

Optimisation et Reconstruction des trajectoires dans une chambre à étincelles

Thierry GUIZOUARN ¹
Magistère Matériaux de l'université de Rennes I

Juin-Août 1998

Abstract

Partis d'un travail préalable sur une chambre à étincelles, nous avons optimisé les paramètres spécifiques à la chambre; c'est-à-dire les réglages proprement dits et les alimentations des appareils connexes. Afin de compléter ce travail, nous avons élaboré un programme de reconstruction des trajectoires des particules élémentaires dans la chambre. Ce programme a été validé par une simulation informatique. En effet, par manque de matériel, les acquisitions de données n'ont pu être réalisées, ce qui n'a pas permis de faire la vérification physique.

responsable de stage : professeur François CORRIVEAU

*Physics Department
McGill University
3600 University, Montreal, Canada*

¹guizou-e@ens.univ-rennes1.fr
juin-août 1998

Contents

1	Introduction	3
I	Optimisation de la chambre à étincelles	4
2	Principe	4
2.1	Les détecteurs	4
2.2	Le système logique et le circuit électrique	4
3	Optimisation, voltages et espacements	5
3.1	Étapes d'optimisation de la chambre à étincelles	6
3.1.1	Réglage de la coïncidence	6
3.1.2	Réglage de l'amplificateur	6
3.1.3	Réglages du spark gap	8
3.2	Tests	8
3.3	Débit du gaz	9
3.4	Branchement et alimentation	9
II	Programme de reconstruction	9
4	Objectif et principe	11
4.1	Logique du programme	11
4.2	Incertitude moyenne sur les résultats du programme de reconstruction	13
4.3	Analyse de l'histogramme	13
5	Annexe	15
6	Photographie	17
7	Bilan du stage	17

1 Introduction

Inventée dans les années 50 pour l'étude des particules fondamentales et exploitée pendant de nombreuses années [1], la chambre à étincelles perdit progressivement de son intérêt et ce au profit de nouvelles technologies toujours mieux adaptées.

Le département de physique par le biais du centre d'études sur la physique des hautes énergies de l'université de McGill (Québec) lança le projet de reconstruction d'une chambre à étincelles afin d'en faire un appareil de démonstration pour le grand public (portes ouvertes, forum, visites et un outil de correction pratique pour les étudiants). Ce projet occupa quelques étudiants, lors de stages d'étude, dans le but de parfaire leurs connaissances en physique.

À mon arrivée, le montage expérimental de la chambre à étincelles était déjà conçu. Ma tâche a été alors d'optimiser les paramètres principaux de la chambre. Puis dans un second temps, il m'a fallu réaliser un programme informatique capable de reconstruire la trajectoire d'une particule traversant la chambre à étincelles.

Il m'a été demandé de faire un rapport didactique afin que les futurs étudiants puissent facilement mener les phases de réglages. C'est pourquoi vous trouverez de nombreux détails techniques.

Part I

Optimisation de la chambre à étincelles

2 Principe

Comme son nom l'indique, la chambre à étincelles permet de visualiser la trajectoire d'une particule fondamentale par une succession d'étincelles entre plusieurs plaques d'aluminium. Ces plaques de $60\text{cm} \times 25\text{cm}$ sont disposées parallèlement l'une sur l'autre dans une boîte où circule un courant d'hélium (gaz diélectrique). Une différence de potentiel (ddp) de 12 kV est appliquée entre chaque paire de plaques (*cf figure 1*). La particule incidente ionise l'hélium $He \rightarrow He^+ + e^-$ puis les électrons, par effet de la ddp, dérivent vers les plaques cathodes et les ions positifs vers les plaques anodes. Cette accumulation rapide d'électrons est à l'origine de l'étincelle. Cependant on ne peut pas laisser continuellement une ddp de 12 kV entre les plaques car d'une part c'est dangereux et d'autre part des étincelles parasites apparaîtraient constamment et rendraient ainsi très difficile la lecture des trajectoires. L'idée est venue alors de placer 2 détecteurs scintillants, de part et d'autre de la boîte, afin de couvrir toute la surface des plaques et de déclencher la ddp au passage d'une particule au sein de la chambre. La particule ne sera donc visible que dans la zone délimitée par les 2 détecteurs (*cf figure 1*).

Description de l'appareillage

2.1 Les détecteurs

Les détecteurs sont en fait constitués d'un ensemble scintillateur-photomultiplicateur. Le scintillateur est un plastique très mince qui contient des molécules capables d'être excitées par une particule incidente. Le retour de ces molécules à leur état non-excité provoque l'émission d'un photon. Celui-ci est acheminé, par une succession de réflexions internes, dans le scintillateur et dans un guide de lumière également en plastique (mais non scintillant), jusqu'à la photocathode d'un photomultiplicateur. Le photon incident y produit des photoélectrons. Le nombre d'électrons est multiplié au cours de leur passage dans le photomultiplicateur, pour donner finalement un signal électrique amplifié et détectable. Ce signal électrique est alors transmis au système logique du montage.

