



# Analyse de la solution multipiste dans le cadre du projet FAZIA

E. Chevallier

► **To cite this version:**

E. Chevallier. Analyse de la solution multipiste dans le cadre du projet FAZIA. Instrumentation and Detectors [physics.ins-det]. 2007. <in2p3-00188081>

**HAL Id: in2p3-00188081**

**<http://hal.in2p3.fr/in2p3-00188081>**

Submitted on 15 Nov 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**GANIL R 07 01**

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**

CENTRE REGIONAL ASSOCIE DE BASSE NORMANDIE

---

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR C.N.A.M.

en

**Instrumentation - Mesure**

par

Eric CHEVALLIER

---

**Analyse de la solution multipiste dans le cadre du  
projet FAZIA**

Soutenu le 25 avril 2007

---

**JURY**

PRESIDENT: M. Juncar

MEMBRES: M. Dujardin  
M. Cahan  
M. Chbihi  
Mme Manduci  
Mme Lavergne

*A ma famille, à mes amis*

# Remerciements

*Je tiens avant tout à remercier :*

*Monsieur Rémi Anne, responsable du secteur de la physique, de m'avoir intégré dans le groupe des aires expérimentales depuis déjà deux ans. Le domaine des détecteurs de particules est nouveau pour moi. C'est un enrichissement personnel au quotidien. Un grand merci pour m'avoir permis de concrétiser ma formation d'ingénieur C.N.A.M.*

*Monsieur Yvon Georget, responsable du groupe des aires expérimentales, de m'avoir soutenu et encouragé pendant ces derniers mois. Je le remercie pour tous les moyens qu'il a mis à ma disposition. Cet environnement favorable a grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.*

*Monsieur Bruno Cahan, qui en tant que maître de stage de ce mémoire, a su m'aiguiller tout au long de ce projet. Je le remercie pour sa disponibilité et son encouragement.*

*Monsieur Abdelouahad Chbihi, physicien et responsable du prototype silicium multipiste dans le cadre du projet FAZIA, pour m'avoir confié cette étude. Je le remercie aussi pour les heures d'écoute et de conseil qu'il m'a accordées.*

*Madame Laurence Lavergne, responsable du groupe détecteur à l'IPN d'Orsay, pour m'avoir apporté un réel soutien pendant de nombreux mois.*

*Madame Manduci Lorendana, professeur au C.N.A.M., enseignante à l'école des applications militaire de l'énergie atomique (E.A.M.E.A.), pour la qualité de son enseignement et pour son aide précieuse pendant la réalisation de ce mémoire.*

*Professeur Juncar, responsable de la filière instrumentation au niveau national, pour avoir accepté de présider le jury de mon mémoire de fin d'étude.*

*Les membres de ce jury messieurs Abdelouahad Chbihi, Bruno Cahan, Philippe Dujardin, madame Laurence Lavergne et madame Manduci Lorendana pour leurs lectures approfondies du document et pour leurs corrections.*

*Monsieur Philippe Dujardin, responsable de la filière instrumentation mesure du C.N.A.M. de Basse Normandie, pour m'avoir orienté, conseillé et enseigné la rigueur nécessaire à tout ingénieur. J'espère faire honneur à cet enseignement en l'appliquant tout au long de ma vie professionnelle.*

*Mes collègues du groupe des aires expérimentales pour m'avoir aidé et encouragé au quotidien dans ce travail de longue haleine.*

---

*Messieurs Luc Perrot et Jean-Louis Ciffre pour leurs précieux conseils pendant la rédaction de ce mémoire.*

*Messieurs Charles Spitaëls, Patrice Bourgault, Patrice Gangnant, Bertrand Jacquot, John Frankland, Emmanuel Rauly, Jean-Marc Gautier, Laurent Olivier, Bruno Raine, Charles Houarner, Hervé Munoz, Philippe Galardo, Jacques Denoyer, François Legruel, Anquetil Patrice, Jean-Michel Litoux, Maël Carrée pour leurs expertises techniques qui se sont révélées une aide indispensable.*

*Mes filles, Pauline et Lisa, pour avoir patienté pendant mes absences, et pour ne pas m'avoir tenu rigueur du côté moins « joueur » de ces derniers mois.*

*Mon épouse, Valérie, pour avoir également fait preuve de patience, de courage et de compréhension pendant ces 5 années de C.N.A.M. Son soutien au quotidien m'a donné la force et la motivation d'aboutir.*

# Table des matières

<b>PRE, MBULE .....</b>	<b>7</b>
<b>CH, PITRE I : PRESENT, TION GENER, LE .....</b>	<b>10</b>
I.1) Le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds .....	11
I.1.1) Historique .....	11
I.1.2) Missions .....	11
I.1.3) La production du faisceau .....	12
I.1.3.1) Les faisceaux stables .....	12
I.1.3.2) Les faisceaux radioactifs .....	13
I.1.4) Les salles d'expériences .....	13
I.2) Le multidétecteur INDRA .....	15
I.3) Le projet international FAZIA .....	19
I.3.1) Présentation .....	19
I.3.2) Objectif du projet international .....	22
I.3.3) Définition des 3 critères d'amélioration du multidétecteur .....	23
I.3.3.1) L'efficacité géométrique .....	23
I.3.3.2) La granularité .....	23
I.3.3.3) La résolution angulaire .....	26
I.3.4) Cahier des charges du multidétecteur FAZIA .....	27
I.4) Le groupe de travail WG5 : les détecteurs silicium .....	29
I.5) Equipe projet : le silicium multipiste de grande surface .....	29
I.5.1) Objectifs de l'équipe projet .....	29
I.5.2) Organisation et ressources .....	30
I.5.3) Déroulement du projet .....	31
I.5.4) Les objectifs du mémoire .....	34
<b>CH, PITRE II : PH, SE D'ETUDE GEOMETRIQUE .....</b>	<b>36</b>
II.1) Etude des 3 critères d'amélioration avec la solution mono cellule .....	37
II.1.1) Evaluation du nombre de détecteurs (granularité) .....	37
II.1.2) Evaluation de l'efficacité géométrique .....	39

II.1.3)	Evaluation de la résolution angulaire .....	39
II.2)	Etude des 3 critères d'amélioration avec la solution multipiste .....	40
II.2.1)	Evaluation du nombre de détecteurs (granularité) .....	40
II.2.2)	Evaluation de l'efficacité géométrique .....	42
II.2.3)	Evaluation de la résolution angulaire .....	42
II.3)	Analyse comparative .....	43
<b>CHAPITRE III : PHASE EXPERIMENTALE.....</b>		<b>45</b>
III.1)	Constitution de la chaîne de mesure de la maquette expérimentale .....	46
III.2)	Les sources de particules chargées utilisées .....	47
III.2.1)	Détecteur soumis aux rayonnements d'une source radioactive étalon $3\alpha$ .....	47
III.2.2)	Mise sous faisceaux de la maquette expérimentale.....	50
III.3)	Le détecteur silicium multipiste.....	55
III.3.1)	Principes de fonctionnement du détecteur .....	55
III.3.1.1)	L'ionisation du détecteur silicium par une particule chargée .....	55
III.3.1.2)	Les semi-conducteurs .....	57
III.3.1.3)	La jonction PN.....	57
III.3.1.4)	Le détecteur silicium multipiste double faces.....	59
III.3.2)	Choix du détecteur .....	60
III.4)	L'électronique de préamplification .....	62
III.4.1)	Principes de fonctionnement de l'électronique .....	62
III.4.1.1)	Les préamplificateurs de charges .....	62
III.4.1.2)	La sensibilité des préamplificateurs.....	65
III.4.1.3)	Influence du taux de comptage .....	66
III.4.1.4)	Couplage entre le détecteur et les préamplificateurs .....	68
III.4.2)	Réalisation de l'électronique .....	69
III.4.2.1)	Les préamplificateurs .....	69
III.4.2.2)	Les cartes mères .....	70
III.5)	Banc d'essais du détecteur expérimental .....	71
III.5.1)	Les fonctions mécaniques .....	71
III.5.1.1)	Système d'insertion du détecteur sous le faisceau .....	71
III.5.1.2)	Étanchéité de l'ensemble au vide.....	72
III.5.1.3)	Alignement de la maquette par rapport à l'axe théorique du faisceau .....	73
III.5.1.4)	Refroidissement de l'électronique de préamplification .....	73
III.5.2)	Les fonctions électriques .....	75
III.5.2.1)	Commande contrôle du système d'insertion.....	75
III.5.2.2)	Bride de connexions électriques air-vide.....	75
III.6)	La chaîne d'acquisition .....	76
III.6.1)	Principe de fonctionnement de la chaîne d'acquisition .....	76
III.6.2)	Amplification et mise en forme du signal.....	77
III.6.3)	Les signaux de déclenchement .....	79
III.6.4)	Le codeur d'amplitude .....	80

---

III.7) Le traitement informatique .....	81
III.8) Caractérisation des mesures en énergie de la maquette expérimentale .....	85
III.8.1) Evaluation des écarts types de mesure en énergie .....	86
III.8.1.1) Ecart type de la chaîne de mesure en énergie avec la source alpha. ....	87
III.8.1.2) Ecart type de la chaîne de mesure avec le faisceau d'ions lourds. ....	89
III.8.2) La résolution en énergie de la chaîne de mesure.....	91
III.9) Evaluation des phénomènes d'influence entre les voies de mesure en énergie. ....	92
III.9.1) Evaluation de la diaphonie .....	92
III.9.2) Evaluation de l'influence de l'interpiste.....	97
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>103</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>107</b>
Annexe A : Formule de Bethe Bloch en fonction du projectile et du milieu traversé.....	107
Annexe B : Formule de Bethe Bloch en fonction des caractéristiques du projectile.....	111
Annexe C : Estimation des surfaces de chaque calotte de la structure FAZIA. ....	113
Annexe D : Démonstration de l'équation de la tension de sortie du préamplificateur en fonction de la charge électrique. ....	116
Annexe E : Choix de la résistance de contre réaction en fonction de l'influence du taux de comptage. ....	120
Annexe F : Droites de calibration en énergie. ....	124
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>128</b>

# Préambule

Au V<sup>ème</sup> siècle avant JC, le philosophe Empédocle pensait que toute chose était composée de quatre éléments principaux : la terre, l'air, l'eau et le feu. Quelques années plus tard le philosophe Démocrite développe une théorie selon laquelle la matière n'est pas indéfiniment divisible, il prononce le mot « atomos » (qui ne peut être coupé). Il faudra attendre 2000 ans pour que « la théorie atomique » soit reprise par les scientifiques. En 1803, le chimiste John Dalton développe la théorie selon laquelle la matière est composée de particules ultimes, identiques et indivisibles : les atomes. En 1811, l'Italien Avogadro établit une distinction entre les atomes et les molécules. En 1869, le savant russe Mendeleïev met au point un système de classification de tous les éléments chimiques connus, par masse atomique croissante. En 1896, la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel marque la naissance de la physique nucléaire proprement dite.

Depuis des siècles, pour comprendre les mécanismes de la matière, des modèles de plus en plus fin sont imaginés grâce aux découvertes.

De nos jours, pour analyser les constituants élémentaires de la matière et leurs mécanismes de réaction, les chercheurs provoquent de fortes collisions, au niveau nucléaire, par l'intermédiaire d'accélérateurs de particules.

Ces instruments permettent de sonder la matière en communiquant de l'énergie à des particules chargées. Elles sont ensuite guidées sur des noyaux cibles. Les réactions nucléaires induites par ces collisions provoquent des émissions de particules dans tout l'espace autour de la réaction. Ces particules sont détectées et identifiées. Une analyse très fine permet d'étudier les mécanismes de ces réactions. Le détecteur de particules est l'instrument de base en physique nucléaire expérimentale. Sa technologie évolue avec les découvertes sur la structure du noyau. Cette évolution a notamment permis la construction de multidétecteurs  $4\pi$  capables de détecter les produits de la réaction avec une grande efficacité géométrique.

Depuis 1993, au Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) à Caen, est utilisé un multidétecteur  $4\pi$  appelé INDRA (Identification de Noyaux et Détection avec Résolutions Accrues).

Les besoins actuels et futurs dans le domaine de la physique nucléaire nécessitent de nouvelles caractéristiques de détection. Ainsi en 2001, un groupe de Recherche et Développement (R&D) a été constitué pour construire un multidétecteur dénommé FAZIA (Four- $\pi$  A and Z Identification Array). Il devrait être composé de 10 000 modules élémentaires dont certains prototypes devraient être réalisés pour la fin 2007.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier en détail une solution alternative de détection pour le futur multidétecteur FAZIA. Nous proposons d'utiliser des détecteurs silicium multipistes à la place des détecteurs silicium mono cellule qui ont été soumis initialement dans le projet.

---

Dans le chapitre 1, le GANIL sera présenté puis l'un de ses détecteurs actuellement en fonctionnement : le multidétecteur INDRA. Cela permettra d'introduire le projet FAZIA qui constitue le sujet principal de l'étude. Le chapitre 2 étudiera les avantages et les inconvénients en termes de géométrie entre la solution mono cellule et la solution multipiste. Le dernier chapitre s'attachera à décrire la chaîne de mesure de la maquette multipiste expérimentale. Les mesures en énergie seront analysées et nous évaluerons l'existence de phénomènes d'influence entachant la discrimination en énergie des particules.

Nous montrerons que les détecteurs silicium multipistes constituent une réelle alternative pour la construction du multidétecteur FAZIA.

# Chapitre I : Présentation générale

Dans ce chapitre est exposée la méthode de production du faisceau d'ions lourds au GANIL. Le faisceau est dirigé vers différentes salles d'expériences, lieux où la détection permet d'explorer la matière. Ensuite le multidétecteur  $4\pi$  appelé INDRA est décrit, il s'agit d'un outil d'étude en physique nucléaire. Nous poursuivrons par la présentation du projet FAZIA, futur multidétecteur étudié par une collaboration internationale entre différents laboratoires et universités. Enfin, ce chapitre se terminera par une présentation de l'équipe projet concernant l'étude du silicium multipiste.

## **I.1) Le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds**

### **I.1.1) Historique**

Le GANIL est un laboratoire commun entre le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Il a été créé en 1975 et a produit son premier faisceau d'ions lourds en 1982 grâce à 3 accélérateurs (cyclotron) en cascade. En 1994, le laboratoire est labellisé Grande Installation Européenne. En 2001, le premier faisceau d'ions exotiques légers est créé par un ensemble cible-source associé à un cyclotron (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne, SPIRAL). Plus récemment, en 2005, la décision de construire une nouvelle installation accélératrice appelée SPIRAL 2 a été prise. Cette nouvelle machine sera capable, à terme, d'élargir la palette des noyaux exotiques produits par le GANIL en accélérant des faisceaux très intenses d'ions.

### **I.1.2) Missions**

Cet instrument de recherche fondamentale est, depuis 23 ans, à la disposition de la communauté scientifique pour étudier les différents mécanismes du noyau. Ainsi, chaque année, des centaines de chercheurs du monde entier sont accueillis pour réaliser leurs expériences. Les domaines d'études sont variés : physique de l'atome et de son noyau, astrophysique, radiobiologie, physique appliquée.

### I.1.3) La production du faisceau

#### I.1.3.1) Les faisceaux stables

Les faisceaux d'ions lourds produits au GANIL couvrent une palette allant du carbone ( $E < 100 \text{ MeV/A}$ ) à l'uranium ( $E < 24 \text{ MeV/A}$ ). Les atomes sont ionisés par une source d'ions de type ECR (Electron Cyclotron Resonance). Ils sont ensuite accélérés par une succession de 3 cyclotrons (C01 ou C02, CSS1, CSS2) permettant d'augmenter de plus en plus l'énergie des particules chargées en combinant l'action d'un champ électrique (pour l'accélération) et d'un champ magnétique (pour en contrôler la trajectoire). Entre chaque cyclotron, à travers les lignes de transfert, des équipements permettent de déterminer les caractéristiques du faisceau souhaité (taille, charge, intensité, énergie). Il est trié une dernière fois par un spectromètre de masse de forme  $\alpha$  avant d'être guidé jusqu'aux salles d'expériences (cf. figure 1).

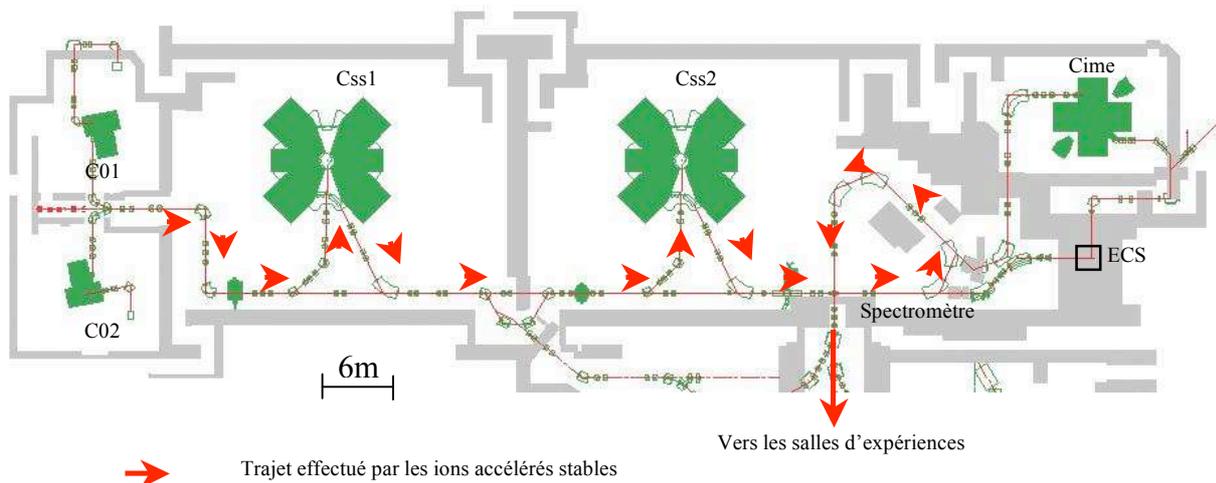


Figure 1 : Schéma de la zone de production et d'accélération des faisceaux stables.

