



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

DSM - DAPNIA

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE



UNIVERSITE DE RENNES 1

UNIVERSITE DE RENNES 1
UFR SPM

Rapport de stage effectué au CEA-Saclay dans le Service de **Physique**
Nucléaire (**SPhN**) du 6/05 au 2/08/2002

Construction et étude d'une chambre à dérive pour l'expérience COMPASS au CERN

Par : Erwan Gardan
Etudiant en licence de physique à l'Université de Rennes1

Maître de stage : Jacques Marroncle
Tél. : 01 69 08 74 88
Email : jmarroncle@cea.fr

Remerciements

*Je tiens à remercier l'équipe DVCS du SPhN
pour son accueil chaleureux durant ces 3 mois
et tout particulièrement Jacques Marroncle
mon maître de stage.*

*De l'équipe des techniciens qui m'ont appris à
résoudre tous les problèmes rencontrés
je souhaite remercier également l'ensemble*

*Enfin Stefano Panebianco, thésard au CEA,
qui m'a aidé à comprendre cette expérience
et m'a transmis son dynamisme pour la physique*

...

Sommaire

Présentation du CEA et du CERN	4
Introduction : L'expérience COMPASS	7
I - Principe de fonctionnement d'une chambre à dérive	8
1- Description de la chambre à dérive	8
2- Principe de fonctionnement d'une cellule de dérive	9
3- Choix du gaz	11
4- Détermination des coordonnées de la particule	11
5- Le beam-killer	12
6- Electronique frontale	12
II - Construction et assemblage des plans	13
1- Fabrication des plans de fils	13
2- Tests sur les plans de fils	13
a- Test d'isolation masse/fils	13
b- Test d'isolation des fils de potentiel par rapport à la masse et aux fils de lecture	14
3- Fabrication des plans graphités	15
4- Empilement des plans de fils et de Mylar	15
III - Accastillage	16
1- Montage	16
2- Test en gaz	16
3- Test de l'électronique et réponse de la chambre	17
4- Installation dans le hall expérimental	17
IV - Prise de données	18
Conclusion	21

Bibliographie

- Annexe 1 : Plan du CERN
- Annexe 2 : Détermination de l'impulsion
- Annexe 3 : Schémas de montages électriques
- Annexe 4 : Préparation du plan U'
- Annexe 5 : Branchement du gaz

Présentation du CEA et du CERN

Mon stage s'est déroulé en deux temps et deux endroits différents. La première partie se passe au CEA-Saclay pour la construction de la chambre à dérive. Le 12 juin celle-ci a été transportée au CERN à Genève et nous l'y avons rejoint pour terminer le montage et commencer la prise de données. C'est pourquoi je présente ces deux organismes de renommée mondiale pour leurs recherches et leurs expériences en physique des particules.

Le Commissariat à l'Énergie Atomique :

cf page de présentation du SPhN : <http://www-dapnia.cea.fr/Sphn/Presentation/index.shtml>

Le Commissariat à l'énergie atomique, fondé en 1945 par le Général De Gaulle, regroupe aujourd'hui 9 centres de recherche civile et militaire en France. Il emploie 16 000 agents CEA pour un budget de 2.8 milliards d'euros. Il est dirigé par un administrateur général (P. Colombani) et un haut commissaire spécialisé dans les orientations scientifiques (R. Pellat).

Le CEA est structuré en 15 directions qui sont constituées de départements divisés eux-même services. La recherche au CEA n'est pas seulement orientée vers l'énergie nucléaire, on y trouve des laboratoires dans le domaine des Sciences du Vivant (DSV), des Sciences de la Matière (DSM), de l'environnement... Le CEA a une volonté constante de se tourner vers l'industrie en signant chaque année près de 1300 contrats avec les entreprises. En accueillant près de 2000 étudiants (stagiaires, doctorats, post-doctorats ...) en 2001, le CEA contribue à l'insertion des jeunes scientifiques dans le monde de la recherche.

Mon stage s'est déroulé au centre de Saclay qui compte 4500 agents, ce qui en fait le centre le plus important du CEA. J'ai travaillé dans une équipe du Service de **Physique Nucléaire** (SPhN) appartenant au DAPNIA. Le DAPNIA est le **D**épartement d'**A**strophysique, de physique des **P**articules, de physique **Nucléaire** de la DSM, il se consacre également à l'étude de l'**I**nstrumentation **A**ssociée aux recherches dans ces domaines.

Tout en bénéficiant de l'expertise d'autres départements du CEA, la recherche au DAPNIA se fait principalement au sein de collaborations nationales et internationales. Le CERN tient une place privilégiée en physique des particules et en physique hadronique. Tous les programmes spatiaux sont cofinancés par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales).

Au sein du DAPNIA on trouve 3 services de recherche : Service d'Astrophysique, le Service de Physique des particules et le Service de Physique Nucléaire, ainsi que 6 services techniques dont le but est de concevoir et de mettre en œuvre les détecteurs et l'instrumentation (électronique, informatique, accélérateurs, etc ...) utilisés par les services de recherche.

Le SPhN est le service de recherche fondamentale en physique nucléaire du DAPNIA et est dirigé par N. Alamanos. Des travaux essentiellement expérimentaux y sont menés avec une volonté constante d'accroître le potentiel d'interprétation théorique, ainsi que de contribuer à l'enseignement de la discipline.

Le SPhN a pour objectif l'étude des systèmes gouvernés par l'interaction forte, c'est-à-dire la structure des noyaux. Cette force se manifeste à deux échelles constituant les premiers étages structurés de la matière ; celle des assemblages de quarks et gluons, sous forme confinée comme dans un plasma, ou liés comme dans les hadrons, dont le nucléon, brique élémentaire de la matière ; celle des assemblages de nucléons, qui fabriquent les noyaux des différentes espèces atomiques. Les études qui sont menées, pourvoient le CEA d'équipes expertes, reconnues au niveau mondial.

Les principaux axes de recherche sont :

- en structure nucléaire : les recherches menées sur le plan expérimental en Europe et surtout au Ganil (Caen) portent sur des noyaux formés dans des conditions extrêmes de moment angulaire (noyaux déformés), d'isospin (noyaux exotiques), de masse (noyaux superlourds) ou d'énergie d'excitation (noyaux chauds). Certains présentent des structures particulièrement intéressantes (halo, déformation, états isomériques). Ces études permettent d'améliorer la connaissance des propriétés des noyaux et de tester notre compréhension au-delà des noyaux stables. Elles ont des implications importantes pour la nucléosynthèse et ouvrent potentiellement de vastes champs d'implications : réacteurs, stockage d'énergie, laser gamma...
- en physique hadronique : l'étude de la structure du nucléon est menée au CERN (COMPASS) et aux Etats-Unis. Le service contribue sur le plan expérimental par des techniques originales (chambres à fils, cavités Fabry-Perot, etc ...), et joue un rôle moteur sur le nouveau concept théorique que sont les fonctions de structures généralisées. La recherche du plasma de quarks et de gluons constitue le second volet de ce domaine, ou la confirmation et l'étude de cette nouvelle phase de la matière sont attendues, notamment grâce à l'expérience ALICE au CERN.
- le SPhN s'applique à mettre en œuvre ses connaissances, ses techniques et ses compétences en physique nucléaire sur des sujets de société comme la transmutation des déchets radioactifs, les nouvelles filières de l'électronucléaire (thorium, actinides mineurs...), les nouveaux concepts de réacteurs. Ce troisième axe se développe autour de la spallation (source complémentaire de neutron pour les réacteurs hybrides), de la modélisation des processus mis en jeu et des mesures de sections efficaces neutroniques (requis pour qualifier les scénarii de transmutation des déchets).

L'équipe du SPhN se compose de 51 chercheurs et ingénieurs du CEA, 13 doctorants et 10 post-docs ; soit au total 81 personnes en comptant le service administratif et le service technique.

C'est au sein du groupe DVCS que s'est effectué mon stage. Ce groupe est composé de N. d'Hose (Chef de groupe), E. Burtin, S. Cavata et J. Marroncle et se propose de mesurer les fonctions de structures généralisées du proton en utilisant l'appareillage et le faisceau de muons de COMPASS. Afin d'acquérir une expertise sur le système de détection de COMPASS, cette équipe s'est jointe au groupe COMPASS du SPhN pour la fabrication de chambres à dérive. En m'intégrant dans cette collaboration j'ai participé à la fabrication de la troisième de ces chambres.

Le CERN (annexe 1) :

cf page internet du CERN : http://press.web.cern.ch/Public/Welcome_fr.html

Le CERN, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire anciennement Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, est le plus grand centre mondial de recherche en physique des particules. Fondé en 1954, le laboratoire a été l'une des premières entreprises communes à l'échelle européenne et est devenu un exemple éclatant de collaboration internationale. Le CERN est situé de part et d'autre de la frontière entre la France et la Suisse, juste à l'Ouest de Genève. Son implantation symbolise l'esprit international de collaboration qui est la raison même du succès du laboratoire. Le CERN, dont la convention constitutive avait été signée à l'origine par 12 pays, compte aujourd'hui 20 états membres.

Environ 6500 scientifiques, soit la moitié des physiciens des particules du monde, viennent au CERN pour leur travail de recherche. Ils représentent 500 universités et plus de 80 nationalités. Le CERN emploie quelques 2500 personnes, couvrant un large éventail de compétences et de métiers - physiciens, ingénieurs, programmeurs, techniciens, ouvriers qualifiés, administrateurs... Il contribue également à la préparation, à la mise en œuvre d'expériences scientifiques complexes ainsi qu'à l'analyse et à l'interprétation des résultats et à la multitude de tâches nécessaires au succès d'une organisation aussi spéciale.

L'expérience COMPASS au CERN

A la fin des années 1960, des expériences faisant entrer en collision des électrons de haute énergie (20 GeV) avec des protons, ont montré que ces derniers étaient en fait des particules composites formées de quarks et de gluons. Une théorie sophistiquée, la chromodynamique quantique, décrit comment ces particules élémentaires interagissent, mais n'explique pas pourquoi les quarks et les gluons restent confinés dans le proton (les quarks et les gluons demeurent inobservables à l'extérieur du proton). Aussi les expérimentateurs continuent à explorer finement la structure du proton avec des sondes d'énergie de plus en plus grande. Ils aimeraient comprendre les grandeurs fondamentales du proton comme sa masse (938 MeV) ou son spin ($\hbar/2$). Par exemple, de quelle façon se répartit le spin du proton sur ses différentes composantes, quarks et gluons? (Le spin intrinsèque des quarks vaut $\hbar/2$, celui des gluons vaut \hbar , et le moment orbital de ces différents constituants doit aussi contribuer au spin du proton).

