

3 L'expérience WA98 au SPS

3.1 Introduction

Le Super Proton Synchrotron (SPS) est un anneau de 6 km de circonférence, construit en 1976 afin d'accélérer des protons jusqu'à 400 GeV. En 1981, il a été converti en collisionneur proton-antiproton et a permis, en 1983, la découverte des bosons W et Z. Débutée en 1986, l'accélération de noyaux a conduit en 1994 aux premières collisions plomb sur plomb à 17.3 AGeV par nucléon.

Ces collisions pourraient permettre la formation d'un plasma de quarks et de gluons. En effet, la densité d'énergie atteinte après les premières interactions entre nucléons est estimée à 3 GeV/fm³. Cette valeur est supérieure à la limite de déconfinement prédite par les calculs théoriques. Pour mettre en évidence la phase partonique, plusieurs expériences ont été conçues, chacune avec un programme de physique spécifique

- NA44 est un spectromètre de particules chargées qui a mesuré avec précision les spectres des pions, kaons, protons, et deuteron. Il couvre une petite acceptance mais présente de très bonne qualité d'identification des particules et de reconstruction de l'impulsion. Des événements contenant entre une et trois particules d'un type donné (pion, kaon ou proton) peuvent être spécifiquement sélectionnés ce qui permet de disposer d'une statistique importante pour différentes études. Les fonctions de corrélation des pions, kaons et protons ont pu ainsi être étudiées avec précision par cette collaboration.
- NA45/CERES : l'objectif de cette expérience est l'étude des paires d'électrons-positrons. Le spectre en masse invariante de ces paires a été construit. Il semble indiquer une modification de la masse de la résonance ρ . Ce changement pourrait être la conséquence de la présence du PQG lors de la désintégration de ce méson.
- NA49 est constituée de plusieurs grandes chambres à projection temporelle. Cette expérience permet l'étude des particules chargées sur un grand domaine en acceptance. Les spectres en masse transverse et en rapidité des pions, kaons et protons ont été construits par cette collaboration. Les fonctions de corrélation pion-pion, proton-proton et pion-proton ont été étudiées ainsi que les spectres en rapidité des particules étranges Λ et K_s^0 . Nous avons utilisé ces mesures dans le chapitre 4.
- NA50 a reconstruit le spectre en masse invariante des paires de muons positifs et négatifs. Cette expérience s'est surtout focalisée sur l'étude du J/Ψ présentée en 1.3.1.
- NA52 était dédiée à l'étude des fragments lourds et en particulier à la recherche de strangelets qui sont des conglomerats de quarks dont la stabilité serait assurée par la présence de quarks étranges. Aucun strangelet n'a été identifié à ce jour.
- WA97 a permis l'étude de la majorité des baryons étranges. Les résultats obtenus par cette expérience ont été présentés au paragraphe 1.3.3. Nous avons utilisé la mesure du taux de production des Λ dans le chapitre 4 pour évaluer la fraction de pions qui en sont issus.

- WA98 était l'expérience la plus généraliste. Elle a permis d'étudier de nombreuses observables. Dans la suite de ce chapitre, nous allons décrire en détails cette expérience en insistant particulièrement sur les spectromètres de particules chargées dont les données ont été utilisées dans notre analyse.

3.2 L'expérience WA98

L'expérience WA98 a été conçue pour étudier les collisions plomb sur plomb à 17.3 GeV par paire de nucléons produites au CERN SPS. L'objectif de la collaboration était d'étudier ces réactions à travers un grand nombre d'observables. L'expérience WA98 est représentée sur la figure 3.1. On peut classer les différents détecteurs en fonction des types de mesures qu'ils effectuent :

- Les détecteurs destinés à caractériser les événements de manière globale
- Le spectromètre de photons
- Les spectromètres de particules chargées.