2.2 Le système logique et le circuit électrique

Chaque détecteur, au passage d'une particule, induit donc un signal électrique au *discriminateur* (voir annexe) qui le transforme en un signal "cran" jusqu'à une porte logique ET. Si les 2 détecteurs induisent "simultanément" un signal électrique, la porte logique ET le

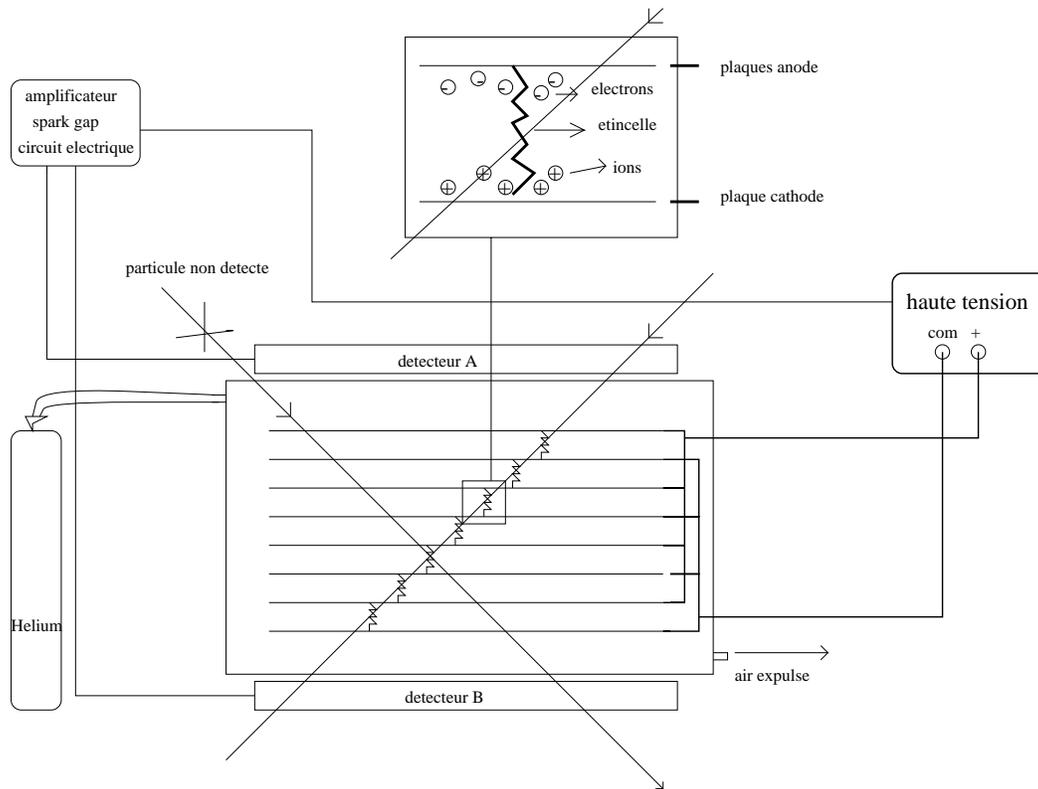


Figure 1: principe de fonctionnement

transformera en un 1-logique appelé *coincidence*. Ce signal de coincidence, synonyme d'un passage d'une particule dans la chambre, est amplifié par un *amplificateur* (voir annexe) et va provoquer la décharge rapide d'un gros condensateur, le *spark gap* (voir annexe), au sein des plaques. Bien entendu le laps de temps que prend cette opération (entre la détection de la particule et la décharge de la tension) reste négligable par rapport au temps que mettent les électrons et les ions pour se dissiper où se recombiner dans l'hélium.

3 Optimisation, voltages et espacements

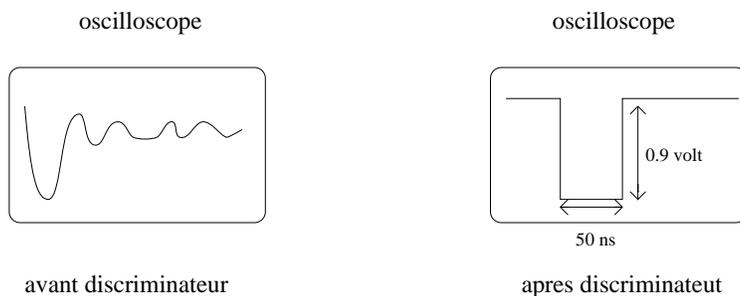
La première partie de mon travail a consisté à remettre en fonction le prototype d'étude qui avait déjà été construit et testé l'année précédente. J'ai donc refait toute la procédure de mise en marche étape par étape pour bien comprendre et analyser toutes les fonctions de chaque appareil. J'ai ensuite effectué quelques tests en modulant l'alimentation et l'espacement des électrodes sur l'amplificateur et le "spark gap" afin d'optimiser l'appareil. Il me fallait donc refaire ces tests sur le modèle final qui n'avait fonctionné qu'une seule fois avec une alimentation sur l'amplificateur de 9800 Volts et sur le "spark gap" de 14700 Volts. Réduire ces tensions était nécessaire pour éviter la détérioration du matériel.

