ou soumettre ses problèmes. Ces réunions sont très productives. À partir du deuxième mois de mon stage, lorsque mon étude avait suffisamment avancé, j'ai présenté mon travail toutes les semaines. J'ai de plus réalisé deux présentations de mes résultats finaux (lors de la dernière semaine de mon stage) au cours de deux réunions des groupes officiels de CMS : le groupe « HZZ4L » (s'occupant de l'analyse $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$) et le groupe « e-gamma » (s'occupant des électrons et photons). Les diapositives de la présentation de la réunion du « e-gamma » peuvent être trouvées en annexe de ce rapport (celles de la réunion du groupe « HZZ4L » sont quasiment les mêmes).

2.3.3 Hiérarchie

Le directeur du laboratoire est Mr Jean-Claude Brient. De plus, le groupe CMS du laboratoire a un responsable, Mr Yves Sirois (qui est aussi porte-parole de la collaboration CMS en France). Cependant, je n'ai pas observé de véritables rapports hiérarchiques lors de mon stage. L'administration ne joue aucun rôle dans l'organisation du travail des chercheurs. Ils savent eux-mêmes ce qu'ils doivent faire et n'ont pas besoin d'une pression hiérarchique pour le faire.

2.3.4 Collaboration entre chercheurs

Il y a une très importante collaboration entre les chercheurs : certains maîtrisent mieux que d'autres certains logiciels ou notions physiques et l'entre-aide est quotidienne. Ces échanges sont très efficaces dans la mesure où ils permettent de confronter différents points de vue et de faire émerger de nouvelles idées. Il y a aussi un véritable travail d'équipe au sein de la collaboration CMS, indispensable dans ce genre d'expériences.

2.4 Investissement dans le travail

Il est assez courant d'entendre dire que le métier de chercheur est un métier de passionnés : j'ai largement pu vérifier cette affirmation lors de mon stage. Il apparaît nettement que les chercheurs sont totalement passionnés par leur travail. Ils sont investis dans ce qu'ils font, ce qui est une différence majeure avec ce que j'avais pu observer lors de mon stage d'exécution, et n'attendent pas avec impatience la fin de la journée lors de leur arrivée le matin !

Chapitre 3

La gestion d'une grande découverte

J'ai eu l'immense chance d'effectuer mon stage au moment d'une découverte majeure pour la physique des particules, attendue depuis plus de 40 ans : celle d'une particule, compatible avec le fameux boson de Higgs.

Le groupe CMS du laboratoire Leprince-Ringuet est très impliqué dans le traitement et l'analyse des données issues du LHC et la recherche du Higgs, en particulier dans son canal de désintégration en 4 leptons via deux bosons Z (voir la partie théorique du deuxième chapitre pour plus de détails) qui est l'un des canaux de désintégration du Higgs les plus prometteurs pour pouvoir trouver, si elle existe, cette particule. Je n'aurais donc pas pu rêver être plus près de l'effervescence qui a entouré cette découverte.

Le groupe CMS a décidé en début d'année, avant la reprise des collisions au LHC, d'appliquer une politique de *blinding* [2]. A la fin de l'année 2011, CMS a exclu la présence du boson de Higgs du Modèle Standard dans la zone de masse 127-600 GeV, avec un seuil de confiance de 95% et a observé un léger excès à 125 GeV. La politique de *blinding* consistait à exclure la région 110 - 140 GeV et celle au-dessus de 300 GeV des analyses de 2012 dans un premier temps. Les simulations Monte-Carlo permettent de mieux comprendre le *background* et d'affiner les analyses de données, les données « non blindées » permettant de contrôler les efficacités et coupures. Ils s'affranchissaient ainsi de tout risque d'adapter les coupures aux événements des données. Lorsque les différents groupes de la collaboration ont fini de fixer les différents paramètres de l'analyse, les données où pouvait potentiellement se cacher la fameuse particule ont été dévoilées : la boîte a été ouverte, comme cela se disait dans le jargon des chercheurs. Après une nuit d'analyses agitée, un meeting s'est tenu le lendemain après-midi pour annoncer les résultats (très) préliminaires dans chaque canal de désintégration du Higgs. Cette réunion était totalement confidentielle, et seules les personnes impliquées dans l'analyse des données ont pu y assister, ma maître de stage m'a permis d'y assister. Les résultats annoncés auguraient déjà de la découverte d'une nouvelle particule. Après deux semaines et demi à revérifier ces résultats, les approfondir, l'annonce officielle a été faite au cours d'un séminaire commun à CMS et ATLAS (l'autre expérience du LHC travaillant sur la recherche du boson de Higgs) au CERN : une particule compatible avec le boson de Higgs a été découverte, avec un seuil de confiance à 4.9 sigma pour CMS et 5 sigma pour le groupe ATLAS [3].

J'ai pu remarquer lors de mon stage que les chercheurs font preuve d'une très grande prudence et rigueur vis-à-vis de leurs résultats et leurs publications. Ainsi pour qu'un résultat soit validé et publié dans une note, il passe par plusieurs étapes, les *pre-approval*, *approval*, lors desquelles les chercheurs doivent montrer la rigueur et la véracité de leurs résultats.

De même, lors de la réunion d'annonce des résultats issus de l'*unblinding*, il a été largement souligné que les résultats obtenus étaient préliminaires et que les personnes ayant assisté à cette réunion devaient garder secret ce qui avait été dit, tant qu'il n'y aurait pas d'annonce officielle (qui a été faite 2 semaines plus tard).

Deuxième partie

Mesure de l'efficacité de déclenchement d'un événement Higgs dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$

Introduction

Le Compact Muon Solenoid est l'une des quatre expériences principales réalisées au Large Hadron Collider, située à la frontière franco-suisse, et a été conçue afin d'étudier les collisions protons-protons produites dans l'accélérateur. Cette expérience a notamment pour objectif de chercher des indices de la présence de nouvelles particules, comme le boson de Higgs, particule dont l'existence a été prédite par le Modèle Standard (théorie physique décrivant les interactions forte, faible et électromagnétique ainsi que l'ensemble des particules élémentaires) mais n'a encore jamais été observée jusqu'à ce jour. Les sections efficaces de la production de telles particules sont extrêmement faibles et noyées sous le bruit de fond. De plus, parmi les millions de collisions produites par seconde, seule une centaine peut être enregistrée et stockée : le système de déclenchement, qui sélectionne les collisions les plus intéressantes, doit donc être extrêmement performant.

Pour répondre à cette exigence, le système de déclenchement du CMS est organisé en deux niveaux : le premier (nommé *L1 Trigger*) effectue une pré-sélection rapide des événements (taux de 100 kHz en sortie) et est complété par le deuxième niveau, le niveau HLT (*High Level Trigger*), qui, à l'aide d'algorithmes complexes et des informations du *L1 Trigger*, effectue une sélection à un taux de 350 Hz.

L'objectif de l'étude présentée ici est d'étudier l'efficacité de déclenchement d'un des *triggers* présent au niveau HLT, utilisé dans l'analyse du canal de désintégration du Higgs $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$, canal pourvu d'une signature très propre mais disposant d'un très faible rapport d'embranchement. Cette efficacité sera mesurée avec les données réelles collectées en 2012 et également comparée avec les prévisions obtenues par simulation d'événements Z avec la méthode Monte-Carlo.

Démarche de l'étude

L'étude menée dans ce rapport est faite au niveau HLT. L'objectif final est d'obtenir l'efficacité de déclenchement des événements $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$ avec le *trigger* di-électrons.

Dans un premier temps, les efficacités de déclenchement par lepton sont calculées pour chacun des filtres composant le *trigger* di-électrons (les filtres sont en quelque sorte des étapes à franchir pour qu'un événement déclenche le *trigger*). Ce calcul va être effectué à l'aide de la méthode du Tag & Probe, qui est une technique d'analyse de données utilisée pour calculer les efficacités de déclenchement à partir des données elle-mêmes, en particulier ici, les événements créant des bosons Z se désintégrant en 2 leptons. Ces efficacités seront calculées pour les données issues du LHC dans la première partie de l'année 2012 et pour les simulations d'événements Z par la méthode Monte-Carlo, afin de pouvoir comparer ces deux situations.

A l'aide de ces efficacités obtenues, l'efficacité de déclenchement du *trigger* di-électrons pour un événement Higgs, composée de 4 leptons, sera calculée, et cette efficacité sera alors déduite pour les données. Cela permettra finalement de déterminer les erreurs systématiques issues des différences entre données et simulation. Ces erreurs systématiques seront utilisées dans l'analyse officielle du $H \rightarrow 4l$ dans CMS.

Chapitre 1

Cadre théorique : Le Modèle Standard

Il y aurait évidemment beaucoup à dire sur le Modèle Standard. Seuls les éléments importants à la compréhension de l'étude menée ici seront évoqués dans cette partie.

1.1 Les particules élémentaires et forces fondamentales

L'Univers est composé de 12 particules élémentaires et 4 forces fondamentales. Ces particules et forces sont décrites par le Modèle Standard, une théorie physique qui n'a encore jamais été mise en défaut par les expériences.

Les particules élémentaires se divisent en deux groupes, caractérisés par la valeur de leur spin. La figure 1.1 récapitule sous forme de tableaux ces différentes particules.

1.1.1 Les fermions

Les *fermions* ont un spin demi-entier et obéissent à la statistique de Fermi-Dirac. Ils sont donc soumis au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions ne peuvent se trouver dans le même état quantique. Ce sont les particules constituant la matière.

Les fermions se classent en deux familles : les *leptons* (qui ne sont pas soumis à l'interaction forte) et les *quarks* (qui sont soumis à toutes les interactions).

Dans la famille des leptons, nous retrouvons l'électron (e^-), le muon (μ^-), le tauon (τ^-) et les trois neutrinos associés : neutrino électronique ν_e , neutrino mu ν_μ et neutrino tau ν_τ .

La famille des quarks, quant à elle, est composée de 6 éléments : le quark down (d), le quark up (u), le quark strange (s), le quark charm (c), le quark bottom (b) et finalement le quark top (t). Les quarks ne peuvent exister de manière isolée, ils s'assemblent pour donner des *hadrons*. Il existe deux types de hadrons : les baryons (combinaison de trois quarks) et les mésons (une paire quark/anti-quark).

Ces particules se rangent en trois familles : la première, composée des quarks u et d et de l'électron et son neutrino associé, comprend les particules les plus stables. La matière ordinaire est composée des particules de cette première famille. Les familles d'ordre supérieure sont issues de phénomènes astrophysiques ou de collisions dans des accélérateurs de particules.

Pour chaque fermion il existe un anti-fermion, ayant la même masse, même spin mais une charge électrique opposée.

1.1.2 Les bosons

Les *bosons* ont un spin entier et obéissent à la statistique de Bose-Einstein.

Les trois forces fondamentales, *faible*, *forte* et *électromagnétique*, agissent sur les fermions par l'intermédiaire de ces bosons (nommés *de jauge*). Il en existe 12 dans le Modèle Standard : le photon (associé à la force électromagnétique), 8 gluons (associés à la force forte) et 3 bosons vecteurs (Z , W^+ , W^- , associés à la force faible). La gravité, et son boson associé, le graviton, n'est à ce jour pas incluse dans le Modèle Standard.

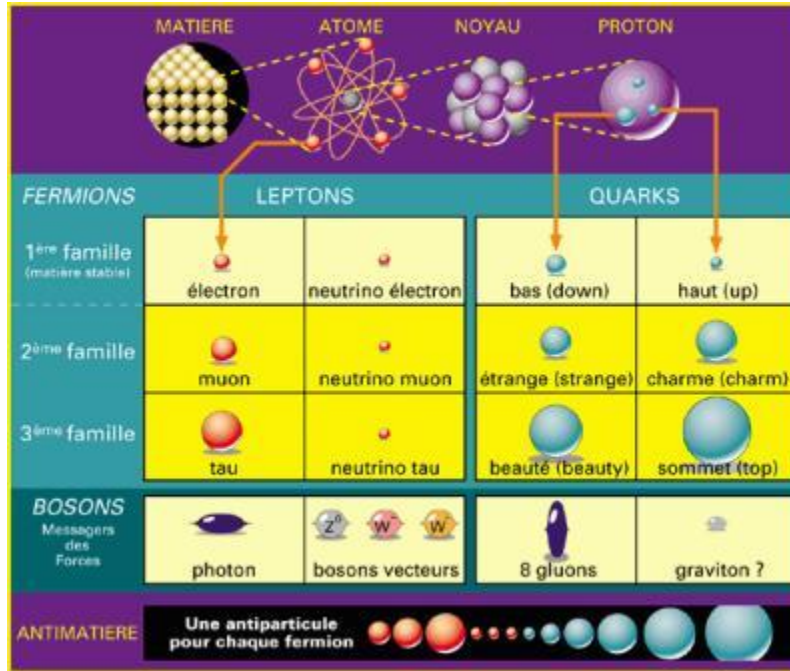


FIGURE 1.1 – Le Modèle Standard

1.2 Le boson de Higgs

Le Modèle Standard permet de décrire toutes les particules élémentaires, et la façon dont elles interagissent ensemble. Cependant, ce modèle prévoyait que toutes les particules élémentaires avaient une masse nulle, ce qui n'était pas conforme à la réalité. Pour résoudre ce problème, plusieurs théoriciens proposèrent une théorie dans les années 60, reposant sur un mécanisme (que l'on appelle désormais le mécanisme de Englert-Brout-Higgs [4][5]). Ce mécanisme prédit l'existence d'un champs, le champs de Higgs, présent dans tout l'espace. Les particules acquièrent une masse en interagissant avec ce champs. Ainsi la masse des particules n'est plus une caractéristique intrinsèque mais le résultat d'une interaction. Peter Higgs montra que ce mécanisme supposait l'existence d'une particule, le boson de Higgs, qui n'avait encore jamais été observée par les physiciens. L'un des objectifs principaux de l'expérience LHC est de chercher cette particule et de déterminer ses principales caractéristiques.

Le mécanisme de Higgs ne prédit pas la masse du boson mais des contraintes théoriques et des expériences menées ont permis de réduire le champs d'investigation. La figure 1.2 présente les domaines d'exclusion de la masse du Higgs en vigueur au début de l'année 2012.

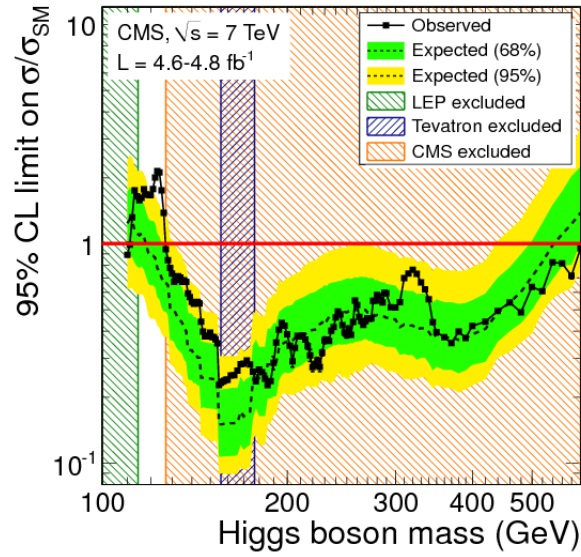


FIGURE 1.2 – Domaines d’exclusion de la masse du Higgs obtenus au travers de plusieurs expériences menées au LEP, Tevatron et CMS, avec un intervalle de confiance de 95% : la ligne noire représente la limite observée divisée par la section efficace prédite par le Modèle Standard et celle en pointillés la limite attendue. L’erreur associée à la limite attendue à 1 et 2σ est symbolisée par les bandes jaunes et vertes [6]

1.2.1 Les canaux de désintégration du Higgs

L’existence du boson de Higgs est trop brève pour qu’on puisse le détecter directement : on ne peut observer que les produits de sa désintégration, ou même les produits de désintégration de ces derniers. Selon la masse du Higgs [7], certains canaux sont particulièrement prometteurs (les rapports d’embranchement sont donnés sur la figure 1.3) :

- Pour une masse située en dessous de **130 GeV**, l’embranchement le plus probable pour la désintégration du Higgs est la production d’un quark et d’un antiquark bottom ($b\bar{b}$). Cependant, ce mode est noyé sous un bruit de fond très important. Ainsi dans cette zone de masse, c’est la désintégration en deux photons ($\gamma\gamma$) ou deux bosons Z (ZZ) qui est privilégiée pour les analyses. Le canal de désintégration $\tau\tau$ est aussi un mode envisagé dans les études à basse masse.
- Pour une masse située **entre 130 GeV et deux fois la masse du boson Z^0 (environ 180 GeV)**, le plus facile à étudier sera la désintégration d’un Higgs en deux Z (puis 4 leptons) et en deux W (puis deux leptons et deux neutrinos). Le canal de désintégration $\tau\tau$ est aussi un mode envisagé dans les études.
- Pour une masse **supérieure à deux fois celle du Z^0** , le Higgs se désintègre principalement en deux bosons Z (qui se désintègrent eux-mêmes en deux paires de leptons) ou deux bosons W. Dans le cas d’une masse supérieure à 350 GeV, il est aussi possible que le Higgs se désintègre en deux quarks, top et antitop ($t\bar{t}$), mais de même que pour la désintégration des quarks bottom, l’analyse est rendue difficile par le bruit de fond.

L’étude menée ici sera faite dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$ (les 4 leptons pouvant être 4 électrons, 2 électrons & 2 muons, ou 4 muons). Ce canal est très intéressant dans la mesure où les 4 leptons sont primaires (ils sont directement et instantanément issus dans la désintégration $ZZ^{(*)}$) et isolés. Il est donc très propre et présente peu de bruit de fond, il permet de plus la reconstruction complète du Higgs. Il a cependant l’inconvénient d’avoir un faible rapport d’embranchement, ce qui nécessite donc une très grande efficacité de reconstruction, d’isolation et d’identification des leptons.

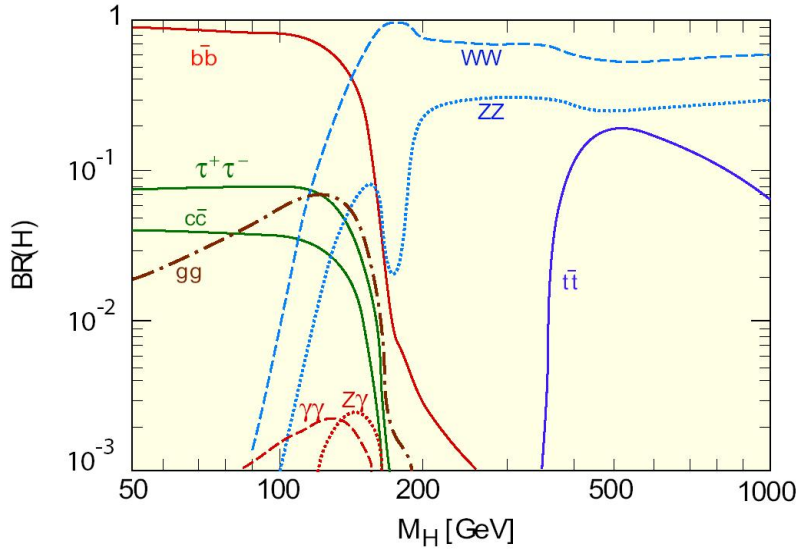


FIGURE 1.3 – Rapport d'enbranchement du Higgs dans ses différents canaux de désintégration en fonction de sa masse [8]

1.2.2 La recherche du boson de Higgs

Dans la région de masse non encore exclue au début de l'année 2012 (115 - 130 GeV), les cinq modes de désintégration mentionnés ci-dessus ($b\bar{b}$, $\gamma\gamma$, $\tau\bar{\tau}$, WW et ZZ), ont été étudiés dans l'objectif de trouver le boson de Higgs en 2012.

L'analyse des données du LHC est un long et fastueux processus d'analyse physique et statistique. Prenons l'exemple de la désintégration du Higgs en 4 leptons (via deux bosons Z). Il existe de nombreux autres processus pouvant conduire à l'obtention de 4 leptons au sein des réactions se produisant dans le LHC. Ainsi, l'analyse consiste à comparer le nombre d'événements où « 4 leptons » ont été obtenus au nombre attendu si l'on tient compte de tous les autres processus déjà connus. On procède ainsi pour toutes les voies de désintégrations possibles et il est possible de parler de découverte lorsque l'on observe un excédent statistiquement significatif [9]. Pour pouvoir annoncer une « découverte », il faut que la probabilité de fluctuation statistique du fond soit très faible, de l'ordre de un sur un million. Les physiciens appellent cela un effet à 5 sigma (déviation standard), correspondant à une probabilité de 99.99994% que le signal observé ne soit pas dû à une fluctuation statistique. Trois sigma (probabilité de 99.73%) ne permettent de conclure qu'à une « observation ».

Le 4 juillet, les résultats des analyses des données de la première partie de l'année 2012 ont été dévoilés au cours d'un séminaire commun à CMS et ATLAS. CMS a observé un excès d'événements à une masse d'environ 125 GeV avec une signification statistique de 4.9 sigma au-dessus de l'attendu pour le bruit de fond, pour un ajustement combiné des 5 canaux principaux de désintégration du Higgs. Un ajustement combiné des 2 canaux les plus sensibles ($\gamma\gamma$ et ZZ) conduit à une signification statistique de 5.0 sigma. La collaboration a par ailleurs exclu l'existence du boson de Higgs (Modèle Standard) dans la plage 110-122.5 GeV et 127-600 GeV à 95% de niveau de confiance [3].