Deux expériences réalisées au CERN en Europe et au SLAC* aux USA au milieu des années 1990 ont montré que la contribution du spin intrinsèque des quarks au spin du proton est à peine de 20%. Le principal objectif de l'expérience COMPASS au CERN^[1] est la mesure de la contribution du spin intrinsèque des gluons au spin du proton en sélectionnant un mécanisme mettant en jeu un gluon du proton lors de la diffusion de muons** polarisés de très haute énergie (160 GeV) sur une cible de protons polarisés. Les produits de la diffusion des muons sur la cible de protons sont détectés par un spectromètre de grande acceptance (voir figure 1).

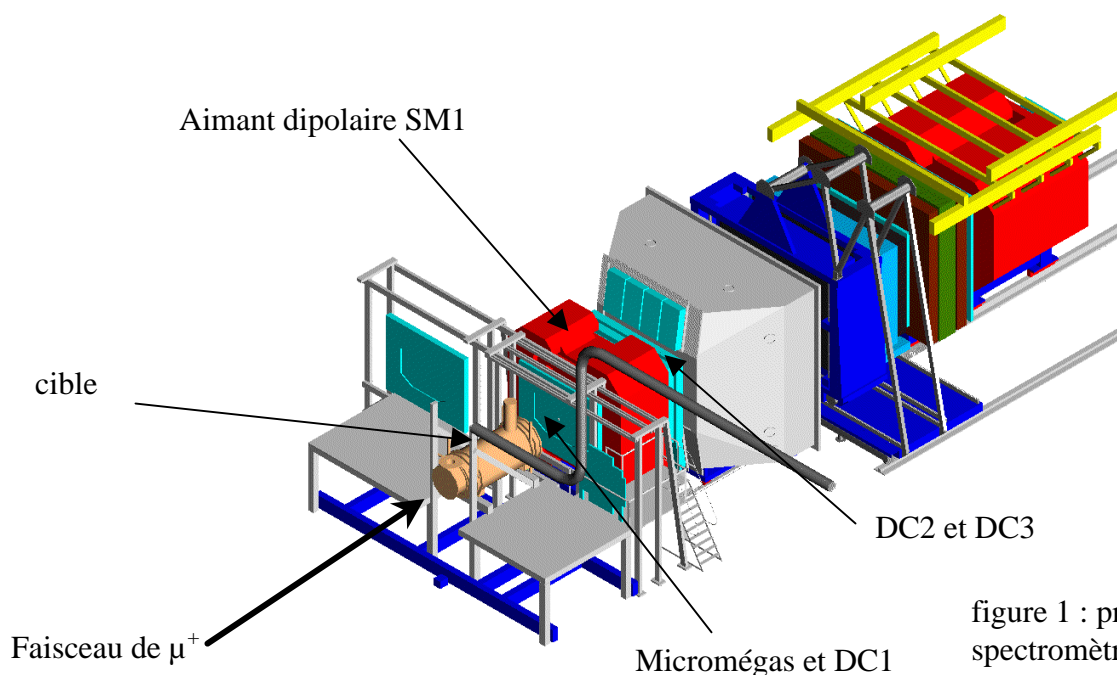


figure 1 : première partie du spectromètre COMPASS

* Stanford Linear Accelerator Center

** Les muons sont des particules semblables aux électrons mais de masse deux cents fois supérieure. Ils sont obtenus à partir des collisions sur une cible fixe de protons accélérés dans un anneau, le supersynchrotron à protons du CERN (cf annexe 1).

Le Service de Physique Nucléaire (SPhN) du CEA à Saclay est responsable de la détection des particules chargées dans la première partie du spectromètre de COMPASS, c'est-à-dire dans la région située entre la cible polarisée et le premier aimant dipolaire (SM1) qui reçoit un flux élevé de particules. Deux types de détecteurs ont été développés dans ce but: des chambres Micromégas^[2] (zone active $40 \times 40 \text{ cm}^2$) pour la région de plus haut flux (quelques 10^5 Hz/cm^2) correspondant aux particules émises à plus petits angles et des chambres à dérive^[3] (zone active $120 \times 120 \text{ cm}^2$) pour des flux un peu plus réduits (10^4 Hz/cm^2) correspondant aux particules émises à plus grands angles. L'étude des chambres à dérive placées dans cet environnement a été très largement développée dans la thèse de Hugo Pereira qui m'a servi de manuel de référence. La dernière des trois chambres à dérives installée dans l'expérience et appelée DC1 est l'objet de ce rapport.

I - Principe de fonctionnement d'une chambre à dérive

Le rôle des détecteurs Micromégas et des chambres à dérive est de reconstruire la trajectoire des particules chargées qui les traversent, pour en déterminer leurs impulsions. Ces détecteurs sont centrés perpendiculairement au faisceau et couvrent un angle solide où sont émises la majorité des particules issues des collisions des muons avec les protons de la cible. Les particules chargées sont déviées latéralement sous l'effet du champ magnétique de SM1. A partir de la déviation angulaire $\Delta\theta$ entre les trajectoires en amont et en aval de SM1, on peut en déduire l'impulsion de la particule (voir annexe 2). Une particule chargée qui traverse une chambre à dérive ionise le gaz libérant des électrons et des ions sur son passage ; ceux-ci dérivent sous l'effet d'un champ électrique vers les électrodes de la chambre. En mesurant leur temps de dérive, on en déduit la position de la particule.

1- Description de la chambre à dérive

La chambre à dérive (cf figure 2) est un empilement de 8 plans de dérive de structure légère afin d'offrir aux particules qui la traversent une transparence maximale. Un plan de dérive est constitué des trois éléments suivants :

- les deux plans de cathode : ce sont deux grandes feuilles de Mylar ($127 \times 180 \text{ cm}^2$) rendues conductrices par un dépôt de graphite et espacées parallèlement de 8 mm. Deux plans de cathode prennent en "sandwich" un plan de fils constitué de deux types de fils: les fils de champ et les fils de lecture.
 - les fils de champ : ce sont des fils conducteurs fins tendus tous les 7 mm dans le plan médian aux deux plans de cathode. L'espace situé entre les deux plans de cathode et deux fils de champ définit une cellule de dérive de section $7 \times 8 \text{ mm}^2$. Ces fils de $100 \mu\text{m}$ de diamètre sont réalisés dans un alliage de cuivre et de béryllium.
 - les fils de lecture : ils sont intercalés entre deux fils de potentiel successifs et dans le même plan. Ces fils sont en tungstène doré, d'un diamètre de $20 \mu\text{m}$ et correspondent au centre de la cellule de dérive.
- Ces plans diffèrent entre eux par l'inclinaison des fils : des fils verticaux pour la coordonnée horizontale et des fils horizontaux pour la coordonnée verticale, ainsi que des fils inclinés à $\pm 20^\circ$ par rapport à la verticale, comme indiqué sur la figure suivante. Chacun de ces plans contient 176 cellules de dérive enfermées dans une enceinte étanche remplie d'un mélange gazeux.

Position des fils dans les chambres

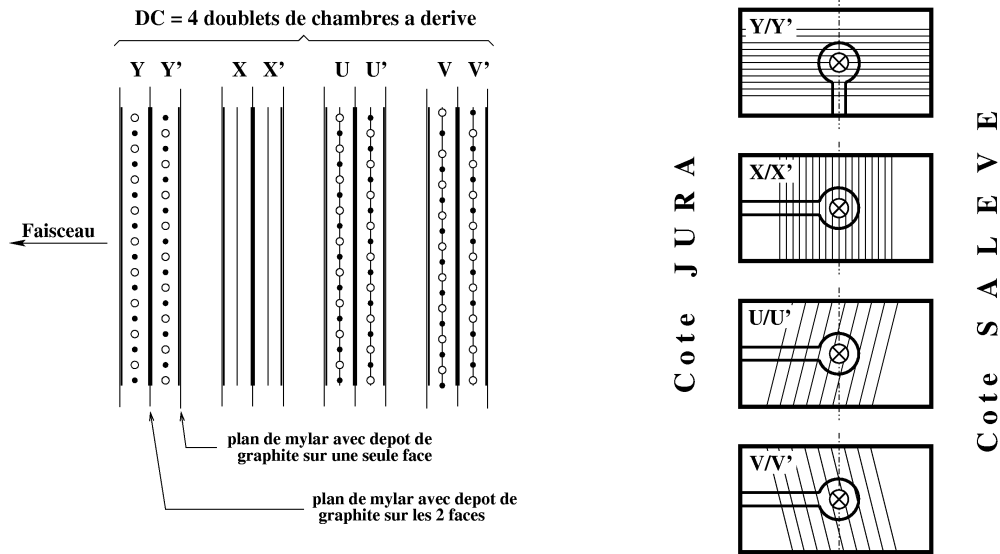


figure 2 : position des plans et des fils dans la chambre à dérive. Les notations indiquent aussi la géométrie de l'installation.

2- Principe de fonctionnement d'une cellule de dérive

La configuration électrostatique d'une cellule de dérive est déterminée par le potentiel des cathodes, les plans de Mylar et les fils de champ, portés à -1800 V et par celui des anodes, les fils de lecture, portés à 0 V . La figure ci-dessous représente le calcul^[3,4] des équipotentielles, ainsi que les lignes de champ, d'une telle cellule pour un prototype dont la section transverse des cellules est de $10 \times 10\text{ mm}^2$, au lieu de $7 \times 8\text{ mm}^2$ pour DC1.

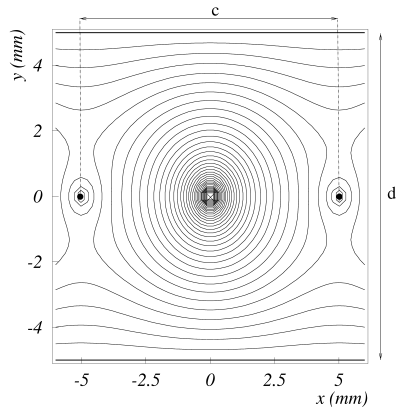


figure 3-a : surfaces équipotentielles

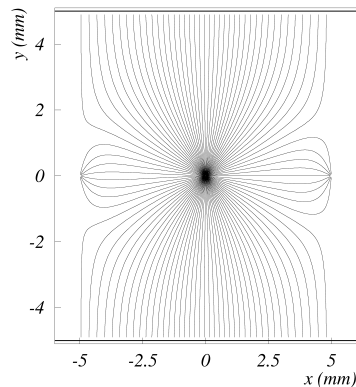


figure 3-b : lignes de champ

La figure montre que la géométrie de la cellule au voisinage des fils de lecture peut être approximativement assimilée à celle d'un condensateur cylindrique : la cathode est un cylindre de longueur L et de diamètre d ($d=7\text{ mm}$) porté au potentiel V_2 (-1800 V) et l'anode est un cylindre de même longueur et de même axe dont le diamètre ϕ est celui du fil de lecture ($\phi=20\text{ }\mu\text{m}$), et porté au potentiel V_1 (0 V). On notera par la suite $V_0=V_1-V_2$. λ est la densité linéique de charges sur le fil de lecture et C est la capacité linéique de la cellule : $\lambda=C(V_1-V_2)=-CV_0$. C'est dans le cadre de cette approximation que l'on étudiera la cellule. En appliquant le théorème de Gauss, on obtient l'expression du champ électrique $E(r)$ à la distance r du fil de lecture :

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r}$$

Or $V_0 = \int_{\phi/2}^{d/2} E \cdot dr$, ce qui donne :

$$E(r) = \frac{V_0}{r \log \frac{d}{\phi}} \quad \text{et} \quad V(r) = \frac{-C V_0}{2\pi\epsilon} \log \frac{r}{\phi/2}$$

Pour $V_0=1800$ V le champ électrique sur le bord du fil ($r=10 \mu\text{m}$) vaut $E=3 \cdot 10^5$ V.cm⁻¹. Ces formules montrent l'intérêt de minimiser le diamètre de ce fil afin de rendre maximal le champ au bord du fil.

