

L'expérience ATLAS au LHC

Le grand collisionneur de hadrons, le LHC (LARGE HADRON COLLIDER), est le dernier d'une série d'accélérateurs de particules situés au CERN. Il est décrit dans la section 2.1. Les analyses présentées dans cette thèse utilisent les données enregistrées par le détecteur ATLAS (A TOROIDAL LHC APPARATUS) qui est une des expériences présentes au LHC. Les caractéristiques principales du détecteur sont détaillées dans la section 2.2. La prise de données est décrite dans la section 2.3. Enfin, les ressources informatiques à disposition sont évoquées dans la section 2.4.

2.1 Le LHC, le grand collisionneur de hadrons

Situé près de Genève, le LHC [38] est un accélérateur de particules circulaire dont la circonférence est de 27 km, enfoui à environ 100 m sous terre, dans un tunnel où se trouvait précédemment le grand collisionneur électron-positron (LARGE ELECTRON-POSITRON COLLIDER, LEP) [25]. Il est caractérisé par une énergie dans le centre de masse atteignant aujourd'hui $\sqrt{s} = 13$ TeV pour des collisions protons-protons (pp).

2.1.1 La chaîne d'accélération

Les protons sont produits en amont, par l'ionisation des atomes d'une cible d'hydrogène. Ils sont injectés dans une chaîne d'accélération avant d'entrer dans le grand collisionneur suivant un schéma représenté sur la figure 2.1. Tout commence avec un accélérateur linéaire (LINAC2) qui donne aux protons une énergie de 50 MeV, suivi d'un accélérateur circulaire ayant un rayon de 25 m appelé Proton Synchrotron Booster (PSB), qui augmente l'énergie des protons jusque 1.4 GeV. S'en suit un synchrotron d'un rayon de 100 m qui augmente l'énergie des protons à 25 GeV. Vient par la suite le Super Proton Synchrotron (SPS) caractérisé par une circonférence de 7 km qui accélère les protons jusqu'à une énergie de 450 GeV. Les protons qui sortent du SPS sont finalement injectés par deux lignes de transfert dans le LHC, où ils circulent en deux faisceaux de directions opposées. L'énergie des protons s'accroît de 485 keV à chaque tour pour atteindre $\sqrt{s} = 13$ TeV pour le Run 2 qui s'est déroulé de 2015 à 2018.

Le LHC est un synchrocyclotron avec une fréquence de fonctionnement limitée à une plage réduite. Cette accélération périodique est faite grâce à huit cavités radiofréquences fournissant chacune un gradient de 5 MV/m et distribuées sur tout l'anneau. Cette radiofréquence doit être un multiple entier de la fréquence de révolution ce qui divise le faisceau en des paquets de protons («bunches»). Les protons sont contrôlés par plusieurs types d'aimants supraconducteurs, chacun assurant une fonction précise : les dipôles courbent les faisceaux tandis que les quadrupôles et les aimants d'ordre supérieur permettent de focaliser les protons et corriger la position des faisceaux.

CERN's Accelerator Complex

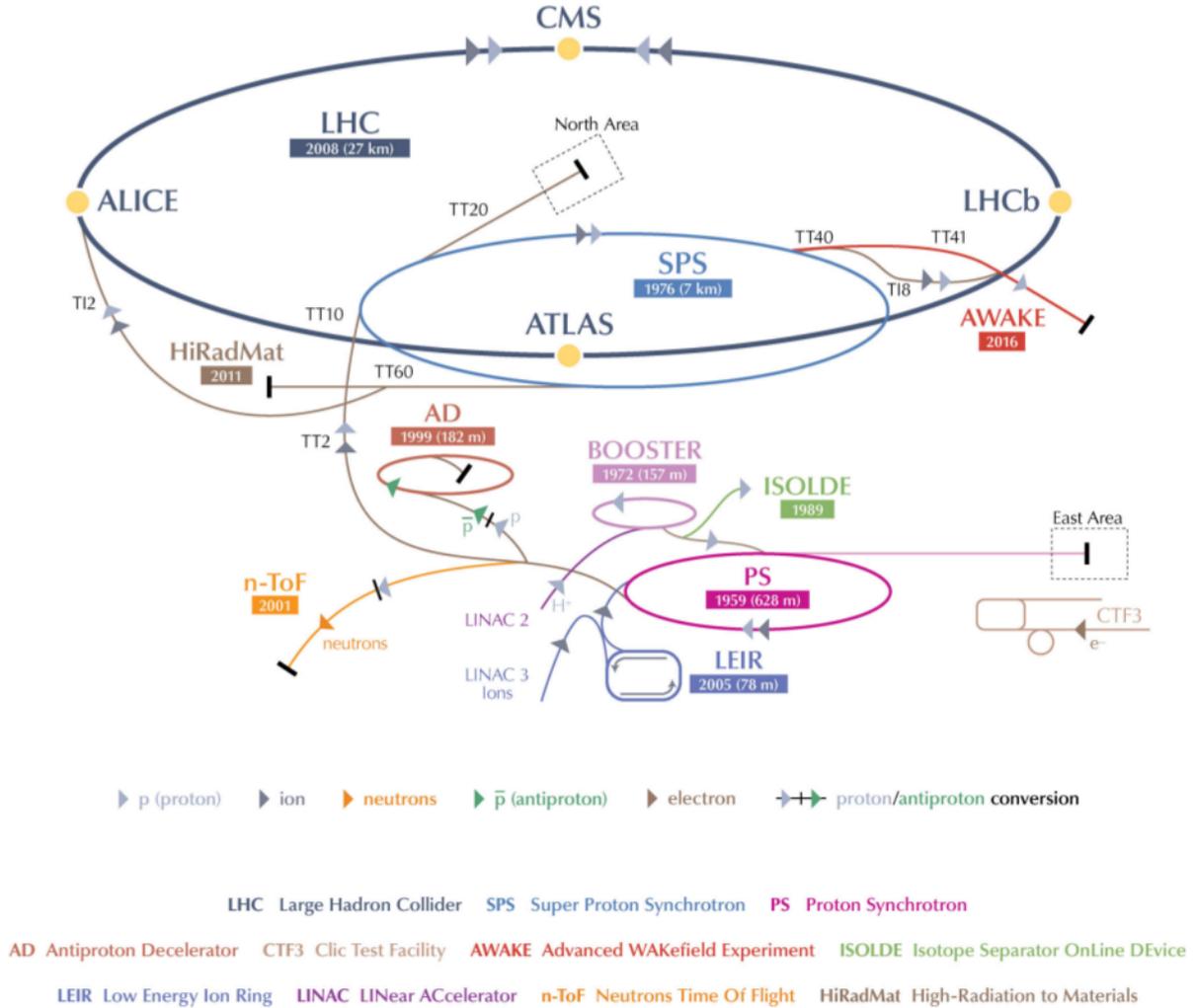


FIGURE 2.1 – Schéma représentant le complexe d'accélérateurs du CERN [84].

La relation liant le champ magnétique B à l'énergie des protons E et au rayon de courbure R est :

$$E = \sqrt{4\pi\alpha} \times \left(\frac{B}{T}\right) \left(\frac{R}{m}\right). \quad (2.1)$$

Suivant cette relation, l'énergie des protons augmente linéairement avec le champ électrique pour un rayon de courbure constant. Cette augmentation est contrainte par la température des supraconducteurs, qui est étroitement liée au nombre de protons par paquet. En effet, une particule chargée accélérée qui tourne rayonne. Cette radiation synchrotron est inversement proportionnelle à m^4 , m étant la masse de la particule. En augmentant le nombre de protons par paquet, la radiation synchrotron devient plus importante. L'équilibre entre nombre de protons et température des aimants a motivé le choix d'avoir 10^{11} protons par paquet.

