

# LHCb : un détecteur dédié

---

**C**E CHAPITRE est dédié à la description du détecteur LHCb [24]. C'est une expérience conçue pour mesurer avec précision des paramètres de violation de la symétrie CP ainsi que rechercher des désintégrations rares dans le secteur des mésons beaux. Elle exploite le grand nombre de paires de quarks  $b\bar{b}$  produites chaque année auprès de l'accélérateur proton-proton, le LHC, situé au CERN à Genève.

La première section présentera le LHC, avec une description succincte de ses propriétés et performances. La deuxième partie présentera le détecteur LHCb, notamment la luminosité de fonctionnement, les mécanismes de production de quarks  $b$ , et les propriétés d'acceptance géométriques. Les sections 2.3 à 2.5 présenteront les sous détecteurs et leur performances, et enfin la section 2.6 présentera la partie logicielle associée au détecteur, avec les simulations détaillées utilisées pour les études préliminaires.

## 2.1 Le Grand Collisionneur de Hadron LHC

Le grand collisionneur de hadron, le LHC [25] est un accélérateur supra-conducteur à deux anneaux. Il est installé dans le tunnel existant de 26,7 km utilisé par le LEP. Il héberge quatre expériences. Atlas et CMS sont dédiées principalement aux processus de grande énergie permettant la découverte du boson de Higgs ou d'une possible nouvelle physique. L'expérience LHCb est dédiée à l'étude de la violation de la symétrie CP et la recherche des désintégrations rares dans le secteur des mésons beaux. Enfin, Alice s'intéresse aux processus extrêmes mettant en jeu la chromodynamique quantique et étudie les collisions d'ions lourds.

L'énergie disponible pour les collisions proton-proton est de 14 TeV dans le centre de masse. Pour obtenir une telle énergie, la chaîne d'accélération illustré dans la Figure 2.1 est mise en œuvre. Tout d'abord des paquets de  $10^{11}$  protons sont ac-

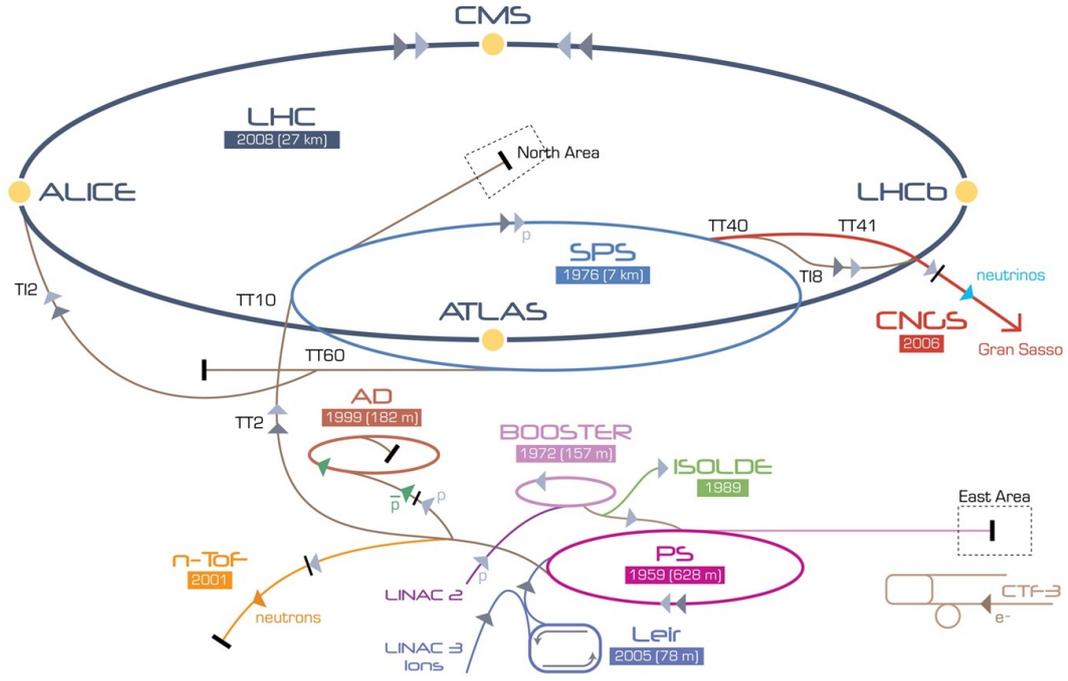


FIG. 2.1: Complexe d'accélération du CERN. Les protons sont accélérés par le Linac2, puis injectés dans le PS, puis dans le SPS, et enfin dans le LHC.

celérés par un LINAC jusqu'à une énergie de 50 MeV. Ils sont ensuite injectés dans le PS où leur énergie initiale est augmentée jusqu'à 26 GeV. Le SPS prend ensuite le relais afin de les envoyer dans l'anneau du LHC avec une énergie de 450 GeV. Ce dernier les accélère jusqu'à l'énergie nominale de 7 TeV.

La luminosité délivrée est déterminée par la relation [25] :

$$\mathcal{L} = \frac{N_b^2 n_b f_{rev} \gamma_r}{4\pi \varepsilon_n \beta^*} F,$$

où  $N_b$  est le nombre de particules par paquet,  $n_b$  est le nombre de paquet par faisceau,  $f_{rev}$  est la fréquence de révolution,  $\gamma_r$  le facteur relativiste gamma,  $\varepsilon_n$  l'émission transverse normalisée,  $\beta^*$  la fonction beta au point de collision, et  $F$  le facteur de réduction de la luminosité géométrique due à l'angle de croisement au point d'interaction :

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*}\right)^2}}.$$

Dans cette expression,  $\theta_c$  est l'angle de croisement au point d'impact,  $\sigma_z$  est la variance de la longueur du paquet, et  $\sigma^*$  la variance de la largeur transverse du faisceau au point de collision. La luminosité nominale du LHC est de  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

## 2.2 Généralités sur LHCb

L'expérience LHCb est installée au point 8 du LHC. Elle occupe la place du détecteur DELPHI du LEP. C'est un spectromètre dirigé vers l'avant, Figure 2.2, dont la géométrie est imposée par deux aspects :

- la production des hadrons beaux se fait essentiellement dans la direction du faisceau ;
- un compromis entre l'efficacité de détection et la place disponible dans la cav-erne.

Les mécanismes de production des quarks beaux à partir d'une collision proton-proton sont complètement régis par l'interaction forte. La production de paires  $b\bar{b}$  par interaction partonique est montrée sur la Figure 2.3, et est dominée par l'excitation de saveur [26].

Les partons impliqués dans la diffusion inélastique proton-proton interagissent avec un grand échange d'impulsion. Puisque l'impulsion échangée augmente avec l'énergie au centre de masse, les paires  $b\bar{b}$  sont *boostées* selon la direction du parton de plus grande impulsion et selon la direction du faisceau. De ce fait, les hadrons beaux issus de la paire  $b\bar{b}$  sont produits principalement dans le même cône avant ou arrière. Ceci est illustré dans la Figure 2.4, qui montre la corrélation angulaire des hadrons  $b$  et  $\bar{b}$  produits dans les collisions proton-proton générées par PYTHIA [27, 26]. Cette figure présente aussi la complémentarité entre le détecteur Atlas et le détecteur LHCb dans la détection des paires de quarks  $b\bar{b}$ . La couverture de LHCb en pseudo rapidité est :

$$1,9 < \eta < 4,9.$$

La section efficace de production de paires  $b\bar{b}$  à 14 TeV est prédite entre  $500 \mu\text{b}$  et  $1000 \mu\text{b}$ , comme le montre la Figure 2.5, et la référence [26].

Pour faciliter la recherche de vertex de production de mésons beaux, l'expérience LHCb utilise une luminosité de  $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . En effet, d'après la Figure 2.6, cette zone de luminosité est dominée par une seule interaction quark-quark. La luminosité intégrée pour une année nominale est à LHCb  $\mathcal{L}_{\text{int}} = 2 \text{ fb}^{-1}$ . L'expérience LHCb attend  $10^{12}$  paires  $b\bar{b}$  par année, puisque le nombre de paires produites est donné par :

$$N_{b\bar{b}} = \mathcal{L}_{\text{int}} \times \sigma_{b\bar{b}}.$$

La luminosité à LHCb est ajustable. Le détecteur a été conçu pour des luminosité variant entre  $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  et  $5 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Le nombre moyen d'interactions quark-quark est indiqué dans la Figure 2.6.