Au passage d'une particule chargée, les atomes ou les molécules du gaz situés sur la trajectoire de celle-ci s'ionisent. Ceci a pour effet de libérer des charges dites primaires. Ces électrons et ces ions dérivent respectivement vers l'anode et la cathode sous l'effet du champ électrique. En migrant vers le fil de lecture les électrons subissent l'effet d'un champ électrique de plus en plus fort. Ils acquièrent ainsi une énergie suffisante leur permettant d'ioniser à leur tour d'autres atomes du gaz : c'est le phénomène d'avalanche. Le gain en électrons, dû à cette avalanche, qui permet d'avoir un signal détectable dépend directement du champ électrique et du mélange gazeux choisi.

Pour le gaz choisi, l'avalanche a lieu à partir de $3 \cdot 10^4$ V/cm. Aussi la quasi-totalité des électrons secondaires est produit au voisinage immédiat du fil de lecture ($r < 100 \mu\text{m}$). Ceux-ci dérivent sur une très courte distance ($< 100 \mu\text{m}$) et pendant un temps très bref (< 1 ns) avant de parvenir sur ce fil. Par opposition les ions, également créés au voisinage du fil, migrent lentement ($100 \mu\text{s}$) sur une grande distance vers les cathodes. Le mouvement des charges induit une variation de potentiel sur le fil de lecture. Pour l'évaluer^[5], on considère une particule de charge q à une distance r ($r = \rho + \phi/2$) de l'axe de la cellule. Son énergie potentielle est $U = qV(r)$, soit pour un déplacement infinitésimal dr : $dU = q \frac{dV(r)}{dr} dr$.

Pour le condensateur cylindrique l'énergie électrostatique est $U = \frac{1}{2} L C V_0^2 \Rightarrow dU = L C V_0 dV_0$.

Si on suppose un système fermé, la conservation de l'énergie donne : $dU = L C V_0 dV_0 = q \frac{dV(r)}{dr} dr$.

Donc la variation de potentiel sur le fil de lecture, due au déplacement des charges, est :

$$dV_0 = \frac{q}{L C V_0} \frac{dV(r)}{dr} dr$$

A partir de cette formule, on peut calculer la variation de potentiel due aux :

$$\text{- électrons : } V_e = \frac{-q}{L C V_0} \int_{\phi/2+\rho}^{\phi/2} \frac{dV(r')}{dr'} dr' = \frac{-q}{2\pi\epsilon L} \log \frac{\phi/2+\rho}{\phi/2}$$

$$\text{- ions : } V_i = \frac{q}{L C V_0} \int_{\phi/2+\rho}^{d/2} \frac{dV(r')}{dr'} dr' = \frac{-q}{2\pi\epsilon L} \log \frac{d/2}{\phi/2+\rho}$$

La somme de ces deux contributions est $V = V_e + V_i = -q/LC$ et leur rapport est :

$$\frac{V_e}{V_i} = \frac{\log \frac{\phi+2\rho}{\phi}}{\log \frac{d}{\phi+2\rho}}$$

Comme le régime d'avalanche intervient au niveau du fil de lecture, en prenant $\rho=10 \mu\text{m}$ le rapport vaut 0.13 et n'est plus que de 0.02 à $\rho=1 \mu\text{m}$. Le signal généré sur le fil de lecture résulte donc principalement du signal induit par le déplacement des ions. La variation de potentiel induit un courant électrique sur l'anode que l'on récupère par l'électronique frontale.

3- Choix du gaz

Il est nécessaire que la chambre à dérive soit un compteur proportionnel aux charges déposées. Ce régime de fonctionnement dépend du choix du gaz et de la haute tension appliquée. Pour optimiser le gain en électrons de l'avalanche le mélange gazeux injecté dans la chambre est constitué :

- d'un gaz noble : l'argon. Il permet la libération d'un grand nombre d'électrons primaires (~100 e⁻/mm), de plus il est d'un faible coût.
- d'un gaz poly-atomique : l'éthane C₂H₆. Ce gaz a pour but d'absorber les photons créés lors de l'avalanche afin qu'ils ne puissent pas induire une seconde avalanche ; il est appelé "quencher" pour cette raison.
- un troisième constituant a été ajouté, le CF₄, qui a la propriété d'augmenter la vitesse de dérive des électrons.

Le mélange gazeux choisi est : Ar / C₂H₆ / CF₄ à 45/45/10 %. Ce mélange offre un gain d'environ 2 10⁴.

4- Détermination des coordonnées de la particule

Pour chaque particule détectée, on mesure le temps de dérive qui lui est associé. On en déduit ainsi sa position en utilisant la relation entre la distance de la trajectoire au fil et le temps de dérive des électrons. Cette caractéristique de la chambre est désignée dans la littérature comme la relation RT (figure 5). C'est une relation entre la distance de la trajectoire de la particule au fil et le temps de dérive des ions. Elle est calculée pour chaque plan lorsque le détecteur fonctionne dans les conditions nominales. Cependant elle ne permet pas de différencier la droite de la gauche du fil. Cette levée d'ambiguïté gauche/droite se fait en utilisant un deuxième plan de dérive dont les fils sont décalés d'une demi-cellule par rapport au premier (figure 4). C'est pour cette raison que la chambre est constituée de doublets de plans de dérive. Les plans inclinés à ±20° par rapport à la verticale permettent quant à eux de résoudre les ambiguïtés dues aux doubles comptages des cellules de dérive des plans verticaux et horizontaux.

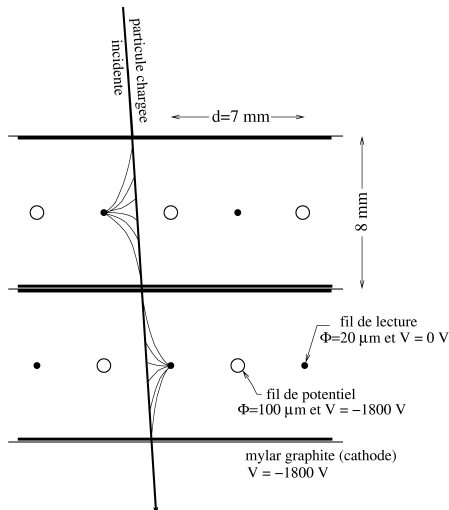


figure 4 : schématisation de la dérive des électrons vers les anodes. Illustration de la levée d'ambiguïté droite/gauche.

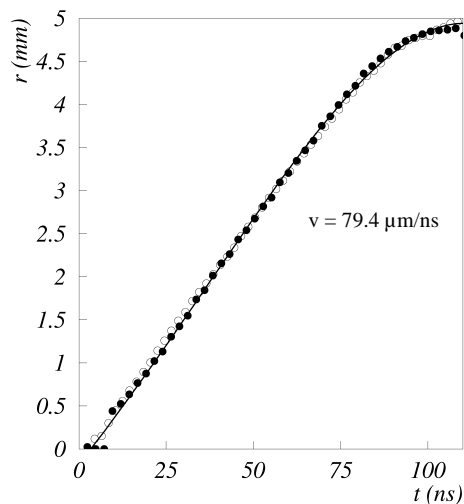


figure 5 : allure théorique de la relation RT dans les conditions nominales de fonctionnement de la chambre.

5- Le beam-killer

Les chambres à dérives doivent être désactivées dans la région centrale car le flux de particules y est trop important pour ce type de détecteurs. La détection est assurée dans cette région par les Micromégas et d'autres détecteurs de ce type.

Le beam-killer est une partie circulaire du plan cathode ($\phi=28.5$ cm) ; il est isolé électriquement du reste de la cathode et peut donc être alimenté de façon séparée. Le fonctionnement du beam-killer a fait l'objet d'une étude très détaillée et présentée dans la thèse de Hugo Pereira^[3]. Il a été montré qu'une réduction de potentiel de la cathode de -1800 V à -900 V sur le beam-killer, produit une désactivation suffisante de la zone centrale.

Ainsi le détecteur n'est pas saturé et peut accepter un haut flux de particules. Cependant cette désactivation est réversible et la région centrale peut être utilisée avec des faisceaux de moindre intensité, lors de l'alignement des détecteurs par exemple, en augmentant la valeur de la tension du beam-killer jusqu'à égaler celle de cathode.

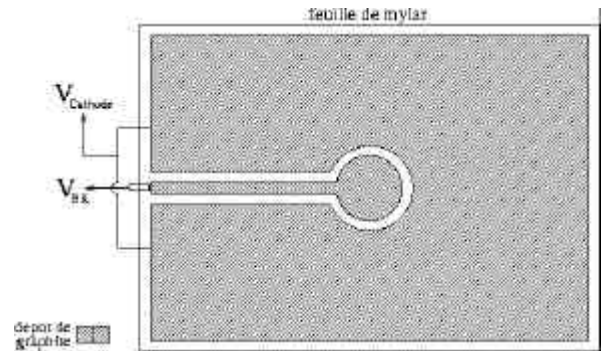


figure 6 : implantation du beam-killer sur la cathode.

6- Electronique Frontale

Une fois que le signal est généré sur le fil, il faut l'extraire et le lire. C'est le rôle de l'électronique frontale qui se présente sous la forme de cartes électroniques qui collectent les informations de tous les fils de lecture. Ces cartes ont deux rôles :

- amplification/discrimination du signal, réalisé par le module ASD8. Les seuils de discrimination sont de l'ordre de $2.5 \cdot 10^4$ électrons et peuvent être programmés indépendamment pour chaque fil.
- numérisation des temps de passage des signaux, réalisé par le module F1 qui sont des TDC (Time to Digital Converter).

