

Thèse présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

spécialité: Physique des particules

par

Stephan SPIELMANN

**L'électronique rapide de déclenchement du calorimètre
SpaCal plomb/fibre-scintillante de l'expérience H1 à
HERA: Mise en œuvre, résultats en faisceaux test du
CERN et premiers résultats à HERA**

soutenue le 2 juillet 1996 devant le jury composé de:

MM. P. BLOCH	Président
J.M. GAILLARD	Rapporteur
H. KOLANOSKI	Rapporteur
F. MOREAU	
C. de LA TAILLE	

Remerciements

J'ai pu réaliser ma thèse dans les meilleures conditions possibles au Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies de l'Ecole Polytechnique. J'en remercie tous les membres et en particulier le directeur, François Jacquet.

Au cours de ces deux années et demi durant lesquelles j'ai participé au projet SpaCal de la collaboration H1, j'ai en particulier pu profiter de la compétence des membres du groupe électronique. Je remercie notamment Etienne Barrelet, Eric Eisenhandler, George Cozzika, Hervé Lebolo, Peter Smirnov et Jozef Spalek. Je remercie Milan Janata et son équipe dont l'aide était indispensable pendant la phase d'installation de l'électronique dans l'expérience H1.

Je remercie François Moreau qui a géré notre ambitieux projet électronique et qui a dirigé ma thèse avec soin et enthousiasme. Il m'a appris beaucoup, tant au niveau des connaissances qu'au niveau de la méthode.

J'exprime ma gratitude à Hermann Kolanoski qui m'a fait l'honneur d'accepter d'être rapporteur de ma thèse et qui n'a pas hésité à me donner tout son soutien pour obtenir le financement de mon travail.

Je remercie également les autres membres du jury de thèse, Phillippe Bloch qui en a accepté la présidence, Jean-Marc Gaillard qui a été rapporteur et Christophe de La Taille avec qui j'ai eu plusieurs discussions fructueuses et éclairantes sur l'électronique de préamplification.

Pour leur travail qualifié et soigneux, pour la réponse aux nombreuses questions et pour la bonne ambiance, je remercie le groupe électronique du Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies de l'Ecole Polytechnique et son responsable Pierre Matricon. Je remercie en particulier Cyril Drancourt, Christophe Renard, Francis Dohou et Eric Beyer.

Je dois toute ma gratitude à l'équipe H1 du laboratoire et son responsable Yves Sirois qui m'a bien accueilli et qui, grâce à son dynamisme, a toujours su créer de l'enthousiasme pour nos travaux. Je remercie Bernard Andrieu, Denis VanDenPlas ainsi que Denis Bernard du groupe Aleph du laboratoire pour avoir soigneusement lu ma thèse. J'ai eu le plaisir de partager le bureau avec Bernard Andrieu durant les années passées. Sa disponibilité et son conseil surtout dans la dernière phase ont été indispensables pour le succès de mon travail. Je remercie également Vincent Boudry, Phillippe Bruel, Andrea Migliori, François Lamarche, Arnd Specka et Christophe Thiébaux pour leur aide et leur conseil.

Table des matières

Introduction	7
1 HERA et le détecteur H1	11
1.1 HERA	11
1.2 Le détecteur H1	14
1.2.1 Présentation générale du détecteur H1	14
1.2.2 La mesure des traces chargées et le champ magnétique	14
1.2.3 La calorimétrie	20
1.2.4 Les détecteurs de muons	23
1.2.5 Le spectromètre de protons diffusés vers l'avant	23
1.2.6 Le système de temps de vol	23
1.2.7 Le compteur de luminosité	25
1.2.8 Le système de déclenchement et l'acquisition	26
1.3 La physique à HERA	29
1.3.1 Les variables cinématiques	29
1.3.2 Les sujets de physique	31
1.3.3 La diffusion profondément inélastique	34
2 Les calorimètres SpaCal-H1	43
2.1 Facteurs d'amélioration de la calorimétrie arrière	43
2.1.1 La mesure de l'électron	43
2.1.2 La mesure des hadrons	47
2.2 Description des calorimètres	48
2.2.1 Section électromagnétique	48
2.2.2 Section hadronique	54
2.3 Réponse aux électrons	56
2.3.1 Uniformité de la réponse et linéarité	56
2.3.2 Résolution en énergie	59
2.3.3 Résolution spatiale	61
2.4 La séparation électrons/pions chargés	63
2.4.1 Le dispositif expérimental	63
2.4.2 Sélection des événements	64
2.4.3 L'étalement longitudinal des gerbes	66

2.4.4	L'étalement latéral des gerbes	68
2.4.5	La combinaison des critères de séparation	75
2.5	Réponse aux MIP	76
3	L'électronique associée aux SpaCal-H1	81
3.1	Introduction	81
3.2	Vue d'ensemble	84
3.3	Le photomultiplicateur et la base active	86
3.3.1	Le photomultiplicateur	86
3.3.2	La base active	90
3.4	La mesure de l'énergie et du temps	92
3.5	La sélection en ligne des événements <i>ep</i>	99
3.6	Le déclenchement sur l'amas en énergie (IET)	104
3.6.1	Vue d'ensemble	104
3.6.2	La carte "fenêtres glissantes"	106
3.6.3	Les cartes LIET et GIET	106
3.7	La fonction véto AToF	110
3.8	Grandes Tours et Energies totales	111
4	Performances du déclenchement SpaCal-H1	113
4.1	Résultats des tests	113
4.1.1	Test des fenêtres glissantes au laboratoire	113
4.1.2	Résultats en faisceau test	118
4.2	Résultats avec le SpaCal dans H1	132
4.2.1	La calibration en temps	133
4.2.2	Performances de l'IET	142
4.2.3	Bilan du fonctionnement pour 1995	155
	Conclusions	159
	Glossaire	160
	A Cartographie des signaux	161
	Bibliographie	169