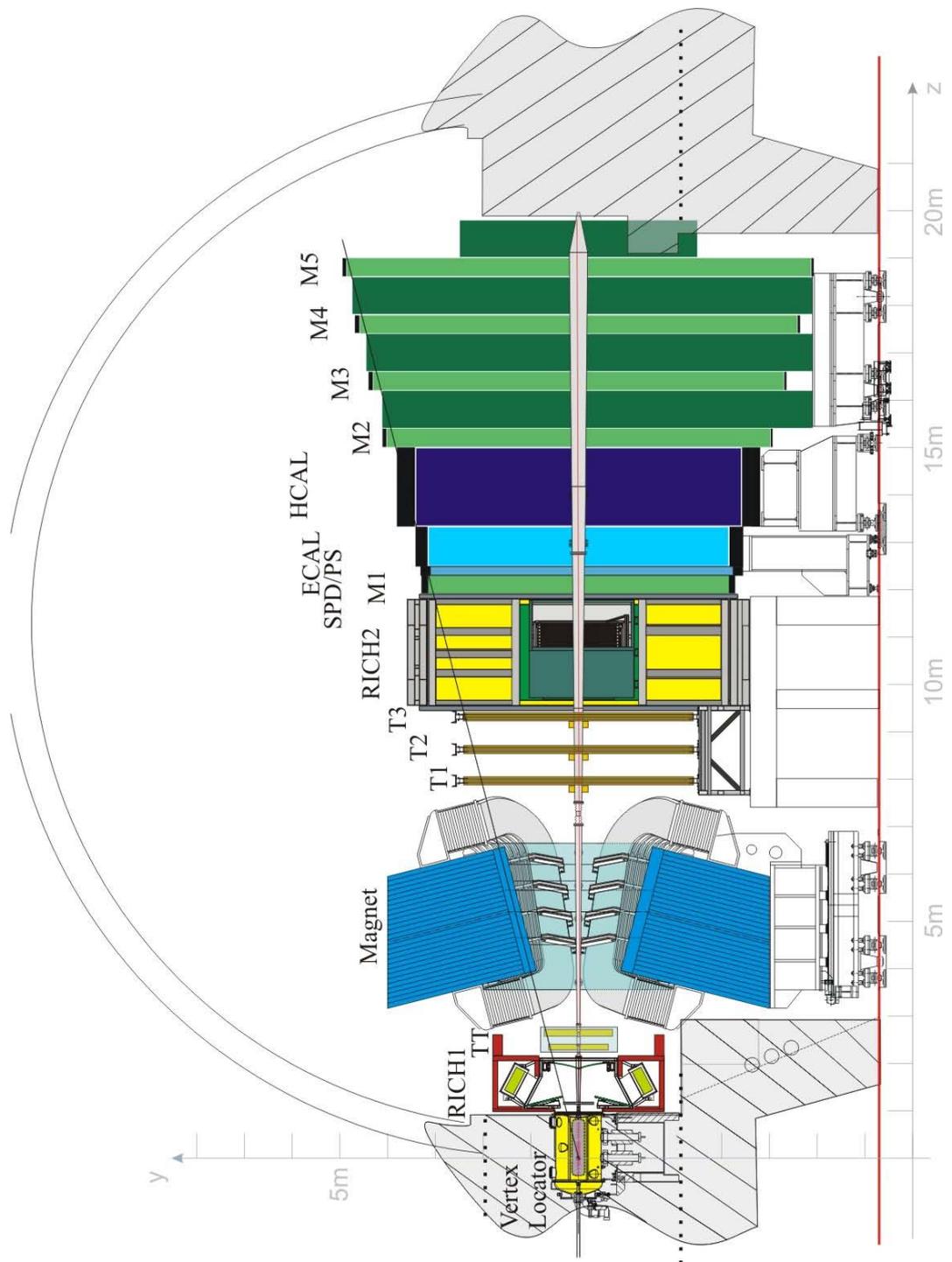


FIG. 2.2: Vue générale du détecteur LHCb. Le point de collision se trouve à l'origine de l'axe horizontal z, dans le Vertex Locator.

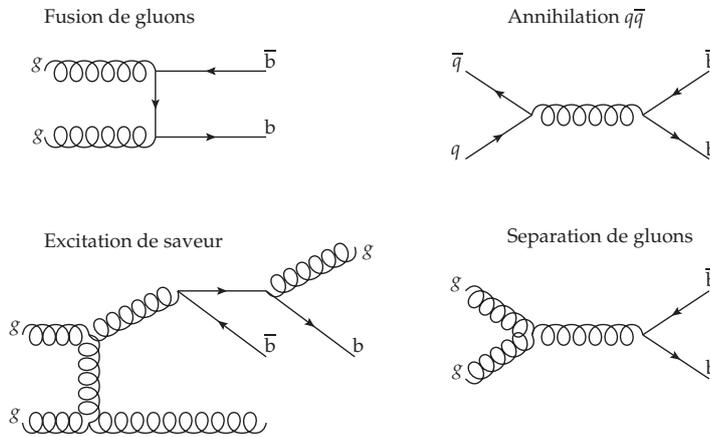


FIG. 2.3: Mécanisme dominant dans la production des paires de quarks  $b\bar{b}$ . Les processus dominants à LHCb sont l'excitation de saveur (47%) et la séparation de gluons (28%) [26].

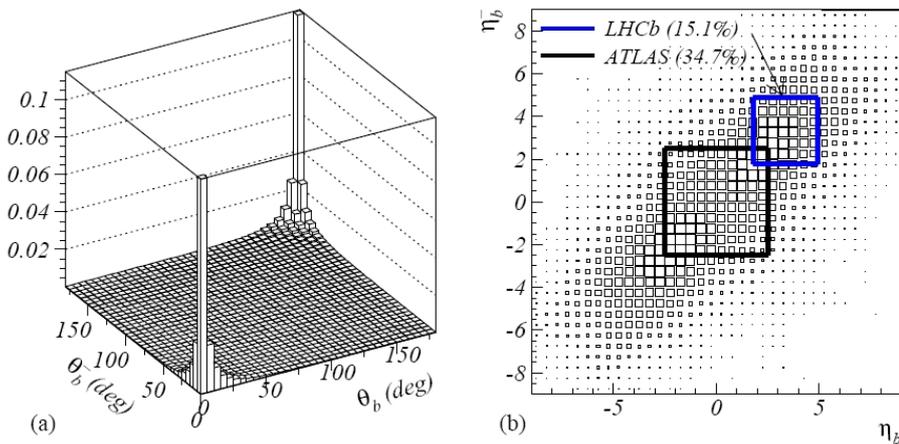


FIG. 2.4: (a) : Corrélation des angles polaires des hadrons  $b$  et  $\bar{b}$  produits dans les collisions proton-proton à  $\sqrt{s} = 14$  TeV, telle que générée par PYTHIA. (b) : Idem, mais en pseudo rapidité. Cette deuxième illustration montre la complémentarité des détecteurs Atlas et LHCb.

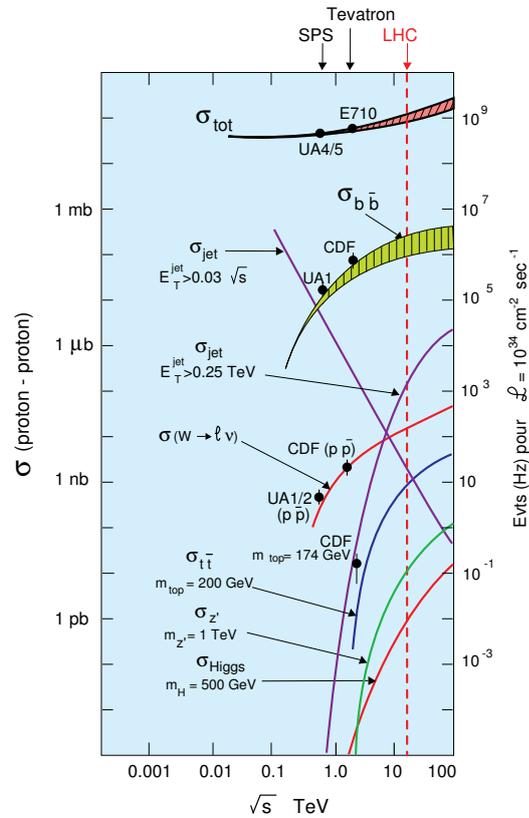


FIG. 2.5: Prédiction des sections efficaces de production de paires de quarks pour différentes énergies [28]. L'axe de gauche donne la section efficace de collisions inélastiques proton-proton, et l'axe de droite le nombre d'événements pour une luminosité de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . La section efficace de production  $b\bar{b}$  est indiquée en vert. Pour une énergie au centre de masse de  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ , elle a une valeur entre  $\sigma_{b\bar{b}} = 500 \mu\text{b}$  et  $1000 \mu\text{b}$ .