La figure 1.4 montre la probabilité de fluctuation du fond jusqu'à atteindre la limite permettant de parler d'une observation ou d'une découverte dans les 5 canaux principaux de désintégration du Higgs, et pour la combinaison de ces 5 canaux.

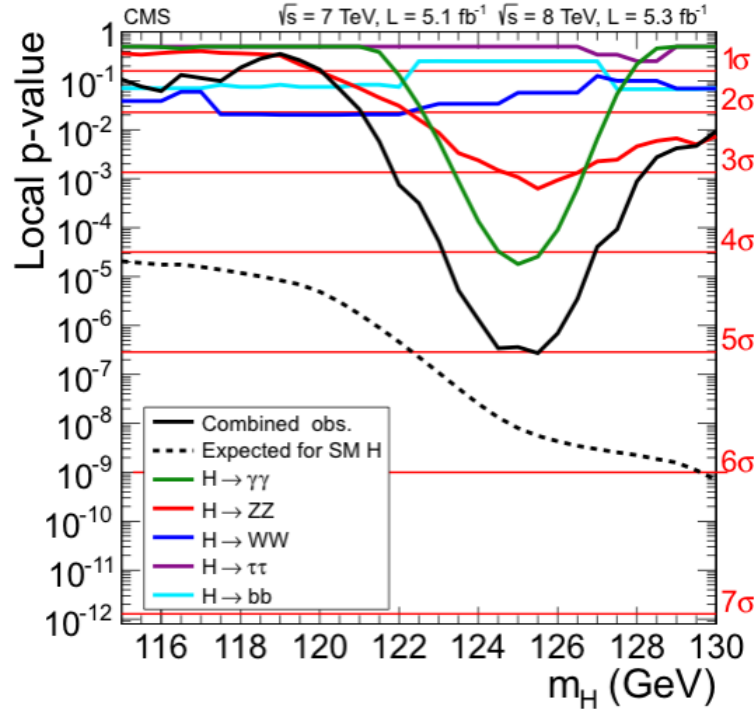


FIGURE 1.4 – Probabilité de fluctuation du *background* dans les 5 principaux canaux de désintégration du boson de Higgs, pour ces 5 canaux combinés (ligne noire) et pour l'attendu (pointillés) : Les 5 sigma permettant de déclarer une découverte sont obtenus pour une masse d'environ 125 GeV - Résultats de CMS au mois de juillet 2012

Chapitre 2

Cadre expérimental : Présentation générale du LHC et du détecteur CMS

2.1 Le Large Hadron Collider

2.1.1 Généralités sur le Large Hadron Collider

Le Large Hadron Collider (LHC) est le plus puissant accélérateur de particules au monde construit à ce jour. Il est situé dans un anneau de 27 kilomètres et enterré à 100 mètres sous terre à la frontière franco-suisse, près de Genève [10]. Le principe de cet accélérateur est d'accélérer des protons (de la famille des hadrons) ou des ions afin de produire des collisions. Deux faisceaux de particules (protons ou ions) sont accélérés en sens inverse : ils s'entrechoquent, créant ainsi des collisions et des particules, permettant de mener des recherches notamment sur l'origine de la masse des particules élémentaires (recherche du boson de Higgs), la Supersymétrie ou encore la matière noire.

Les faisceaux sont composés de paquets contenant des centaines de milliards de protons (ou ions) chacun. Voyageant quasiment à la vitesse de la lumière (99,9999991% de la vitesse de la lumière), ils sont injectés, accélérés, et maintenus en circulation pendant des heures, guidés par des milliers d'aimants supraconducteurs puissants.

Le LHC a été mis en fonctionnement le 10 septembre 2008 et inauguré le 21 octobre 2008, soit plus de 10 ans après la décision officielle de le construire, pour succéder au Large Electron Positron (LEP). Quelques jours après l'injection du premier faisceau dans l'accélérateur, le LHC a été arrêté à cause d'un incident lors d'un test. Il a alors été redémarré plus d'un an après (le 23 octobre 2009), avec des collisions à 900 GeV dans un premier temps, puis 2.36 TeV. Il a ensuite atteint des collisions à 7 TeV en 2010 et 8 TeV au début de l'année 2012, réalisant ainsi un nouveau record. Lorsque le LHC aura atteint son fonctionnement nominal, les deux faisceaux de protons voyageront chacun à une énergie maximum de 7 TeV, permettant ainsi des collisions frontales de 14 TeV, ce qui donnera lieu à quelques 600 millions de collisions par seconde.

2.1.2 Les différentes expériences du LHC

Dans la majeure partie de l'anneau, ces 2 faisceaux en sens opposés voyagent sur deux lignes séparées. Ils se heurtent au coeur des quatres expériences principales du LHC (ALICE, ATLAS, CMS et LHCb), disposées le long de l'anneau de collision.

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), aux dimensions colossales (46 mètres de long et 25 mètres de haut), est un détecteur polyvalent qui cherche à identifier et mesurer précisément les caractéristiques

des particules produites lors des collisions, afin d'observer de nouveaux phénomènes physiques, comme par exemple la recherche du boson de Higgs ou de particules supersymétriques, ou encore de dimensions supplémentaires de l'espace.

CMS (Compact Muon Solenoid) poursuit les mêmes objectifs qu'ATLAS, mais sa conception est totalement différente de celle d'ATLAS. CMS est ainsi deux fois plus petit qu'ATLAS, mais deux fois plus lourd. Il s'agit d'un détecteur très compact.

Le LHC est aussi constitué de deux autres grands détecteurs, **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) et **LHCb** (Large Hadron Collider beauty experiment), qui ont chacun des objectifs différents. ALICE s'attache à étudier la matière nucléaire dans un état extrême de température et de densité, une « soupe » de quarks et gluons qui aurait existé quelques microsecondes après le Big Bang afin d'apporter des éclairages nouveaux sur des questions telles que l'état de la matière dans les premiers instants de l'Univers. LHCb est destiné à l'étude de l'asymétrie matière-antimatière en traquant spécifiquement les particules contenant un quark b (appelé « beauty »), l'objectif ultime étant de comprendre pourquoi l'univers est composé exclusivement de matière alors qu'à sa naissance, matière et antimatière étaient présentes à parts égales.

L'expérience CMS, qui est le cadre de cette étude, est décrite plus en détails ci-dessous.

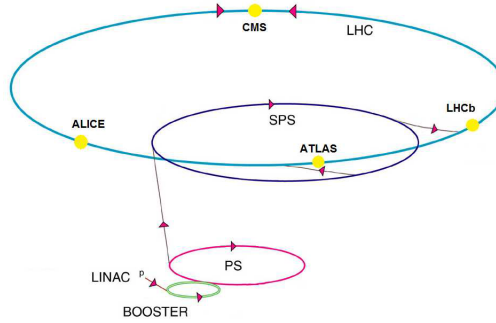


FIGURE 2.1 – Vue schématique de dessus du LHC

2.2 Le détecteur CMS (Compact Muon Solenoid)

Le projet CMS vit le jour dans les années 1990 et est le fruit d'une collaboration entre 38 pays. 184 institutions et près de 3000 physiciens travaillent sur ce détecteur. CMS et ATLAS poursuivent les mêmes objectifs scientifiques mais les solutions techniques retenues pour chacun de ces deux détecteurs sont totalement différentes. Ceci permet ainsi d'avoir deux expériences totalement indépendantes, et ainsi pouvoir confirmer un résultat scientifique de deux manières différentes. Une description détaillée du détecteur CMS peut être trouvée aux références [11] et [12].

2.2.1 Les caractéristiques du détecteur

Les dimensions du détecteur CMS sont colossales : il mesure 21.6 mètres de long, pour un diamètre de 15 mètres et un poids de 12 500 tonnes. Ce détecteur est donc très dense, d'où le mot « Compact » dans sa dénomination. Il est caractérisé par une réponse rapide (croisement des faisceaux à 40MHz), et dispose de plus d'une très grande granularité (près de 15 millions de canaux), est résistif aux radiations et hermétique. Le champ magnétique régnant à l'intérieur du détecteur est de 3.8 Tesla. Ce détecteur est composé de divers modules permettant la détection de particules de natures différentes, tels les muons, les électrons, les positons, les hadrons ou encore les photons.

Pour l'identification des particules et la mesure de leurs diverses caractéristiques physiques, deux types de détecteurs sont utilisés :

- les **trajectographes**, ou détecteurs de reconstruction de traces, qui permettent d'enregistrer la trajectoire des particules chargées le traversant, ces particules devant interagir le moins possible avec le trajectographe.
- les **calorimètres**, qui mesurent l'énergie des particules et sont spécialement conçus pour les arrêter.

La figure 2.2 présente une vue éclatée du détecteur. Ce détecteur est de forme cylindrique fermée, qui se décompose en un tonneau central (ou aussi nommé selon le mot anglais *barrel*) et deux bouchons (*endcaps*) aux extrémités du cylindre.

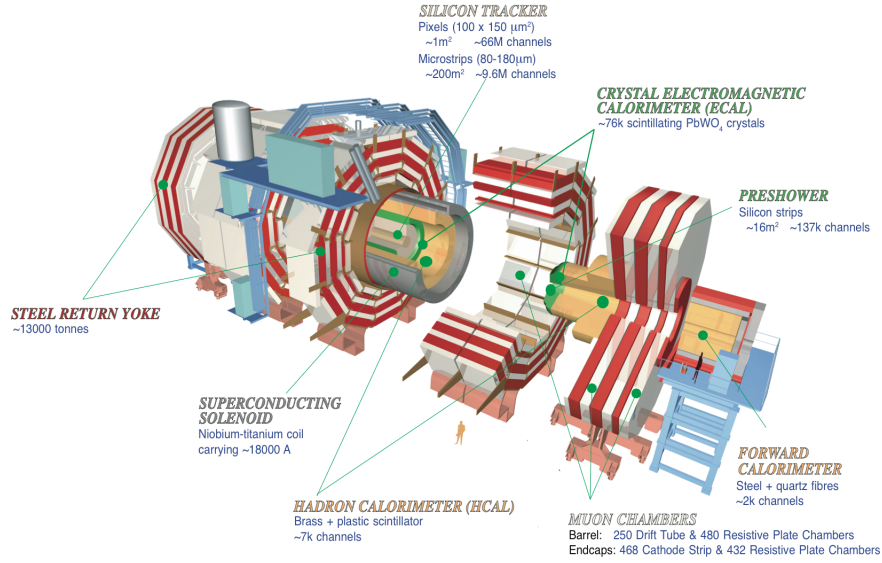


FIGURE 2.2 – Vue éclatée du détecteur CMS (Compact Muon Solenoid)

2.2.2 Le système de coordonnées utilisé

Cette partie décrit le système de coordonnées du détecteur utilisé dans toute cette étude et qui est schématisé sur la figure 2.3.

L'origine est centrée sur le point nominal de collision au sein du détecteur, avec l'axe y pointant verticalement vers le haut et l'axe x pointant radialement vers le centre du LHC. Ainsi, l'axe z est dirigé selon la direction du faisceau. L'angle azimutal ϕ est mesuré depuis x et est dans le plan (x,y). L'angle polaire θ est mesuré à partir de l'axe z.

La pseudo-rapacité est définie par $|\eta| = -\ln (\tan (\theta/2))$.

2.2.3 Les différents constituants du détecteur CMS

Les différents modules de CMS sont les suivants, du point le plus proche de la collision au point le plus extérieur :

- le **trajectographe** (ou tracker) est destiné à la reconstruction des trajectoires et impulsions des particules chargées le traversant,
- le **calorimètre électromagnétique** (ou ECAL) permet la mesure de l'énergie et la position des photons, électrons et positons grâce à un ensemble très compact de 80 000 cristaux scintillants,

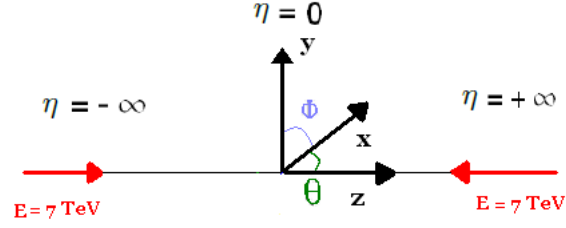


FIGURE 2.3 – Système de coordonnées de CMS

- le **calorimètre hadronique** (ou HCAL) permet la mesure de l'énergie et la position des jets de hadrons chargés (ou neutres),
- l'**aimant supraconducteur** génère un champ magnétique de 3.8 Teslas et permet de courber les trajectoires des particules chargées,
- le **détecteur à muons** identifie les muons et permet, en association avec le trajectographe, de mesurer précisément leur impulsion.

La figure 2.4 représente les signatures laissées par les particules dans les différentes parties du détecteur.

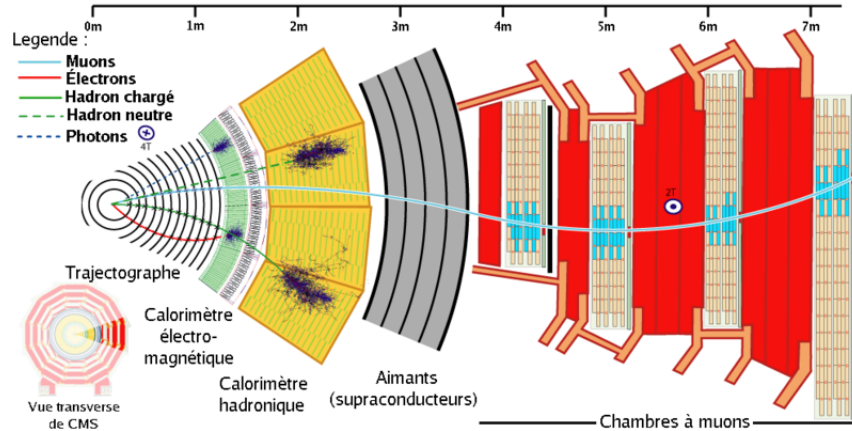


FIGURE 2.4 – Signature de différentes particules dans les différents modules du détecteur

Ci-dessous sont détaillés le trajectographe et le calorimètre électromagnétique qui seront utiles pour l'étude menée dans ce rapport.

Le trajectographe

Le trajectographe est utilisé pour reconstruire avec précision l'impulsion des particules chargées, telles que les électrons, les muons et les hadrons à partir de leur trajectoire, ainsi que la position du vertex d'où proviennent ces particules. Il s'agit d'un détecteur cylindrique de 5.4 m de longueur, d'un rayon variant entre 1.07 et 1.1 m et d'une surface totale de 2012 m². Ce détecteur est entièrement fait de silicium.

Il est constitué en son centre de détecteurs à pixels, composés de 3 couches cylindriques de pixels de très grande granularité (près de 66 millions de canaux), situées respectivement à un rayon moyen de 4.4 cm, 7.3 cm et 10.2 cm. Cette partie est complétée par deux disques de chaque côté des bouchons. Ces détecteurs à pixels permettent généralement l'obtention de 2 ou 3 points de mesure (nommés « hits ») par

trace, ayant une résolution d'environ $10 \mu\text{m}$ dans le plan (r, ϕ) et $15 \mu\text{m}$ dans le plan z . La figure 2.5 donne une représentation de ce détecteur à pixels.

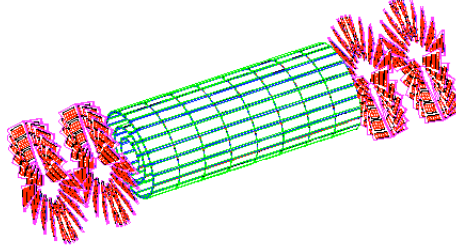


FIGURE 2.5 – Illustration des détecteurs à pixels du trajectographe

Dans sa partie la plus externe, le trajectographe est constitué de 10 couches de micro-pistes en silicium, s'étendant jusqu'à un rayon de 1.1 m, complété par 12 disques de micro-pistes au niveau des bouchons. Cette partie est de granularité moindre que le détecteur à pixels, avec un total de 9.6 millions de canaux environ. Ces détecteurs à micro-pistes peuvent fournir jusqu'à 14 hits par trace avec une résolution allant de 10 à $60 \mu\text{m}$ en (r, ϕ) . Les disques de micro-pistes et pixels au niveau des bouchons permettent d'avoir une couverture angulaire allant jusqu'à une pseudo-rapacité de $|\eta| = 2.5$.

Le calorimètre électromagnétique

Le calorimètre électromagnétique (ECAL) permet la mesure de l'énergie et de la position des photons et des électrons/positons. Il est formé de 80 000 cristaux de tungstate de plomb ($PbWO_4$) de section rectangulaire, rassemblés en modules (de 400 à 500 cristaux). Ces cristaux très denses (8.28 g/cm^3) permettent de produire les gerbes électromagnétiques et d'en mesurer leurs énergies grâce à la lumière de scintillation émise par les cristaux.

Le ECAL est constitué de deux parties : une partie centrale (nommée *tonneau* ou *barrel*) couvrant $|\eta| < 1.479$ et deux bouchons (nommés *endcaps*) couvrant $1.479 < |\eta| < 3.0$. Cela est montré sur la figure 2.6.

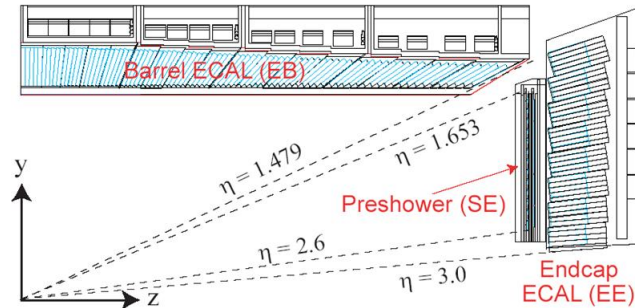


FIGURE 2.6 – Coupe transversale du ECAL

Le **tonneau (EB, ou barrel)** est constitué de 31 200 cristaux, de granularité $\Delta\eta * \Delta\phi = 0.0174 * 0.0174$ (correspondant à $22 * 22 \text{ mm}^2$). Il est divisé en deux sous-parties suivant l'axe longitudinal Oz. Chaque demi-tonneau est composé de 18 super-modules couvrant 20° en ϕ et contenant chacun 17 000 cristaux. Les super-modules sont divisés eux-mêmes en 4 modules.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 2.6, les **bouchons (EE, ou endcaps)** sont précédés d'un détecteur de pied de gerbe (*preshower*), couvrant la zone $1.653 < |\eta| < 2.6$ et permettant d'améliorer

l'identification des électrons (en les distinguant des pions) et la résolution sur leur position. Chacun des bouchons est composé de 7324 cristaux rectangulaires.

La figure 2.7 montre l'arrangement géométrique des modules, super-modules et bouchons.

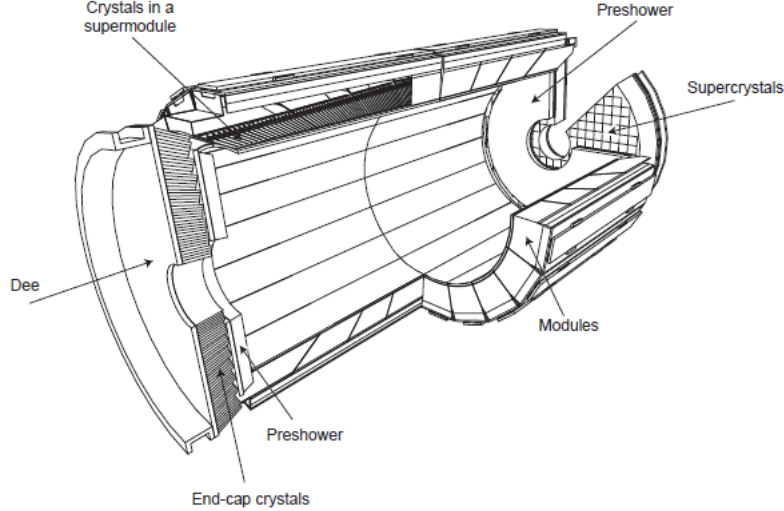


FIGURE 2.7 – Vue éclatée du ECAL

2.2.4 Le système de déclenchement

A la luminosité du LHC en 2012, une trentaine de collisions protons-protons a lieu toutes les 50 ns : il est impossible de stocker toutes les données correspondantes. Le système de déclenchement [13] [14] a pour tâche de diminuer d'un rapport de 10^5 le flot d'informations. Pour cela, il doit analyser les quelques 15 millions de canaux de détection afin de sélectionner parmi les 40 millions de croisements de faisceaux par seconde les 350 plus intéressants et les stocker.

Pour cela, le système est divisé en deux niveaux, l'un composé de filtres matériels et l'autre logiciels. Le premier, dit déclenchement de premier niveau (L1 pour *Level 1 trigger*), analyse seulement les informations provenant des chambres à muons et du calorimètre électromagnétique pour des raisons de rapidité (ces informations sont traitées en seulement 3 μ s) et conserve ainsi environ 100 000 événements par seconde (c'est-à-dire un événement sur 400 en moyenne). Le second, nommé déclenchement de haut niveau (HLT, pour *High Level Trigger*) prend les événements sélectionnés par le L1 Trigger et utilise la totalité des données de l'événement pour réduire le taux aux environs de 350 Hz. Le niveau HLT permet la reconstruction et la sélection d'électrons, photons, muons, jets produits lors des collisions. L'étude menée ici sera faite à ce niveau.

