Centre de Physique des Particules de Marseille

Etude et comparaison de différents algorithmes de recherche d'électrons

Nicolas Delerue

Marseille, France
Juillet 1995

Table des matières

A Finalités de la recherche à HERA 5

A-I Historique: la quête de l'infiniment petit et des composants ultimes de la matière... 6

A-I.1 L'élémentarité dans l'antiquité 6

A-I.2 L'expérience de Rutherford et les premiers modèles de l'atome 6

A-I.3 A la recherche de la structure du noyau atomique 7

A-I.4 Les Accélérateurs de particule et la structure du nucléon 7

A-I.5 Les tentatives d'unification des forces de la nature 8

A-II Vers une amélioration des modèles actuels 10

A-II.1 La recherche de nouvelles particules 10

A-II.2 L'amélioration de la compréhension de la structure du nucléon. 10

A-III La physique à HERA 12

A-III.1 Le fonctionnement de l'accélérateur 12

A-III.2 Les domaines d'étude couverts par HERA 13

A-IV Les résultats des expériences en physique des particules 14

A-IV.1 Comment observer l'infiniment petit ? 14

A-IV.2 La prise de données 15

A-IV.3 Caractérisation d'un électron 17

B Comparaison des electron finders 18

B-I Des "*electron finders*" pour quoi faire? 19

B-I.1 Les événements concernés 19

B-I.2 Problème rencontrés lors de la sélection événements 23

B-I.2.1 Le bruit de fond 23

B-I.2.2 Les Cracks 23

B-I.3 Le tri des données 26

B-II Les electron finders étudiés **27**

B-II.1 le premier "*electron finder*" 27

B-II.2 le deuxième "*electron finder*" 27

B-III Techniques de comparaison **28**

B-III.1 Les variables étudiées 28

B-III.2 Provenance des données étudiées 28

B-III.3 Méthode de comparaison des "*electron finders*" 29

B-IV Résultats de l'analyse **30**

B-IV.1 Les variables de l'étude 30

B-IV.2 Comparaison des échecs des deux finders 32

B-IV.2.1 Analyse des valeurs de ϕ pour les électrons perdus 32

B-IV.2.2 Analyse des valeurs de θ pour les électrons perdus 34

B-IV.2.3 Valeurs de l'énergie pour les électrons perdus 34

B-IV.3 Comparaison de la qualité des données des deux finders 37

B-IV.3.1 Analyse des erreurs sur ϕ pour les électrons retrouvés 37

B-IV.3.2 Analyse des erreurs sur θ pour les électrons retrouvés 40

B-IV.3.3 Analyse des erreurs sur l'énergie pour les électrons retrouvés 42

C Conclusion **43**

D Appendice **I**

Partie A

Finalités de la recherche à HERA

Chapitre A-I

Historique: la quête de l'infiniment petit et des composants ultimes de la matière...

A-I.1 L'élémentarité dans l'antiquité

Depuis toujours les hommes ont voulu savoir de quoi était constituée la matière, car ils devinaient intuitivement que malgré sa grande diversité, le monde qui nous entoure pouvait être fait à l'aide de "*briques élémentaires* " qui assemblées différement créent les différents objets qui nous entourent...

Les atomes furent mis en évidence à la fin du XIX^{eme} siècle, mais très vite il apparut évident qu'il existait une structure sous-jacente...

A-I.2 L'expérience de Rutherford et les premiers modèles de l'atome

Pour explorer la structure interne de l'atome Rutherford eut l'idée de bombarder une plaque métallique avec des particules α[1] et d'observer la déviation angulaire de ces particules.

Au cours de cette expérience il constata que les particules semblaient être repoussées par une toute petite portion de l'atome. Il en conclut qu'il y avait au centre de l'atome une particule (ou un ensemble de particules) de même charge que celle des particules α. C'est à dire de charge opposée à celle de l'électron (donc positive). En étudiant la probabilité qu'avait la particule α d'interagir avec cette particule au centre de l'atome, il estima que sa taille était environ 10^{-4} fois inférieure à celle de l'atome... Il en déduisit qu'il y avait, au coeur de l'atome, un tout petit noyau chargé positivement, beaucoup plus massif que les électrons et que le reste de l'atome n'était formé que de vide...

Le modèle qui fut alors proposé fut établi par analogie avec le seul système de ce genre qui était connu à l'époque, c'est à dire le système solaire. Rutherford proposa donc un modèle[2] où l'atome serait comparable à un système solaire, le noyau jouant le rôle du soleil et le cortège électronique celui des planètes...

Moyennant quelques améliorations ultérieures, ce modèle décrivait assez bien la structure de l'atome. Mais en fait le probléme de l'élémentarité n'avait été que repoussé, puisque si l'électron pouvait être élémentaire, il était évident que le noyau, lui, ne l'était pas...

[1] Une particule α est un atome d'Hélium ayant perdu ses deux électrons ($^4_2He^{2+}$). Ces particules sont émises lors d'une désintégration radioactive de type α, d'où leur nom...

[2] On sait aujourd'hui que ce modèle ne décrit pas exactement la structure de l'atome, entres autres pour des raisons de stabilité des électrons

A-I.3 A la recherche de la structure du noyau atomique

En 1932 Dirac postulat l'existence de l'antimatière, ainsi à l'électron il associa un positron de charge +1 et de même masse que l'électron . Tout d'abord on crut que cette particule pouvait être présente à l'intérieur du noyau. Mais cette théorie fut abandonnée suite à la découverte d'une autre particule dans les rayons cosmiques.

Cette nouvelle particule, elle aussi de charge +1 et de masse comparable à celle d'un atome d'hydrogène, semblait être à la base de la constitution du noyau, c'est pourquoi on la nomma "*proton*". Peu après Chadwick lui découvrit un compagnon neutre lui aussi présent dans le noyau. Il nomma cette particule "*Neutron*".

On possédait enfin les briques qui permettaient de construire tous les atomes connus, à partir de seulement trois particules: le proton, le neutron et l'électron .

Pourtant on avait déjà constaté qu'il existait, dans les rayons cosmiques, d'autres particules qui n'étaient, pour l'instant, pas classifiables. L'évolution des techniques avait aussi permis la mise au point, au cours des années trente, de petits accélérateurs de particules qui eux aussi révélèrent l'existence de particules étranges, et que l'on ne pouvait pas classer.

A-I.4 Les Accélérateurs de particule et la structure du nucléon

Après la seconde guerre mondiale la physique de l'atome eut un regain d'intérêt et les trois grands pôles scientifiques du monde (Etats-Unis, Union Soviétique et Europe) décidèrent de créer des laboratoires de recherche dans ce domaine. C'est à cette époque que le CERN vit le jour en Europe.

Les données collectées par ces accélérateurs mirent en évidence l'existence d'un grand nombre de particules dites élémentaires, car elles avaient des propriétés semblables à celles du nucléon. A nouveau il devenait nécessaire de les classer.

C'est en les classant que Gell-Mann[3] trouva à nouveau une propriété qui laissa imaginer une structure sous-jacente. En effet, il constata que les différentes particules élémentaires connues à l'époque (1960) formaient, à l'aide d'un classement approprié, une figure mathématique analogue à celle des éléments du groupe SU(3).

Ce classement laissait donc présager une sous-structure où apparaîtrait trois particules différentes. Cette idée fut reprise dans la théorie des quarks qui est maintenant acceptée comme la théorie décrivant la structure du nucléon. Toutefois, depuis l'idée de Gell-Mann, de nouvelles particules ont été découvertes et le nombre de quarks à été porté à six.

Contrairement aux autres particules connues, les quarks n'ont pas une charge entière (par rapport à celle de l'électron), mais une charge multiple du tiers de celle de l'électron. Pourtant toutes les expériences visant à mettre en évidence des particules de charge fractionnaire, et entre autre l'expérience de Millikan, échouèrent. La théorie fut alors reformulée en spécifiant que la force qui lie les quarks entre eux croit exponentiellement avec la distance, forçant les quarks à rester par groupes dont la charge est entière... C'est ce que l'on appelle la liberté asymptotique: deux particules proches l'une de l'autre n'interagissent pas entres elles, elles sont libres, alors que deux particules distantes s'attirent très fortement, elles sont liées.

Cette théorie appelée ChromoDynamique Quantique (QCD) fait entre autres intervenir un nouveau type de charges appelée "charges de couleur" : les quarks sont soit Bleu, soit Rouge, soit Vert, mais on ne peut observer que de particules incolores, ce qui oblige les quarks à être groupés, et qui permet de n'obtenir que des particules de charge électrique entière...

A l'heure actuelle cette théorie reste valable, le nombre de quarks a été porté à six et il a été démontré au LEP[4] qu'il existait au maximun trois familles de deux quarks. D'ailleurs, même s'ils

[3] cf [M. Gell-Mann, Phys. Lett. 8 (1964) 214]

[4] LEP = Large Electron Positron collideur. Collisionneur Electron Positron situé au CERN.

ne peuvent pas les observer directement, les physiciens ont recueilli des preuves expérimentales de l'existence des quarks.

A ces trois familles de quarks on associe aussi les trois familles de leptons.[5]

Au total on a donc, dans l'état actuelle de nos connaissances:
12 particules élémentaires de matière ainsi que leurs anti-particules.

On peut résumer la situation par le tableau suivant:

Famille	Quarks		Leptons	
1	u (up)	d (down)	électron (e^-)	neutrino électronique (ν_e)
2	s (strange - étrange)	c (Charmed - Charmé)	muon (μ^-)	neutrino muonique (ν_μ)
3	b (bottom)	t (top)	tau (τ^-)	neutrino tauique (ν_τ)

Tableau A-I.1: Les trois familles de particules élémentaires de matiére

A-I.5 Les tentatives d'unification des forces de la nature

Parallélement à la recherche des particules, les physiciens voulurent unifier les différentes forces de la nature.

Tout d'abord Maxwell, au XIX^{eme} siècle unifia les forces électriques et magnétiques en montrant que celles-ci s'exprime toutes deux par l'intermédiaire de la même particule: le photon.

Au début du XX^{eme} l'étude approfondie du noyau atomique permit la découverte de deux nouvelle forces responsables de la cohésion du noyau et des nucléons: La force nucléaire faible, et la force nucléaire forte.

A chacune de ces forces on associe une ou plusieurs particules d'interaction appelées "*Bosons.*"

	Force Electromagnetique	Force Faible	Force forte	Gravitation
Bosons	Photon	W^- W^+ Z^0	8 Gluons	Graviton (?)
	Force Electrofaible			
	Théorie de grande unification (GUT)			

Tableau A-I.2: Les forces et les étapes de l'unification

Dans le cadre du modèle standard, on a reussi à unifier les interactions faibles et électromagnétique grâce à un mécanisme dit de brisure de symétrie. C'est à dire que même si à de basse énergies ces deux forces se manifestent différement, à partir d'un certain seuil (l'énergie de brisure de symétrie), elles sont unifiées et se présentent sous la même forme. A cette énergie la masse des bosons intermédiaires faibles,[6] responsables de la force faible, devient négligeable. Le Z^0 et le photon ont alors les mêmes propriétés. Cette brisure de symétrie fait notamment appelle au boson de Higgs qui est une particule responsable de la masse des autres particules. Cette force unifiée est appelée force électrofaible.

[5]Les leptons sont des particules de spin $\frac{1}{2}$ et qui ne sont ni des quarks, ni composées de quarks. La premiére famille de leptons comprend l'électron e^- et le neutrinos électronique (ν_e).

[6]Ces trois bosons sont le W^-, le W^+ et le Z^0

Des preuves expérimentales de la validité du modèle standard ont été observées, au CERN notamment.

De nouveaux modèles dits de Grande Unification (GUT) tentent maintenant d'unifier la force électrofaible et la force forte...

L'unification de la gravitation avec les trois autres forces se heurte à des problémes théoriques: La formulation relativiste de la gravitation (dans le cadre de la relativité générale) n'est pas formalisée de façon analogue aux autres théories.

Chapitre A-II

Vers une amélioration des modèles actuels

A l'heure actuelle, nous disposons de modèles théoriques pour expliquer la structure de la matière. Ces modèles ne nécessitent que les particules élémentaires citées plus haut, mais ils prévoient l'existence de particules encore jamais observées, souvent car ces particules sont trop massives pour être crées dans les accélérateurs actuels.[1] De plus nos modèles ne sont pas "complet", ils permettent encore des améliorations et nécessitent des expériences pour les confronter à la réalité.