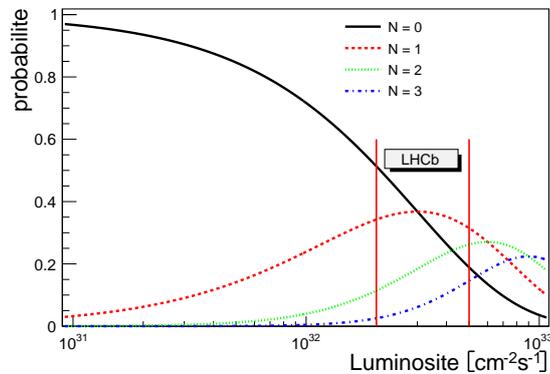


FIG. 2.6: Probabilité d'observer  $N$  interactions par rapport à la luminosité. La région de fonctionnement de LHCb est indiquée.

Le détecteur LHCb est constitué de six sous-détecteurs regroupés en trois systèmes interdépendants : un système de trajectographie regroupant l'aimant, le localisateur de vertex VELO, les trajectographes en silicium TT et les stations T ; le système d'identification des particules composé des imageurs Čerenkov RICH1 et RICH2, des calorimètres, et des stations à muons, et enfin le système de déclenchement.

## 2.3 Système de trajectographie : mesure des positions des vertex et des impulsions

L'objectif de LHCb est l'étude de la violation de la symétrie CP et la recherche de désintégrations rares dans le secteur des mésons beaux. De nombreuses études nécessitent de connaître leur temps de vie. Parmi ces analyses figurent la mesure de  $\sin(2\beta)$  et celle de  $\beta_s$ . Il est primordial que le détecteur LHCb soit capable de mesurer avec une très grande précision les longueurs de vol ainsi que les impulsions des particules, puisque ces deux ingrédients interviennent dans la mesure du temps de vie. Pour cela, est mis en place un système de trajectographie composé d'un aimant, d'un localisateur de vertex (VELO), et de stations de trajectographes avant et après l'aimant, TT, T1, T2, et T3. Les trajectographes des stations TT et T servent aussi à la détermination des directions des particules dans les RICHs, et comme racine de gerbes pour les calorimètres.

### 2.3.1 Aimant

L'aimant de LHCb [29], Figure 2.7, est proche du point d'interaction et son ouverture définit l'acceptance du détecteur. L'impulsion des traces est déterminée à partir de leur courbure dans le champ magnétique. Celui-ci a un pouvoir de courbure caractérisé par le champ total intégré  $\int Bdl \sim 4 \text{ Tm}$ . La composante principale du champ est orientée selon l'axe vertical  $y$  : elle est présentée en fonction de la coordonnée  $z$  dans la Figure 2.8.

La polarité du champ peut être inversée, condition sine qua non pour minimiser les erreurs systématiques induites par les différences droite-gauche.

L'intensité du courant qui circule dans les bobines non supraconductrices est de 5,85 kA, correspondant à une puissance électrique dissipée de 4,2 MW.

### 2.3.2 Le détecteur de vertex

Cet élément est utilisé pour reconstruire très précisément les positions des vertex primaires et secondaires de hadrons beaux ou charmés [30]. Il est composé de

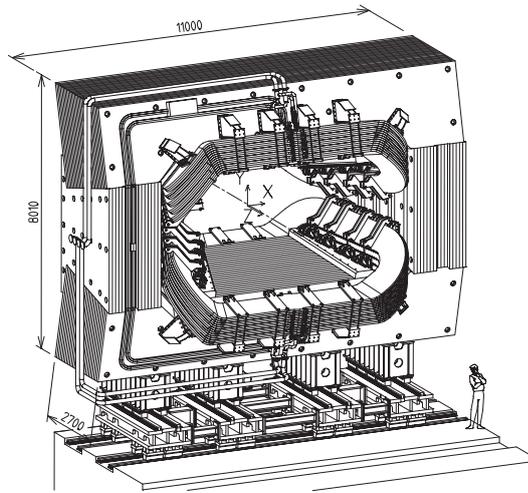


FIG. 2.7: Vue en perspective de l'aimant dipolaire de LHCb [24]. Le point d'interaction est derrière l'aimant dans cette vue.

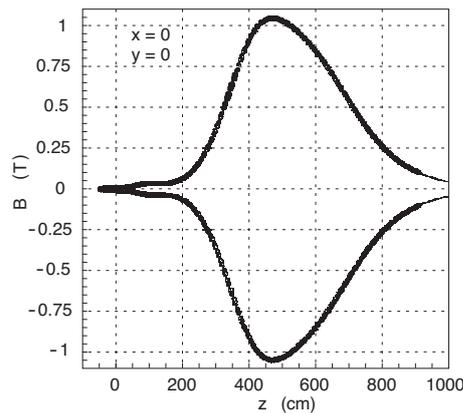


FIG. 2.8: Valeur du champs magnétique suivant l'axe  $z$ . L'ordonnée est l'axe vertical  $y$  du référentiel du détecteur LHCb.

21 plans de mesure, perpendiculaires à l'axe des faisceaux, utilisant la technologie des bandes en silicium. La Figure 2.9 est une vue globale du détecteur.

La position nominale du détecteur de vertex est à  $\sim 8\text{mm}$  du faisceau, ce qui à imposé un certain nombre de contraintes dans sa conception. Les bandes ont deux configurations, radiale et azimutale, représentés dans la Figure 2.10. Les bandes radiales sont regroupées en quatre régions de  $45^\circ$  pour optimiser l'occupation spatiale. L'espace entre les bandes varie de  $38\ \mu\text{m}$  à proximité du faisceau à  $102\ \mu\text{m}$  à son extrémité. En ce qui concerne les bandes azimutales, elles sont séparés en deux régions, interne et externe. Pour augmenter l'efficacité de reconstruction, les bandes azimutales ont des angles de  $20^\circ$  par rapport au rayon dans la région interne, et de  $10^\circ$  dans la région externe.



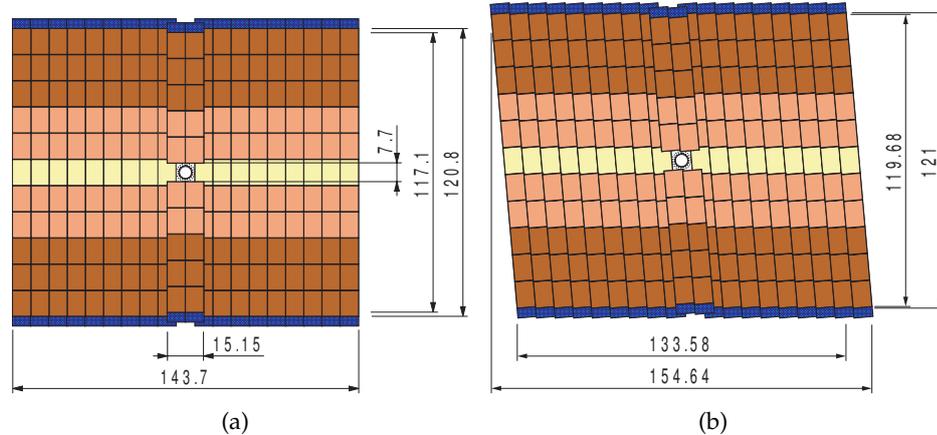


FIG. 2.11: Vue des stations TT. Les dimensions sont indiquées en centimètres. Les deux types de plan, vertical et oblique, sont montrés.

Parmi les 21 plans de mesures, deux sont utilisés pour le système de déclenchement de premier niveau. Ils servent à éliminer les événements à interactions multiples.