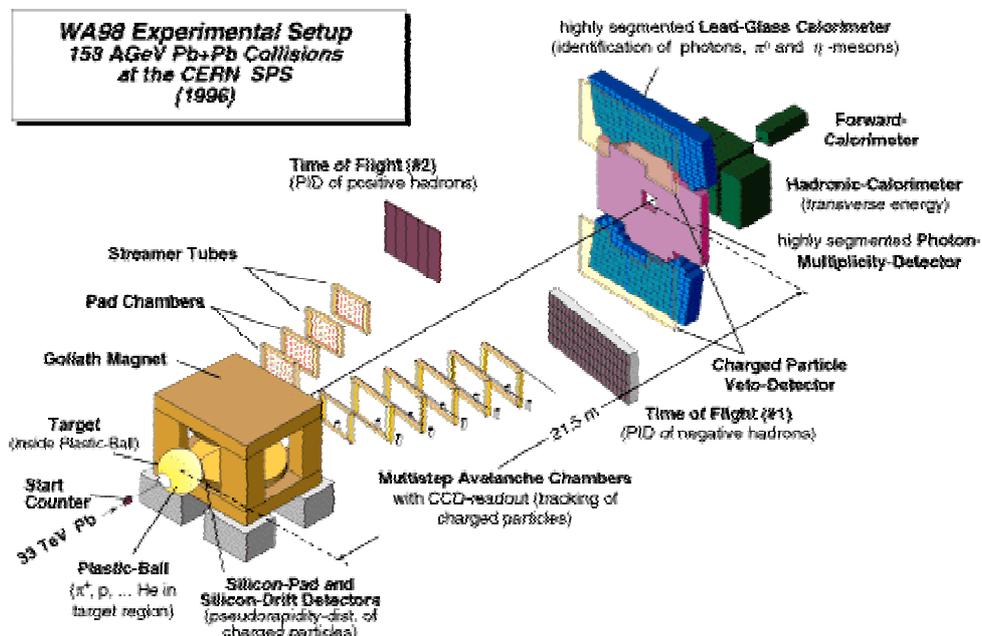


Figure 3.1 L'expérience WA98

Nous détaillerons au paragraphe 3.3 les différents sous détecteurs des spectromètres de particules chargées. Nous allons maintenant présenter les autres composants de l'expérience WA98 en insistant sur les résultats qui en ont été extraits.

3.2.1 Caractérisation des événements

3.2.1.1 Calorimétrie globale

Le Zero Degree Calorimeter (ZDC), mesure l'énergie des fragments du noyau projectile qui n'ont pas interagi. Il couvre une région de pseudo-rapacité, $\eta \geq 5.9$. Le Mid Rapidity Calorimeter (MIRAC), mesure l'énergie des particules émises pour $3.5 < \eta < 5.5$. Il permet de détecter à la fois les gerbes électromagnétiques et hadroniques. Ces détecteurs sont essentiels pour déterminer la centralité des collisions. Nous développerons ce point au

paragraphe 2.4.2. La variation de l'énergie transverse en fonction de la centralité a été étudiée à partir des mesures du MIRAC [29]. Elle ne varie pas linéairement avec le nombre de participants qui représente le nombre de nucléons impliqués dans une collision noyau–noyau. Son évolution se traduit plutôt par la relation :

$$(dE_T/d\eta)_{max} \propto N_{participant}^\alpha \text{ avec } \alpha \approx 1.08$$

Le paramètre α serait égal à un si la linéarité était respectée, c'est-à-dire si toute l'énergie était libérée dans une unique collision. Par ailleurs, si l'énergie était équitablement partagée entre toutes les collisions que subissent les nucléons participants, le coefficient α serait égal à 4/3. Le résultat de l'expérience WA98 montre que la réalité se situe dans un état intermédiaire entre ces deux cas extrêmes.

3.2.1.2 Multiplicité et DCC

Pour déterminer la centralité des collisions, on peut aussi étudier la multiplicité des particules chargées. Cette mesure est moins précise que celle réalisée en utilisant les calorimètres car elle est plus sujette aux fluctuations. Dans l'expérience WA98, la multiplicité des particules chargées est mesurée par des détecteurs au silicium à pads et à dérive. Ces deux détecteurs couvrent une région de pseudo-rapacité comprise entre 2 et 3.75. L'énergie transverse par particule a été évaluée à partir des mesures réalisées à l'aide du MIRAC (figure 3.2). On constate qu'elle atteint une valeur de saturation de 800 MeV autour de 100 participants [29]. Comme pour l'énergie transverse, l'évolution de la multiplicité des particules chargées en fonction du nombre de participants n'est pas linéaire. On a aussi $\alpha = 1.08$. Ce résultat pourrait remettre en cause les estimations d'absorption du J/Ψ par les hadrons qui sont basées sur une évolution linéaire de la densité de particules en fonction du nombre de participants.

