2 Dispositif expérimental

Ce chapitre est consacré à une description très succincte de l'appareillage expérimental. Le lecteur aura ainsi une idée d'ensemble des outils mis en œuvre pour mener à bien le programme de mesure.

2.1 Introduction

L'expérience NA50 [Abreu91] a pour objectif la mesure des caractéristiques des paires de muons produites dans les interactions Pb–Pb à 158 GeV/c par nucléon. Dans ce travail, nous extrayons les sections efficaces de production de dimuons mesurées au cours des prises de données effectuées en novembre et décembre 1995 auprès du SPS au CERN et nous établissons leurs dépendances avec certains indicateurs caractérisant la géométrie de la collision.

L'ensemble de détecteurs NA50 a pour élément central le *spectromètre à muons* de l'expérience NA10 [Anderson83]. Celui-ci mesure les quantités de mouvement des muons produits lors des interactions, dont on peut déduire les variables cinématiques $(M_{\mu\mu}, p_\perp, y, \ldots)$ définissant les paires de muons.

Le dispositif permet aussi la mesure de paramètres caractérisant la géométrie de la collision noyau-noyau ayant fourni le dimuon. Un *calorimètre électromagnétique* mesure le flux d'énergie transverse neutre $E_\perp$ (centralité de l'interaction). Des informations complémentaires sont obtenues grâce à un *compteur de multiplicité* de particules chargées M_{ch}, également corrélées à la centralité de l'interaction, et à un *calorimètre à zéro degré* (ZDC), qui mesure l'énergie E_{zdc} emmenée par le projectile spectateur.

Une grande luminosité est obtenue au moyen d'une *cible épaisse segmentée* avec détection du vertex d'interaction.

Ces éléments sont complétés par une série de *compteurs de contrôle*. Les hodoscopes BH, BHI et BHI_{new} permettent une mesure directe du faisceau (luminosité, empilement). Une paire de compteurs antihalo ($AH_{1,2}$) permet de mesurer la position du faisceau et d'identifier un éventuel halo de particules. A ces compteurs viennent s'adjoindre des téléscopes, contrôlant la stabilité dans le temps de la luminosité.

2.2 Le spectromètre à muons

Le spectromètre à muons (figure 2.1) est l'élément principal de l'expérience NA50. Conçu pour pouvoir supporter un grand taux de comptage, il accepte les dimuons dans l'intervalle de pseudo-rapidité $2,8 < \eta < 4,0$. Il possède une résolution en masse de 3,2% et une acceptance A_{cc} de l'ordre de 13% [Petiau96] à la masse du J/ψ. L'ensemble comporte :

- un aimant toroïdal ;
- un absorbeur, qui a pour fonction d'arrêter les électrons, photons ou hadrons produits dans la cible ainsi que les noyaux n'ayant pas interagi, ne laissant passer que les muons ;
- 8 chambres à fils qui mesurent la trajectoire des muons avant et après le passage dans le champ magnétique de l'aimant ;
- des hodoscopes ($R_1 \cdots R_4$ et P_1, P_2) qui permettent le déclenchement de l'acquisition.

2.2.1 L'aimant

L'aimant est l'élément central du spectromètre. De symétrie hexagonale, il mesure 4.8 m de longueur et possède un rayon de 2 m. Un champ magnétique toroïdal y est créé par six bobines parcourues par un courant pulsé et synchronisé avec le cycle du SPS. Chaque sextant est soutenu par une pièce de fer qui couvre 18° en azimut sur les 60° des secteurs.