Chaque carte traite 64 voies ou fils. Les signaux numériques donnés par ces cartes sont acheminés via des câbles "hot-link" jusqu'à un tableau de connections ("patch-pannel") implanté sur le support de la chambre, puis vers des modules "CATCH" situés dans le hall expérimental et enfin vers des ordinateurs dans la salle de contrôle. Ces cartes sont réalisées par l'université de Freiburg (Allemagne) et équipent d'autres détecteurs de l'expérience. Ces cartes n'étaient pas utilisées pour les deux premières chambres construites, DC2 et DC3, pour lesquelles l'équipe de Saclay avait conclu à une séparation de la partie analogique (module ASD8) de la partie digitale (module F1) en 2 cartes distinctes. Aussi l'utilisation des cartes de Freiburg est à valider.

L'alimentation de ces cartes est faite par une basse tension ± 9 V débitant environ 70A. La dissipation de chaleur par effet Joule est très grande et est évacuée par une ventilation d'autant plus nécessaire que les cartes sont enfermées dans un blindage électromagnétique.

II - Construction et assemblage des plans

La construction de la chambre à dérive est faite en deux étapes : la fabrication et l'assemblage des différents plans au CEA-Saclay ; l'accastillage au CERN, c'est-à-dire la mise en place des pièces mécaniques nécessaires à la fixation de l'électronique et du blindage suivie du montage-même de l'électronique.

A mon arrivée, la moitié de la chambre était déjà construite. Je me suis donc impliqué dans la fabrication et les tests des deux derniers doublets (XX' et YY').

1- Fabrication des plans de fils

A l'aide d'un métier à tisser, développé par le CEA-Saclay, les fils de lectures sont disposés avec une très grande précision sur un cadre tournant ; ils sont tendus à 70 gf* et sont espacés de 7 mm. Cette opération est répétée pour les fils de potentiel tendus à 400 gf. L'ensemble de ces fils est ensuite soudé sur des pistes électroniques collées sur un cadre en "époxy". La rigidité de ce plan est assurée par un cadre de transfert qui facilite également sa manipulation. Ensuite des connecteurs 16 voies, associés aux fils de lecture, ainsi que des réseaux de résistances sont soudés sur les pistes électroniques. Ces réseaux permettent une alimentation en parallèle des fils de potentiel. Le nettoyage au méthylal ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{OCH}_3$) du plan peut alors commencer.

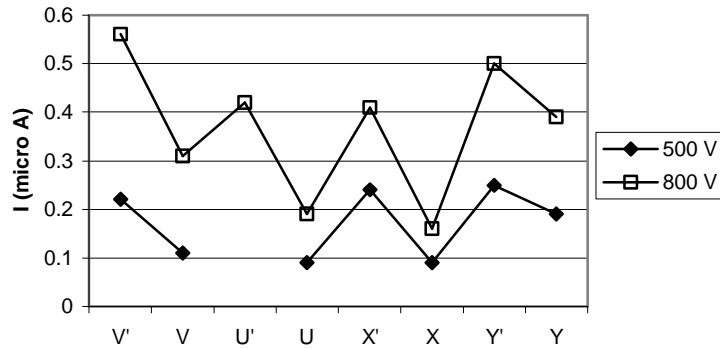
2- Tests sur les plans de fils

a- Test d'isolation masse/fils (annexe 3-b)

Ce premier test sert à vérifier l'isolation entre les fils (potentiel et lecture) et la masse. Tous les fils sont portés à un potentiel de 800 V. Le courant de fuite, entre la masse et les fils, est enregistré sur un ampèremètre à stilet pour suivre son évolution au cours du temps. Ce test est validé si le courant de fuite ne dépasse pas 0.5 μA à 500 V ; la tension est montée à 800 V pour garder une marge de sécurité.

Une fuite de courant peut provenir de poussières, de salissures (reste de soudure, graisse, ...) sur les fils ou les connecteurs qu'il faut éliminer par un nettoyage méticuleux. De l'humidité peut être piégée dans les soudures. On l'évapore à l'aide d'une chaufferette (Leister). Pour enlever les poussières restantes on souffle de l'argon sur les connecteurs. L'argon ayant une tension de claquage plus faible que l'air, il apparaît des arcs électriques au niveau des poussières qui sont alors grillées et donc éliminées. En soufflant de l'argon sur le plan de fils, on peut repérer les fils mal tendus et les changer.

* gf=gramme-force, unité ancienne, 1kgf = 9.8 N



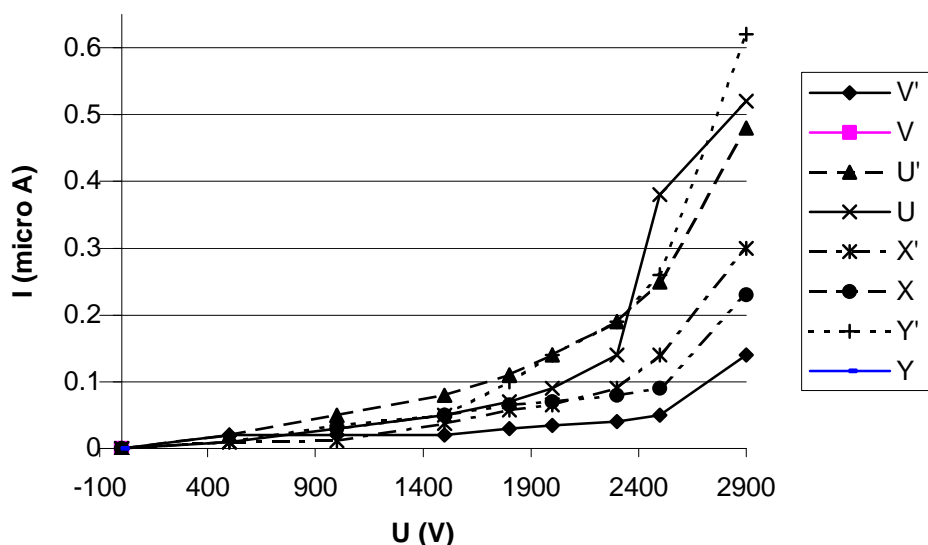
Le graphique ci-dessus représente les valeurs du courant de fuite pour les 8 plans aux tensions de 500 V et de 800 V. Aucun des plans ne dépasse la valeur de 0.5 μ A à 500 V, le test est donc validé.

b- test d'isolation des fils de potentiel par rapport à la masse et aux fils de lecture (annexe 3-c)

On teste ensuite l'isolation entre les fils de potentiel et les fils de lecture reliés à la masse. Ce test est validé lorsque le courant de fuite est inférieur à 1.5 μ A pour une alimentation à 2800 V des fils de potentiel.

Un ensemble de cartes "test" permet de connecter tous les fils de lecture entre eux 16 par 16 (cf annexe 3-a). Pour localiser les fuites de courant au niveau des connecteurs, on débranche les cartes "test" une à une et on observe la chute de courant. Si cette chute est importante on re-nettoie les fils et les connecteurs correspondants à cette carte "test". Cette opération est réitérée jusqu'à obtenir une valeur raisonnable du courant de fuite. Ensuite le plan de fils est mis en "cuisson", c'est-à-dire qu'on le laisse sous tension suffisamment longtemps pour que toute impureté résiduelle soit brûlée. La réduction par un facteur 10 du courant de fuite en une douzaine d'heures, constatée à plusieurs reprises, montre bien l'efficacité de la "cuisson". L'élaboration détaillée du plan U' est présentée dans l'annexe 4. Durant la "cuisson", il faut couvrir les plans pour les protéger des poussières ambiantes, des insectes, etc.

Nous avons remarqué l'influence des conditions climatiques sur le courant de fuite. Le courant croît avec l'humidité et décroît avec la pression.



Le graphe ci-dessus montre l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée aux différents plans. Une fois ces tests effectués et validés, les fils sont collés avec de la cyanolite au niveau des soudures afin d'éviter une éventuelle défaillance de celles-ci. Six heures de séchage sont nécessaires avant de retrouver les caractéristiques électriques.

Il ressort de cette étape la nécessité de travailler dans d'excellentes conditions de propreté. L'idéal serait de travailler en salle blanche, mais le coût et le volume de la salle seraient trop importants pour ces chambres à dérive.

3- Fabrication des plans graphités

La fabrication des plans de cathode se fait en deux étapes :

- Le Mylar est tendu par des vérins pneumatiques répartis le long des quatre cotés pour obtenir une surface uniforme. Celle-ci est ensuite collée par de l'araldite sur son cadre en "époxy". Pour assurer un bon contact pendant le collage, des briques de plomb sont disposées sur le cadre.
- Le graphitage est réalisé, par une entreprise extérieure, en déposant au pistolet une peinture à base de graphite. Ensuite le Mylar est "poli" pour retirer l'excédent de graphite et assurer une conductivité électrique homogène qui est mesurée pendant l'opération.. Puis on enlève les scotchs de protection laissant apparaître entre autres le dessin du beam-killer. L'alimentation en tension du plan est faite par des bandes de peinture d'argent reliant les câbles à la surface graphitée.

De manière identique, les Mylars aluminisés des deux fenêtres qui ferment la chambre sont tendus sur le cadre raidisseur.

L'isolation électrique du beam-killer par rapport au reste du plan est ensuite testée. Pour cela on applique une différence de potentiel de 2200 V entre les deux surfaces tout en vérifiant que le courant de fuite reste inférieur à 0.5 μ A. Les résistances du plan et du beam-killer sont également mesurées afin de révéler d'éventuels problèmes de conduction.

4- Empilement des plans de fils et de Mylar

Les plans de Mylar et de fils sont empilés individuellement entre deux fenêtres de fermeture, elles-mêmes sont maintenues par des cadres raidisseurs qui garantissent la tenue mécanique de l'ensemble.

Pour chaque doublet, l'empilement des plans se fait dans l'ordre suivant (cf figure 2):

- un plan de Mylar graphité sur une face
- un plan de fils
- un plan de Mylar graphité sur les deux faces
- un plan de fils
- un plan de Mylar graphité sur une face

Ce motif est répété pour les 4 doublets. Entre chacun de ces plans, est placé un joint torique assurant l'étanchéité au gaz.

Lorsqu'un doublet est monté, on le teste à une différence de potentiel de 2150 ~ 2200 V. Le doublet est mis en "cuisson" afin d'éliminer les poussières qui auraient pu se déposer lors du montage. Au fur et à mesure que les doublets sont montés, un blindage électromagnétique est posé sur les côtés de la chambre. Il s'agit de plaques de laiton recouvrant les tranches latérales de la chambre. Ce blindage a deux buts : isoler la chambre contre le bruit électromagnétique d'une part et assurer la continuité de la masse d'autre part. Les fenêtres de ces plans ont le même but, de plus elles assurent l'étanchéité de la chambre et servent de réservoir tampon de gaz.