3.1 Étapes d'optimisation de la chambre à étincelles

3.1.1 Réglage de la coïncidence

On alimente les 2 scintillateurs avec une tension de 1800 Volts puis on les branche sur l'entrée de 2 discriminateurs afin d'obtenir sur l'oscilloscope 2 signaux "cran" d'amplitude 0.9 Volts et de largeur 50 ns (pour cela il faut jouer avec les vis *threshold et width*) cf figure 2.

Les 2 sorties des discriminateurs sont branchées à l'entrée de l'unité logique cf figure 3. Il faut que ces 2 signaux soient identiques pour obtenir une coïncidence à la sortie de la porte logique ET. La fréquence de ces coïncidences est bien entendu variable suivant la surface des scintillateurs et de leur espacement. Pour se donner une idée, une main placée à l'horizontal est traversée par environ 3 particules élémentaires détectables chaque seconde.



threshold: réglage du taux de seuil ici 30mV
width: réglage de la largeur, ici 50ns(l'ordre de grandeur de la formation des étincelles)

Figure 2: aperçu des signaux avant et après le discriminateur

3.1.2 Réglage de l'amplificateur

En premier lieu il faut s'assurer qu'une coïncidence induit une étincelle dans l'amplificateur pour une tension et un espacement choisis. Si cela n'est pas le cas, il faut revoir le réglage des coïncidences. On aura besoin, pour la suite, de travailler avec le "spark gap" pour vérifier si la tension de sortie de l'amplificateur est suffisante pour induire une étincelle aux électrodes du "spark gap". En augmentant l'espacement entre les électrodes de l'amplificateur on augmente aussi la tension de sortie. Néanmoins cette opération nécessite une alimentation plus élevée sur l'amplificateur. C'est donc un travail par tâtonnement où beaucoup de tests sont nécessaires pour obtenir des paramètres optimaux cf figure 4

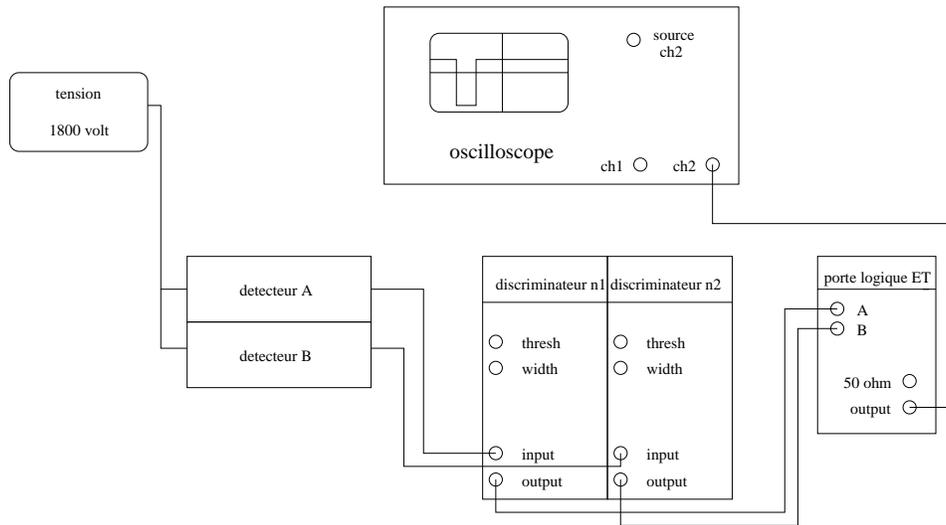


Figure 3: montage final

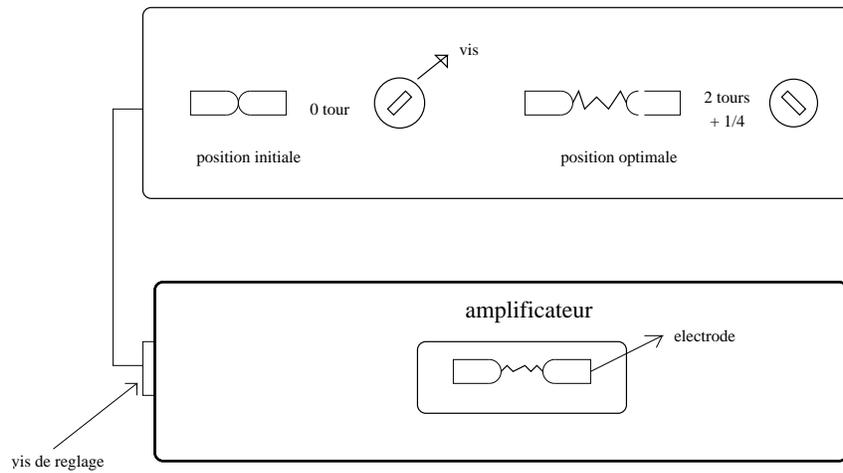


Figure 4: réglage de l'espace des électrodes dans l'amplificateur

3.1.3 Réglages du spark gap

Les réglages du "spark gap" dépendent donc des réglages de l'amplificateur et suivent la même logique. Mais cette fois-ci, il y a un autre paramètre à prendre en ligne de compte: la chambre à étincelles. La tension fournie par le "spark gap" doit suffire pour engendrer des étincelles entre les plaques d'aluminium et obtenir, pour chaque coïncidence, une trajectoire. Trois électrodes sont à régler dont 2 (électrodes face à face) doivent rester symétriques par rapport à la troisième *cf figure 5*