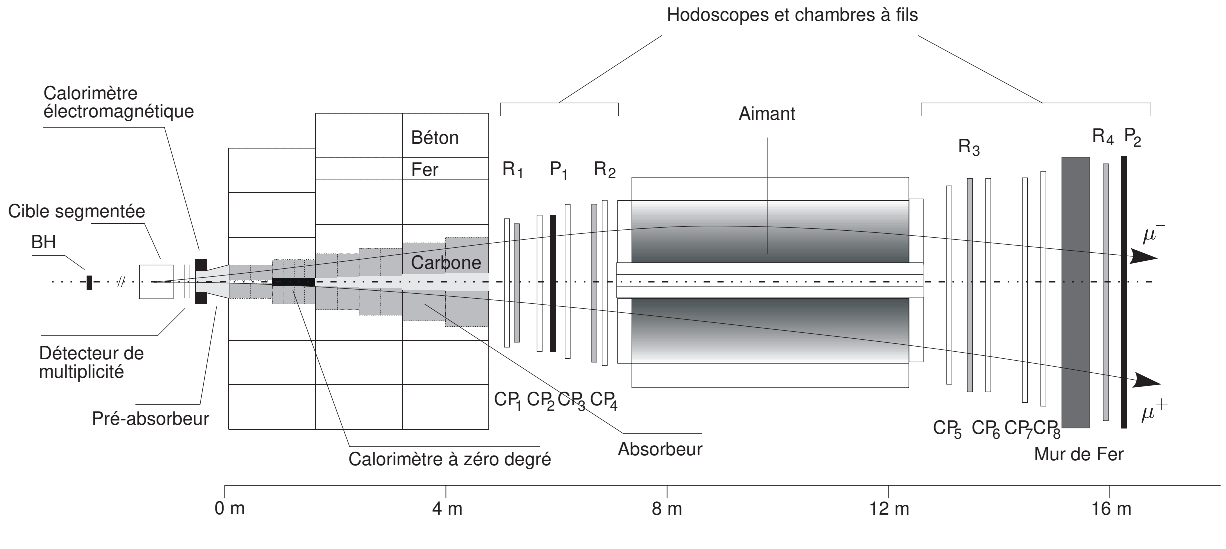

FIG. 2.1 - « *Spectromètre à muons de l'expérience NA50.* »

Le champ créé possède une dépendance en $1/r$ (r étant la distance à l'axe) :

$$\vec{B}(r) = \frac{B_0}{r}\vec{e}_\phi$$

où ϕ est l'angle azimutal et B_0 une constante dépendant du courant (4000-7000 A). Pour prévenir tout effet systématique lié au champ, la polarité est inversée pour certaines prises de données. L'amplitude du champ est constamment mesurée et est paramétrisée analytiquement pour être utilisée dans les simulations hors-ligne et la reconstruction des données.

Dans un tel champ, une particule chargée émise de la cible reste dans son plan azimutal. L'angle de déflection des muons est inversement proportionnel à leur impulsion transverse : $\Delta\theta \propto 1/p_\perp$.

Cette dépendance en $p_\perp$ (plutôt qu'en p comme dans le cas d'un champ dipolaire) intervient dans la logique du système de déclenchement.

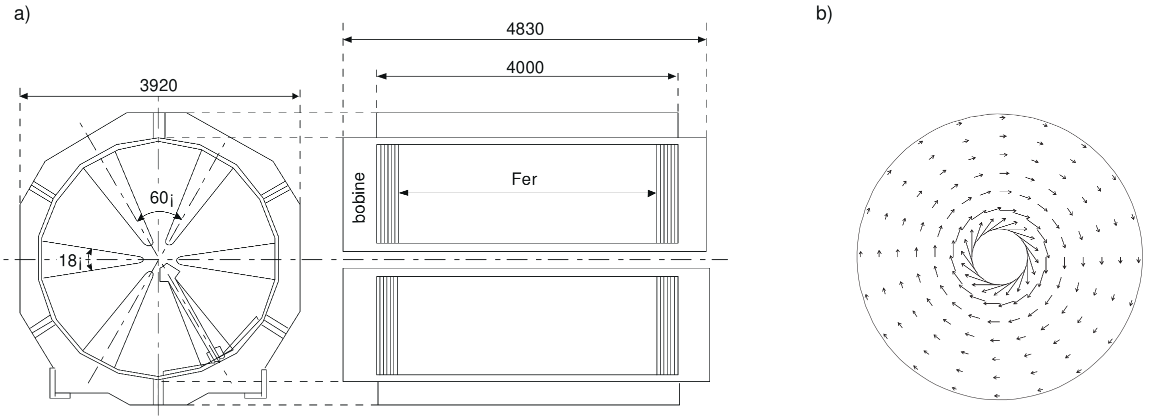

FIG. 2.2- *a* - « *Vues de face et de côté de l'aimant.* »
b - « *Vue transverse du champ magnétique toroïdal.* »

2.2.2 L'absorbeur

Le rôle de l'absorbeur est double : absorber la fraction du faisceau n'ayant pas interagi avec la cible (absorbeur de faisceau) et faire interagir le plus grand nombre de particules légères et de fragments produits lors des interactions.