L'ensemble de ces plans est maintenu serré par des boulons placés dans les goupilles et vissés à un couple de 10 kgf.m. On peut maintenant procéder au test d'étanchéité de la chambre. De l'argon est mis en circulation dans la chambre (voir le schéma de l'installation dans l'annexe 5) pendant une quinzaine d'heures, puis une mesure de fuite de gaz est faite à l'aide d'un détecteur de gaz.

L'assemblage de la chambre est alors terminé. Elle fut donc transportée par camion du CEA-Saclay au CERN le 12 Juin.

III - Accastillage

L'accastillage, commencé le 17 juin, est la mise en place des pièces mécaniques entourant le détecteur et de l'électronique frontale. Cette opération s'est déroulée à l'antenne du CEA-Saclay au CERN et a duré une quinzaine de jours.

1- Montage

Une fois la structure mécanique montée, on dispose les boîtiers d'alimentation des hautes tensions, les "bus-barres" véhiculant l'alimentation des cartes électroniques et enfin les tuyaux de gaz. Sur cette structure on pose le blindage protégeant la chambre du bruit électromagnétique extérieur et canalisant la circulation de l'air autour de l'électronique. On branche les cartes électroniques sur les connecteurs des cadres en "époxy", puis les tuyaux de ventilation sont mis en place et reliés à une soufflerie située à l'extérieur de la chambre.

Tous les câbles (alimentations et "hot-links") sont connectés au "patch-pannel". Une fois le blindage posé, le "patch-pannel" est la seule interface entre le détecteur et la chambre. On y branche les alimentations (haute tension et basse tension) venant de l'extérieur et les câbles "hot-link" permettant la liaison entre les ordinateurs et les cartes électroniques.

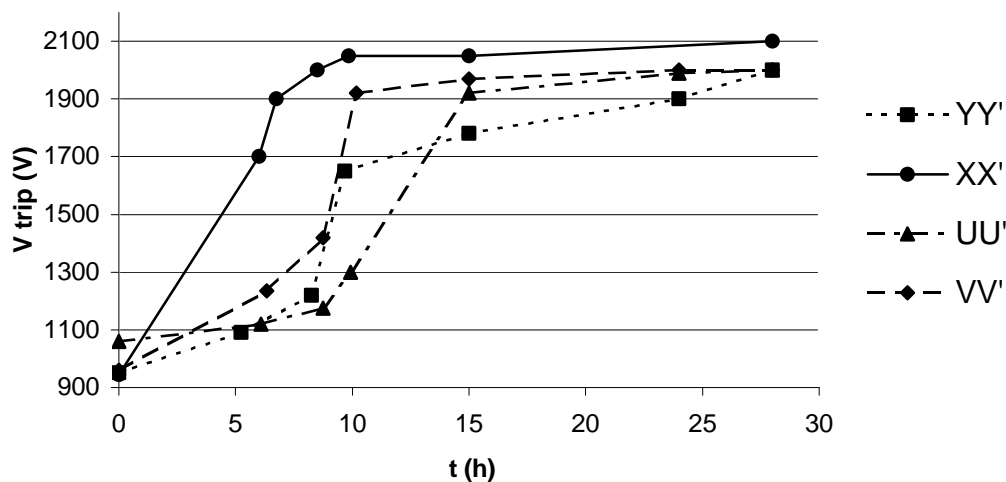
2- Tests en gaz

Avant de transporter la chambre dans le hall expérimental, différents tests en gaz et en haute tension sont réalisés.

On fait circuler de l'argon (~20 l/h) dans la chambre (cf annexe 5) que l'on recueille ensuite en sortie afin de s'assurer qu'il n'y a pas de fuite supérieure au débit de gaz entrant. Le remplissage de la chambre compte tenu de la perte en charge dans le système nécessite environs 48h.

Afin de se rapprocher des conditions expérimentales, on introduit un mélange Ar + C₂H₆ (50%, 50%). Vu que la tension de claquage de l'argon est inférieure à celle du mélange, on suit au cours du remplissage l'évolution de la tension V_{trip} appliquée sur les doublets. V_{trip} est la tension pour laquelle le courant de fuite devient supérieur à 5 μA .

Le graphe ci-dessous représente l'évolution de V_{trip} en fonction du temps de balayage du mélange gazeux pour les quatre doublets. Il faut attendre 25h pour que le mélange soit stabilisé et que la tension nominale puisse être montée à 1800 V.



3- Test de l'électronique et réponse de la chambre

Les cartes électroniques sont connectées sur la chambre et alimentées en ± 9 V via les "bus-barres". Leur fonctionnement exige différents paramètres de configuration tels que les seuils de discrimination, le calibre de l'horloge.... Ceux-ci sont chargés sous la forme d'un fichier informatique transféré aux modules F1 par un ordinateur via les "hot-links". On peut alors vérifier les valeurs des seuils en mesurant les tensions appliquées sur certains points de connexion des modules ASD8.

Pour une voie donnée, on visualise sur un oscilloscope le bruit électronique caractéristique des cartes et des fils. En faisant varier les seuils on vérifie qu'on observe bien l'extinction des signaux.

On peut maintenant tester la réponse de la chambre soumise à des particules ionisantes. On alimente les doublets à -1800 V afin de mettre en évidence un signal de source radioactive. En approchant une source de ^{90}Sr des fenêtres de fermeture de la chambre, on observe sur l'oscilloscope le signal déposé par le rayonnement β^- de cette source. En éloignant la source, le signal s'estompe laissant apparaître seulement le bruit de fond.

Ces tests sont succincts étant donné la difficulté d'accès à toutes les voies de la chambre, mais permettent néanmoins de valider son fonctionnement. Toutes les voies seront testées lorsque la chambre sera dans sa position expérimentale.

4- Installation dans le hall expérimental

La chambre a été transportée par camion de l'antenne du CEA-Saclay au hall expérimental le 2 juillet. Puis elle a été déplacée vers sa position finale et suspendue verticalement sur une potence. Cette potence permet deux positions :

- la position "faisceau" : la chambre est dans la ligne de faisceau et alignée avec les autres détecteurs pour les prises de données.
- la position "garage" : la chambre est accessible pour réaliser différentes interventions.

La chambre est placée en position "garage", afin de brancher les câbles d'alimentation haute et basse tension, les câbles "hot-link", les tuyaux de gaz et le système de ventilation. La mise en position

“faisceau” se fait par une simple translation guidée par un rail. Ce rail de guidage empêche la chambre de se balancer lors de sa translation. Ce rail est d’autant plus important que l’espace entre la chambre et la station Micromégas n’est que de quelques centimètres. De plus des “espaceurs” sont installés afin d’éviter tout déplacement de la chambre dû au champ de fuite de l’aimant SM1.

La chambre n’est pas placée immédiatement en position faisceau car il faut attendre que le mélange gazeux se stabilise. Au bout de quelques jours la tension sur les doublets s’approchait de la tension nominale, mais le système de gaz ne “bullait” pas. On s’est ainsi rendu compte d’une fuite de gaz très importante (~25 l/h) due à un mauvais serrage de la chambre. Cette fuite n’a pas été détectée pendant l’accastillage à l’antenne du CEA-Saclay et n’est apparue qu’après le transport.

Un autre problème est apparu sur les alimentations basse tension de l’électronique. Certaines cartes, mal alimentées, ne répondaient pas et d’autres étaient endommagées. Après la réparation des cartes, le réglage des alimentations et le serrage, la chambre était opérationnelle pour la prise de données.

Il a fallu deux semaines pour régler ces problèmes car la zone expérimentale n’est ouverte, pour une durée minimale de 8h, qu’une seule fois par semaine. La prise de données a donc commencé le 17 juillet.

IV - Prise de donnés

Les tensions appliquées sont de -1650 V sur les cathodes et de -900 V sur les beam-killers. Le seuil de discrimination des ASD8 a été fixé dans un premier temps à 900 mV sur tous les plans (figure 6 gauche).

Les histogrammes de la figure 7 représentent le taux de comptage par fils sur le plan Y1, c’est-à-dire le nombre de signaux dépassant le seuil de discrimination par seconde. Ce taux de comptage prend en compte les signaux induits par les particules et le bruit électronique.

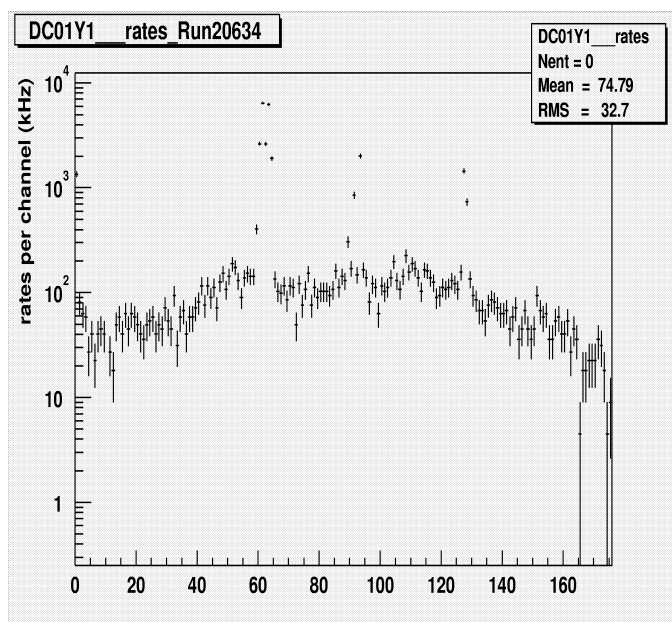


figure 7-a : profil où le seuil des ASD8 est le même pour tous les fils (900 mV).

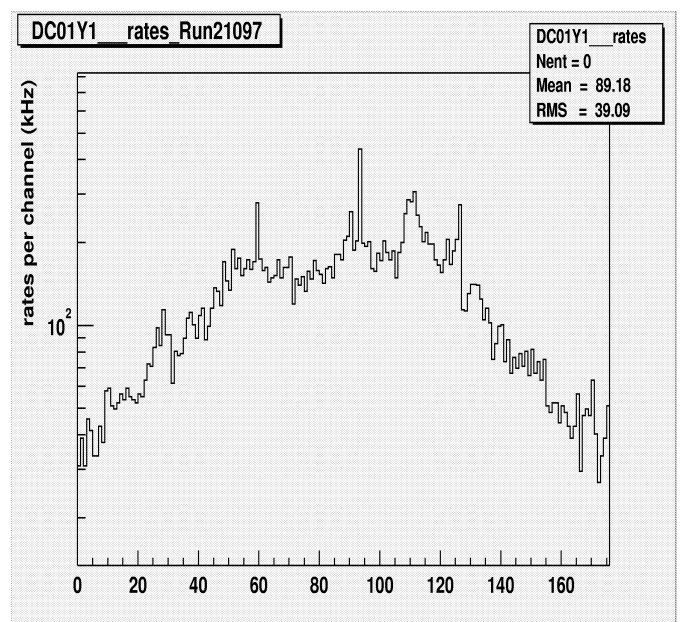


figure 7-b : profil avec les seuils modifiés.