Une meilleure connaissance de l'infiniment petit nécessite donc la résolution de ces deux problèmes. Il existe donc deux axes de recherche majeurs en physique des particules à l'heure actuelle:

A-II.1 La recherche de nouvelles particules

Pour s'assurer que nos modèles sont valables, il faut confronter leurs prédictions à des domaines encore non-étudiés expérimentalement, mais où ils prédisent l'existence de nouvelles particules ou effets.

Ce genre d'expériences nécessitent de grands collisionneurs permettant d'accéder à des gammes d'énergie trés élevées. C'est le cas du LEP2 au CERN en Suisse ou du Tevatron à Fermilab aux Etats-Unis. D'ailleurs, le Fermilab vient, par la découverte d'un nouveau quark (le quark Top) de confirmer de manière éclatante la théorie. Le LHC, actuellement en projet au CERN devrait lui aussi permettre de confirmer ou d'infirmer l'existence de certaines particules prédites par les théoriciens, et tout spécialement celle du boson de Higgs...

A-II.2 L'amélioration de la compréhension de la structure du nucléon.

La structure globale d'un nucléon est connue et verifiée expérimentalement: Un nucléon est formé de trois quarks de valence (uud pour le proton, udd pour le neutron) qui échangent entre eux des gluons.[2] Mais un gluon peut lui aussi se transformer en deux quarks que l'on appelle "*Quarks de la mer*".

[1]La masse et l'énergie étant liées par la relation $E = mc^2 \Leftrightarrow m = E/c^2$, d'ailleurs, en physique des particules on exprime la masse d'une particule en Gev/c^2, le Gev étant une unité énergetique et c^2 la vitesse de la lumiére.

[2]Particules véhicules de l'interaction forte

La composition en gluons et quarks de la mer d'un nucléon est elle beaucoup moins bien connue. En effet, plus l'énergie du nucléon augmente, plus l'importance de la mer augmente...

Il existe donc des collisionneurs tels HERA à DESY (Hambourg, Allemage) où l'on cherche à sonder le nucléon, pour étudier la composition de la mer de particule d'un nucléon...

Chapitre A-III

La physique à HERA

A-III.1 Le fonctionnement de l'accélérateur

HERA est un sigle allemand signifiant Hoch Energie Ring Anlage. C'est un accélérateur de particule de type circulaire de 6,3 kilomètres de long. C'est un accélérateur mixte c'est à dire qu'il sert à la fois à accélérer des protons et des électrons.

Il est situé sur le site de DESY (Deutsches Elektronen SYnchrotron) à Hambourg en Allemagne.

Les protons sont produits par un autre accélerateur (PETRA), puis ils sont regroupés par paquets et accélérés une première fois, pour obtenir une vitesse compatible avec les fréquences de HERA.

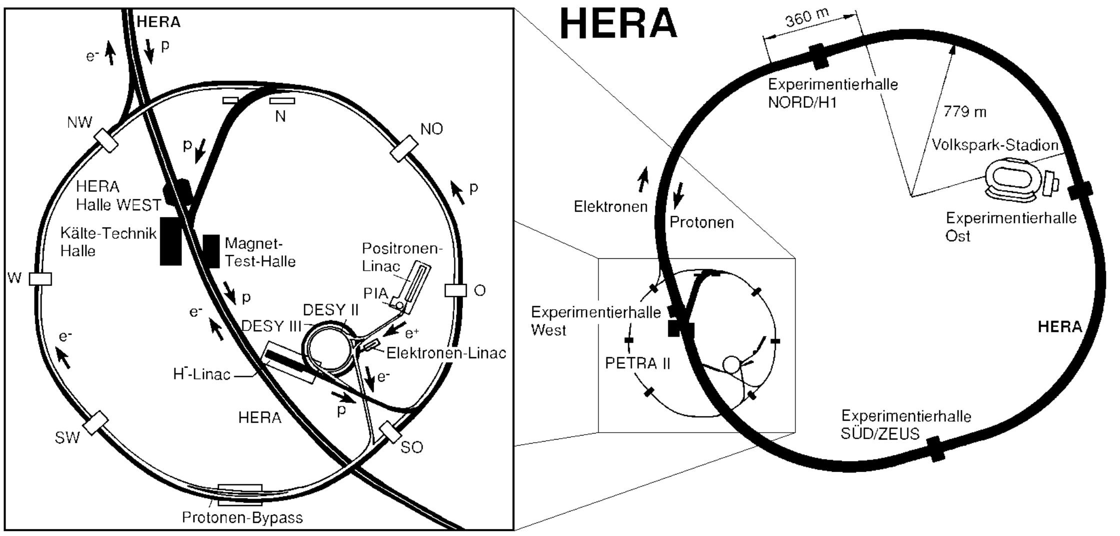

Figure A-III.1: Le site de DESY à Hambourg (Allemagne)

Comme dans tous les accélérateurs à cavités, il est impossible d'obtenir un flux constant de particules, on est obligé, pour des raisons techniques de les regrouper par paquets.[1] Les paquets

[1]Bunches en Anglais

sont séparés par 96 ns. Les électrons atteignent une énergie de 27,5 GeV et les protons 820 GeV. Certains paquets sont vides, pour permettre le calcul de la luminosité, du bruit de fond et des autres paramètres nécessaires à l'analyse des données.

Les deux faisceaux circulent en sens inverse et se croisent en 4 points. L'un de ces points est occupé par l'expérience ZEUS, un second par H1. Un troisième est utilisé par HERMES.

A-III.2 Les domaines d'étude couverts par HERA

De par sa spécificité, HERA permet essentiellement d'étudier la structure du nucléon, par des méthodes proches de celles de Rutherford. En effet, le principe de l'expérience est le même: Une petite particule (une particule α chez Rutherford, un électron à HERA) est projetée sur une plus grosse (atome ou proton) de structure composite à l'échelle de la petite et l'on étudie les transformations subies par l'électron ainsi que les nouvelles particules produites.

Un autre domaine où HERA peut apporter des résultats intéressants est la recherche de nouvelles particules, en effet, l'électron incident peut former un état composite avec un quark. Cet état est appelé Leptoquark. L'observation de particules super-symétriques ou de certains nouveaux bosons est aussi envisageable...

Chapitre A-IV

Les résultats des expériences en physique des particules

A-IV.1 Comment observer l'infiniment petit ?

La taille d'un atome est de l'ordre de $10^{-10}m$, celle du noyau est de l'ordre de $10^{-14}m$. A ces échelles une observation optique directe est impossible physiquement (Les objets à observer sont plus petits que la longueur d'onde de la lumière visible, et l'usage de longueur d'onde plus petite serait destructive pour la matière). Il faut donc recourir à d'autres méthodes.

Pour observer un atome on peut étudier le champ magnétique de celui-ci pour en déduire la topologie de la surface étudiée, c'est le principe de fonctionnement du microscope électronique.

Au-delà, pour l'étude du noyau et des nucléons, il faut recourir à des méthodes analogues à celles de Rutherford, mais dans des gammes d'énergie beaucoup plus élevées...

- *Les collisioneurs électron-positron*, comme au LEP permettent d'obtenir des collisions propres et claires: le nombre de particules produites est faible et l'on connait bien leur gamme d'énergie. L'inconvenient est que le rayonnement synchrotron y est intense, ce qui limite les énergies atteintes.
- *Les collisioneurs de Hadrons*[1]*,* permettentde monter beaucoup plus haut en puissance, mais les collisions qu'ils génèrent sont beaucoup moins propres: plusieurs parties du premier Hadron peuvent interagirent avec le second, créant ainsi des particules parasites qui masquent la réaction principale.De plus on connait beaucoup moins précisement l'impulsion des éléments ayant réagis, car ceux-ci n'emportent qu'une partie de l'impulsion totale. Le collisionneur pp de Fermilab et le LHC sont de ce type.
- *Les collisionneurs sur cible fixe,* héritiers directs de l'expérience de Rutherford, ils sont peu maintenant utilisés pour sonder la structure du nucléon, car ils sont trés limités en énergie (et ils sont très loin des gammes nécessaires pour la recherche de nouvelles particules).
- *Les collisioneurs mixtes Electron-proton,* sont une amélioration de l'expérience de Rutherford, car ils permettent de sonder le nucléon à l'aide d'une particule plus petite, mais à des énergies beaucoup plus hautes, puisque les deux particules possédent une impulsion. HERA est de ce type.

[1] Les Hadrons sont toutes les particules composées de quarks, par opposition aux Leptons

A-IV.2 la prise de données

Aprés une collision dans un accélérateur, il faut pouvoir détecter les particules produites. Pour cela on dispose un certain nombre d'appareils électroniques de mesure[2] autour du point de collision.[3] (figure A-IV.1)

[2]D'après [I. Abt et Al., H1 collaboration DESY preprint 93-103(July 1993)]

[3]Le point de collision ou de désintégration d'une particule est appelé un vertex.

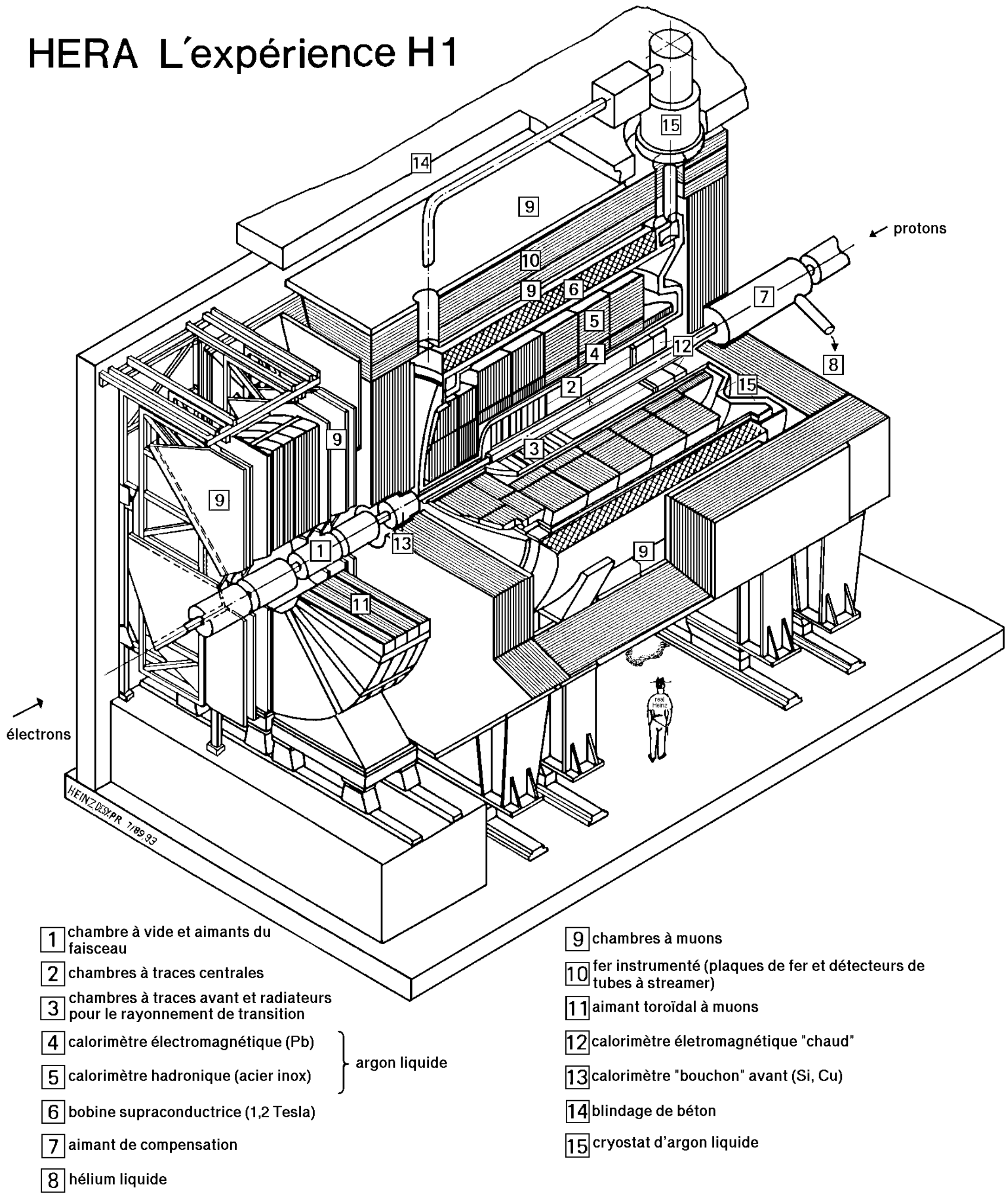

Figure A-IV.1: Le Détecteur de H1 en perspective

Ces parties sont successivement (par éloignement croissant du faisceau)[4]:

1. *Les détecteurs de traces,* composés le plus souvent de chambres à fils. Ils permettent de mesurer la courbure de la trajectoire de la particule depuis un point proche du faisceau jusqu'au calorimètre . Connaissant cette courbure et l'intensité du champ magnétique, on peut déduire l'impulsion de la particule.