La multiplicité des photons est mesurée à l'aide d'un calorimètre (Photon Multiplicity Detector, PMD) conçu pour sélectionner les gerbes électromagnétiques. Il ne permet que de compter les photons car il ne mesure pas toute l'énergie des gerbes. Les hadrons laissent en général une énergie insuffisante pour être détectés car ils n'entraînent pas la formation d'une gerbe électromagnétique. L'acceptance du PMD est $2.4 < \eta < 4.4$. En combinant les mesures de multiplicité des particules chargées et des photons dans les mêmes domaines d'acceptance, la collaboration WA98 a cherché à mettre en évidence la formation de condensats chiraux désorientés (DCC) [30]. Ce phénomène est lié à une restauration partielle de la symétrie chirale qui entraîne une variation du nombre de π^0 produits par rapport au nombre de pions chargés, localisée sur une petite région de l'espace de phase. Les π^0 sont la source dominante de photons alors que les particules chargées sont majoritairement des pions ce qui permet d'étudier les DCC à travers les mesures de multiplicité de photons et de particules chargées. Aucun événement n'ayant été identifié, une limite supérieure de la probabilité de produire des DCC a été estimée.

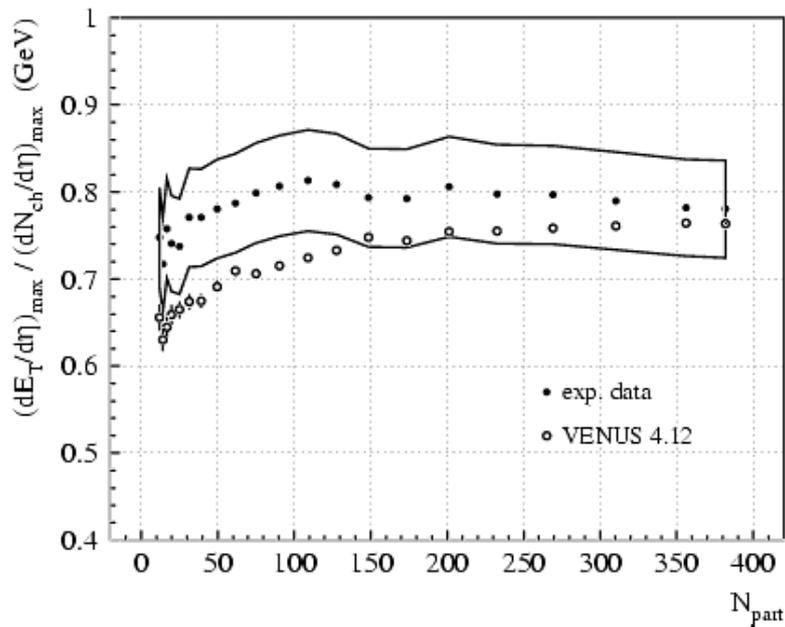


Figure 3.2 $\langle E_T \rangle / \langle N_{Ch} \rangle$, Énergie transverse moyenne par particule chargée. Les bande représente les erreurs systématiques de la mesure. Les données sont comparées aux calculs réalisés avec le modèle VENUS.

3.2.1.3 Mesure du flot anisotrope

La boule de plastique est un détecteur hérité des expériences au Bevalac. Elle mesure les impulsions des particules chargées. Les pions, protons, deuteron et tritons sont identifiés grâce à une combinaison de deux types de scintillateurs. La charge des particules n'est pas mesurée. L'acceptance de la boule de plastique couvre la région de la cible. L'isotropie de l'émission des pions et des protons a été étudiée à l'aide de ce détecteur. Dans les réactions périphériques, une anisotropie importante a été mesurée par la collaboration WA98 [31]. Le résultat principal obtenu est que les pions et les protons sont émis préférentiellement dans le plan de réactions qui est défini sur la figure 3.3.