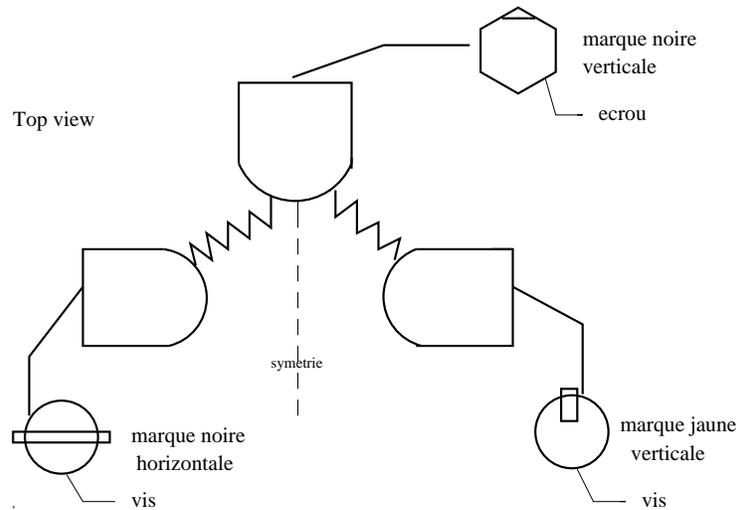


Figure 5: réglage de l'espace des électrodes dans le spark gap

3.2 Tests

Après avoir réglé convenablement l'amplificateur et le "spark gap", j'ai procédé à quelques tests sur les alimentations des 2 appareils *cf tableau*

Conclusion: Ces tests s'avèrent concluants au niveau du rendement (coïncidences et trajectoires visibles): environ 80%. Le bon compromis en tension est de 6600 Volts sur l'amplificateur et de 12000 Volts sur le "spark gap". On a une moyenne de 30 coïncidences par minute mais on observe un certain pourcentage de mauvaises étincelles. Certaines sont localisées sur les coins anguleux des plaques où une accumulation de charges provoque à certains moments des étincelles parasites. D'autres étincelles sont produites par l'humidité résidente dans la boîte localisées surtout sur les bords des plaques. Enfin la poussière déposée sur les plaques peut aussi créer des étincelles. Pour obtenir un meilleur rendement il faudrait minimiser ces paramètres en installant un "assécheur" d'air, en arrondissant un peu plus les coins et en ayant une boîte totalement hermétique pour éviter toute pénétration de poussière.

HV amplificateur HV spark gap (en Volt)	nombre de coincidences par minute	étincelles seulement dans l'amplificateur (sur 100)	mauvaises étincelles dans la chambre (sur 100)	bonnes étincelles (trajectoire) (sur 100)
6600 11400	26	11	11	78
6600 12000	25	8	12	80
6600 12500	28	7	14	79
6800 11400	33	39	9	52
6800 12000	34	15	12	73
6800 12400	30	3	13	84

Table 1: tableau de tests sur les alimentations

3.3 Débit du gaz

Théoriquement la chambre à étincelles pourrait fonctionner avec de l'air ambiant mais les tensions appliquées seraient beaucoup trop élevées pour l'appareillage. De plus l'air n'est pas un gaz diélectrique parfait (*présence de molécules d'eau polarisés et autres particules chargées*) et cela provoquerait un certain nombre d'étincelles parasites. L'hélium convient très bien à cette expérience pour son faible coût et ses propriétés diélectriques [1]. Ce gaz étant très léger, il faut attendre un minimum de 3/4 d'heure de débit avec le "flowmeter" indiquant le maximum pour chasser tout l'air du fond de la chambre et y maintenir, par la suite, une légère surpression.

3.4 Branchement et alimentation

Le schéma de branchement (*cf figure 6*) est réalisé avec les alimentations que j'ai jugées optimales. Ce schéma n'inclut pas les branchements des appareils sur les prises de 110 Volts. A noter que les gros cables noirs (*notés 1 et 2 sur la figure 6*) sont dotés de connecteurs pour faciliter l'échange de la petite chambre *prototype* avec la grande. Pour plus de détails concernant les différents appareils *voir annexe*.