On voit que les canaux 1, 63, 64, 65, 87, 88, 122 et 123 sont très bruyants (plusieurs MHz) alors que le niveau maximum toléré est de l'ordre de 250 kHz. Un phénomène déjà observé sur les plans Y de DC2 et DC3 est l'apparition de canaux bruyants sur le bord du plan (ici le canal 0). Les canaux 63 et 127 correspondent au dernier fil de leurs cartes respectives. Ce phénomène étant observé sur presque tous les autres plans de DC1, on pense que ce bruit est induit par les cartes elles-mêmes. D'autre part il reste des canaux bruyants comme les canaux 87 et 88. Il faut rappeler que ces cartes de Freiburg sont utilisées pour la première fois sur les chambres à dérive placées dans cet environnement.

Afin de réduire le taux de comptage dû au bruit électronique, on a décidé d'appliquer des seuils différents sur chaque canal des ASD8. Le seuil sur l'ensemble des fils est laissé à 900 mV, alors que sur les canaux bruyants il est à 2000 mV. Le résultat de ces changements de seuils est montré sur le profil de la figure 7-b. Il faudra déterminer l'impact de cette procédure sur l'efficacité de la chambre.

On observe également un plateau au centre de la chambre, entre les canaux 50 et 125, c'est l'effet du beam-killer. Sans le beam-killer le taux de comptage serait très important au niveau de ces fils et formerait un pic de plusieurs dizaines de MHz.

Un système de déclenchement (trigger), composé de détecteurs rapides, permet de sélectionner un type de réactions (domaines cinématiques, particules dans l'état final...). Il envoie alors aux détecteurs un signal qui déclenche l'acquisition des données. Ce signal constitue également la référence en temps de l'événement.

Dans le cas de la chambre à dérive, le trigger ouvre une porte en temps (2400 canaux = 310 ns) durant laquelle les F1 mesurent le temps d'arrivée des signaux sur les fils de lecture.

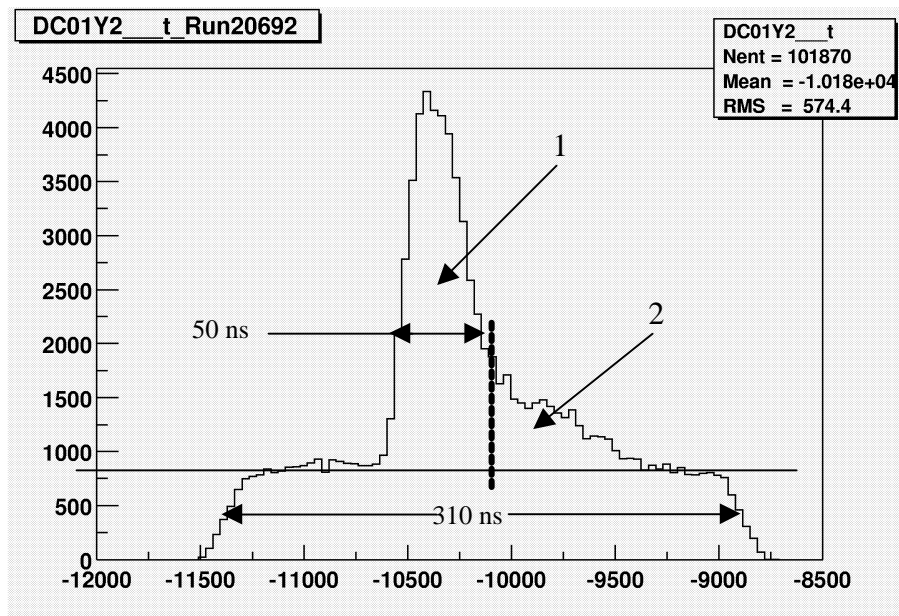


figure 8 : spectre en temps de Y' ; la partie grisée représente les événements fortuits

Les événements fortuits (partie grisée) sont des particules n'ayant pas déclenché le trigger mais qui ont laissé un signal sur les fils de lecture dans la fenêtre en temps des F1. Elles sont distribuées uniformément sur le temps et sont perçues comme un bruit de fond lorsqu'elles sont enregistrées.

Les événements sélectionnés par le trigger forment la partie supérieure de l'histogramme. La zone 1 correspond principalement aux particules de très faible incidence par rapport à la normale de la cellule. Les temps de dérive s'étalent de 0 à 50 ns : les particules incidentes traversant le centre de la cellule ont un temps de dérive quasi-nul tandis que celui des particules passant à proximité des fils de potentiel est de 50 ns.

Comme on peut le constater sur la figure 3, le champ électrique et le potentiel aux quatre coins d'une cellule sont nettement plus faibles que sur le reste de la cellule. Il en résultera une diminution locale de la vitesse de dérive des électrons primaires. Une particule incidente qui traverse la cellule uniquement dans ces régions sera donc associée à un temps de dérive plus long. Ce sont ces particules que l'on retrouve dans la zone 2 du spectre. Cela concerne principalement les particules ayant un angle d'incidence notable [6].

Avant d'analyser les résultats, il faut caractériser la chambre, c'est-à-dire déterminer les relations RT et les efficacité de détection de chaque plan. Les efficacité attendues sont de l'ordre de 98% comme celle déterminées sur DC2 et DC3.

L'étape suivante sera la détermination des résolutions spatiales qui seront obtenues par les relations RT. Pour la première chambre construite, DC2, les résolutions des plans varient entre 160 et 200 microns. La déviation des particules par l'aimant SM1 se faisant selon la direction x , la résolution en impulsion dépendra donc principalement de la résolution sur cette coordonnée. Ainsi la conception de la chambre a été telle que la résolution sur l'axe x soit privilégiée.

CONCLUSION

La durée de la construction de la chambre aura été de trois mois, depuis la fabrication au CEA-Saclay jusqu'à l'accastillage au CERN. La chambre a été installée dans le spectromètre COMPASS le 02/07/2002. En raison des divers problèmes rencontrés, les premières données fiables n'ont été enregistrées qu'une quinzaine de jours après l'installation dans le hall expérimental.

Au cours de ces trois mois de stage j'ai donc assisté à ces différentes étapes. Bien que ce fut la troisième chambre à dérive construite sur le même modèle, il surgit toujours de nouveaux problèmes. Ceux-ci m'ont appris que la réalisation d'un détecteur nécessite un travail soigné, rigoureux et méthodique durant la construction et les tests de vérification systématiques. Je retiendrai tout particulièrement ces méthodes de travail.

Ce stage m'aura permis de mieux comprendre le fonctionnement d'une expérience de physique nucléaire au CERN et les techniques de détections utilisées. De plus la réalisation de cette chambre en collaboration avec des techniciens et des physiciens m'a appris à travailler en groupe.

Au cours de mon stage, j'ai participé à la vie du groupe DVCS, qui s'apprête à rejoindre la collaboration COMPASS, ainsi qu'à celle de l'autre groupe du SPhN, engagé depuis plusieurs années dans cette expérience et expert de la construction des chambres Micromégas et à dérive. Travailler dans une collaboration aussi dynamique et compétente aura été pour moi une expérience très enrichissante aussi bien sur le plan de la physique nucléaire que sur le plan expérimental. J'ai apprécié de découvrir cet autre aspect de la physique.

Bibliographie

[1] A proposal for a Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy (COMPASS), CERN/SPSLC 1996-14, SPSC/P 297, CERN/SPSLC 1996-30.

[2] Y. Giomataris, Ph. Rebougeard, J.P Robert, G. Charpak, NIM A376 (1996) 23.

D. Thers, *Développement du détecteur gazeux Micromegas pour l'expérience COMPASS*, thèse de l'Université Blaise Pascal a Clermont-Férrand (2001).

[3] H. Pereira Da Costa, *Développement de chambres à dérive pour les hauts flux dans l'expérience COMPASS*, Thèse de l'université de Paris-Sud, UFR scientifique d'Orsay (2001).

[4] <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>

[5] F. Sauli, *Principals of operation of multiwire proportional and drift chambers*, CERN 1977-09.

[6] G. Charpak, R. Bouclier, T Bressani and C. Zupancic, *Nuclear Instruments and Methods*, 62 (1968) 262.