Il y a 180 000 canaux de lecture pour le VELO.

Une des particularités du détecteur de vertex est qu'il est mobile. En effet, pendant la phase d'injection, la taille des faisceaux est plus grande que l'ouverture nominale du détecteur à vertex. Les radiations pouvant détériorer le détecteur, les deux moitiés sont séparés de 6 cm.

### 2.3.3 Les trajectographes au silicium

Les trajectographes en silicium [31] comprennent deux sous détecteurs, le Tracker Turicensis<sup>1</sup> (TT) et le tracker interne (IT). Les deux utilisent des micro-bandes en silicium dont les pistes sont espacés de 200  $\mu\text{m}$ .

Le TT est placé entre le premier imageur Čerenkov (RICH1) et l'aimant, pour couvrir toute l'acceptance du détecteur. Il est composé de quatre couches de détecteurs. Chacune est épaisse de 410  $\mu\text{m}$  et elles sont disposées en deux sections de 15 cm d'épaisseur, séparées de 30 cm. Les première et dernière couches sont verticales alors que les couches intermédiaires sont inclinées de  $\pm 5^\circ$ . La Figure 2.11 représente les deux types de plans utilisés dans TT.

Le tracker interne est situé au centre des stations T situées après l'aimant, au plus près du faisceau, là où la densité des particules est la plus importante. Tout

<sup>1</sup>L'appellation du TT est initialement Trigger Tracker, ou tracker de déclenchement. Suite au remaniement du système de déclenchement et le retrait du niveau 1 en 2005, l'appellation a changé pour Turicensis, le nom de la ville de Zurich à l'époque Romaine, ville dans laquelle le TT a été conçu.

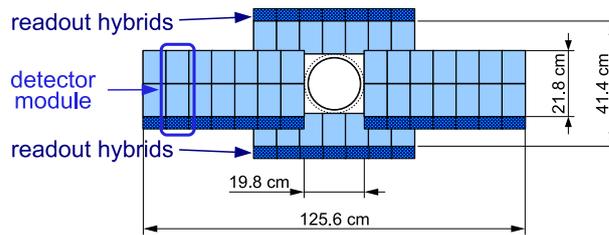


FIG. 2.12: Vue de la première couche du tracker interne.

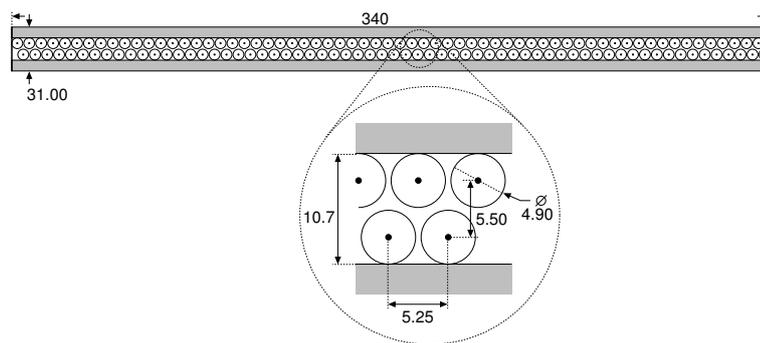


FIG. 2.13: Section transverse des chambres à dérives des stations T.

comme le TT, il est composé de 4 couches de bandes en silicium, dont les premières et dernière couches ont des bandes verticales alors que les couches intermédiaires ont leurs bandes sont inclinées d'un angle de  $\pm 5^\circ$ . La Figure 2.12 montre la disposition des éléments du tracker interne, pour la première couche.

Ces détecteurs ont les propriétés suivantes :

- position d'un hit précise à  $50 \mu\text{m}$ ,
- rapport signal sur bruit 12/1.
- nombre de canaux de lectures : 143 360 pour TT, et 129 024 pour le tracker interne.

### 2.3.4 Les trajectographes externes

Le système de trajectographe externe [32] comprend 55 000 chambres à dérives placées dans les stations T, représenté dans la Figure 2.13. Comme pour les détecteurs à base de bandes silicium, il utilise quatre plans, dont les deux à l'extérieur sont verticaux et les deux à l'intérieurs ont des angles de  $\pm 5^\circ$  par rapport à la verticale.

Le temps de dérive rapide, plus petit que  $50 \text{ ns}$ , permet d'éviter la superposition des événements. De plus, ces détecteurs ont une résolution sur la position des passages des particules de  $200 \mu\text{m}$ . Ces performances sont rendues possibles par l'util-

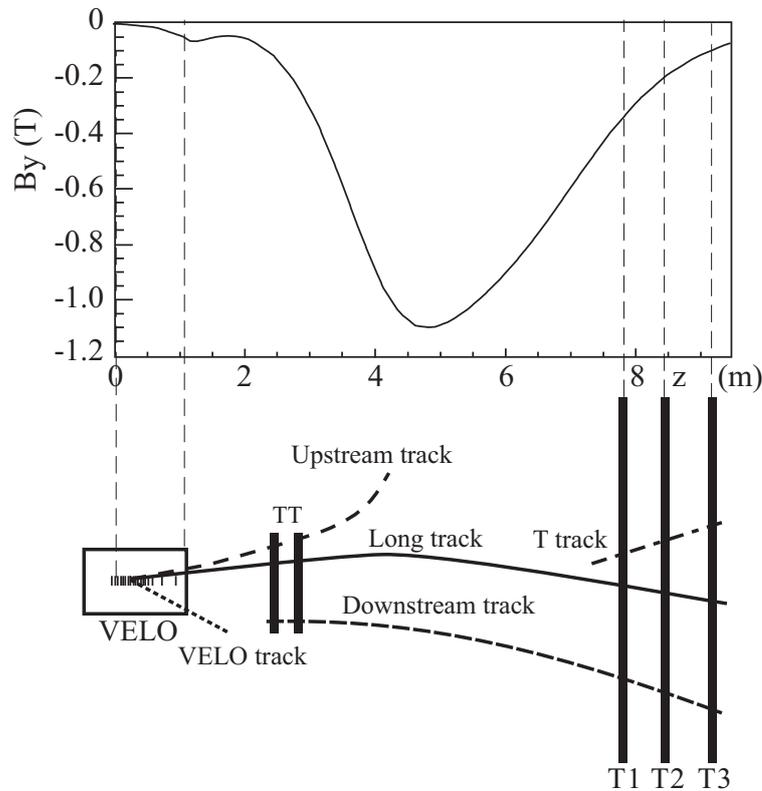


FIG. 2.14: Illustration schématique des différents types de traces : *long*, *upstream*, *downstream*, *VELO*, et *T*. Pour référence, la composante verticale du champ magnétique est montrée en fonction de l'axe  $z$ .

isation d'un mélange d'argon (70%) et de  $\text{CO}_2$  (30%). L'acceptance géométrique de ces stations est 300 mrad dans le plan de courbure (horizontal) et 250 mrad dans le plan perpendiculaire au plan de courbure (vertical).

### 2.3.5 Performances

Les hits détectés dans le VELO, la station TT, le tracker interne, et le tracker externe sont combinés pour former les trajectoires des particules depuis le VELO jusqu'aux calorimètres.

Selon leur trajectoires dans le détecteur, les traces sont triées de la façon suivante, Figure 2.14 :

**Traces *long*.** Elles traversent l'ensemble du trajectographe depuis le détecteur de vertex jusqu'aux stations T. Elles ont la meilleure précision sur leur impulsion, et par conséquent sont les traces les plus utilisées pour la reconstruction de hadrons beaux.