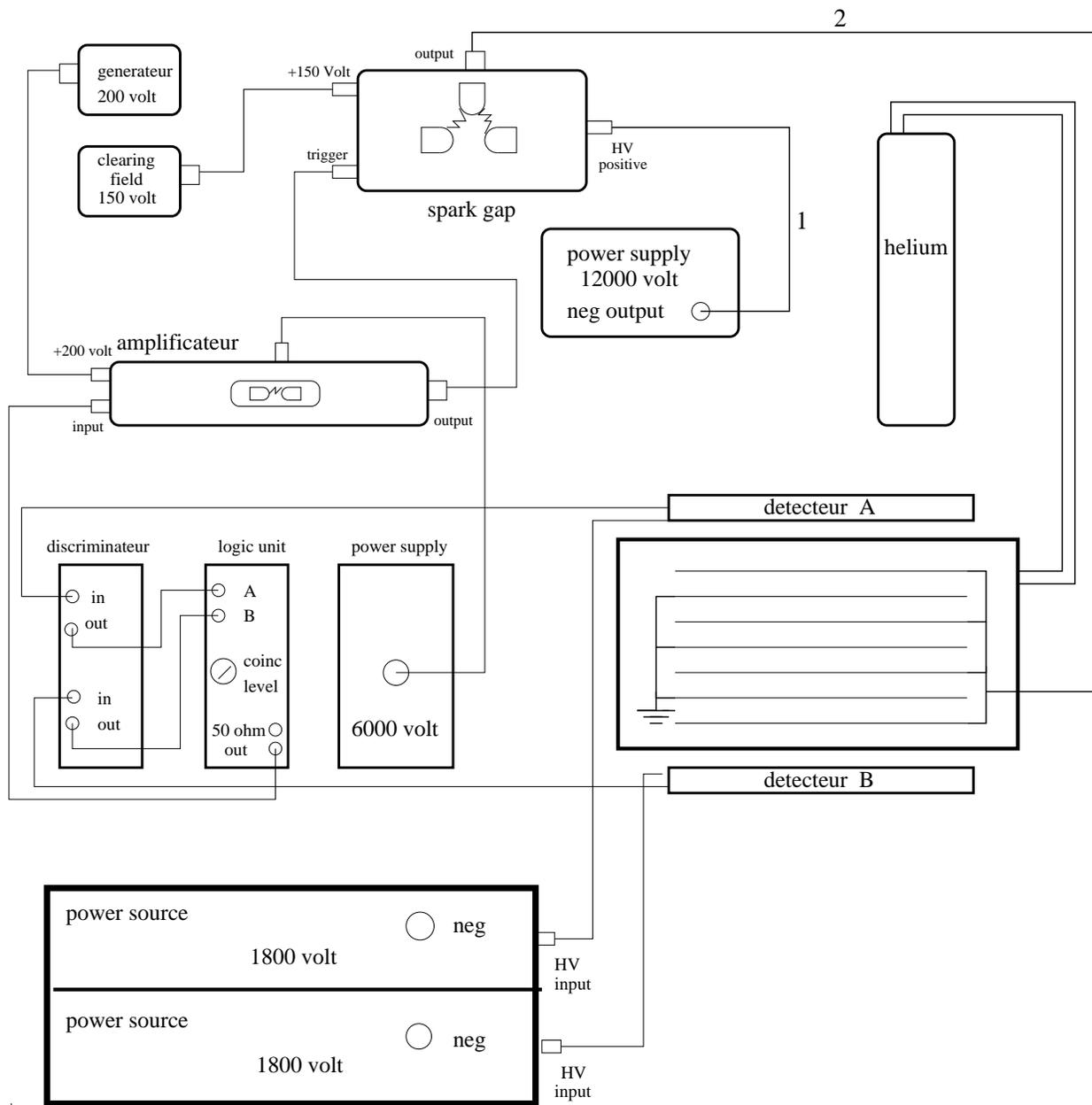


Figure 6: schéma général des branchements et des tensions de la chambre à étincelles

Part II

Programme de reconstruction

4 Objectif et principe

L'objectif de la seconde partie de mon étude, a été de reconstruire les trajectoires des particules sur ordinateur. Placés aux bords des plaques, des microphones piezoélectriques détectent le bruit des étincelles transmis à travers le gaz et envoient l'information à un programme de reconstruction. Celui-ci analyse les données et permet d'obtenir sur un écran la trajectoire de la particule étudiée. Mon travail a consisté à programmer, grâce au langage FORTRAN, la reconstruction des étincelles à partir d'un programme de simulation. Par manque de temps et ne disposant pas encore des microphones, je n'ai pu tester mon programme informatique sur le montage expérimental.

4.1 Logique du programme

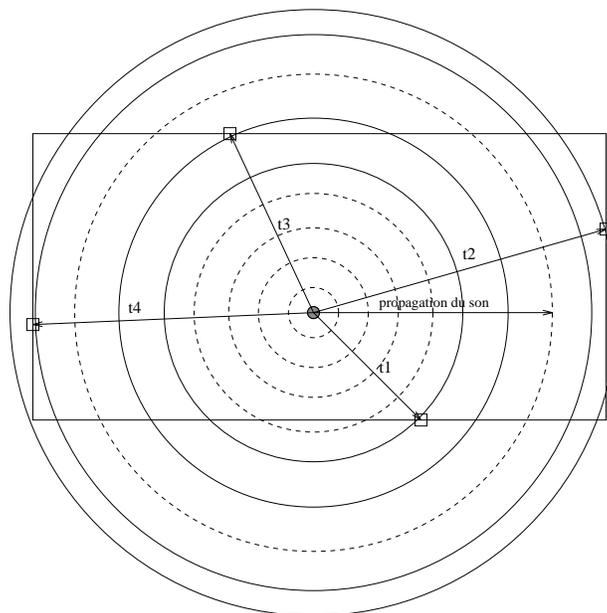


Figure 7: propagation du son de l'étincelle jusqu'aux microphones

Si la chambre est dotée de 8 microphones [2]: 4 sur une plaque du dessus et 4 sur une plaque du dessous, le programme consistera alors à calculer les coordonnées du point d'intersection des 4 cercles (*cf figure 8*). Cette opération est répétée 2 fois: pour la première plaque et la seconde, afin d'obtenir un couple de coordonnées nécessaire au tracé d'une trajectoire.