Introduction

En 1992, la collaboration H1 a décidé la réalisation d'un programme d'amélioration de la région "arrière" de son détecteur situé auprès du collisionneur HERA (Hambourg). Ce programme incluait, entre autres, la réalisation de deux calorimètres séparés, un électromagnétique et un hadronique. Le travail de cette thèse se place dans le cadre de ce projet de construction et mise en œuvre des nouveaux calorimètres et de leur électronique associée.

Ce que nous avons appelé la région arrière correspond à la région d'espace de diffusion à petit angle des électrons par rapport à leur direction incidente. Il est possible en principe d'atteindre dans cette région des domaines de Q^2 ($\simeq 1 \text{ GeV}^2$) et x ($< 10^{-4}$) petits. Ces domaines sont intéressants du point de vue d'une part de l'étude de la structure du proton à haute densité de partons/gluons [1] et d'autre part de la compréhension de la transition entre la photoproduction $Q^2 \approx 0 \text{ GeV}^2$ et la diffusion profondément inélastique $Q^2 \gtrsim 5 \text{ GeV}^2$ [2].

Du point de vue expérimental, l'accès à ces nouveaux domaines correspond à augmenter l'acceptance angulaire des électrons diffusés à petits angles et à abaisser le seuil effectif de détection à 3-4 GeV environ (contre 8 GeV précédemment). Mais pour ces énergies, il est essentiel d'identifier l'électron car les événements de photoproduction génèrent des pions qui simulent le dépôt d'énergie d'un électron dans le calorimètre. Un autre facteur important pour accéder à cette nouvelle physique est la minimisation des biais systématiques dûs à des zones mortes du détecteur ou à une inefficacité de l'électronique de déclenchement variant spatialement.

Une particularité des collisions à HERA est la possibilité de reconstruire les variables cinématiques d'une collision en utilisant totalement (ou partiellement) l'information de l'état final hadronique. Pour ce dernier, la mesure n'était pas faite dans la région arrière à cause de l'absence de calorimétrie hadronique. L'exigence de l'ajout d'un tel calorimètre derrière le calorimètre électromagnétique a eu pour conséquence la réalisation d'une électronique rapide de mesure calorimétrique de temps de vol. Nous devons en effet rejeter un bruit de fond généré par les collisions proton-gaz qui déposent leur énergie dans le calorimètre arrière 9 ns en moyenne avant le dépôt d'énergie généré par une collision physique. Ce rejet était effectué précédemment par un mur de scintillateurs qui fut retiré pour

l'installation du calorimètre hadronique.

La technique de calorimétrie, choisie par la collaboration H1 a été celle des fibres scintillantes/plomb (SpaCal) développée dans les années 80 et 90 [3]. L'électronique associée à ces détecteurs SpaCal-H1 (1600 voies au total) a été entièrement conçue (et réalisée!) pour satisfaire ces exigences de déclenchement uniforme et de rejet de bruit de fond par temps de vol. Ces nouveaux détecteurs ont été installés dans H1 pendant la fermeture de HERA à l'hiver 1994/1995 et ont été utilisés pendant la prise de données 1995. Cette thèse couvre donc la période du projet SpaCal-H1 depuis les nombreux tests réalisés au faisceau (CERN principalement) jusqu'aux premières analyses des performances sur site pendant l'année 1995.

Les sujets principaux abordés dans cette thèse sont:

- la mise en œuvre en faisceau test des prototypes de l'électronique rapide de déclenchement. Cette étape essentielle nous a permis d'établir les performances accessibles et de valider les circuits, avant le lancement de la production de série.
- L'installation et mise en route à HERA de l'électronique de déclenchement sur l'amas en énergie dont nous avons la responsabilité.
- Les résultats après la première année de fonctionnement dans H1.
- Des données de faisceau test ont été aussi enregistrées pour l'étude de la séparation électron/pion dont nous présentons les résultats.

Nous résumons rapidement le contenu des quatre chapitres qui composent ce mémoire de thèse.

Au premier chapitre, après une brève description du collisionneur HERA (paragraphe 1.1) nous décrivons en détail le détecteur H1 (paragraphe 1.2) et continuons avec une discussion des principaux sujets de physique qui peuvent être étudiés à HERA (paragraphe 1.3).

Au deuxième chapitre, nous indiquons les facteurs d'amélioration de la calorimétrie que l'on cherche à réaliser à travers le projet SpaCal (paragraphe 2.1). Ensuite nous décrivons le détail de la géométrie et réalisation de ces calorimètres (paragraphe 2.2) et continuons (paragraphe 2.3) avec la présentation de leurs performances (linéarité, résolution ...) mesurées en faisceau test. Les paragraphes 2.4 et 2.5, sont dédiés aux résultats concernant la séparation électron/pion et la réponse aux particules au minimum d'ionisation.