Les faisceaux de protons rentrent en collisions quasi-frontales avec une fréquence de 40 MHz à chaque point d'interaction où se trouvent des détecteurs : ATLAS [85], CMS [86], LHCb [87] et ALICE [88]. Les deux premiers sont des détecteurs polyvalents optimisés pour des interactions protons-protons afin de rechercher et étudier le boson de Higgs, de tester la cohérence du modèle standard et de rechercher de la nouvelle physique. ALICE se focalise sur les études des interactions d'ions lourds qui permettent d'étudier le plasma quark-gluon. Enfin, LHCb est plus spécialisée dans le domaine des quarks de saveurs lourdes (b , c) afin d'étudier la violation de CP et donc l'asymétrie entre matière et antimatière.

2.1.2 Paramètres du faisceau

Les deux paramètres du faisceau les plus importants pour les mesures de physique sont l'énergie dans le centre de masse \sqrt{s} et la luminosité \mathcal{L} . Le LHC a fourni des collisions pp avec une énergie dans le centre de masse de 900 GeV en 2010, $\sqrt{s} = 7 - 8$ TeV pour le Run 1 en 2011-2012 et enfin $\sqrt{s} = 13$ TeV pour le Run 2 de 2015 à 2018. L'énergie de collision maximale d'opération à 14 TeV ne devrait être atteinte que lors de la prochaine prise de données, à partir de 2022.

La luminosité ne dépend que des paramètres de l'accélérateur. À cause des collisions inélastiques, *i.e.* au cours desquelles une partie de l'énergie cinétique des protons est convertie en nouvelles particules, le nombre de protons N dans les faisceaux décroît avec le temps. On surveille cette baisse grâce à la luminosité instantanée L et intégrée $\mathcal{L} = \int L dt$ qui sont des quantités liées à la section efficace σ :

$$N = \mathcal{L} \cdot \sigma . \quad (2.2)$$

La luminosité intégrée est exprimée en barn⁻¹ ($b^{-1} \approx 10^{28} \cdot m^{-2}$) et est utilisée pour quantifier les données.

En plus des processus physiques qui intéressent une étude donnée, des collisions « subsidiaires » auront lieu. On en distingue deux types selon l'interaction mise en jeu. Les interactions à longue distance entre les protons produisent des particules ayant une impulsion longitudinale élevée, celles-ci sont appelées des collisions « molles » (ou *minimum bias*). Les interactions « dures » sont quant à elles produites grâce aux interactions entre les partons des protons et peuvent produire des particules du modèle standard. Ce dernier type de collisions produites en grande partie via interaction forte (cf. section 1.2.1) induit des jets provenant des quarks et gluons.

La probabilité d'avoir plusieurs collisions inélastiques augmente linéairement avec la luminosité. On parle alors d'empilement (*pile-up*). Ce dernier représente un défi pour les analyses de physique. Il faut différencier les différents processus pour pouvoir trouver celui d'intérêt dans l'événement. La reconstruction des objets physiques est elle aussi plus complexe par les contributions énergétiques supplémentaires émergeant de ces radiations. On divise l'empilement en deux catégories : celles « en-temps » caractérisant les collisions survenues durant le même croisement de paquets et celles « hors-temps » qui viennent de croisements précédents. L'empilement est quantifié par le nombre moyen d'interactions par croisement, $\langle \mu \rangle$, qui est le paramètre de la distribution de Poisson donnant la probabilité d'avoir X interactions lors du croisement en question. Il est lié à la luminosité instantanée L , à la fréquence de révolution f du LHC et à la section efficace totale σ :

$$\mu = \frac{L \cdot \sigma}{f} . \quad (2.3)$$

La figure 2.2b montre la distribution du nombre moyen d'interactions par croisement de faisceau par année durant le Run 2 [89]. Le Run 2 a dépassé la luminosité instantanée de conception et a fourni

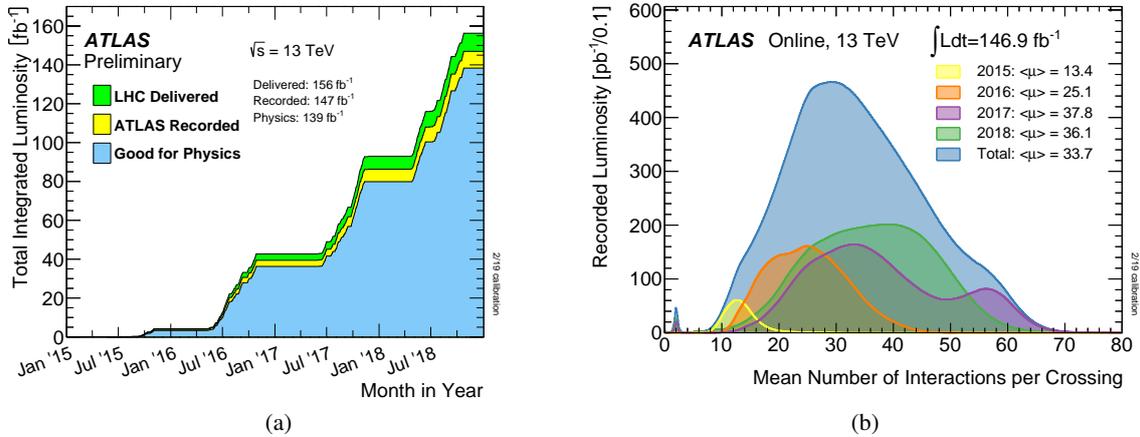


FIGURE 2.2 – Distributions montrant (a) la luminosité intégrée en fonction du temps délivrée par le LHC (en vert), enregistrée par ATLAS (en jaune) et celle gardée pour les analyses de physique (en bleu) avec les collisions pp à une énergie dans le centre de masse à 13 TeV et (b) le nombre moyen d’interactions par croisement de faisceau $\langle \mu \rangle$ donné par année durant le Run 2 [89].

une luminosité intégrée plus grande que prévue. La figure 2.2a montre la luminosité intégrée fournie par le LHC (156 fb^{-1}), collectée par ATLAS (147 fb^{-1}) et celle gardée pour les études physiques (139 fb^{-1}) durant tout le Run 2 [89]. L’augmentation de la luminosité instantanée est accompagnée par un accroissement du nombre moyen d’interactions par croisement de faisceau qui est passé de $\langle \mu \rangle = 20$ pour le Run 1 à $\langle \mu \rangle = 33,7$ pour l’ensemble du Run 2.

L’opération du LHC passe par plusieurs phases de collecte de données appelées *Run* et des phases d’arrêts pour des mises à niveau appelées *Shutdown*. La figure 2.3 montre une frise chronologique qui détaille le plan pour le LHC et le HL-LHC avec l’énergie dans le centre de masse obtenues ou prévues, et des phases de modifications techniques des quatre expériences majeures du CERN [90]. À la fin de la période d’arrêt dans laquelle nous sommes (LS2), courant 2021, le LHC reprendra la collecte de données pour le Run 3 de 2022 à 2024, durant lequel seront collectées autant de données que le Run 2 à une énergie dans le centre de masse de $\sqrt{s} = 13 - 14 \text{ TeV}$. Le Run 3 opérera avec les mêmes conditions expérimentales que le Run 2, avant de laisser place entre 2027 et 2035 au HL-LHC (HIGH LUMINOSITY LHC) [91].