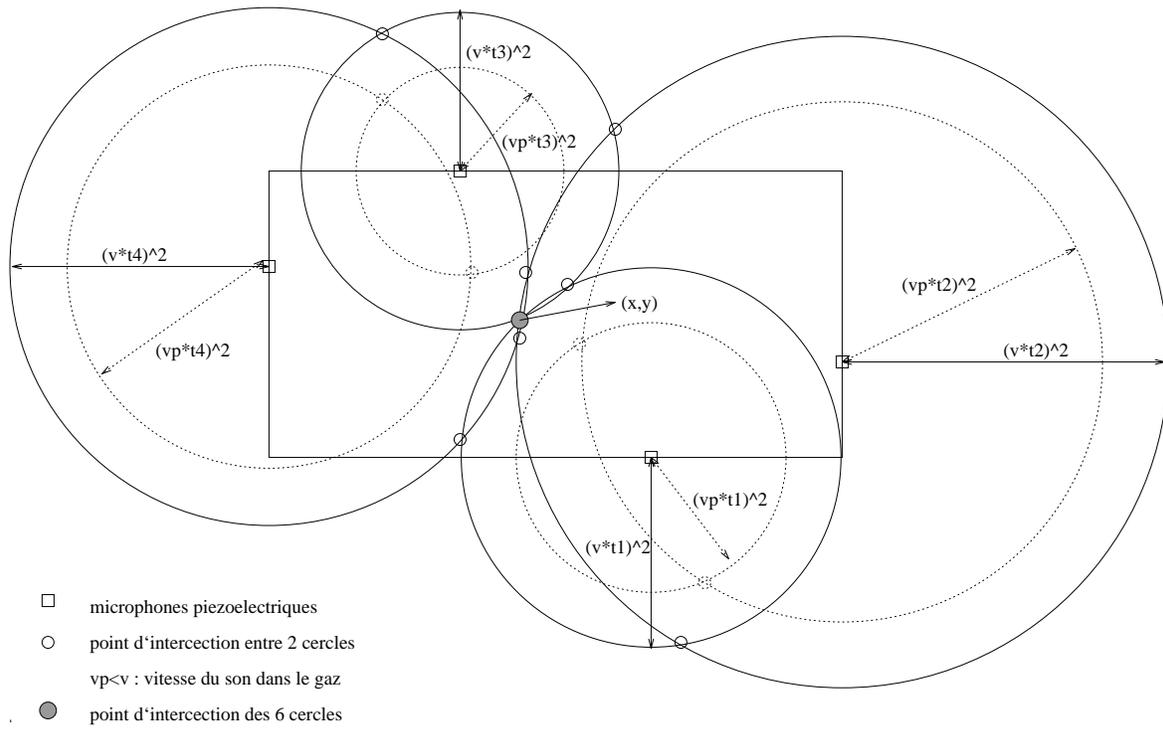


Figure 8: représentation mathématique de la figure 7

L'étincelle produit une onde sonore qui se propage d'une manière isotrope dans l'espace. Suivant la position de la décharge, l'onde sera captée à des temps différents sur les 8 microphones piézoélectriques ou électrostatiques [3] *cf figure 7*. Le programme consiste alors à comparer t_1-t_4 puis à réitérer l'opération par simple permutation des indices-temps. Cela revient à calculer les solutions mathématiques donnés par l'intersection de 2 cercles. Ensuite le programme compare l'ensemble des solutions obtenues et ne retient que les valeurs proches à ϵ près, où ϵ est une incertitude de l'ordre de 10^{-6} . Ne connaissant pas la précision des microphones, on balayera différentes valeurs pour epsilon jusqu'à obtenir un nombre satisfaisant de solutions. Nous allons également balayer différentes valeurs pour la vitesse du son dans l'hélium car sa valeur peut varier en fonction de différents paramètres tels que la température, la pression, le taux de pureté du gaz etc..

Une première procédure notée "position" calcule toutes les solutions mathématiques possibles issues de l'intersection de 2 cercles et ce pour chaque couple de microphones (*cf schéma 2.2*). Elle les stocke dans les vecteurs "xf" et "yf". Les 2 autres procédures "approx" et "approxxy" comparent toutes les solutions stockées dans ces vecteurs et ne retiennent que celles qui sont identiques à epsilon près.