L'absorbeur de faisceau est un assemblage cônique de tungstène et d'uranium (figures 2.1 et 2.3) de 4,80 m devant lequel se situe le calorimètre à zéro degré (voir paragraphe 2.3.2).

Tout autour se trouve un assemblage de cylindres de carbone (représentant environ 15 longueurs d'absorption du π) qui couvre l'acceptance angulaire du spectromètre (de 35 à 140 mrad). Il permet d'absorber le maximum de $\pi^\pm$, $K^\pm$, e^- et γ sans toutefois trop affecter la trajectoire des muons. Le faible numéro atomique du carbone réduit la diffusion multiple (coulombienne) des muons. L'erreur sur la mesure de l'angle entre les deux muons et sur la perte d'énergie est alors minimisée et permet d'obtenir une bonne résolution en masse. A cet absorbeur est adjoint un pré-absorbeur en oxyde de béryllium (voir figure 2.3).

L'élimination, le plus tôt possible, des $\pi^{\pm}$ et des $K^{\pm}$ produits en quantité importante dans les interactions noyau-noyau, est essentielle. En effet, la désintégration de ces particules en $\mu + \nu$ est susceptible de créer des paires de muons $\mu^{+}\mu^{-}$ qui se superposent aux dimuons produits lors de l'interaction[16].

L'ensemble formé par l'absorbeur de faisceau et le filtre à muons est inséré entre des blocs de fer et de béton. Certains hadrons très énergétiques sont capables de traverser le bloc de graphite et le champ de l'aimant, pour venir frapper un hodoscope et déclencher une acquisition fortuite. A cette fin, un mur de fer est placé avant les derniers hodoscopes R_4 et P_2 (figure 2.1). Situé après les dernières chambres à fils, il permet l'absorption des hadrons restants, sans affecter la résolution du spectromètre malgré son numéro atomique élevé.

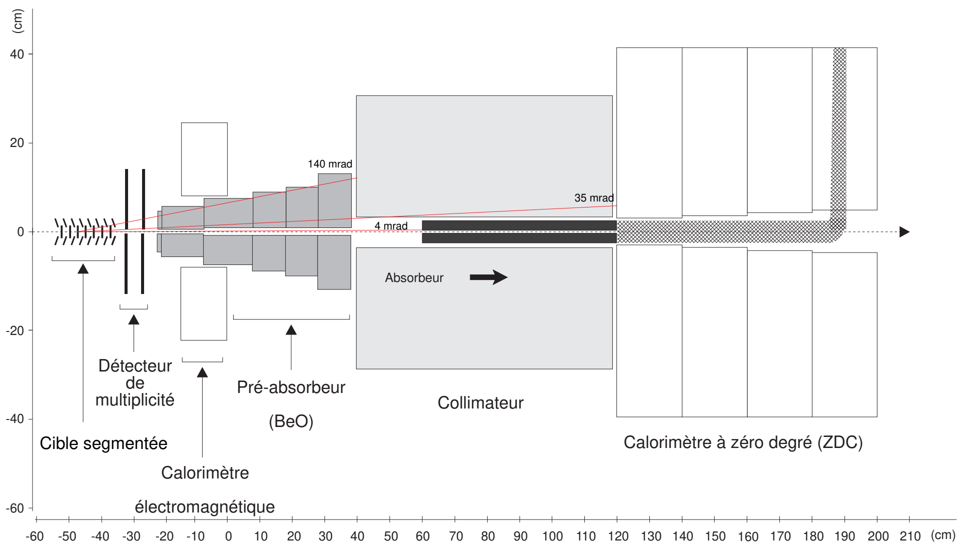

FIG. 2.3 - « *Vue détaillée de la région cible* »

2.2.3 Les chambres à fils

Les chambres proportionnelles à fils sont au nombre de huit. Chacune d'elles, de forme hexagonale, comprend trois plans de fils (y, u, v) faisant un angle de 60° les uns par rapport aux autres (figures 2.4). Ces ensembles de fils permettent de mesurer les coordonnées dans l'espace de la trace des muons. Les fils de tungstène plaqués d'or de 20 μm de diamètre sont espacés de 3 mm. Le gaz utilisé pour ces chambres est un mélange d'argon (80%), d'isobutane (19,8%) et de fréon (0,2%). La lecture s'effectue par groupes de 32 fils connectés à des préamplificateurs d'où sortent des câbles

16. De telles coïncidences créent également des paires $\mu^{+}\mu^{+}$ et $\mu^{-}\mu^{-}$ à partir desquelles il est possible d'estimer le bruit de fond $\mu^{+}\mu^{-}$ enregistré.