### I.1.3.2) Les faisceaux radioactifs

Les faisceaux radioactifs sont créés à partir d'un faisceau stable accéléré par les deux cyclotrons principaux CSS1 et CSS2. Le faisceau stable est dirigé vers un ensemble cible-source (ECS). Sa collision avec une cible (de carbone par exemple), produit des ions instables. Ces ions sont ensuite accélérés par un cyclotron appelé CIME (Cyclotron pour Ions de Moyenne Energie). Puis le faisceau est redirigé vers le spectromètre  $\alpha$  avant d'être envoyé vers les salles d'expériences (cf. figure 2)

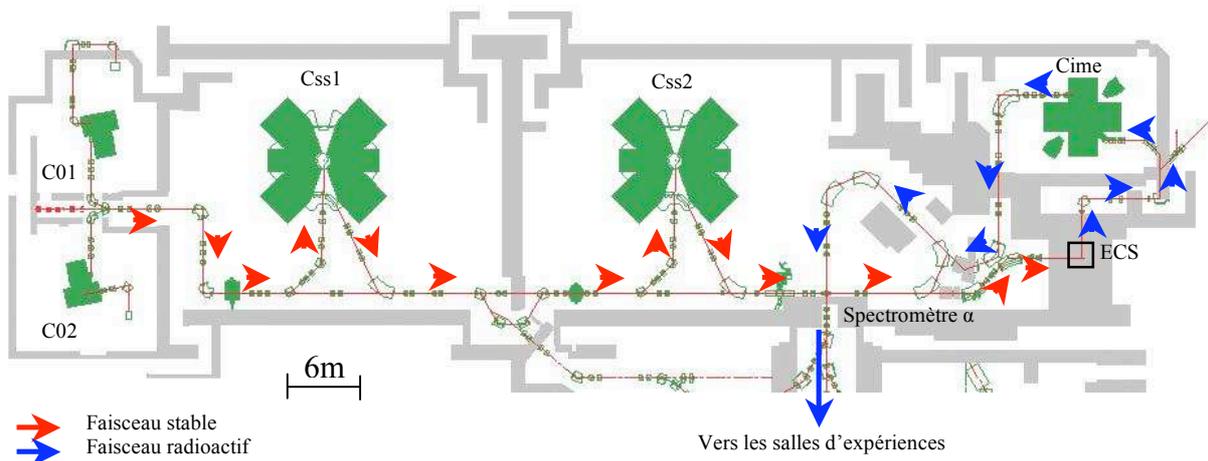


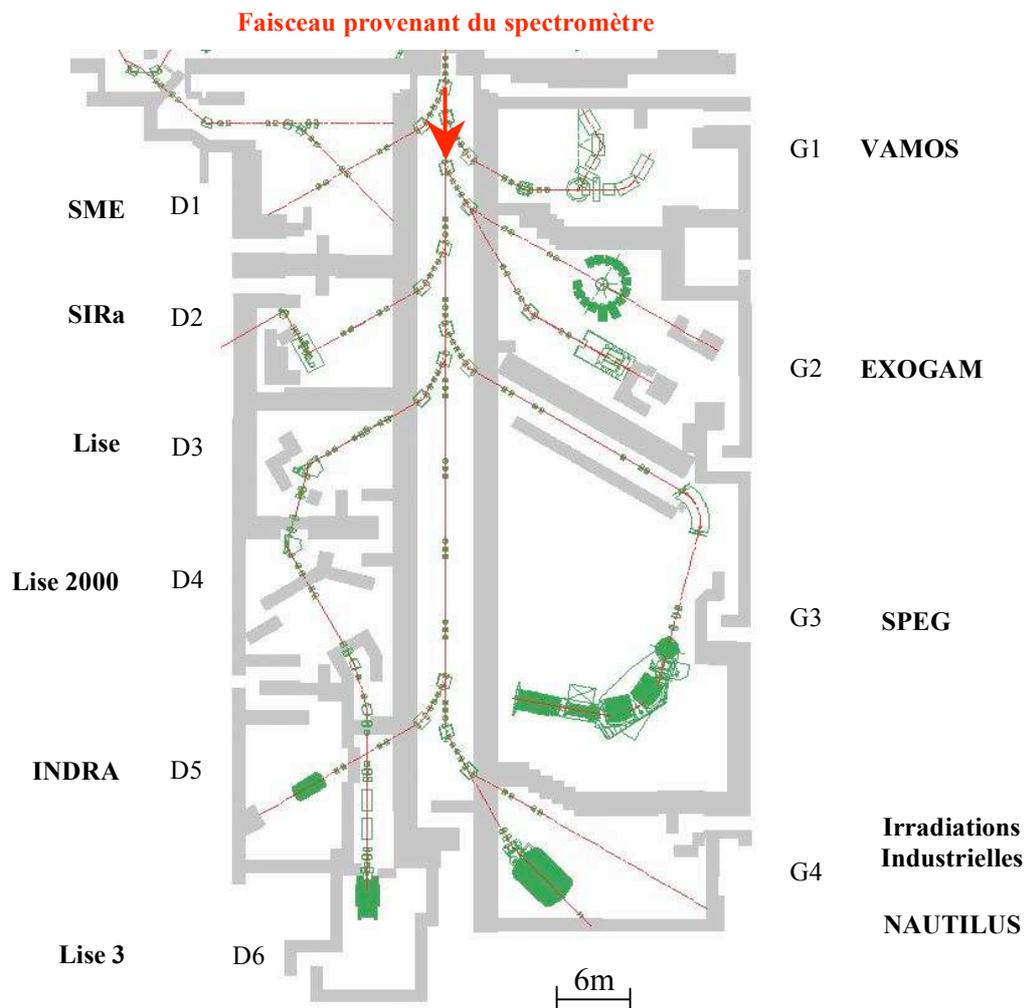
Figure 2 : Schéma de la zone de production et d'accélération des faisceaux instables.

### I.1.4) Les salles d'expériences

Le GANIL possède 8 salles d'expériences (cf. figure 3) pouvant accueillir des détecteurs de particules étudiant chacun des domaines de recherche particuliers. Lorsque les particules émises d'une collision interagissent avec les détecteurs, un signal électrique est délivré puis converti en données numériques.

Les milliards d'évènements produits sont stockés sur un support informatique (disque dur ou bande magnétique) ; c'est le rôle de l'acquisition des données. Chaque salle dispose de son propre système d'acquisition.

En fin d'expérience, ces données sont traitées par les physiciens afin de pouvoir les analyser et les interpréter.



**Figure 3 : Schéma des salles d'expériences. Les faisceaux stables ou radioactifs sont dirigés vers la salle où l'expérience a lieu.**

## I.2) Le multidétecteur INDRA

La présentation du multidétecteur INDRA est importante pour deux raisons. La première est que son fonctionnement est très proche du futur multidétecteur FAZIA, contexte dans lequel nous travaillerons. La seconde est que FAZIA sera un multidétecteur permettant d'explorer dans le même axe de recherche qu'INDRA mais avec des exigences de détection plus importantes.

INDRA est installé dans la salle d'expérience D5 (cf. figure 4). Ce dispositif de détection  $4\pi$  stéradian englobe l'espace autour de la cible. Il couvre environ 90% de l'angle solide. Le faisceau d'ions projectile est envoyé sur la cible générant des réactions nucléaires entre noyaux projectiles et noyaux cibles d'où est émis un certain nombre de particules. Les différents types de détecteurs placés autour de l'événement vont ainsi pouvoir identifier les produits issus de la réaction. Le détecteur INDRA identifie des particules de numéros atomiques  $Z$  très différents du proton jusqu'à l'uranium ( $Z=92$ ). [POU94]

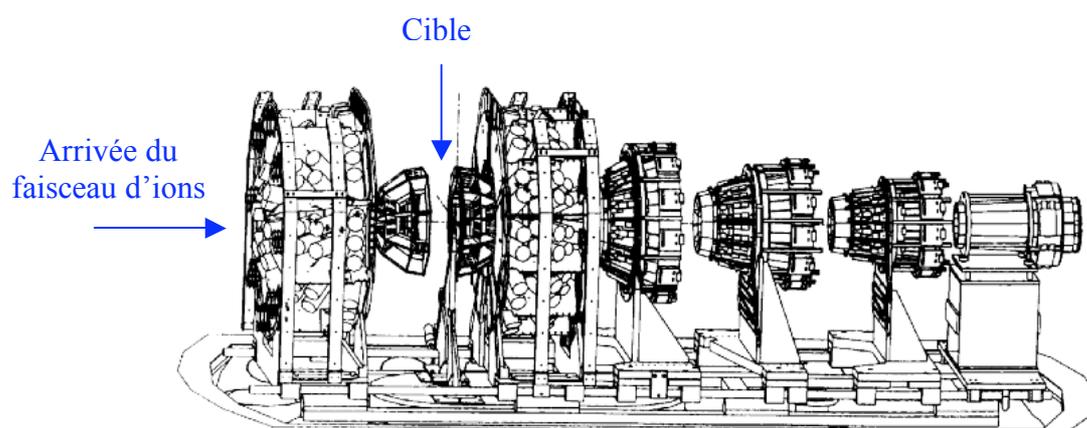
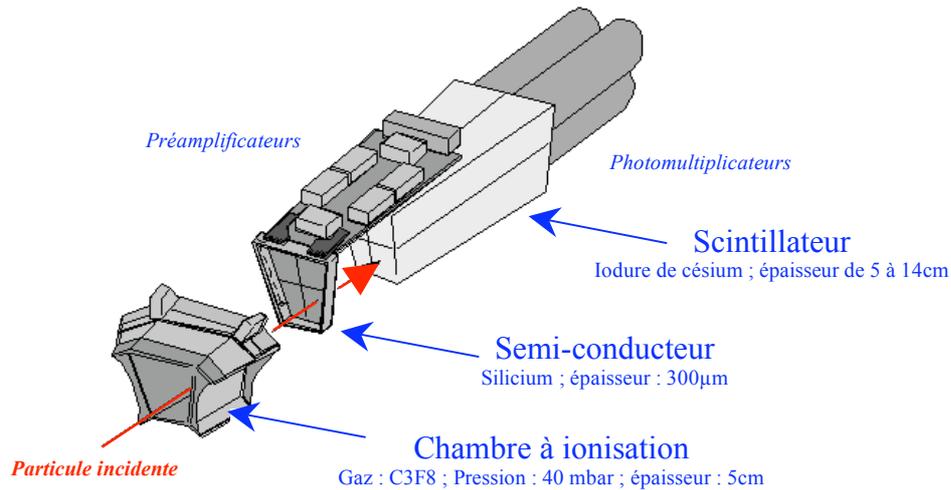


Figure 4 : Schéma éclaté du multidétecteur INDRA.

Ce multidétecteur est composé de 336 modules répartis sur 17 couronnes. Chaque module (aussi appelé télescope) est composé de trois étages : une chambre à ionisation, un silicium et un scintillateur couplé à un photomultiplicateur (cf. figure 5).



**Figure 5 : Un noyau produit dans la cible traverse d'abord la chambre à ionisation puis la jonction silicium et enfin le scintillateur.**

La technique  $\Delta E$ -E est utilisée pour identifier la particule [KNO89]. Cette méthode consiste à mesurer la perte d'énergie  $\Delta E$  des particules qui traversent un premier étage de détection et s'arrêtent dans un deuxième étage où l'on mesure l'énergie résiduelle E. Elle est définie par la formule de Bethe Bloch (cf. annexe A) qui peut s'exprimer sous la forme simplifiée suivante :

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2}{v^2} \times \frac{\rho \times Z}{A} \times K1$$

**Équation 1**

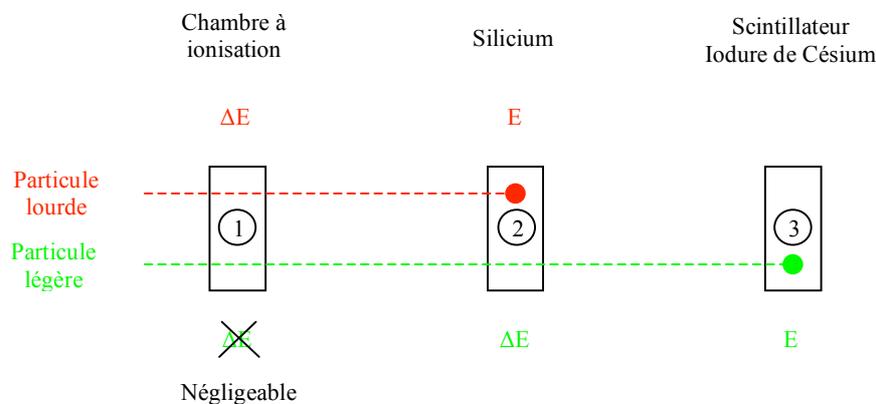
- $dE$  : La perte d'énergie en eV
- $dx$  : L'épaisseur traversée par la particule incidente dans le détecteur en m
- $z$  : Le numéro atomique de la particule incidente
- $v$  : La vitesse de la particule incidente en  $m.s^{-1}$
- $\rho$  : La masse volumique du matériau traversé en  $kg.m^{-3}$
- $Z$  : Le numéro atomique, ou nombre de proton du milieu traversé
- $A$  : La masse atomique du milieu traversé  $kg.mol^{-1}$
- $K1$  : Facteur en  $eV.mol^{-1}.m^2$

Le premier terme de cette formule ( $\frac{z^2}{v^2}$ ) dépend des caractéristiques du projectile et le deuxième terme ( $\frac{\rho \times Z}{A}$ ) dépend des caractéristiques du milieu traversé.

La formule de Bethe Bloch (cf. équation 1) nous montre que plus le  $z$  du noyau produit est grand, plus il déposera de l'énergie dans le milieu. Dans ce cas les particules lourdes s'arrêteront plus vite que les légères. Lorsque des particules, ayant le même  $z$ , traversent des milieux dont la densité est différente, plus la densité sera grande et plus les particules s'arrêteront rapidement.

Les particules lourdes traversent la chambre à ionisation et s'arrêtent dans le deuxième étage (silicium). La perte d'énergie  $\Delta E$  est mesurée dans la chambre à ionisation et l'énergie résiduelle  $E$  avec l'étage du détecteur silicium.

Les particules légères, traversent les deux premiers étages et sont stoppées dans le dernier étage (scintillateur). Dans ce cas la perte d'énergie dans la chambre à ionisation est négligeable. Nous nous intéresserons donc à leur dépôt d'énergie  $\Delta E$  dans le 2<sup>ème</sup> étage. La figure 6 résume le parcours des particules à travers le télescope.



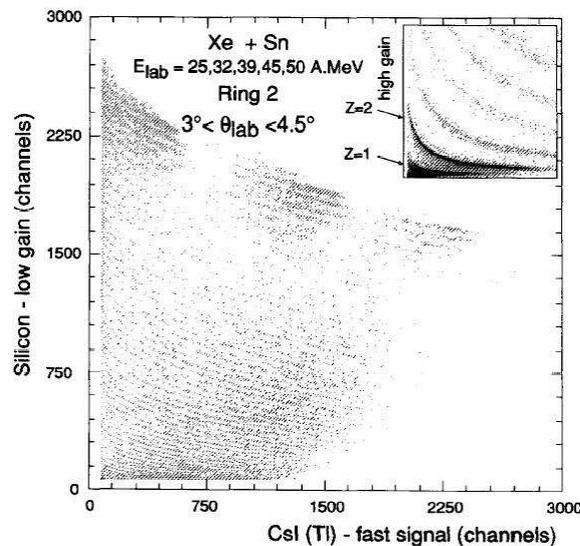
**Figure 6 : Schéma de principe de la technique  $\Delta E$ - $E$  pour un module INDRA.**

Nous pouvons réécrire la loi de Bethe Bloch de la perte d'énergie par unité de longueur sous la forme suivante (cf. annexe B) :

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2 A_p}{E_c} \times K5 \quad \text{Équation 2}$$

- $dE$  : La perte d'énergie de la particule dans le premier étage en eV  
 $dx$  : L'épaisseur traversée par la particule incidente dans le détecteur en m  
 $z$  : Le numéro atomique, ou nombre de proton de la particule incidente  
 $A_p$  : La masse atomique du projectile  $kg \cdot mol^{-1}$   
 $E_c$  : La perte d'énergie de la particule incidente dans le deuxième étage en eV  
 $K5$  : Facteur en  $eV^2 \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1} \cdot mol$  pour un milieu traversé donné

Cette loi définit la perte d'énergie dans le matériau du détecteur selon la particule incidente. Nous pouvons représenter l'énergie perdue  $\Delta E$  en fonction de l'énergie totale  $E$  perdue dans l'ensemble du détecteur. Les courbes  $\Delta E = f(E_c)$  représenteront des hyperboles dépendantes de la charge et avec moins d'importance de la masse. Ainsi en connaissant la perte d'énergie dans un premier détecteur ( $\Delta E$ ) et la perte d'énergie dans un deuxième ( $E_c$ ) nous déterminons la charge et la masse de l'ion incident. Ces courbes permettent d'identifier les particules mesurées. Ce type de représentation est très largement utilisé dans le domaine de la physique nucléaire (cf. Figure 7).



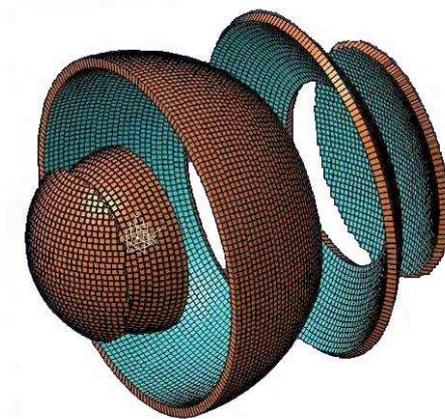
**Figure 7 : Energie perdue dans le semi-conducteur en fonction de l'énergie résiduelle dans le scintillateur [POU94].**

Les caractéristiques du multidétecteur INDRA ne suffisent plus aujourd'hui à répondre aux exigences de la physique. Ainsi, un groupe de R&D dénommé AZ4PI (A pour la détection de la masse, Z pour le numéro atomique et  $4\pi$  pour indiquer la couverture de détection) a été mis en place. L'objectif de ce groupe d'étude est de concevoir un nouveau multidétecteur, dénommé FAZIA.

### **I.3) Le projet international FAZIA**

#### **I.3.1) Présentation**

Afin d'étudier de nouveaux concepts d'identification en masse (A) et en nombre de protons (Z) des produits de réactions nucléaires, un groupe de travail « AZ4PI » a été mis en place depuis 2001. L'objectif dans les 2 années à venir est d'élaborer plusieurs prototypes permettant de faire des choix technologiques en vue de la construction d'un nouveau multidétecteur. Il sera utilisable auprès des futures installations nucléaires européennes de faisceaux radioactifs (SPIRAL 2/GANIL et EURISOL : European Isotope Separation On-Line). Au final, le multidétecteur sera composé d'un grand nombre de modules semblables au prototype sélectionné.



**Figure 8 : Simulation 3D de la géométrie du multidétecteur FAZIA.**

La collaboration AZ4PI est composée principalement d'institutions européennes. Voici la liste des établissements impliqués dans le projet aujourd'hui :

#### FRANCE

- GANIL, CEA-CNRS
- Institut de Physique Nucléaire d'Orsay, IN2P3/CNRS
- Institut de Physique Nucléaire de Lyon, IN2P3/CNRS-Université
- Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, IN2P3/CNRS-Université-ENSICAEN

#### ITALIE

- INFN et Université de Firenze
- INFN et Université de Bologne
- INFN et Université de Napoli
- INFN et Université de Catania
- LNS Catania
- LNL Legnaro

#### POLOGNE

- Jagellonian Institute, de Krakow
- Université de Katowice
- Université de Warsaw

#### ESPAGNE

- Université de Huelva
- Université de Sevilla

#### ROUMANIE

- IFIN, de Bucarest

#### CANADA

- Université de Laval, au Québec

#### USA

- Western Michigan Université

#### INDE

- Centre Cyclotron à énergie variable, de Calcutta

Ce projet a été accepté par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) avec une subvention de 270 000 € sur deux ans pour l'ensemble de la collaboration FAZIA.

L'organisation du groupe R&D est composée de 80 personnes réparties sur 9 groupes de travail (cf. figure 9) :

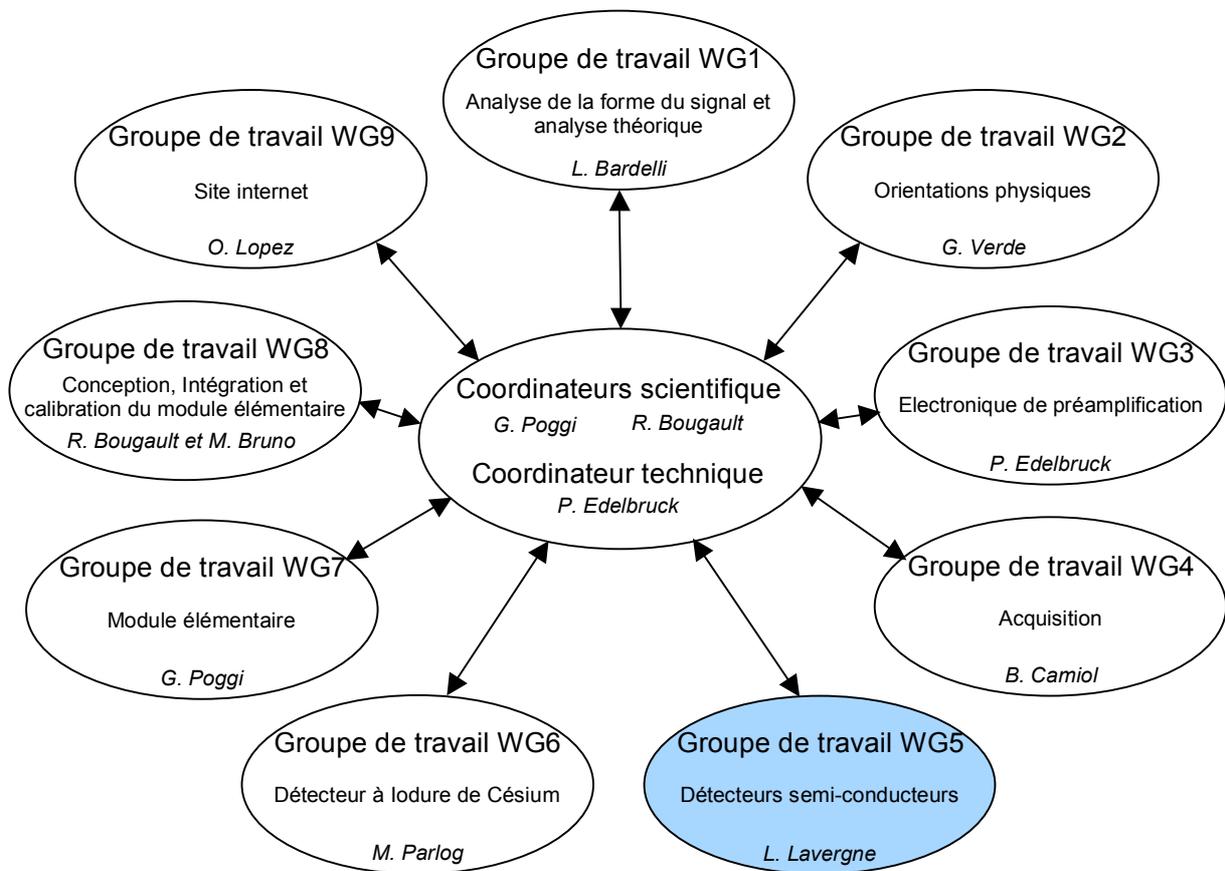


Figure 9 : Organisation du groupe de R&D AZ4pi.