G. Charpak, R. Bouclier, T Bressani and C. Zupancic, *Nuclear Instruments and Methods*, 80 (1970) 13.

Annexe 1 : Le CERN

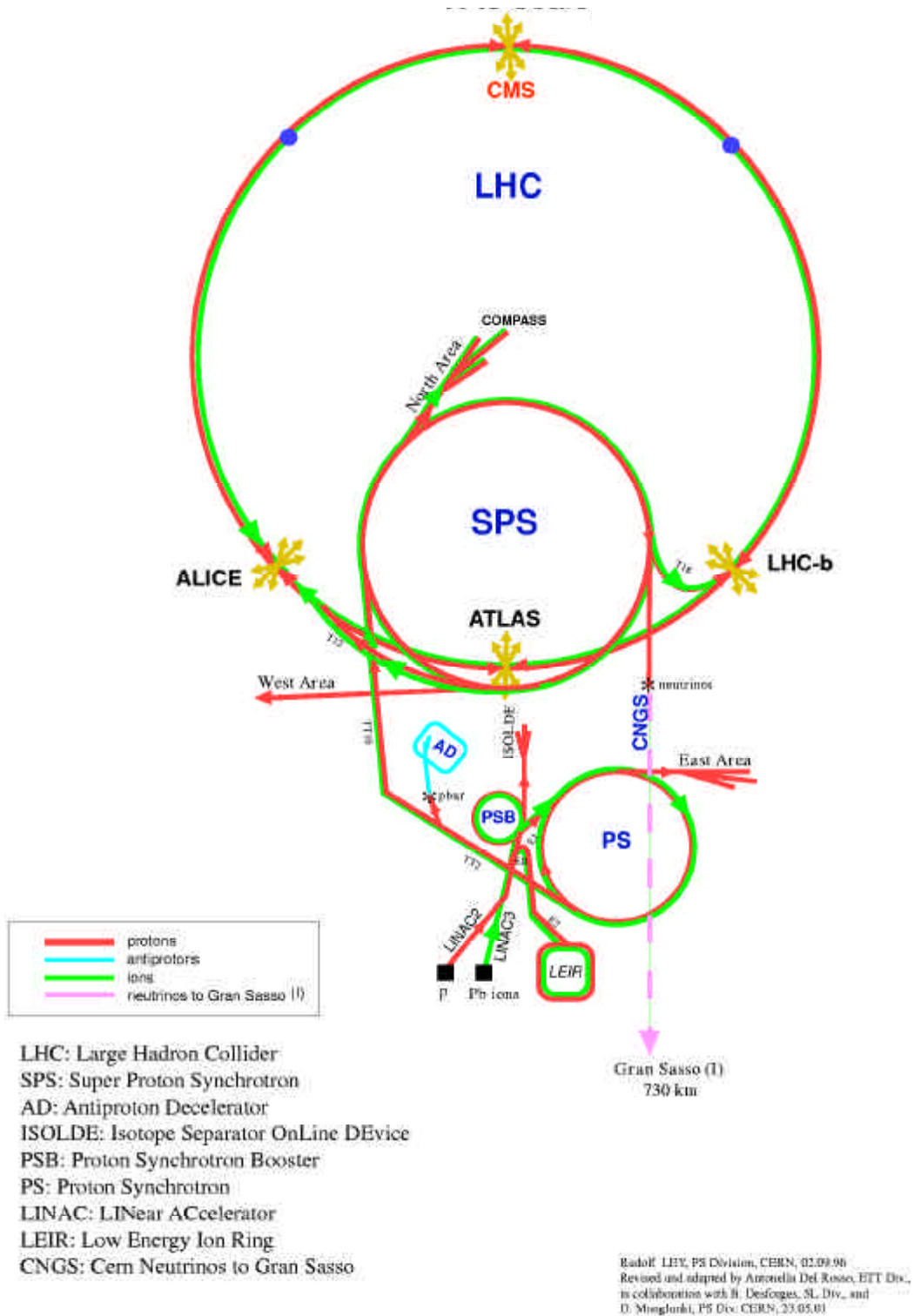


Schéma d'ensemble des accélérateurs et collisionneurs du CERN

Annexe 2 : Détermination de l'impulsion

Lors de son passage dans l'aimant dipolaire SM1, une particule de charge q , de masse m , d'impulsion \vec{P} , est soumise à la force de Lorentz : $\vec{F} = q \frac{\vec{P}}{m} \wedge \vec{B}$ qui courbe sa trajectoire selon une hélice. Le champ magnétique ne transfère pas d'énergie à la particule, aussi son mouvement est uniforme ($\|\vec{P}\|$ reste constant).

Si la vitesse de la particule est perpendiculaire à \vec{B} la trajectoire est un cercle et $qvB = m \frac{V^2}{R} \Leftrightarrow qRBc = Pc$

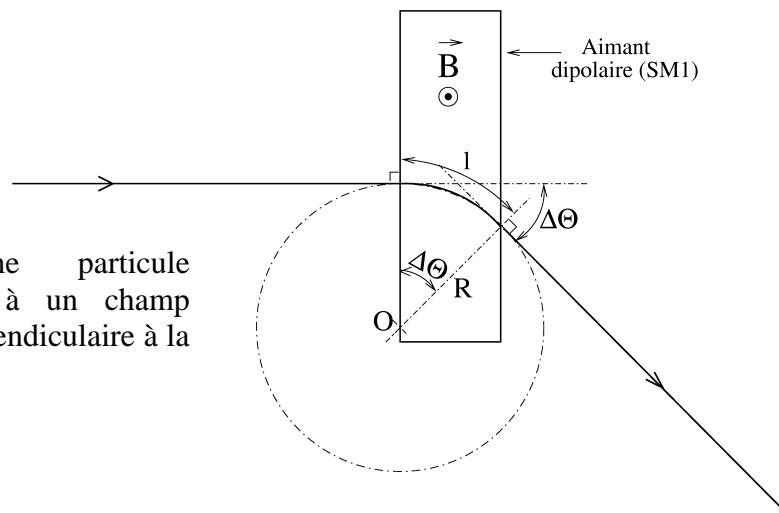
c la vitesse de la lumière. Pc s'exprime en Joule dans le système international mais l'unité utilisée en physique des hautes énergies est le GeV

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$q = n_q \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\boxed{Pc = 0.3 n_q R B} \quad \text{avec } Pc \text{ en GeV, } R \text{ en m, } B \text{ en T et } n_q \text{ est le nombre de charge}$$

Trajectoire d'une particule chargée soumise à un champ magnétique B perpendiculaire à la vitesse.



$$R = \frac{l}{\Delta\theta} \Rightarrow Pc = 0.3 n_q \frac{Bl}{\Delta\theta}$$

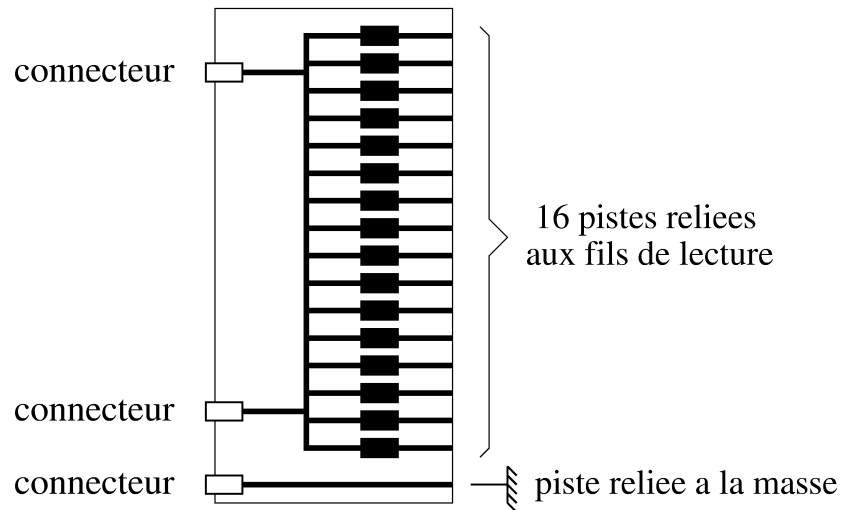
B n'étant pas forcément constant, il faut remplacer $B.l$ par son intégrale le long de la trajectoire et $\Delta\theta$ par l'angle total de déviation. Alors :

$$\boxed{Pc = 0.3 q \frac{\int B \cdot dl}{\Delta\theta}}$$

avec Pc en GeV
 $\Delta\theta$ en radian
 $\int B \cdot dl$ en T.m

Annexe 3 : Schémas des montages électriques

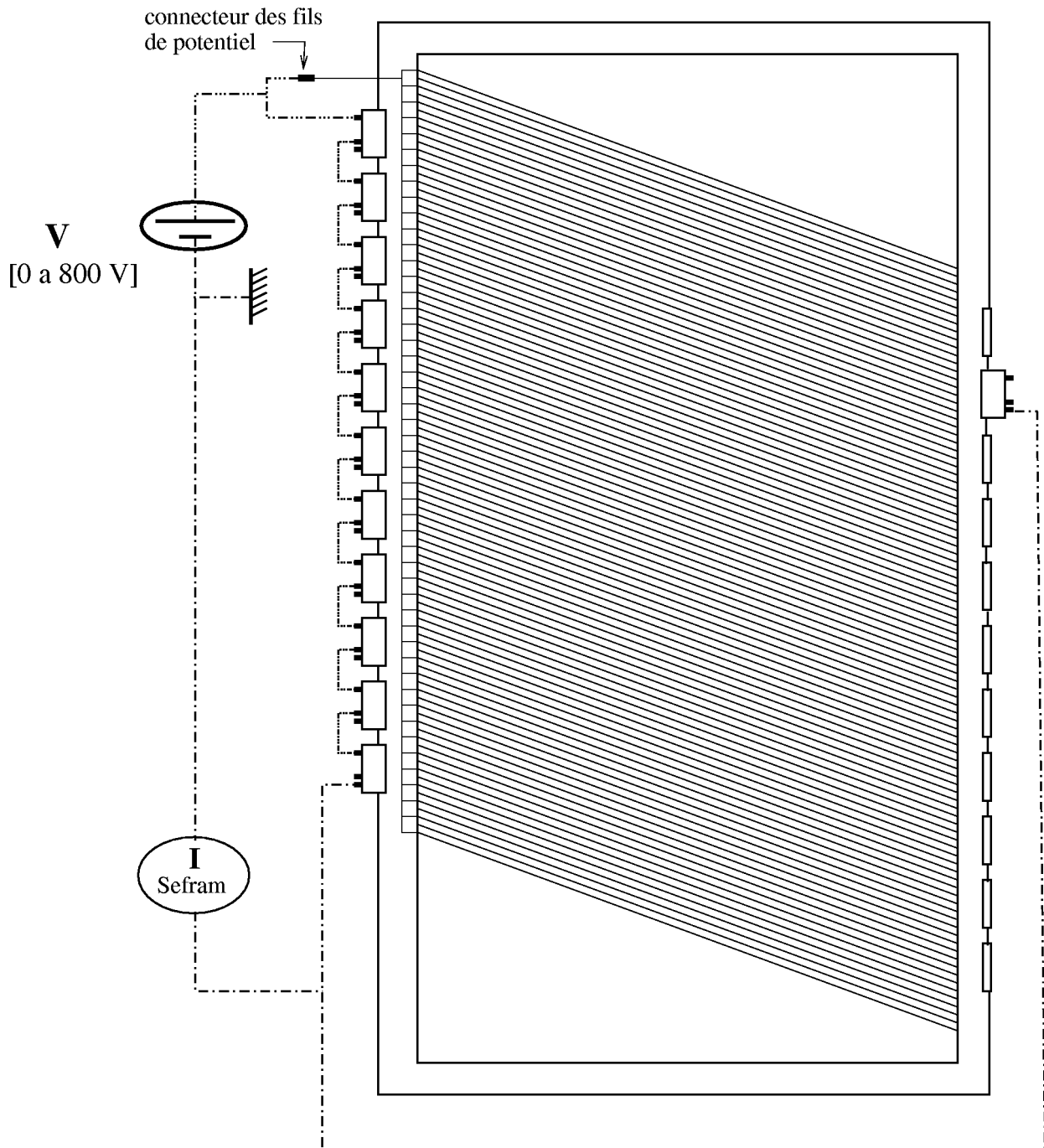
figure a : Carte “test”



Elle sert à connecter entre eux les 16 fils de lecture d'un connecteur de la chambre. Comme on le constate sur le schéma, on peut aisément relier ces fils à la masse avec un “shunt”.