2.2 L’expérience ATLAS

2.2.1 La collaboration et son programme d’études

ATLAS est une collaboration internationale [92] regroupant près de 181 institutions dans 38 pays et plus de 5500 collaborateurs de plus d’une centaine de nationalités, travaillant sur un projet de physique commun. Elle est l’une des plus grandes collaborations de la sorte. En France, de nombreux laboratoires participent à ce projet : 8 laboratoires du CNRS/IN2P3 [93] et de l’IRFU au CEA [94]. Le projet de ce détecteur [85], [95], [96] a été concrétisé en 1992 par la rédaction du « ATLAS Technical Proposal » [97]. L’objectif principal de sa conception était la recherche du boson de Higgs qui a été découvert en 2012 [16], [17]. Ce détecteur est aussi utilisé à des fins de tests de cohérence du modèle standard, des études dans les secteurs des interactions électrofaible et forte. On peut citer par exemple les mesures des différentes

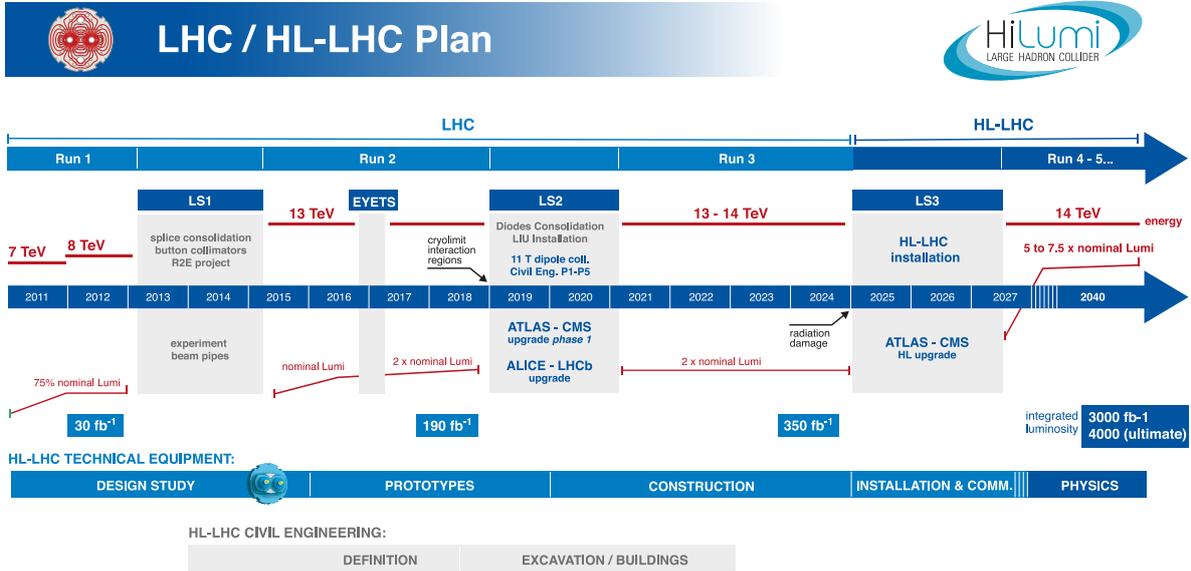


FIGURE 2.3 – Frise chronologique détaillant les étapes par lesquelles le LHC va passer dans les années à venir [90].

propriétés des bosons W et Z et du quark top. La physique des saveurs est aussi étudiée à travers des analyses sur les désintégrations rares des mésons B . La collaboration ATLAS mène aussi des recherches de physique au-delà du modèle standard, en allant directement chercher des résonances ou en posant des limites d'exclusion.

2.2.2 Description générale

ATLAS est une expérience polyvalente situé au Point 1 de l'anneau LHC. Il fait 44 m de long, a une hauteur de 25 m et pèse environ 7000 t. Il a une structure en oignon, typique des détecteurs de particules. Il est constitué de plusieurs sous détecteurs ayant un module principal qui entoure le tube à vide et appelé tonneau (*barrel*) et des modules cylindriques se trouvant de part et d'autre de ce dernier, appelés bouchons (*end-caps*).

L'origine du système de coordonnées cartésien direct est confondu avec le point d'interaction. L'axe x pointe vers le centre du LHC, l'axe y vers le haut et l'axe z suit l'axe de collision. La coordonnée radiale dans le plan (x,y) est notée R , et l'axe associé est noté r . L'angle azimutal ϕ est défini dans le plan (x,y) , et l'angle polaire θ dans le plan (r,z) . Ce dernier permet de définir la pseudo-rapacité η qui, dans le cas d'une particule ultra-relativiste, est une bonne approximation de la rapidité \mathcal{Y} . La propriété la plus importante de ces quantités est qu'une différence de (pseudo-)rapidité est invariante sous une transformation de Lorentz. Ces deux quantités sont définies de la sorte :

$$\mathcal{Y} = \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right) \xrightarrow{E \gg m} \eta = -\ln \tan \left(\frac{\theta}{2} \right). \quad (2.4)$$

Le tonneau est constitué de plusieurs détecteurs, chacun assurant la bonne détection d'un certain type de particule. Entourant le tube à vide, on trouve le trajectographe interne qui permet la reconstruction des

traces et la courbure, donc la quantité de mouvement, des particules chargées¹. Vient ensuite un système de calorimètres, électromagnétique et hadronique, permettant la détection des photons/électrons et des jets, respectivement. Enfin, on trouve un spectromètre à muons permettant la reconstruction des traces et la mesure de l'impulsion de ce type précis de particule. Le nom de l'expérience ATLAS est dû à un des deux types d'aimants supraconducteurs, les toroïdes. Ces derniers sont situés dans des cryostats et entourent le calorimètre hadronique. Ils génèrent un champ magnétique d'environ 4 T perpendiculaire à la trajectoire des particules chargées passant dans le spectromètre à muons. Dans la région du tonneau, le champ toroïdal de 4 T est assuré par huit boucles de courant. Deux toroïdes se trouvent dans la région des bouchons et ferment le champ magnétique. Le deuxième type d'aimant est un solénoïde situé dans un cryostat entre le détecteur interne et le calorimètre électromagnétique. Le champ magnétique constant de 2 T créé par ce solénoïde est dirigé selon l'axe du faisceau.

2.2.3 Le détecteur interne

Le détecteur interne [98], [99] est installé à une distance de quelques centimètres du tube à vide. Il a une couverture angulaire complète en ϕ et permet de détecter des particules qui sont à l'avant avec une pseudo-rapacité jusqu'à $|\eta| < 2,5$. Il a une taille de 6,2 m et un diamètre de 2,1 m. Les principaux buts du détecteur interne sont de mesurer les impulsions des particules chargées dès 500 MeV, ainsi que le positionnement des vertex primaires et secondaires jouant un rôle dans l'étiquetage des jets de b . La figure 2.4a montre une vue générale du détecteur interne et la figure 2.4b montre les distances par rapport au tube à vide de chaque couche des sous-détecteurs. On en compte trois : le détecteur à pixels, le détecteur à micro-pistes (SCT) et le détecteur à rayonnement de transition (TRT).

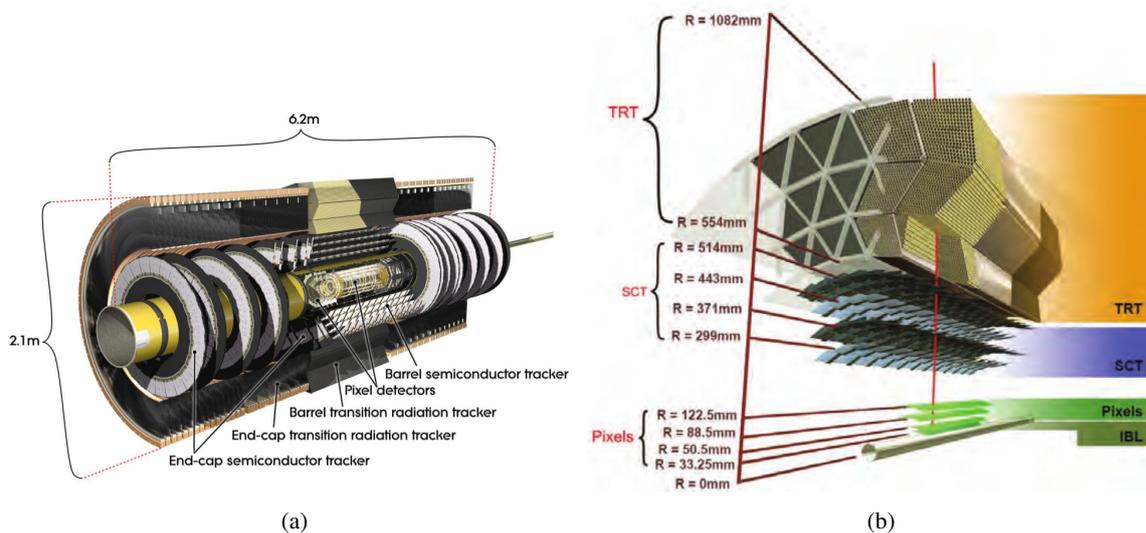


FIGURE 2.4 – Vue (a) générale du détecteur interne d'ATLAS et (b) approchée selon une coupe transverse [85].