Notre étude se déroulera dans le cadre du groupe détecteur semi-conducteur WG5 (en bleu).

### **I.3.2) Objectif du projet international**

L'objectif de la conception du multidétecteur FAZIA est d'avoir des performances de détection supérieures à celles d'INDRA. FAZIA permettra une détection complète de produits de réaction. Ces informations permettront d'affiner les modèles et d'acquérir des connaissances supplémentaires sur l'état de la matière nucléaire.

Les voies d'études du groupe R&D se dirigent vers l'amélioration de la géométrie du multidétecteur ainsi que de sa résolution de la mesure en énergie. De plus, il est étudié la possibilité d'employer une méthode novatrice d'identification des particules par l'analyse de la forme du signal issu du détecteur (via son préamplificateur), correspondant à l'image de la perte d'énergie dans le détecteur (cette méthode est en cours d'étude par différents laboratoires de la collaboration, nous ne traiterons pas ce point).

Le groupe R&D souhaite améliorer la géométrie afin d'obtenir :

- Une efficacité géométrique accrue
- Une meilleure granularité
- Une meilleure résolution angulaire

Ces performances permettront d'augmenter la localisation des fragments émis lors des interactions du faisceau avec la cible.

### **I.3.3) Définition des 3 critères d'amélioration du multidétecteur**

Dans cette partie, nous définirons les trois critères d'amélioration du multidétecteur. Ces notions serviront au choix dimensionnel du détecteur silicium multipiste (cf. III.3).

#### **I.3.3.1) L'efficacité géométrique**

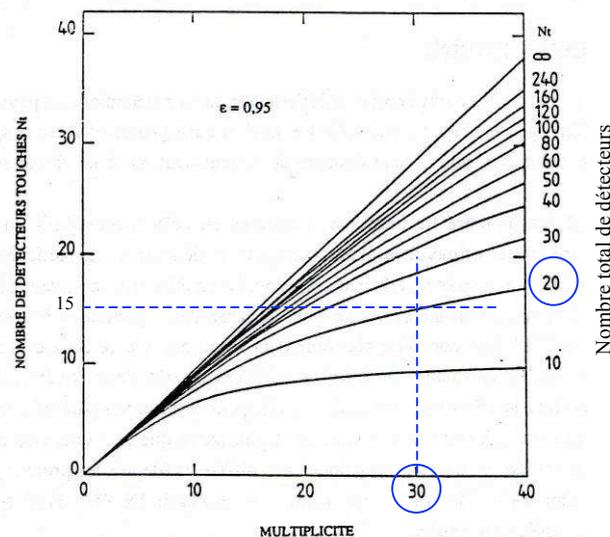
La couverture de détection est la zone utile du multidétecteur. Cette zone est l'efficacité géométrique du détecteur. Elle s'exprime en pourcentage de l'angle solide  $4\pi$ . Si cette efficacité est de 100%, il n'y a pas de zone morte. Ceci est impossible dans la pratique. En effet les parties mécaniques supportant le détecteur font partie des zones mortes. Pour INDRA la couverture angulaire est de 90% (cf. section I.2).

#### **I.3.3.2) La granularité**

Les capteurs placés autour de la cible détectent les particules émises par la cible. Un détecteur élémentaire effectue une mesure d'identification en énergie correcte lorsqu'il intercepte qu'une seule des particules émises lors d'une réaction dans la cible (événement). En effet si 2 particules (ou plus) sont vues simultanément par le même détecteur, il est impossible de les discriminer car les signaux correspondants à la perte d'énergie des particules à identifier s'additionnent dans le module de détection. La granularité est la taille du détecteur permettant d'identifier une seule particule.

Si par exemple le nombre de particules émises lors d'une collision entre le faisceau de particules et les noyaux de la cible (appelé multiplicité) est égale à 40, il faudra alors au minimum 40 détecteurs pour identifier chaque particule d'une même réaction dans la cible. La localisation des particules émises durant une collision change d'un événement à l'autre. 40 détecteurs ne suffiront pas. Des calculs de probabilité sur le nombre de détecteurs touchés ont été réalisés [COP90].

La figure 10 présente la relation liant le nombre de détecteurs touchés avec la multiplicité [COP90]. Elle a été tracée pour une efficacité géométrique de 95%. Cela permet de connaître le nombre de détecteurs nécessaires pour identifier le maximum de particules émises lors de la collision.



**Figure 10 : Nombre moyen de détecteurs touchés en fonction de la multiplicité pour un nombre variable  $N_t$  (nombre total) de modules.**

Chaque courbe est définie pour un nombre total précis de détecteurs. Par exemple si le multidétecteur est construit avec 20 détecteurs et si la multiplicité (le nombre de particules émises lors d'une collision) est de 30, 15 détecteurs seront statistiquement touchés.

Nous pouvons observer sur la figure 10 que pour une multiplicité égale à 40 (valeur typique au GANIL), 240 détecteurs suffisent pour identifier le maximum de particules. En d'autres termes, après avoir atteint un nombre « suffisant » de détecteurs, il ne sert à rien de vouloir augmenter le nombre de cellules (la granularité). Le coût du multidétecteur s'en trouverait inutilement accru et son rendement serait peu amélioré.

Afin de connaître le nombre optimum de modules élémentaires nécessaires pour le multidétecteur, nous pouvons utiliser la courbe présentée figure 11 [COP90].

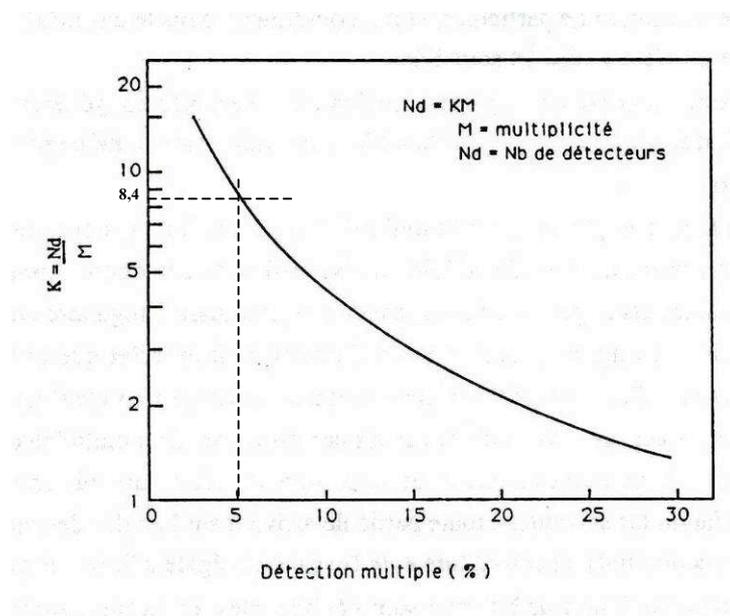


Figure 11 : Variation du rapport  $K$  du nombre de modules  $N_d$  à la multiplicité  $M$  en fonction de la probabilité de détection multiple avec une couverture de détection de 95%.

Par exemple, pour le multidétecteur INDRA (cf. section I.2), la multiplicité est de 40 et le nombre de modules est de 336. Le rapport  $K$  (nombre de détecteurs divisé par la multiplicité) est donc égal à 8,4. Pour cette valeur nous constatons qu'il y a environ 5% des détecteurs qui ont une détection multiple. 5% des particules émises au cours d'un évènement ne pourront donc être identifiées. Une meilleure granularité permettra de diminuer le pourcentage de détection multiple et ainsi de réduire le nombre d'évènements non pris en compte.

### I.3.3.3) La résolution angulaire

Sur une sphère nous pouvons représenter la position d'un détecteur avec 2 angles. Un angle polaire  $\theta$  et un angle  $\varphi$  dans le plan  $(x, y)$ . Nous remarquons que ce dernier est une projection orthogonale sur le plan  $(x, y)$ . La résolution angulaire est l'étendue de la position de la particule dans un angle donné. En d'autres termes,  $d\theta$  et  $d\varphi$  sont les angles de couverture du détecteur sur la sphère (cf. figure 12). Dans cette zone du détecteur nous ne pouvons pas connaître la position exacte de la particule incidente.

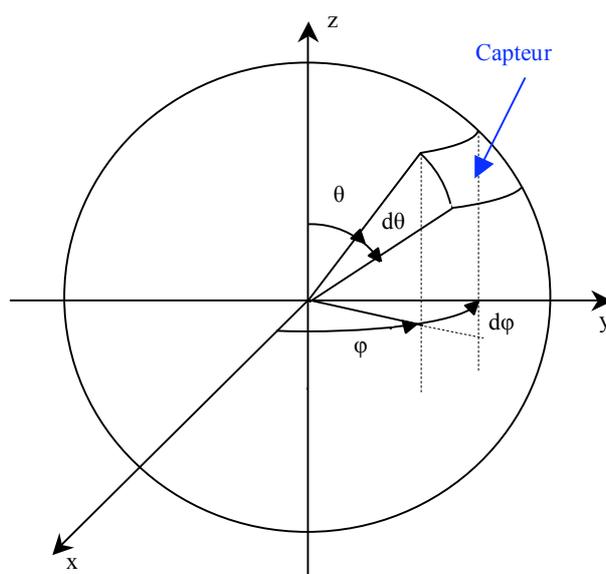


Figure 12 : Représentation des angles  $d\varphi$  et  $d\theta$  (résolution angulaire) sur une sphère en coordonnées sphériques.

En résumé, pour un multidétecteur, la couverture de détection et la granularité sont deux paramètres impliquant une « perte » de mesure dans la discrimination d'évènement produit par la réaction étudiée. Une bonne résolution angulaire permettra de déterminer avec une plus grande exactitude la position de l'évènement dans l'espace. Ces facteurs ont une grande importance dans la conception de l'ensemble du multidétecteur.

### I.3.4) Cahier des charges du multidétecteur FAZIA

Au stade actuel de l'étude (phase d'avant projet), le futur multidétecteur FAZIA serait constitué de plusieurs modules (ou télescopes) couvrant la globalité de l'espace géométrique. Ces modules devront être disposés autour de la cible sur un système de calottes placées à différentes distances (cf. figure 13)

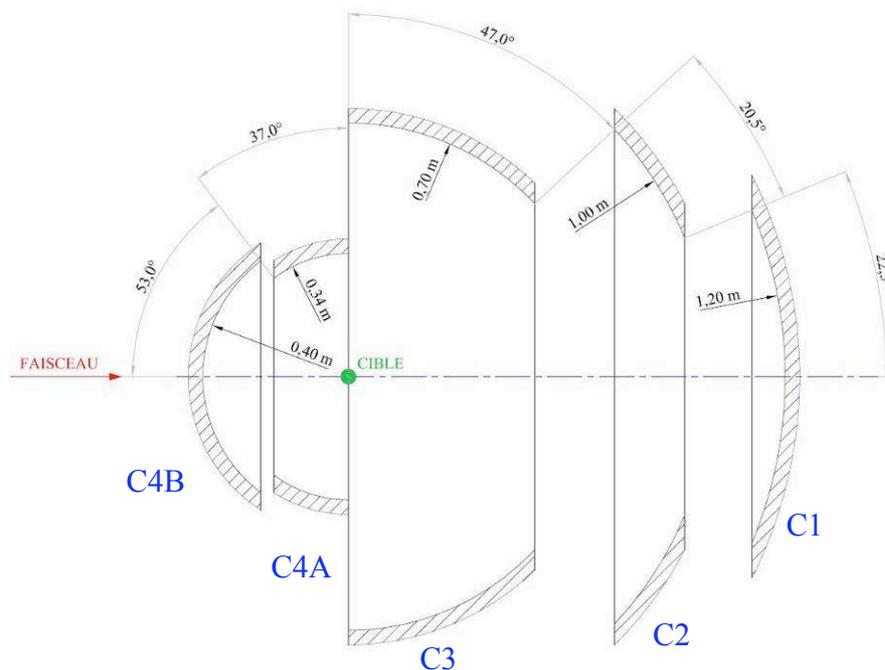


Figure 13 : Vue en coupe des différentes calottes du futur multidétecteur FAZIA.

Un module élémentaire permettra de mesurer la perte d'énergie de la particule à discriminer. Il comprendra 3 étages :

- étage n°1 : silicium d'une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$
- étage n°2 : silicium d'une épaisseur de 700  $\mu\text{m}$
- étage n°3 : scintillateur CsI (Iodure de Césium) couplé à une photodiode.

Les critères d'amélioration du multidétecteur sont :

- Une efficacité géométrique supérieure à 90 %
- Un nombre de détecteurs réparti sur  $4\pi$  stéradian supérieur à 337 (INDRA) pour avoir une meilleure granularité.
- Une résolution angulaire (en  $d\theta$  et  $d\phi$ ) répartie sur les différentes calottes selon le tableau ci-dessous :

Calotte	Résolution angulaire en $^{\circ}$
C1	0,95
C2	1,15
C3	1,64
C4A	3,37
C4B	2,86

**Tableau 1 : Résolution angulaire souhaitée pour le multidétecteur FAZIA.**

#### **I.4) Le groupe de travail WG5 : les détecteurs silicium**

L'objectif du groupe est d'étudier la solution la plus adaptée, sur les deux premiers étages du télescope, en termes de coût et de mise en place technique. Les capteurs devront avoir une qualité de détection en énergie la plus élevée possible.

Ce groupe de travail est composé de 30 personnes réparties dans plusieurs laboratoires. Parmi les différents axes d'étude, deux sont en cours à ce jour par plusieurs équipes projet :

- Etude de l'utilisation de silicium mono cellule de petite surface
- Etude de l'utilisation de silicium multipiste de grande surface

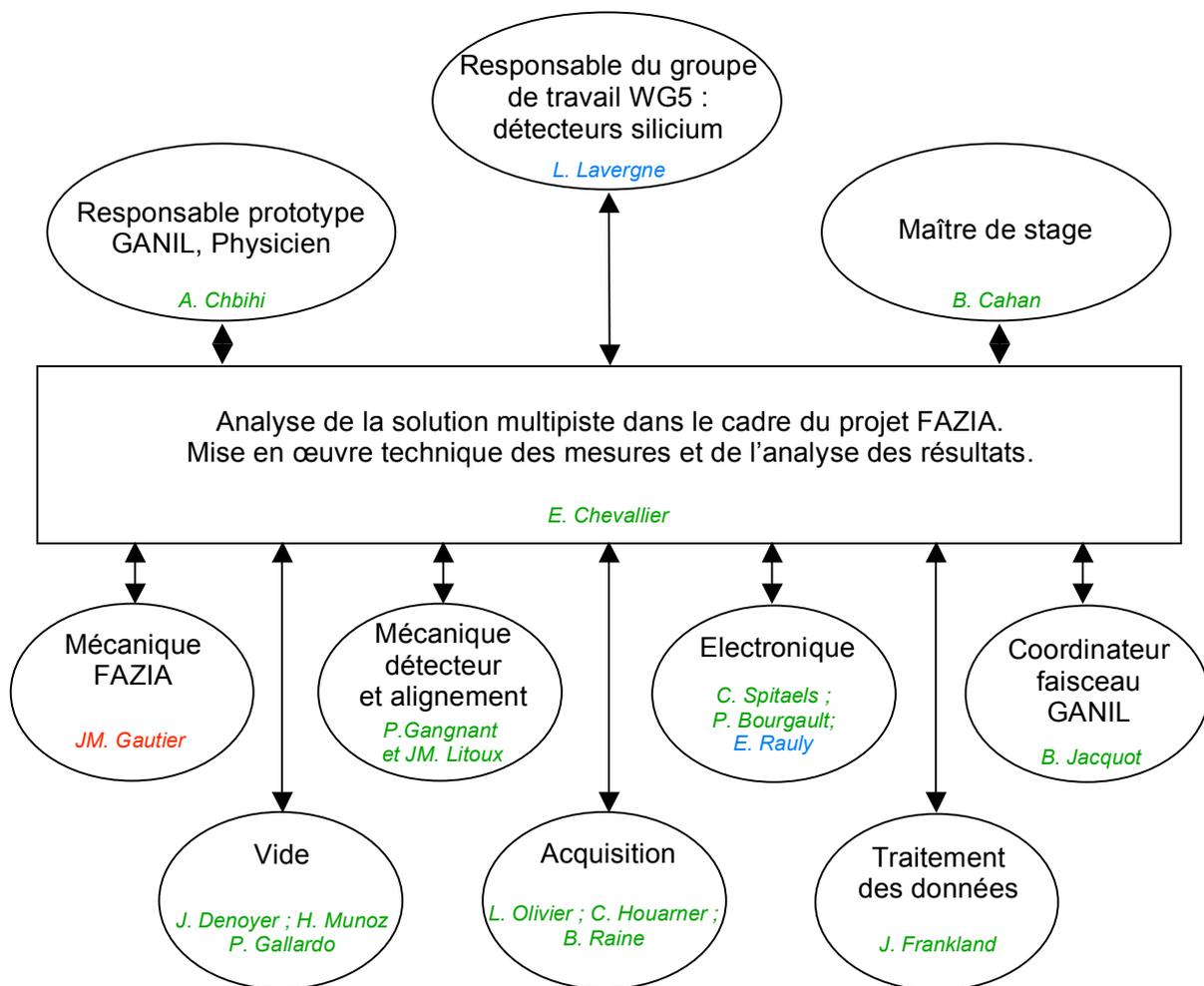
#### **I.5) Equipe projet : le silicium multipiste de grande surface**

##### **I.5.1) Objectifs de l'équipe projet**

L'objectif de l'équipe projet est de réaliser une étude approfondie sur les avantages et les inconvénients d'utiliser un détecteur silicium multipiste double faces pour le premier étage d'un module élémentaire de FAZIA. Le détecteur multipiste, en comparaison à un silicium non segmenté (une seule voie), est sujet à des phénomènes d'influence entre les voies de mesures. Nous tenterons d'évaluer ces phénomènes en réalisant une maquette de tests.

### I.5.2) Organisation et ressources

Le montant alloué au GANIL pour l'étude de la solution utilisant un silicium multipiste est de 37 000 €. Notre étude est rattachée au groupe de travail lié au détecteur silicium (WG5). La figure 14 représente l'équipe projet mis en place pour cette étude :



Laboratoires de rattachement :

En vert : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds de Caen (GANIL)  
 En rouge : Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen (LPC)  
 En bleu : Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO)

**Figure 14 : Organisation pour la mise en œuvre du prototype silicium multipiste.**

### **I.5.3) Déroulement du projet**

Au sein de l'équipe projet, j'étais le médiateur entre les différentes personnes responsables des tâches fonctionnelles. Je devais répondre aux besoins « clients » (responsable du prototype GANIL et responsable du groupe détecteur silicium WG5) avec la mise en place technique de la solution multipiste. J'ai dû respecter d'une part les orientations de la collaboration AZ4PI et d'autre part la période de disponibilité du faisceau pour notre étude expérimentale.

En effet, la production du faisceau d'ions lourds au GANIL est planifiée plusieurs mois à l'avance lors d'un comité d'expériences. De plus, selon la programmation des faisceaux, certains éléments de la machine peuvent ne pas être utilisés. Pour nos essais, la décision fut prise d'employer l'ensemble CIME. Avec l'aide du coordinateur de faisceau, nous avons pu obtenir une période allant du 17 au 25 juin 2006. Dans cette configuration, l'accélérateur CIME a fourni un faisceau de manière autonome indépendamment du reste de la machine.

Cette contrainte en temps a été un facteur important. La figure 15 présente l'organisation des différentes tâches réalisées pour la préparation d'expérience sous faisceau.