2. *Le calorimètre électromagnétique* est composé de plaques de plomb et de chambres à fils. Il sert à arrêter les électrons et les photons. En effet ceux-ci perdent leur énergie dans le plomb en y créant une gerbe de particules. Cette gerbe de particules dont l'énergie est proportionnelle à celle de la particule génératrice est ensuite détectée par des chambres à fils qui permettent alors d'estimer l'énergie initiale.

3. *Le calorimètre hadronique* est composé de plaques d'acier et des chambres à fils. Il fonctionne comme le calorimètre électromagnétique , mais avec les particules qui n'ont pas perdu toutes leur énergie dans ce dernier: le plus souvent des Hadrons...

4. *L'aimant supraconducteur* sert à courber la trajectoire des particules chargées, permettant ainsi d'en déduire leur impulsion.

5. *Les chambres à muons,* sont des chambres à fils situées après le calorimétre hadronique. Elle permettent de détecter les particules n'ayant pas été arrêtées par les calorimétres.

Remarque: Les chambres à fils ne détectent que les particules chargées, les calorimétres que les particules (chargées ou non) ayant une section efficace d'interaction suffisante pour interagir avec la matière. Les neutrinos ne sont donc pas détectés par ce genre de détecteur...

Tous ces éléments fournissent des données sous forme de signaux électroniques qui sont amplifiés, puis analysés et stockés, lorsque l'événement paraît intéressant, en vue d'une analyse ultérieure...

A-IV.3 Caractérisation d'un électron

Un électron[5] est une particule chargée, il laisse donc une trace dans les chambres à fils. C'est aussi une particule interagissant avec la matière, il laisse donc des dépôts dans les calorimètres , mais étant donné qu'il dépose la majeur partie son énergie dans le calorimètre électromagnétique , on ne doit retrouver que de faibles dépôts dans le calorimètre hadronique...

De plus, les gerbes que crée l'électron dans le calorimètre sont très compactes et ne s'étendent que sur très peu de celulles détectrices contrairement à celles que crée un pion par exemple qui sont elles moins denses et plus étendues.

[4]Cette description correspond au détecteur de H1, elle peut légèrement varier d'un détecteur à l'autre, mais reste globalemment vrai...

[5]Le terme électron seras employé indifférement pour désigner les électrons ou leur anti-particule c'est à dire les positrons

Partie B

Comparaison des electron finders

Chapitre B-I

Des "*electron finders*" pour quoi faire?

B-I.1 Les événements concernés

L'analyse de la structure du nucléon à HERA produit deux types d'événements :

1. Des Courants Chargés (Charged Currents) (CC) au cours desquels le lepton incident transmet sa charge au proton. L'échange de charge constituant le courant chargé proprement dit. (Figure B-I.1)

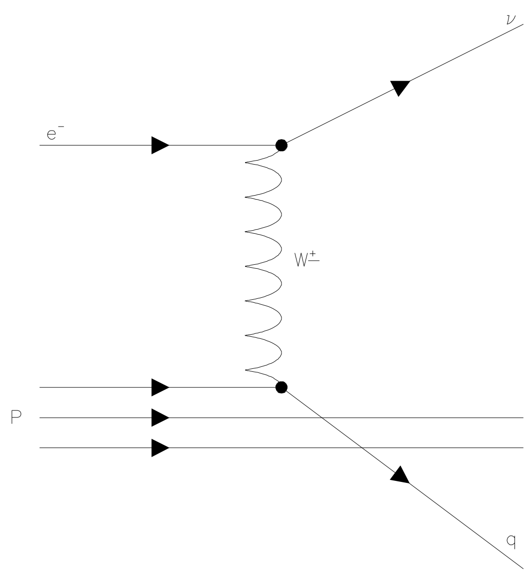

Figure B-I.1: Diagramme de Feynman d'un courant chargé

2. Des Courants Neutres au cours desquels le lepton interagit avec le nucléon par l'intermédiaire d'une particule neutre... Ici, il n'y a donc pas d'échange de charge entre l'électron et le proton. (Figure B-I.3)

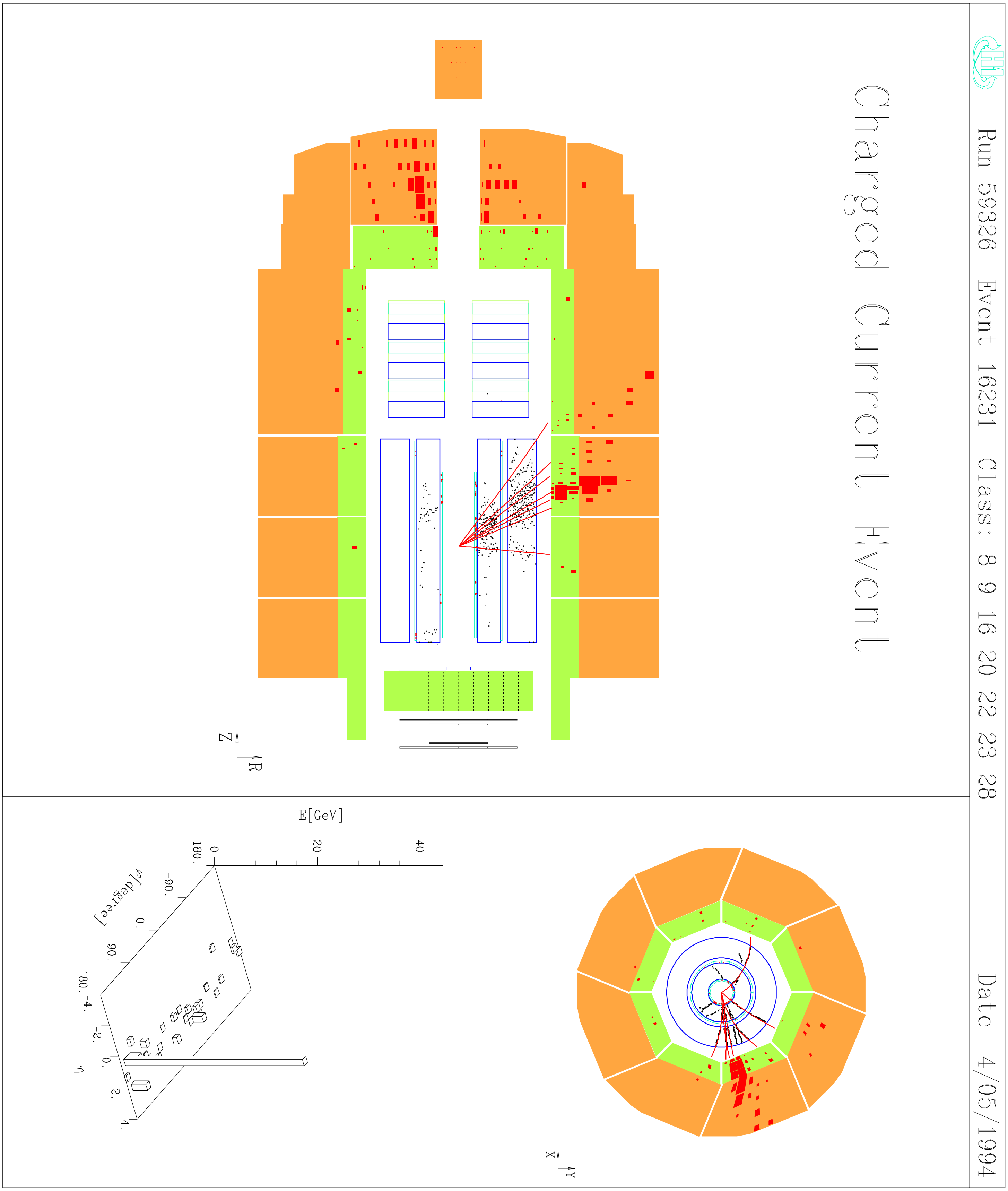

Figure B-I.2: un événement à courant chargé à HERA

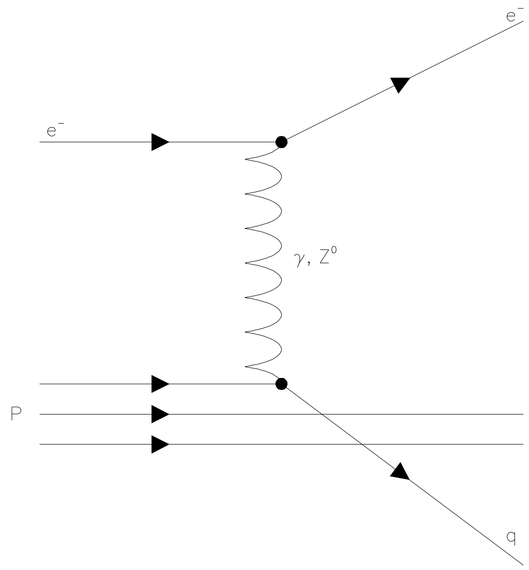

Figure B-I.3: Diagramme de Feynman d'un courant neutre

La principale différence entre un courant neutre et un courant chargé est l'échange de charge entre le lepton et le nucléon. Il en résulte que dans le cas du Courant Chargé, le lepton produit a une charge nulle, c'est donc un neutrino électronique (ν_e). A l'inverse, dans le cas du Courant Neutre, le lepton conserve sa charge et le produit est donc bien un électron. Comme on l'a vu plus haut (cf page 17, section A-IV.2) il n'existe aucun appareillage permettant de détecter avec une bonne efficacité les neutrinos, ils sont donc perdus et seule la présence ou l'absence d'un électron différencie un Courant Neutre d'un Courant Chargé (l'absence de l'électron étant caractérisée par un défaut d'énergie entre l'énergie initiale et l'énergie retrouvée après la collision)...

Les figures B-I.2 et B-I.4 mettent en évidence la différence entre un Courant Chargé et un Courant Neutre:

- Sur la figure B-I.2 on voit un paquet de trajectoires ayant laissé des signaux dans les deux calorimètres : C'est la signature des particules venant du quark après la collision avec l'électron . L'absence de trace de l'électron laisse penser qu'il s'agit d'un Courant Chargé. On peut aussi remarquer la trace laissée par les restes du proton dans le calorimètre hadronique, à l'avant du détecteur. (Les restes du protons, appelés "*proton remnant*" s'hadronisent eux aussi après la collision, mais étant donné qu'ils suivent une trajectoire proche de celle du faisceau, ils ne sont pas étudiés.)