1. $p = q \cdot B \cdot R$, où p est la quantité de mouvement, B le champ magnétique, R , le rayon de courbure. Cette équation est dérivée de la conservation de l'énergie.

2.2.3.1 Le détecteur à pixels

Le détecteur à pixels [100] est la première couche avec laquelle les particules peuvent interagir. Il comporte trois disques de part et d'autres dans la région des bouchons à une distance de $z = \pm 495$ mm, ± 580 mm et ± 650 mm respectivement, et trois couches dans la région du tonneau qui existent depuis le Run 1 appelées : couche- b (b -layer), Layer 1 et Layer 2 qui sont à une distance du faisceau de 50,5 mm, 85,5 mm et 122,5 mm respectivement. La quatrième couche appelée IBL (INSERTABLE B-LAYER) [101] n'a été ajoutée qu'à partir du début du Run 2 à une distance de 33 mm du faisceau. Elle permet un meilleur étiquetage des particules de saveurs lourdes (principalement quark b et lepton τ) et une meilleure reconstruction des vertex. Ces couches permettent aussi de faire la séparation entre les électrons et les photons convertis en paires électron-positron, celle-ci se déroulant généralement après la traversée du photon dans le milieu. Toutes les couches sont équipées de capteur planaires (*planar sensors*), à l'exception des extrémités de l'IBL qui sont formées de capteurs avec une technologie 3D. Ces capteurs à pixels ont une taille de $250 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ pour l'IBL et de $400 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ pour les autres couches. Ceci permet une résolution de $10 \mu\text{m}$ dans la direction $R - \phi$ et de $100 \mu\text{m}$ dans la direction du faisceau.

2.2.3.2 Le détecteur à micro-pistes de silicium

Le détecteur à micro-pistes de silicium (ou *SemiConductor Tracker* (SCT) [85]) est formé de quatre couches concentriques de rayons 299, 371, 443 et 514 mm, respectivement et de neuf disques de part et d'autres de la région des bouchons. Une couverture en pseudorapidité jusqu'à $|\eta| < 1,1$ ($|\eta| < 2,5$) est assurée par les composantes du (des) tonneau (bouchons). Le mécanisme de détection est le même que pour le détecteur à pixels, tous les deux utilisant la même technologie à base de silicium. Un module est composé de quatre détecteurs : deux de chaque côté des modules qui sont tournés d'un angle de 40 mrad. Ceci a permis la réduction du nombre de voies de lectures atteignant 6,3 millions. Les pistes ont une taille de $80 \mu\text{m}$ dans le plan $R - \phi$ et de 6,4 cm dans la direction du faisceau. La résolution sur la position est donc meilleure que dans le plan $R - \phi$ où elle est de $17 \mu\text{m}$ alors qu'elle n'est que de $580 \mu\text{m}$ dans la direction longitudinale (radiale) pour le tonneau (bouchons).

2.2.3.3 Le détecteur à rayonnement de transition

Le détecteur à rayonnement de transition (ou *Transition Radiation Tracker* (TRT)) [85] est la couche la plus externe du détecteur interne. Il couvre une pseudo-rapidité allant jusqu'à $|\eta| < 2,0$ et est à une distance entre 55 – 110 cm du faisceau. Il est constitué de tubes à dérives (ou pailles) de 4 mm de diamètre et 0,7 m de longueur contenant un fil de tungstène et un mélange gazeux à base de Xenon qui a été modifié, suite à des problèmes de corrosion dus à des fuites de gaz, pour une utilisation d'un gaz à base d'Argon moins coûteux. Le passage d'une particule ionise le milieu et les charges ainsi produites sont collectées par le fil de tungstène. Le tonneau consiste en 53 000 pailles, et chaque bouchon en contient 122 880. Le TRT procure environ 40 points de mesure par traces, contribuant à la bonne reconstruction de celles-ci. Il permet aussi d'identifier des particules, en particulier les électrons, ceux-ci émettant plus de rayonnement de transition que les autres particules chargées, du fait de sa masse. La résolution en position dans la direction $R - \phi$ est de $130 \mu\text{m}$.

2.2.3.4 Performances du détecteur interne

La résolution attendue repose sur l'hypothèse qu'une trace reconstruite a laissé en moyenne dans le tonneau, trois, huit et trente-six points de mesure pour le détecteur à pixels, le SCT et le TRT respectivement. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = 0,05\% \times p_T[\text{GeV}] \oplus 1\% . \quad (2.5)$$

2.2.4 Le système calorimétrique

Le système calorimétrique a pour but la reconstruction de la position et de l'énergie ainsi que l'identification des électrons et photons par le calorimètre électromagnétique, et des hadrons par le calorimètre hadronique.

2.2.4.1 Le calorimètre électromagnétique

Le calorimètre électromagnétique [102] est un calorimètre à échantillonnage composé d'argon liquide pour la matière active et d'absorbeurs en plomb permettant la perte d'énergie des particules. Il est représenté sur la figure 2.5. Dans les régions du tonneau et des bouchons, les absorbeurs ont une épaisseur fixée entre 1,5 et 1,7 mm. La matière active a une épaisseur de 2,1 mm (de 0,9 à 3,8 mm) dans la région du tonneau (des bouchons). Sa forme en accordéon permet d'avoir des voies de lectures à l'avant et à l'arrière offrant une couverture complète en ϕ . Le tonneau est divisé en deux parties, chacune ayant une longueur de 3,2 m comportant 1024 absorbeurs chacun et une épaisseur entre 22 et 24 longueurs de radiation X/X_0 . Le bouchon est quant à lui divisé en deux roues, chacune couvrant les régions $1,375 < |\eta| < 2,5$ et $2,5 < |\eta| < 3,2$. La région de transition entre les parties bouchons et tonneau, dans laquelle se trouve des câbles alimentant le détecteur interne, couvre l'intervalle $1,37 < |\eta| < 1,52$ et est souvent exclue des analyses. Le calorimètre est formé de trois compartiments permettant une mesure précise des gerbes. Chacune possède une fonction précise :

Le premier compartiment a pour fonction principale de déterminer le début du développement des gerbes électromagnétiques et ainsi de permettre de séparer, en particulier, les photons individuels de ceux issus de la désintégration d'un pion π^0 en deux photons. Il est aussi utile pour corriger les signaux des problèmes de diaphonie. Il est caractérisé par une granularité très fine $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,003 \times 0,1$ radian et une profondeur de $4 X_0$. Il contient 57 216 cellules dans la région $|\eta| < 1,4$ et 1536 dans $1,4 < |\eta| < 1,475$.

Le deuxième compartiment est la partie principale du calorimètre et permet de collecter la majeure partie de l'énergie des électrons et des photons. Il est caractérisé par une granularité de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,025 \times 0,025$ radian, moins fine que celle du premier compartiment, et une profondeur de 16 à $18 X_0$. Dans la région $|\eta| < 1,4$, il contient 28 672 cellules et 512 cellules dans la région $1,4 < |\eta| < 1,475$.