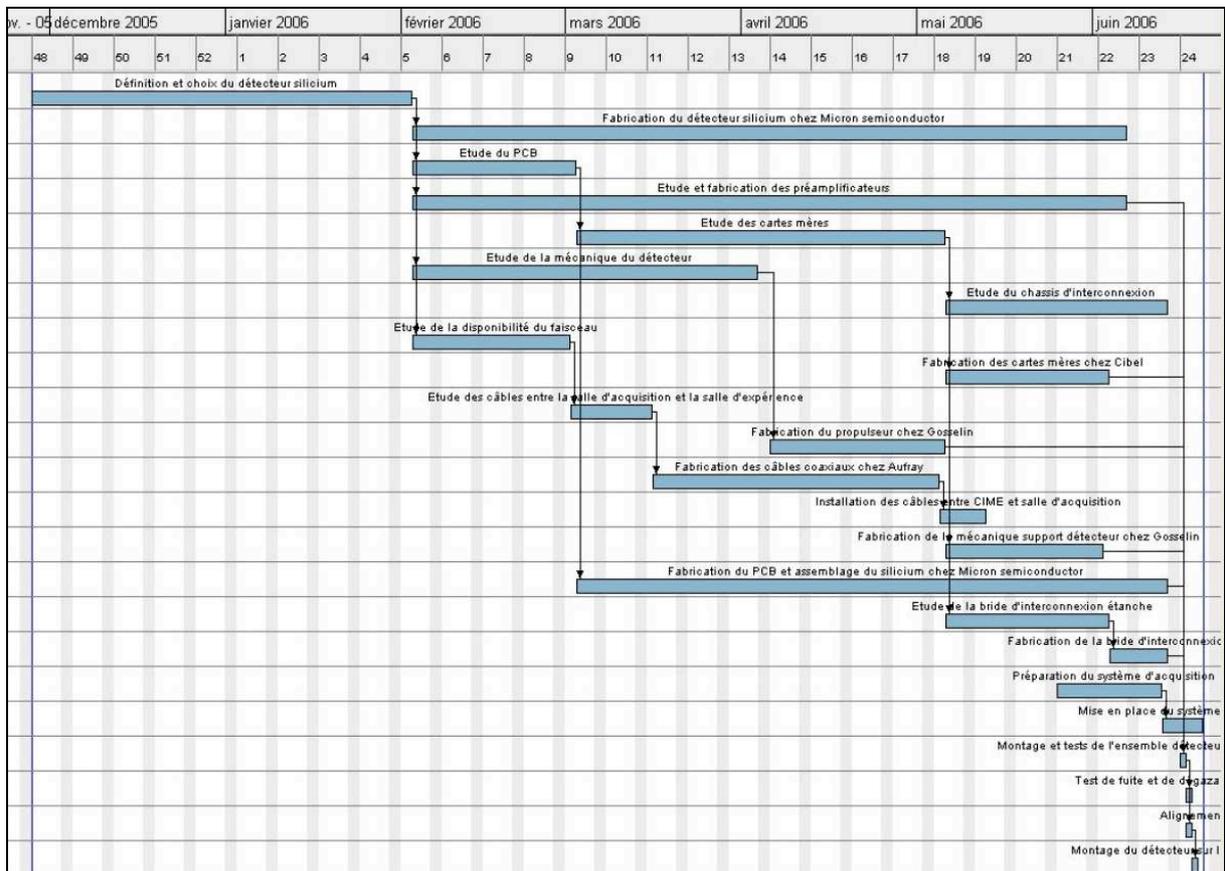


Figure 15 : Diagramme de Gantt de la préparation d'expérience sous faisceau.

La première phase du projet a été d'étudier du point de vue géométrique les avantages que le détecteur multipiste pouvait apporter. Durant cette période de conception, j'étais en contact avec le responsable de la mécanique de l'ensemble FAZIA. Mes calculs en termes de géométrie se sont basés sur des données d'entrée provenant de la collaboration FAZIA (résolution angulaire, dimensions de la structure du multidétecteur). Suite à cette étape, avec l'aide de la responsable du groupe WG5, nous avons commandé un capteur silicium de dimension standard pour éviter d'être contraints par les délais de fabrication.

Le support silicium « standard » que proposait le fournisseur ne correspondait pas à nos attentes. Avec notamment des longueurs de connexion vers les voies de mesure très différentes les unes des autres. Le responsable de la fonction électronique au GANIL a réalisé l'étude d'un support diminuant au maximum cette contrainte. En parallèle, le responsable électronique de l'IPN d'Orsay a travaillé sur le module de préamplification.

Début février 2006, nous avons débuté la conception de la mécanique et des cartes mères d'alimentation des préamplificateurs avec les contraintes d'encombrement. Le challenge était de fabriquer un ensemble ayant un encombrement mécanique inférieur à un tube de diamètre 150 mm (dimension de la ligne de conduite du faisceau).

A différentes étapes du projet, j'ai organisé des réunions se déroulant majoritairement au GANIL. A plusieurs reprises l'utilisation d'un système en visioconférence entre l'IPN d'Orsay et le GANIL a permis une certaine souplesse.

La préparation de l'expérience s'est accélérée pendant le mois de juin. En effet, les délais d'approvisionnement du détecteur silicium ont été très longs. Le détecteur a été réceptionné une semaine avant l'expérience. Nous avons eu juste le temps de faire quelques vérifications de fonctionnement (test avec un générateur d'impulsions pour vérifier la chaîne de mesure) avant d'installer les équipements à proximité de l'accélérateur CIME, lieu de l'expérience.

Après l'expérience, pour procéder à des mesures complémentaires, l'ensemble du dispositif a été placé en laboratoire avec l'utilisation d'une source étalon radioactive émettrice alphas. Généralement les mesures de rayonnement produit par une source étalon se réalisent aussi avant la mise sous faisceau du détecteur.

### **I.5.4) Les objectifs du mémoire**

Le mémoire sera traité en deux phases :

#### **1 PHASE D'ETUDE GEOMETRIQUE**

Dans cette partie, nous montrerons les avantages et les inconvénients en termes de géométrie (efficacité géométrique, nombre de détecteurs, résolution angulaire) d'une utilisation de siliciums multipistes pour la construction du multidétecteur FAZIA. Une étude comparative sera alors réalisée avec le silicium mono cellule.

##### **Objectif n°1 :**

**Etude géométrique comparative entre le silicium multipiste et le silicium mono cellule.**

#### **2 PHASE EXPERIMENTALE**

Après la mise en place de la maquette expérimentale, nous devons caractériser les mesures en énergie du détecteur silicium multipiste. Dans cette première étape du projet, nous ne pourrons pas réaliser une comparaison de ces caractéristiques directement avec le silicium mono cellule. En effet, pour des raisons de délai de fabrication et de coût, nous avons choisi un silicium multipiste de dimension standard. Selon les résultats que nous obtiendrons dans cette première étude, nous déciderons de réaliser ou non une seconde étape avec un silicium multipiste ayant les dimensions déterminées dans la phase d'étude géométrique (étude post mémoire).

**Objectif n°2 :**

**Caractérisation des mesures en énergie de la maquette expérimentale.**

La maquette expérimentale nous aidera aussi à observer l'existence de phénomènes d'influence entre les 32 voies de mesures du silicium multipiste.

**Objectif n°3 :**

**Evaluation des phénomènes d'influence entre les voies de mesure en énergie.**

## Chapitre II : Phase d'étude géométrique

Dans ce chapitre seront évalués, pour les deux solutions de silicium, les trois critères d'amélioration que souhaite réaliser la collaboration AZ4PI en construisant le futur multidétecteur FAZIA. Cette étude comparative entre le silicium multipiste et le silicium mono cellule sera basée sur la structure mécanique donnée dans le cahier des charges (cf. I.3.4).

## II.1) Etude des 3 critères d'amélioration avec la solution mono cellule

### II.1.1) Evaluation du nombre de détecteurs (granularité)

Pour évaluer le nombre de détecteurs sur l'ensemble de la structure FAZIA il est nécessaire de déterminer la surface équivalente de chaque calotte (cf. annexe C) et la surface d'un élément de détection (avec zone morte). L'équipe projet travaillant sur la solution « mono cellule » a choisit des détecteurs ayant les dimensions suivantes :

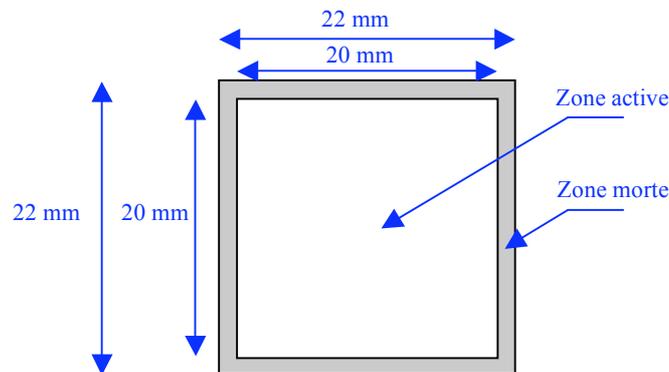


Figure 16 : Les dimensions d'une mono cellule de silicium.

Une simulation avec un logiciel de dessin en 3D a démontré qu'il y avait une perte d'environ 3% sur le nombre de détecteurs théoriques placés sur chaque calotte. En effet, la disposition de surface plane sur une surface sphérique induit des pertes de couverture angulaire. Le nombre de détecteurs par calotte peut s'évaluer d'après l'équation ci-dessous :

$$\text{Nombre de détecteurs par calotte} = \frac{\text{Surface de la calotte}}{\text{Surface d'un détecteur}} \times (1 - 0,03) \quad \text{Équation 3}$$

Voici le tableau récapitulatif du nombre de détecteurs réparti sur la structure FAZIA pour la solution mono cellule:

Calotte	Nombre de mono cellule
C1	1378
C2	2425
C3	4513
C4A	875
C4B	801
<b>Total</b>	<b>9992</b>

Tableau 2 : Nombre de mono cellules sur la structure FAZIA.

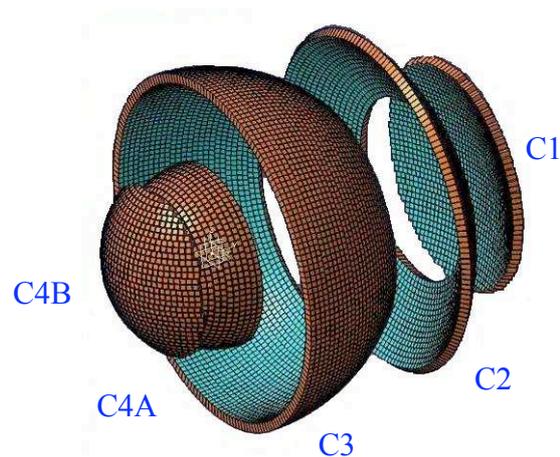


Figure 17 : Structure FAZIA composée de mono cellule de 22 x 22 mm.

### II.1.2) Evaluation de l'efficacité géométrique

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (cf. I.3.3.1), l'efficacité géométrique d'un multidétecteur est égale à la surface active de détection de l'ensemble. Elle se définit par :

$$\text{Efficacité géométrique} = \frac{\text{Surface active d'un détecteur} \times \text{nombre de détecteurs}}{\text{Surface totale du multi - détecteur}} \quad \text{Équation 4}$$

$$\text{Efficacité géométrique} = \frac{(20 \times 10^{-3})^2 \times 9992}{4,987} = 0,80 \quad \text{Équation 5}$$

L'efficacité géométrique pour la solution mono cellule est alors de 80 %.

### II.1.3) Evaluation de la résolution angulaire

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (cf. I.3.3.3), la résolution angulaire permet de déterminer la position de la particule dans l'espace. Elle est donc liée à la taille d'une cellule élémentaire. Etant donné que le détecteur est carré la résolution en  $\theta$  est la même qu'en  $\varphi$ .

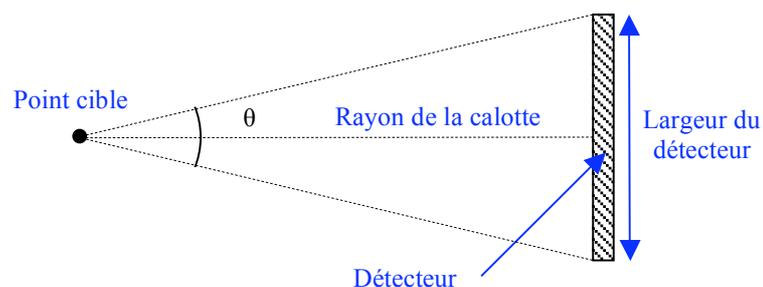


Figure 18 : Angle de résolution.

D'après la figure ci-dessus, la résolution angulaire est égale à :

$$\theta = 2 \times \arctan\left(\frac{\text{largeur du détecteur}}{2 \times \text{rayon de la calotte}}\right) \quad \text{Équation 6}$$

Pour calculer la résolution, nous utilisons la largeur de la zone active du détecteur, soit 20 mm.

Le tableau 3 récapitule les résolutions angulaires de chaque calotte.

Calotte	Résolution angulaire en °
C1	0,95
C2	1,15
C3	1,64
C4A	3,37
C4B	2,86

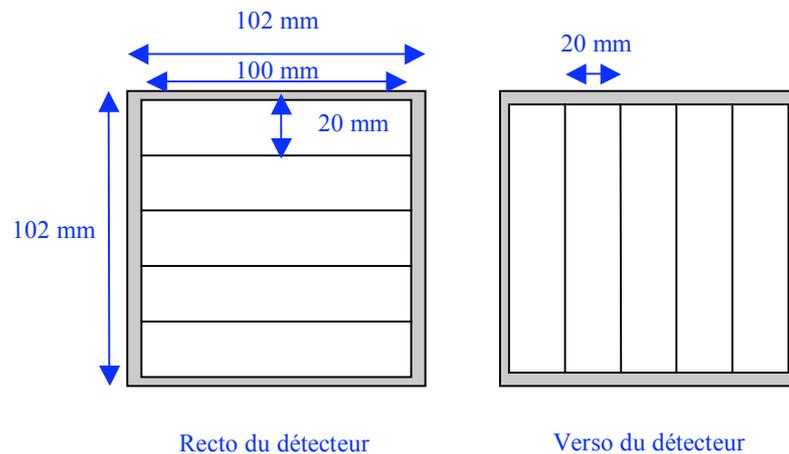
Tableau 3 : Résolution angulaire pour une structure composée de mono cellule de dimensions 20x20 mm.

## II.2) Etude des 3 critères d'amélioration avec la solution multipiste

### II.2.1) Evaluation du nombre de détecteurs (granularité)

Le silicium multipiste double face est un détecteur possédant des voies de mesure indépendantes sur chaque face. Les pistes d'une face à l'autre sont orthogonales. Ainsi l'intersection entre deux pistes est équivalente à un pixel de détection.

Dans le cas de notre étude comparative nous avons choisis un détecteur silicium multipiste ayant la même résolution angulaire que les mono cellules vues précédemment. Le pixel équivalent fera alors 20x20 mm. Les dimensions du silicium multipiste sont représentées figure 19 :



**Figure 19 : Schéma d'un silicium multipiste de 102x102mm.**

Le silicium est constitué de 5 pistes en x sur une face et 5 pistes en y sur l'autre face. La zone grisée représente comme dans le cas de la mono cellule une zone morte.

En appliquant l'équation 3, le nombre de détecteurs est réparti sur les différentes calottes suivant le tableau ci-dessous :

Calotte	Nombre de multipistes
C1	64
C2	112
C3	209
C4A	40
C4B	37
<b>Total</b>	<b>462</b>

**Tableau 4 : Nombre de multipistes sur la structure FAZIA.**

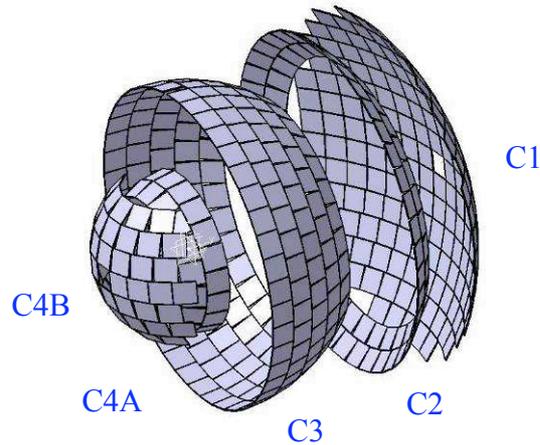


Figure 20 : Structure FAZIA composée de multipistes de 102 x 102 mm.

Il est à remarquer que le nombre de voie électronique sera multiplié par 10 (5 voies sur le plan x et 5 voies sur le plan y de chaque détecteur).

### II.2.2) Evaluation de l'efficacité géométrique

En appliquant l'équation 5, l'efficacité géométrique pour le silicium multipiste 102x102 mm (100x100 mm de zone active) est égale à :

$$\text{Efficacité géométrique} = \frac{(100 \times 10^{-3})^2 \times 462}{4,987} = 0,93 \quad \text{Équation 7}$$

L'efficacité géométrique pour la solution multipiste est alors de 93 %.

### II.2.3) Evaluation de la résolution angulaire

Nous réaliserons notre étude géométrique comparative avec la même résolution angulaire que la solution mono cellule (cf. tableau 3).

### II.3) Analyse comparative

			Efficacité géométrique globale	Résolution angulaire en $\varphi$ et $\theta$	Nombre total de détecteurs (granularité)	Estimation du coût d'un silicium	Estimation du coût des siliciums pour le premier étage (ensemble de la structure)
EXISTANT	INDRA	Silicium segmenté	90%	de 15° à 30° pour $\varphi$ de 1° à 20° pour $\theta$	337	300 €	0,1 M€
PROJET	FAZIA	Silicium mono cellule	80%	de 0,95° à 2,90°	9992	750 €	7,5 M€
	FAZIA	Silicium multipiste double faces	93%	de 0,95° à 2,90°	462 (équivalent à 11 550 pixels)	7 500 €	3,5 M€

**Tableau 5 : Analyse comparative entre le multidétecteur existant et les deux solutions de silicium pour le premier étage de FAZIA.**

La solution mono cellule a l'avantage d'utiliser des cellules autonomes qui évitent les phénomènes d'influences entre les voies de mesure. La résolution angulaire atteint les objectifs de FAZIA. Par contre, la zone de détection est plus faible car la surface des supports mécanique devient plus importante avec le nombre de détecteurs. L'estimation du coût globale pour les siliciums utilisés sur le premier étage serait deux fois plus élevée que la solution multipiste.

L'intérêt d'utiliser des siliciums multipistes est d'une part de réduire les zones mortes dues aux supports mécaniques et d'autre part de diminuer le nombre de voies de mesure (matrice, dans notre cas 4620 voies de mesure au lieu de 9992 voies). Cette diminution de voies de mesure induirait une réduction d'équipement électronique de mise en forme et de traitement de l'information.

Il faut aussi garder à l'esprit que l'ensemble est installé sous vide et que toute diminution de la connectique simplifie l'installation et la maintenance de l'ensemble. Par contre lorsqu'un détecteur multipiste ne fonctionne plus, la surface détériorée est 25 fois plus importante que la solution mono cellule.

La solution multipiste semble présenter beaucoup d'avantages. Il est nécessaire d'étudier son comportement expérimental. Une maquette silicium multipiste sera installée sur un banc de test. Elle sera alors soumise à des particules chargées provenant d'une source étalon (alpha) et de faisceaux d'ions lourds provenant d'un accélérateur. Cette maquette expérimentale nous aidera à caractériser les mesures en énergie et évaluer les phénomènes d'influence entre les voies de mesures.

**Objectif n°1 :**

**Etude géométrique comparative entre le silicium multipiste et le silicium mono cellule.**

**Conclusion n°1 :**

**La solution silicium multipiste présente des avantages en terme :**

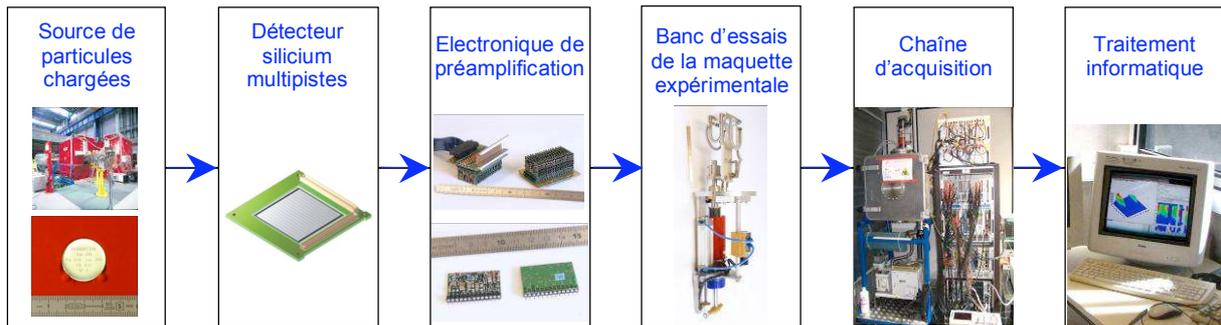
- d'efficacité géométrique**
- de nombre réduit de détecteurs**
- de coût**

## Chapitre III : Phase expérimentale

Dans le chapitre précédent, l'intérêt d'utiliser des siliciums multipistes double face a été présenté. Cependant, des phénomènes d'influence entre les voies de mesures en énergie peuvent exister. Ils sont intrinsèques au détecteur. Pour les quantifier, nous avons mis en place un banc de test permettant d'étudier une maquette silicium multipiste. Dans ce chapitre sera exposée la chaîne de mesure exploitée pour répondre à notre problématique. Ensuite nous caractériserons la résolution en énergie de la maquette expérimentale avec les particules chargées de différentes énergies. Nous terminerons par une évaluation des phénomènes de diaphonies et d'interpistes. Nous verrons qu'ils n'influenceront pas la mesure en énergie.