2.2.5 Reconstruction et identification des électrons

La reconstruction des électrons [15] [16] dans CMS utilise les données provenant du trajectographe et de l'ECAL. La mesure de l'énergie des électrons dans le ECAL est notamment gênée par la présence du trajectographe, constitué d'une quantité importante de matériel, ainsi que par le fort champ magnétique régnant dans le détecteur. En effet, lorsque les électrons traversent le trajectographe, ils rayonnent des photons par effet Bremsstrahlung : l'énergie qui atteint le ECAL est donc dispersée dans la direction azimutale ϕ (la figure 2.8 schématise ce phénomène). La reconstruction des électrons a donc pour principe d'associer un agrégat d'énergie ou super-agrégat (nommé *supercluster*, qui est constitué de plusieurs agrégats d'énergie) dans le ECAL avec une trace dans le trajectographe. Cela est fait en deux étapes : dans un premier

temps, des algorithmes permettent la reconstruction des traces associées aux agrégats, et dans un second temps, l'identification des électrons est réalisée.

La reconstruction des candidats électrons commence par la reconstruction des super-agrégats d'énergie au niveau des cristaux du ECAL. Cela est réalisé à l'aide d'algorithmes spécifiques, qui dépendent de la position du super-agrégat (partie tonneau ou bouchons). Puis, à partir des informations obtenues, une trace en accord avec ce super-agrégat est recherchée et est complétée par un autre algorithme démarrant à la trace. La distribution de la perte d'énergie des électrons dans le trajectographe est en grande partie non-Gaussienne. Ainsi un filtre Gaussian-Sum Filter (GSF) a été développé pour reconstruire la trace de l'électron, l'idée étant de modéliser la perte d'énergie par Bremsstrahlung comme un mixte de gaussiennes, et non une simple gaussienne.

La sélection des électrons pour les différentes analyses nécessite d'avoir une information sur la qualité de la reconstruction de l'électron. Pour cela, les électrons sont classés en différentes catégories :

- Les électrons *crack* sont les électrons ayant un point d'impact proche des espaces inter-modules du ECAL (zones qui sont nommées *crack*). Les électrons tombant dans la zone de recouvrement $1.4442 < |\eta| < 1.5660$ sont aussi regroupés dans cette catégorie. Tous ces électrons sont classés à part des autres.
- Les électrons *golden* sont ceux qui sont le moins affectés par la traversée des matériaux du trajectographe. Ils ont en général peu rayonné par effet Bremsstrahlung. Leur super-agrégat n'est formé que d'un seul agrégat.
- Les électrons *big brem* ont un super-agrégat formé que d'un seul agrégat. La fraction de bremsstrahlung est importante, à la différence des électrons *golden*. Il s'agit notamment d'électrons ayant eu un photon bremsstrahlung émis soit très tôt, soit en bout de trace.
- Les électrons *bad track* ont une trace mal mesurée.
- Les électrons *showering* sont les électrons restants. Leur super-agrégat est formé de plusieurs agrégats.

Finalement, afin d'améliorer la résolution de la mesure de l'impulsion de l'électron, les mesures provenant du trajectographe et du ECAL sont combinées (on parle de combinaison Energie-Impulsion ou E-p). En effet, la résolution sur la mesure de l'énergie par l'ECAL s'améliore quand l'énergie de l'électron est importante, tandis que la résolution sur la mesure de l'énergie par le trajectographe est meilleure à basse énergie. Ainsi, à basse énergie, l'énergie des électrons est plutôt un mixte des mesures de l'ECAL et du trajectographe, tandis qu'à haute énergie, l'énergie est principalement déterminée par le ECAL.

Les électrons sont donc identifiés par la présence d'un super-agrégat dans l'ECAL et d'une trace dans le trajectographe pointant vers ce super-agrégat, ainsi que par une impulsion étant en bon accord avec l'énergie mesurée dans le calorimètre.

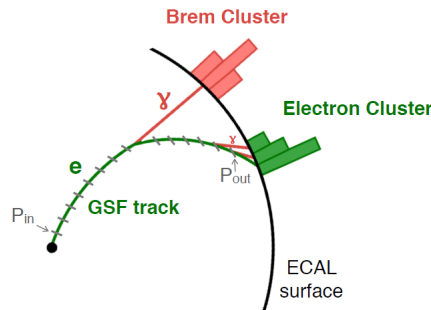


FIGURE 2.8 – Effet Bremsstrahlung des électrons lors de leur traversée dans le trajectographe

2.3 Traitement des données

Le traitement et stockage des données issues des collisions constituent un véritable défi pour le CERN compte tenu de leur nombre très important [10]. Pour cela, le LHC s'est doté d'une *grille*, un centre de calcul réparti dans le monde entier. Au niveau matériel, la grille est composée de plusieurs dizaines de milliers d'ordinateurs, de plusieurs dizaines de pétaoctets de stockage disque, répartis dans plus d'une centaine de centres de calcul.

La grille est hiérarchisée en différents niveaux, nommés *Tiers*. Au niveau 0 (*Tier-0*), le centre de calcul du CERN récupère les données brutes produites par les détecteurs, les stocke et les redistribue au niveau 1. Ce dernier niveau est composé de 11 centres informatiques et est disponible 24h/24. Il se charge d'assurer la pérennité des données et d'effectuer une première analyse des résultats, avant de les transmettre aux niveaux 2 (le laboratoire en dispose d'ailleurs d'un) et 3 qui réalisent l'analyse physique à proprement parler.

Chapitre 3

Mesure de l'efficacité de déclenchement par lepton

3.1 Démarche adoptée

L'étude menée ici est faite au niveau HLT. L'objectif final est d'obtenir l'efficacité de déclenchement des événements $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$ avec le *trigger* di-électrons. Dans un premier temps, les efficacités de déclenchement par lepton vont être calculées, pour chacun des filtres composant le *trigger* di-électrons (les filtres sont en quelque sorte des étapes à franchir pour qu'un événement déclenche le *trigger*). Ce calcul va être effectué à l'aide de la méthode du Tag & Probe, qui est une technique d'analyse de données utilisée pour calculer les efficacités de déclenchement à partir des données elle-mêmes.

3.1.1 Echantillons utilisés pour l'étude

L'efficacité sera calculée sur les données issues du LHC en 2012, et sur les simulations d'événements Z réalisées à l'aide de la méthode de Monte-Carlo, afin de comparer ces deux situations.

Les données 2012 utilisées sont celles du Ihep dataset (analysées pour la conférence ICHEP 2012 à Melbourne en juillet 2012), 2012A et 2012B. La luminosité¹ totale et certifiée de ces échantillons est de 5.25 fb^{-1} avec une énergie de 8 TeV.

Les simulations Monte-Carlo utilisées sont :

- *DYJetsToLL_M-50_TuneZ2Star_8TeV-madgraph-tarball/Summer12-PU_S7_START52_V9-v2* pour la simulation d'événements Z, à 8 TeV
- *GluGluToHToZZTo4L_M-*_8TeV-powheg-pythia6/Summer12-PU_S7_START52_V9-v1* pour la simulation de signal Higgs à différentes masses, à 8 TeV

3.1.2 La méthode du Tag & Probe

La méthode du Tag & Probe a pour objectif de sélectionner parmi un lot de candidats électrons les *vrais* électrons, au sein d'un événement [17], afin de les utiliser pour les mesures d'efficacité en particulier.

Pour cela, il faut dans un premier temps sélectionner les événements comportant un boson Z se désintégrant en 2 leptons. Puis, parmi les deux leptons du Z, on sélectionne un *tag*, qui est un lepton ayant subi des coupures très strictes (plus strictes que celles dont on souhaite calculer l'efficacité) et qui permet ainsi de réduire le bruit de fond. A partir de ce *tag* et de la résonance de masse du boson Z (située à 91.1876 GeV), on sélectionne les *probes*, qui doivent passer des coupures très relâchées, afin d'être les plus libres possible

1. La luminosité intégrée représente le nombre d'événements par unité de section efficace sur une durée donnée.

de toutes contraintes et ainsi être les moins biaisés possible. C'est à partir de ces *probes* que va être calculée l'efficacité des différents filtres du *trigger* di-électrons.

Ainsi, dans notre étude, nous calculons au sein d'un événement la masse invariante des paires de leptons de charges opposées, et sélectionnons les paires ayant une masse se situant dans la fenêtre [60 - 120] GeV (résonance de masse du Z, voir figure 3.1). Nous nous assurons ensuite qu'un des deux leptons passe les coupures très strictes pour être identifié comme étant le *tag*. Le second électron est alors défini comme étant le *probe*. Les *passing probe* sont les probes ayant passé les coupures que l'on souhaite tester (ie les filtres du *trigger* di-électrons dans notre étude). L'efficacité se calcule alors comme étant le rapport du nombre de *passing probes* sur le nombre total de *probes*.

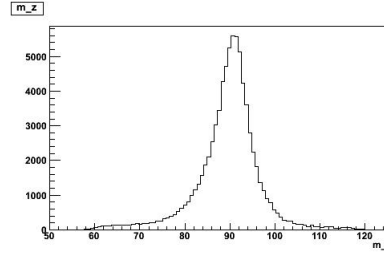


FIGURE 3.1 – Résonance de la masse du Z, obtenue par les données 2012

La figure 3.2 résume cette méthode : nous marquons l'événement sur un électron (*le tag*) passant des coupures strictes et nous testons les coupures souhaitées (ici, le passage des électrons dans un des filtres du *trigger* di-électrons) sur l'électron qui lui est associé (*le probe*) par l'intermédiaire de la résonance de masse du Z.

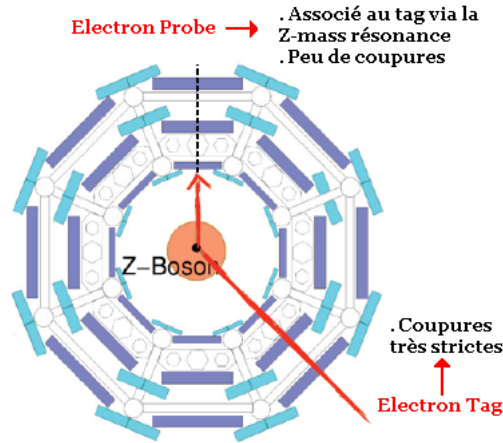


FIGURE 3.2 – Méthode du Tag & Probe

3.1.3 Triggers et filtres

Trigger di-électrons

Le *trigger* dont nous souhaitons évaluer l'efficacité dans cette étude est le suivant :

HLT_Ele17_CaloIdT_CaloIsoVL_TrkIdVL_TrkIsoVL_Ele8_CaloIdT_CaloIsoVL_TrkIdVL_TrkIsoVL

Ce *trigger* se base sur les événements ayant déclenché au *L1 Trigger* le *L1 seeding* DoubleEG_13_7. Il sélectionne les événements ayant au moins deux électrons d'énergie transverse (E_T) supérieure respectivement à 17 GeV et 8 GeV vérifiant les coupures *Tight* pour l'identification au niveau du calorimètre (CaloId) et les coupures *Very Loose* pour l'isolation au niveau du calorimètre (CaloIso) et l'isolation au niveau du trajectographe (TrkIso) et pour l'identification au niveau du trajectographe (TrkId). Les coupures pour l'électron sont définies dans le tableau 3.1, une explication de ces coupures est réalisée dans la section 3.1.4 de cette partie.

Ce *trigger* est composé de trois filtres, qui sont les suivants :

- hltEle17TightIdLooseIsoEle8TightIdLooseIsoTrackIsoFilter, appelé par la suite *Ele17*
- hltEle17TightIdLooseIsoEle8TightIdLooseIsoTrackIsoDoubleFilter, appelé par la suite *Ele17Ele8*
- hltEle17TightIdLooseIsoEle8TightIdLooseIsoTrackIsoDZ, appelé par la suite *Ele17Ele8dZ*. Ce filtre constitue la dernière étape à franchir pour déclencher le trigger.

Pour qu'un événement passe le *trigger* di-électrons, les trois filtres doivent être franchis. Le premier filtre est validé lors du passage d'un électron d'énergie transverse (E_T) supérieure à 17 GeV, le deuxième lorsqu'il y a au moins deux électrons, dont l'un a une énergie transverse E_T supérieure à 17 GeV et l'autre supérieure à 8 GeV. Le troisième filtre ajoute une condition de couplage dZ entre l'électron passant la coupure de 17 GeV et celui passant la coupure de 8 GeV. La coupure dZ représente la différence entre la coordonnée selon l'axe z du vertex du premier électron et celle du second : cette coupure permet de s'assurer que les deux électrons proviennent du même vertex.

Dans la première partie de notre étude, nous souhaitons calculer l'efficacité de passage d'un électron dans les filtres du *trigger* di-électrons, ce qui signifie que les passing probes seront les probes passant ces filtres.

Nous disposons pour chaque filtre (dans chaque événement) d'une liste d'objets ayant passé ces filtres. Pour savoir si un électron reconstruit a passé ce filtre, il faut donc savoir s'il est associé à un des objets ayant passé le filtre. Pour cela, nous utiliserons la variable d'association : $\Delta R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2}$, caractérisant la distance entre l'électron reconstruit et l'électron ayant déclenché le filtre. Pour déclarer qu'un probe est associé à un objet ayant déclenché le filtre, il devra vérifier $\Delta R < 0.1$.

Trigger du Tag & Probe

Le *trigger* utilisé pour le Tag & Probe est le suivant :

HLT_Ele20_CaloIdVT_CaloIsoVT_TrkIdT_TrkIsoVT_SC4_Mass50

Ce *trigger* sélectionne les événements ayant au moins un électron d'énergie transverse (E_T) supérieure à 20 GeV vérifiant les coupures *Very Tight* pour l'identification au niveau du calorimètre (CaloId), l'isolation au niveau du calorimètre (CaloIso) et l'isolation au niveau du trajectographe (TrkIso) et les coupures *Tight* pour l'identification au niveau du trajectographe (TrkId) et ayant un supercluster (super-agrégat d'énergie dans les cristaux du ECAL) d'énergie transverse supérieure à 4 GeV. Les coupures pour l'électron sont définies dans le tableau 3.1, une explication de ces coupures est réalisée dans la section 3.1.4 de cette partie. Il est composé des deux filtres suivants :

- hltEle20CaloIdVTCaloIsoVTTrkIdTTrkIsoVTSC4TrackIsoFilter
- hltEle20CaloIdVTCaloIsoVTTrkIdTTrkIsoVTSC4PMMassFilter

Pour que le trigger se déclenche dans un événement, il faut que les deux filtres soient validés : le premier filtre correspond au passage d'un électron d'énergie transverse (E_T) supérieure à 20 GeV vérifiant les coupures, le deuxième à la présence de l'électron à 20 GeV et d'un supercluster de 4 GeV.

WP	CaloId EB (EE)	CaloIso EB (EE)	TrkId EB (EE)	TrkIso (EE)
VeryLoose (VL)	H/E<0.15(0.10) σ <0.024 (0.040)	ecalIso/et<0.2 (0.2) hcalIso/et<0.2 (0.2)	d η <0.01 d ϕ <0.15 (0.10)	trkiso/et<0.2 (0.2)
Tight (T)	H/E<0.10 (0.075) σ <0.011 (0.031)	ecalIso/et<0.125 (0.075) hcalIso/et<0.125 (0.075)	d η <0.008 (0.008) d ϕ <0.07 (0.05)	trkiso/et<0.125 (0.075)
Very Tight (VT)	H/E<0.05 (0.05) σ <0.011 (0.031)	ecalIso/et<0.05 (0.05) hcalIso/et<0.05 (0.05)	$\emptyset$	trkiso/et<0.05 (0.05)

TABLE 3.1 – Coupures du trigger [18]

WP	Barrel	Endcap
d η	0.007	0.009
d ϕ	0.15	0.10
$\sigma_{i\eta i\eta}$	0.01	0.03
H/E	0.12	0.10
ecalIso/pT	0.2	0.2
hcalIso/pT	0.2	0.2
trackIso/pT	0.2	0.2

 TABLE 3.2 – Coupures *Tight Trigger Working Point 2012* appliquées au *tag* et au *probe* (dans un premier temps) [18]

3.1.4 Coupures appliquées

Coupures de trigger

H/E représente le rapport entre l'énergie de l'électron dans le calorimètre hadronique et celle du super-cluster dans le ECAL. Dans l'idéal, H doit être nul : l'électron ne va pas jusqu'au HCAL. Cependant, la plupart du temps, une petite partie de son énergie y est retrouvée. Il est donc nécessaire que cette fraction soit la plus petite possible.

ecalIso/et, **hcalIso/et** et **trkIso/et** sont des variables permettant de caractériser l'isolation de l'électron, normalisée par l'énergie transverse de l'électron, respectivement dans le ECAL, le HCAL, et le trajectographe. Un cône est réalisé autour de l'électron et l'énergie contenue dans ce cône est déterminée. La coupure ecalIso/et < 0.2 signifie ainsi qu'il ne doit pas y avoir plus de 20% de l'énergie de l'électron (E_T) dans ses alentours (ie dans le cône d'isolation). Ceci permet de s'assurer que l'énergie du supercluster provient bien d'un unique électron, et non d'un jet de hadrons.

d η et **d ϕ** sont des variables d'identification caractérisant la différence entre la direction de la trace au vertex et celle au supercluster dans le ECAL, respectivement en η et ϕ .

$\sigma_{i\eta i\eta}$ est une variable caractérisant la forme et l'étalement du dépôt d'énergie dans le supercluster en η .

Coupures sur le *tag*, le *probe* et la paire formée

L'électron reconstruit *tag* doit passer les coupures *Tight Trigger Working Point 2012* (ces coupures étant plus strictes que celles du *trigger*), définies dans le tableau 3.2. Il doit de plus avoir une impulsion transverse supérieure à 20 GeV et être associé à un objet ayant passé le premier filtre du *trigger* di-électrons (dR<0.1).

Dans un premier temps, le *probe* devra vérifier les coupures *Tight Trigger Working Point 2012*, comme cela est le cas pour le *tag*.

Finalement, le *tag* et le *probe* doivent être de signes opposés (un électron et un positon) et avoir une masse invariante proche de la résonance de masse du Z, c'est-à-dire comprise entre 60 et 120 GeV.

Remarque : Il n'est pas possible de mesurer directement l'efficacité de passage des électrons pour la coupure à 8 GeV. En effet, pour être validé, le second filtre du *trigger* di-électrons doit détecter deux électrons : un de 17 GeV et un second de 8 GeV. Nous pouvons faire cependant l'hypothèse que tous les électrons passant la coupure 17 GeV passent aussi celle à 8 GeV. L'efficacité de passage à 8 GeV correspond alors à ce filtre.

3.2 Efficacité des filtres du *trigger* di-électrons

Les courbes d'efficacité en fonction de l'impulsion transverse des électrons (p_T) obtenues lors de cette étude sont ajustées (*fitting*) à l'aide du package RooFit du logiciel Root, qui permet de modéliser des distributions attendues d'événements. Elles seront modélisées à l'aide de la fonction Crystal Ball intégrée, qui est une fonction typiquement utilisée pour les courbes d'efficacité de *trigger*. Les électrons *probes*, dans cette partie, sont des électrons reconstruits ayant passé les coupures *Tight Trigger Working Point 2012* (nommées *Working Point* par la suite).

3.2.1 Efficacité du filtre Ele17

La figure 3.3 représente l'efficacité du premier filtre Ele17 du *trigger* di-électrons en fonction de l'impulsion transverse p_T de l'électron, calculée pour les données 2012A et 2012B et la simulation Monte-Carlo. L'électron *probe* doit être dans la liste des objets ayant déclenché le filtre Ele17 et dans ceux ayant déclenché le filtre Ele17Ele8dZ. L'efficacité est définie ainsi :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre de probes passant le filtre Ele17 et le filtre Ele17Ele8dZ}}{\text{Nombre total de probes}}$$

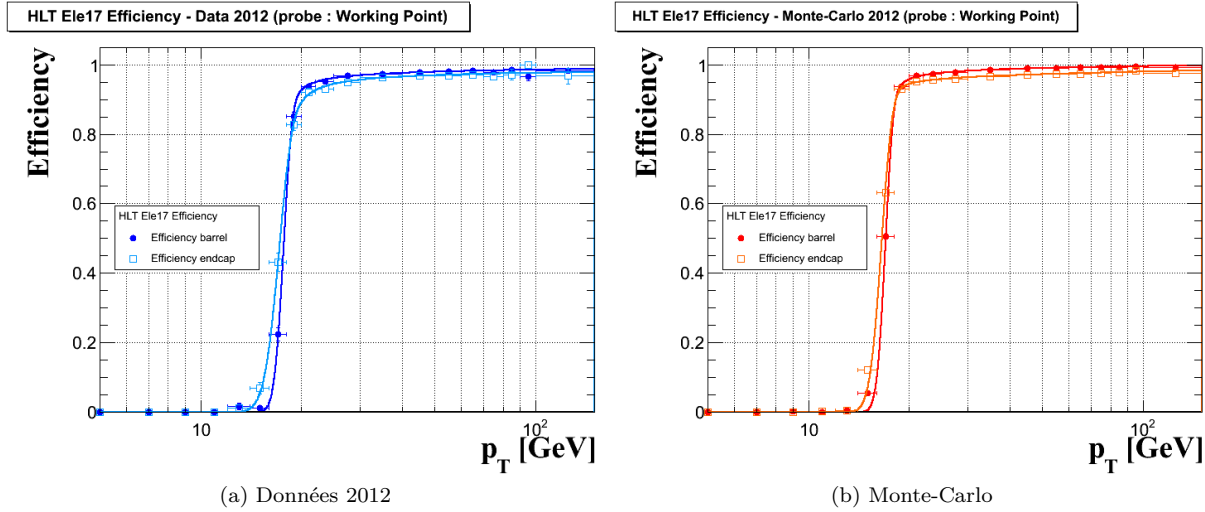


FIGURE 3.3 – Efficacité de déclenchement du filtre Ele17, calculée à partir des données 2012 (a) et de la simulation Monte-Carlo (b), dans le tonneau (*barrel* - couleur foncée) et les deux bouchons (*endcaps* - couleur claire) en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

Cette première courbe d'efficacité permet de donner la forme des courbes qui seront obtenues dans cette étude. Elle s'approche d'un échelon d'Heavyside, comme on pouvait s'y attendre, mais la pente n'est pas infinie : en effet, l'énergie des électrons *online* et *offline* n'est pas complètement la même, ce qui fait que

des électrons ayant un p_T inférieur à 17 GeV peuvent franchir ce filtre (et de même, des électrons ayant un p_T supérieur à 17 GeV peuvent ne pas le franchir).