- Sur la figure B-I.4 on voit que les trajectoires partent dans deux directions opposées: La trajectoire seule qui part vers l'arrière du détecteur laisse une gerbe très compacte dans le calorimètre électromagnétique et rien dans le calorimètre hadronique, c'est l'électron . A l'opposé, on retrouve bien le paquet de trajectoires résultant du quark heurté. Ce paquet laisse des traces dans les deux calorimètres . A l'avant on retrouve à nouveau les traces du *proton remnant.*

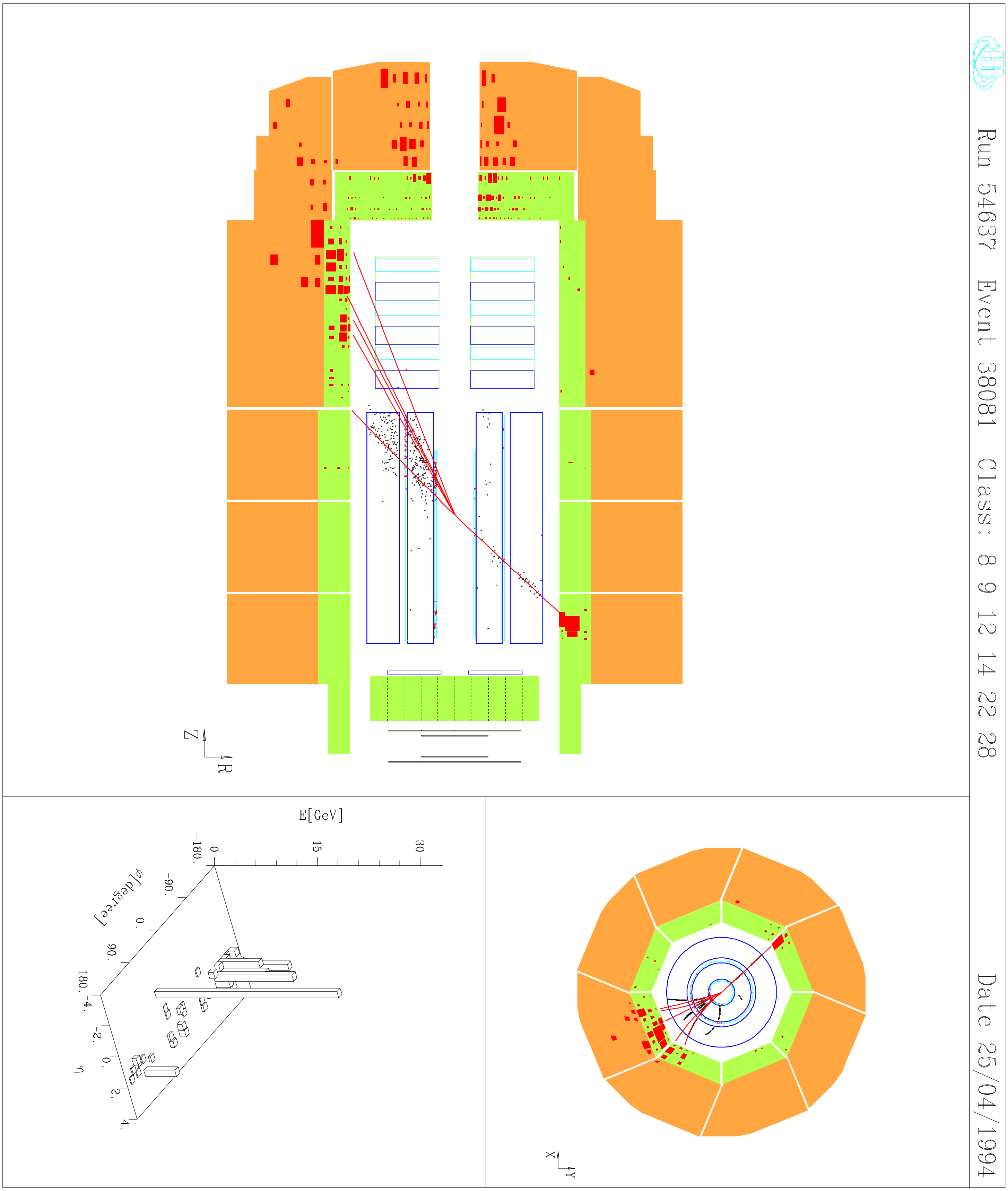

Figure B-I.4: un événement à courant neutre à HERA

B-I.2 Problème rencontrés lors de la sélection événements

Malheureusement, la détection de l'électron n'est pas aussi aisée qu'il n'y paraît. En effet deux grandes catégories de gênes peuvent amener à des conclusions erronées sur le type de l'événement :

B-I.2.1 Le bruit de fond

Il existe trois causes principales de bruit de fond lors de la prise de données dans un accélérateur de particules:

B-I.2.1.1 Les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques sont des flux de particules produits dans l'espace et qui atteignent la terre avec une fréquence moyenne de 100 particules par seconde et par m^2. Ils sont composés de toutes sortes de particules d'une énergie moyenne de 2 GeV. Pour s'en protéger (car ils laissent des traces parasites dans les détecteurs), on construit des détecteurs souterrains. Malheureusement certaines particules réussissent tout de même à passer... (figure B-I.5)

B-I.2.1.2 Les collisions avec le vide résiduel

Bien que les faisceaux des accélérateurs soient placés sous vide, ce vide n'est pas complet, et il reste quelques atomes dits de vide résiduel dans les tubes où circulent les faisceaux. Parfois les particules accélérées, heurtent un atome de vide résiduel générant alors un événement totalement différent de ceux attendus.

B-I.2.1.3 Les nuages de muons

Le faisceau de protons est accompagné d'un halo de muons qui peuvent eux aussi interagir avec le détecteur ou avec d'autres particules créant ainsi d'autres événements de bruit de fond qu'il est indispensable d'éliminer...

B-I.2.2 Les Cracks

En théorie un détecteur devrait pouvoir détecter des particules sur tout l'angle solide. En fait, comme pour tout objet technologique, les performances sont limitées par un certain nombre de contraintes qui limitent sa surface de détection. Il faut en effet ménager un espace pour le passage des faisceaux de particules et des cables reliant les cellules détectrices au système d'acquisition et d'enregistrement des données. Ces zones ne pourront bien-sûr pas être couvertes par des détecteurs, ce sont des trous où les particules disparaissent. On les appelle "*Cracks*". L'ensemble des appareillages du détecteur qui ne détectent pas directement (les amplificateurs par exemple) est appelé matière morte.

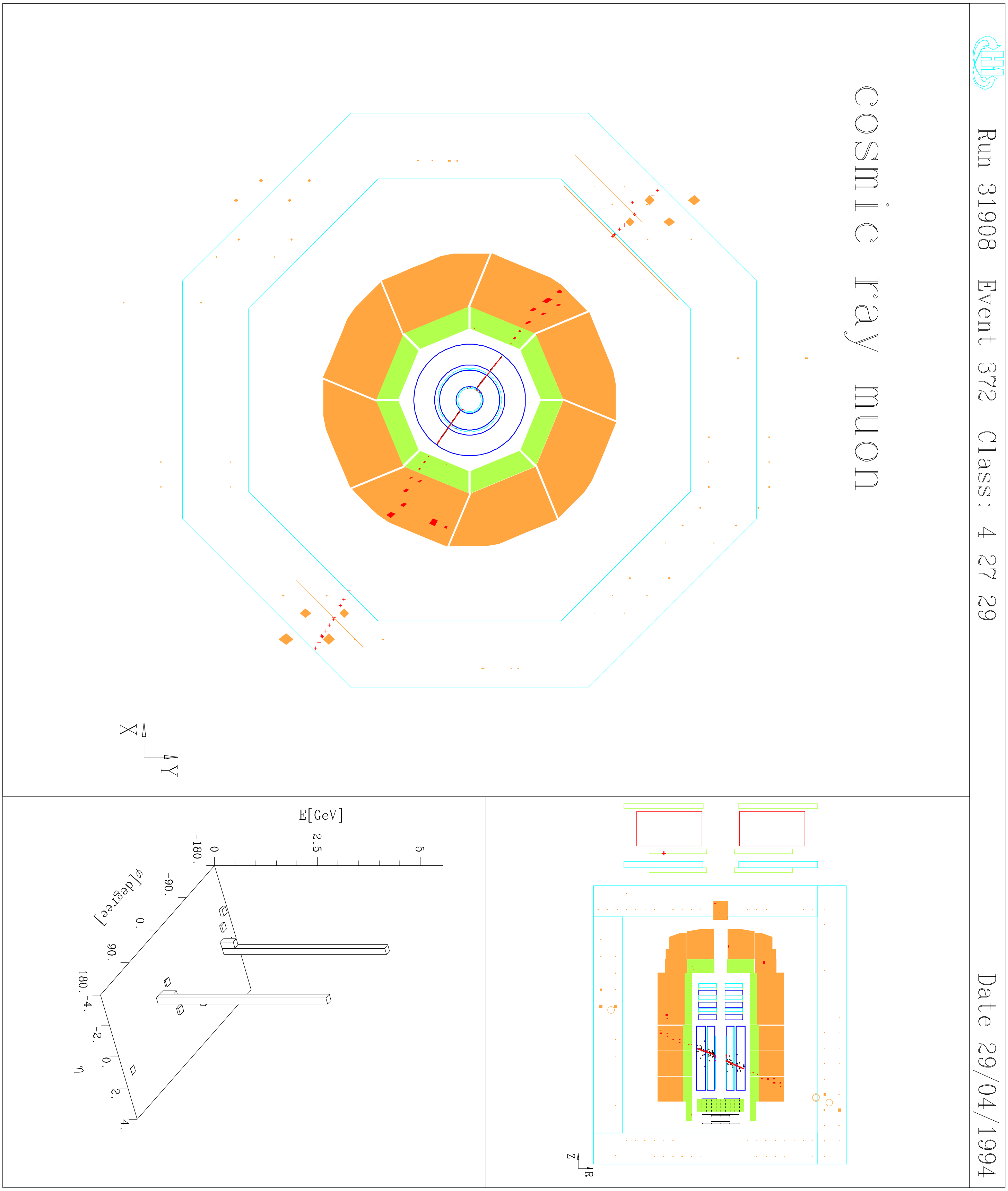

Figure B-I.5: Un rayon cosmique dans le detecteur H1

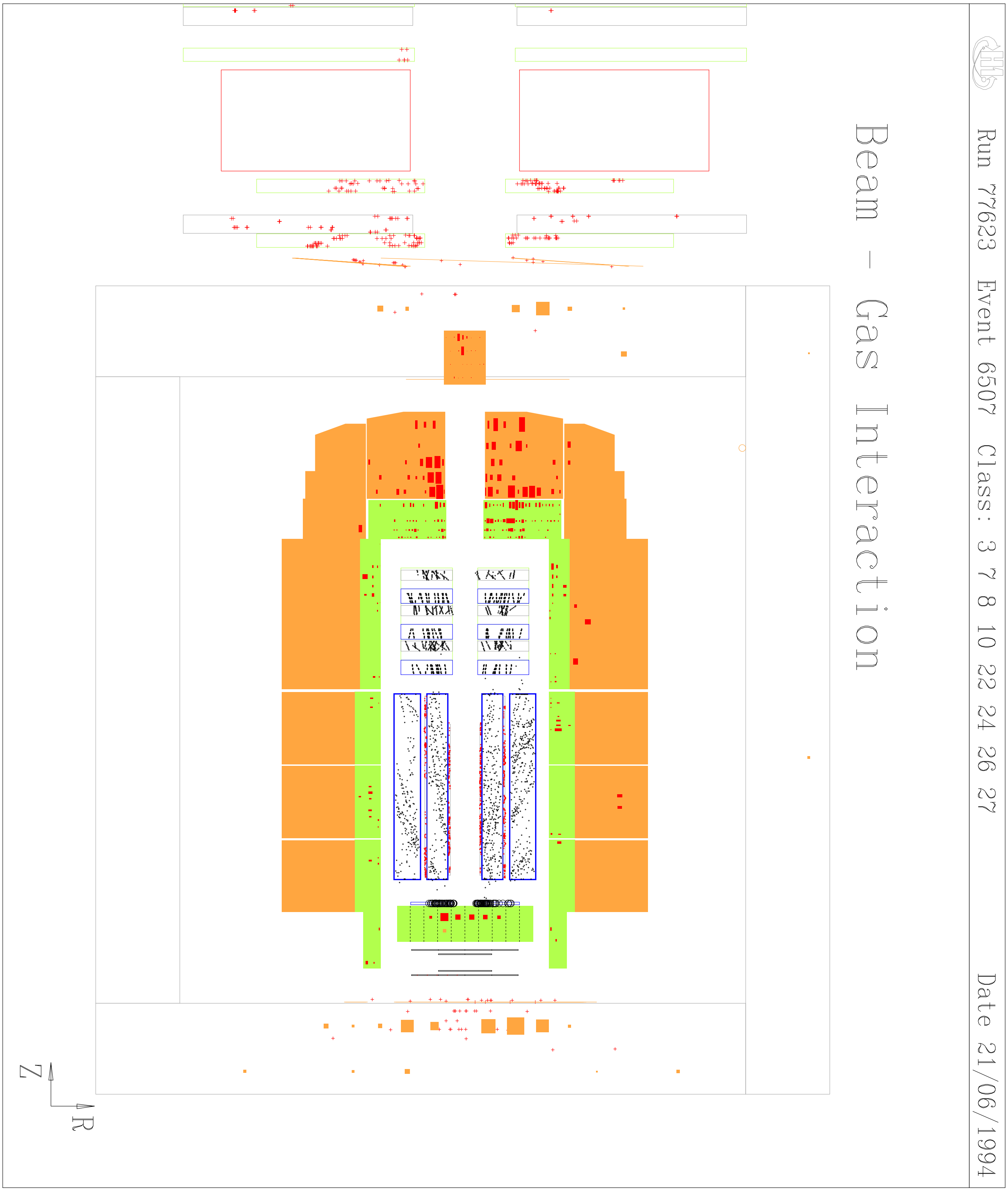

Figure B-I.6: Une collision avec le vide résiduel à HERA

B-I.3 Le tri des données

Lors de l'acquisition des données "on-line" (c'est à dire directement pendant le déroulement des collisions) les systèmes électroniques analysent l'événement pour déterminer s'il est intéressant ou non. Suite à cette analyse, ils disposent d'un certain nombre d'informations sur ce que peut contenir (ou ne pas contenir) l'événement . Ces informations sont indispensables pour déterminer si l'événement doit être conservé ou oublié. Mais elles sont aussi stockées sous forme de *flags*[1] qui permettent une classification plus rapide des événements avant leur analyse définitive.