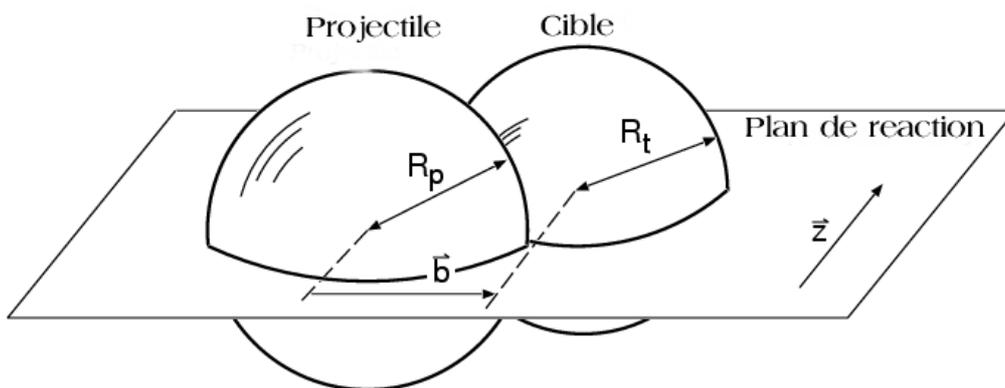


Figure 3.3 Définition du plan de réaction

3.2.2 Spectrométrie des photons

Un calorimètre au verre de plomb (LEDA) a été utilisé afin de mesurer précisément

l'énergie déposée par les gerbes électromagnétiques. Pour s'affranchir du fond hadronique, un détecteur gazeux (Charge Particle Veto) placé devant le calorimètre, sensible uniquement aux particules chargées, permet de supprimer les gerbes créées par les hadrons chargés. La combinaison de ces deux détecteurs a permis de construire la distribution en masse transverse des π^0 (figure 3.4)[20]. Ce spectre s'étend jusqu'à 4 GeV ce qui permet de tester la contribution des processus durs dans la production de pions de grande impulsion transverse qui peuvent être considérés comme provenant de mini-jets. La distribution des impulsions transverses des π^0 supérieures à 2 GeV/c est reproduite par un calcul basé sur la chromodynamique quantique perturbative. Aucun phénomène de perte d'énergie lors de la traverse de la matière nucléaire n'est nécessaire pour reproduire les données.