L'efficacité à 50% est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 17.8 GeV et 17.3 GeV pour les données et 17.0 GeV et 16.6 GeV pour le Monte-Carlo. L'efficacité à 95% quant à elle est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 22.1 GeV et 27 GeV pour les données et 19.4 GeV et 21.4 GeV pour le Monte-Carlo. Ces efficacités sont satisfaisantes au regard du seuil du filtre à 17 GeV, cependant l'efficacité du filtre Ele17 est légèrement plus faible dans les bouchons que dans le tonneau au plateau, en effet le *turn-on* (ou montée de la courbe d'efficacité) des bouchons est plus lent que celui du tonneau : il faut un accroissement de 2.6 GeV (données) et de 1.9 GeV (Monte-Carlo) pour passer de 20% à 80% d'efficacité dans les bouchons, alors que dans le tonneau, cet accroissement est de 1.6 GeV (données) et 1.4 GeV (Monte-Carlo). Finalement, les efficacités des données sont cohérentes avec celles Monte-Carlo.

3.2.2 Efficacité du filtre Ele17Ele8

La figure 3.4 représente l'efficacité du second filtre Ele17Ele8 du *trigger* di-électrons (déclenché lorsqu'il y a un lepton d'énergie transverse supérieure à 17 GeV et un second d'énergie transverse supérieure à 8 GeV), calculée pour les données 2012A et 2012B et la simulation Monte-Carlo. L'efficacité est définie ainsi :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre de probes passant le filtre Ele17Ele8}}{\text{Nombre total de probes}}$$

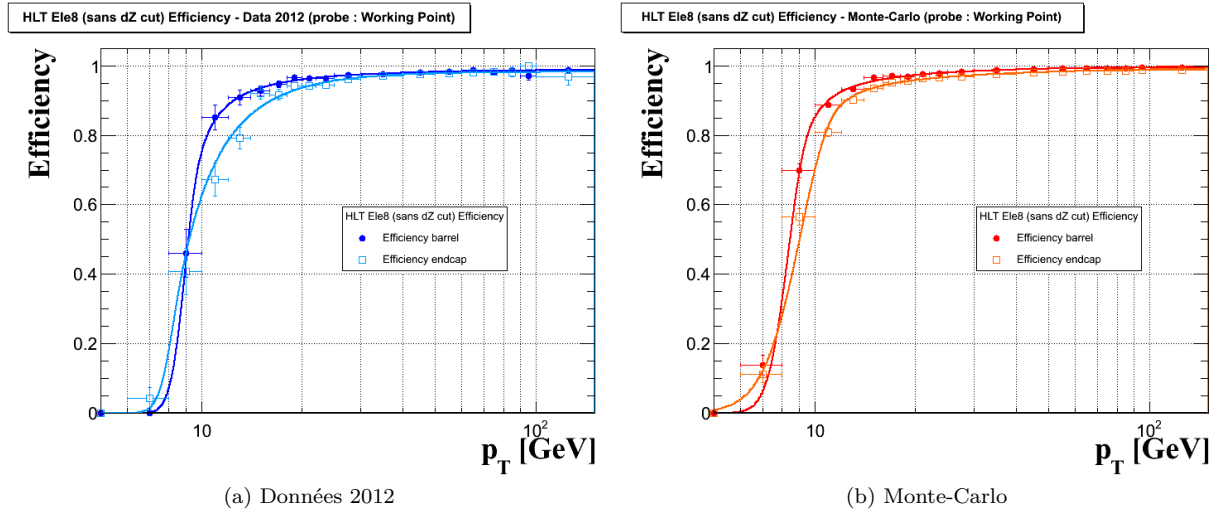


FIGURE 3.4 – Efficacité de déclenchement du filtre Ele17Ele8 (sans la coupure dZ), calculée à partir des données 2012 (a) et de la simulation Monte-Carlo (b), dans le tonneau (*barrel* - couleur foncé) et les deux bouchons (*endcaps* - couleur claire) en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

L'efficacité à 50% est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 9.1 GeV et 9.2 GeV pour les données et 8.4 GeV et 9.0 GeV pour le Monte-Carlo. L'efficacité à 95% quant à elle est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 17.4 GeV et 23.1 GeV pour les données et 14.3 GeV et 17.6 GeV pour le Monte-Carlo. De même que pour le filtre Ele17, le *turn-on* des bouchons est plus lent que celui du tonneau : il faut un accroissement de 2.0 GeV (données) et de 1.5 GeV (Monte-Carlo) pour passer de 20% à 80% d'efficacité dans le tonneau, alors que dans les bouchons, cet accroissement est de 4.3 GeV (données) et 2.7 GeV (Monte-Carlo). Les efficacités des données sont là aussi cohérentes avec celles Monte-Carlo.

3.2.3 Efficacité du filtre Ele17Ele8dZ

La figure 3.5 représente l'efficacité du troisième filtre Ele8Ele17dZ du *trigger* di-électrons (déclenché lorsqu'il y a deux leptons de E_T supérieur à 8 GeV et 17 GeV, avec la coupure dZ sur la paire), calculée pour les données 2012A et 2012B et la simulation Monte-Carlo. L'efficacité est définie ainsi :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre de probes passant le filtre Ele8Ele17dZ}}{\text{Nombre total de probes}}$$

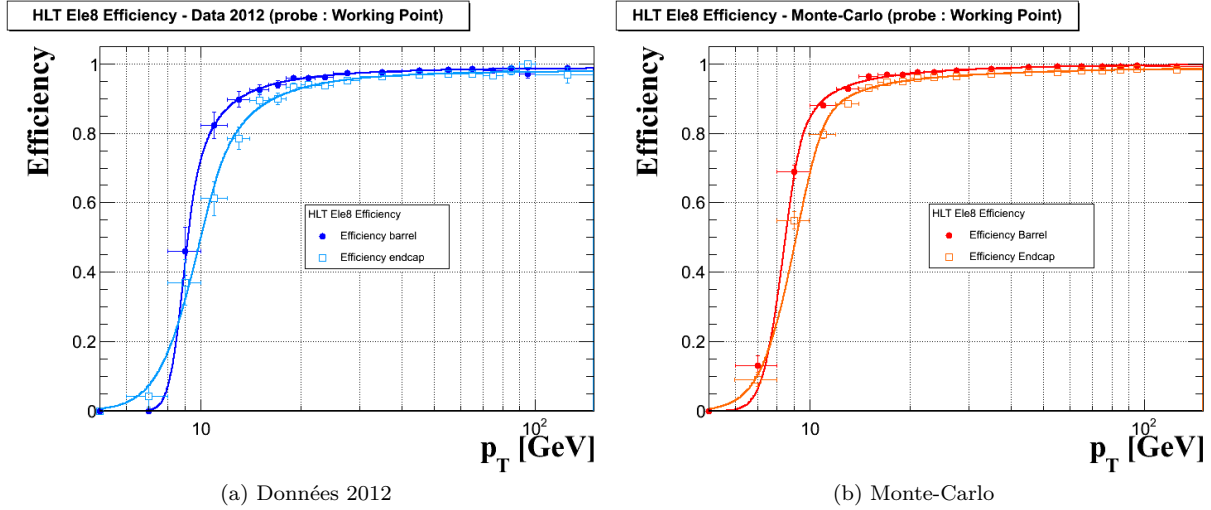


FIGURE 3.5 – Efficacité de déclenchement du filtre Ele8Ele17dZ, calculée à partir des données 2012 (a) et de la simulation Monte-Carlo (b), dans le tonneau (*barrel* - couleur foncée) et les deux bouchons (*endcaps* - couleur claire) en fonction de l'impulsion transverse des électrons probes

L'efficacité à 50% est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 9.2 GeV et 10.0 GeV pour les données et 8.5 GeV et 9.1 GeV pour le Monte-Carlo. L'efficacité à 95% quant à elle est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 18.4 GeV et 26.0 GeV pour les données et 14.7 GeV et 19.5 GeV pour le Monte-Carlo. Les plateaux sont donc atteints relativement tardivement (par rapport à ce qui a été observé avec le filtre Ele17). Les *turn-on* ne sont pas aussi pentues que ceux pour le filtre Ele17, en particulier dans les bouchons, où un accroissement de 4.6 GeV est nécessaire pour passer de 20% à 80% d'efficacité (pour les données).

3.2.4 Comparaison de l'efficacité des filtres Ele8Ele17 et Ele8Ele17dZ

Peu de différences sont observables entre les courbes d'efficacité du filtre Ele17Ele8 et Ele17Ele8dZ. La plus grande différence se situe pour les données, dans le endcap (figure 3.6), mais le fit ne suit pas totalement les données (carrés et points). La très légère perte d'efficacité du filtre Ele17Ele8dZ par rapport au filtre Ele17Ele8 est due à la coupure dZ qu'il y a entre les deux électrons de la paire. Le filtre Ele17Ele8dZ sera donc utilisé pour la suite de l'étude.

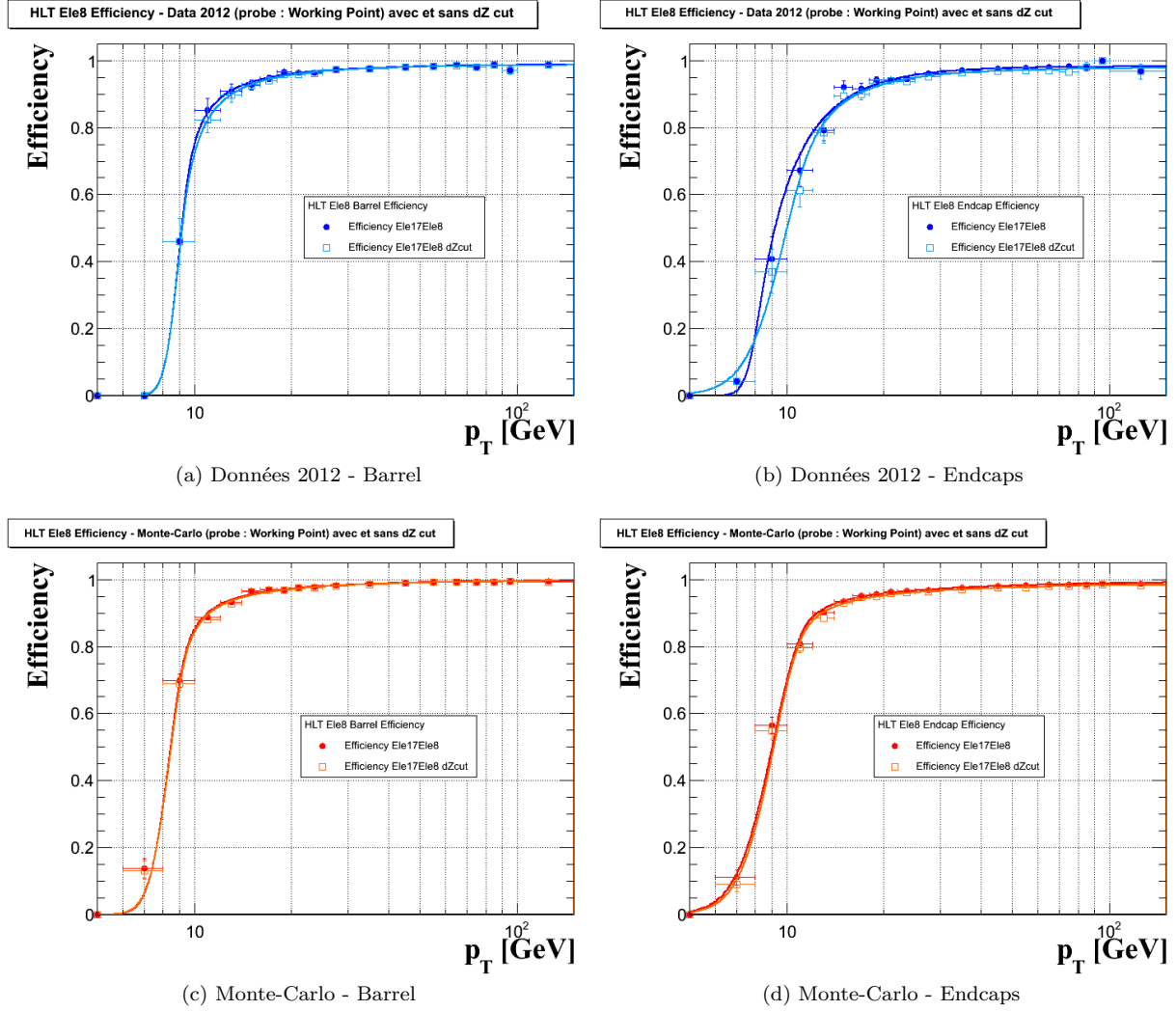


FIGURE 3.6 – Comparaison des efficacités de déclenchement des filtres Ele17Ele8 et Ele8Ele17dZ, calculées à partir des données 2012, dans le barrel (a) et les deux endcaps (b), et à partir des Monte-Carlo, dans le barrel (c) et les endcaps (d) en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

3.3 Analyse des résultats

3.3.1 Comparaison données et simulation Monte-Carlo

Cette comparaison est très importante dans la mesure où elle permet de vérifier que les données issues des collisions correspondent bien à ce qui est attendu (ce qui a été simulé). En effet, un certain nombre d'événements Higgs est attendu d'après les simulations effectuées. Les éventuelles différences obtenues ici permettent de déterminer le nombre d'événements attendus réellement des rapports d'efficacité données/Monte-Carlo auxquels sont associées les erreurs systématiques.

Les données et la simulation Monte-Carlo sont cohérentes. Un décalage peut cependant être observé dans les 4 cas de la figure 3.7 d'environ 1 GeV dans le *turn-on* (le lecteur remarquera l'échelle logarithmique : le

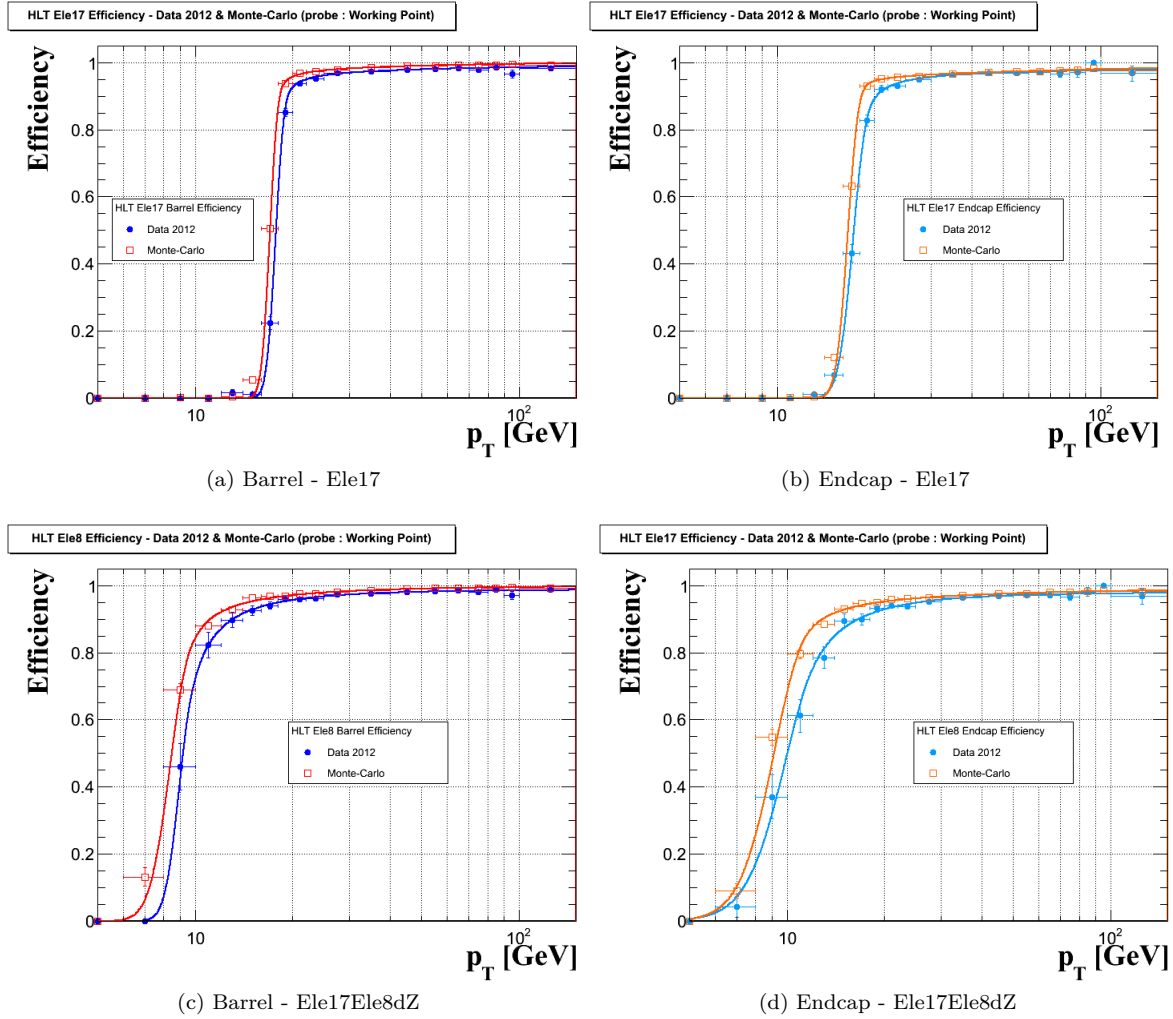


FIGURE 3.7 – Comparaison de l'efficacité du filtre Ele17 entre les données 2012 (courbe bleue / azure) et la simulation Monte-Carlo (courbe rouge / orange) dans le tonneau (*barrel*) (a) et les bouchons (*endcaps*) (b) et de l'efficacité du filtre Ele17Ele8dZ entre les données 2012 (courbe bleue / azure) et la simulation Monte-Carlo (courbe rouge / orange) dans le tonneau (*barrel*) (c) et les bouchons (*endcaps*) (d)

décalage n'est pas plus important pour le filtre Ele17 que pour le filtre Ele17Ele8dZ). L'efficacité au plateau est ainsi légèrement plus faible pour les données que pour Monte-Carlo (différence de 1% en moyenne).

3.3.2 Problème d'efficacité au niveau des données 2012A

La figure 3.8 représente la comparaison entre les données 2012A et 2012B dans le tonneau. Les données 2012A ont une efficacité légèrement plus faible que celles de 2012B, or, il n'y a *a priori* aucune raison pour que les données 2012A soient moins efficaces que les données 2012B. Il faut donc déterminer d'où vient cette différence.

La figure 3.9 montre l'efficacité du filtre Ele17 dans les différentes régions du détecteur ($i\eta$ et $i\phi$ étant des variables d'espace proportionnelles à η et ϕ). Elle met en avant la présence de deux zones peu efficaces, pour $i\phi \in [7; 8]$ et $i\eta \in [10; 13]$ et pour $i\phi \in [16; 17]$ et $i\eta \in [11; 13]$ pour les données 2012A, résultat qui ne

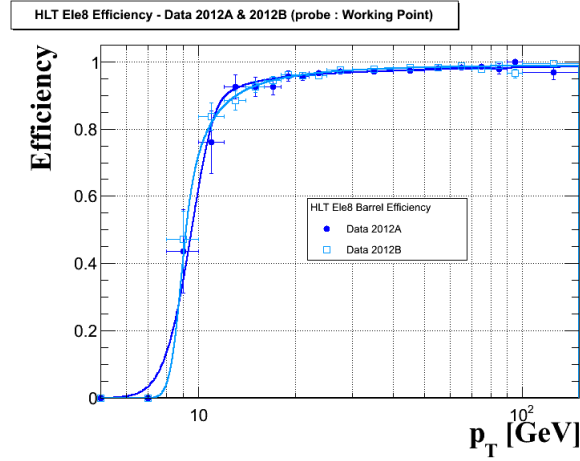


FIGURE 3.8 – Efficacité de déclenchement du filtre Ele8, calculée à partir des données 2012A et 2012B, dans le tonneau (*barrel*) en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

se retrouve pas pour les données 2012B.