4.2 Incertitude moyenne sur les résultats du programme de reconstruction

Pour obtenir une moyenne significative sur les incertitudes des résultats, nous avons stocké 50 coordonnées, prises de manière aléatoire par le programme "simulation.f", dans un fichier *fort.15*. Ensuite on a positionné différemment les 4 microphones sur les plaques supérieures et inférieures (*fort.82* dans le programme de reconstruction).

Toutes ces coordonnées sont transformées en temps par le programme "transformation" qui fournit plusieurs précisions allant de 10^{-6} à 10^{-3} secondes. Ces temps sont injectés dans le fichier "fort.83" du programme de reconstruction qui les analyse et les retransforme en coordonnées avec leurs incertitudes. Enfin le programme "précision" et "graphique" font une moyenne de ces incertitudes sur un histogramme logarithmique *cf figure 9*

4.3 Analyse de l'histogramme

En augmentant la précision des microphones, l'erreur relative moyenne diminue. Nous ne considérerons un résultat comme fiable que lorsque son erreur relative moyenne ne dépassera pas 1% ce qui correspond à une précision des microphones inférieure à 10^{-4} secondes [3].

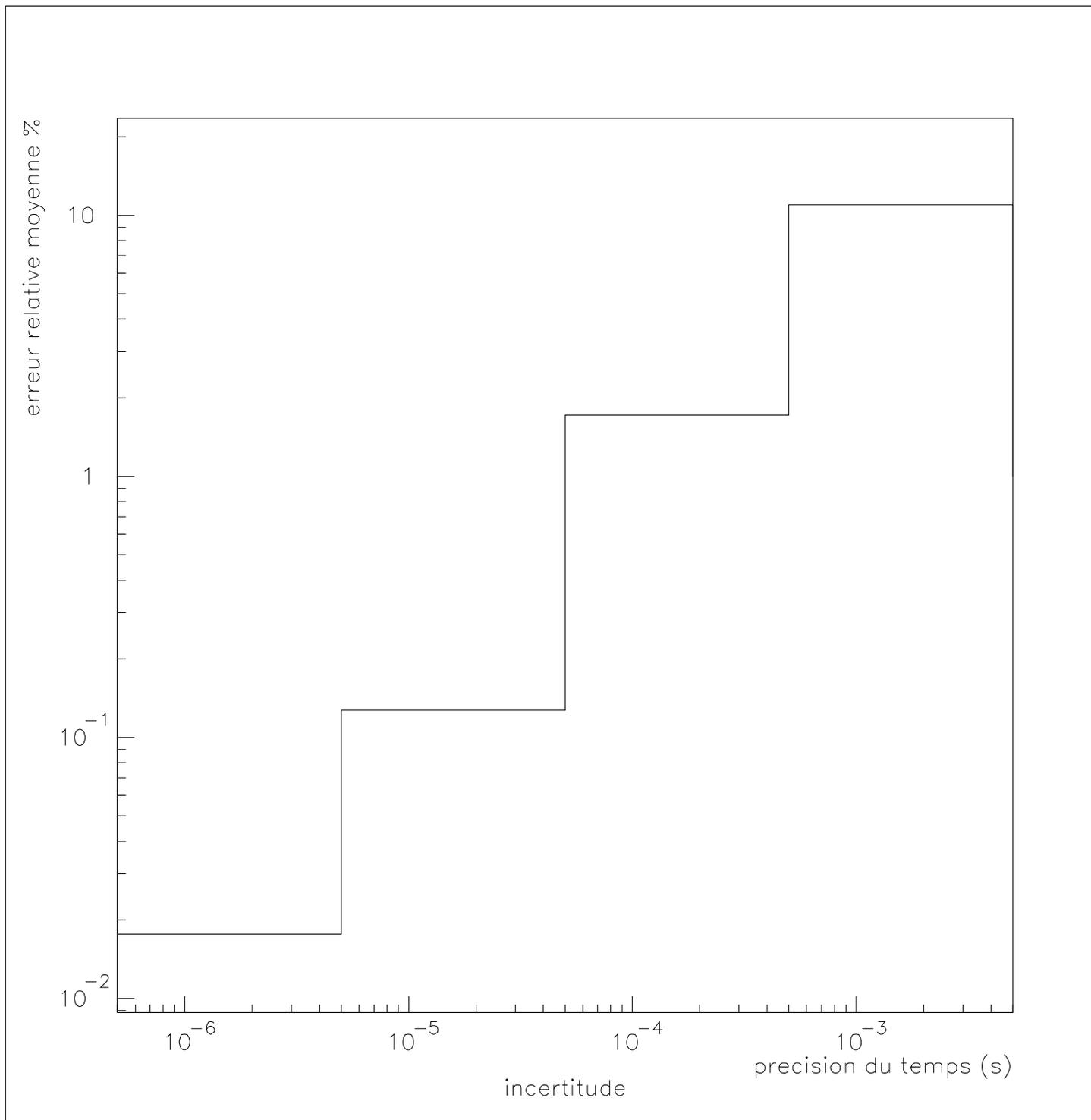


Figure 9: histogramme sur les incertitudes des résultats du programme de reconstruction

5 Annexe

Générateur haute tension (15000 Volts)