### III.1) Constitution de la chaîne de mesure de la maquette expérimentale

La chaîne de mesure est composée des différents éléments suivant la figure 21 :



**Figure 21 : Synoptique de la chaîne de mesure.**

La maquette de silicium a été soumise à deux types de particules chargées. Certaines proviennent d'une source radioactive étalon, d'autres d'un accélérateur d'ions lourds (CIME).

Le détecteur silicium multipiste a été installé sur un système mécanique permettant d'une part de refroidir l'électronique de préamplification et d'autre part d'insérer le banc de test sous le faisceau d'ions lourds.

Une électronique de mise en forme convertira les signaux de mesure de pertes d'énergie. Les données ont été ensuite traitées grâce à un système informatique.

### III.2) Les sources de particules chargées utilisées

Dans une première étape, le détecteur silicium sera soumis aux alphas provenant d'une source radioactive d'une énergie moyenne de 6 MeV. Puis, dans un second temps, cette maquette de test sera soumise à différents faisceaux d'ions lourds provenant de l'accélérateur CIME dans une gamme d'énergie variant de 100 MeV à 350 MeV.

#### III.2.1) Détecteur soumis aux rayonnements d'une source radioactive étalon 3 $\alpha$

Les isotopes radioactifs sont des éléments instables. Ils souffrent d'un excès de nucléons ou d'un excès d'énergie. Pour atteindre la stabilité, ils émettent des rayonnements  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ . La source alpha radioactive utilisé, dite trois alphas, est un mélange de trois radio-isotopes (Américium 241, Curium 244, Plutonium 239, cf. figure 22).



Figure 22 : Source radioactive étalon NB 433 (3 alphas).

Chaque radio-isotope émet des alphas d'énergie bien caractéristique. Les énergies sont données par la table des isotopes radioactifs [TORI96] défini dans le tableau ci-dessous :

Elément émetteur	Energie de l'alpha en keV	Pourcentage du type l'alpha
<sup>239</sup> Pu	5105,5	11,94%
	5144,3	17,11%
	<b>5156,59</b>	<b>70,77%</b>
<sup>241</sup> Am	5388	1,66%
	5442,8	13,10%
	<b>5485,56</b>	<b>84,80%</b>
<sup>244</sup> Cm	5762,64	23,60%
	<b>5804,77</b>	<b>76,40%</b>

**Tableau 6 : Distribution en énergie des alphas d'une source étalon 3 pics d'Américium, de Curium et de Plutonium.**

Nous utiliserons les valeurs énergétiques des alphas les plus représentatifs. Elles seront prises comme référence (valeurs surlignées en gras dans le tableau ci-dessus). Le tableau 7 résume alors les caractéristiques principales de la source radioactive utilisée :

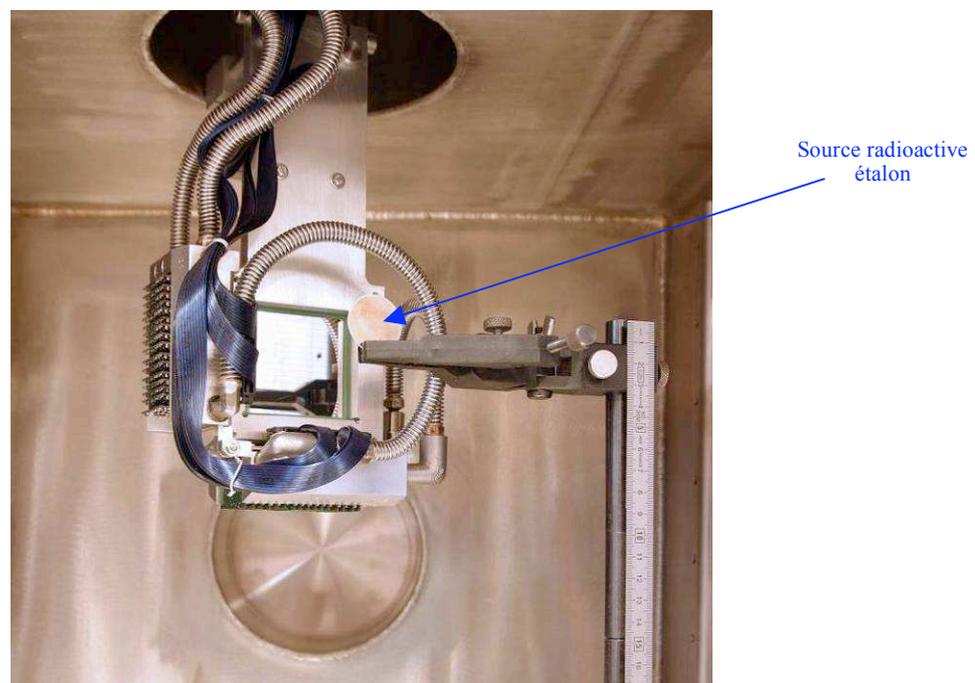
Elément émetteur	Energie de l'alpha en keV	Ecart type absolu sur l'énergie de l'alpha en keV	Ecart type relatif sur l'énergie de l'alpha	Estimation par logiciel (SRIM) de la distance de pénétration dans le détecteur en $\mu\text{m}$
<sup>239</sup> Pu	5156,59	$\pm 0,14$	$\pm 2,7 \times 10^{-5}$	27
<sup>241</sup> Am	5485,56	$\pm 0,12$	$\pm 2,2 \times 10^{-5}$	28
<sup>244</sup> Cm	5804,77	$\pm 0,05$	$\pm 8,6 \times 10^{-6}$	30

**Tableau 7 : Caractéristiques des alphas émis par une source étalon 3 pics d'Américium, de Curium et de Plutonium.**

Pour identifier une particule il est nécessaire de récolter toute son énergie. Avec un seul étage de détection la particule doit s'arrêter dans le capteur. L'estimation par le logiciel SRIM du parcours de pénétration permet de montrer que la particule s'arrête bien dans le silicium (épaisseur de 300  $\mu\text{m}$ ).

L'écart type relatif sur l'énergie des alphas émis par la source est négligeable en comparaison aux ordres de grandeurs de mesure que nous retrouverons plus loin. Elle ne sera donc pas prise en compte lors de nos calculs.

La source étalon radioactive a été installée dans une chambre à vide face au détecteur silicium multipiste (cf. figure 23).



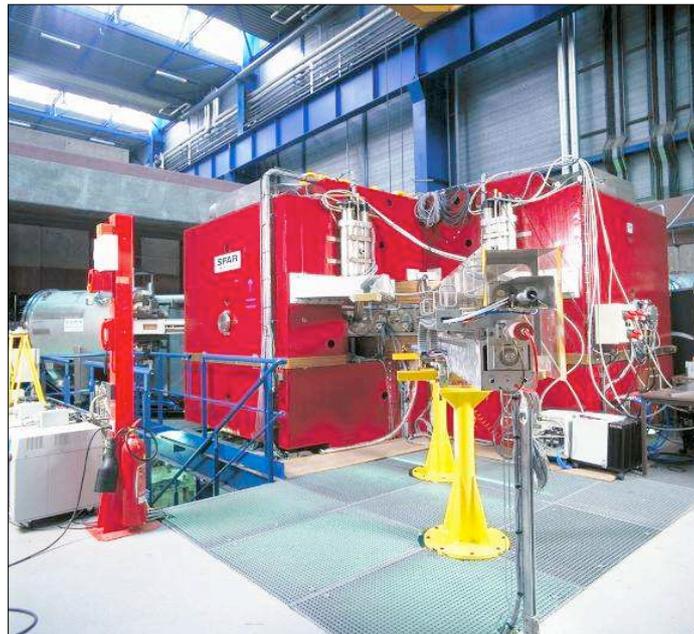
**Figure 23 : Source étalon radioactive placée face au détecteur dans une enceinte à vide.**

Dans ces conditions nous avons réalisé des mesures d'énergie de particules alphas. Elles ont permis d'étudier le comportement du détecteur en fonction de la tension de polarisation et de la température de refroidissement du système. Nous avons pu aussi étudier les phénomènes d'influences entre les pistes avec des particules de faible énergie (6MeV). Cet environnement a été moins « bruyant » que lors de l'expérience sous faisceaux. En effet le système de déclenchement était réglé sur 10mV de seuil (2,8 MeV) pour les mesures en laboratoire contre 60mV de seuil (16,7 MeV) pour les mesures sous faisceaux.

### III.2.2) Mise sous faisceaux de la maquette expérimentale

Les mesures sous faisceaux ont été importantes pour étudier le détecteur avec des particules plus énergétiques (100 – 350 MeV) par rapport aux alphas produits par une source étalon radioactive.

CIME est un cyclotron permettant d'accélérer des ions produits par une source (cf. figure 24).



**Figure 24 : Dans notre étude les ions sont accélérés par un cyclotron (CIME).**

C'est un instrument qui permet de communiquer de l'énergie à des particules chargées et de les guider sur une trajectoire déterminée, grâce à l'action de champs électriques et magnétiques.

Lorsque des particules chargées sont placées entre deux électrodes ayant une différence de potentiel  $V$ , les charges  $q$  reçoivent un gain d'énergie égale à :

$$W = q \times V$$

Équation 8

- $W$  : L'énergie de la particule chargée eV  
 $q$  : La charge électrique en Coulomb  
 $V$  : Tension en volt entre les deux électrodes

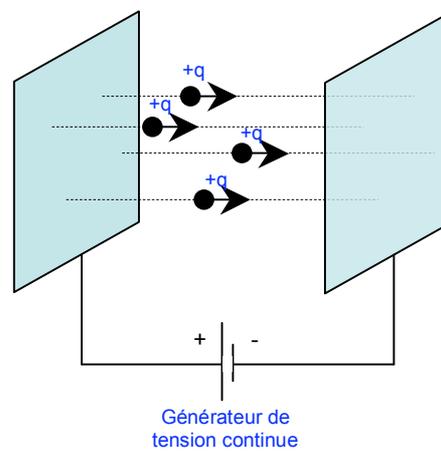


Figure 25 : Accélération de particules chargées grâce à un champ électrique.

D'après ce principe, plus la tension est importante et plus l'énergie transférée à la particule est grande. Pour atteindre des énergies importantes, nous aurions besoin de générateurs fournissant des tensions de l'ordre du milliard de volts, ce qui est dans la pratique impossible. Pour palier à cette contrainte des cyclotrons sont utilisés.

Dans un cyclotron à deux cavités accélératrices (cf. figure 26), les particules injectées au centre sont soumises à un champ électrique haute fréquence pour l'accélération et à un champ magnétique constant pour la déviation.

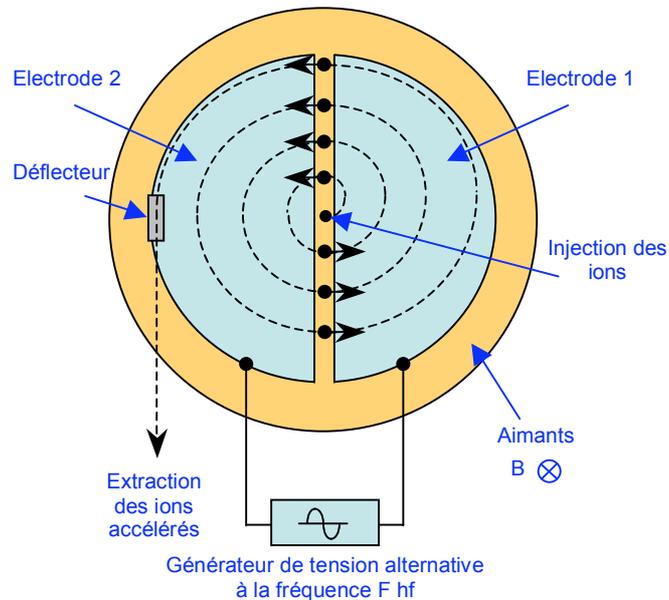


Figure 26 : Principe de fonctionnement d'un cyclotron.

La combinaison des deux champs provoque une trajectoire spiralée des particules accélérées. A chaque passage entre les deux électrodes les particules gagnent de l'énergie. L'extraction des particules accélérées se fait à l'aide d'un déflecteur électrostatique situé sur le rayon extérieur. La fréquence de la tension alternative ( $\frac{1}{T_{hf}}$ ) appliquée sur les électrodes produit des zones d'accélération synchronisées dans le temps (cf. figure 27).

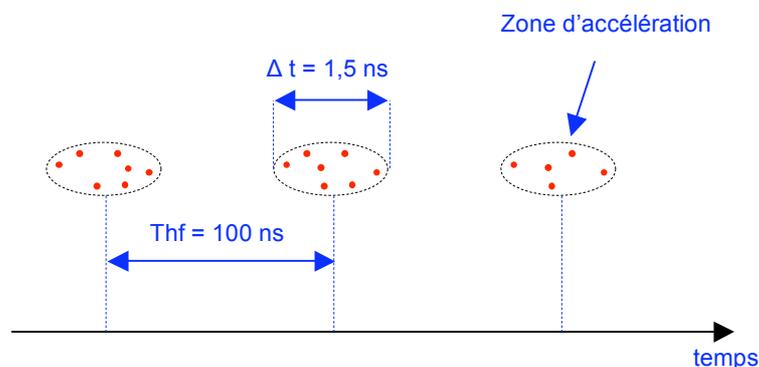


Figure 27 : Zones d'accélération produit à l'intervalle de temps  $T_{hf}$  (fréquence du générateur alternatif).

Durant l'expérience de juin l'intensité du faisceau était de 1000 particules par seconde. Le nombre de particules par paquet est égale à :

$$\text{Nombre\_de\_particules\_par\_paquet} = \frac{\text{Intensité\_du\_faisceau}}{\text{fréquence\_HF}} \quad \text{Équation 9}$$

Dans notre cas, avec une fréquence HF de 10 MHz, le nombre de particules est de  $1 \times 10^{-4}$  particule par paquet. Nous avons donc concrètement 1 particule tous les 10 000 paquets (1 particule toutes les ms). Conclusion, pendant l'expérience, les particules sont arrivées sur le détecteur les unes après les autres.

Les faisceaux d'ions utilisés pendant l'expérience sont décrits dans le tableau suivant :

Ions	Energie de l'ion en MeV	Ecart type relatif sur l'énergie de l'ion	Estimation par logiciel (SRIM) de la distance de pénétration dans le détecteur en $\mu\text{m}$
$^{12}\text{C}$	104,22	$\pm 1 \times 10^{-3}$	206
$^{16}\text{O}$	138,96	$\pm 1 \times 10^{-3}$	165
$^{20}\text{Ne}$	173,70	$\pm 1 \times 10^{-3}$	138
$^{32}\text{S}$	277,92	$\pm 1 \times 10^{-3}$	101
$^{36}\text{Ar}$	312,66	$\pm 1 \times 10^{-3}$	101
$^{40}\text{Ar}$	347,40	$\pm 1 \times 10^{-3}$	98

**Tableau 8 : Les différents types de faisceaux d'ions utilisés pendant l'expérience.**

Les valeurs des écarts types relatifs sur l'énergie de l'ion ont été données par les utilisateurs de l'accélérateur (valeurs par expérience).

Comme pour les alphas, nous travaillons avec un seul étage de détection, les ions doivent intégralement déposer toute leur énergie dans le détecteur. Ils ne doivent pas traverser le capteur. Dans le cas contraire nous ne pourrions pas discriminer correctement les particules. Un logiciel de simulation (SRIM) a permis de vérifier qu'avec ce type de faisceaux le parcours maximum de pénétration ne dépassait pas 300  $\mu\text{m}$  (épaisseur du détecteur).

Pendant neuf jours consécutifs, le détecteur silicium multipiste a été installé auprès de l'accélérateur CIME (cf. figure 28) pour procéder à des mesures d'énergie avec différents types de faisceaux d'ions.

L'ensemble de la chaîne de mesure a été placé dans la salle du cyclotron.

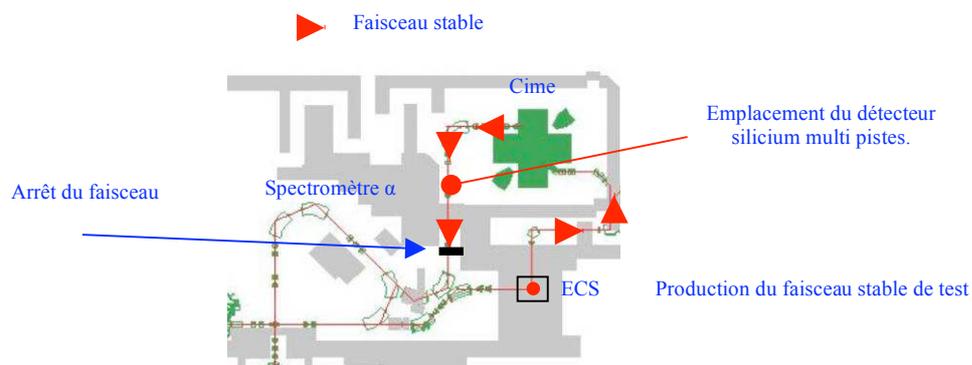


Figure 28 : La situation de l'expérience.

Le détecteur a été installé sur la ligne de transfert (conduite du faisceau) selon la figure 29.

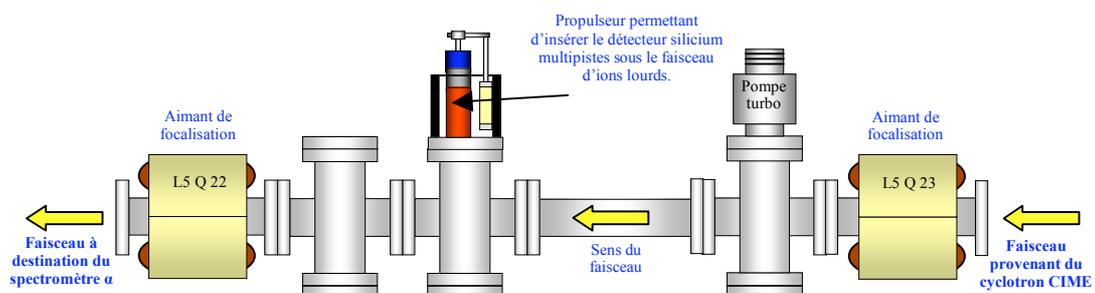


Figure 29 : Implantation du détecteur sur la ligne de transfert.

Pour des raisons de protection radiologique, il est interdit de pénétrer dans une salle lors du fonctionnement de l'accélérateur. Des câbles de liaisons ont été installés entre la chaîne de mesure proche du détecteur et une salle d'acquisition située au sous sol.

Cette installation a permis de contrôler à distance le réglage de certains paramètres sans perturber le système de mesure :

- La commande et le contrôle des paramètres des amplificateurs.
- La mesure de l'intensité du faisceau.
- L'acquisition des données sur un serveur via une connexion Ethernet.
- La commande et le contrôle de l'insertion du détecteur sous le faisceau d'ions.

### **III.3) Le détecteur silicium multipiste**

#### **III.3.1) Principes de fonctionnement du détecteur**

##### **III.3.1.1) L'ionisation du détecteur silicium par une particule chargée**

Lorsqu'une particule chargée traverse la matière, si son énergie cinétique est suffisante, elle ionise, de manière aléatoire, tout au long de son parcours les atomes qu'elle rencontre. Les valeurs typiques d'énergie minimum d'ionisation sont d'environ 3,6 eV dans le silicium à 300 °K [BOU04].

La particule incidente « arrache » des électrons à l'atome. Toute particule chargée pourra arracher des électrons car elle interagit à distance avec eux grâce à l'interaction Coulombienne.

La force créée entre 2 charges électriques (cf. figure 30) est égale à :

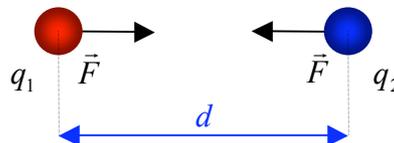
$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2} \quad \text{Équation 10}$$

$F$  : La force Coulombienne en Newtons

$\epsilon_0$  : La permittivité du vide  $\frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$

$q_1$  et  $q_2$  : Les charges électriques en Coulomb.