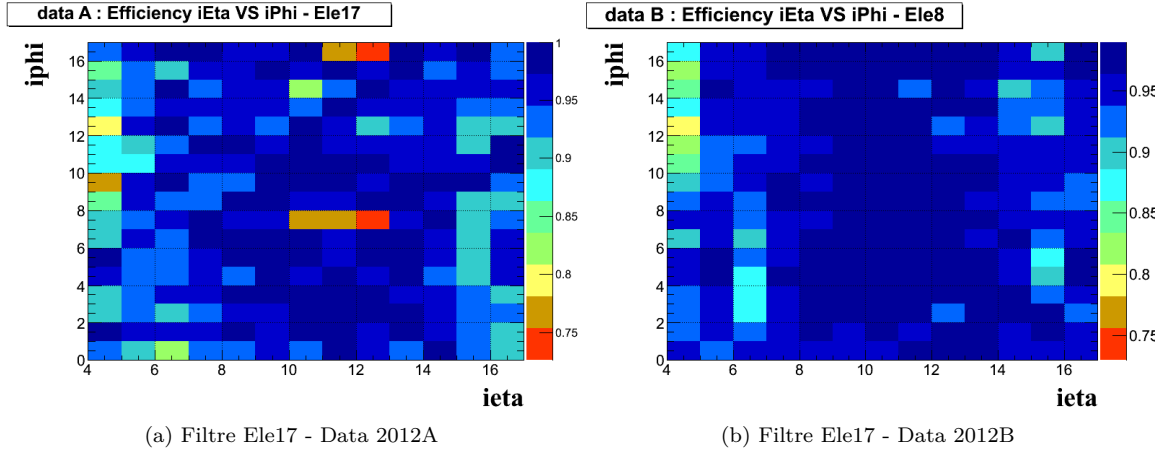


FIGURE 3.9 – Efficacité du filtre Ele17 du *trigger* di-électrons dans les différentes parties du détecteur ($i\eta$) en fonction de $i\phi$ pour les données 2012A et 2012B

Afin de savoir si ce problème provenait du niveau HLT ou était déjà présent lors de la sélection au *L1 Trigger*, une figure similaire a été tracée à ce dernier niveau. A l'aide de la table de conversion RCT (Regional Calorimeter Trigger), les zones de la figure 3.9 sont mises en correspondance avec les zones de la figure 3.10 : la perte d'efficacité correspond bien aux mêmes zones dans les deux figures. Ces zones correspondent à des supermodules précis. Il s'est finalement avéré que les tours *trigger* correspondant à ces zones ont été masquées lors de la période de prises de données 2012A suite à un problème.

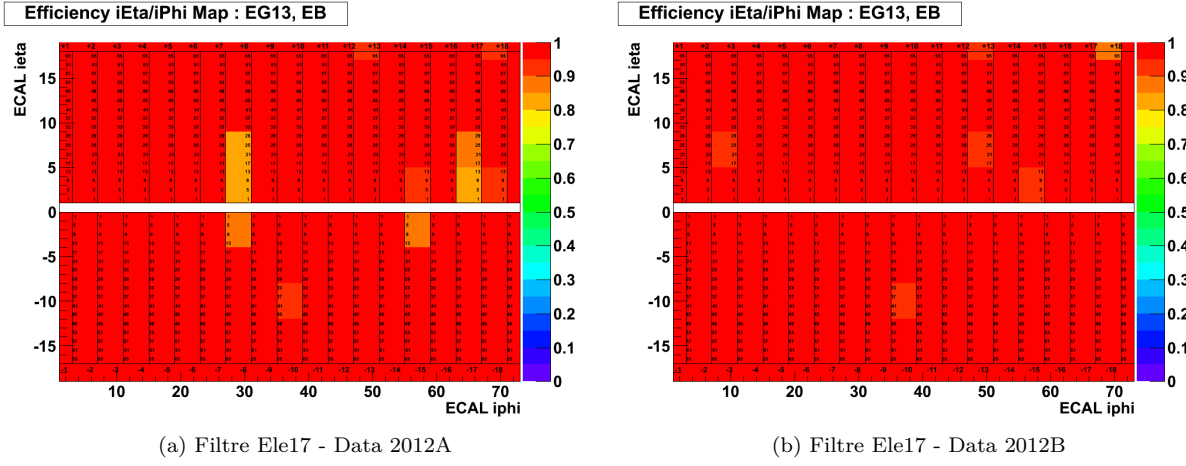


FIGURE 3.10 – Efficacité du seed utilisé au $L1$ -trigger pour le $trigger$ di-électrons du niveau HLT dans les différentes parties du détecteur ($i\eta$ en fonction de $i\phi$) pour les données 2012A et 2012B

Chapitre 4

Application des coupures d'analyse sur les probes

4.1 Les coupures d'analyse 2012

Dans cette partie, les coupures appliquées aux probes ne sont plus celles utilisées précédemment (*Trigger Working Point 2012*), mais celles utilisées dans l'analyse $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$ par le groupe CMS en 2012 [18]. Ces coupures sont légèrement moins strictes que les *Working Point*, elles sont résumées ci-dessous :

- Expected missing inner hits ≤ 1
- $|SIP| < 4$
- Isolation particle flow < 0.4
- BDT (Boosted Decision Tree) $>$ seuil (dépendant du p_T et de la variable d'espace η de l'électron)
- $|\eta| < 2.5$
- $p_T > 7 \text{ GeV}$

Expected missing inner hits

Cette variable correspond au nombre de hits manquants dans la trajectoire de l'électron qui sont attendus dans le trajectographe.

Le Significance Impact Parameter (SIP)

Le Significance Impact Parameter (SIP), défini comme étant le rapport de l'Impact Parameter sur son erreur, permet de déterminer les électrons qui ne viennent pas du vertex primaire et donc qui ne sont pas issus de la désintégration Z ou $Z^* \rightarrow ee$. Appliquer une coupure sur cette variable permet notamment de se débarrasser des électrons issus du bruit de fond, qui ne proviennent pas du Z , dont la désintégration se passe à un vertex secondaire (les électrons qui nous intéressent sont ceux provenant de la désintégration $Z \rightarrow ee$ qui est instantannée).

Isolation Particle-Flow

L'Isolation Particule-Flow (PF-Iso) est une isolation basée sur un cône $dR < 0.4$ autour du lepton et calculant l'impulsion totale de toutes les particules contenues dans ce cône. Ces particules sont identifiées auparavant à l'aide des divers informations provenant du trajectographe, de l'ECAL et de l'HCAL. Elle permet de sélectionner les électrons de signal, isolés, de ceux dans les jets par exemple, qui sont non isolés.

Le BDT

Le Boosted Decision Tree est une coupure d'identification. Le principe est de regrouper plusieurs variables en une seule : le BDT prend en compte plusieurs variables provenant des différentes parties du CMS (HCAL, ECAL, tracker) et permet également de partager les leptons en différentes catégories. Le BDT est utilisé dans les coupures d'analyse 2012 pour l'identification des électrons. Le BDT d'un électron doit être supérieur à un seuil, dépendant de son impulsion transverse et de la variable d'espace η .

4.2 Efficacité des filtres du trigger di-électrons

4.2.1 Efficacité du filtre Ele17

La figure 4.1 représente l'efficacité du premier filtre Ele17 du *trigger* di-électrons, calculée pour les données 2012A, 2012B et la simulation Monte-Carlo. Les électrons *probes* sont des électrons reconstruits ayant passé les coupures d'analyse définies ci-dessus. L'efficacité est calculée ainsi :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre de probes passant le filtre Ele17 et le filtre Ele17Ele8dZ}}{\text{Nombre total de probes}}$$

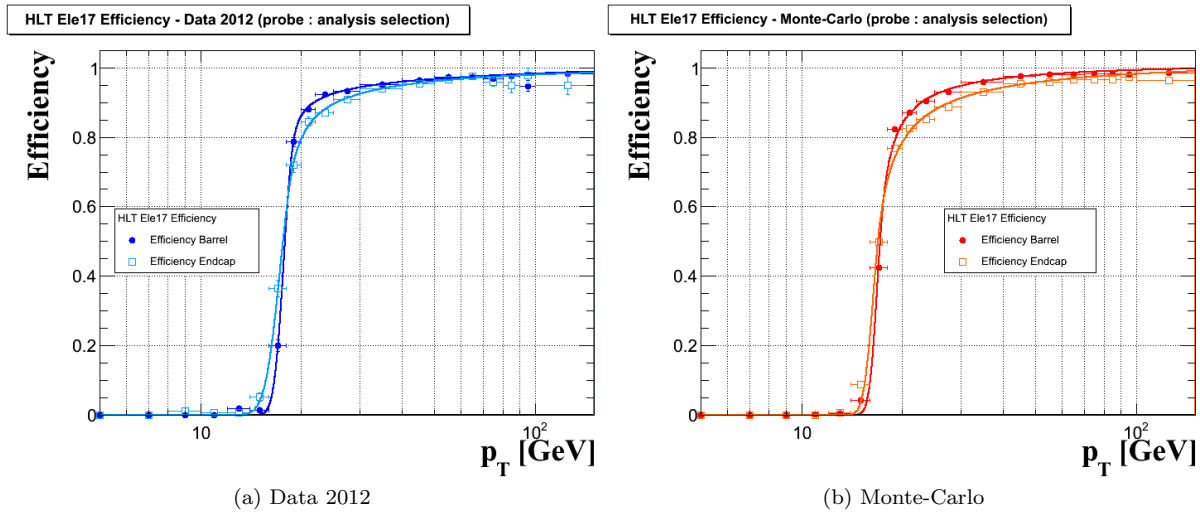


FIGURE 4.1 – Efficacité de déclenchement du filtre Ele17, calculée à partir des données 2012 (a) et de la simulation Monte-Carlo (b), dans le tonneau (couleur foncée) et les deux bouchons (couleur claire) en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

L'efficacité à 50% est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 17.9 GeV et 17.7 GeV pour les données et 17.2 GeV et 16.9 GeV pour le Monte-Carlo. L'efficacité à 95% quant à elle est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 33.5 GeV et 40.9 GeV pour les données et 30.8 GeV et 44.6 GeV pour le Monte-Carlo. Les *turn-on* sont un peu moins pentus que cela n'était le cas avec les coupures *Working Point* : par exemple, un accroissement de 3.8 GeV est nécessaire pour passer de 20% à 80% d'efficacité pour les données dans les bouchons.

4.2.2 Efficacité du filtre Ele17Ele8dZ

La figure 4.2 représente l'efficacité du troisième filtre Ele8Ele17dZ du *trigger* di-électrons (pour rappel : deux électrons de E_T supérieur à 8 GeV et 17 GeV, avec la condition de coupure dZ sur la paire), calculée pour

les données 2012A, 2012B et la simulation Monte-Carlo. Les électrons *probes* sont des électrons reconstruits ayant passé les coupures d'analyse. L'efficacité est définie ainsi :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre de probes passant le filtre Ele8Ele17dZ}}{\text{Nombre total de probes}}$$

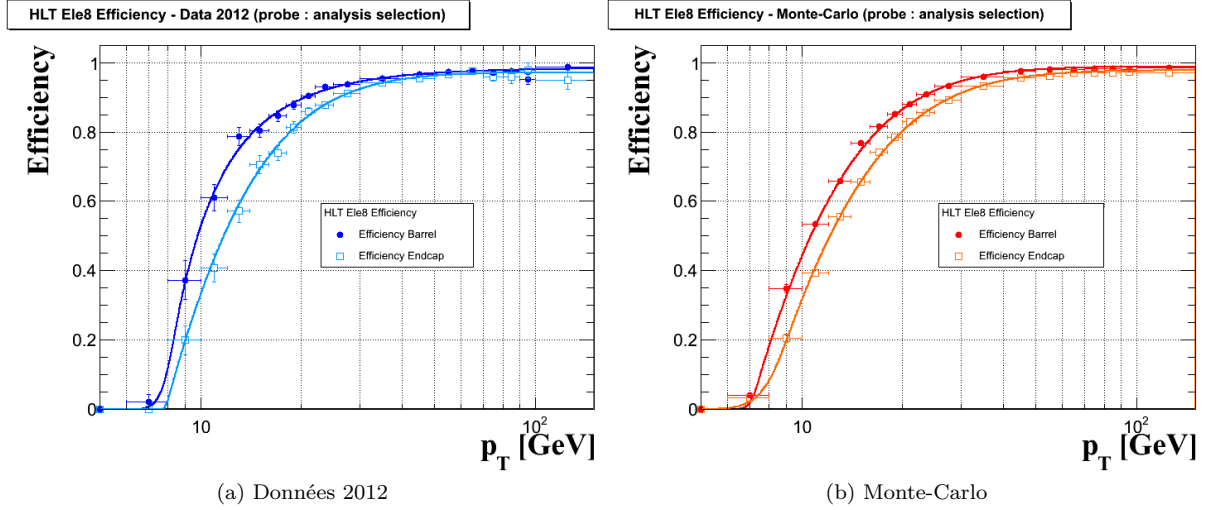


FIGURE 4.2 – Efficacité de déclenchement du filtre Ele8, calculée à partir des données 2012 (a) et de la simulation Monte-Carlo (b), dans le tonneau (couleur foncée) et les deux bouchons (couleur claire) en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

L'efficacité à 50% est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 9.8 GeV et 11.8 GeV pour les données et 10.7 GeV et 12.2 GeV pour le Monte-Carlo. L'efficacité à 95% quant à elle est atteinte respectivement dans le tonneau et les bouchons à 32.5 GeV et 39.4 GeV pour les données et 31.2 GeV et 41.3 GeV pour le Monte-Carlo. Les *turn-on* sont très peu pentus : par exemple, un accroissement de 9.55 GeV est nécessaire pour passer de 20% à 80% d'efficacité pour les données dans les bouchons. Cela constitue une différence notable par rapport aux courbes d'efficacité obtenues avec les *probes* passant les *Trigger Working Point* pour le filtre Ele17Ele8dZ.

4.3 Analyse des résultats

4.3.1 Comparaison des efficacités avec les *probes* passant les *Working Point* et les *probes* passant les coupures d'analyse

La figure 4.3 présente la comparaison entre les efficacités issues des *probes* passant les *Working Point* et ceux passant les coupures d'analyse, dans le tonneau.

Il y a une diminution nette, pour les données, de l'efficacité des trigger Ele17 et Ele8Ele17dZ, en particulier dans le *turn-on* et pour le filtre Ele8Ele17dZ, lorsque les *probes* passent les coupures d'analyse au lieu des coupures *Working Point*. Un résultat similaire est mis en avant avec les courbes d'efficacité tracées dans les bouchons. Ce résultat se retrouve sur les courbes d'efficacité générées avec la simulation Monte-Carlo : il s'agit donc d'un résultat attendu. Cela peut s'expliquer par le fait que les coupures d'analyse sont moins strictes que les coupures *Working Point*, mais il faut cependant s'assurer que ce n'est pas un effet de bruit de fond. Pour cela, nous avons retracé ces courbes en ne prenant en compte cette fois-ci dans la boucle

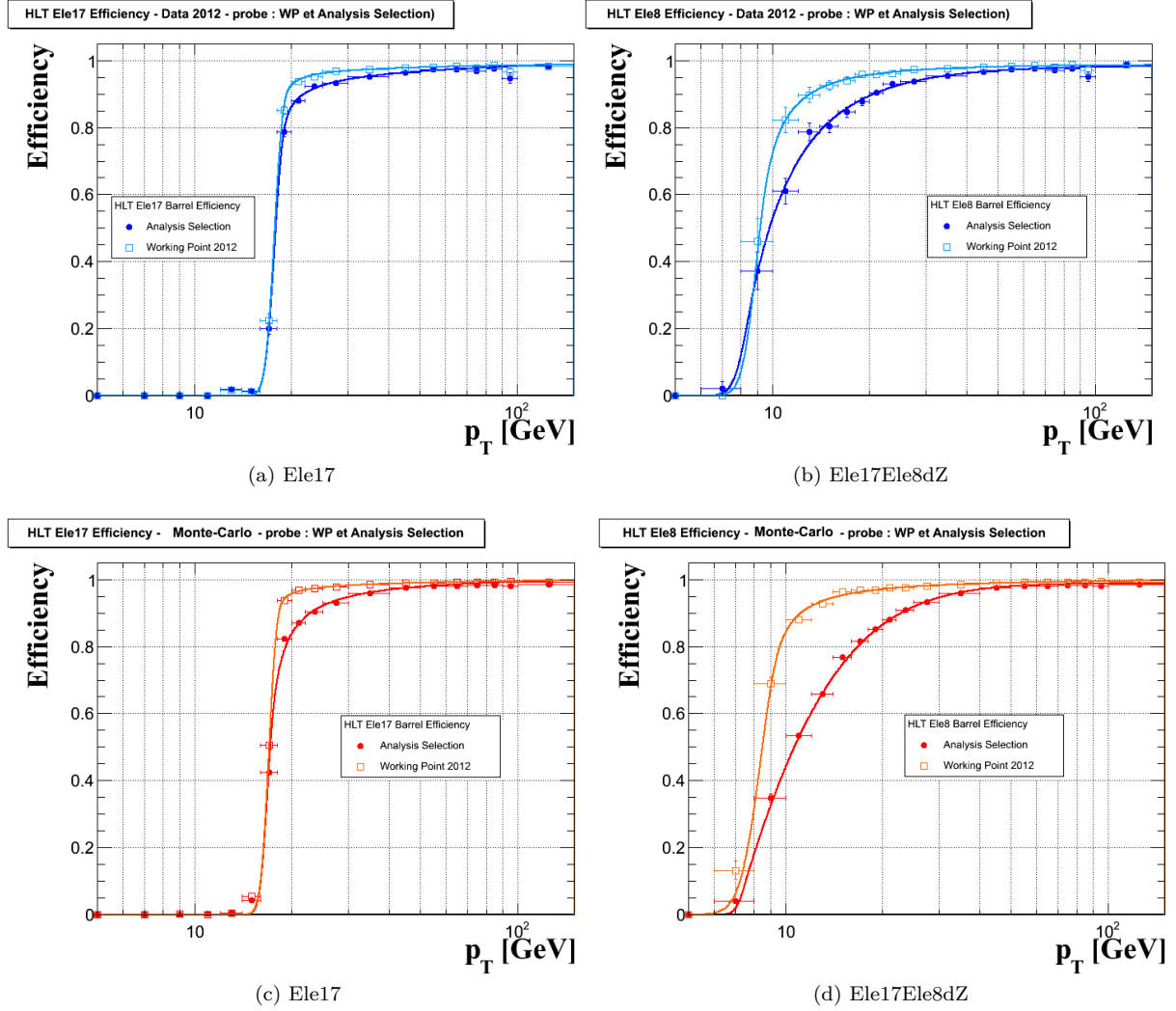


FIGURE 4.3 – Comparaison de l’efficacité de déclenchement, pour les données 2012, des filtres Ele17 (a) et Ele8Ele17dZ (b) dans le tonneau et pour la simulation Monte-Carlo (c et d) en fonction de l’impulsion transverse des électrons *probes*, avec en bleu foncé et rouge les courbes obtenues par les coupures d’analyse et en bleu clair et orange les courbes obtenues avec les *Trigger Working Point*

principale du code que les électrons reconstruits correspondant à des électrons générés (pour cela, le cône d’isolation est utilisé avec pour condition $dR < 0.1$), en Monte-Carlo. En ne prenant en compte que les électrons générés, nous nous assurons d’avoir très peu de *background* (de *faux* électrons).

Les courbes d’efficacité obtenues sur la figure 4.4 sont exactement les mêmes : la perte d’efficacité lors du passage des coupures *Working Point* aux coupures d’analyse pour les *probes* n’est pas un effet de bruit de fond.

4.3.2 Comparaison données et simulation Monte-Carlo

Comme le montre la figure 4.5, données et simulation sont en total accord et peu de différences sont observables au niveau du tracé des courbes d’efficacité.

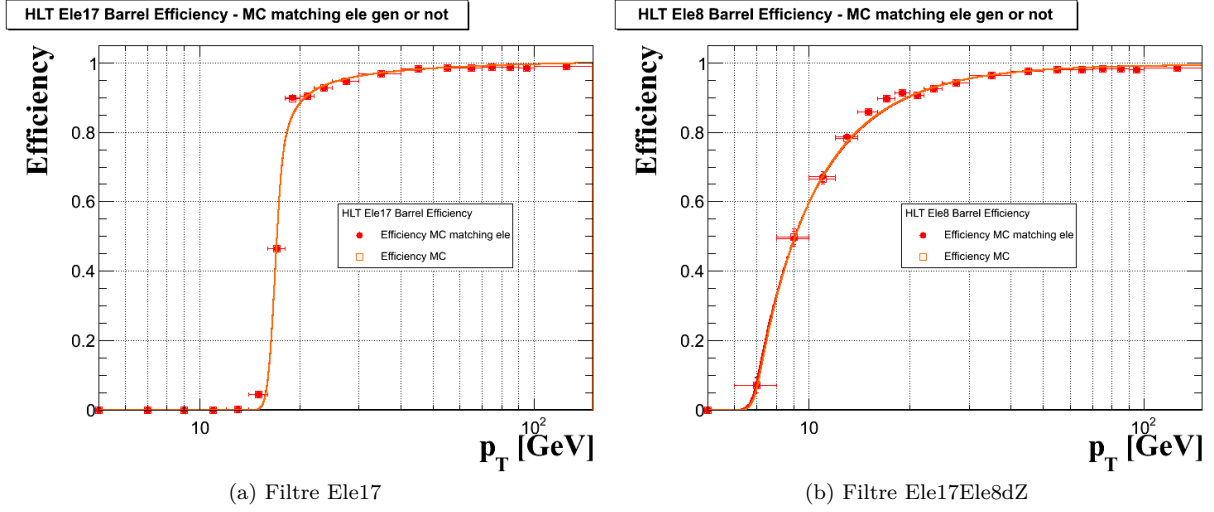


FIGURE 4.4 – Efficacité de déclenchement des filtres Ele17 (a) et Ele17Ele8dZ (b), calculée à partir de la simulation Monte-Carlo dans le tonneau en fonction de l'impulsion transverse des électrons probes, pour des électrons reconstruits correspondant à des électrons générés (rouge) ou non (orange)

Pour l'efficacité du filtre Ele17, l'allure des courbes est similaire dans le tonneau et les bouchons : au niveau de la pente du *turn-on*, la simulation est légèrement en avance par rapport aux données, mais les données deviennent plus efficaces dans le virage avant le plateau, avant d'être de nouveau dépassées par la simulation. Nous observons quelques différences d'efficacité au niveau du plateau : à 100 GeV, l'efficacité est respectivement dans le tonneau et les bouchons de 98.2% et 97.9% pour les données et 97.9% et 98.1% pour la simulation Monte-Carlo. La différence d'efficacité entre données et simulations est donc inférieure à 0.3% au plateau et à peu près de 0.5% dans le *turn-on*.