Les deux derniers chapitres sont consacrés d'une part (chapitre 3) à la description de l'électronique associée à ces calorimètres et d'autre part à la présentation

de ses performances (chapitre 4). Au chapitre 3, après avoir introduit la position du problème (paragraphe 3.1), nous donnons une vue d'ensemble de cette électronique (paragraphe 3.2) dont les diverses composantes sont décrites aux paragraphes 3.3-3.8; le paragraphe 3.6 est relatif au déclenchement sur l'amas en énergie, dont nous avons eu la responsabilité.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les performances obtenues lors des tests de prototypes en faisceau au CERN (paragraphe 4.1.2). Dans le paragraphe 4.2 nous présentons d'une part, la méthode utilisée pour calibrer l'efficacité de la sélection des événements physiques par temps de vol et d'autre part les efficacités du déclenchement sur l'amas d'énergie (IET); ces résultats sont ceux obtenus à HERA pendant la campagne de prises de données 1995. Enfin, nous résumons (paragraphe 4.3) les principaux problèmes rencontrés pendant cette prise de données et les améliorations prévues pour l'année 1996.

Chapitre 1

HERA et le détecteur H1

1.1 HERA

L'accélérateur HERA (**H**adron **E**lektron **R**ing **A**nlage) situé à Hambourg auprès du site de DESY (**D**eutsches **E**lektronen-**S**ynchrotron) est le premier collisionneur lepton-nucléon. Il consiste en deux anneaux indépendants dont l'un sert à accélérer et stocker des électrons et l'autre des protons. L'énergie nominale des électrons est de 30 GeV et celle des protons atteint 820 GeV. Ainsi l'énergie maximale dans le centre de masse est $\sqrt{s} = 314$ GeV. Pour obtenir une telle énergie avec un faisceau d'électrons projeté sur une cible fixe, les électrons devraient être accélérés jusqu'à 52 TeV, une énergie inaccessible à la technologie d'aujourd'hui. Les énergies dans le centre de masse pour de telles expériences sur cible fixe sont limitées à quelques dizaines de GeV jusqu'à présent. HERA est donc le premier collisionneur *ep* permettant d'accéder à une région cinématique jamais atteinte auparavant.

Avant d'être injectées dans les deux anneaux de HERA d'une circonférence de 6.3 km, les particules sont préalablement accélérées (fig. 1.1). Les protons atteignent une énergie de 40 GeV dans l'anneau PETRA avant d'entrer dans HERA. Le processus d'injection dans HERA est réalisé par l'envoi des paquets de protons par période de 96 ns. A la suite de la procédure d'injection dans HERA, les protons sont accélérés jusqu'à leur énergie nominale et stockés à l'aide des aimants supraconducteurs qui créent un champ magnétique de 4.53 T. Le remplissage de l'anneau d'électrons est réalisé de la même façon. Ces derniers ont une énergie de 14 GeV en entrant dans HERA.

Beaucoup de paramètres des aimants, tant de focalisation que de déflexion, sont à considérer, ce qui rend l'ajustement du faisceau complexe. C'est ce qui pourrait expliquer pourquoi les valeurs nominales pour HERA n'ont pas encore été atteintes, bien que les performances

aient été considérablement améliorées au cours des années (tableau 1.1). Une des mesures prises pour améliorer la luminosité de la machine a consisté en 1994, à

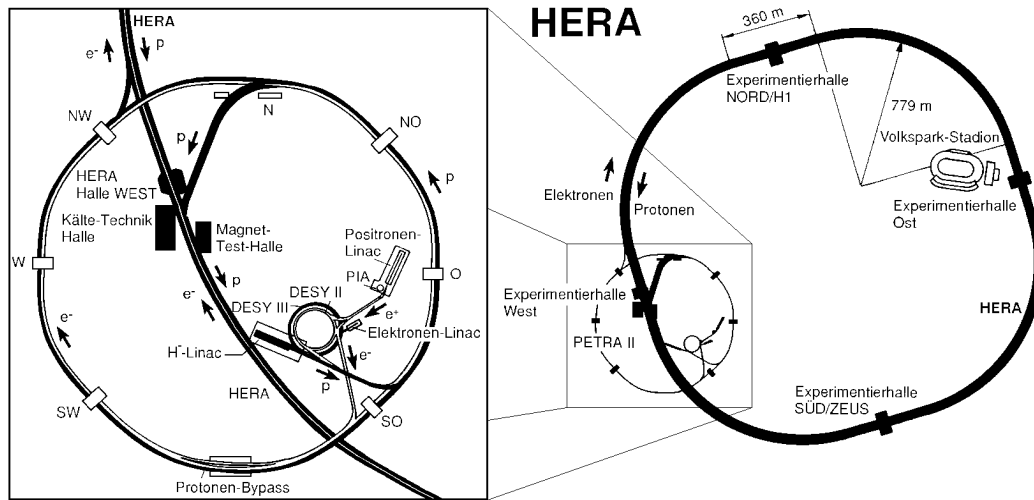


Figure 1.1: Plan du collisionneur HERA avec ses pré-accélérateurs. À gauche, un agrandissement du système d'injection est présenté.

remplacer les électrons par des positrons¹. Ce changement a aussi rendu possible des nouvelles études de physique, notamment en ce qui concerne la recherche des particules au-delà du Modèle Standard et l'analyse des courants chargés.