$d$  : La distance relative entre les deux charges électriques en mètres



**Figure 30 : Représentation de l'interaction Coulombienne entre deux particules chargées.**

La force exercée, par exemple, par un proton incident sur un électron va avoir pour effet de transférer de l'énergie cinétique à cet électron. Il y aura mise en mouvement de l'électron et ralentissement de la particule chargée.

### **III.3.1.2) Les semi-conducteurs**

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la résistivité est comprise entre les isolants et les conducteurs. Ils sont caractérisés par le fait que leur couche électronique superficielle contient quatre électrons (groupe IV dans le tableau périodique). Ils sont isolants à 0°K et leur conductivité augmente avec la température, l'adjonction d'impuretés et lorsqu'ils sont soumis à des rayonnements. Les principaux semi-conducteurs utilisés dans la détection de particules sont le germanium et le silicium.

L'introduction d'impuretés dans le réseau cristallin crée des niveaux d'énergie dans la bande interdite, proche des bandes permises. La résistivité du matériau se trouve ainsi modifiée et un type de conduction est privilégié. Les impuretés introduites dans le silicium sont soit trivalents (type P) soit pentavalents (type N) :

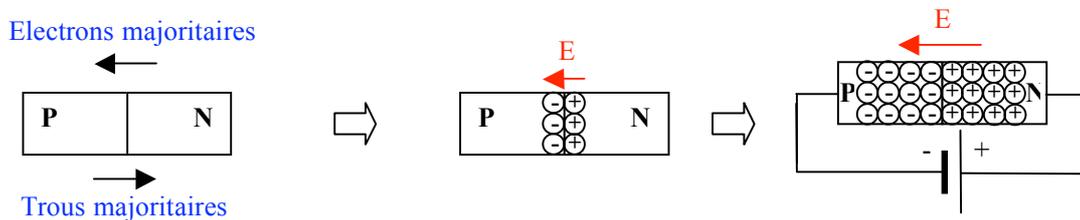
### **III.3.1.3) La jonction PN**

Avec une jonction PN, une zone de résistivité suffisamment élevée est réalisée pour obtenir un courant de fuite de l'ordre du nA. Elle se forme au contact de deux zones de dopages différents.

A l'interface, il y a diffusion de porteurs de charges majoritaires d'une zone vers l'autre. Les électrons de la zone N diffusent vers la zone P et les trous de la zone P diffusent vers la zone N. Il se crée ainsi une zone où il ne reste plus aucun porteur libre.

Elle se nomme « zone de déplétion » (traduction en anglais : épuisement, typiquement de l'ordre de 100 porteurs par  $cm^3$  au lieu de  $10^{10}$  dans le silicium de haute pureté).

Une tension inverse aux bornes de la jonction PN permettra d'augmenter cette zone (cf. figure 31). Ces ions produisent un champ électrique provoquant l'apparition d'une barrière de potentiel. La zone de déplétion est la partie utile du détecteur.



**Figure 31 : Diffusion des porteurs sur une jonction PN.**

Lorsque les particules chargées traversent le détecteur silicium, il y a création de paires électron-trou principalement dues à la force coulombienne (l'ionisation). L'énergie nécessaire pour la création d'une paire électron-trou dans le silicium est de 3,6 eV à 300 °K.

L'énergie déposée par la particule dans le détecteur produira une charge  $Q$  égale à :

$$Q = \frac{W_d}{W_p} \times q_e \quad \text{Équation 11}$$

- $Q$  : La charge déposée dans le détecteur en Coulomb
- $W_d$  : L'énergie déposée par une particule incidente dans le détecteur en eV
- $W_p$  : L'énergie pour former une paire électron trou dans le silicium égale 3,6 eV
- $q_e$  : La charge élémentaire égale à  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulomb

Dans notre étude nous utiliserons des jonctions asymétriques de type  $P^+N$ . Elles sont fabriquées avec un silicium de type N où l'on implante sur une faible épaisseur (quelques dizaines de nanomètres) une forte concentration d'impuretés de type P. En appliquant une polarisation inverse, la zone de déplétion est considérée comme être entièrement dans la zone N.

#### III.3.1.4) Le détecteur silicium multipiste double faces

Le détecteur silicium multipiste double faces est utilisé pour la localisation de particules. Il est segmenté de chaque côté par des bandes isolées entre elles par une couche de dioxyde de silicium  $SiO_2$ . Ces pistes sont orthogonales d'un plan à l'autre. Le fonctionnement de chaque piste est équivalent à celui d'une jonction  $P^+N$ .

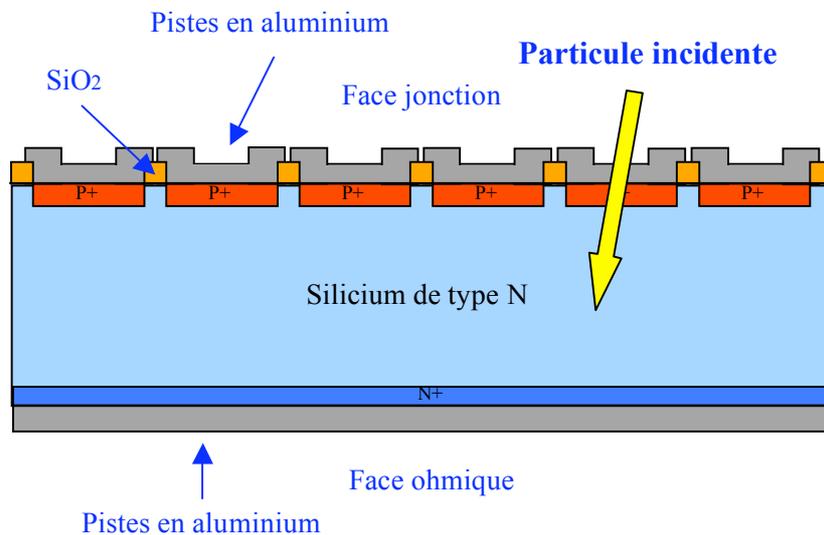


Figure 32 : Coupe transversale du détecteur silicium à pistes.

Nous pouvons remarquer que du côté de la face ohmique, des fortes zones de dopage N que l'on note  $N^+$ . Ces zones permettent d'avoir un meilleur contact au niveau de la piste et donc une meilleure collection des charges.

Lorsqu'une particule chargée traverse le détecteur deux pistes récupèrent les charges produites par l'ionisation du silicium. C'est à l'intersection de ces deux pistes que la réaction a lieu. Nous reconstituerons par analyse des données la position de chaque impact.

### **III.3.2) Choix du détecteur**

D'une manière générale, obtenir un détecteur silicium avec des caractéristiques non standard entraîne des délais de fabrication très longs (de l'ordre de 6 à 8 mois). Or, la période accordée pour réaliser les mesures avec le faisceau du GANIL avait été planifiée pour le mois de juin 2006 (4 mois de délai après le choix du détecteur). Nous étions donc très limités dans le temps et nous n'aurions pas pu disposer du silicium spécifié.

Néanmoins, afin de répondre à la problématique posée, il était possible d'utiliser un détecteur multipiste avec une géométrie très proche mais disponible. L'entreprise choisie pour la fabrication du détecteur silicium multipiste est *Micron semiconductors*, implantée en Angleterre.

*Micron semiconductors* avait à sa disposition un détecteur silicium d'une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$ , de surface active de 50 x 50 mm, segmenté en 16 pistes de chaque côté.

Les caractéristiques du constructeur du détecteur silicium multipiste sont :

Nombre de voies dans le plan x : 16

Nombre de voies dans le plan y : 16

Taille de la zone de détection : 50 x 50 mm

Epaisseur du silicium : 300  $\mu\text{m}$

Tension de déplétion : 30 V

Capacité électrique équivalente par voie (par piste) de mesure : 60 pF

Le support mécanique permettant de maintenir le silicium disponible chez *Micron semiconductor* ne correspondait pas à nos exigences car les pistes de connexion sur circuit imprimé (PCB : Printed Circuit Board) entre le silicium et le connecteur avaient des longueurs totalement différentes (cf. figure 33 n°1).

Un nouveau modèle a été étudié au sein du GANIL puis réalisé en fonction de nos exigences par l'entreprise *Micron semiconductor* dans le but d'obtenir un routage des pistes les plus courtes possibles et les plus homogènes en longueur.

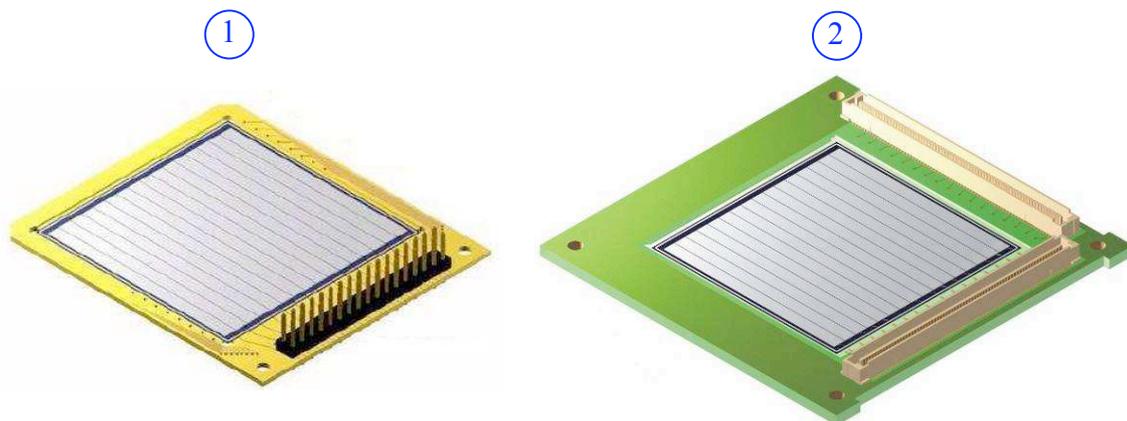


Figure 33 : N°1 Silicium avec PCB standard, n°2 silicium avec PCB GANIL.

### III.4) L'électronique de préamplification

#### III.4.1) Principes de fonctionnement de l'électronique

##### III.4.1.1) Les préamplificateurs de charges

Comme cela a été exposé précédemment, la chaîne de mesure comprend le détecteur et un ensemble de fonctions électroniques permettant d'estimer au mieux la grandeur physique à mesurer. Pour la définir, il est nécessaire de disposer d'un modèle électrique du détecteur.

Un détecteur soumis à un rayonnement est équivalent à un générateur de courant dont la durée de l'impulsion de courant est liée au temps de transit des charges dans le détecteur. La forme de l'impulsion  $i_s(t)$  créée est indépendante de l'électronique de lecture. Afin de fixer les idées, évaluons la charge électrique  $Q$  produite dans le détecteur par une particule déposant une énergie totale  $W_d$  de 1 MeV. Sachant que l'énergie nécessaire pour la création d'une paire électron trou dans le silicium est de  $W_p$  3,6 eV (à 300°K), la charge induite par la particule est :

$$Q = \frac{W_d}{W_p} \times q_e = \frac{1 \times 10^6}{3,6} \times 1,6 \times 10^{-19} = 44,4 \times 10^{-15} C = 44,4 \text{ fC} \quad \text{Équation 12}$$

- $Q$  : La charge déposée dans le détecteur en Coulomb
- $W_d$  : L'énergie déposée par une particule incidente dans le détecteur en eV
- $W_p$  : L'énergie pour former une paire électron trou dans le silicium égale 3,6 eV
- $q_e$  : La charge élémentaire égale à  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulomb

Pour mesurer une quantité de charges électriques aussi faible, il est indispensable d'utiliser un préamplificateur.

Ce dernier doit prélever et amplifier l'information de la perte d'énergie dans le détecteur le plus fidèlement possible. D'autre part, il doit rendre la mesure indépendante des caractéristiques du détecteur.

Il existe 3 types de préamplificateur ; courant, tension et charges. Le préamplificateur de charge (PAC) est celui qui est le plus utilisé dans la spectrométrie car il présente un très bon rapport signal sur bruit. C'est celui qui a été retenu pour notre application.

Idéalement, le préamplificateur de charges fournit une tension proportionnelle à la charge électrique qu'il reçoit en entrée.

Pour compléter le modèle électrique de l'ensemble détecteur-électronique, la capacité équivalente du détecteur  $C_{\text{det}}$  est introduite avec le réseau de contre réaction du préamplificateur ( $C_r, R_r$ ). A ce niveau, le préamplificateur lui-même est considéré comme un amplificateur différentiel de gain  $A_0$  et de bande passante infinie qui satisfait à la relation :

$$v_s(t) = A_0(V^+(t) - V^-(t)) \quad \text{Équation 13}$$

$v_s(t)$  : La tension de sortie du préamplificateur en Volt

$A_0$  : Le gain en boucle ouverte

$V^+(t)$  : La tension de saturation positive en Volt

$V^-(t)$  : La tension de saturation négative en Volt

Ainsi, le détecteur couplé au préamplificateur peut être schématisé par la figure ci-dessous :

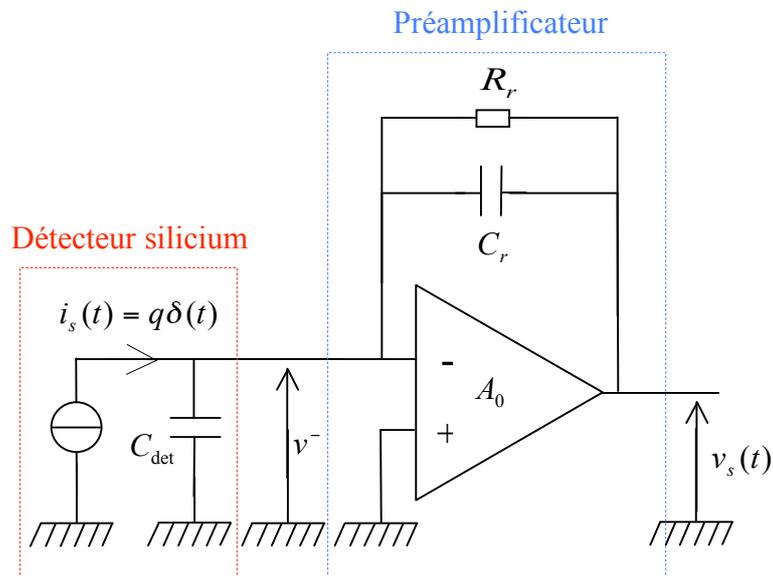


Figure 34 : Schéma équivalent du détecteur associé au préamplificateur.

Si le gain en boucle ouverte  $A_0$  de l'amplificateur constituant le préamplificateur de charge respecte la relation suivante [KNO89] :

$$A_0 \gg \frac{(C_{det} + C_r)}{C_r} \quad \text{Équation 14}$$

$A_0$  : Le gain en boucle ouverte

$C_{det}$  : La capacité électrique équivalente du détecteur en Farad

$C_r$  : La capacité électrique équivalente de la boucle de retour de l'amplificateur en Farad

Alors, la tension de sortie du préamplificateur est égale à (cf. annexe D) :

$$v_s(t) \approx -\frac{Q}{C_r} \times e^{\frac{-t}{R_r C_r}} \quad \text{Équation 15}$$

- $v_s(t)$  : La tension de sortie du préamplificateur en Volt  
 $t$  : Le temps en seconde  
 $Q$  : La charge électrique en Coulomb  
 $R_r$  : La résistance de la boucle de retour de l'amplificateur en ohm  
 $C_r$  : La capacité électrique équivalente de la boucle de retour de l'amplificateur en Farad

La charge électrique  $Q$  apparue sur  $C_{\text{det}}$  est transférée intégralement sur la capacité électrique de contre réaction  $C_r$  (cf. figure 34). Afin d'éviter une saturation en sortie du préamplificateur (dû à une intégration continue de charges présentées à son entrée), une résistance  $R_r$  est mise en parallèle sur la capacité de contre réaction  $C_r$ , dont la constante de temps ( $\tau = R_r \times C_r$ ) est déterminée en fonction du taux de comptage estimé par l'expérience.

### III.4.1.2) La sensibilité des préamplificateurs

Si  $A_0$  est grand (de l'ordre de  $10^5$  par exemple), la tension de sortie est pratiquement indépendante de la capacité électrique équivalente du détecteur. La sensibilité du préamplificateur couplé à un détecteur silicium est égale à :

$$S = \frac{10^6}{3,6} \times \frac{1,6 \times 10^{-19}}{C_r} \approx \frac{44,4}{C_r} \quad \text{Équation 16}$$

Avec la sensibilité  $S$  en mV/MeV et la capacité  $C_r$  en pF.

Dans notre cas, la valeur de la capacité électrique de contre réaction est de 12 pF, la sensibilité est ainsi égale à 3,6 mV/MeV.

### III.4.1.3) Influence du taux de comptage

La contre réaction du préamplificateur est composé d'une capacité  $C_r$  en parallèle sur une résistance  $R_r$ .

D'après l'équation 15, ces deux caractéristiques constituent la constante de décroissance  $\tau$  du signal de sortie  $v_s(t)$ . La figure 35 représente la réponse en tension du préamplificateur de charge à une interaction (aussi appelé événement) dans le détecteur silicium :

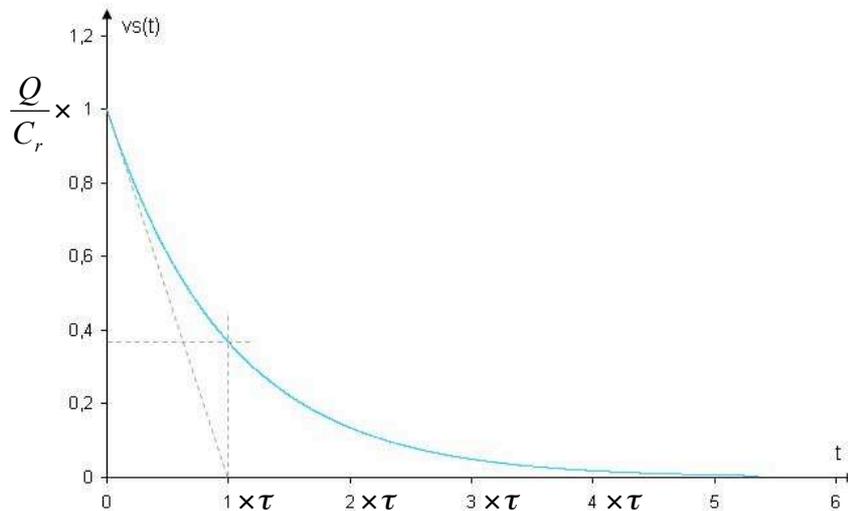
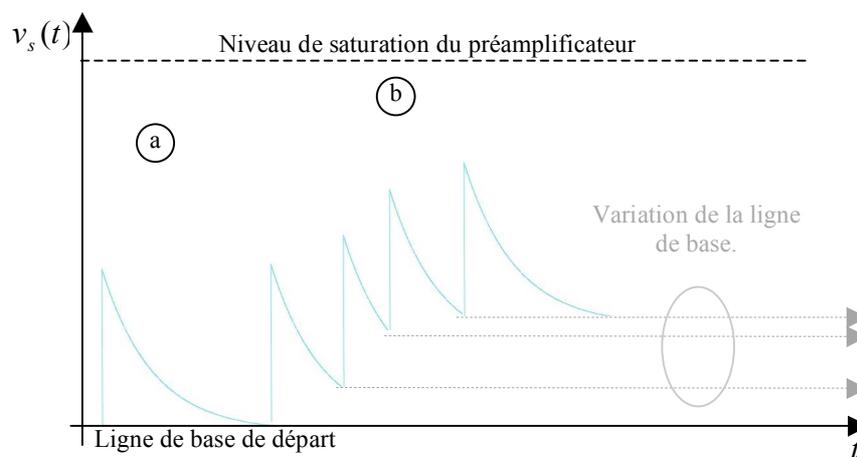


Figure 35 : Représentation du signal de sortie du préamplificateur.

Dans notre cas, avec une résistance  $R_r$  de 10 M $\Omega$  et une capacité électrique  $C_r$  de 12 pF la constante de décroissance est de 120  $\mu$ s.

Au bout de  $3 \times \tau$ , il ne reste plus que 5% de la valeur de  $\frac{Q}{C_r}$ . Ainsi le signal est considéré comme négligeable après 360  $\mu\text{s}$ . De plus les particules arrivent sur le détecteur complètement aléatoirement. De ce fait, les signaux induits par chacune d'entre elles peuvent entraîner des empilements et par conséquent provoquer des fluctuations de la ligne de base (pied de l'impulsion) comme la figure 36 l'illustre.