Mais pour étudier un événement , il faut reconstituer tout son déroulement, depuis la collision jusqu'à la sortie des particules du champ de détection. Pour cela il faut savoir quelles sont les particules ayant interagi lors de l'événement , on doit donc dans un premier temps rechercher les protagonistes à l'aide d'algorithmes appelés "*finders*".

L'interêt des "*electron finders*" est encore accru par le fait que la présence d'un électron permet de distinguer sans équivoque un Courant Neutre d'un Courant Chargé[2]

[1] indicateurs booléens qui signalent si l'événement a ou n'a pas telle ou telle propriétée...

[2] mais, à l'inverse, l'absence d'un électron ne signifie pas que l'on a affaire à un courant chargé, puisque l'électron peut s'être perdu dans un crack...

Chapitre B-II

Les electron finders étudiés

Pour cette étude deux "*electron finders*" ont été utilisés:

B-II.1 le premier "*electron finder*"

Cet "*electron finder*" utilise la propriété qu'ont les gerbes laissées par les électrons dans le calorimètre électromagnétique d'être trés compactes.

La principale coupure à laquelle procède cet "*electron finder*" limite donc le rapport de l'énergie déposée dans quatre cellules contigues par rapport à l'ensemble de l'énergie déposée dans le calorimètre par la particule.

Ensuite l' "*electron finder*" vérifie qu'il existe bien une trace dans les chambres à fils qui pointe vers ces cellule.

Si l' "*electron finder*" détecte une trace à proximité d'un crack, il appelle une sous-routine spécifique qui analyse les dépôts d'énergie dans les calorimètres à proximité de ce crack pour y déceler la présence d'un électron .

B-II.2 le deuxième "*electron finder*"

C'est ce que l'on appelle un "electron finder topologique".

Le principe de cet "*electron finder*" est qu'il cherche un cluster électromagnétique où se trouve un électron potentiel (cluster pointé par une trace). Ensuite il verifie que la largeur de la gerbe (transversalement par rapport à la trajectoire de l'électron) est suffisament faible (les gerbes crées par les électron sont compactes). Ensuite, il ajoute un critère d'isolation: l'énergie déposée dans le calorimètre hadronique dans une couronne autour de ce cluster doit être inférieure à un certain seuil, ce qui permet d'éliminer des événements où les photons de désintégration d'un π^0 simulent un électron .

Cet "*electron finder*" ne pratique aucune coupure en fonction du rapport de l'énergie déposée dans le calorimètre électromagnétique par rapport à l'énergie déposée dans le calorimètre hadronique derrière le cluster .

Chapitre B-III

Techniques de comparaison

B-III.1 Les variables étudiées

Pour cette étude on a utilisé les variables suivantes:

- Pour la localisation spatiale de l'électron :
  1. **L'angle de la trajectoire de l'électron devié par rapport à celui du proton incident** appelé θ
  2. **L'angle de la trajectoire de l'électron devié par rapport à la verticale** appelé ϕ
- Pour l'énergie:
  1. **L'énergie de l'électron diffusé** appelée Ee'

En effet, on peut parfaitement caractériser un électron avec ces trois variables, tous les autres paramètres se retrouvant alors par le calcul...

B-III.2 Provenance des données étudiées

Pour pouvoir comparer les deux "*electron finders*" il était important d'utiliser des événements dont on connait déjà les caractéristiques. C'est pourquoi le travail ne s'est pas fait sur des données réelles, mais sur des événements simulés. (Méthode Monte-Carlo)

Les échantillons utilisés contenaient 4502 électrons et 4550 positrons soit un total de 9052 événements . Dans tous ces événements , la particule avait une impulsion transverse supérieure à 14 GeV.

Un échantillon de valeurs théoriques a donc été généré par la méthode de Monte-Carlo, puis ces valeurs ont été soumises à un simulateur d'événements fait à l'image de H1. Ce simulateur créait, pour chaque valeur théorique un événement simulé, avec les mêmes caractéristiques qu'un événement réel. (Le simulateur fonctionne selon la géométrie du détecteur H1, il peut donc entre autres simuler les problèmes dûs à la matiére morte.) Ces événements simulés étaient alors soumis aux deux "*electron finders*" .

Les résultats renvoyés par les deux "*electron finders*" ainsi que les valeurs réelles étaient ensuite regroupées dans un N-tuple . C'est avec ces N-tuples que l'analyse a été faite.

B-III.3 Méthode de comparaison des "*electron finders*"

Les deux grands axes de l'analyse sont:

- la comparaison des échecs des deux "*electron finders*"
- l'analyse de la qualité des données renvoyées par les "*electron finders*" pour les événements retrouvés

Pour comprendre pourquoi l'un ou l'autre des "*electron finders*" manquait tel ou tel événement , il a fallu tracer la répartition de ces échecs selon la valeur des différentes variables cinématiques disponibles dans le ntuple, puis analyser la forme de ces tracés pour éventuellement y révéler la présence de motifs géométriques remarquables. Des distributions différents ont donc dû être effectuées pour chacun des "*electron finders*" ainsi qu'une serie de tracés pour les échecs communs.

L'analyse de la qualité des données des deux "*electron finders*" a eu lieu en deux étapes:

- une analyse comparée des performances des deux "*electron finders*" entre eux,
- une comparaison de chacun des deux "*electron finders*" avec les valeures théoriques.

Une procedure fortran a donc été definie pour comparer la valeur renvoyée par un "*electron finder*" à la valeur réelle qui avait été donnée au simulateur, selon la formule:

$$\frac{\text{valeur théorique} - \text{valeur réelle}}{\text{valeur théorique}}$$

Ensuite pour chaque variable renvoyée par les "*electron finders*" , un nuage de points été crée, chaque point représentant un événement , avec la valeur renvoyée par la procédure pour le premier "*electron finder*" en abscisse et celle renvoyée pour le deuxième "*electron finder*" en ordonnée.

Chapitre B-IV

Résultats de l'analyse

B-IV.1 les variables de l'étude

Pour réaliser cette étude les trois variables choisies sont ϕ, θ et l'énergie de l'électron . En effet, comme on l'a vu section B-III.1, ces trois variables décrivent parfaitement les événements étudiés.

La distribution de ces variables pour la totalité des événements est representée figure B-IV.1 pour ϕ, figure B-IV.2 pour θ et figure B-IV.3 pour l'énergie .

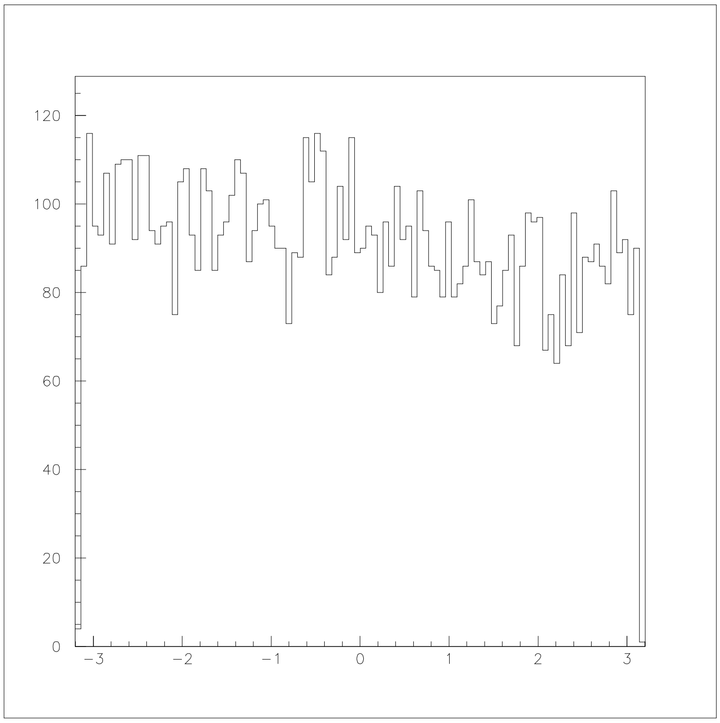

Figure B-IV.1: Distribution du nombre total d'événements sur ϕ

Comme le montre la figure B-IV.1, la distribution des événements sur ϕ est uniforme. Sur θ, on constate que le nombre d'événements croît avec θ, ce qui est normal, puisque les collisions e.p. sont asymétriques.

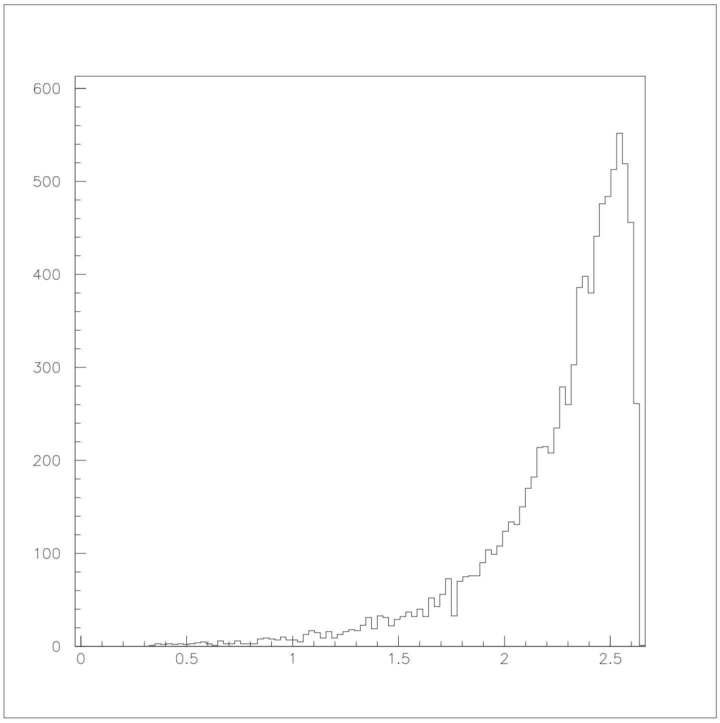

Figure B-IV.2: Distribution du nombre d'événements sur θ

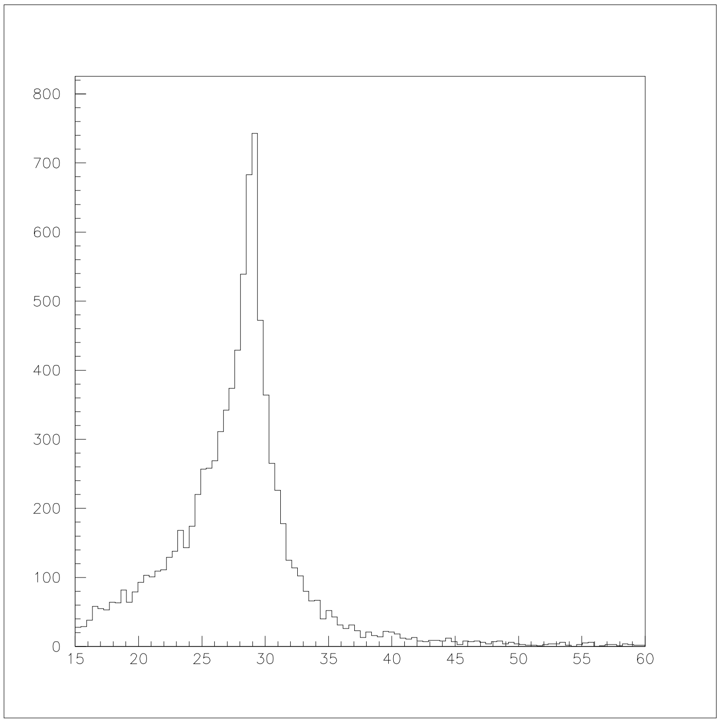

Figure B-IV.3: Distribution du nombre total d'événements en fonction de l'énergie

B-IV.2 Comparaison des échecs des deux finders

Lorsque l'on compare le nombre d'électrons trouvés par les deux "*electron finders*" on obtient les résultats du tableau B-IV.1.

	le premier "*electron finder*"	le deuxième "*electron finder*"	Les deux
Nombre d'événements	9052		
Nombre d'échecs	353	92	45
Taux d'erreur	3,90% (± 0,20%)	1,01% (± 0,10%)	0,49% (± 0,07%)
succés	96,10% (± 0,20%)	98,99% (± 0,10%)	99,51% (± 0,07%)

Tableau B-IV.1: Performances comparées des deux "*electron finders*"

Une analyse des différentes variables cinématiques des électrons non-trouvés montre un certain nombre de points intéressants.