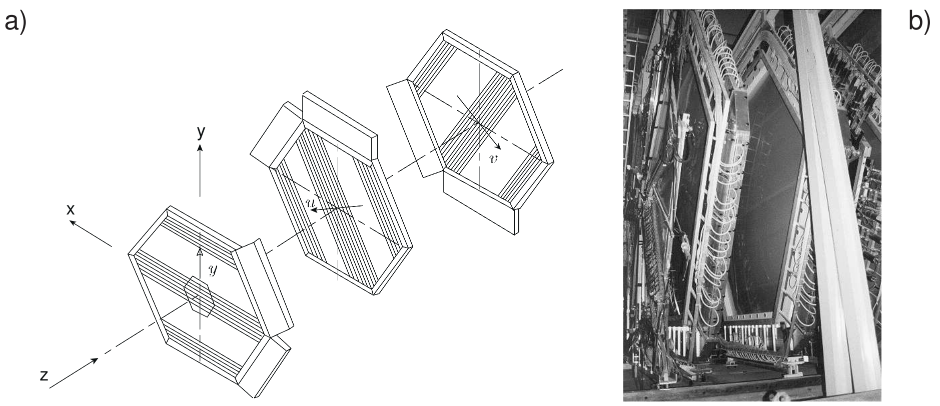

FIG. 2.4- *a - « Chambre proportionnelle avec ses trois plans de fils* (y, u, v)*. »*
b - « Photographie des chambres proportionnelles. »

qui retardent les signaux et les transmettent au RMH (« *Receiver Memory Hybrid* »). L'ensemble des quatre chambres $(CP_1, \cdots, CP_2)$ situé en amont de l'aimant détermine la trajectoire des muons avant la déflexion par le champ magnétique. Les quatre autres chambres $(CP_5, \cdots, CP_8)$, en aval de l'aimant, déterminent la trajectoire des muons après déflexion. On notera $\varepsilon_{2\mu}$ l'efficacité de mesure de dimuons résultante.

2.2.4 Les hodoscopes

Les hodoscopes $R_1, \cdots, R_4$ (figures 2.5) sont utilisés pour le déclenchement du système d'acquisition. Deux hodoscopes sont placés de chaque côté de l'aimant, R_1 et R_2 en amont, R_3 et R_4 en aval. Ces hodoscopes, qui reprennent la forme hexagonale de l'aimant et des chambres à fils, sont divisés en six sextants formés de lattes de scintillateurs, parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe du faisceau.

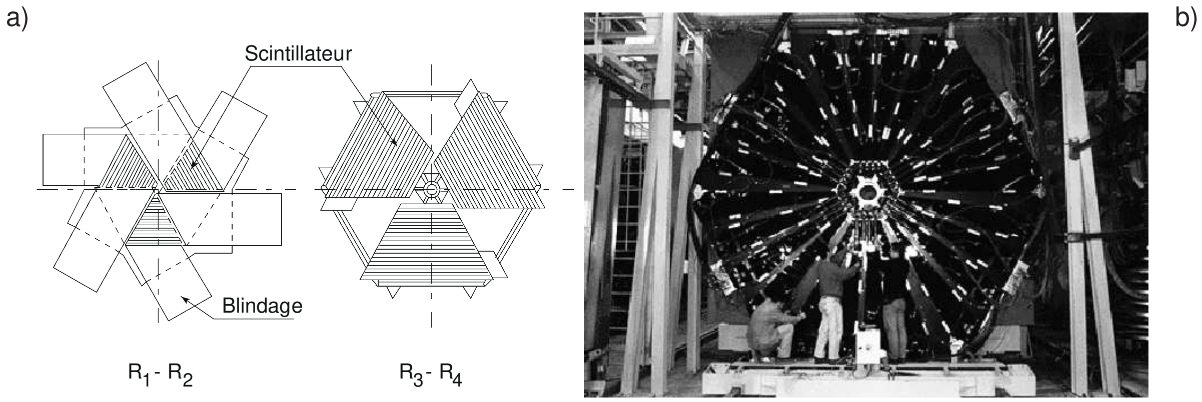

FIG. 2.5- *a - « Hodoscopes* R_j $(j = 1 \cdots 4)$*. »*
b - « Hodoscope P_2*, situé après le mur de fer. »*