**Traces *upstream*.** Elles ne traversent que le VELO et la station TT. Généralement ce

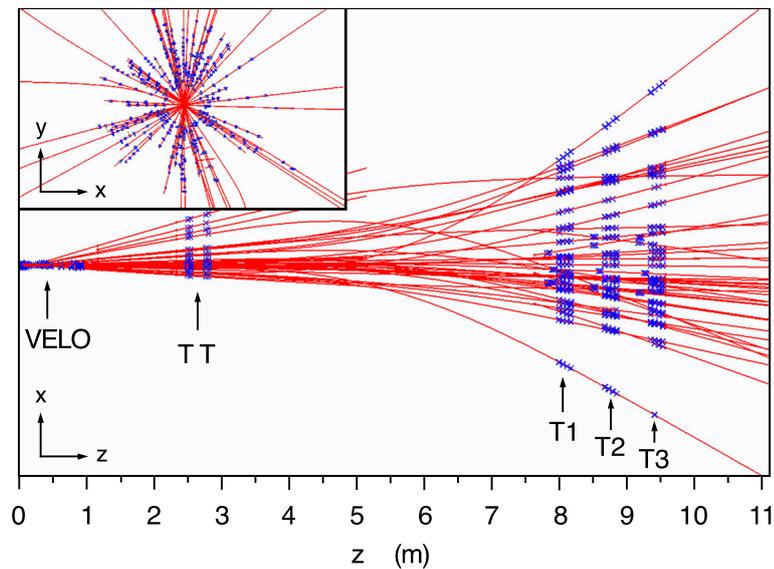


FIG. 2.15: Illustration des traces reconstruites et hits associés dans un événement. L'encart montre un zoom dans le plan  $(x, y)$  dans la région du VELO.

sont des traces de faible impulsion qui sont courbées par le champ magnétique en dehors de l'acceptance géométrique du détecteur. Par contre, comme elles traversent le RICH 1, elles peuvent émettre des photons Čerenkov si elles sont assez rapides. Elles sont par conséquent utilisées pour la compréhension du bruit de fond issu du RICH 1. Elles peuvent également servir à la reconstruction de hadrons beaux et à l'étiquetage de la saveur, malgré leur faible résolution en impulsion.

**Traces *downstream*.** Elles ne traversent que la station TT et les stations T. Elles sont utiles lorsqu'elles sont issues de particules à grand temps de vie telles que  $K_S^0$  ou  $\Lambda$ .

**Traces *VELO*.** Ne sont vues que dans le VELO. Elles sont généralement à grand angle ou allant vers l'arrière du détecteur. Elles sont utilisées pour la reconstruction des vertex primaires.

**Traces *T*.** Elles ne sont mesurées que dans les stations T. Elles sont généralement issues d'interactions secondaires dans le détecteur, et sont utilisées pour l'étalonnage du RICH 2.

Un événement contient en moyenne 72 traces reconstruites [33], parmi lesquelles il y a 26 traces *longues*, 11 *upstreams*, 4 *downstreams*, 26 *VELO*, et 5 traces *T*.

La qualité d'une trace reconstruite est déterminée par le  $\chi^2$  de son ajustement et des distributions du pull de ses paramètres. La Figure 2.15 montre un événement complètement reconstruit.

Dans l'évaluation des performances de l'algorithme de reconstruction sur des données de simulation Monte-Carlo, une trace est considérée correctement reconstruite si au moins 70% de ses hits sont issus d'une particule Monte-Carlo. Dans le cas où elle n'a pas 70% de ses hits associés à une particule Monte-Carlo, on l'appelle *ghost*.

Ce système de trajectographie permet d'obtenir une résolution sur l'impulsion de [24] :

$$\frac{\delta p}{p} \approx 0,35\%.$$

Le paramètre d'impact d'une trace par rapport au vertex primaire est connu avec une précision de [24] :

$$\sigma(\text{IP}) = 14 \mu\text{m} \pm \frac{35 \mu\text{m}}{p_T(\text{GeV}/c)}.$$

Ces résolutions impliquent une résolution sur le temps de vie du méson  $B_s^0$  dans le canal  $B_s^0 \rightarrow D_s \pi$  de 40 fs. Les résolutions en temps des canaux utilisés dans cette thèse sont données dans le chapitre 4.

## 2.4 Identification des particules

L'identification des particules est un aspect fondamental pour LHCb. Pour pouvoir étudier les effets de violations de la symétrie CP dans un canal de désintégration particulier, il est nécessaire de pouvoir le différencier avec d'autre lui ressemblant ainsi que du bruit de fond. De ce fait, la séparation des pions et kaons par exemple est essentielle.

De plus, il est nécessaire de pouvoir identifier et reconstruire les électrons et photons.

Enfin, la détection et l'identification des muons sont essentielles pour la physique impliquant des mésons beaux.

Trois systèmes sont utilisés dans LHCb pour parvenir à cette identification :

- deux imageurs Čerenkov,
- un système de calorimétrie,
- un système de chambre à muons.

Les performances du système d'identification sont données dans la section 2.4.4.

### 2.4.1 Imageurs Čerenkov

Le détecteur LHCb comporte deux imageurs Čerenkov [34] pour couvrir tout le spectre en impulsion des particules. Le premier imageur, RICH 1, est situé entre le détecteur de vertex et les stations TT. Il couvre toute l'acceptance géométrique du

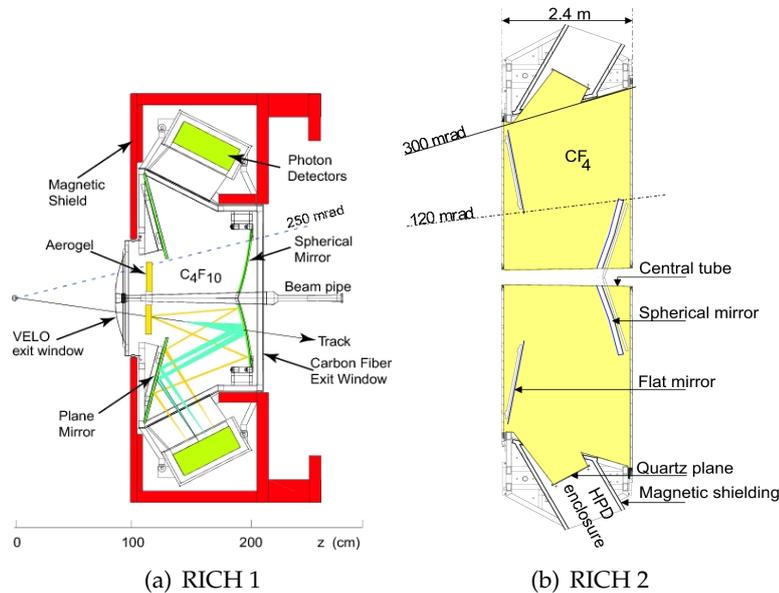


FIG. 2.16: Vue latérale du RICH 1 et vue du dessus du RICH 2.

détecteur. Il permet d'identifier des particules ayant une impulsion de 1 à 60 GeV/c. Pour cela, il possède deux milieux radiatifs : le premier est en aerogel, d'indice de réfraction 1,030, et le second est du fluorobutane  $C_4F_{10}$ , d'indice 1,0014. Le deuxième imageur Čerenkov, RICH 2, est situé entre les stations T et la première station à muons M1. Il permet l'identification des particules ayant une impulsion de 15 à plus de 100 GeV/c. Le milieu radiateur utilisé est du  $CF_4$ , d'indice 1,0005. Il a une acceptation géométrique réduite, c'est-à-dire qu'il ne couvre que  $\pm 120$  mrad suivant le plan horizontal et  $\pm 100$  mrad suivant la verticale.

Les deux RICH, schématisés dans la Figure 2.16, contiennent des miroirs plans et courbes permettant de collecter les photons produits par effet Čerenkov. Les photons sont détectés par des photo-multiplicateurs hybrides, isolés du champ magnétique. Il y en a 196 pour le premier imageur et 288 pour le second. Chaque photo-multiplicateur comportant une matrice de détection de 1 024 pixels, comme le montre la Figure 2.17, permet la localisation le point d'impact du photon sur la cathode avec une précision de  $500 \mu\text{m}$ .

Pour illustration, la Figure 2.18 montre une image des photons détectée et les anneaux Čerenkov reconstruits par le RICH 1 [24].