B-IV.2.1 Analyse des valeurs de ϕ pour les électrons perdus

En comparant les taux d'échecs des deux "*electron finders*" , on constate que, individuellement ils perdent chacun un nombre important d'événements à certaines valeurs de ϕ (figure B-IV.4 pour le premier "*electron finder*" figure B-IV.5 pour le deuxième "*electron finder*"). Ces valeurs correspondent aux points de raccord des octants du calorimètre .

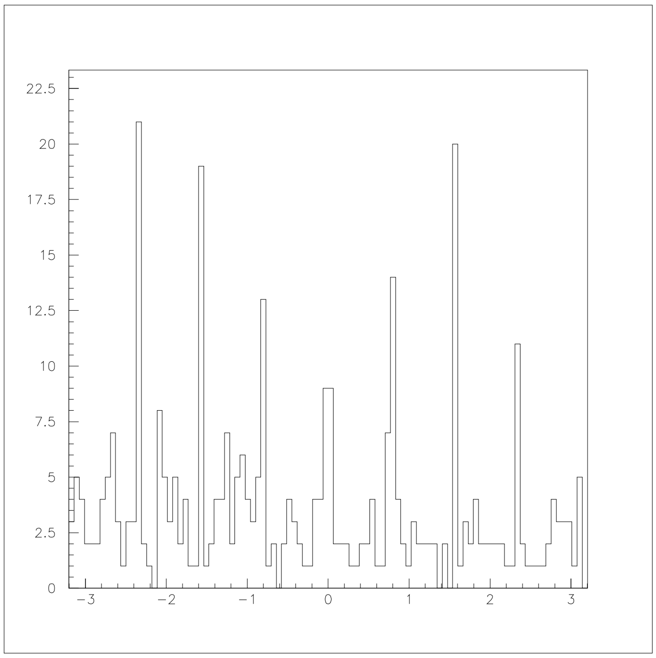

Figure B-IV.4: Nombre d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de ϕ

A ces endroits il est donc vraisemblable que les électrons entrent dans la matière morte du détecteur et sont donc difficilement repérables... Pourtant lors de l'étude de la même

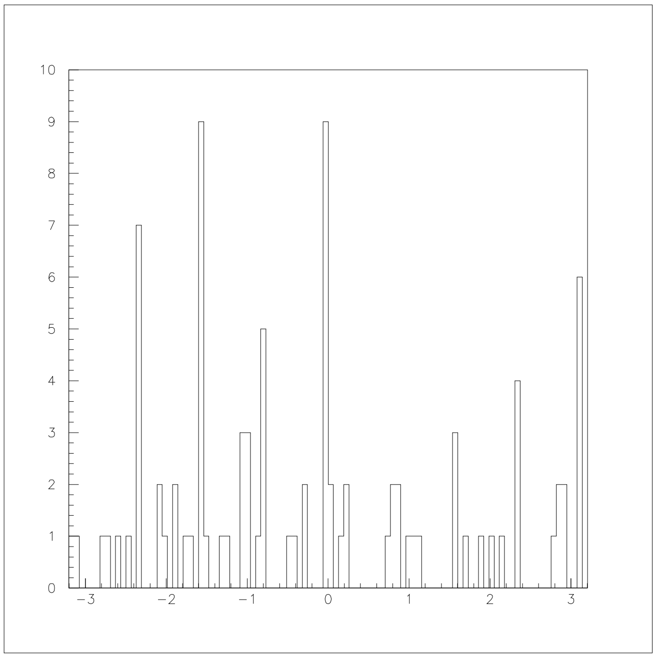

Figure B-IV.5: Nombre d'événements perdu par le deuxième "*electron finder*" en fonction des valeurs de ϕ

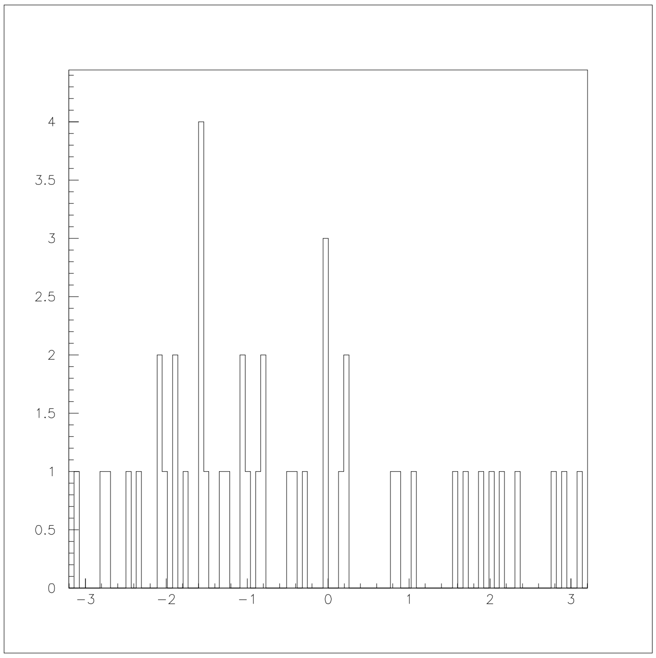

Figure B-IV.6: Nombre d'événements perdu les deux "*electron finders*" en fonction des valeurs de ϕ

distribution montrant les électrons qu'aucun des deux "*electron finder*" n'a trouvé, on ne retrouve pas ces mêmes cracks en ϕ. (figure B-IV.6)

Les deux "*electron finders*" semblent donc se compléter dans la détection des cracks en ϕ. Sur ce plan la recherche des électrons perdus à proximité des cracks par la subroutine spécifique utilisée par le premier "*electron finder*" pourrait être envisagée en complément d'une recherche par le moment transverse dans les mêmes zones.

B-IV.2.2 Analyse des valeurs de θ pour les électrons perdus

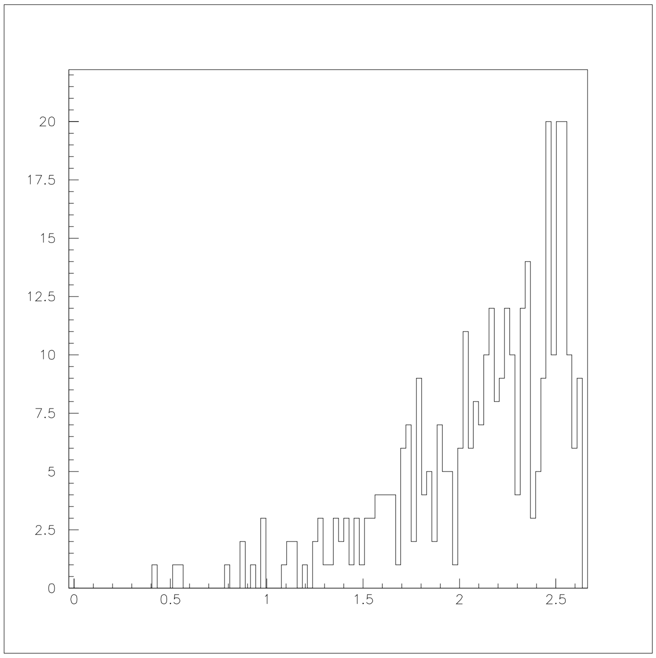

Figure B-IV.7: Nombre d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de θ

En analysant les résultats qu'obtient le premier "*electron finder*" selon la variable θ, on constate qu'il perd un nombre d'électron qui croît avec θ (figure B-IV.7), mais si l'on calcule les taux de perte, il apparait que les proportions decroissent avec θ (figure B-IV.8). Par contre, le deuxième "*electron finder*" manque très peu d'événements pour $\theta < 2.25$ radians. Au-delà de cette valeur, le nombre d'électrons perdus devient plus important tout en restant inférieur au nombre d'électron manqués par le premier "*electron finder*" (figure B-IV.9).

B-IV.2.3 Valeurs de l'énergie pour les électrons perdus

La distribution du nombre d'événements perdus en fonction de l'énergie est donnée figure B-IV.10 pour le premier "*electron finder*" et figure B-IV.11 pour le deuxième "*electron finder*" .

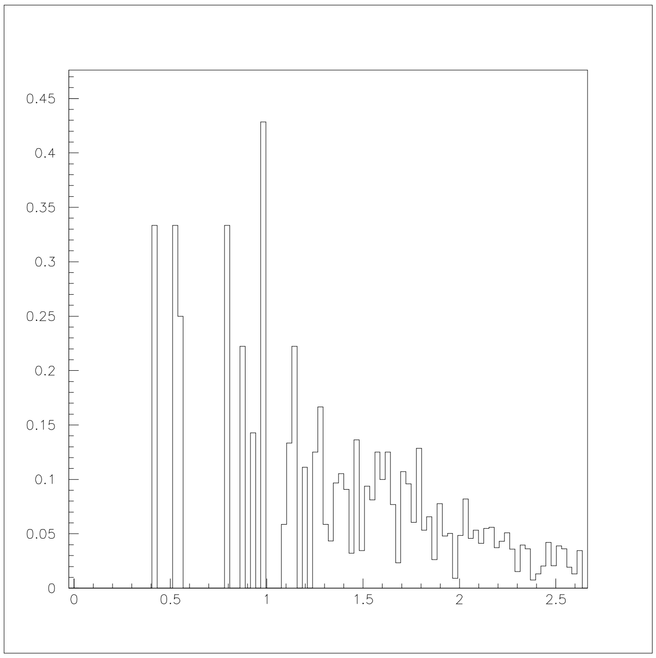

Figure B-IV.8: Taux d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de θ

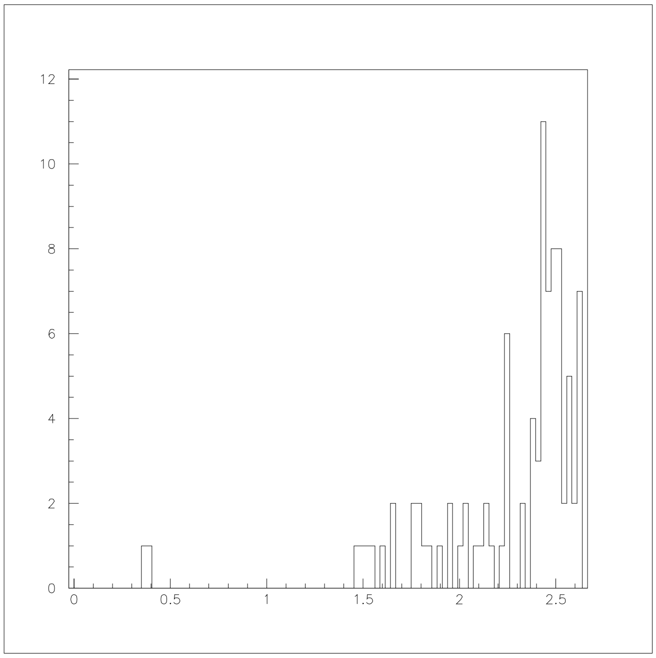

Figure B-IV.9: Nombre d'événements perdu par le deuxième "*electron finder*" en fonction des valeurs de θ