L'ensemble $R_1 - R_2$ détermine la zone de provenance des muons. L'hodoscope R_2 est homothétique de R_1 par rapport au centre de la cible.

L'ensemble des hodoscopes permet une estimation « en ligne » de l'impulsion transverse des muons à partir de l'angle de déflexion. Les signaux des compteurs sont transmis aux modules RMH. Les hodoscopes P_1 et P_2, dont les scintillateurs sont disposés radialement, sont situés également de part et d'autre de l'aimant. Ils permettent la mesure de l'efficacité du déclenchement basé sur les hodoscopes R_j $(j = 1 \cdots 4)$. On notera ε_{trig} cette efficacité.

2.3 Mesures correlées aux dimuons

2.3.1 Le calorimètre électromagnétique

Le calorimètre électromagnétique permet la mesure, événement par événement, de l'énergie transverse neutre $E_\perp$, qui rend compte de la centralité de la collision.

Ce calorimètre est constitué de fibres scintillantes logées dans des tubes en inox et placées dans du plomb. Celles-ci sont parallèles au faisceau et la lumière produite est conduite par des fibres optiques jusqu'aux photomultiplicateurs. Pour la lecture du signal, ces fibres sont regroupées en cellules réparties en quatre couronnes centrées sur le faisceau et divisées en six secteurs trapézoïdaux (voir figure 2.6). Sa structure lui confère environ 13 longueurs de radiation, ce qui lui permet d'absorber en moyenne 90% de la gerbe électromagnétique. Comme la cible est fractionnée en plusieurs ciblettes (voir paragraphe 2.3.4) le domaine de pseudo-rapidité couvert par le calorimètre varie légèrement d'une ciblette à l'autre. Quelle que soit la ciblette, l'information en énergie transverse recueillie par le calorimètre est ramenée après correction au domaine de pseudo-rapidité $1,7 < \eta < 2,3$.

Sa calibration est effectuée grâce à un faisceau d'électrons. Le vieillissement des fibres, dû au taux de radiation élevé, doit être pris en compte pour la mesure de l'énergie transverse. La contribution à l'énergie déposée dans les couronnes due aux particules chargées est estimée par une simulation GEANT. L'énergie transverse neutre totale est obtenue en sommant toutes les contributions des cellules :

$$E_\perp = \sum_j \alpha(i,j)\ E_j \times \sin(\theta_j)$$

où E_j est l'énergie mesurée dans la cellule j, et où $\alpha(i,j)$ est un facteur de correction dépendant de la cellule j et de la ciblette d'interaction i, et où θ_j est l'angle moyen sous lequel est vue la cellule j à partir de la ciblette vertex i. Pour des collisions Pb-Pb, la résolution en énergie transverse neutre du calorimètre électromagnétique est :

$$\frac{\sigma(E_\perp)}{E_\perp} \approx \frac{0,94}{\sqrt{E_\perp \text{ (GeV)}}}$$

Un calorimètre similaire a été utilisé pour l'expérience NA38 [Devaux88].

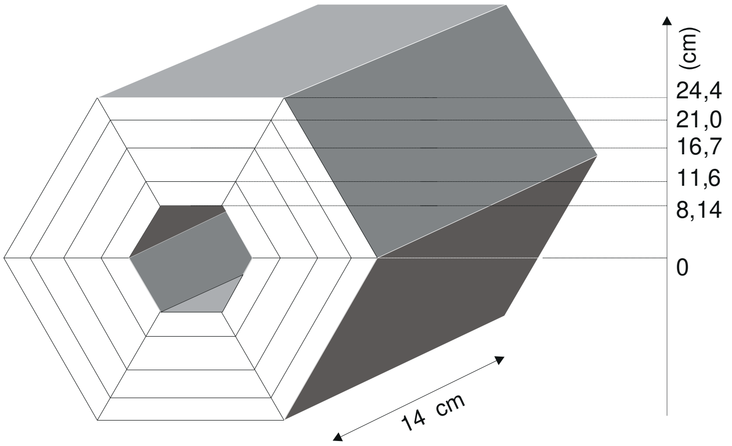

FIG. 2.6 - « *Calorimètre électromagnétique. Le faisceau est perpendiculaire à la feuille, au centre géométrique.* »