Au collisionneur HERA, il y a 4 points d'interaction autour de chacun desquels on trouve un détecteur d'une expérience pour l'étude de différents domaines de la physique des particules. Deux de ces expériences, H1 (350 chercheurs de 12 pays) et ZEUS (450 chercheurs de 11 pays), de finalité comparable ont un programme de mesure des interactions ep très vaste que nous décrirons au paragraphe 1.3. Nous indiquerons en particulier, les résultats déjà obtenus par ces deux expériences qui prennent des données depuis le démarrage de HERA en 1992.

HERMES, la troisième collaboration, a commencé à prendre des données au printemps 1995. Utilisant uniquement le faisceau des électrons polarisés diffusé sur une cible de gaz dilué, leur but est de vérifier les règles de somme de QCD et de mesurer les fonctions de structure. À l'aide de différentes cibles polarisées qui sont composées de ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$ ou ${}^3\text{He}$, on peut mesurer les fonctions de structure dépendantes du spin du proton et du neutron.

Enfin, la quatrième expérience HERA-B est dédiée à l'étude de la violation de CP dans le système $B-\bar{B}$. Ce dernier est produit en faisant interagir les protons sur une cible fixe interne. Le démarrage de cette expérience est prévue pour 1998.

¹Par la suite, le mot "électrons" sera utilisé sauf quand la distinction entre "électrons" et "positrons" deviendra essentielle.

	1992		1993		1994	
	e^-	p	e^-	p	e^-	p
énergie (GeV)	26.7	820	26.7	820	27.5	820
luminosité moyenne ($cm^{-2}s^{-1}$)	0.29 10^{29}		0.28 10^{30}		0.57 10^{30}	
luminosité par an (pb^{-1})	0.055		0.998		0.938	
nombre maximal de paquets	9	9	84	84	153	153
nombre de paquets pilotes	1	1	10	10	15	15
courant moyen (mA)	1.40	1.07	7.72	10.79	10.49	28.55

	1994		1995		nominal	
	e^+	p	e^+	p	e	p
énergie (GeV)	27.5	820	27.5	820	30	820
luminosité moyenne ($cm^{-2}s^{-1}$)	1.40 10^{30}		2.13 10^{30}		1.50 10^{31}	
luminosité par an (pb^{-1})	4.977		11.055		100	
nombre maximal de paquets	153	153	174	174	210	210
nombre de paquets pilotes	15	17	15	6	0	0
courant moyen (mA)	17.00	41.02	18.4	54.0	60	160

Tableau 1.1: Les paramètres du collisionneur HERA pour des années 1992-1995. En 1994, le faisceau d'électron fut remplacé par un faisceau de positrons. Nous remarquons que les paquets dit pilote sont des faisceaux de protons (électrons) n'ayant pas de correspondant électrons (protons). Ces paquets pilotes sont employés pour évaluer le bruit de fond.

1.2 Le détecteur H1

L'expérience H1, installée dans la zone d'interaction nord du collisionneur HERA, fonctionne depuis 1992. La connaissance de certaines de ses limites pour accéder à de nouveaux domaines de physique a conduit un projet d'amélioration de certaines de ses composants lors de la fermeture de HERA à l'hiver 1994/1995. Nous incluons dans notre description du détecteur H1 ces améliorations.

1.2.1 Présentation générale du détecteur H1

La grande différence en énergie entre les électrons et les protons se reflète dans la conception de l'ensemble du détecteur H1. La partie vers l'avant, c'est-à-dire en direction de l'impulsion des protons, est instrumentée différemment de la partie vers l'arrière (fig. 1.2). Néanmoins, le détecteur possède évidemment une symétrie cylindrique par rapport à l'axe du faisceau.

En partant du point d'interaction nominal, H1 consiste en un ensemble de sous-détecteurs qui peuvent être divisés selon leurs tâches respectives:

- Les détecteur à traces,
- Les calorimètres,
- Un fer de retour du champ magnétique entourant l'aimant supraconducteur, instrumenté pour la mesure des muons,
- Un système de temps de vol en arrière,
- Un spectromètre à muons à l'avant,
- Un spectromètre à protons à l'avant,
- Des détecteurs pour la mesure de la luminosité.

Le système des coordonnées de H1 est défini de telle façon que la direction des protons incidents donne l'axe z . L'axe y est défini comme la verticale ascendante et l'axe x est orienté horizontalement. L'origine se trouve au point d'interaction. L'angle θ balaie le plan en coupe transversale du détecteur H1 le long de l'axe du faisceau tel que $\theta = 180^\circ$ pointe la direction des électrons incidents. La variable ϕ segmente la coupe transversale du détecteur H1. La variable r est la distance au point d'interaction dans cette projection.