En ce qui concerne le filtre Ele17Ele8dZ, les données sont plus efficaces dans le *turn-on* que la simulation, mais sont de nouveau dépassées au niveau du plateau. Les efficacités au plateau obtenues sont plus faibles que pour le filtre Ele17 : 98.0% et 97.1% pour le tonneau et les bouchons, pour les données et 98.8% et 97.6% pour la simulation Monte-Carlo. Ainsi, il y a une différence de quasiment 1 GeV au plateau pour le tonneau et 0.5 GeV pour les bouchons. Au niveau du *turn-on*, la différence données/simulations est plus importante pour le tonneau (1 à 2 GeV) que pour les bouchons (moins de 1 GeV).

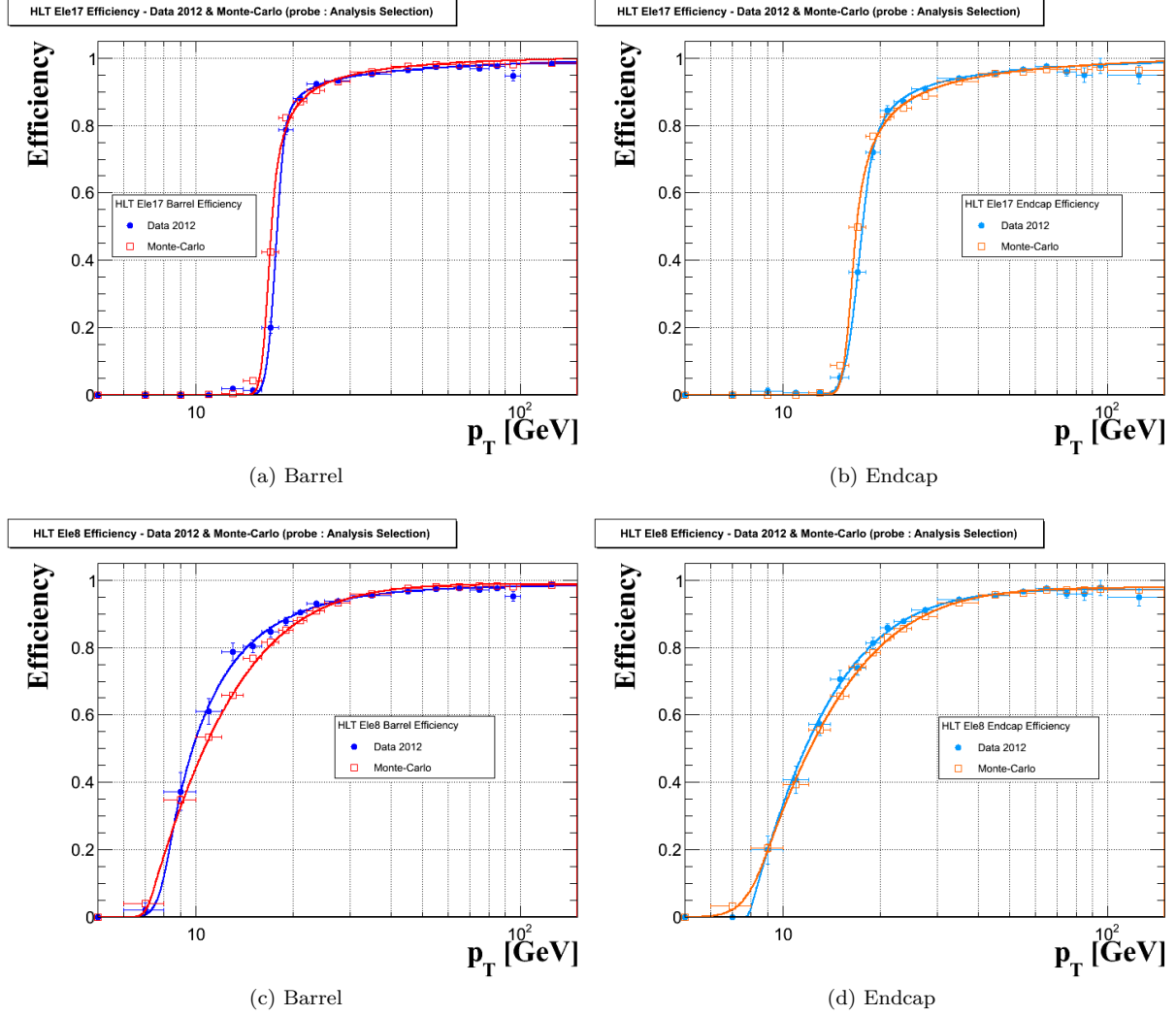


FIGURE 4.5 – Comparaison de l'efficacité de déclenchement du filtre Ele17 (a et b) et Ele17Ele8dZ (c et d) entre les données 2012 (bleu/azure) et la simulation Monte-Carlo (rouge/orange), dans le tonneau et les deux bouchons en fonction de l'impulsion transverse des électrons *probes*

Chapitre 5

Efficacité de déclenchement des événements Higgs, dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$

5.1 Démarche

La partie précédente a permis d'établir l'efficacité de passage des leptons dans les différents filtres du *trigger* di-électrons en fonction de leur p_T , à l'aide de la méthode Tag & Probe, pour les données et la simulation Monte-Carlo. Il s'agit maintenant de calculer l'efficacité qu'un événement Higgs (ie 4 leptons répondant à certaines conditions) passe le *trigger* di-électrons.

Pour qu'un événement Higgs déclenche le *trigger* di-électrons, il est nécessaire d'avoir 2 leptons passant le filtre Ele17Ele8dZ et un passant le filtre Ele17, parmi les 4 leptons répondant aux critères de sélection d'un événement Higgs. Cette efficacité ne peut être calculée directement à partir des données, compte tenu du fait que ces événements ont déjà déclenché le *trigger* et de la très faible statistique d'événements répondant aux critères d'un événement Higgs (seulement 18 événements sur toute la statistique). Des simulations de signal Higgs pour différentes masses du Higgs vont donc être utilisées et l'efficacité sur les données sera ensuite déduite de ces résultats, c'est-à-dire pour une cinématique correspondant à celle d'événements Higgs.

Le calcul d'efficacité va être réalisé de deux manières, afin de vérifier si le passage « efficacité par lepton $\rightarrow$ efficacité d'un événement Higgs », à l'aide des *turn-on* par lepton obtenus dans le chapitre 4, est valide.

Dans un premier temps, l'efficacité correspondante à chaque lepton sélectionné sera déterminée à l'aide des *turn-on*, pour le filtre Ele17 et le filtre Ele17Ele8dZ. Cette méthode sera nommée « méthode avec les *turn-on* ». La deuxième méthode consiste à calculer l'efficacité à l'aide seulement des simulations de signal Higgs : parmi les événements répondant aux critères d'un événement Higgs, combien passent le *trigger* di-électrons ? Cette méthode sera nommée « directe ».

5.2 Coupures pour la sélection d'un événement Higgs

La sélection d'un événement Higgs [18] nécessite dans un premier temps la présence d'au moins quatre électrons reconstruits passant les coupures d'analyse définies dans le chapitre 4. Une présélection des événements est faite en imposant à l'événement Monte-Carlo d'avoir 4 électrons générés avec $|\eta| < 2.5$. Parmi les électrons passant les coupures d'analyse, quatre doivent avoir leur impulsion transverse supérieure à **7 GeV**, l'un d'entre eux doit avoir une impulsion transverse supérieure à **20 GeV** et un autre doit avoir cette dernière supérieure à **10 GeV**.

Parmi ce lot d'électrons sélectionnés, il faut pouvoir définir deux paires de leptons. La première est constituée des deux leptons de l'événement ayant des charges opposées (électron/positron) et dont la masse invariante est la plus proche possible de celle du Z, cette paire doit vérifier la condition : $40 \text{ GeV} < m(l\bar{l}) < 120 \text{ GeV}$. La seconde paire est formée par 2 leptons de l'événement, parmi ceux restant, qui ont les plus grandes énergies transverses et qui sont de charges opposées. Cette paire doit passer la condition : $12 \text{ GeV} < m(l\bar{l}) < 120 \text{ GeV}$. Finalement, la masse invariante de ces 4 leptons (*Higgs-mass*) doit vérifier : $m(4l) > 100 \text{ GeV}$.

Le tableau 5.1 détaille le nombre d'événements sélectionnés pour chaque étape de cette sélection, pour certaines masses du Higgs.

Masse du Higgs (en GeV/c^2)	117	125	145	300	450	600
Nombre d'événements ayant 4 électron générés	23546	76831	23769	25521	27077	28171
Nombre d'événements ayant 4 électrons passant les coupures d'analyse	6447	25539	10557	15132	16741	18138
Nombre d'événements après la sélection sur les masses invariantes	5475	22598	10006	13865	15660	17043
Nombre d'événements finalement sélectionnés (après la condition sur les p_t des 4 leptons)	4767	20650	9690	13812	15628	17003

TABLE 5.1 – Nombre d'événements sélectionnés lors des différentes étapes de la sélection des événements Higgs

La figure 5.1 présente l'efficacité de sélection des événements Higgs pour une masse du Higgs comprise entre 115 et 600 GeV. Cette efficacité est définie par :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre d'événements finalement sélectionnés}}{\text{Nombre d'événements ayant 4 électrons générés avec } |\eta| < 2.5}$$

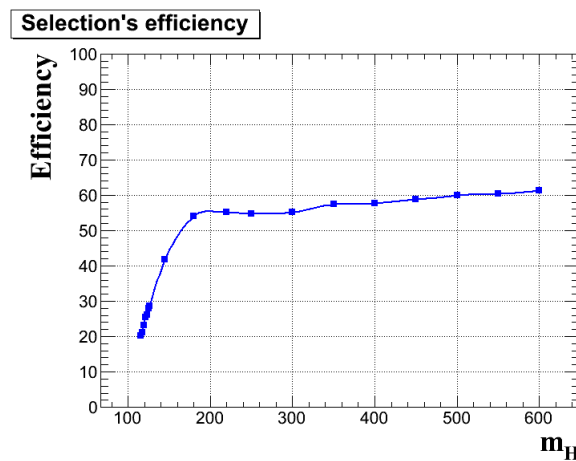


FIGURE 5.1 – Efficacité de sélection d'un événement Higgs en fonction de la masse du Higgs (en GeV/c^2), avec pour acceptation 4 leptons générés, dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$

5.3 Efficacité d'un événement Higgs

5.3.1 Méthode avec les *turn-on*

Dans un premier temps, les événements passant les coupures associées à un événement Higgs sont sélectionnés. Les informations des 4 leptons (vecteur de Lorentz comportant des informations sur l'impulsion, l'énergie des leptons ...) de ces événements sont stockées. Ensuite, la raisonnement suivant est appliqué pour chacun des quatre leptons : à partir de son impulsion transverse et de son $|\eta|$, les efficacités des filtres Ele17 et Ele17Ele8dZ correspondantes sont récupérées à l'aide des *turn-on* obtenus dans le chapitre 4, pour les données et la simulation Monte-Carlo. Le programme génère un nombre aléatoire (distribution uniforme) entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à l'efficacité associée au lepton pour un de deux filtres, le lepton est considéré comme passant le filtre en question.

Une fois cette démarche appliquée aux 4 leptons, il suffit de vérifier si l'événement comporte 2 électrons passant le filtre Ele17Ele8dZ et un passant le filtre Ele17 pour conclure du déclenchement ou non du *trigger* di-électrons dans l'événement.

L'efficacité est alors calculée ainsi et représentée figure 5.2 pour données et simulation Z Monte-Carlo :

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre d'événements passant les coupures d'un événement Higgs et le trigger di - électrons}}{\text{Nombre d'événements passant les coupures d'un événement Higgs.}}$$

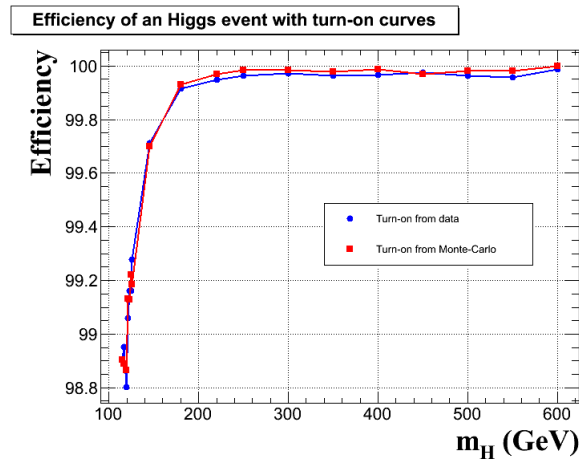


FIGURE 5.2 – Efficacité du *trigger* di-électrons, calculée à l'aide des *turn-on* par leptons avec les données (courbe bleu) et Monte-Carlo (courbe rouge), pour différentes masses du Higgs

Il y a très peu de différences entre le tracé de l'efficacité d'un événement Higgs avec les *turn-on* des données ou du Monte-Carlo : cela conduit donc à l'absence d'erreurs systématiques à ce niveau. La figure 5.3 représente le ratio données / Monte-Carlo. La différence entre les données et la simulation Monte-Carlo est de moins de 1 pour mille pour toutes les masses du Higgs entre 100 et 600 GeV.

5.3.2 Méthode directe

Parmi les événements vérifiant les coupures de sélection d'un événement Higgs, les événements passant le *trigger* di-électrons sont comptés. A partir des simulations de signal Higgs à différentes masses, l'efficacité est calculée (cf la formule ci-dessous). La figure 5.4 représente cette efficacité pour différentes masses du Higgs.

$$\epsilon = \frac{\text{Nombre d'événements passant les coupures d'un événement Higgs et le trigger di - électrons}}{\text{Nombre d'événements passant les coupures d'un événement Higgs}}$$

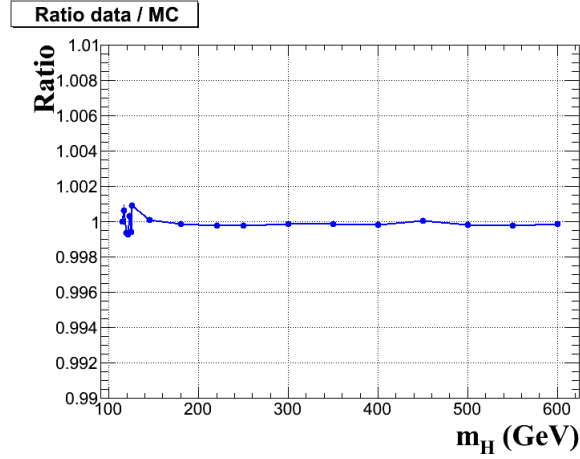


FIGURE 5.3 – Rapport des efficacités obtenues à la figure 5.2 entre données et simulation Monte-Carlo

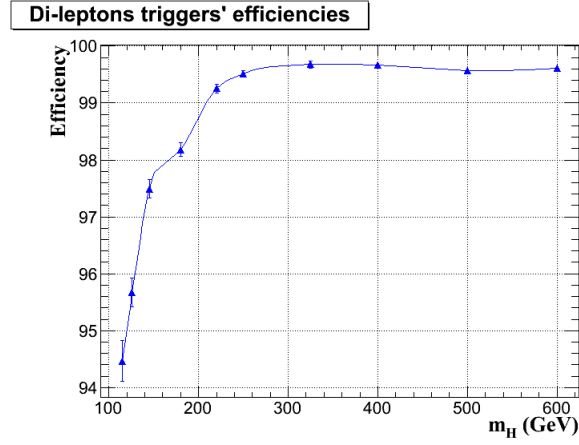


FIGURE 5.4 – Efficacité du *trigger* di-électrons, calculée par la méthode directe, pour différentes masses du Higgs

L'efficacité obtenue à 125 GeV est inattendue : en 2011, elle était de plus de 99% alors que, d'après la figure 5.4, elle n'est que de 95.7% en 2012. De plus, les courbes obtenues à l'aide des 2 méthodes ne correspondent pas.

5.3.3 Problème au niveau de l'isolation des leptons

Les événements ne passant pas le *trigger* di-électrons mais passant les coupures de sélection d'un événement Higgs ont été étudiés attentivement afin de déterminer l'origine du problème mentionné dans la partie précédente. Il a été remarqué que certains de ces événements ont des variables d'isolation (ecal, hcal ...) très élevées, empêchant l'événement de passer le *trigger*.

Pour chaque lepton, il est possible de définir sa proximité avec d'autres leptons à l'aide de la variable dR , le cône d'isolation d'un lepton étant défini au niveau HLT par $dR < 0.3$. Ainsi, calculer le dR entre deux leptons permet de savoir si un des deux leptons se trouve dans le cône d'isolation du second. Au sein de

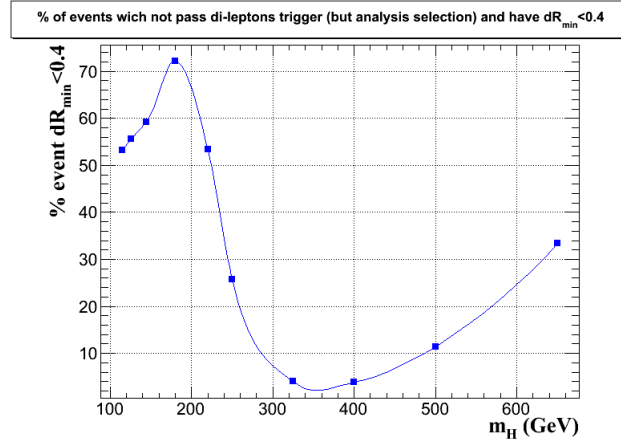


FIGURE 5.5 – Pourcentage d’événements, parmi ceux passant les coupures d’analyses mais ne déclenchant pas le *trigger* di-électrons, ayant un dR minimum inférieur à 0.4, pour différentes masses du Higgs

chaque événement, nous relevons le dR minimum entre 2 leptons. La figure 5.5 représente le pourcentage d’événements ayant un dR minimum inférieur à 0.4, pour chaque simulation du signal Higgs. Ce pourcentage permet de caractériser la proportion d’événements, parmi ceux qui ne déclenchent pas le *trigger* di-électrons, ayant deux leptons très proches. Ce pourcentage est très élevé (plus de la moitié) pour une masse du Higgs comprise entre 100 et 250 GeV. Ainsi, lors du calcul de l’isolation du lepton au niveau HLT, l’énergie d’autres leptons proches est aussi prise en compte, faussant donc le calcul.

Entre l’année 2011 et l’année 2012, les coupures appliquées aux événements ont été modifiées, en particulier la coupure d’isolation. L’année dernière, la coupure appliquée était une *detector-based isolation* : cette approche était basée sur les informations fournies par chaque détecteur de façon indépendante et ne posait pas de veto aux autres leptons du cône d’isolation. Cette année, une nouvelle coupure d’isolation a été introduite, la *particle-based isolation* (ou *Particle-Flow isolation*), qui somme l’énergie des particules contenues dans un cône de longueur dR autour du lepton, ce qui pose un veto aux autres leptons contenus dans le cône d’isolation, or ceci n’est pas réalisé par le *trigger*. Ainsi, l’efficacité du *trigger* di-électrons est plus faible avec la *PF-isolation* qu’avec la *detector-based isolation*, expliquant ainsi une partie de la différence d’efficacité obtenue entre l’année 2011 et l’année 2012.

5.4 Comparaison entre l’efficacité directe et évaluée par les *turn-on*

Les *turn-on* sont retracés avec les simulations du signal Higgs (pour les différentes masses), dans deux cas différents. Dans le premier cas, ces courbes sont tracées avec la méthode classique du Tag & Probe, appliquée exactement de la même manière que cela a été fait jusqu’à présent, mais avec des simulations de signal Higgs et non d’événements Z. Cela permet de voir la différence de comportement entre les événements Z et les signaux Higgs.

Dans le second cas, ces courbes d’efficacité sont tracées directement avec les 4 leptons des événements passant les coupures d’événements Higgs, ce qui permet de voir les biais induits par la méthode du Tag & Probe.

Ces *turn-on* sont tracés sur la figure 5.6 pour une masse du Higgs de $m_H = 125$ GeV dans le tonneau. Les résultats obtenus dans les bouchons sont similaires.