2.3.2 Le calorimètre à zéro degré

Le calorimètre à zéro degré (ZDC) permet la mesure de l'énergie déposée par les particules spectatrices de la réaction. Il est constitué de fibres de quartz noyées dans du tantale. Son volume actif est de $5 \times 5 \times 65$ cm^3. Situé au cœur de l'absorbeur de hadrons (figure 2.3), il possède une très haute résistance aux radiations. Sa résolution est de l'ordre de 7% pour les ions Pb de 158 GeV/c par nucléon, et de l'ordre de 30% pour des protons de 200 GeV/c. En outre, le calorimètre à zéro degré permet d'identifier tous les événements avec plus d'un ion incident, quelque soit le résultat de leur comptage par l'hodoscope de faisceau (BH).

2.3.3 Le détecteur de multiplicité

Le détecteur de multiplicité (MD) mesure la multiplicité des particules chargées produites sur une large ouverture angulaire (incluant l'ouverture angulaire du spectromètre à muons), et leur distribution en rapidité.

La mesure est effectuée par deux unités MD_1 et MD_2 (voir figure 2.3). Chaque unité est constituée de deux couronnes de détecteurs au silicium, de rayon intérieur 4.4 mm (resp. 34.4 mm) et de rayon extérieur 34.4 mm (resp. 86.4 mm). Le détecteur de multiplicité permet d'atteindre une acceptance en pseudo-rapidité de $1,6 < \eta < 4$ pour chaque ciblette. Sa résolution est voisine de 5 %.

2.3.4 La cible segmentée

Le dispositif cible est représenté sur la figure (2.7). On distingue, outre le porte-ciblettes, le dispositif de mesure du vertex d'interaction, formé de barettes de quartz, à l'intérieur d'une chambre métallique supportant les organes du système (photomultiplicateurs, fibres optiques, dispositif mécanique, etc.). La détermination du vertex permet le calcul de l'énergie transverse $E_\perp$ et des caractéristiques cinématiques des paires de muons produites. Le chapitre 3 est consacré entièrement à sa description, à son fonctionnement et à l'étude de son efficacité $\langle\varepsilon\rangle_{1...7}$ de reconnaissance du vertex.

2.4 Les compteurs de contrôle

2.4.1 L'hodoscope de faisceau « BH »

L'hodoscope de faisceau (BH) détecte chaque ion incident qui arrive de l'accélérateur. Il est composé d'un plan de 16 lames de quartz couvrant une surface de dimensions 20×70 mm^2. Il permet en outre de déceler le passage simultané de plusieurs ions pendant l'intervalle de temps d'analyse des données analogiques (empilement faisceau). Le taux de comptage de chaque voie du BH est enregistré pour les besoins du calcul des sections efficaces. L'efficacité de détection d'un ion dépend en grande partie de la géométrie des compteurs. Elle est de l'ordre de 98%. Le dispositif est complété par un compteur BHI détectant une éventuelle interaction du faisceau avec l'hodoscope de faisceau. Un second détecteur (BHI$_{new}$), formé de quatre secteurs, permet d'améliorer l'efficacité du