Le troisième compartiment permet de mesurer les queues des gerbes des électrons et des photons les plus énergétiques. Il est caractérisé par une granularité plus large de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,05 \times 0,025$ radian et une profondeur de $2 X_0$. Il se trouve dans la région $|\eta| < 1,35$ où il contient 13 824 cellules.

Le calorimètre à pré-échantillonnage [103] est une fine couche d'argon liquide installée entre le calorimètre électromagnétique et le détecteur interne, couvrant la région jusqu'à $|\eta| < 1,8$. Il permet de quantifier et de corriger les pertes d'énergie en amont dues aux interactions avec le milieu environnant (solénoïde et structure du détecteur).

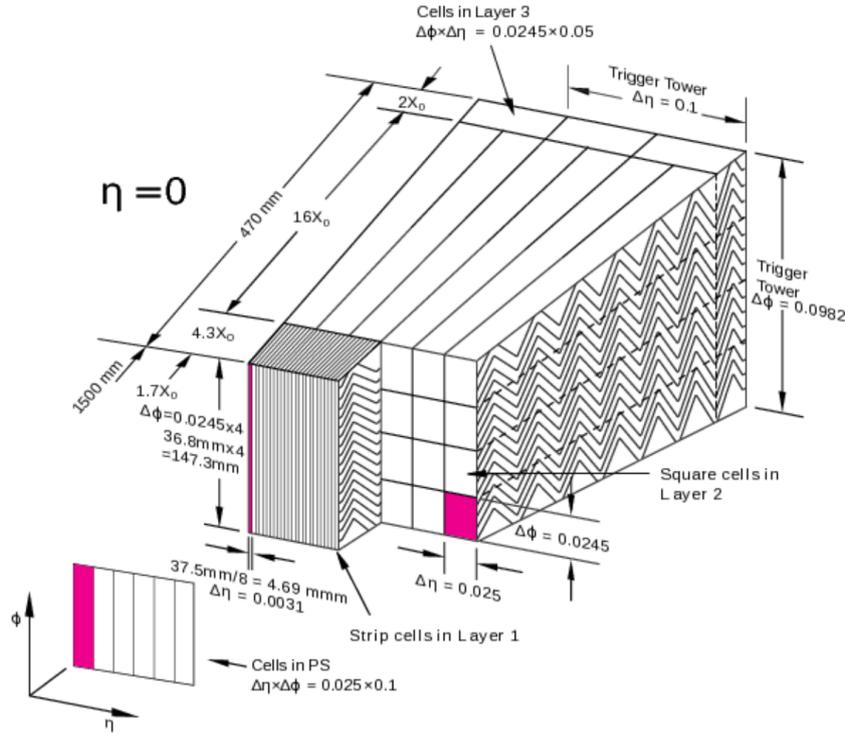


FIGURE 2.5 – Schéma représentant le calorimètre électromagnétique d'ATLAS [85].

2.2.4.2 Le calorimètre hadronique

Le calorimètre hadronique est constitué de deux parties, le calorimètre à tuiles [104] montré sur la figure 2.6 et les bouchons hadroniques [85]. Il a pour but de compléter la mesure de la position et de l'énergie des jets. Ceux-ci déposent en effet environ deux tiers de leur énergie dans le calorimètre électromagnétique. Il est aussi utile pour la mesure de l'énergie transversale manquante.

Le calorimètre à tuiles (ou *Tile Calorimeter*, TileCal) : Ce calorimètre à échantillonnage est composé d'absorbeurs en acier et de tuiles en polystyrène dopé. Il consiste en 460 000 tuiles de scintillateurs avec 9852 voies de lecture, 5760 pour la partie tonneau et 4092 pour les parties avant. Les photons produits par l'excitation des molécules par les hadrons sont alors conduits grâce à un réseau de fibres optiques vers des photomultiplicateurs. Il enveloppe le calorimètre électromagnétique dans la partie tonneau qui s'étend jusqu'à $|\eta| < 1$ et comprend deux parties bouchons ($0,8 < |\eta| < 1,7$). Il est segmenté en trois couches ayant une épaisseur de 1,5, 4,1, et 1,8 longueur d'interactions λ_I pour le tonneau, et 1,5, 2,6, et 3,3 λ_I pour les bouchons. Les deux premières couches ont une granularité de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,2 \times 0,1$ et de $0,1 \times 0,1$ radian pour la troisième couche.

Les bouchons hadroniques (ou *Hadronic Endcap Calorimeter*, HEC) sont situés dans la région $1,5 < |\eta| < 3,2$. Ce sont deux roues qui abritent des plans perpendiculaires au faisceau. Du cuivre est utilisé pour les absorbeurs et de l'argon liquide pour le milieu actif. Ils ont une granularité de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1$ ($0,2 \times 0,1$) radian dans la région $1,5 < |\eta| < 2,5$ ($2,5 < |\eta| < 3,2$).

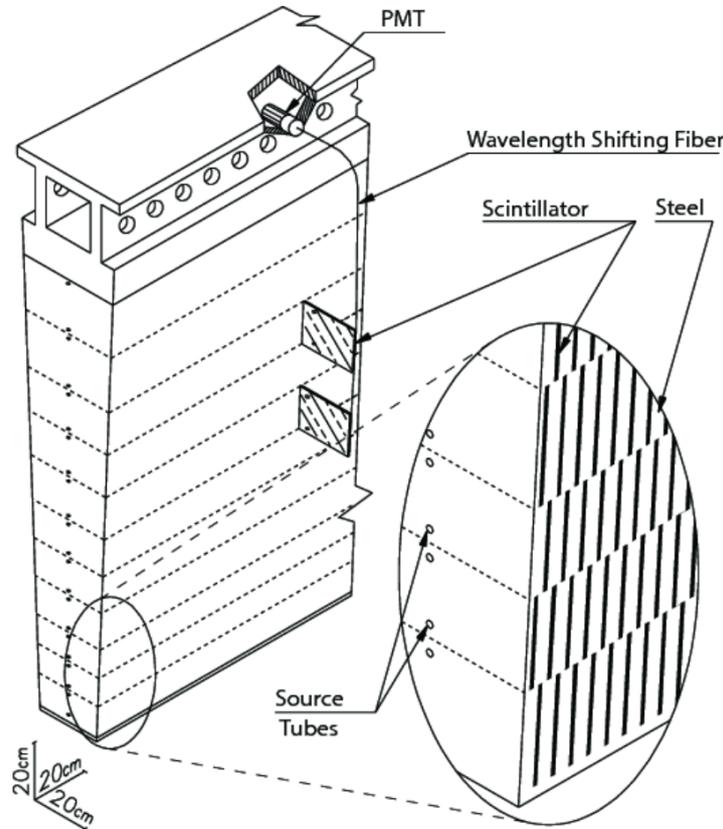


FIGURE 2.6 – Schéma représentant le calorimètre à tuiles d'ATLAS [104].

2.2.4.3 Les calorimètres à l'avant

Les calorimètres électromagnétiques très à l'avant ($3,1 < |\eta| < 4,9$) permettent d'acquérir une herméticité du détecteur. Ils sont formés de matrices de cuivre entrecoupées d'argon liquide. Ils possèdent une granularité de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1$ radian.

Le calorimètre hadronique à l'avant doit faire face à un flux très important de rayonnement. On y trouve donc deux types d'absorbeur en alternance, une couche en cuivre et deux couches en tungstène. Dans les deux cas, l'argon liquide constitue le milieu actif. Il est utilisé pour des analyses physiques qui reconstruisent des jets très à l'avant et permet aussi de peaufiner le calcul de l'énergie transversale manquante. Il possède une granularité de $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,2 \times 0,2$ radian.