### 2.4.2 Calorimètres

Les calorimètres de LHCb [35] sont situés au milieu du détecteur LHCb, entre la première et la seconde station à muons. Ils sont utilisés pour absorber toutes les particules et mesurer leur énergie. Seuls les muons et les neutrinos ne sont pas

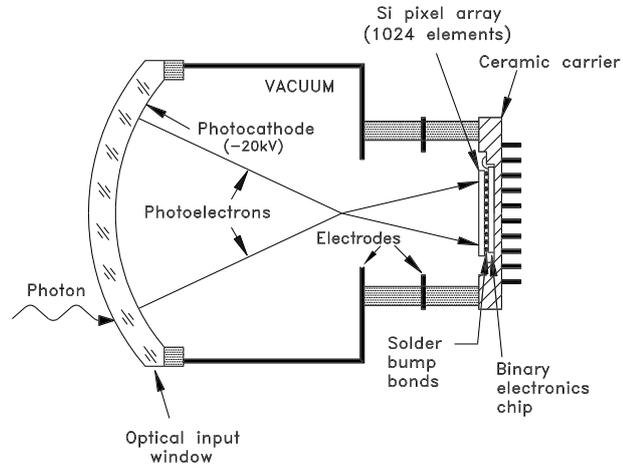


FIG. 2.17: Schéma d'un photo multiplicateur hybride.

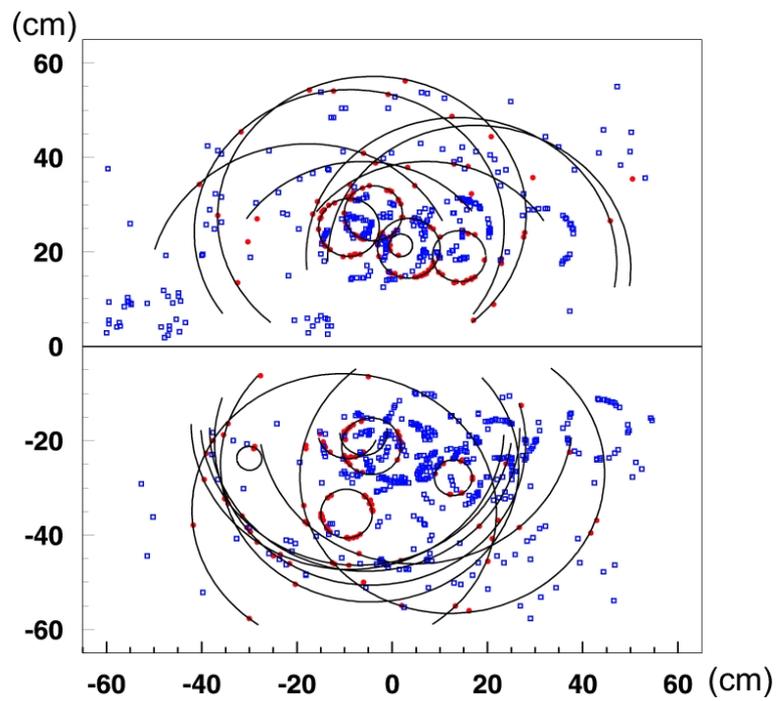


FIG. 2.18: Image d'un événement typique de LHCb dans le RICH 1.

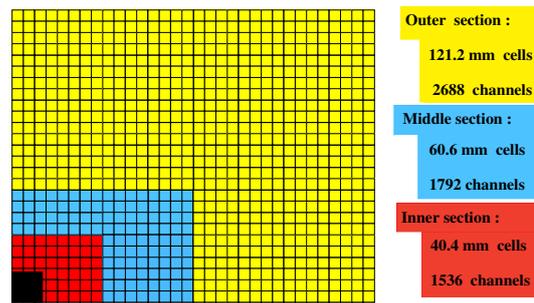


FIG. 2.19: Segmentation latérale du SPD, PS et ECAL.

arrêtés. Les amas calorimétriques sont reconstruits en mesurant l'énergie déposée par une particule via les processus d'ionisation induits par la cascade de particules secondaires, jusqu'à l'absorption.

Les amas calorimétriques sont utilisés par le premier niveau de déclenchement pour identifier des objets de grande énergie transverse, qui sont des signatures de désintégration de hadrons beaux. Ils sont aussi utilisés pour identifier les électrons et pour reconstruire les particules neutres, telles que photons et  $\pi^0$ .

Le premier système rencontré par les particules est le SPD, ou détecteur avec pavés de scintillateurs. Il permet de séparer les particules chargées des particules neutres en collectant leur ionisation avant que la gerbe électromagnétique ait commencé à se former. Il est composé de pavés de scintillateurs. La lumière de scintillation est transmise aux photo-multiplicateurs par des fibres à décalage de longueur d'onde. Sa segmentation latérale, montrée dans la Figure 2.19, tient compte de la variation de la densité des particules qui est plus dense à proximité du faisceau.

Après le SPD se trouve un mur de plomb de 12 mm d'épaisseur qui déclenche la gerbe électromagnétique. Le second détecteur est le PS ou détecteur à pied de gerbe. Il est similaire au SPD.

L'ensemble PS/SPD possède 12 032 canaux de lecture.

A ce stade, les particules rencontrent le calorimètre électromagnétique ECAL. Ce dernier utilise la technologie Shashlik, qui consiste en l'alternance de 4 mm de scintillateur et de 2 mm de plomb. Il est épais de 25 longueur de radiation. Le ECAL détecte les électrons et les photons via leurs gerbes électromagnétique  $e^+e^-$  et  $\gamma$ . Il partage la même segmentation que les SPD et PS et le même nombre de canaux de lecture. La résolution en énergie est [24] :

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%,$$

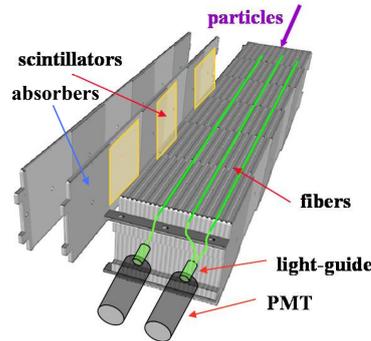


FIG. 2.20: Vue l'un module du calorimètre hadronique.

où l'énergie  $E$  s'exprime en GeV.

Enfin, le dernier élément du système de calorimétrie est le calorimètre hadronique HCAL. Il est placé juste derrière le ECAL et identifie les hadrons via leur interaction avec la matière du détecteur. Il est constitué de plaques de 16 mm de fer et de 4 mm de scintillateurs disposées parallèlement à l'axe du faisceau, illustrées sur la Figure 2.20. Les plaques de scintillateur sont reliées à des photo multiplicateurs par des fibres optiques. Il y a 1 468 canaux de lecture. Il est épais de 5,6 longueurs de radiations. La résolution en énergie est [24] :

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{(69 \pm 5)\%}{\sqrt{E}} \oplus (9 \pm 2)\%.$$

### 2.4.3 Chambres à Muons

Le système à muons [36] se compose de 5 stations, M1 à M5. Il est représenté sur la Figure 2.21. Le déclenchement pour l'acquisition des données et l'identification hors-ligne des muons font partie des aspects fondamentaux de l'expérience LHCb. Les muons sont présents dans plusieurs canaux clés de l'expérience LHCb, tels que les canaux  $B_d^0 \rightarrow J/\psi(\mu\mu)K_S^0$ ,  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\mu\mu)\phi$ ,  $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ ,  $B_d^0 \rightarrow K^*\mu\mu$ , etc. De plus, les muons sont utilisés pour l'étiquetage de la saveur initiale des mésons beaux.

Les stations à muons sont équipées de 1368 chambres à multi-fils proportionnelles (MWPC), divisées en quatre régions de granularités différentes. La région interne de M1 utilise 12 chambres contenant 2 détecteurs triple-GEM. Les 122 112 canaux physiques sont regroupés en 25 926 canaux logiques qui sont utilisés dans le système de déclenchement. Le bouclier du système à muons est composé des calorimètres et de quatre murs de fers de 80 cm d'épaisseur.

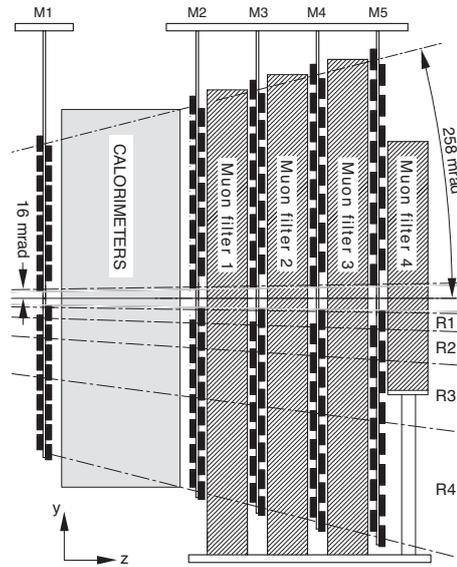


FIG. 2.21: Vue de côté du système à muons.