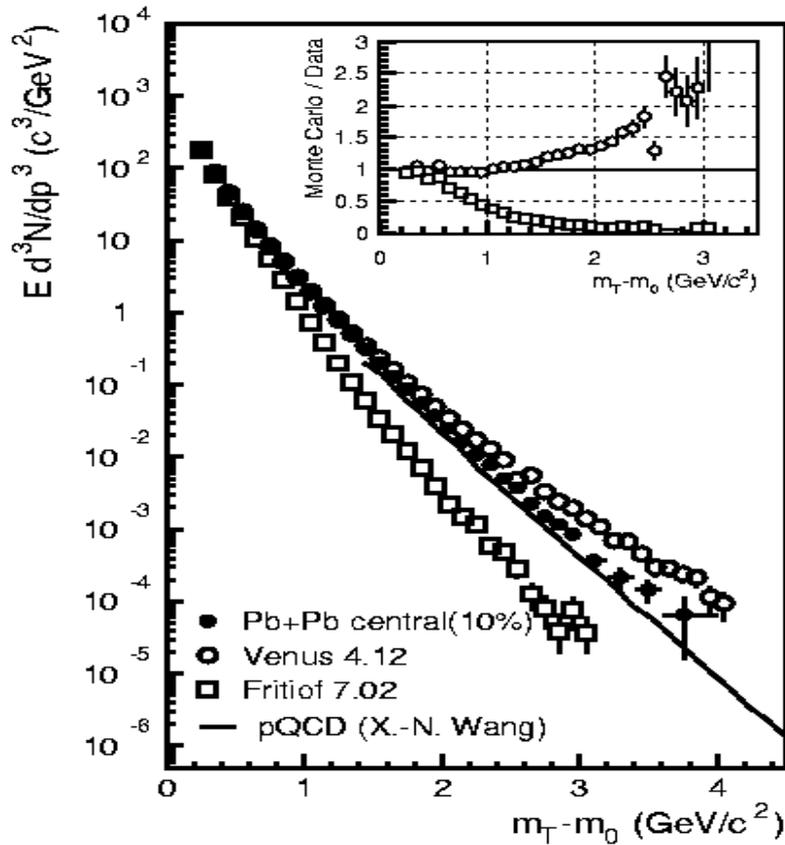


Figure 3.4 Distribution en masse transverse des π^0

Un spectre de photons directs a été extrait en éliminant la contribution des photons issus de la désintégration des mésons [12]. La figure 3.5 représente le rapport entre le nombre total de photons mesurés et le nombre de photons issus de désintégration de mésons. Un excès de photons est constaté pour des impulsions supérieures à 1.5 GeV/c dans les collisions centrales uniquement. Les calculs perturbatifs montrent que la contribution des interactions entre nucléons incidents n'est pas suffisante pour expliquer le taux de productions des photons directs. Ces calculs comportent peu d'incertitudes car ils peuvent être contraints par les mesures réalisées avec des faisceaux de protons à $\sqrt{s}=19.4$ GeV. Les

ré-interactions entre particules après les premières collisions sont donc responsables de la production de photon directs. Les données ont pu être décrites à partir d'un modèle hydrodynamique qui inclus les deux phases : partonique et hadronique. Dans le cadre de ce calcul, la source de photons dominante est la matière de quarks. Toutefois, des études théoriques plus poussées sont nécessaires afin de pouvoir affirmer que le taux de production des photons directs mesurés par WA98 implique la formation d'une phase partonique.

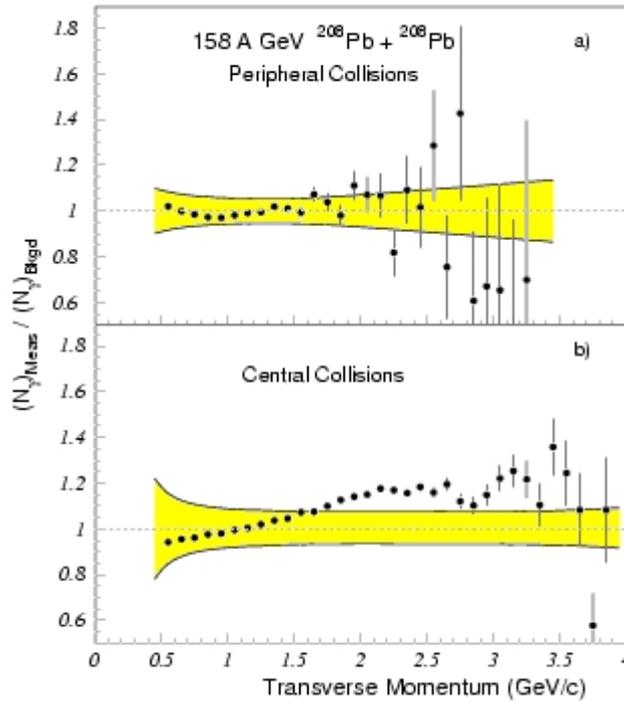


Figure 3.5 Photons directs : rapport du nombre total de photons détectés sur le nombre de photons provenant des désintégrations de mésons. Ce rapport n'est significativement différent de 1 que dans les collisions centrales.

3.3 Spectromètre de particules chargées : les bras de trajectographie

Dans l'expérience WA98, les particules chargées issues des collisions entre noyaux, traversent un aimant dipolaire (GOLIATH) qui les dévie. Le pouvoir de déviation de cet aimant est : $BL=1.6 \text{ Tm}$. Son centre est situé à 3.280 mètre de la cible. Les trajectoires des particules chargées sont reconstruites dans deux bras de trajectographie après leur traversée de l'aimant. Ces bras sont situés de part et d'autre de l'axe du faisceau de manière à mesurer simultanément les particules chargées négativement pour le bras 1 et positivement pour le bras 2. Un schéma de principe des spectromètres est représenté sur la figure 3.6. L'acceptance des deux bras est différente car ils ne forment pas le même angle avec l'axe du faisceau. La polarité du champ a été inversée pendant une période de prise de données de trois jours. Nous avons utilisé ces données au paragraphe 3.3. Le principe de fonctionnement de ces deux bras est similaire : ils se composent d'une série de détecteurs

gazeux pour la trajectographie et d'un détecteur de temps de vol pour l'identification des particules. La reconstruction des trajectoires permet de calculer l'impulsion des particules. Afin d'obtenir la meilleure mesure de l'impulsion possible la résolution en position a été optimisée dans la direction perpendiculaire au champ magnétique notée x. Nous allons maintenant détailler le fonctionnement de chaque bras de trajectographie.