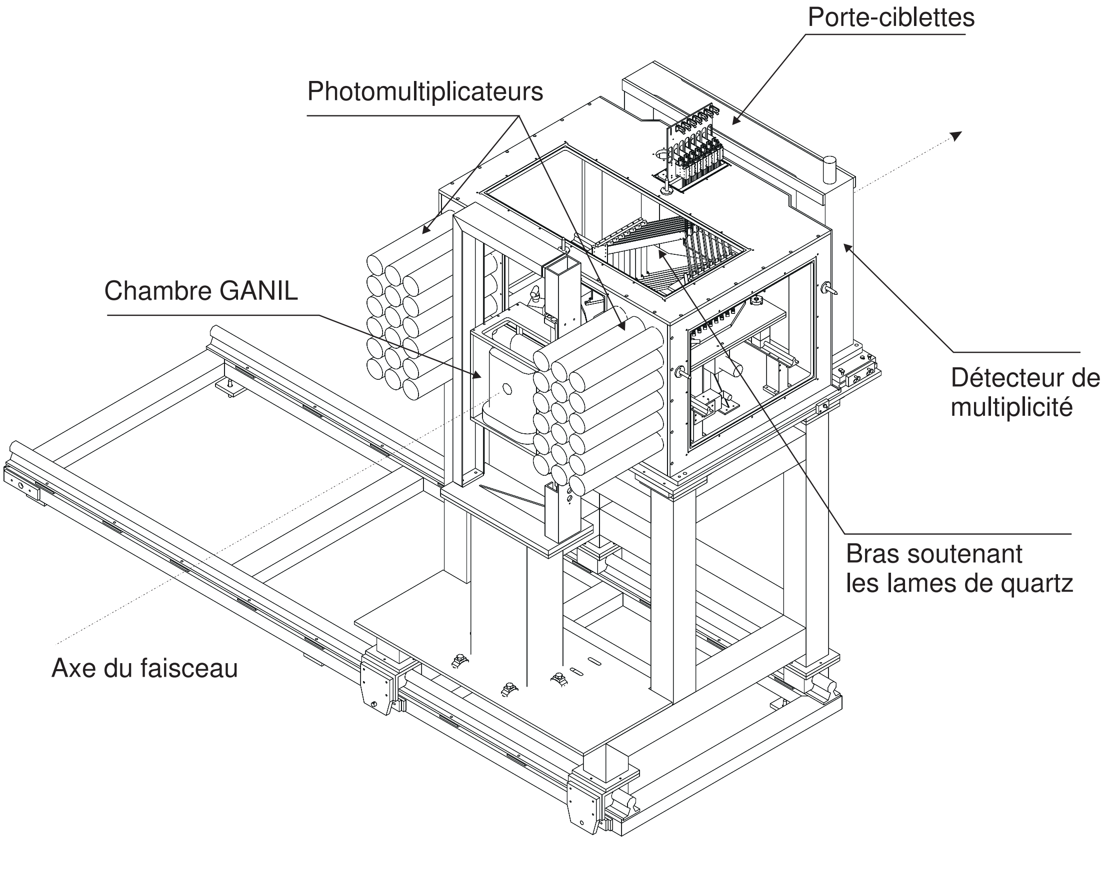

FIG. 2.7 - « *Vue de la cible active NA50.* »

BHI, en portant l'angle minimum de détection des produits d'interactions (vu du BH) de 73 mrad à 13 mrad. L'ensemble de ces détecteurs est placé dans le vide.

2.4.2 Les compteurs « antihalo »

Les antihalos AH_i sont deux lames carrées de quartz, percées d'un trou de 3 mm de diamètre, sensibles uniquement aux fragments multichargés. Ils sont destinés à veiller à la stabilité du faisceau sur son axe théorique et à le délimiter, en éliminant les noyaux incidents passant hors du trou ou les fragments issus de collisions en amont. Notons qu'une paire de lames de quartz (indicée 0) solidaire du dispositif de mesure du vertex d'interaction (voir chapitre 3) est placée à l'entrée de la cible pour détecter une éventuelle interaction (dans l'air, dans les fenêtres minces, dans les détecteurs précédants, etc.) avant la cible.

Un compteur antihalo BAH fait de 6 éléments scintillants couvrant une surface $15 \times \pi^2$ cm^2 autour d'un trou ($\varnothing$ =15 mm) pour le passage du faisceau, détecte le bruit de fond résiduel dû aux particules légères provenant de l'amont (non utilisé en 1995).

2.4.3 Les chambres « GANIL »

Les chambres GANIL sont situées à l'amont de la cible (voir figure 2.7). Ces petites chambres à fils permettent une mesure du profil du faisceau horizontal et vertical.