2.2.4.4 Performances du système calorimétrique

Les exigences sur les résolutions des calorimètres sont données en terme de résolution en énergie. Celle-ci est décrite par la somme directe de trois termes. Le premier, le terme d'échantillonnage, comprend tous les effets liés aux fluctuations de la fraction d'énergie des gerbes. Le deuxième terme, le terme de bruit, prend en compte l'empilement et le bruit électronique. Enfin vient le troisième terme, le terme constant, qui est dû aux non uniformités, à la qualité de l'étalonnage et à la non-linéarité de la réponse en énergie.

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c. \quad (2.6)$$

Le calorimètre électromagnétique est caractérisé par une excellente résolution, où le terme d'échantillonnage dépendant de η varie de 0 à 20% avec une valeur de $a = 0,1 \text{ GeV}^{1/2}$ à $\eta = 0$. Le terme de bruit a une valeur moyenne de 0,3 GeV mais varie avec la luminosité instantanée [105]. Enfin, le dernier terme est de l'ordre de 0,7%. Ainsi, à $\eta = 0$, on a :

$$\frac{\sigma_E}{E \text{ (GeV)}} = \frac{10\%}{\sqrt{E \text{ (GeV)}}} \oplus \frac{0,3}{E \text{ (GeV)}} \oplus 0,7\% . \quad (2.7)$$

Pour le calorimètre hadronique la résolution en énergie dépend des technologies utilisées. Dans la partie tonneau, des scintillateurs sont utilisés et de l'argon liquide dans la partie bouchons. La résolution en énergie est donc de :

$$\frac{\sigma_{PT}}{PT} = \begin{cases} \frac{56\%}{\sqrt{E}} \oplus 5,5\%, & \text{pour la partie tonneau} \\ \frac{71\%}{\sqrt{E}} \oplus 5,8\%, & \text{pour la partie bouchons} \end{cases} \quad (2.8)$$

Enfin, la région à l'avant possède la plus faible résolution en énergie :

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{100\%}{\sqrt{E}} \oplus 10\% . \quad (2.9)$$

2.2.5 Le spectromètre à muons

Le spectromètre à muons [106] consiste en quatre types de chambres couvrant jusqu'à $|\eta| < 2,7$. Il a pour but la mesure de la trajectoire et de l'impulsion des muons qui traversent le détecteur sans avoir perdu beaucoup d'énergie jusque là. Il est immergé dans le champ magnétique toroïdal décrit précédemment. La figure 2.7 montre le système de chambres à muons. Quatre technologies de détection sont utilisées : les tubes à dérive, (*Monitoring Drift Tubes, MDT*) et les chambres à pistes cathodiques (*Cathode Strip Chambers, CSC*) couvrent une région allant jusque $|\eta| < 2,7$. Les chambres à plaques résistives (*Resistive Plate Chambers*) et à fentes minces (*Thin Gap Chambers*) forment un système de déclenchement autonome dans une région allant jusque $|\eta| < 2,4$.

Les tubes à dérive (ou *Monitoring Drift Tubes, MDT*) constitués de deux multi-couches de trois ou quatre couches d'un diamètre de 3 cm contenant un mélange gazeux porté à une pression de 3 bar. En tout, il existe près de 350 000 tubes. L'anode en tungstène soumise à une grande tension possède un diamètre de $50 \mu\text{m}$ et permet de collecter les électrons générés par les muons ionisant le mélange gazeux. La puissance du signal est proportionnelle à l'énergie incidente, à la pression du gaz et au potentiel électrique. Les 1088 chambres ont une résolution spatiale de $80 \mu\text{m}$ et un temps de dérive des particules de 700 ns.

Les chambres à pistes cathodiques (ou *Cathode Strip Chambers, CSC*) sont divisées en seize secteurs organisés en deux disques contenant chacun huit chambres. Ces dernières sont faites d'un ensemble de réseaux d'anodes chargées positivement et de cathodes en cuivre chargées négativement perpendiculaires aux anodes. Le passage d'un muon ionise le mélange gazeux dans lequel ce réseau baigne ce qui entraîne la création d'une paire électron-ion. L'électron dérive vers l'anode tandis que l'ion dérive vers la cathode. La disposition perpendiculaire permet ainsi d'avoir deux coordonnées avec une résolution spatiale de $40 \mu\text{m}$ dans la direction radiale et de 5 mm dans la direction longitudinale. La résolution temporelle est de 7 ns.

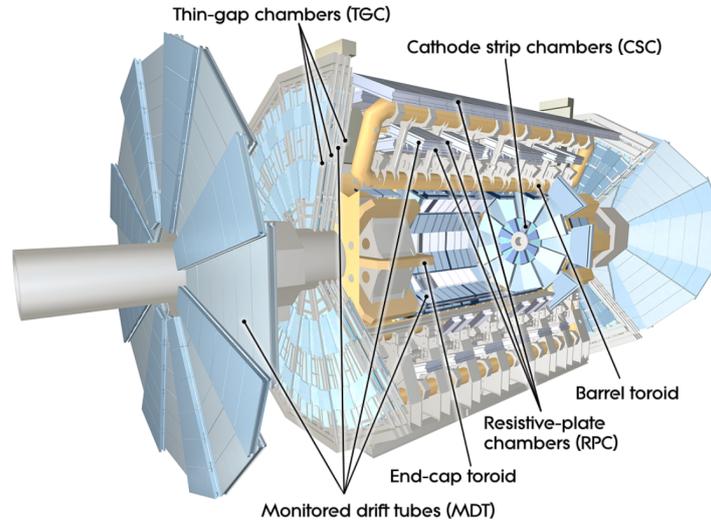


FIGURE 2.7 – Schéma représentant les différentes technologies utilisées dans le spectromètre à muons d'ATLAS [85].

Les plaques resistives (ou *Resistive Plate Chambers*, RPC) sont des détecteurs gazeux dont le principe de détection des particules repose aussi sur l'ionisation d'un gaz. Les plaques sont faites de bakélite d'une épaisseur de 2 mm soumises à un potentiel de 9.8 kV. Elles sont caractérisées par une résolution en temps de 1 ns qui leur permettent d'être utilisées comme système de déclenchement dans la région du tonneau. Deux séries de voies de lecture orthogonales s'y trouvent, parallèles (perpendiculaires) aux MDT suivant $\eta(\phi)$, offrant un système de coordonnées bi-dimensionnelle entraînant une bonne résolution spatiale.

Les chambres à fentes minces (ou *Thin Gap Chambers*, TGC) sont constituées de fils étroitement espacés soumis à une tension positive, encadrés par des cathodes reliées à la terre. Elles ont une résolution temporelle de 4 ns et sont utilisées comme système de déclenchement pour les muons dans la région des bouchons. Elles fournissent également une mesure des trajectoires des muons complémentaires à celles fournies par les chambres de précision, à savoir MDT et CSC.

2.2.5.1 Performances du spectromètre

La résolution de reconstruction des muons vient de la combinaison des données du spectromètre ainsi que des données du détecteur interne. Elle est dépendante de leur énergie et de leur position dans le détecteur. Ainsi, on a :

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \begin{cases} 10\%, & \text{si } p_T = 1 \text{ TeV} \\ 4\%, & \text{si } p_T = 50 \text{ GeV} \end{cases} \quad (2.10)$$

2.2.6 Les détecteurs à l'avant

Des détecteurs supplémentaires, plus spécialisés, sont situés très à l'avant. Ils ne sont opérationnels que dans des conditions de très basse luminosité et de faible empiement, étant donné qu'ils sont exposés à de très fortes radiations. Les deux premiers sont dédiés à la mesure de la luminosité instantanée (LUCID et ALFA), les deux suivants permettent, quant à eux, d'obtenir des informations supplémentaires à des fins d'analyses de physique.