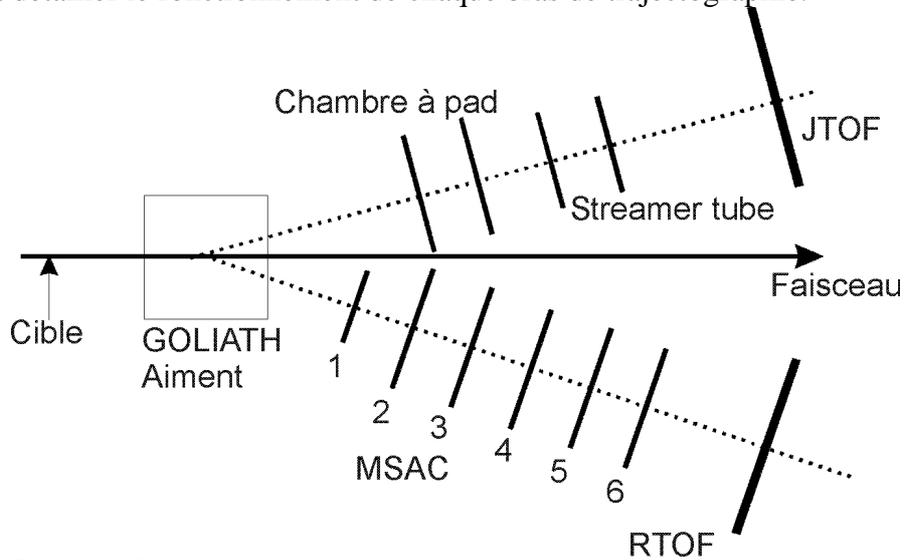


Figure 3.6 Schéma de principe des deux spectromètres de particules chargées. Les distances ne sont pas respectées.

3.3.1 Bras 1

Ce bras de trajectographie fut le premier construit à partir de 1994. Il est composé de 6 chambres à avalanche multi-étage (MSAC, Multi Step Avalanche Chamber) qui permettent de reconstruire les trajectoires des particules et d'un détecteur de temps de vol (RTOF) destiné à leur identification. Il est situé sur un axe incliné de 19° par rapport à l'axe du faisceau.

3.3.1.1 MSAC, Chambres à avalanche multi-étage

Six chambres à avalanche multi-étage (MSAC) sont utilisées dans le bras 1 de WA98 [32]. Leur surface active est de $1.2 \times 0.85 \text{ m}^2$ pour la chambre la plus proche de l'aimant et de $1.6 \times 1.2 \text{ m}^2$ pour les autres chambres. Schématiquement, elles sont composées de trois parties : un espace d'ionisation, un espace d'amplification et de dérive, et un espace de conversion du signal électrique en lumière. Chaque espace est séparé par une grille de fils conducteurs sur lesquels une tension est appliquée. Le gaz est ionisé par le passage des particules à l'intérieur de l'ensemble de la chambre, mais, seuls les électrons qui traversent l'espace d'amplification produisent un signal mesurable. Les électrons d'ionisation dérivent ensuite sous l'effet d'un champ électrique vers l'autre côté de la chambre. Pendant leur dérive, ils traversent trois zones où le champ est suffisant pour produire une amplification du nombre d'électrons. Dans le dernier espace, ils excitent des molécules de gaz TEA (Tri Ethyl Amine) qui se dés excitent en produisant de la lumière ultra-violette. Le rayonnement UV est ensuite converti en lumière visible et est dévié par des miroirs vers des caméras CCD pour y être mesuré. L'avantage de cette méthode de lecture est principalement son

faible coût étant donné que les caméras CCD sont produites industriellement. Mais les conversions des électrons en lumière UV puis en lumière visible et les pertes de lumière dans les optiques (miroir et lentilles) imposent d'utiliser les chambres à un gain important ce qui les rend vulnérables aux étincelles.