1.2.2 La mesure des traces chargées et le champ magnétique

Pour mesurer le parcours des particules chargées, on exploite leurs propriétés ionisantes. Quand les particules traversent un champ magnétique, on peut mesurer

HERA L'expérience H1

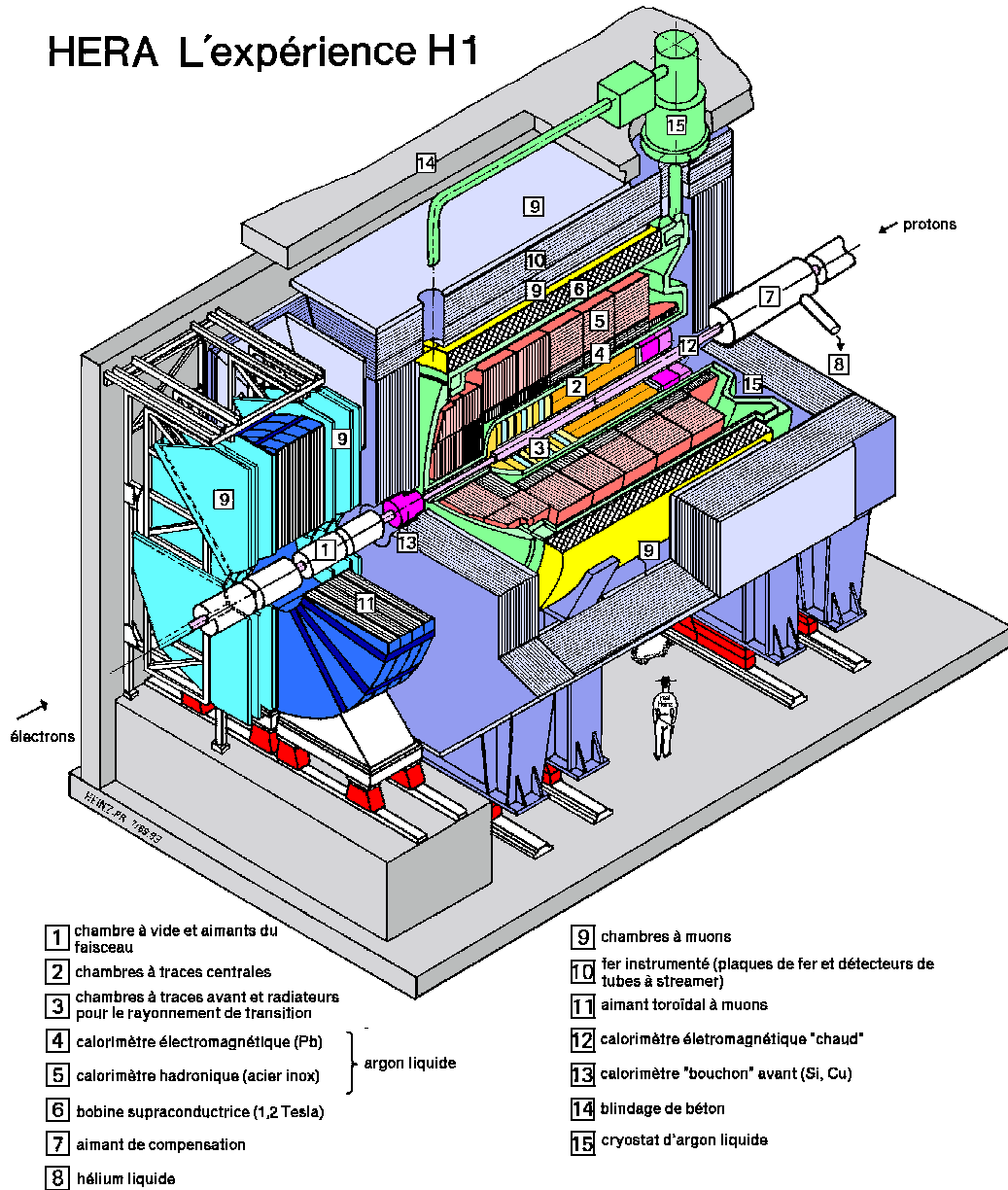


Figure 1.2: Vue globale du détecteur H1.

leur impulsion grâce à la courbure des trajectoires induite par la force de Lorentz. Les détecteurs à traces sont plongés dans un champ magnétique de 1.2 T, engendré par une bobine supraconductrice située à l'extérieur du calorimètre à argon liquide (fig. 1.3). Le champ est orienté parallèlement à l'axe du faisceau et