figure b : Test d'isolation fils par rapport à la masse

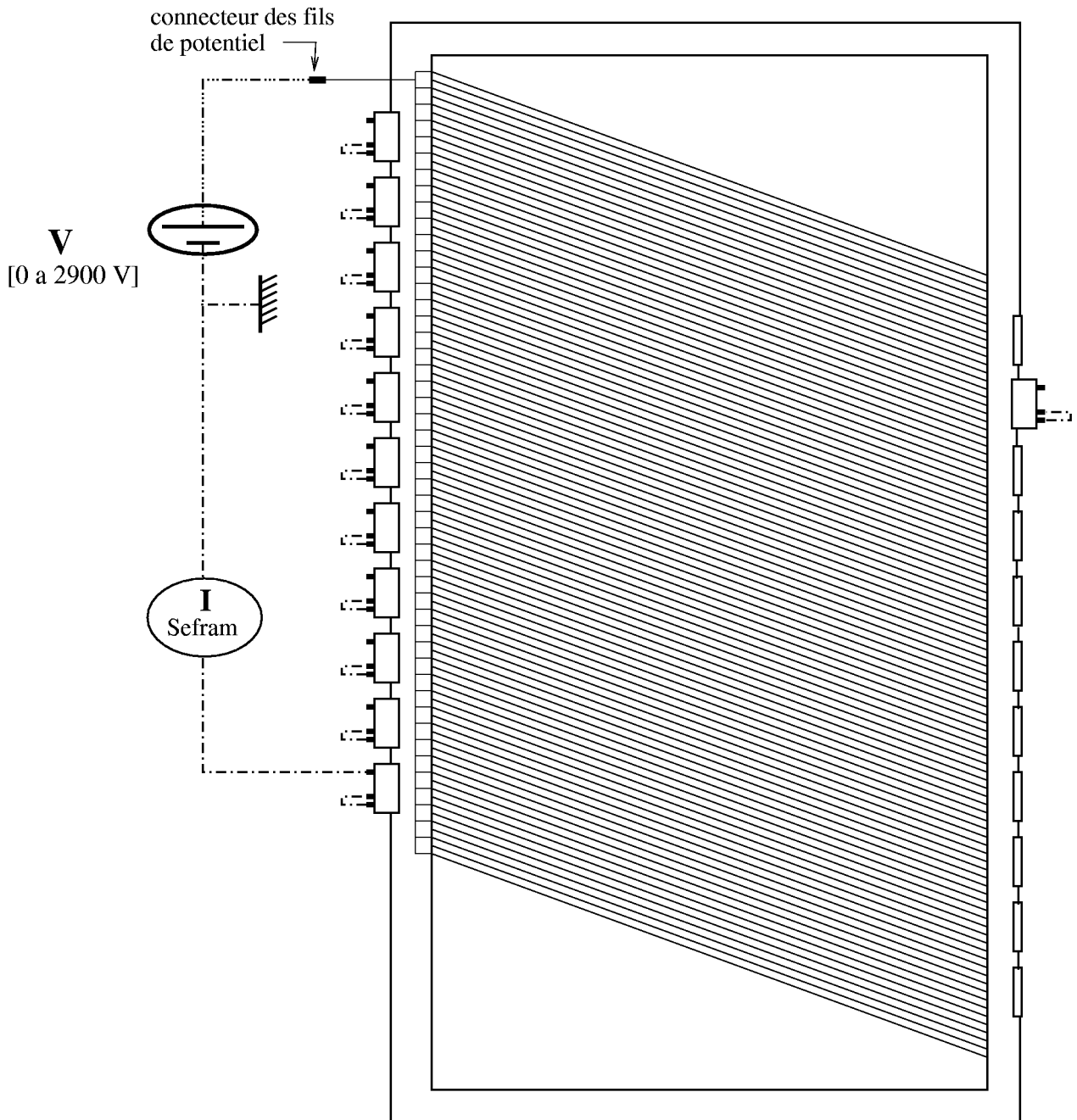
Tous les fils (lecture et potentiel) sont reliés entre eux à l'aide de cartes "test" et sont alimentés par la haute tension. Le courant de fuite est mesuré sur la masse.



Tolérance $I_{\text{fuite}} < 0.5 \mu\text{A}$ à 500 V

figure c : Test d'isolation fils de potentiel/ fils de lecture + masse

Tous les fils de lecture sont reliés à la masse à l'aide des cartes "test" tandis que les fils de potentiel sont alimentés en haute tension. Le courant de fuite sur la masse est mesuré.



Tolérance $I_{\text{fuite}} < 1.5 \mu\text{A}$ à 2800 V

Annexe 4 : Préparation du plan U'

Ce tableau donne la valeur du courant de fuite (μA) entre les fils de potentiel et les fils de lecture reliés à la masse. La chronologie et les observations relatives à l'élaboration de ce plan sont également reportées.

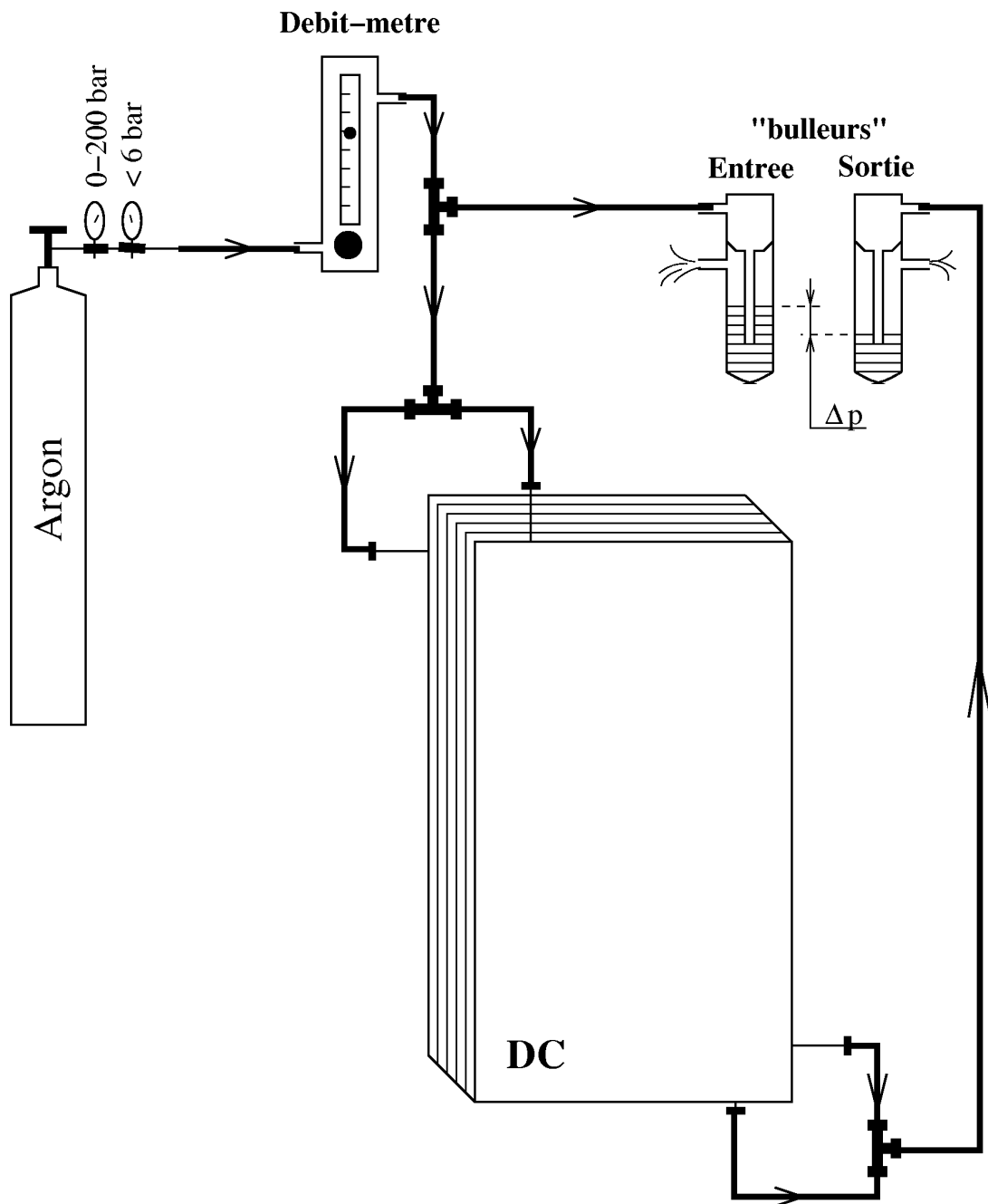
date	heure	observation	Tension (V)								
			2450	2500	2580	2600	2700	2800	2900		
7/05	16h00		3.0 μA								
	17h00		1.8 μA	2.6 μA							
	18h30			1.0 μA		1.8 μA					
	19h00				1.5 μA						
Mise en "cuisson" durant la nuit à 2580 V											
9/05	8h35	I en chute			1.2			6.0			
	8h40						5.0				
	8h50						4.4				
Mise en "cuisson" à 2700 V : réduction du courant de fuite 4.4/0.5=9 en 12h											
13/05	8h30						0.5	4.0			
	9h30							1.0			
	11h00							0.8	4.0		
	15h40								0.52		
	17h45								0.42		
Mise en "cuisson" à 2900 V											
Durant la nuit il y a eu une montée brusque du courant due aux orages											
14/05	8h20	Nettoyage des fils 2 fils cassés et changés							8.4		
	8h50								2.0		
	11h25									2.5	
	13h30									1.2	
	15h00										
	15h15										2.5
	16h30										0.8
18h30									0.48		
"Cuisson" : réduction du courant 2.5/0.48=5 en 3h											

Les valeurs finales du courant de fuite de ce plan sont :

V (V)	500	1000	1500	1800	2000	2300	2500	2900
I (μA)	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	0.19	0.25	0.48

Il ressort du premier tableau qu'il faut environ une semaine de travail par plan de fils pour obtenir les tolérances électriques requises. On a constaté, et au moins à deux reprises sur ce plan, la grande efficacité de la "cuisson". D'autre part nous avons mis en évidence les effets climatiques sur l'évolution du courant de fuite : I croît avec le taux d'humidité et décroît avec la pression.

Annexe 5 : Branchement du gaz



De l'argon est mis en circulation à un débit de l'ordre de 20 l/h que l'on règle en ajustant un débit-mètre à bille. Cette circulation va alimenter d'une part la chambre par deux orifices et d'autre part un "bulleur" d'entrée. Le débit-mètre est réglé en dessous du seuil de formation des bulles dans le "bulleur" d'entrée. Le gaz sortant de la chambre va quant à lui dans un bulleur de sortie. Le rôle des bulleurs est de contrôler que le gaz circule bien en visualisant les bulles qu'il produit dans la solution liquide. De plus ils servent de sécurité afin d'éviter les surpressions dans le circuit : dans ce cas le gaz est évacué dans l'air par l'orifice latéral. Lorsque la circulation de gaz dans la chambre est établie, des bulles apparaissent alors dans le "bulleur" de sortie.