Les MSAC sont des détecteurs de grande dimension qui permettent de mesurer le point de passage des particules avec une précision estimée à 1.5 mm. Leur granularité est suffisante pour fonctionner dans un environnement où la multiplicité de particules est importante et leur longueur de radiation reste limitée. Cependant, leur point faible est l'efficacité. En effet, pour éviter les étincelles les chambres ont été utilisées avec un gain insuffisant pour assurer la détection de 100% des particules au minimum d'ionisation.

3.3.1.2 Détecteur de temps de vol

Le détecteur de temps de vol du premier bras est constitué d'un damier de 4×120 scintillateurs. Il permet de mesurer simultanément les temps de vol de plusieurs dizaines de particules. Il est situé à 16.5 m de la cible et couvre une surface de $1.2 \times 0.85 \text{ m}^2$. Il a une résolution en temps de 120 ps. Cette valeur est une convolution de la résolution du TOF avec celle de 30 ps du compteur Cherenkov à gaz qui définit l'origine du temps pour chaque particules.

Le détecteur de temps de vol peut être utilisé à la fois comme un plan de trajectographie additionnel et afin d'identifier les particules. Il permet de séparer les kaons des pions jusqu'à une impulsion de 3 GeV et les protons des pions jusqu'à 6 GeV.

3.3.2 Bras 2

Le second bras de trajectographie est composé de trois types de détecteurs : deux chambres multi-étage à avalanche, deux tubes à streamer, et un détecteur de temps de vol [33].

3.3.2.1 Chambre à avalanche à pads

Les chambres à avalanche à pad couvrent une surface de $1.2 \times 1 \text{ m}^2$ [34]. Elles fonctionnent sur le même principe que les MSAC du premier bras. Cependant, les électrons qui ont traversé toute la chambre sont directement récoltés sur des pads pour donner un signal mesurable. Chaque pad consiste en un rectangle de $1 \times 17 \text{ mm}^2$ qui est connecté à un amplificateur. Cette méthode est plus efficace que la lecture à l'aide des caméras CCD car il n'y a pas de conversion en lumière. Malgré tout, ces détecteurs souffrent aussi du problème des étincelles lorsque la densité d'électrons d'ionisation est trop importante. Ce phénomène se produit lorsqu'une particule très ionisante traverse la chambre ou lorsqu'une particule au minimum d'ionisation dépose beaucoup d'énergie dans le gaz, ce qui est possible du fait de la grande dispersion des distributions en perte d'énergie. Lorsqu'une étincelle se produit, la tension baisse dans l'ensemble de la chambre pendant une demi-seconde. Durant cette période, l'efficacité chute car le gain est fortement réduit. Nous verrons au paragraphe 4.1.1.2 comment identifier ces événements. Si on exclut ce problème de temps mort dû aux étincelles, ces chambres se sont avérées performantes, avec une efficacité de détection comprise entre 91 et 96%, et une résolution en position de 0.5 mm selon x et 1.7 mm selon y. Les pads morts sont responsables de la perte d'efficacité.

3.3.2.2 Tube à décharge

Les tubes à décharge (streamer) sont des chambres à fils qui fonctionnent à haut gain. Les avalanches dans le gaz provoquent des mini-étincelles. Le signal est mesuré par induction capacitive sur des pads de $7 \times 22 \text{ mm}^2$. Le gain dans le gaz est suffisamment grand pour ne pas nécessiter d'amplification supplémentaire. La résolution de ces détecteurs est de 3 mm en x et de 6.5 mm en y. Leur efficacité est de l'ordre de 95%.

3.3.2.3 Détecteur de temps de vol

Le détecteur de temps vol utilisé dans le deuxième bras de trajectographie de WA98 est un prototype réalisé pour l'expérience Phenix. Il est situé à environ 18 m de la cible. Sa résolution en temps est de 90 ps à laquelle il faut convoluer la résolution de 30 ps du compteur Cherenkov. Il est composé de 480 scintillateurs dont les dimensions sont pour une moitié, de $15 \times 637.7 \text{ mm}^2$ et l'autre moitié de $15 \times 433.9 \text{ mm}^2$, couvrant au total une surface de $2.45 \times 1.924 \text{ m}^2$. Sa résolution en position moyenne est 12.5 mm en x et 26.4 mm en y.