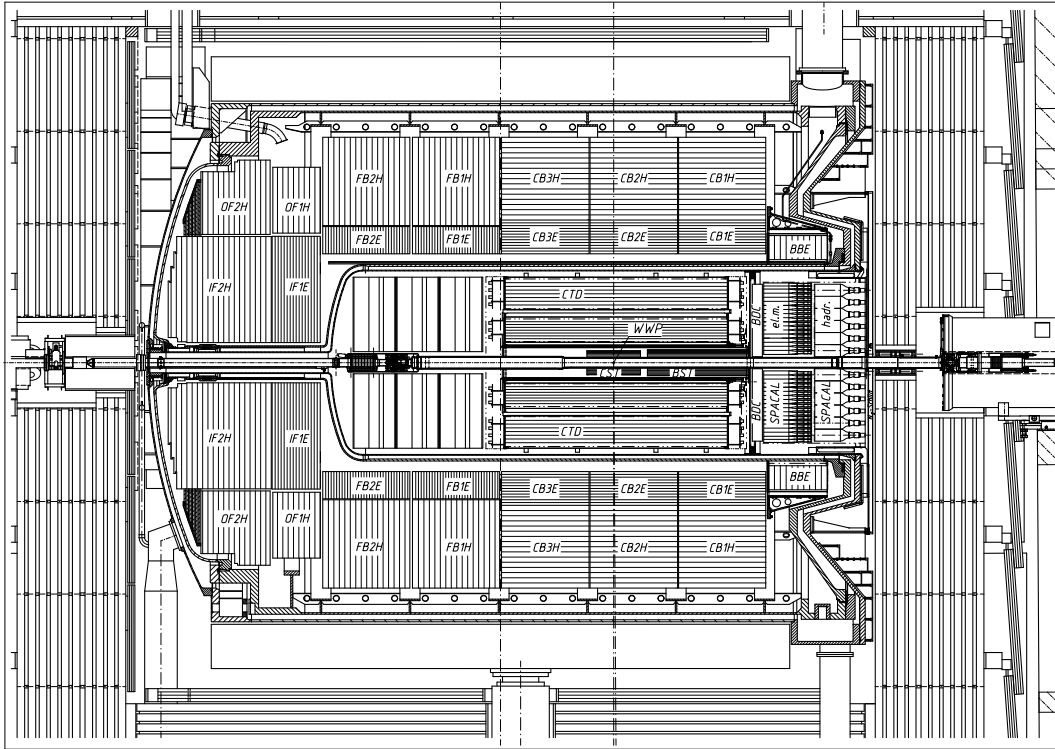


Figure 1.3: Coupe longitudinale du détecteur H1, le long de l'axe du faisceau.

ne varie que de quelques pour-cent dans la région des détecteurs à traces. Pour boucler les lignes de champ, H1 est entouré par des plaques de fer. Vers l'avant, un aimant de compensation est installé afin d'éviter une perturbation du faisceau par le champ magnétique de H1.

Les détecteurs à traces au silicium

Lors de la fermeture de HERA à l'hiver 1994/1995, le tube à vide dans H1 a été remplacé par un tube de diamètre plus petit, permettant d'introduire des détecteurs à traces au silicium, caractérisés par une excellente résolution en position. Ces détecteurs au silicium se divisent en deux ensembles, l'un entourant le vertex nominal d'interaction (**CST**²) et l'autre situé vers l'arrière (**BST**³).

²Central Silicon Tracker

³Backward Silicon Tracker

L'intérêt principal qui a motivé la construction du CST est l'amélioration de l'étude des particules à court temps de vie. L'assemblage final du CST est composé de deux cylindres concentriques de détecteurs au silicium double faces (fig. 1.4); leur rayon respectif est de 40 mm et 75 mm. Chaque cylindre est cons-

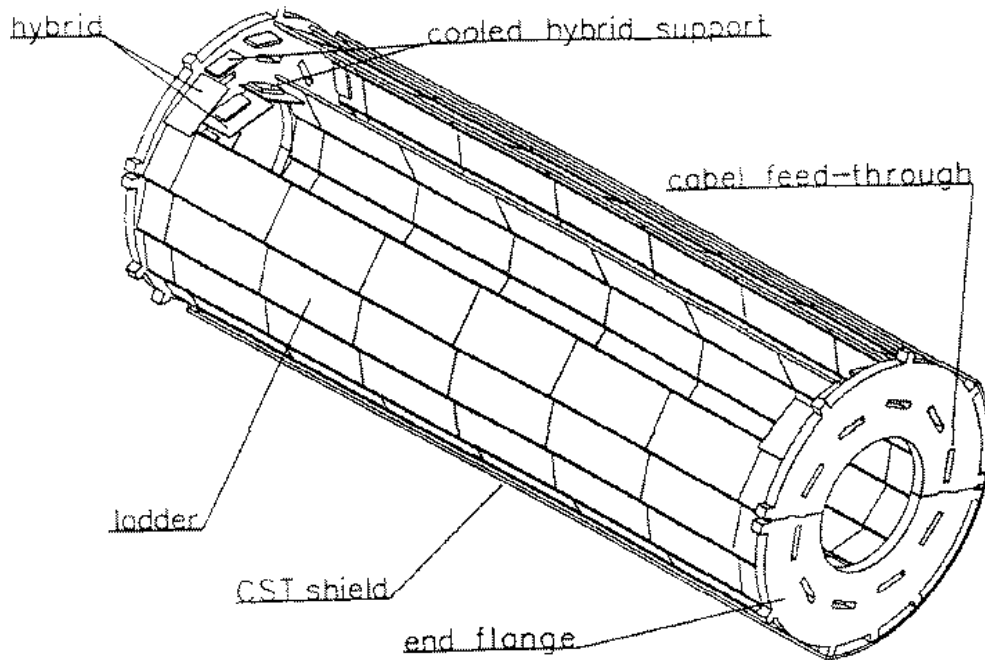


Figure 1.4: Vue en perspective du CST. La longueur complète est 400 mm

titué de 6 anneaux de couches, comportants respectivement 10 et 16 détecteurs élémentaires.