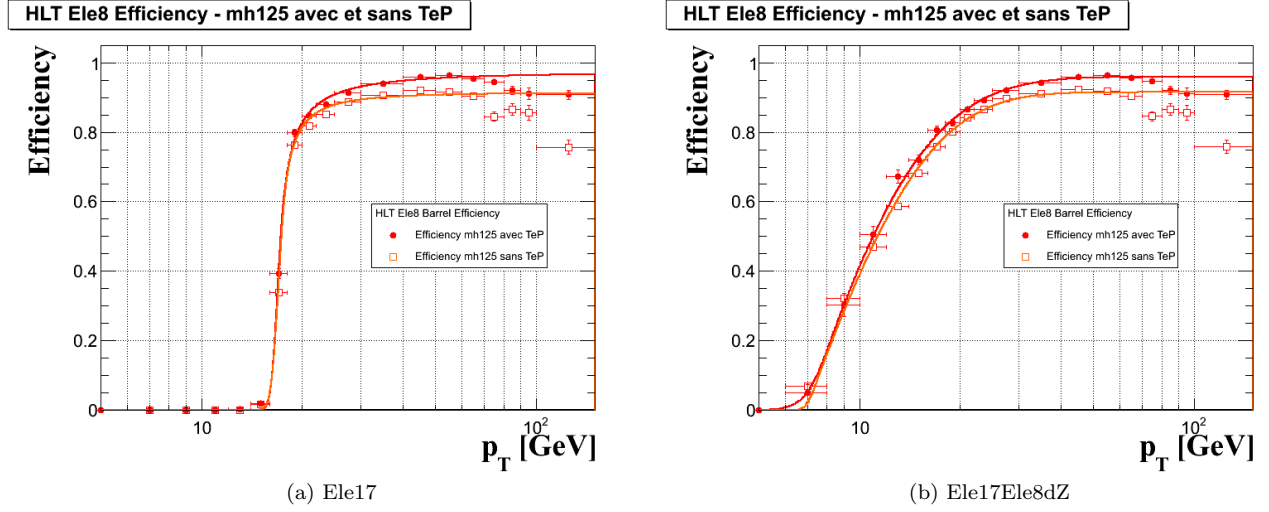


FIGURE 5.6 – Comparaison des efficacités des simulations du signal Higgs pour une masse $m_H=125$ GeV, avec (courbe rouge) et sans (courbe orange) la méthode du Tag & Probe pour le filtre Ele17 (a) et Ele17Ele8dZ (b) dans le tonneau

De ces courbes, un premier constat peut être fait : il y a à haut p_T une perte d'efficacité (visible sur les données : points et carré rouges et oranges), qui peut s'expliquer par des considérations cinématiques sur les leptons, mais ce phénomène n'a pas été approfondi dans cette étude.

Les *turn-on* obtenus avec la méthode du Tag & Probe ont une efficacité plus grande que ceux obtenus sans la méthode du Tag & Probe. Rappelons que dans la méthode du Tag & Probe, les événements sélectionnés passent le trigger Ele20, ayant une coupure d'isolation différente de celles utilisées dans l'analyse. Or, sans la méthode du Tag & Probe, les leptons sélectionnés ne passent que les coupures d'analyse.

La figure 5.7 récapitule les 5 manières dont l'efficacité d'un événement Higgs a été calculée :

- à l'aide des *turn-on* par lepton avec les données (courbe bleue)
- à l'aide des *turn-on* par lepton avec la simulation Monte-Carlo pour des événements Z (courbe rouge)
- à l'aide des *turn-on* par lepton avec les simulations du signal Higgs à différentes masses avec Tag & Probe (orange clair)
- à l'aide des *turn-on* par lepton avec les simulations du signal Higgs à différentes masses sans Tag & Probe (orange plus foncé)
- par la méthode directe (courbe verte)

La différence observée entre la simulation du signal Higgs avec et sans Tag & Probe est due en partie au problème d'isolation explicité précédemment : en effet lors de l'application de la méthode du Tag & Probe, il y a une pré-sélection des événements qui doivent passer le *trigger* Ele20SC4, ayant une coupure d'isolation différente de la *PF-isolation*. Dans le cas où le Tag & Probe n'est pas appliqué, les événements sélectionnés sont ceux ayant 4 leptons passant les coupures d'analyse (dont la *PF-isolation*) et vérifiant les coupures d'un événement Higgs. Il est aussi possible que la méthode du Tag & Probe induise d'autres biais. De plus, une autre partie des différences observées entre les courbes de *turn-on* obtenus avec les données et Monte-Carlo Z (courbes rouge et bleue) et le calcul direct avec le *trigger* (courbe verte) peut être du à des différences de comportement cinématique des leptons entre les événements Z (qui ont 2 leptons) et les événements Higgs (qui ont 4 leptons).

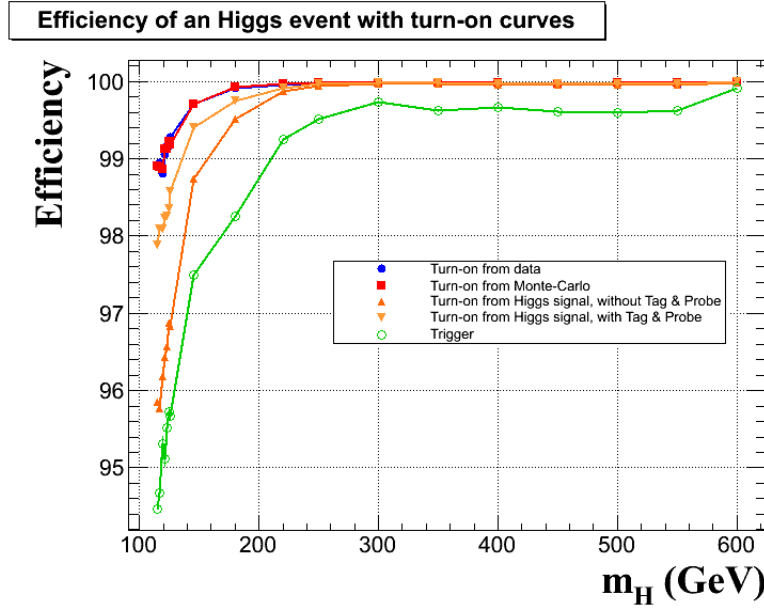


FIGURE 5.7 – Efficacité du *trigger* di-électrons, calculée à l’aide des *turn-on* par lepton avec les données (bleu), Monte-Carlo (rouge), avec les simulation de signal Higgs avec (orange) et sans (orange plus foncé) la méthode du Tag & Probe, et par la méthode directe avec les *triggers* (vert) pour différentes masses du Higgs

Afin d’obtenir l’efficacité de déclenchement d’un événement Higgs pour les données réelles, il est possible de faire l’hypothèse selon laquelle les différences observées, pour les simulations, entre le calcul d’efficacité à l’aide des *turn-on* issus du Tag & Probe et celui obtenu par le calcul direct sont les mêmes pour les données (il faudrait cependant vérifier cette hypothèse). Ainsi, le ratio entre la courbe rouge (données - efficacité obtenue à l’aide des *turn-on*) sur la figure 5.7 et sur la courbe bleue (simulation - efficacité obtenue à l’aide des *turn-on*) peut être appliqué à la courbe verte (simulation - efficacité par la méthode directe), permettant ainsi d’obtenir l’efficacité pour les données de déclenchement du *trigger* di-électrons pour les événements Higgs. Ce ratio est très proche de 1, le nombre d’événements attendus n’est pas à corriger à partir d’un effet de différence d’efficacité données / simulation Monte-Carlo.

5.5 Le *trigger* tri-électrons

Le *trigger* tri-leptons (HLT_Ele15_Ele8_Ele5_CaloIdL_TrkIdVL) est un trigger sans coupure d’isolation, ne comportant que des coupures d’identification, basé sur la présence de 3 électrons, dont les impulsions transverses doivent être supérieures à 15 GeV, 8 GeV et 5 GeV respectivement pour les trois leptons. L’utilisation de 3 électrons permet de relâcher les coupures car il y a alors moins de « fake rate ». L’efficacité d’un événement Higgs par la méthode directe a été retracée, avec cette fois-ci :

$$\epsilon = \frac{\text{Événements passant les coupures d'un événement Higgs \& (le trigger di-électrons OU tri-électrons)}}{\text{Nombre d'événements passant les coupures d'un événement Higgs.}}$$

Comme le montre la figure 5.8, le gain d’efficacité est important entre 100 et 200 GeV : à 125 GeV, ce gain augmente de +3,3% avec l’ajout du trigger tri-électrons. L’utilisation d’un *trigger* tri-électrons semble donc être une alternative intéressante au problème engendrant une baisse d’efficacité du *trigger* di-électrons en 2012.

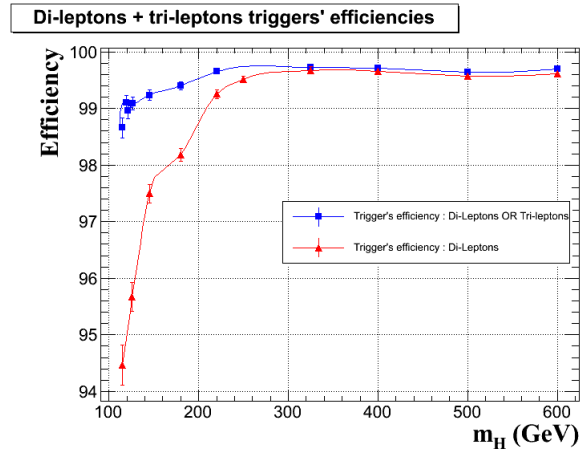


FIGURE 5.8 – Efficacité calculée à l’aide de la méthode directe avec les *triggers* di-électrons (rouge) et di-électrons ou tri-électrons (bleu) pour différentes masses du Higgs

Conclusion

Une étude d'efficacité de déclenchement des trois filtres du *trigger* di-électrons a été dans un premier temps réalisée grâce à la méthode du Tag & Probe. Elle a été menée pour les données de la première partie de l'année 2012 (2012A et 2012B) et pour les simulations d'événements Z (obtenus par Monte-Carlo), dans le tonneau et les bouchons du Compact-Muon Solenoid. Cette étude a permis de remarquer quelques petites différences entre données et simulations, mais ces dernières sont en général en bon accord. Cependant, il a été montré que cette étude d'efficacité de déclenchement par lepton ne permet pas de déduire directement l'efficacité de déclenchement du *trigger* di-électrons d'un événement Higgs. Une importante perte d'efficacité (3%) du *trigger* di-électrons vis-à-vis d'un événement Higgs a été observée entre l'analyse réalisée en 2011 et celle de 2012 et cette différence s'explique pour le changement de la coupure d'isolation utilisée au niveau de l'analyse entre l'année 2011 et l'année 2012.

L'efficacité de déclenchement d'un événement Higgs a alors été calculée à l'aide des simulations de manière directe. Pour en déduire l'efficacité sur les données, il est donc possible de faire l'hypothèse selon laquelle la différence entre l'efficacité déduite par le Tag & Probe et celle calculée directement s'avère être la même pour les données et les simulations. Il faudrait cependant vérifier cette hypothèse dans une autre étude. Dans ce cas là, il est alors possible de conclure que les erreurs systématiques dues à la différence d'efficacité entre données et Monte-Carlo sont négligeables. Il n'y a donc pas de facteur correctif à appliquer pour déterminer, à partir du nombre d'événement Higgs obtenu par simulation, le nombre d'événements Higgs attendu lors des prises de données réelles.

Dans un futur proche, il serait intéressant d'ajouter le *trigger* tri-leptons à l'analyse, afin de récupérer les 3% d'efficacité du *trigger* di-électrons perdus notamment à cause de la *PF-isolation*. A plus long terme, une solution durable serait d'implémenter la *PF-isolation* au niveau HLT afin d'avoir le veto appliqué directement à ce stade. Finalement, il faudrait vérifier l'hypothèse faite pour la conclusion de ce rapport, selon laquelle la différence entre l'efficacité déduite par le Tag & Probe et celle calculée directement s'avère être la même pour les données et les simulations.

Troisième partie

Apport du stage dans la construction du projet professionnel

Développement du projet professionnel lors de la deuxième année

Depuis mon arrivée à Centrale, je sais que j'ai envie de faire un métier en lien direct avec la physique, et non pas un où l'organisation et le management dominant. C'est donc logiquement que j'ai orienté mes choix d'options de la deuxième année vers tout ce qui avait attiré à la physique.

La recherche est un domaine qui m'attire particulièrement, et j'ai pu découvrir à Centrale qu'il existait deux grandes « manières » d'en faire : au sein d'un bureau R&D dans une entreprise, ou bien dans un laboratoire de recherche.

Lors du choix du Projet d'Application de deuxième année, j'ai ainsi décidé de tester la R&D dans une entreprise, en choisissant le projet « Sèche-cheveux silencieux » proposé par le groupe SEB, qui consistait en l'étude de divers solutions techniques pour réduire le bruit acoustique d'un sèche-cheveux, en faisant tout d'abord un état de l'art de ce qui existait déjà dans ce domaine, puis en menant diverses expériences « bricolées » pour tenter de caractériser l'influence de divers paramètres sur le bruit du sèche-cheveux. Bien que ce projet fut intéressant, il m'a semblé que nous avions trop peu de temps pour aller au bout des choses et pour véritablement étudier ce qu'il se passait. Les moyens mis à notre disposition étaient de plus assez restreints, et j'ai eu le sentiment qu'il s'agissait surtout de bricolage, où la rigueur manquait. Il m'a de plus semblé que les personnes travaillant dans ce service ne pouvaient se concentrer sur un domaine précis : elles avaient plusieurs projets en cours, relativement différents, et ne pouvaient donc approfondir une étude en particulier.

Lors du choix de mon stage d'application, j'ai voulu découvrir la recherche à proprement parler, au sein d'un laboratoire.

La découverte du métier de chercheur au sein de l'expérience CMS

Le métier de chercheur m'a toujours intriguée, bien que je ne sache pas réellement ce qu'il se cachait derrière ce mot. Faire ce stage au sein d'un laboratoire, dans un domaine qui m'intéresse (la physique des particules en l'occurrence) m'a donc semblé être une excellente opportunité pour découvrir cet univers. Grâce à un thésard de l'IPNL (Institut de Physique Nucléaire de Lyon), Mr Olivier Bondu, rencontré lors des enquêtes découvertes de première année, j'ai pu obtenir ce stage, dans un laboratoire de physique des particules.

Qu'est-ce que le métier de chercheur ? Vaste question, dont il me semble que la réponse peut considérablement varier en fonction des chercheurs et de leur domaine de recherche. Il me semble cependant que certaines constantes restent inhérentes à ce métier. Un bon nombre de personnes s'imaginent caricaturalement un être solitaire dans un laboratoire, en blouse blanche, cherchant d'obscures molécules et écrivant de complexes formules mathématiques sur un tableau à la craie. Avant ce stage, j'avais eu l'occasion de croiser à l'Ecole Centrale de Lyon et lors des enquêtes de premières années des chercheurs, mais quelques mots échangés en 15 minutes ne peuvent résumer ce métier et j'en avais une conception plus que floue. Après ces 3 mois de stage, il me semble maintenant encore plus difficile d'appréhender ce métier sans avoir travaillé au moins quelques temps au sein d'un laboratoire.

J'ai pu découvrir lors de ce stage l'organisation d'un laboratoire et d'une collaboration telle CMS, deux univers qui m'étaient totalement inconnus avant.

Dans un premier temps, il a été très agréable lors de ce stage de travailler avec des personnes dont la seule préoccupation de leur journée de travail n'est pas de savoir quand il sera l'heure de partir ou de faire une pause, ou d'appliquer le principe du « moins j'en fais, mieux je me porte ». Les chercheurs sont véritablement investis dans leur travail et ils aiment ce qu'ils font.

J'ai également découvert que le métier de chercheur est loin d'être un métier répétitif et monotone : il y a de constantes évolutions, particulièrement dans les expériences au sein du LHC, où tout est fait dans la rapidité, peut-être même un peu trop pour les chercheurs qui n'ont pas toujours le temps d'approfondir ce qu'ils étudient.

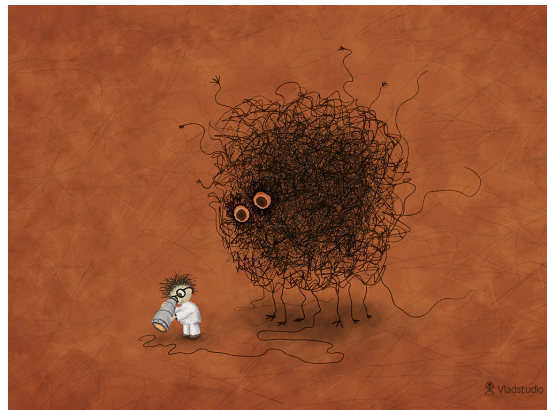
Ce stage m'a ensuite permis de me rendre compte de l'importance de savoir communiquer et parler anglais, ainsi que de savoir expliquer clairement ses résultats et la façon dont ils ont été obtenus. La formation reçue en prépa et en école d'ingénieurs généralistes permettent très nettement d'acquérir, au fur et à mesure des rapports et présentations orales, ces compétences.

J'étais à l'origine plus attirée vers la recherche en physique *théorique*, mais au cours de stage, j'ai pu découvrir la recherche en physique plutôt *expérimentale*. J'ai beaucoup codé en C++, et contre toute attente, cela m'a plu. L'informatique et le codage réalisés lors de ce stage diffèrent totalement de la façon dont ils sont enseignés à l'Ecole Centrale de Lyon et sont beaucoup plus intéressants. De plus, je trouve qu'il est passionnant d'être au coeur des expériences de physique et des analyses de données. La physique plus *théorique* est de plus très importante pour comprendre ce qu'il se passe dans les différentes expériences, mais n'ayant pas encore les connaissances nécessaires dans ce domaine, je n'ai pu qu'écouter les chercheurs en discuter. Il me semble qu'avoir ses notions donne une dimension encore plus passionnante à l'analyse des données.

Impact du stage sur la construction du projet professionnel

Au terme de ce stage, je suis définitivement confortée dans ma décision de faire une thèse après mes 2 années de master en Physique Théorique en Allemagne. Le domaine de la physique des particules et des expériences du LHC, découverts lors de stage, m'intéresse véritablement : je pense orienter mes cours le plus possible vers ce domaine au cours de mon master (les choix de cours se faisant pendant le mois de septembre) et faire une thèse dans ce domaine est une possibilité que j'envisage maintenant sérieusement.

Finalement, je tiens à remercier Mme Stéphanie Baffioni de m'avoir accueillie et guidée lors de ce stage, ainsi que tous les membres du groupe CMS du laboratoire LLR, chercheurs, post-doc et thésards, pour leur chaleureux accueil, leur aide et leurs explications.



Conclusion Générale

Ce rapport fait suite à un stage de trois mois effectué au laboratoire Leprince-Ringuet de l'École polytechnique, au sein du groupe de chercheurs de la collaboration internationale CMS.

Ce stage a parfaitement répondu à mes attentes. Il m'a permis dans un premier temps de découvrir le monde de la recherche, que je ne connaissais que très peu. Au cours de ces trois mois, j'ai pu étudier l'organisation d'un laboratoire de recherche, et en particulier de la collaboration internationale CMS, qui regroupe quelques 3000 chercheurs et ingénieurs, ce qui nécessite donc une organisation toute particulière. J'ai également pu observer la manière dont était gérée une grande découverte pour le monde scientifique, puisque mon stage s'est déroulé en pleine effervescence de la découverte d'une particule compatible avec le boson de Higgs.

L'étude que j'ai menée lors de ces trois mois a été l'occasion d'avoir un premier contact avec le travail qui est effectué en recherche. L'analyse des données a conduit à l'identification de divers problèmes, à partir desquels des explications et solutions ont été proposées. Cette étude m'a de plus permis de me familiariser petit à petit avec l'organisation et le vocabulaire spécifique de la collaboration CMS.

Finalement, ces trois mois au sein du laboratoire m'ont permis de découvrir le métier de chercheur et d'avoir une première expérience dans la recherche, ce qui me sera très utile dans la poursuite de la construction de mon projet professionnel, notamment lors de ma très probable recherche de thèse.