**Figure 36 : La zone a représente un évènement, la zone b représente un empilement d'évènements.**

Pendant l'expérience réalisée en juin, l'intensité du faisceau n'a pas dépassé 1000 coups par seconde. Cette limitation a été d'une part choisie pour éviter le phénomène évoqué précédemment et d'autre part décidée pour réduire la détérioration du détecteur silicium que pourrait produire un faisceau trop intense (cf. annexe E).

### III.4.1.4) Couplage entre le détecteur et les préamplificateurs

La polarisation du détecteur silicium multipiste est réalisée par un module commercial de type Silena (quad bias supply) réglé à  $-40\text{ V}$ . D'un point de vue liaisons électrique, c'est par les préamplificateurs de charge du plan y et les préamplificateurs de charge du plan x que le détecteur silicium multipiste est alimenté.

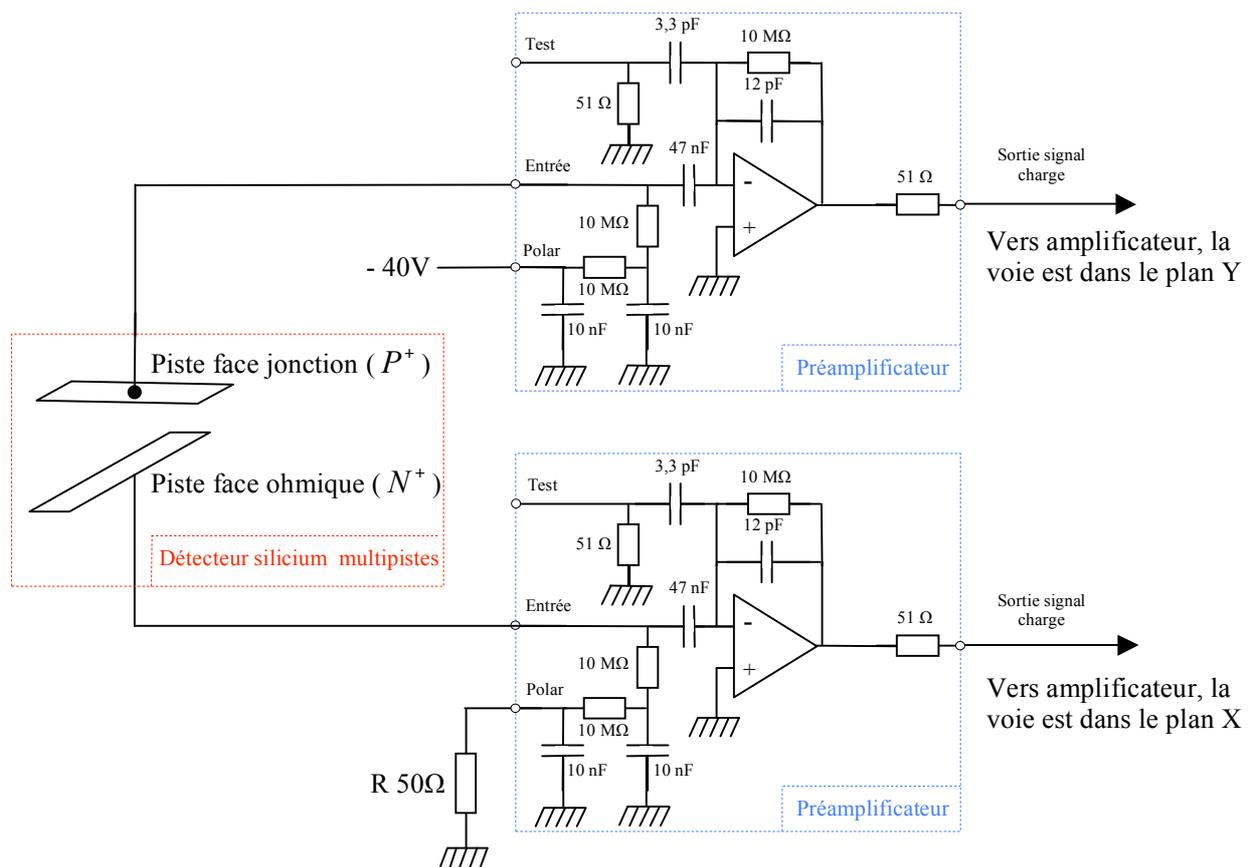


Figure 37 : Schéma de couplage entre le détecteur et les préamplificateurs, ici deux voies de mesures sont représentées, dans la réalité il y en a 16 fois plus.

## III.4.2) Réalisation de l'électronique

### III.4.2.1) Les préamplificateurs

L'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO) a réalisé 32 préamplificateurs. Ils ont été conçus sur de petits circuits imprimés appelé « carte fille » (cf. figure 38) :

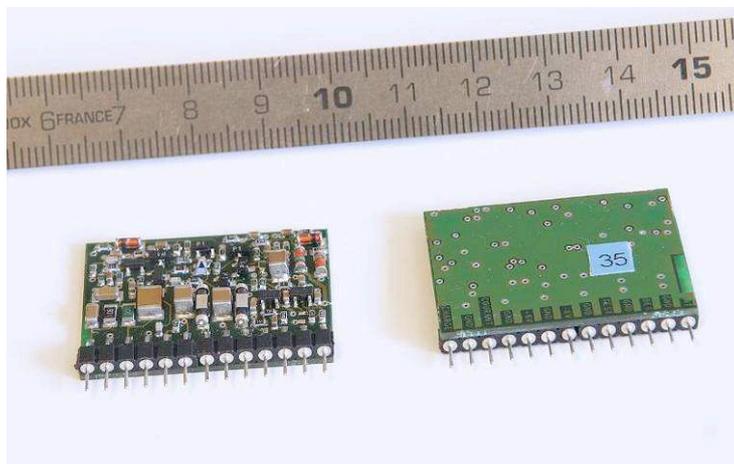


Figure 38 : Vue de face et de dos du préamplificateur de charges.

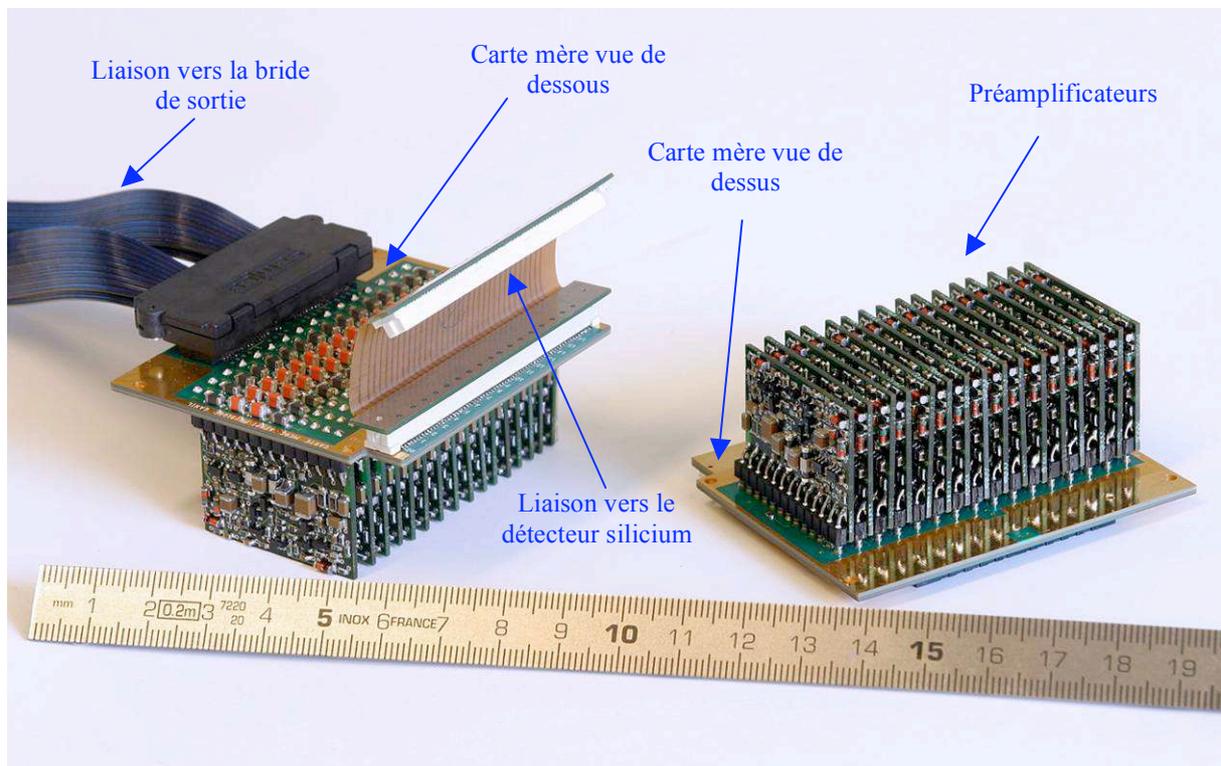
Les dimensions ont été optimisées pour réduire l'encombrement de l'ensemble. Un repérage des entrées sorties est effectué sur la face arrière du circuit imprimé. Les cartes fille sont à connecter verticalement sur la carte mère.

Les caractéristiques des 32 préamplificateurs sont :

- sensibilité : 3,6 mV/MeV
- Energie maximum mesurée : 600 MeV
- constante de décroissance : 120  $\mu$ s
- dimension : 25 mm x 35 mm
- Tension d'alimentation  $\pm 6$  V

### III.4.2.2) Les cartes mères

Les cartes mères regroupant les préamplificateurs et la connectique ont été conçus et fabriqués au GANIL. Afin de minimiser la longueur des câbles entre le détecteur silicium et les préamplificateurs, les cartes mères seront placées au plus près du détecteur. Il y aura deux cartes, une pour le plan x et une pour le plan y. Ainsi chaque carte mère aura 16 cartes filles (preamplificateur) connectées dont les dimensions sont 60 x 70 mm.



**Figure 39 : Photos de deux cartes mères couplées chacune de 16 préamplificateurs.**

Deux nappes de 80 coaxiaux (SAMTEC) sont utilisées entre les deux cartes mères et la bride de sortie. Cette technologie garanti une bonne fiabilité et permet un gain de place conséquent.

### III.5) Banc d'essais du détecteur expérimental

Le banc d'essais de la maquette expérimentale peut être symbolisé par la figure 40.

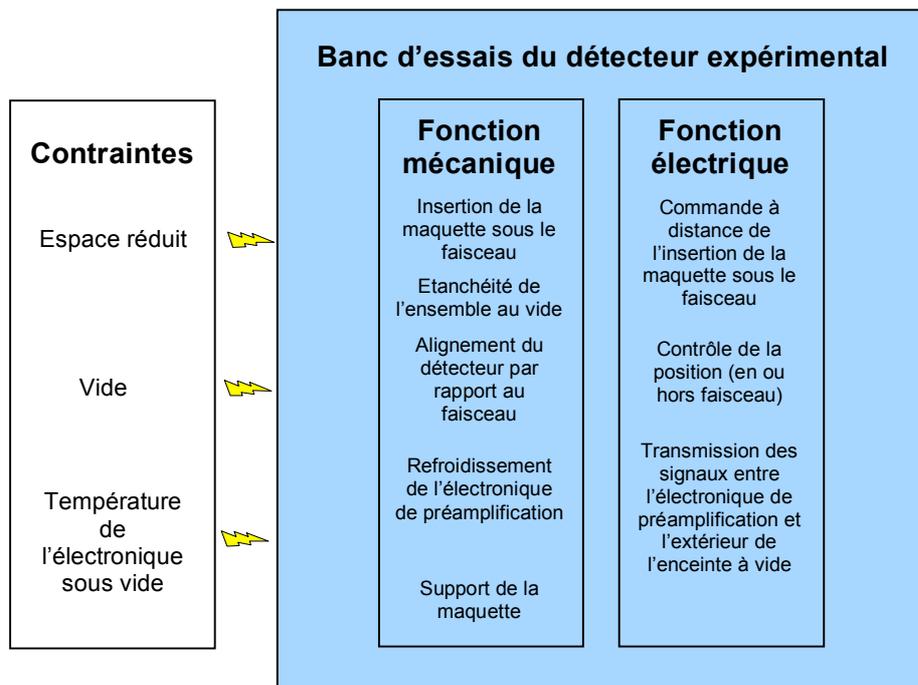


Figure 40 : Schéma fonctionnel du banc d'essais de la maquette expérimentale.

#### III.5.1) Les fonctions mécaniques

##### III.5.1.1) Système d'insertion du détecteur sous le faisceau

Comme nous l'avons vu dans la présentation générale, la maquette expérimentale a été placée sur la ligne de conduite du faisceau en sortie de l'accélérateur CIME (cf. section I.5.3). Le détecteur étant interceptif, nous avons mis en place un système d'insertion permettant d'une part de protéger le diagnostique et d'autre part de ne pas perturber le réglage du faisceau.

Ce système permet d'assurer un mouvement de translation tout en conservant l'étanchéité nécessaire au vide (cf. figure 41).

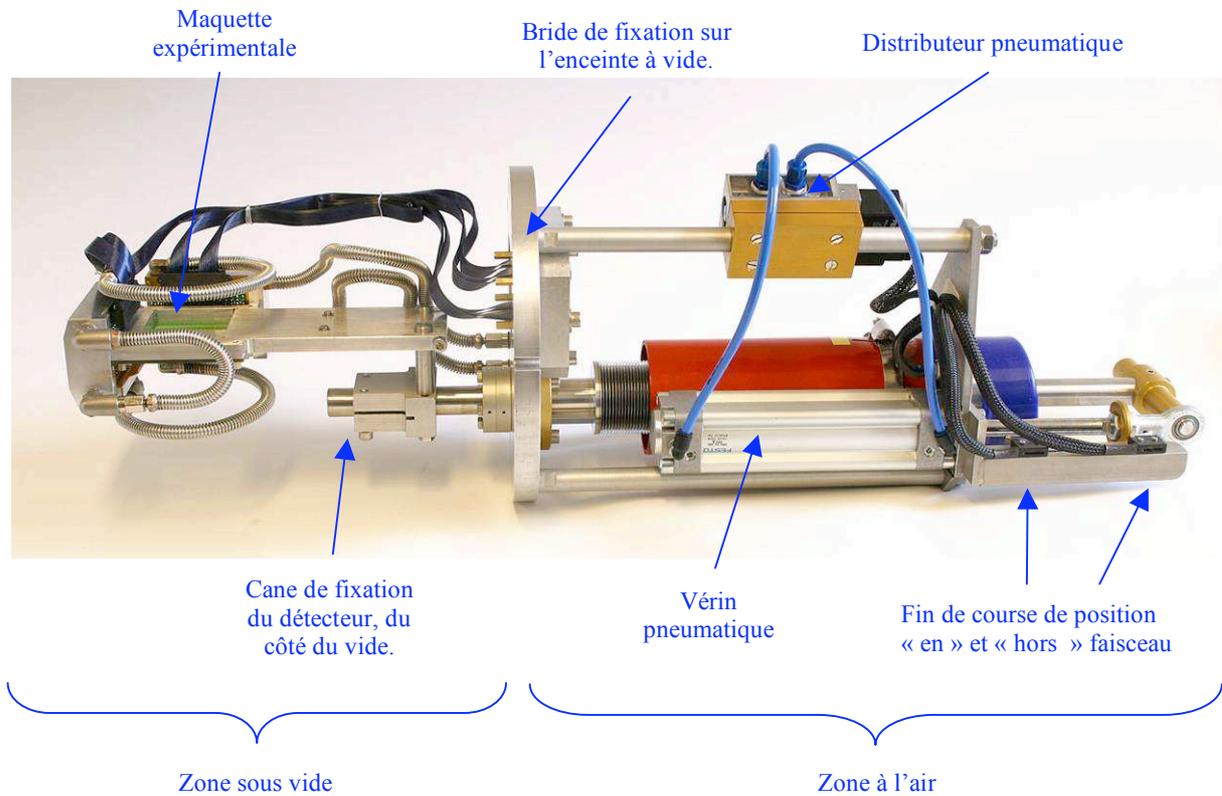


Figure 41 : Ensemble de détection.

### III.5.1.2) Etanchéité de l'ensemble au vide

Un test de fuite permet de contrôler l'étanchéité du système destiné à être mis sous vide. Pour cela nous avons utilisé un détecteur de taux d'hélium. L'hélium est un élément chimique monoatomique non toxique et pratiquement inerte. Ses noyaux sont très petits et permettent de détecter des fuites d'un taux pouvant atteindre  $1 \times 10^{-10} \text{ mbars.l.s}^{-1}$  (mesure de flux gazeux d'hélium). Le système à tester est placé sous vide par le détecteur de fuite. Dans un même temps on envoie dans l'air à proximité des zones à tester un jet d'hélium. A la moindre défaillance d'étanchéité le système signale la présence d'hélium dans l'enceinte à vide.

### III.5.1.3) Alignement de la maquette par rapport à l'axe théorique du faisceau

Le système mécanique est réglé de manière à centrer la maquette expérimentale par rapport à l'axe théorique du faisceau. La position du détecteur est ensuite déterminée par des relevés topo métriques.

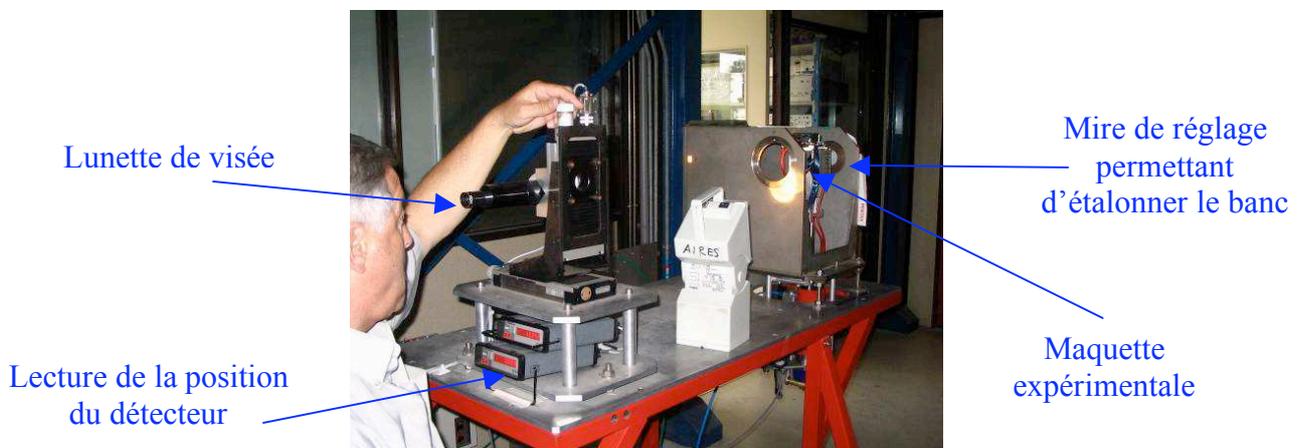
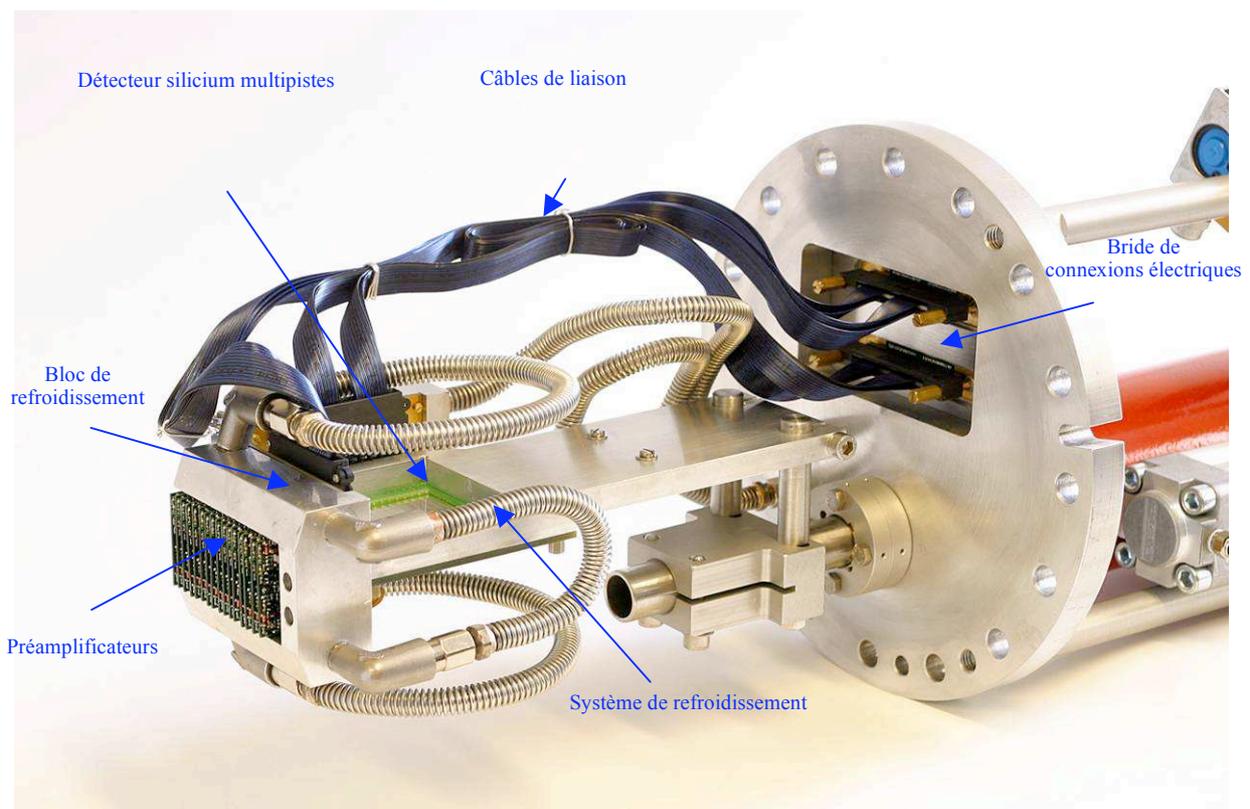


Figure 42 : Alignement du détecteur silicium multipiste.