En 1995, le CST ne comportait que la moitié des détecteurs élémentaires de chaque cylindre. On prévoit l'installation de l'autre moitié lors de la fermeture de HERA pendant l'hiver 1995/1996.

Le CST complet pourra reconstruire des traces entre $62^\circ < \theta < 118^\circ$ avec une résolution spatiale de $60 \mu\text{m}$ pour une particule de 1 GeV d'impulsion diffusée à un angle de $\theta = 90^\circ$. Une telle résolution permettra de reconstruire les vertex primaires et secondaires très précisément. Ainsi pour des baryons et mésons contenant des quark b ou c qui sont créés par photoproduction, on possède un outil efficace afin de rejeter le bruit de fond induit par les particules produites à partir de la désintégration des quarks légers [4].

La réalisation de la partie **BST** (**B**ackward **S**ilicon **T**racker) a été motivée par l'intérêt d'augmenter l'acceptance en θ du détecteur H1 dans la région vers l'arrière dans le domaine $167^\circ < \theta < 176^\circ$, couvrant 90% des événements de la diffusion profondément inélastique avec un $Q^2 > 4 \text{ GeV}$ [4].

L'assemblage final du BST comportera 8 disques montés perpendiculairement par rapport à l'axe du faisceau. Les disques, situés entre $z = -280$ mm et $z = -860$ mm, ont un rayon intérieur de 55 mm pour l'insertion du tube à vide et un rayon extérieur de 126 mm.

Chaque disque comprend 16 secteurs en ϕ , équipés de 3 couches de détecteurs au silicium, ayant respectivement des "strips" radiaux pour la mesure en ϕ , des "strip" circulaires pour la mesure en θ et une segmentation en "pads" pour un déclenchement rapide. Le BST aura une résolution en ϕ ainsi qu'en θ d'environ 1 mrad.

Pour l'instant, le BST n'est pas équipé complètement. Il est prévu d'intégrer les détecteurs manquants à l'hiver 1995/1996. Une présentation des modules déjà installés dans H1 se trouve dans la figure 1.5.

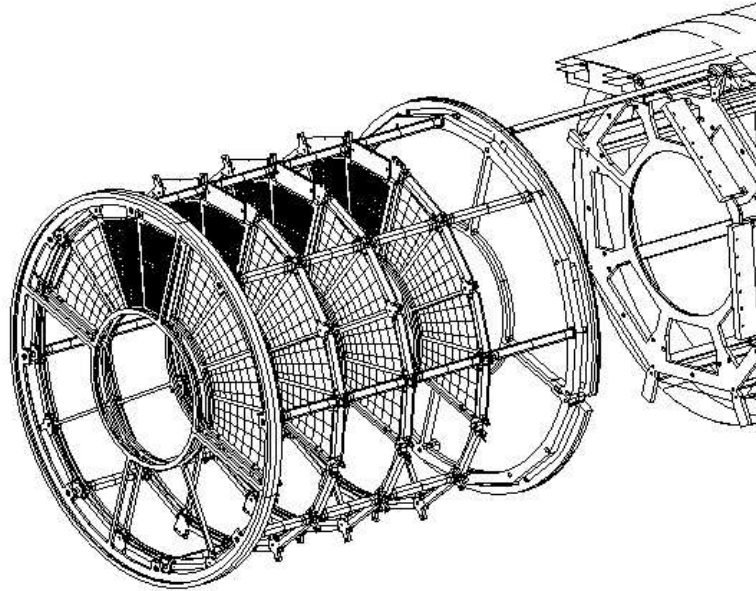


Figure 1.5: Vue en perspective du BST, tel qu'il est intégré dans H1 au printemps 1995. Jusqu'à maintenant seuls quatre disques sont équipés avec 8 secteurs des "pad" pour le déclenchement, 2 secteurs comportent aussi des détecteurs de "strip" radial pour une résolution en θ . La distance entre les disques est 62 mm.

Les chambres dans la région centrale

La partie centrale dans le domaine angulaire $25^\circ < \theta < 155^\circ$ est équipée de deux grandes chambres à dérive concentriques (CJC1 et CJC2), de deux chambres à dérive (CIZ et COZ) de moindre envergure et de deux chambres proportionnelles

(CIP et COP). Leurs tailles et positions respectives sont présentées à la figure 1.6.