2.4.4 Les télescopes

Les trois télescopes « J », « S » et « V » permettent le contrôle de la stabilité du faisceau. Ce sont des scintillateurs pointant vers la cible à 90 degrés. Les télescopes « J » et « S » sont disposés dans le plan horizontal des ciblettes, alors que le télescope « V » est positionné à la verticale de celles-ci.

Etant positionnés hors de l'axe du faisceau, ils ne reçoivent que les produits des interactions. Ces télescopes sont donc soumis à un taux de comptage faible (relativement à l'hodoscope de faisceau). Leur taux de comptage est proportionnel à la luminosité, qui est le produit du nombre d'ions incidents par le nombre de noyaux cible.

2.5 Déclenchement et acquisition des données

Le système de déclenchement *dimuon* est basé sur l'information des quatre hodoscopes R_1 à R_4. Il est conçu autour d'une matrice de coïncidence qui permet, à partir de ces signaux, d'estimer en ligne l'impulsion transverse des muons traversant le spectromètre. Chaque scintillateur i de R_2 est associé à un scintillateur i de R_1 par l'intermédiaire d'un circuit de coïncidence. La coïncidence

$V^i = R_1^i \times R_2^i$ permet d'éliminer les traces provenant des interactions se produisant dans l'absorbeur pour n'accepter que les traces pointant sur la cible[17].

Si la coïncidence $V^i \times R_4$ est satisfaite, alors une particule a traversé l'appareillage. L'hodoscope R_4 est situé après le mur de fer, de façon à s'assurer que la particule détectée est bien un muon. La coïncidence $V^i \times R_4$ est validée par l'hodoscope R_3 afin de réduire le taux de déclenchement fortuit.

Le premier niveau de déclenchement exige deux signatures $V \times R_4 \times R_3$ synchrones dans deux sextants différents des hodoscopes. La logique intersextant (dite « *Magic Box* ») est opérée par une boîte mémoire programmable. L'angle de déflection estimé à partir des compteurs V^i et R_4 touchés permet d'évaluer sommairement l'impulsion transverse $p_\perp$ des muons.

Le second niveau de déclenchement est assuré par un microprocesseur qui permet la sélection des événements selon différents critères, dont la zone de masse de la paire de muons. En première approximation la masse invariante du dimuon s'écrit :

$$M_{\mu\mu} \approx p_\perp^{\mu_1} + p_\perp^{\mu_2}$$

où $p_\perp^{\mu_1}$ et $p_\perp^{\mu_2}$ sont les impulsions transverses de chacun des muons. Le microprocesseur permet également de combiner d'autres critères, comme le nombre de mots de l'événement, le nombre total de compteurs touchés, l'énergie totale mesurée par le calorimètre électromagnétique, etc.

Les informations sont enregistrées sur bande magnétique. Ces données contiennent des renseignements sur la nature de la prise de données (polarité du champ magnétique, nature du déclenchement, etc.), les informations relatives à chaque paquet de faisceau, les signaux de l'ensemble des compteurs (hodoscopes touchés, fils des chambres, informations calorimétriques, etc.), à chaque événement.

2.6 Conclusion

Le dispositif expérimental permet la mesure de divers paramètres caractérisant les dimuons ($M_{\mu\mu}, p_\perp$, etc.) et la géométrie des collisions ($E_\perp, M_{ch}, E_{zdc}$, etc.).

Dans le calcul des sections efficaces interviennent des termes de correction sur le nombre d'événements mesurés (voir chapitre 4), pour la prise en compte des effets d'acceptance A_{cc} et des efficacités de mesure de traces $\varepsilon_{2\mu}$, de déclenchement ε_{trig}, et de mesure du vertex $\langle\varepsilon\rangle_{1\ldots7}$ (voir chapitre 3).

En outre, des coefficients de correction sur la luminosité intégrée sont introduits pour tenir compte des multiples ions incidents, des interactions des ions dans l'hodoscope de faisceau (BH), des passages des ions hors du volume défini par les compteurs antihalo et des événements corrélés à plusieurs ions incidents détectés par le calorimètre à zéro degré (mais compté 1 par le BH). Tous ces facteurs sont décrits et évalués dans le chapitre 5 de ce document.

17. A cause de l'extention spaciale de la zone cible et pour augmenter l'acceptance des dimuons de basse masse, la coïncidence $V^i = R_1^i \times R_2^{i-1}$ est également acceptée.