LUCID, pour *LUminosity measurement using Cherenkov Integrating Detector* [85], est installé à ± 17 m du centre du détecteur couvrant les régions $5,5 < |\eta| < 5,9$. Il est crucial pour la vérification des conditions du faisceau et pour la détermination de la luminosité instantanée au cours de la prise des données à travers des calculs de sections efficaces inélastiques (scans de Van der Meer) [107].

ALFA, pour *Absolute Luminosity For ATLAS* [85], situé à ± 240 m du point d'interaction et est utilisé pour le calcul des sections efficaces élastiques à partir des protons déviés avec un petit angle.

ZDC, pour *Zero Degree Calorimeter* [85], comporte quatre modules formés de plaques de tungstène. Il est à ± 140 m du point d'interaction et permet la détection des particules neutres à très grande pseudo-rapacité ($|\eta| > 8,3$) n'ayant pas été affectées par le champ magnétique d'ATLAS.

AFP, pour *ATLAS Forward Proton* [108], permet d'effectuer des études de diffraction à l'aide des protons à très bas angle $\sim 100\mu\text{rad}$.

2.3 La prise de données

2.3.1 Le système de déclenchement

La fréquence de croisement des faisceaux étant de 40 MHz et le taux d'empilement d'environ 25, c'est environ un milliard de collisions qui se produisent toutes les secondes. Si toutes les données brutes étaient gardées, le taux d'enregistrement serait de 60 To/s. Un système de déclenchement est alors essentiel afin de sélectionner les événements intéressants. La figure 2.8 montre un schéma résumant les différentes parties du déclencheur comme utilisé dans le Run 2 [109]. Il est monté en deux niveaux.

Le premier niveau (*Level-1 trigger, L1*) effectue une sélection des événements dans un laps de temps de $2,5 \mu\text{s}$ en recherchant des informations élémentaires dans le détecteur comme la présence de leptons, de photons, de jets à haut moment transverse, ainsi que de grandes valeurs d'énergie transverse manquante. Il réduit la fréquence d'enregistrement des données de 40 MHz à 100 kHz. Des régions d'intérêt, *Region of Interest* ou RoI, sont alors définies en η et ϕ où des objets d'intérêts ont été identifiés. Ce niveau sélectionne alors le croisement d'intérêt en se basant sur les informations des TGC du spectromètre à muons et le système calorimétrique. À ce niveau, plusieurs déclencheurs sont définis au préalable afin de sélectionner les événements et font partie du menu de déclenchement.

Les événements sélectionnés par le L1 passent ensuite à un deuxième niveau de déclenchement qui divise le taux d'enregistrement par un facteur 100. Le déclencheur HLT, *High-Level Trigger*, utilise toute la granularité et la précision du détecteur contrairement au niveau précédent. La latence de ce déclencheur est de 200 ms, durant lesquelles ce déclencheur vérifie si les objets demandés par le déclencheur sont bien présents dans l'évènement enregistré.

La nomenclature pour un type de déclenchement dans ATLAS se présente sous la forme suivante :

[NIVEAU]_[N]_[TYPE(S)]_[SEUIL]_[ISOLATION]_[QUALITÉ]

où [NIVEAU] désigne quel déclencheur est utilisée (L1 ou HLT), [N][TYPE(S)] désignent le type et la multiplicité des objets, [SEUIL] désigne le seuil du moment transversal pour une sélection du déclenchement, [ISOLATION] désigne le point de travail d'isolation *isolation working point*, [QUALITÉ] désigne la rigueur de l'exigence dans les algorithmes. Un exemple de déclencheur utilisé dans les analyses détaillées dans cette thèse est HLT_e140_lhloose_nod0 qui sélectionne des événements avec un électron avec un critère d'identification relâché (*loose*) ayant un $p_T > 140$ GeV.

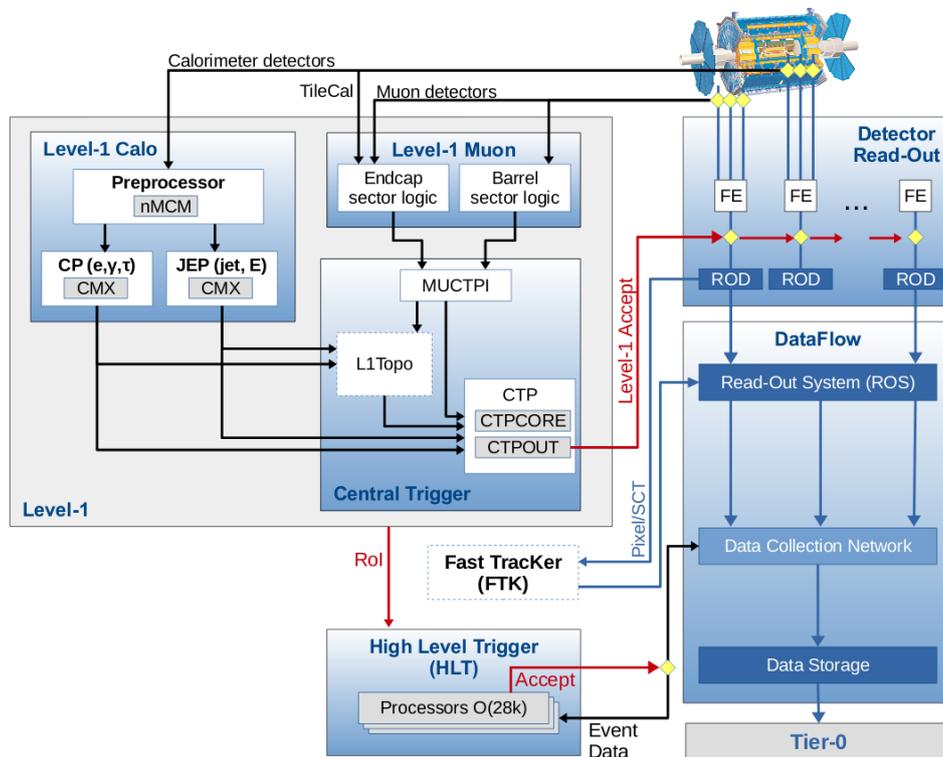


FIGURE 2.8 – Le système de déclenchement et une partie du système d’acquisition d’ATLAS durant le Run 2 [109].

2.3.2 L’acquisition et le suivi de la qualité des données

Le suivi du fonctionnement global du détecteur est fait par le système d’acquisition (ou DAQ pour *Data Acquisition system*). Ce système contrôle le bon fonctionnement du matériel, des systèmes de déclenchement et le bon enregistrement des données. Le DCS (*Detector Control System*) contrôle quant à lui chaque sous détecteur en temps réel. Le tout est piloté par le *run control* responsable du démarrage et de l’arrêt des sous détecteurs et donc de l’acquisition des données par ces derniers. Ces systèmes sont suivis en temps réel par des *shifters* dans la salle de contrôle.

Lors de la prise de données, des dysfonctionnements d’une partie du détecteur peuvent survenir au moment de l’acquisition des événements et affecter leur qualité. Les intervalles de prises de données impactées sont alors étiquetés soit lors de l’acquisition soit après, par d’autres *shifters* regardant la qualité des données sur les objets reconstruits et étalonnés, suivant des critères définis par les groupes de chaque sous-détecteur. La figure 2.9 montre le pourcentage de données étiquetées comme étant de bonnes qualités pour des analyses de physique pour les différents sous-détecteurs au cours du Run 2. Le niveau de fonctionnement de chaque sous-détecteur est supérieur à 99%, permettant d’obtenir 95,6% de données étiquetées comme de bonne qualité pour l’ensemble des détecteurs, soit 139 fb^{-1} de données collectées. Certaines analyses ont besoin de données de quelques sous-détecteurs et non pas du détecteur en entier. Des listes appelées *Good Run List*, *GRL* sont ainsi définies. Elles définissent des listes de blocs de luminosité remplissant les exigences des différentes analyses.