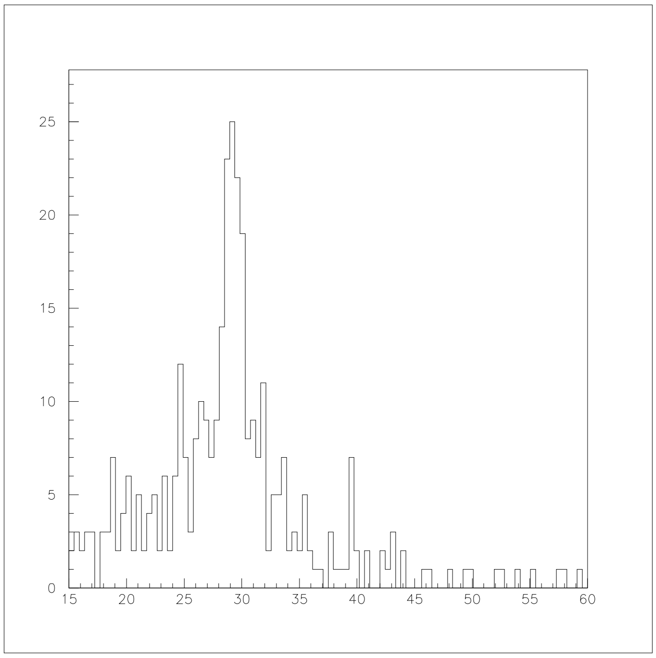

Figure B-IV.10: Nombre d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de l'énergie

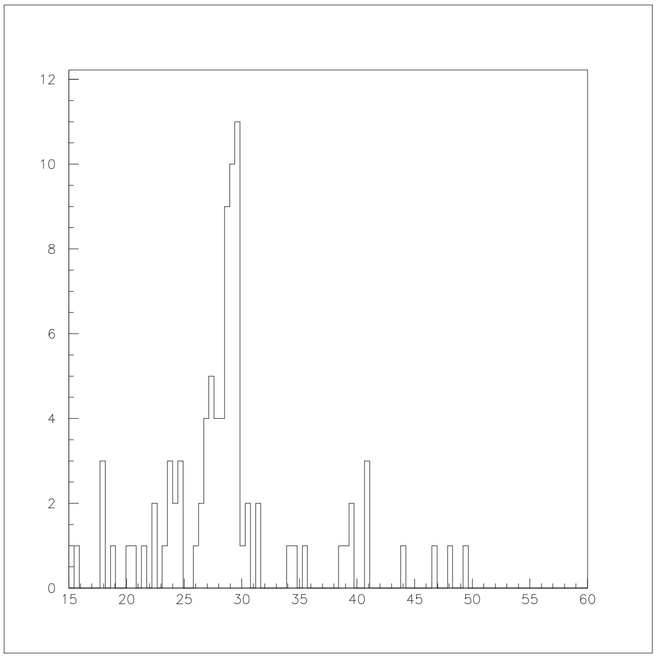

Figure B-IV.11: Nombre d'événements perdu par le deuxième "*electron finder*" en fonction des valeurs de l'énergie

B-IV.3 Comparaison de la qualité des données des deux finders

Même lorsqu'un électron a été trouvé, l' "*electron finder*" peut avoir fait une erreur. En effet, outre le fait de savoir s'il y avait ou non un électron dans le produits de la collision, il est important de connaître les différentes caractéristiques de cet électron telle sa direction ou son énergie pour pouvoir analyser un événement . Il est donc important de connaître la qualité des données renvoyées par les deux "*electron finders*" .

Pour ce faire d'autres tracés sont nécessaires: une première fonction calcule, pour chaque événement l'erreur faite par les "*electron finders*" par rapport à la valeur théorique. Ces deux erreurs servent ensuite à placer un point correspondant à l'événement . Après avoir ainsi traité les 8652 événements où un électron a été trouvé, on obtient un nuage de points dont on analyse la forme...

B-IV.3.1 Analyse des erreurs sur ϕ pour les électrons retrouvés

Le tracé (figure B-IV.12) nous montre clairement un noyau de coordonnées (0;0), ce qui prouve que dans la très grande majorité des cas les deux "*electron finders*" retrouvent une valeur de ϕ qui est exacte.

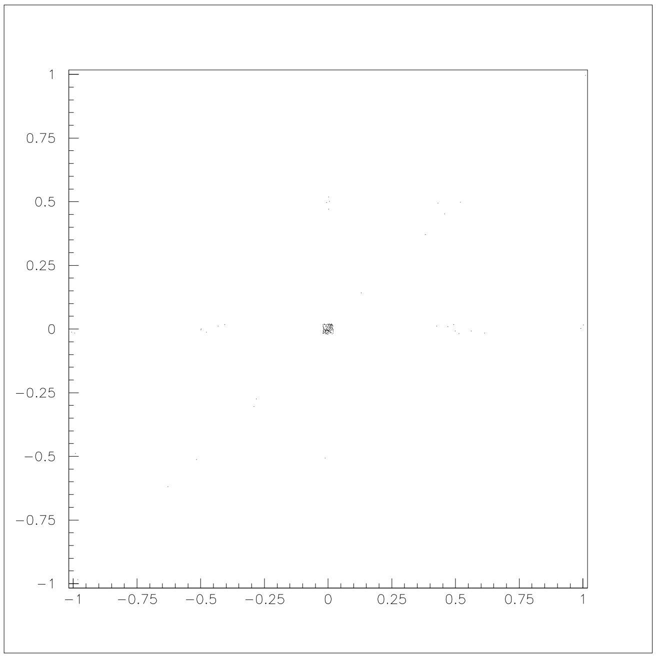

Figure B-IV.12: Erreur des deux "*electron finders*" sur ϕ. Les erreurs sont calculées par rapport à la valeur réelle. En Abscisse: le premier "*electron finder*" , en ordonnée: le deuxième "*electron finder*"

On constate tout de même qu'une trentaine de points sont hors de cette zone et témoignent donc d'une erreur non négligeable de la part de l'un au moins des "*electron finder*" .

1. Une droite de pente 1 montre que dans une dizaine de cas les deux "*electron finders*" se sont trompés, mais de la même façon. Ils ont donc renvoyé le même ϕ, entaché de la même erreur.

2. Une droite d'abscisse 0 montre que dans une demi-douzaine de cas le deuxième "*electron finder*" s'est trompé alors que le premier "*electron finder*" a trouvé la bonne valeur.

3. Une droite d'ordonnée 0 montre qu'à l'inverse, dans une quinzaine de cas le premier "*electron finder*" s'est trompé alors que le deuxième "*electron finder*" avait renvoyé une valeur correcte.

4. Un point isolé de coordonnées (-1;-0,5) montre que les deux "*electron finders*" peuvent se tromper dans des proportions différentes. Ce cas reste trés marginal.

Toutefois, on constate que les deux "*electron finder*" ne se trompent que rarement en ϕ: Ils renvoient tous les deux une valeur erronée dans 0,34% des cas ($\pm 0,06\%$).

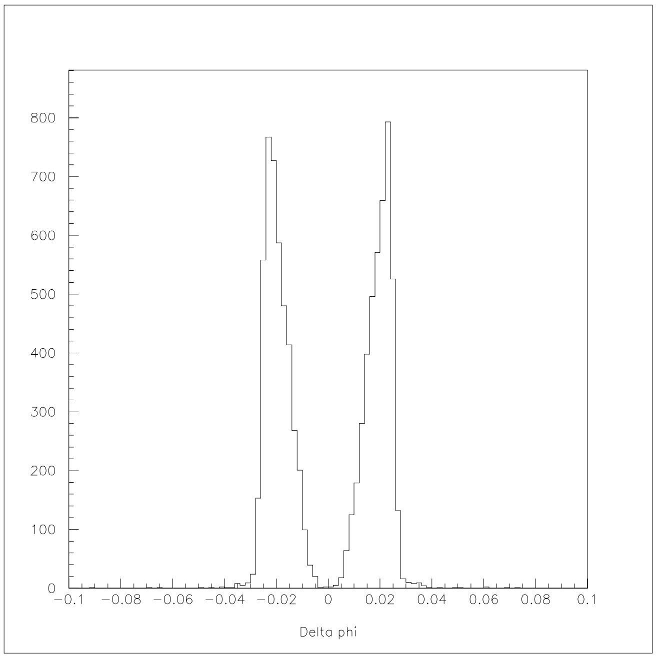

Figure B-IV.13: Erreur faite sur ϕ par le premier "*electron finder*" pour les électrons et positrons retrouvés

Une analyse plus détaillée des erreurs en ϕ, par rapport aux valeures théoriques, pour chacun des deux "*electron finders*" fait apparaître, chez le premier "*electron finder*" , deux pics distincts et symétriques (figure B-IV.13). En effet, le premier "*electron finder*" ne mesure pas ϕ au point de départ de la trace, mais à l'entrée dans le calorimètre , la courbure de la trajectoire entraine donc une variation du ϕ que mesure le premier "*electron finder*" par rapport au ϕ théorique. L'existence de deux pics symétriques est due au fait que l'échantillon avec lequel l'étude a été faite contenait des électrons et des positrons or ces deux particules ayant une charge opposée, elles sont deviées de manière symétrique par le champ magnétique.

Un tracé agrandi de la distribution de ces déviations (en valeur absolue) (figure B-IV.14) nous montre que l'erreur due à cette deviation varie selon l'impulsion de la particule.

Toutefois, on constate que l'erreur moyenne sur ϕ faite par le premier "*electron finder*" est plus faible que celle faite par le deuxième "*electron finder*" .

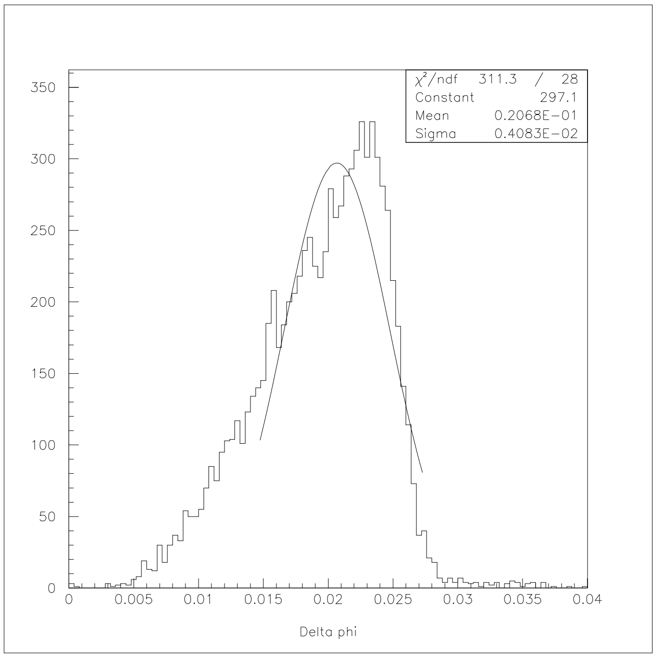

Figure B-IV.14: Erreur faite sur ϕ par le premier "*electron finder*" pour les électrons retrouvés (valeur absolue)

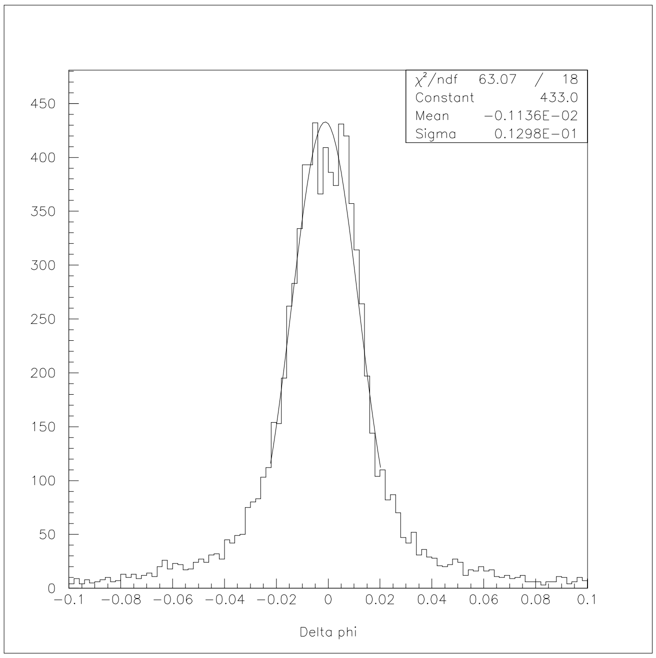

Figure B-IV.15: Erreur faite sur ϕ par le deuxième "*electron finder*" pour les électrons et positrons retrouvés

B-IV.3.2 Analyse des erreurs sur θ pour les électrons retrouvés

Le tracé en θ (figure B-IV.16) est beaucoup plus diffus. On y retrouve un noyau de coordonnées (0;0), donc, en θ aussi les deux "*electron finders*" retrouvent une valeur de θ qui est exacte dans un grand nombre de cas.