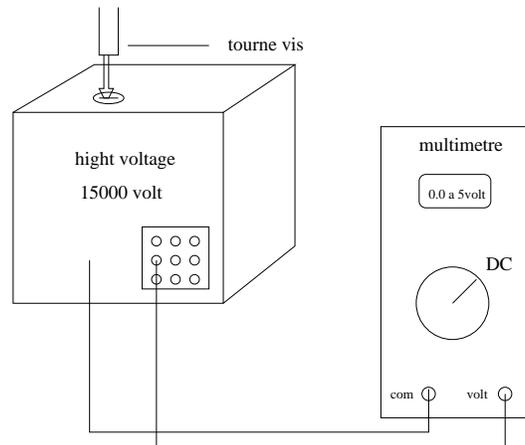


Figure 10: lecture de la tension sur le générateur

Pour connaître la tension délivrée par le générateur, il suffit juste de tourner une petite vis sur l'appareil et de brancher un multimètre comme le montre le schéma 7. Le multimètre indiquera 1 Volt pour 3000 Volts délivrés par le générateur. Il y a quelques précautions à prendre dans la manipulation:

-Il faut toujours remettre à 0 Volt le générateur avant toute manipulation des autres appareils et avant de le débrancher car ceci pourrait endommager tout le circuit électrique en le rebranchant avec une telle tension.

-Eviter de monter la tension au delà de 14000 Volts pendant trop longtemps.

Discriminateur

Il permet de transmettre un signal constant en amplitude et en largeur chaque fois qu'il reçoit une impulsion électrique supérieure à celle fixée par le seuil: 30mV

Amplificateur

L'amplificateur transmet un signal de haute tension au "spark gap" dès qu'il reçoit un signal logique. On peut faire varier la tension du signal soit en jouant sur la distance entre les 2 électrodes visibles de l'appareil soit sur l'alimentation 5000→8000Volts.

Spark gap

Il est composé essentiellement de 3 électrodes et de plusieurs capacités dont une grosse de 6800pF alimentée par une haute tension de 12000 Volts. Le signal électrique provenant de l'amplificateur induit une étincelle entre l'électrode reliée au signal et l'électrode reliée à la terre. Une seconde étincelle est alors induite entre l'électrode reliée au signal et la troisième reliée à la capacité de 6800pF. Celle-ci chargée par la tension de 12000 Volts se décharge rapidement dans les plaques.

Clearing field

Le principe du "clearing field" est de dissiper toutes les particules chargées dans les plaques après l'étincelle. Pour cela on applique une tension d'une centaine de Volts entre 2 plaques consécutives. Cette tension étant opposée à la haute tension délivrée par le "spark gap", les particules chargées résiduelles proches des plaques sont alors absorbées.

6 Photographie

Photographie d'une succession d'étincelles entre les plaques de la chambre dessinant la trajectoire d'une particule élémentaire *cf photographie*

7 Bilan du stage

Durant 2 mois j'ai pu me familiariser avec le monde de la recherche en physique expérimentale et apprécier tout ce qu'elle m'a apporté en matière de connaissances extra-scolaires.

“Patience et Persévérance” voici les maîtres-mots d'un stage alternant surprises et déconvenues où tout n'est jamais acquis. Il faut sans cesse s'enrichir de nouvelles connaissances, à première vue sans relation directe avec le sujet, pour venir à bout d'un problème.

J'ai pu aussi me réconcilier avec l'informatique que j'avais longtemps “boudée”. Bien que réticent à “UNIX” et “LATEX” j'ai été convaincu de leur efficacité grâce à François, aidé par Nadim, Justin, et Patrick depuis la Bretagne(!).

Reprendre des travaux en cours sur le détecteur n'a pas été chose facile au début mais après avoir réussi à “dompter” les appareils je me suis adonné à un exercice des plus appréciables en matière de physique: les manipulations et les tests.

References

- [1] H. S. W. Massey and Keith A. Brueckner, "Bubble and spark chambers" chap 6, par R.P.Shutt, Academic Press, NY 1967.
- [2] C. Djokić, L. M. C. Dutton, R. J. W. Howells, J. D. Jafar, H. B. Van Der Raay, D. G. Ryan and J. A. Stiegelmaier, "A data handling system for sonic spark chambers", Department of physique, University of Birmingham, England, 1967.
- [3] B. D. Jones, J.Malos, W. Galbraith and G. Manning, "Nucl. Inst. and Meths.,29, 115 (1964).

Remerciements

Je voudrais remercier tout particulièrement mon responsable de stage le professeur François CORRIVEAU du groupe des hautes énergies au département de physique de l'université de McGill. Il m'a tout d'abord permis de traverser l'atlantique, en solutionnant de nombreux problèmes administratifs et internes. En outre il s'est montré d'une grande disponibilité et d'une infinie patience quand il s'est agit du stageproprement dit.

Merci également à Nadim et Justin qui se sont avérés très convaincants dansleurs roles de professeurs en informatique.

Je terminerai par les Bretons : Gilles, Marie et Patrick qui m'ont offert leur aide et leur compagnie via internet.