Annexe A

Valeurs significatives des courbes d'efficacité

	Données - Barrel	Données - Endcap	MC - Barrel	MC - Endcap
p_T à 50%	17.8	17.3	17.0	16.6
p_T à 95%	22.1	27	19.4	21.4
efficacité à 100 GeV	0.985	0.976	0.995	0.979
p_T à 0.99*plateau	39.4	42	35.9	42.2
delta turn-on	1.6	2.6	1.4	1.9

TABLE A.1 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17 pour les données 2012 et Monte-Carlo dans le cas de *probes* passant les *Working Point*

	Données - Barrel	Données - Endcap	MC - Barrel	MC - Endcap
p_T à 50%	17.8	17.3	17.0	16.6
p_T à 95%	20.8	22.4	19.1	18.8
efficacité à 100 GeV	0.988	0.976	0.998	0.993
p_T à 0.99*plateau	36.2	34.1	31.3	35.7
delta turn-on	1.6	2.5	1.4	1.8

TABLE A.2 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17 sans matching dZ pour les données 2012 et Monte-Carlo dans le cas de *probes* passant les *Working Point*

	DataA - Barrel	DataA - Endcap	DataB - Barrel	DataB - Endcap
p_T à 50%	17.7	17.9	17.8	17.1
p_T à 95%	22.1	26.8	22.1	26.6
efficacité à 100 GeV	0.980	0.966	0.987	0.980
p_T à 0.99*plateau	41.5	29.4	38.9	50.9
delta turn-on	1.5	3.1	1.7	2.5

TABLE A.3 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17 pour les données 2012A et 2012B dans le cas de *probes* passant les *Working Point*

	DataA - Barrel	DataA - Endcap	DataB - Barrel	DataB - Endcap
p_T à 50%	9.6	9.4	9.2	9.3
p_T à 95%	17.6	24.9	18.2	26.3
efficacité à 100 GeV	0.982	0.971	0.987	0.974
p_T à 0.99*plateau	39.2	34.3	34.3	35.6
delta turn-on	2.6	3.5	2.2	5.2

TABLE A.4 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17Ele8dZ pour les données 2012A et 2012B dans le cas de *probes* passant les *Working Point*

	Données - Barrel	Données - Endcap	MC - Barrel	MC - Endcap
p_T à 50%	9.1	9.2	8.4	9.0
p_T à 95%	17.4	23.1	14.3	17.6
efficacité à 100 GeV	0.986	0.981	0.995	0.988
p_T à 0.99*plateau	33.5	35.9	32.6	41.2
delta turn-on	2.0	4.3	1.5	2.8

TABLE A.5 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17Ele8 pour les données 2012 et Monte-Carlo dans le cas de *probes* passant les *Working Point*

	Données - Barrel	Données - Endcap	MC - Barrel	MC - Endcap
p_T à 50%	9.2	10.0	8.5	9.1
p_T à 95%	18.4	26.0	14.7	19.5
efficacité à 100 GeV	0.985	0.976	0.995	0.983
p_T à 0.99*plateau	33.8	40.4	33.8	41.0
delta turn-on	2.2	4.6	1.6	2.9

TABLE A.6 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17Ele8dZ pour les données 2012 et Monte-Carlo dans le cas de *probes* passant les *Working Point*

	Données - Barrel	Données - Endcap	MC - Barrel	MC - Endcap
p_T à 50%	17.9	17.7	17.2	16.9
p_T à 95%	33.5	40.9	30.8	44.6
efficacité à 100 GeV	0.982	0.979	0.993	0.982
p_T à 0.99*plateau	61.9	62.2	58.9	70.7
delta turn-on	2.0	3.8	2.8	4.6

TABLE A.7 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17 pour les données 2012 et Monte-Carlo dans le cas de *probes* passant les coupures d'analyse

	Données - Barrel	Données - Endcap	MC - Barrel	MC - Endcap
p_T à 50%	9.8	11.8	10.7	12.2
p_T à 95%	32.5	39.4	31.2	41.3
efficacité à 100 GeV	0.980	0.971	0.988	0.976
p_T à 0.99*plateau	52.0	49.7	48.0	55.7
delta turn-on	6.1	9.5	8.7	10.9

TABLE A.8 – Données statistiques de l'efficacité du filtre Ele17Ele8dZ pour les données 2012 et Monte-Carlo dans le cas de *probes* passant les coupures d'analyse

Annexe B

Diapositives de présentation du meeting E-gamma du 24 juillet

Di-electrons trigger's efficiencies

Pauline Soulet
Stéphanie Baffioni

LLR Ecole polytechnique

26/07/2012

Trigger's Efficiency

1

Introduction

- Data used :
 - 2012A et 2012B - ichep dataset
- MC used :
 - DYJetsToLL_M-50_TuneZ2Star_8TeV-madgraph-tarball /Summer12-PU_S7_START52_V9-v2
 - Higgs Signal: GluGluToHToZZTo4L_M-*_8TeV-powheg-pythia6 /Summer12-PU_S7_START52_V9-v1/

26/07/2012

Trigger's Efficiency

3

First step : probes passing WP

- Cuts WP 2012:

	Barrel	Endcap
dEtaIn	0.007	0.009
dPhiIn	0.15	0.10
sigma(Eta)Eta	0.01	0.03
H/E	0.12	0.10
ecalIso/pT	0.2	0.2
hcalIso/pT	0.2	0.2
trackIso/pT	0.2	0.2

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Probes passing working point and filter}}{\text{Probes passing working point}}$$

26/07/2012

Trigger's Efficiency

5

Introduction

- Trigger used for the H -> ZZ* -> 4l analysis (4e and 2e2mu channels):
 - HLT_Ele17_CaloIdT_CaloIsoVL_TrkIdVL_TrkIsoVL_Ele8_CaloIdT_CaloIsoVL_TrkIdVL_TrkIsoVL
 - Contained 3 filters :
 - hltEle17xxx - Ele8xxxTrackIsoFilter
 - Electron with ET>17GeV
 - hltEle17xxx - Ele8xxxTrackIsoDoubleFilter
 - 2 electrons : one with ET>17GeV, the other ET>8GeV
 - hltEle17xxx - Ele8xxxTrackIsoDZ
 - 2 electrons : one with ET>17GeV, the other ET>8GeV + dZ cut on the pair

26/07/2012

Trigger's Efficiency

2

Tag&Probe Selection

- Trigger T&P used for events' selection : HLT_Ele20_CaloIdVT_CaloIsoVT_TrkIdT_TrkIsoVT_SC4_Mass50
- For the Tag :
 - Must pass the Tight Trigger WP (2012)
 - Matching with the Tag of the T&P trigger (dR<0.1)
 - ET > 20 GeV
- For the Probe :
 - First step : probes passing Working Point 2012
 - Second step : Passing the h4l analysis selection → synchronized with 2012 analysis cuts
- Selection of Tag&Probe pairs :
 - 60 < M(tag,probe) < 120 GeV (Z-mass)
 - Opposite sign

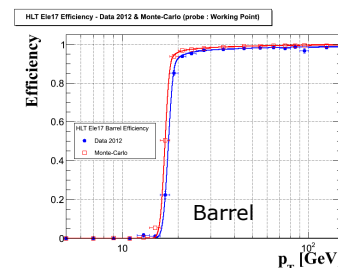
26/07/2012

Trigger's Efficiency

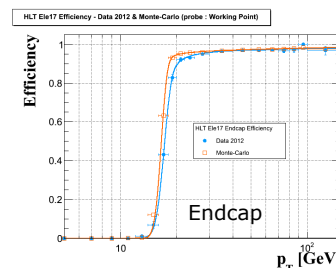
4

First step : probes passing WP

Filtre Ele17



	Data (A+B)	MC
50%	17.8	17.0
95%	22.1	19.4
100 GeV	0.985	0.995



	Data (A+B)	MC
50%	17.3	16.6
95%	27.0	21.4
100 GeV	0.976	0.980

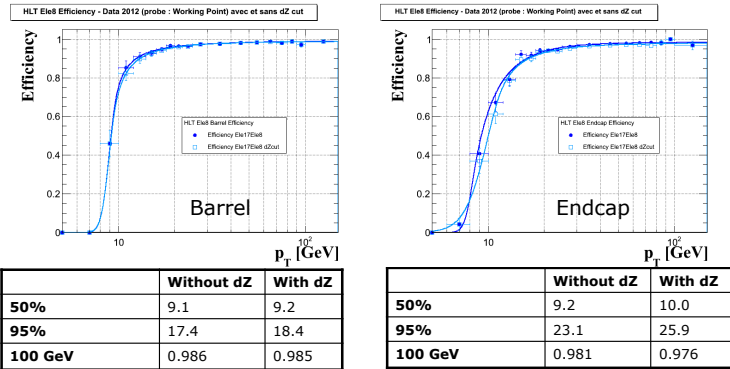
26/07/2012

Trigger's Efficiency

6

First step : probes passing WP

Comparison efficiency filter Ele17Ele8 et Ele17Ele8dZ - Data



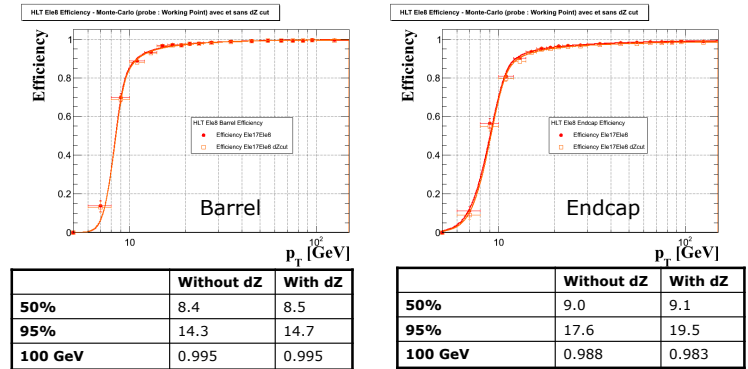
26/07/2012

Trigger's Efficiency

7

First step : probes passing WP

Comparison efficiency filter Ele17Ele8 et Ele17Ele8dZ - Monte Carlo



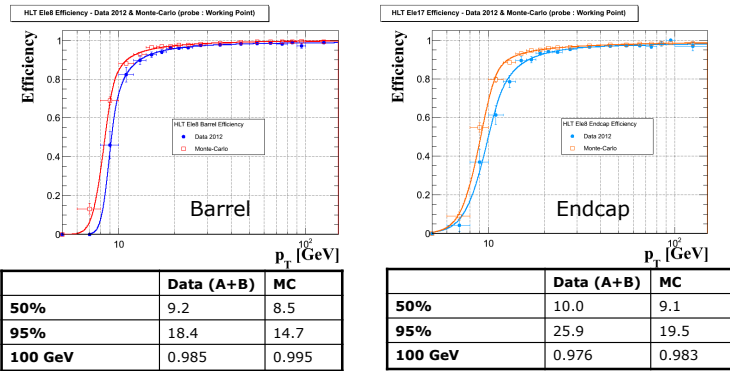
26/07/2012

Trigger's Efficiency

8

First step : probes passing WP

Filtre Ele17Ele8dZ



26/07/2012

Trigger's Efficiency

9

Second step : probes passing analysis cuts

Analysis cuts :

- Expected missing inner hits ≤ 1
- $|SIP| < 4$
- Isolation Particle Flow < 0.4
- BDT (Boost Decision Tree) $>$ threshold (pT and eta dependant)
- $|\eta| < 2.5$

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Probes passing analysis cuts and filter}}{\text{Probes passing analysis cuts}}$$

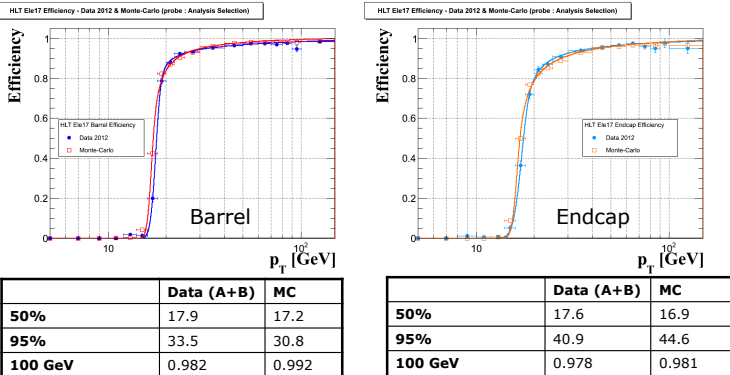
26/07/2012

Trigger's Efficiency

10

Second step : probes passing analysis cuts

Filter Ele17

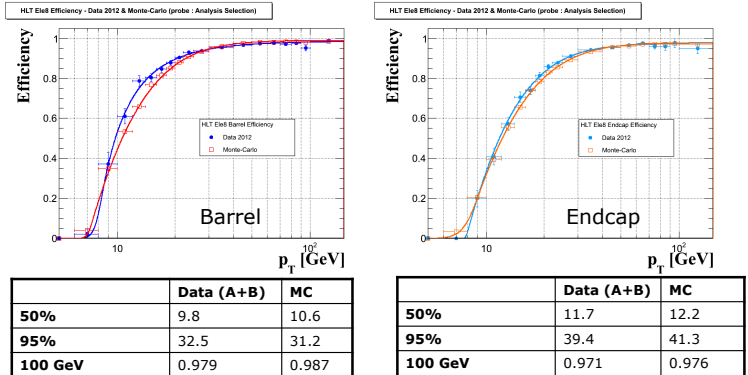


26/07/2012

Trigger's Efficiency

11

Filter Ele17Ele8dZcut



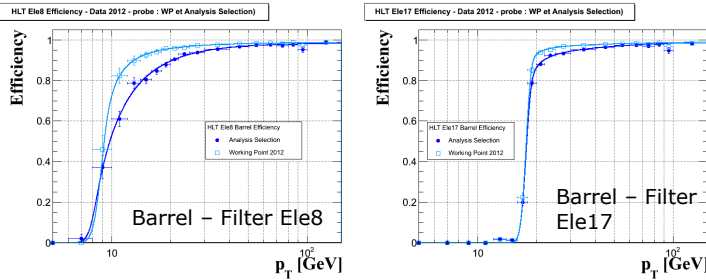
26/07/2012

Trigger's Efficiency

12

Second step : probes passing analysis cuts

Comparison probe passing WP vs probe passing analysis cuts - data



→ Loos of efficiency when we change probe's cut (WP → analysis cut)

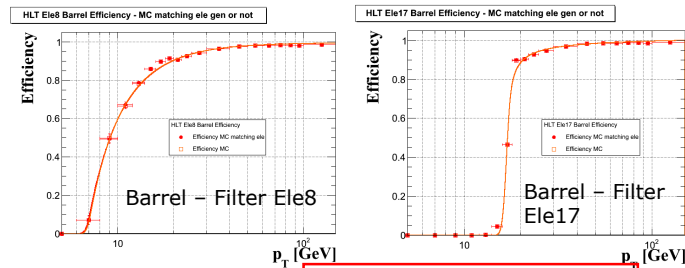
26/07/2012

Trigger's Efficiency

13

Second step : probes passing analysis cuts

Loop over all electrons → Loop over electrons reco associated ($dR < 0.1$) with an electron generated (no background)



→ Not a background effect

26/07/2012

Trigger's Efficiency

15

Efficiency of a Higgs event

- 2 ways to calculate efficiency :
 - With the T&P turn-on (emulation of the filters efficiency)
 - For each of the 4 leptons → efficiencies for the both filters ? (from the turn-on, depend on the p_T)
 - Random number generated between 0 and 1
 - If $rdn < \text{efficiency}$: lepton pass the filter
 - 2 leptons passing Ele17Ele8dZ + 1 lepton passing Ele17 = trigger ok
 - With the events passing trigger or not

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Events selected passing di-electrons trigger}}{\text{Events selected}}$$

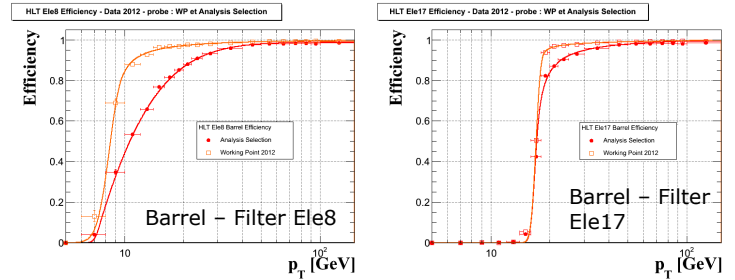
26/07/2012

Trigger's Efficiency

17

Second step : probes passing analysis cuts

Comparison probe passing WP vs probe passing analysis cuts – Monte Carlo



Same results with Monte-Carlo... Could be due to the a bakground effect or looser cuts

26/07/2012

Trigger's Efficiency

14

Efficiency of a Higgs event

□ Cuts for the selection of a Higgs event :

- 4 leptons with ID, SIP & isolation :
 - 2 leptons (closest to the Z_{mass}) with : $40 < m(2l) < 120 \text{ GeV}$
 - 2 other leptons (highest p_T remaining) with : $12 < m(2l) < 120 \text{ GeV}$
 - 4 leptons : $m_H > 100 \text{ GeV}$
 - 2 others pairs : $m(2l) > 4 \text{ GeV}$
 - **1 lepton** : $p_T > 20 \text{ GeV}$ - **2 leptons** : $p_T > 10 \text{ GeV}$ - **4 leptons** : $p_T > 7 \text{ GeV}$

26/07/2012

Trigger's Efficiency

16

Efficiency of a Higgs event

□ Additional checks :

Efficiency calculate from Higgs signal too, in two ways :

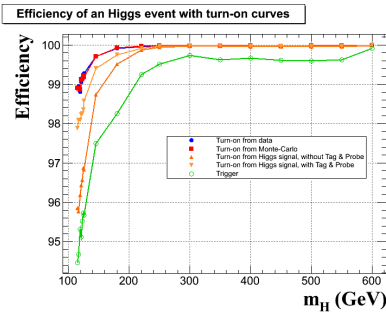
- Turn-on of these signals with T&P method and same approach as previously explained
- Turn-on of these signals with the 4 leptons of Higgs event and same approach as previously explained

26/07/2012

Trigger's Efficiency

18

Efficiency of a Higgs event



→ Unexpected efficiency for $m_H=125\text{GeV}$ (trigger curve) : trigger's efficiency is not **99%** like previous year, but only **95.7%**!

26/07/2012

Trigger's Efficiency

19

Efficiency of a Higgs event

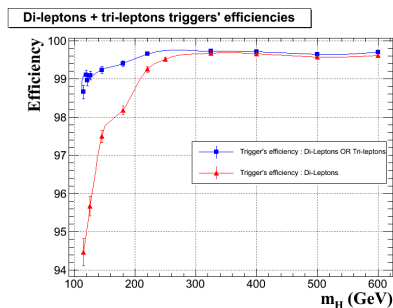
- Reason : the isolation's cuts change this year
 - Last year, the detector-based isolation was not vetoing other leptons inside the isolation cone.
 - This year, the PF-isolation is vetoing other electrons inside the isolation cone, but it's not done by the trigger ...
- Lower efficiency of the trigger with the PF cuts than with the detector-based isolation

26/07/2012

Trigger's Efficiency

21

Efficiency of a Higgs event



→ + 3.3 % efficiency for $m_H=125\text{ GeV}$

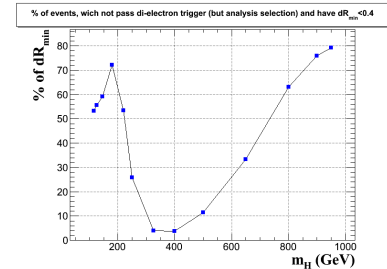
26/07/2012

Trigger's Efficiency

23

Efficiency of a Higgs event

- Isolation's problem :
 - For the events passing the analysis cuts but not the di-electrons trigger : some leptons in these events are very close ($dR < 0.4$) → problem in the isolation cuts



26/07/2012

Trigger's Efficiency

20

Efficiency of a Higgs event

- Solution : add tri-leptons trigger :

Selection of events passing :

- Di-electrons trigger :
 $HLT_Ele17_CaloIdT_CaloIsoVL_TrkIdVL_TrkIsoVL_Ele8_CaloIdT_CaloIsoVL_TrkIdVL_TrkIsoVL$
- OR
- Tri-electrons trigger :
 $HLT_Ele15_Ele8_Ele5_CaloIdL_TrkIdVL$

26/07/2012

Trigger's Efficiency

22

Conclusion

- Per-leg Tag & Probe study :

- Turn-on curves evaluated using Z T&P for Ele17_Ele8 trigger for WP trigger 2012 and H4I analysis cuts for barrel, endcap, data and MC
- some little differences between data and MC observed but in general quite in agreement

26/07/2012

Trigger's Efficiency

24

Conclusion

□ Efficiency for $H \rightarrow 4e$ events

- Basically no difference between data and MC, but not straight forward to obtain the efficiency per Higgs event from the per-leg T&P studies
- Assumption = if difference of the efficiency derived from the per-leg T&P studies and the real efficiency behaves the same for data and MC → Systematic errors coming from the data-MC differences are negligible.

□ Efficiency at 125 GeV can be recovered by the tri-electrons trigger

Bibliographie

- [1] Site du Laboratoire Leprince-Ringuet. [http ://lrr.in2p3.fr](http://lrr.in2p3.fr), consulté en juillet 2012.
- [2] Achintya Rao. Blinding and Unblinding Analyses. [http ://cms.web.cern.ch/news/blinding-and-unblinding-analyses](http://cms.web.cern.ch/news/blinding-and-unblinding-analyses), Juin 2012.
- [3] Site du CMS. Observation of a New Particle with a Mass of 125 GeV. [http ://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev](http://cms.web.cern.ch/news/observation-new-particle-mass-125-gev), juillet 2012.
- [4] F. Englert and R. Brout. Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons. *Physical Review Letters* - Vol 13, 1964.
- [5] Peter W. Higgs. Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. *Physical Review Letters* - Vol 13, 1964.
- [6] CMS Twiki. [https ://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/HiggsWG](https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/CMS/HiggsWG), consulté en juillet 2012.
- [7] CMS Collaboration. Physics Performance. *Physics Technical Design Report, Vol II*, Juin 2006.
- [8] LHC Higgs Cross Section Working Group, S. Dittmaier, and C. Mariotti et al. Handbook of LHC Higgs Cross Sections : 2. Differential Distributions. *CERN-2012-002*, 2011.
- [9] Lucas Taylor. Higgs Boson, terms and definitions. [http ://cms.web.cern.ch/content/higgs-boson-terms-and-definitions](http://cms.web.cern.ch/content/higgs-boson-terms-and-definitions), juin 2012.
- [10] Site français du LHC. [http ://www.lhc-france.fr](http://www.lhc-france.fr), consulté en juillet 2012.
- [11] CMS Collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, Août 2008.
- [12] CMS Collaboration. Detector Performance and Software. *Physics Technical Design Report, Vol I*, Février 2006.
- [13] CMS Collaboration. The Level-1 Trigger. *The Trigger and Data Acquisition Project, Vol I*, Décembre 2000.
- [14] CMS Collaboration. Data Acquisition & High-Level Trigger. *The Trigger and Data Acquisition Project, Vol II*, Décembre 2002.
- [15] S. Baffioni, C. Charlot, F. Ferri, D. Futyan, P. Meridiani, I. Puljak, C. Rovelli, R. Salemo, and Y. Sirois. Electron Reconstruction in CMS. *CMS Note 2006/040*, février 2006.
- [16] C. Charlot. La reconstruction des électrons dans CMS. *Mémoire pour l'HDR*, janvier 2007.
- [17] The Egamma ID group. Tag and Probe methodology for analyses using electrons and photons. *CMS Analysis Note*, Avril 2012.
- [18] CMS Collaboration and S. Chatrchyan et al. Evidence for a new state in the search for the standard model Higgs boson in the H to ZZ to 4 leptons channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. *CMS-PAS-HIG-12-016*, 2012.