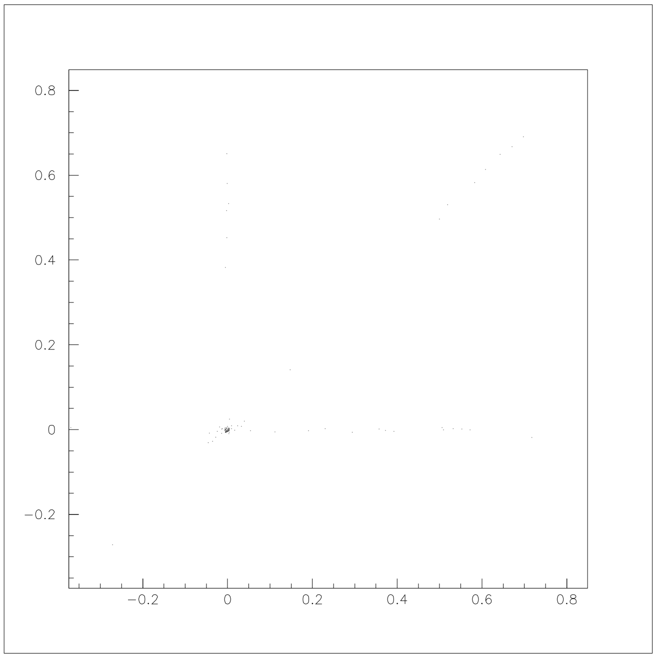

Figure B-IV.16: Erreur des deux "*electron finders*" sur θ.

Par contre, cette fois-ci le nombre de points hors du noyau est plus important (environs une cinquantaine).

1. La droite de pente 1 nous montre que dans la moitié des cas erronés, les deux "*electron finders*" se sont trompés de la même façon. Ils ont donc renvoyé le même θ, entaché de la même erreur.
2. Une droite d'abscisse 0 montre que dans une demi-douzaine de cas le deuxième "*electron finder*" s'est trompé alors que le premier "*electron finder*" a trouvé la bonne valeur.
3. Une droite d'ordonnée 0 montre qu'à l'inverse, dans une quinzaine de cas le premier "*electron finder*" s'est trompé alors que le deuxième "*electron finder*" avait renvoyé une valeur correcte.

On peut remarquer qu'ici aussi les erreurs en θ sont peut fréquentes (0,58 % des cas $\pm$ 0,08%). De plus, elle sont presque toutes situées dans le quart de plan dont les coordonnées sont toutes deux positives, ce qui montre que lorsqu'ils se trompent, les "*electron finder*" exagérent la valeur de θ.

Une analyse plus détaillée des erreur en θ par rapport aux valeurs théoriques pour chacun des deux "*electron finders*" nous montre, pour le deuxième "*electron finder*" une distribution Gaussienne (figure B-IV.18). Pour le premier "*electron finder*" (figure B-IV.17) la distribution est très différente: on constate une l'existence d'une asymétrie assez marquée (environs 1500 événements) pour les valeurs négatives. Cette asymétrie est probablement due au fait que le premier "*electron finder*" utilise deux procédures différentes de recherche des électrons .

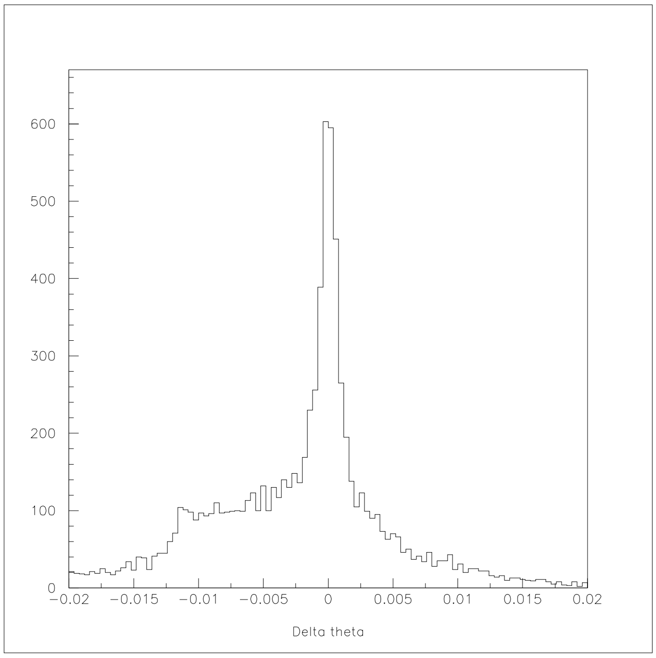

Figure B-IV.17: Erreur faite sur θ par le premier "*electron finder*" pour les électron retrouvés

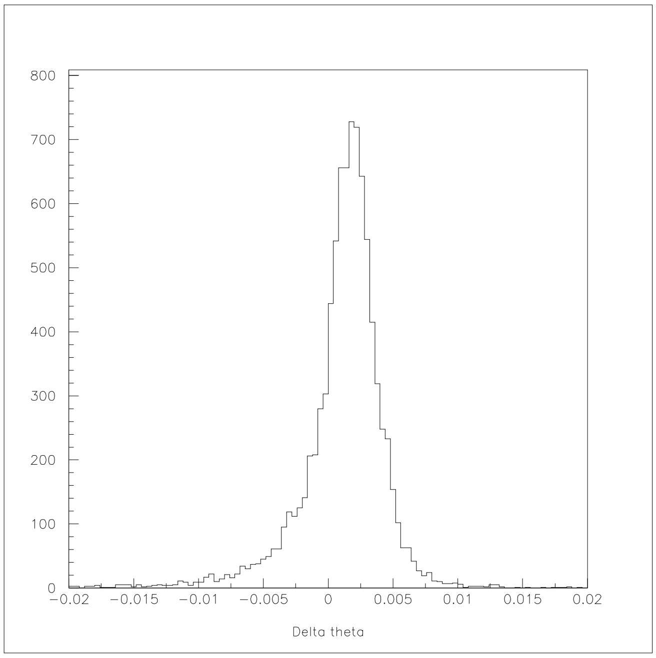

Figure B-IV.18: Erreur faite sur θ par le deuxième "*electron finder*" pour les électron retrouvés

B-IV.3.3 Analyse des erreurs sur l'énergie pour les électrons retrouvés

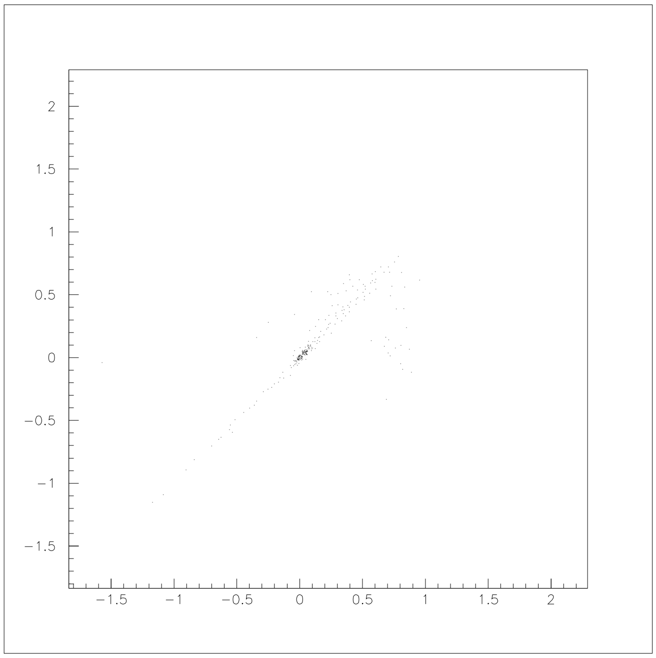

Figure B-IV.19: Erreur des deux "*electron finders*" sur l'énergie.

Le noyau de coordonnées (0;0) et la droite de pente 1 sont aussi présent, ce qui prouve que dans la très grande majorité des cas (tous sauf 39) les deux "*electron finders*" retrouvent la même énergie pour l'électron (voir figure B-IV.19 page 42). Pourtant dans 39 cas l'énergie est erronée de manière différente pour les deux "*electron finders*" .

19 cas sont situés au-dessus de la droite de pente 1 et 20 cas sont en dessous de cette même droite.

Sur les 20 cas situés en dessous de la droite de pente 1, on constate que le plus souvent le premier "*electron finder*" a fait une erreur de l'ordre de +100% alors que le deuxième "*electron finder*" a fait une erreur comprise entre -50% et +75%.

Les cas situés au dessus de la droite ne présentent pas de propriétés particuliéres.

En Energie les deux "*electron finders*" sont donc assez fiables. Lorsqu'ils se trompent ils renvoient dans la grande majorité des cas la même erreur.

Partie C

Conclusion

D'aprés les données étudiées, la méthode la plus intéressante pour chercher un électron est de faire une analyse dans le plan transverse, par rapport à la direction de la trace laissée par l'électron comme le fait le deuxième "*electron finder*", plutôt que la recherche de gerbes électromagnétique denses comme le fait le premier "*electron finder*".

Toutefois, on retiendra que les deux méthodes peuvent agir en complément l'une de l'autre, surtout dans les cracks.

Partie D

Appendice

Liste des figures

A-III.1 Le site de DESY à Hambourg (Allemagne) 12

A-IV.1 Le Détecteur de H1 en perspective 16

B-I.1 Diagramme de Feynman d'un courant chargé 19

B-I.2 un événement à courant chargé à HERA 20

B-I.3 Diagramme de Feynman d'un courant neutre 21

B-I.4 un événement à courant neutre à HERA 22

B-I.5 Un rayon cosmique dans le detecteur H1 24

B-I.6 Une collision avec le vide résiduel à HERA 25

B-IV.1 Distribution du nombre total d'événements sur ϕ 30

B-IV.2 Distribution du nombre d'événements sur θ 31

B-IV.3 Distribution du nombre total d'événements en fonction de l'énergie 31

B-IV.4 Nombre d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de ϕ 32

B-IV.5 Nombre d'événements perdu par le deuxième "*electron finder*" en fonction des valeurs de ϕ 33

B-IV.6 Nombre d'événements perdu les deux "*electron finders*" en fonction des valeurs de ϕ 33

B-IV.7 Nombre d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de θ 34

B-IV.8 Taux d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de θ 35

B-IV.9 Nombre d'événements perdu par le deuxième "*electron finder*" en fonction des valeurs de θ 35

B-IV.10 Nombre d'événements perdu par le premier "*electron finder*" en fonction des valeurs de l'énergie 36

B-IV.11 Nombre d'événements perdu par le deuxième "*electron finder*" en fonction des valeurs de l'énergie 36

B-IV.12 Erreur des deux "*electron finders*" sur ϕ. Les erreurs sont calculées par rapport à la valeur réelle. En Abscisse: le premier "*electron finder*" , en ordonnée: le deuxième "*electron finder*" 37

B-IV.13 Erreur faite sur ϕ par le premier "*electron finder*" pour les électrons et positrons retrouvés 38

B-IV.14 Erreur faite sur ϕ par le premier "*electron finder*" pour les électrons retrouvés (valeur absolue) 39

B-IV.15 Erreur faite sur ϕ par le deuxième "*electron finder*" pour les électrons et positrons retrouvés 39

B-IV.16 Erreur des deux "*electron finders*" sur θ. 40

B-IV.17 Erreur faite sur θ par le premier "*electron finder*" pour les électron retrouvés . . 41

B-IV.18 Erreur faite sur θ par le deuxième "*electron finder*" pour les électron retrouvés . 41

B-IV.19 Erreur des deux "*electron finders*" sur l'énergie. 42

Liste des tableaux

A-I.1 Les trois familles de particules élémentaires de matiére 8

A-I.2 Les forces et les étapes de l'unification 8

B-IV.1 Performances comparées des deux "*electron finders*" 32