ATLAS pp Run-2: July 2015 – October 2018										
Inner Tracker			Calorimeters		Muon Spectrometer				Magnets	
Pixel	SCT	TRT	LAr	Tile	MDT	RPC	CSC	TGC	Solenoid	Toroid
99.5	99.9	99.7	99.6	99.7	99.8	99.6	100	100	99.8	98.8
Good for physics: 95.6% (139 fb⁻¹)										
Luminosity weighted relative detector uptime and good data quality efficiencies (in %) during stable beam in pp collision physics runs with 25 ns bunch-spacing at $\sqrt{s}=13$ TeV for the full Run-2 period (between July 2015 – October 2018), corresponding to a delivered integrated luminosity of 153 fb ⁻¹ and a recorded integrated luminosity of 146 fb ⁻¹ . Runs with specialized physics goals are not included. Dedicated luminosity calibration activities during LHC fills used 0.6% of recorded data in 2018 and are included in the inefficiency. Trigger-specific data quality problems (0.4% inefficiency at Level-1) are included in the overall inefficiency. When the stable beam flag is raised, the tracking detectors undergo a so-called "warm start", which includes a ramp of the high-voltage and turning on the pre-amplifiers for the Pixel system. The inefficiency due to this, as well as the DAQ inefficiency, are not included in the table above, but accounted for in the ATLAS data taking efficiency.										

FIGURE 2.9 – Performance du détecteur ATLAS pour l'ensemble du Run 2 avec une énergie dans le centre de masse $\sqrt{s} = 13$ TeV et un espacement entre les paquets de 25 ns [110].

2.4 Ressources informatiques

2.4.1 Environnement logiciel

L'environnement logiciel utilisé par la collaboration pour la reconstruction et l'analyse des données, pour la simulation ainsi que pour le traitement des bases de données relatives aux informations sur les conditions du détecteur est appelé ATHENA [111]. Il est constitué de bibliothèques logicielles programmées pour l'essentiel grâce au langage C++. Il est fortement couplé au logiciel ROOT [112]. Le langage python est utilisé pour la création des procédures de calcul utilisant ces bibliothèques. Le logiciel ATHENA est développé en plusieurs sous-projets plus spécifiques pour la simulation, la reconstruction, l'analyse ou les développements pour les mises à niveau futures du détecteur. Pour chacun des projets, des versions successives sont mises à disposition et sont accessibles sur les différents centres de calcul. Une version majeure d'ATHENA est produite environ tous les six mois, mais des versions intermédiaires existent, utilisées principalement par les développeurs du code : des versions de développement à un rythme approximatif d'une par mois et des versions quotidiennes, compilées chaque nuit. Les versions pour l'analyse, comme celles pour la physique du quark top, apparaissent presque toutes les semaines. Le système d'exploitation utilisé est une distribution GNU/linux (CentOS).

2.4.2 La mise en format et l'agencement des données

Les données acquises à la sortie des différents systèmes de déclenchements sont des données brutes, produites par les centaines de millions de voies électroniques du détecteur, et sont enregistrées dans un format appelé RAW. À l'issue du déclenchement chaque événement occupe environ 1,8 Mio d'espace

disque. Une année de prise de données nécessite ainsi plusieurs Pto d'espace disque. La reconstruction de ces données brutes, en données contenant des objets reconstruits tel que des électrons, photons, muons ou jets se fait en plusieurs étapes successives :

- tout d'abord, des algorithmes de recherches de formes sont appliqués aux données brutes, séparément dans chaque sous-détecteur. À l'issue de cette étape sont reconstruites des traces dans le trajectographe interne ou dans les spectromètres à muons, et des cellules ou amas de cellules dans les calorimètres ;
- ces informations, propres à chaque sous-détecteur, sont ensuite combinées afin d'obtenir une meilleure estimation des paramètres cinématiques des particules, et permettre ainsi de calculer les variables nécessaires à leur identification. Après ces deux étapes, un événement occupe environ 1 Mio. Ce format, anciennement appelé ESD (*Event Summary Data*) n'est plus sauvegardé depuis quelques années pour diminuer l'utilisation de l'espace disque ;
- les informations obtenues lors des deux premières étapes sont exploitées afin de créer des objets correspondant aux particules physiques et à l'impulsion transverse manquante. Cette étape permet de réduire la quantité d'informations associées à chaque événement, en éliminant des informations peu pertinentes pour les analyses de physique telles que la localisation de tous les points d'impacts dans le trajectographe ou des dépôts d'énergies dans chaque cellule des amas calorimétriques associés aux objets reconstruits. Le volume occupé par un événement à l'issue de cette dernière étape est fortement réduit et occupe environ 100 kio. Ce format de données, appelé AOD (*Analysis Object Data*), n'inclue ainsi que les informations utiles pour les analyses de physique.
- un format encore plus petit, environ 10 kio par événement, est alors créé spécifiquement pour la plupart des analyses. Ce format est appelé DAOD (*Derived Analysis Object Data*). Près d'une centaine de formats sont ainsi créés, chacun réduisant à la fois l'information disponible par événement mais aussi effectuant une préselection visant à réduire ce nombre d'événements. Ainsi, pour la physique du quark top 5 formats sont produits. Ceux qui nous intéressent dans le cadre de cette thèse sont les formats TOPQ1 et TOPQ5 qui seront décrits plus en détails au début du chapitre 5. Au final, la place prise par l'ensemble des DAODs est du même ordre que celle prise par les AODs.

2.4.3 Moyen de calcul et de stockage

Un ensemble de ressources de calcul et de stockage de données a été développé au sein du projet WLCG (World LHC Computing Grid [113]). Cet ensemble de ressources, appelé grille de calcul, est distribué à travers de nombreux sites de par le monde et est organisé selon une architecture en plusieurs niveaux appelés Tiers.

Le Tier-0, localisé au CERN, est dédié à la première reconstruction et au stockage des données enregistrées par le détecteur, avant que celles-ci ne soient transmises aux différents Tiers, localisés dans différents pays. Initialement très hiérarchisé, le modèle en Tiers s'est largement assoupli avec la montée en puissance et le bon fonctionnement des réseaux. Il y a une dizaine de Tier-1 et une centaine de Tier-2. Ils effectuent la reconstruction et l'analyse des événements, la simulation et le stockage des données. Les Tier-1 correspondent le plus souvent à des grands centres nationaux. Ainsi, le Centre de Calcul de

l'IN2P3 [114] situé à Villeurbanne est l'un des grands Tier-1 de la collaboration. Les Tier-2 sont en général localisés dans les laboratoires. En France, sept des huit laboratoires possède un tel centre de calcul. La différence majeure entre les Tier-1 et les Tier-2 reste la taille, les Tier-1 étant en général bien plus gros, et le système de stockage sur bandes est présent dans la majorité des Tier-1. C'est ainsi plus de 350 000 CPU et près de 500 Po de stockage qui sont accessibles à la collaboration. Cette dernière utilise aussi d'autres ressources de calcul, que ce soit des centres de calcul haute performance (HPC) dans des grands centres de calcul, des sites de *cloud computing*, et même des machines individuelles, dans le cadre du *volunteer computing*. Enfin, des ressources de calcul et de stockage sont disponibles « localement ».

Dans cette thèse, la production des données et des simulations, sous les différents formats (RAW à DAOD), a été effectuée de manière centralisée par la collaboration. Les analyses finales et le stockage de données, spécifiques à cette thèse, (sous forme de fichiers ROOT et d'histogrammes) ont été faites sur les ressources de la grille, du centre de calcul de Lyon et du LPNHE.