#### 2.4.4 Performances

Les informations issues des deux RICHs, des calorimètres et du système à muons sont combinées pour une identification optimale des particules chargées  $e$ ,  $\mu$ ,  $K$ ,  $p$ , et  $\pi$ . Les photons et  $\pi^0$  sont identifiés en utilisant le calorimètre électromagnétique via leur désintégration en deux photons. L'identification utilise la méthode statistique du maximum de vraisemblance.

L'identification des hadrons utilise principalement l'information des RICHs. Les images détectées sont comparées à des images obtenues suivant différentes hypothèses de particules [24]. La vraisemblance est maximisée en variant les hypothèses de particules pour chaque trace. Cette variation d'hypothèse est exprimée sous la forme d'une différence :

$$\text{Hypothèse kaon} = \ln \mathcal{L}_K - \ln \mathcal{L}_\pi = \Delta \ln \mathcal{L}_{K\pi}$$

par exemple. Pour illustration, la Figure 2.22 donne la valeur de cette différence pour des vrais kaons et des vrais pions. Cette variable permet la discrimination entre les différentes particules, et est utilisée dans le chapitre 4.

Pour chaque trace, la fonction de vraisemblance utilise la valeur de l'angle Čerenkov et l'impulsion de la trace. Par conséquent l'identification des particules basée sur les RICHs nécessite des traces reconstruites et la mesure de leur impulsion.

Le système de RICHs assure une identification des particules pour la totalité du spectre en impulsion. L'efficacité moyenne d'identification d'un kaon avec une énergie entre 2 et 100 GeV/c est de l'ordre de 95% ; le taux de mauvaise identification,

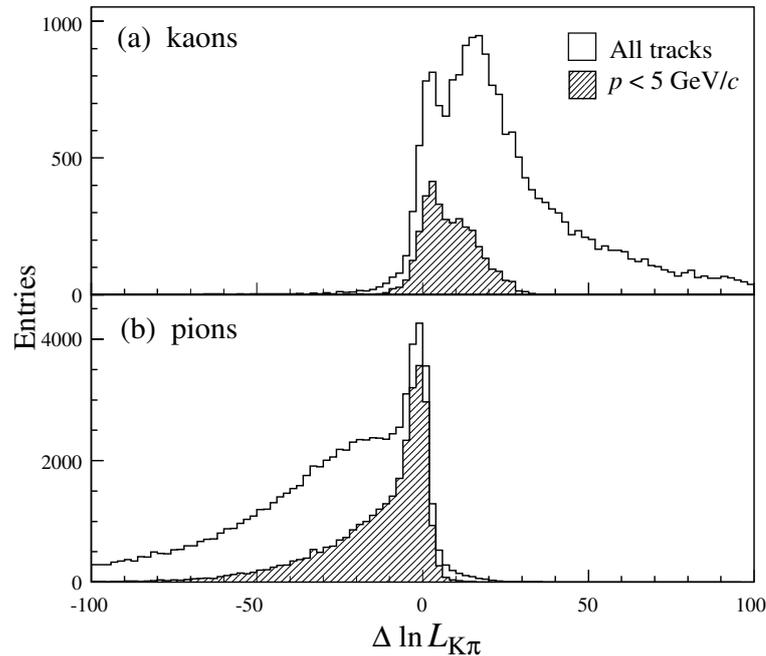


FIG. 2.22: Distribution de la différence de vraisemblance  $\Delta \ln \mathcal{L}_{K\pi}$  pour (a) les vrais kaons et (b) les vrais pions [33].

kaon identifié comme un pion, est de l'ordre de 5%. Autour de 30 GeV/c, l'efficacité est de 97%, avec un taux d'erreur de 5%.

L'identification des muons se fait en extrapolant des traces ayant une impulsion plus grande que 3 GeV/c. Cette coupure vient du fait que les particules de moindre impulsion ne parviennent pas aux chambres à muons. Des hits sont recherchés dans des régions d'intérêt autour de la trace extrapolée. Une trace est considérée comme un candidat muon si un minimum de chambres contiennent des hits dans les régions d'intérêt. Comme pour les RICHs, une vraisemblance est construite. La combinaison est faite de la même manière. L'identification des muons a une efficacité de 94% et un taux de mauvaise identification de l'ordre de 3%. La fonction d'efficacité est plate au delà de 10 GeV/c.

L'identification des muons est une contrainte essentielle dans l'analyse effectuée dans cette thèse. En effet, la reconstruction des  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  est un moyen très efficace de rejeter le bruit de fond. De plus, les muons sont essentiels à l'étiquetage de la saveur, présentée dans le chapitre 3.

L'identification des électrons est basée principalement sur l'équilibre entre l'impulsion de la trace et de l'amas d'énergie déposé dans le ECAL et l'accord entre le

barycentre de l'amas et le point d'impact de la trace extrapolée. Ces informations sont combinées pour contruire la vraisemblance de l'électron.

Un second estimateur est relié aux photons de bremsstrahlung émis par les électrons avant l'aimant. S'il radie avant l'aimant, il y a un deuxième amas neutre correspondant qui aura une orientation bien définie par rapport à l'extrapolation de la trace de l'électron. En reconstruisant l'énergie associée au deuxième cluster et celle associée au premier, alors il est possible de déterminer l'énergie totale [24].

L'efficacité moyenne d'identification des électrons issus de  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  est de l'ordre de 94%. La mauvaise identification des pions en électrons est de l'ordre de 0,7%.

L'identification des photons est effectuée grâce au calorimètre électromagnétique, puisqu'ils ont des clusters sans trace associée.

Les  $\pi^0$  sont reconstruits suivant deux types : *merged* et *resolved*, dépendant de leur impulsion transverse. S'ils ont une faible impulsion transverse il y a deux amas distincts (*resolved*), alors que dans le cas contraire ils sont dit *merged*. Leurs efficacités de reconstruction sont comparables, de l'ordre de 50%.

## 2.5 Système de déclenchement

La fréquence de croisements qui produisent au moins deux traces laissant des hits dans VELO et les stations T est de l'ordre de 10 MHz. Cette fréquence doit être réduite par le déclenchement à environ 2 kHz, pour que les événements puissent être écrits sur disques. Cette réduction est obtenue par deux niveaux de déclenchement : L0 (level-0) et HLT (High Level Trigger), schématisés sur la Figure 2.23 et décrits en détail dans [37].

Le premier niveau, L0, utilise l'information de quelques sous-détecteurs et est implémenté au niveau matériel, c'est-à-dire avec des cartes d'électroniques dédiées, alors que le HLT fonctionne en utilisant toute l'information du détecteur et des algorithmes tournant sur une ferme de calcul.

### 2.5.1 Déclenchement de niveau 0

L'objectif du L0, schématisé dans la Figure 2.24, est de réduire le flux de données de 40 MHz à 1 MHz. Du fait de leur grande masse, les hadrons beaux produisent souvent des particules de grande impulsion et énergie transverses. De plus le système de *pile-up veto* dans le VELO estime le nombre d'interactions proton-proton primaires dans chaque croisement de faisceau.

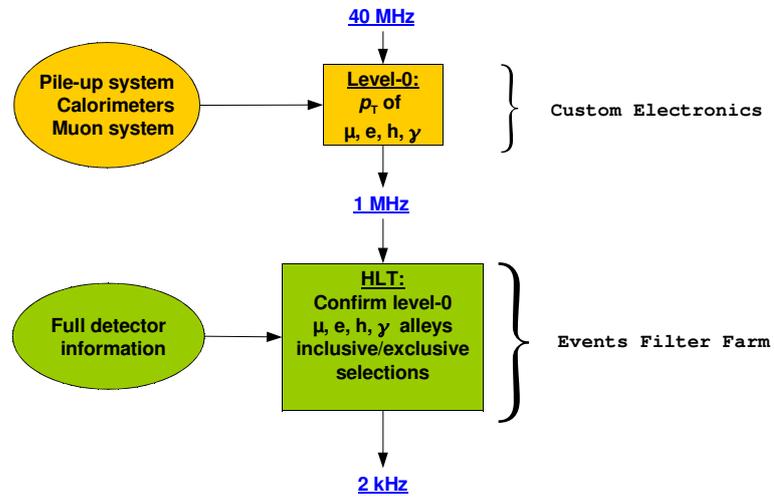


FIG. 2.23: Schéma du système de déclenchement de LHCb.