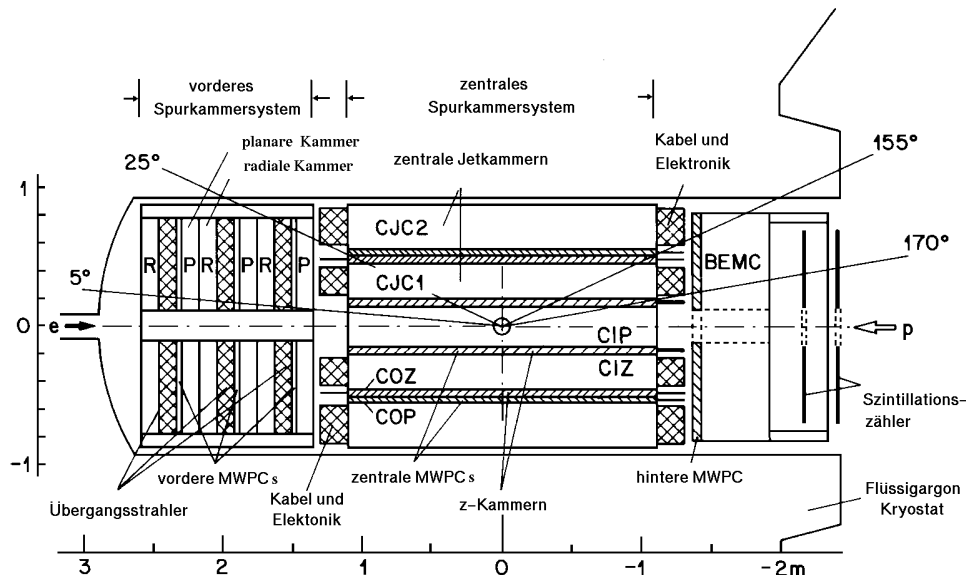


Figure 1.6: Les détecteurs de traces, vue θ - z .

Les chambres CJC1 et CJC2 sont composées respectivement de 30 et 60 cellules dans la projection r - ϕ . Leurs fils d'anode sont tendus parallèlement à l'axe du faisceau. Dans le plan r - ϕ , ces chambres permettent d'obtenir une résolution en impulsion de $\sigma_p/p < 0.01 p / \text{GeV}$ et une résolution spatiale de $170 \mu\text{m}$ [6]. Pour des traces issues du vertex primaire, on peut même, en imposant la contrainte au vertex, obtenir une résolution en impulsion de $0.3\% p / \text{GeV}$. Ces chambres offrent en plus une mesure du dE/dx à 10% près.

Les chambres CIZ et COZ qui disposent de fils orthogonaux à l'axe du faisceau, complètent la mesure des traces chargées dans région centrale. Ils ont une résolution spatiale de $\sigma_z \approx 350 \mu\text{m}$ et une résolution angulaire $\sigma_\phi \approx 100 \text{ mrad}$.

Les deux chambres proportionnelles CIP et COP qui sont équipées de plans de plusieurs fils fournissent des informations rapidement accessibles pour le système de déclenchement de premier niveau.

Les chambres dans la partie avant

Le détecteur FTD (**F**orward **T**racking **D**etector) couvre le domaine angulaire $7^\circ < \theta < 25^\circ$ (fig. 1.6). Il comprend 3 supermodules identiques qui permettent de mesurer l'impulsion dans le plan r - ϕ avec une précision de $\sigma_p/p < 0.03p / \text{GeV}$ pour $p > 3 \text{ GeV}$ et la contrainte que la trajectoire a son origine au vertex primaire.

La résolution angulaire $\sigma_{\theta\phi}$ est de l'ordre de 1 mrad. Les supermodules sont composés de 4 types de modules différents:

- Des chambres à dérive planaires, constituées de 3 plans de fils parallèles tournés de 60° en ϕ l'une par rapport à l'autre. Ils permettent d'obtenir une résolution en $x-y$ comprise entre $150 \mu\text{m}$ et $170 \mu\text{m}$.
- Des chambres à dérive radiales, les fils pointant vers le faisceau. Les résolutions obtenues en $r-\phi$ sont de l'ordre de $190 \mu\text{m}$.
- Des détecteur de radiateurs de transition, pour l'identification des électrons; les photons de rayonnement X, créés par le passage de l'électron, sont détectés dans les chambres.
- Des chambres proportionnelles FWPC (MWPC dans la figure 1.6) utilisées pour le déclenchement de premier niveau.

La chambre à dérive à l'arrière

Comme le CST et le BST, la chambre à dérive en arrière **BDC** (**B**ackward **D**rift **C**hamber) fait partie du projet d'amélioration de H1. Elle a également été installée dans la période de fermeture de HERA en 1994/1995. La BDC couvre un domaine entre $157^\circ < \theta < 177^\circ$. La BDC est composée de 8 couches octogonales dont chacune contient des anodes sensibles perpendiculaires à l'axe du faisceau. On s'attend à obtenir des résolutions $\sigma_r = 400 \mu\text{m}$, et $\sigma_\phi = 800 \mu\text{m}$. La résolution de séparation des traces doubles est de l'ordre de 3 mm. On espère obtenir avec ce détecteur une mesure de dE/dx , utile pour l'identification des particules, avec une précision de 30% [5].

1.2.3 La calorimétrie

La mesure de l'énergie des particules dans le domaine angulaire $4^\circ < \theta < 152^\circ$ est réalisée par le calorimètre à échantillonnage à argon liquide qui constitue la pièce maîtresse du détecteur H1. Dans la région $152^\circ < \theta < 177.5^\circ$, c'est le détecteur SpaCal (**S**paghetti **C**alorimeter), dont nous parlerons plus en détail dans les chapitres suivants puisqu'il constitue le sujet de cette thèse. Ces deux calorimètres (Argon liquide, SpaCal) sont complétés par:

- Un petit calorimètre dans la direction du proton (le "PLUG"),
- Un détecteur de fin de gerbe localisé dans le fer de retour du champ magnétique de la bobine.

Nous allons décrire les principales caractéristiques du calorimètre à argon liquide.