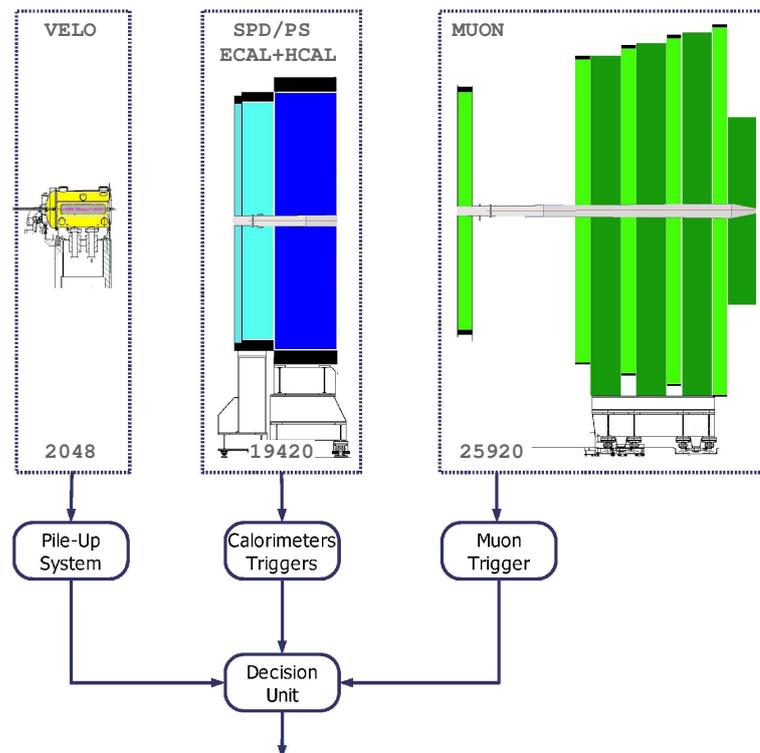


FIG. 2.24: Schéma du premier niveau de déclenchement de LHCb.

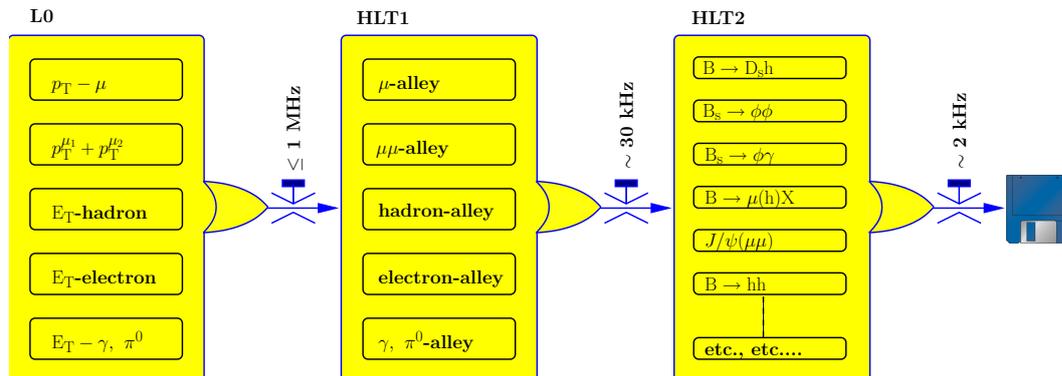


FIG. 2.25: Flot des différents éléments du système de déclenchement.

L'information issue des trois sous systèmes est alors donnée à l'unité de décision qui accepte ou rejette l'événement.

## 2.5.2 Déclenchement de haut niveau

Une fois un événement accepté par le premier niveau de déclenchement, il est envoyé dans une ferme de calcul dans laquelle il va être traité par le déclenchement de haut niveau HLT. Ce système est une application C++. Il se compose de deux parties, HLT1 et HLT2. L'objectif de ce niveau de déclenchement est de réduire le taux de sortie de 1 MHz à 2 kHz en rejetant les événements non intéressants. La Figure 2.25 montre les trois étapes du système de déclenchement avec leurs différentes composantes ainsi que les taux de rétention après chaque étape.

La première composante, HLT1, est utilisé pour reconstruire les particules dans le VELO et les stations de tracker correspondantes aux objets du L0. Dans le cas où les objets sont des photons ou des  $\pi^0$ , il est utilisé pour confirmer l'absence de particules chargées pouvant correspondre. C'est l'étape de confirmation du premier niveau. Le HLT1 doit réduire suffisamment le nombre d'événements pour permettre une reconstruction complète des événements restants.

Le deuxième élément, HLT2, est une combinaison d'algorithmes de reconstruction partielle de hadrons beaux et d'algorithmes de reconstruction complète. Ces événements reconstruits doivent ensuite passer un ensemble de coupures pour être enregistrés. Ces coupures sont regroupées en sélections, dont les propriétés sont différentes. Certaines biaisent le temps de vie, et d'autres non. Pour l'analyse effectuée dans cette thèse, seuls les canaux non biaisant seront utilisés. Les sélections non biaisantes ont des taux de réjection du bruit faible, et peuvent être *prescalées* pour respecter la fréquence de sortie. Des événements sont alors rejetés aléatoirement.

## 2.6 Logiciel et simulation Monte-Carlo complète

Pour finir cette présentation du détecteur, nous décrivons sa partie logicielle. Celle-ci est utilisée dans la simulation, le système de déclenchement, la reconstruction des événements ainsi que dans l'analyse. De plus, pour effectuer les études de sensibilité et de faisabilité, des données Monte-Carlo sont générées. Cinq applications composent le logiciel de LHCb :

- GAUSS est le programme qui génère les données Monte-Carlo. Cette génération utilise PYTHIA [26], EvtGen [38], PHOTOS [39], LHAPDF [40], et HepMC [41]. Gauss est aussi responsable de la simulation de la réponse du détecteur, en utilisant GEANT4 [42].
- BOOLE se base sur les informations fournies par GAUSS pour générer les hits dans le détecteur. Les données issues de BOOLE sont similaires à celles issues du détecteur réel.
- BRUNEL effectue la reconstruction des événements. C'est-à-dire qu'à partir des hits, il fait l'ajustement des traces et extrait les informations nécessaires pour l'identification des particules.
- DAVINCI est le logiciel d'analyse. C'est lui qui fixe l'identité des particules reconstruites ainsi que leur masse. Il permet de faire les combinaisons des particules et de reconstruire les hadrons beaux.
- MOORE est le logiciel utilisé dans les fermes de calcul pour le HLT. C'est une version rapide, mais moins précise, du couple BRUNEL/DAVINCI.

Puisque le LHC n'a pas encore commencé à tourner, les études préliminaires utilisent des données Monte-Carlo. En particulier, ici nous utilisons des données du *Data Challenge 2006*. Ces données utilisent une simulation complète du détecteur. Elle décrit au mieux le détecteur, et permet de faire les études de sensibilité. Les lots utilisés seront décrits dans les chapitres suivants.

## 2.7 Conclusion

L'expérience LHCb a été décrite telle qu'elle sera lors du démarrage du LHC, courant 2009. Nous avons présenté le contexte du détecteur, ses sous-constituants et leurs performances.

Les premières données vont être utilisées pour mesurer les performances réelles du détecteur, le comportement du système de déclenchement, les capacités de reconstruction et des sélections d'événements. Lors du démarrage du LHC, l'énergie au centre de masse sera de 7 TeV, donc la section efficace de production de quarks beaux sera plus faible. De plus la luminosité sera plus faible que la luminosité nom-

inale. Alors le nombre d'événement de signal sera plus faible, mais aussi celui de bruit de fond. Cela simplifiera notablement les procédure d'étalonnage en ligne du détecteur.

L'expérience LHCb a été conçue pour répondre au mieux aux attentes des physiciens, en terme de précision et d'efficacité de détection, pour mesurer les paramètres de la violation de la symétrie CP. De nombreux outils, dont l'algorithme d'étiquetage de la saveur, vont utiliser les informations extraites par le détecteur, pour effectuer les mesures. Ces outils doivent être étalonnés. Les chapitres suivants se concentrent sur l'étiquetage de la saveur.