### III.5.1.4) Refroidissement de l'électronique de préamplification

Le système de détection comprend 32 préamplificateurs. Ils sont alimentés sous  $\pm 6$  V et la consommation est de 300 mW par préamplificateur. La puissance consommée totale du système de préamplification est d'environ 10 W. De plus, pour éviter toute déformation du signal, les préamplificateurs sont placés au plus près du silicium, donc sous vide.

4 blocs d'aluminium traversés par un liquide réfrigéré sont placés au contact des cartes mères, support des préamplificateurs (cf. figure 43). Le liquide est refroidi par un cryothermostat autonome régulé (LAUDA écoline staredition RE105, liquide kryo40 silicone). La puissance de refroidissement du système est de 500 W [LAU05] ce qui est largement suffisant pour dissiper les 10 W consommés par l'électronique de préamplification.



**Figure 43 : Partie du détecteur sous vide.**

## III.5.2) Les fonctions électriques

### III.5.2.1) Commande contrôle du système d'insertion

Un système électropneumatique permet de contrôler à distance l'insertion de la maquette expérimentale sous le faisceau. La position est contrôlée par deux contacts électriques nous informant de l'état du système.

### III.5.2.2) Bride de connexions électriques air-vide

Le détecteur silicium et les préamplificateurs (avec les cartes mères) sont placés sous vide pendant l'expérience. Il est donc nécessaire d'avoir une bride capable de relier les 134 conducteurs (polarisations, alimentations, signaux de sortie charge, signaux d'entrée test) tout en respectant l'étanchéité au vide et en optimisant l'encombrement de la connectique. La figure 44 représente une vue en coupe de la bride de connexion fabriquée au GANIL :

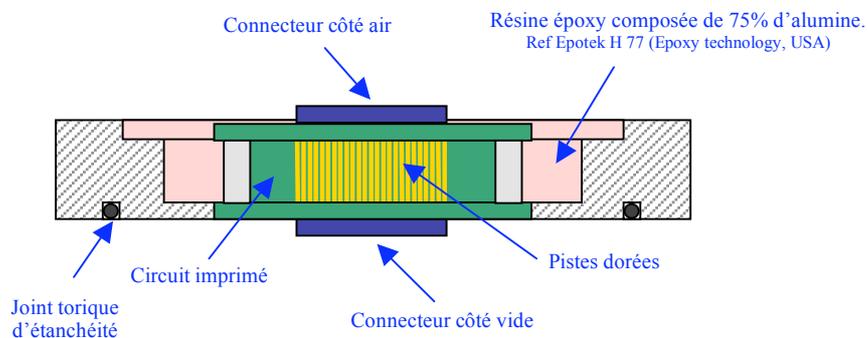


Figure 44 : Vue en coupe de la bride étanche de connexion électrique.

### III.6) La chaîne d'acquisition

#### III.6.1) Principe de fonctionnement de la chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition (en aval des préamplificateurs) est constituée de deux modules commerciaux de type *C.A.E.N.* composant chacun 16 voies indépendantes d'amplification. Chacune de ces voies comprend deux sorties, une en énergie et une en temps. La sortie en énergie délivre un signal dont l'amplitude est proportionnelle à l'énergie déposée dans le détecteur. Ce signal est dirigé vers un codeur d'amplitude (ADC : Amplitude Digital Converter), convertisseur qui transforme l'amplitude d'un signal analogique en une donnée numérique. Pour numériser un signal avec un ADC, il est nécessaire de lui en donner l'ordre. Ceci est effectué par le signal de temps qui est connecté au système de déclenchement de l'ADC. Enfin, le codeur d'amplitude (ADC) transfèrera le signal ainsi traité vers un ordinateur d'acquisition.

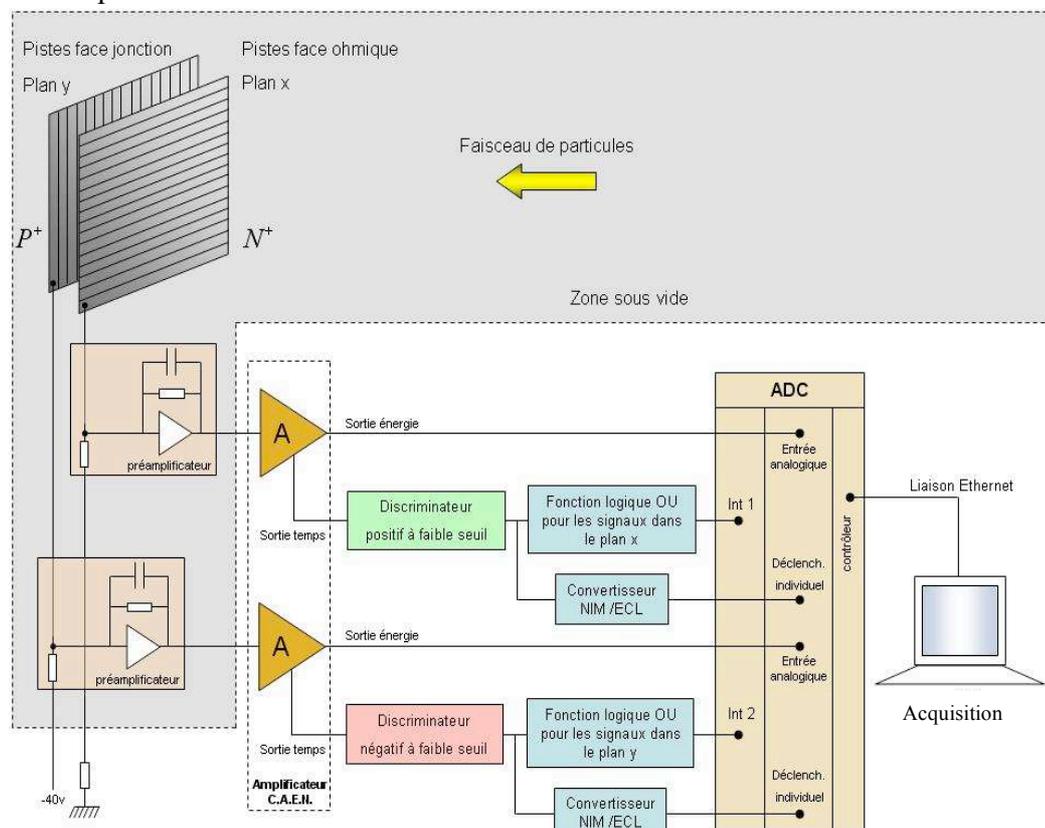


Figure 45 : Schéma de la chaîne d'acquisition pour une voie dans le plan x et une autre dans le plan y.

### III.6.2) Amplification et mise en forme du signal

A la sortie du préamplificateur, nous disposons d'un signal dont l'amplitude est encore relativement faible (une dizaine de mV par MeV). Il est donc indispensable d'amplifier ces signaux en gardant une excellente linéarité. En plus de réaliser la fonction d'amplification, ce module assure la fonction de filtrage (mise en forme du signal) afin d'améliorer le rapport signal sur bruit. Lorsqu'il est couplé avec le préamplificateur, l'ensemble de la chaîne électronique peut être représenté selon la figure 46:

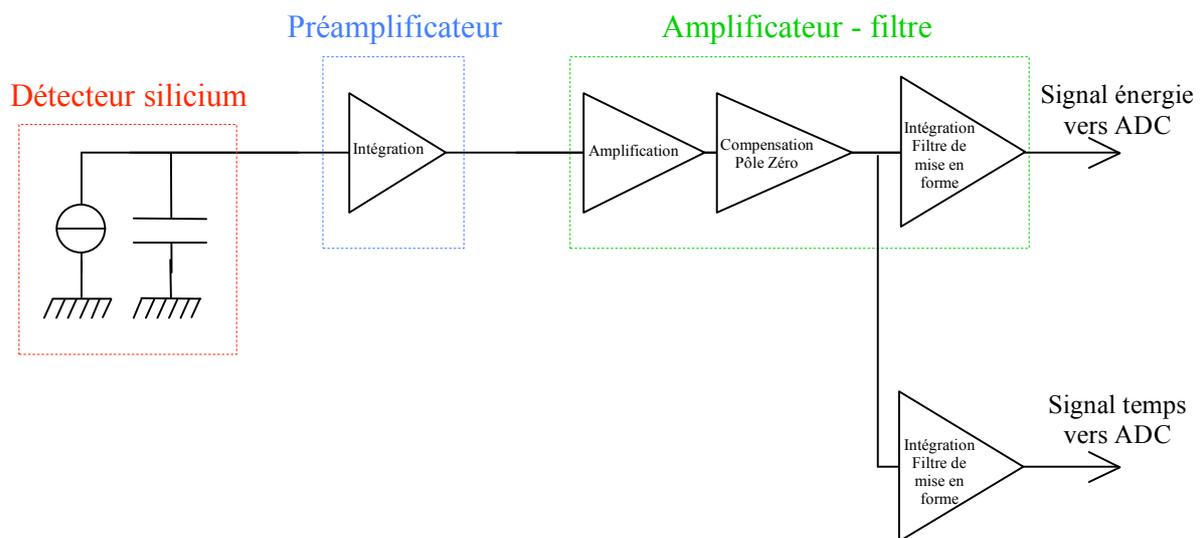


Figure 46 : Schéma de principe de la chaîne analogique de mesure à savoir : détecteur, préamplificateur, amplificateur.

L'amplificateur filtre peut se décomposer en trois étages :

- Amplification :

Le signal à l'entrée de l'amplificateur - filtre est multiplié par un facteur d'échelle. Cette amplification est généralement obtenue par plusieurs amplificateurs mis en cascade pour éviter de diminuer la bande passante tout en obtenant un gain important.

- Compensation pôle zéro :

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. section III.4.1.3), l'intégration dans le préamplificateur donne lieu à un pôle dominant ( $\frac{1}{R_r C_r}$ ). Il doit être annulé afin de réduire l'encombrement temporel de l'impulsion présente à l'entrée du circuit de mise en forme.

- Le filtre de mise en forme :

Cette étage réalise plusieurs intégrations successives, afin d'obtenir, un rapport signal sur bruit optimum.

### III.6.3) Les signaux de déclenchement

La sortie analogique temps de l'amplificateur est utilisée pour déclencher l'ADC. Au préalable il est nécessaire de le mettre en forme par l'intermédiaire d'un discriminateur. Ce système permet de définir un seuil de déclenchement du signal d'entrée. Le signal « numérique » de sortie sera de type NIM (Nuclear Instrument Module) dont le niveau logique bas est 0 V (pas de signal) et le niveau logique haut est à -800 mV (ce qui correspond à 16 mA sous 50  $\Omega$ ). Ainsi lorsque le signal d'entrée dépasse le seuil réglé sur le discriminateur, le système fournit un signal de sortie de -800 mV dont la durée est au préalable réglée sur le discriminateur.

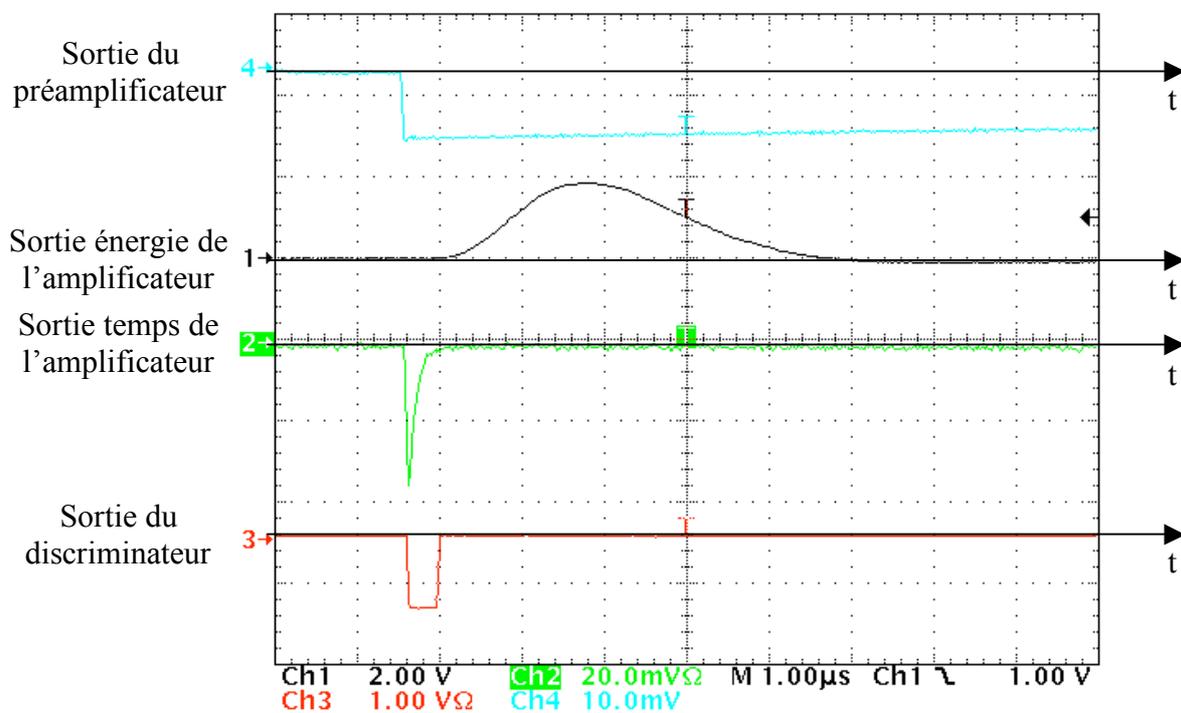


Figure 47 : Signaux mesurés en divers point de la chaîne électronique. Le détecteur est soumis à une source alpha.

Le signal énergie en sortie du circuit de mise en forme est proche d'une gaussienne (optimisation du rapport signal sur bruit). Le signal en sortie du discriminateur est bien au même instant que le signal temps et va pouvoir déclencher le système d'acquisition.

### III.6.4) Le codeur d'amplitude

Le codeur est la dernière partie de la chaîne d'acquisition. Il permet de convertir une information analogique en une grandeur numérique. Le codeur d'amplitude (ADC ; Amplitude Digital Converter) mesure l'amplitude de l'impulsion analogique avec un détecteur de crête (cf. Figure 48). L'ADC fournit ensuite une tension proportionnelle à l'amplitude.

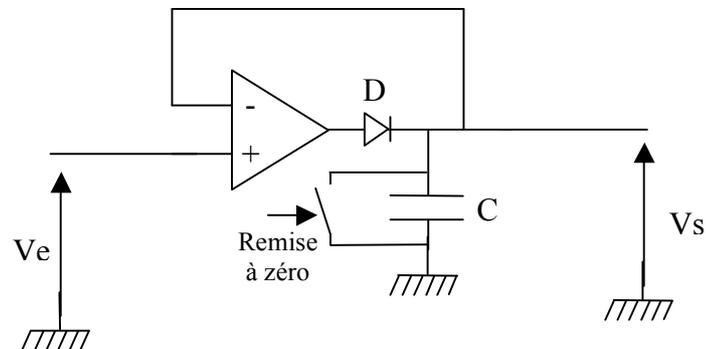


Figure 48 : Schéma de principe du détecteur de crête.

Tant que la tension d'entrée  $V_e$  augmente le système se comporte comme un suiveur inverseur ( $V_e = -V_s$ ).

Lorsque la tension d'entrée diminue, la diode se comporte comme un interrupteur ouvert et le système n'est plus bouclé. La capacité  $C$  reste chargée à la tension maximum. Le système conserve la valeur de la tension d'entrée et la numérise. Une fois l'information récupérée, la capacité  $C$  est déchargée par un interrupteur de remise à zéro.

### III.7) Le traitement informatique

La tension numérisée par le codeur d'amplitude est transférée, par réseau Ethernet, vers un serveur d'enregistrement des données. Il est possible d'interroger ce serveur, soit en temps réel, soit à posteriori. Dans les deux cas, la représentation que donne l'informatique est sous forme de spectre d'énergie réparti sur un certain nombre de canaux. Chaque canal représente une tension mesurée à l'entrée de l'ADC proportionnelle à la perte d'énergie de la particule chargée dans le détecteur. Le codeur d'amplitude fonctionne avec une tension d'entrée pouvant varier de 0 à 10 V. Cette information est ensuite restituée sur une gamme de 16 000 canaux. Ainsi, un canal représente 0,625 mV mesuré en entrée de l'ADC (cf. figure 49).

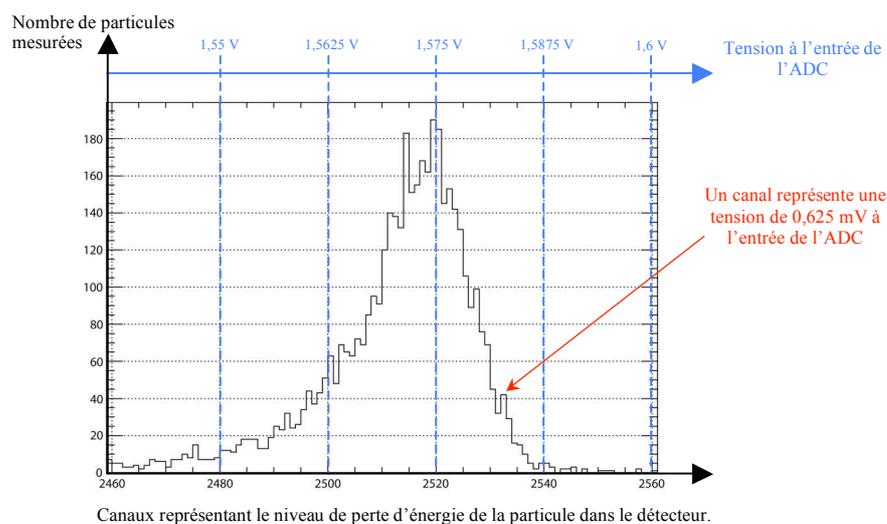


Figure 49 : Spectre de la perte d'énergie de la particule chargée dans le détecteur fournit par le système d'acquisition.

La correspondance entre l'énergie perdue (en keV ou en MeV) par la particule dans le détecteur et les spectres affichés sur le système de traitement informatique (canaux correspondant à un niveau de tension sur l'ADC) se fera par une droite de calibration (cf. Annexe F).

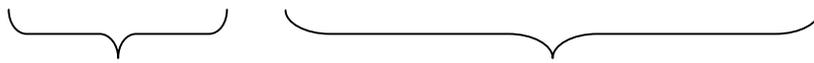
Le système d'acquisition possède 32 voies correspondantes aux 16 voies de mesure d'énergie dans le plan X (de V0 à V15) et aux 16 voies de mesure d'énergie dans le plan Y (de V16 à V31). Chaque voie de mesure est indépendante.

Lorsqu'un évènement est identifié par la chaîne de mesure, le système de traitement est « occupé » pendant 100 $\mu$ s. Pendant cette période, les nouvelles particules arrivant sur le détecteur ne seront pas discriminées.

L'acquisition GANIL permet de stocker les données sur disque. Ainsi, nous avons enregistré pour chaque évènement les 32 voies de l'ADC avec leur valeur.

L'étude d'un pixel (équivalent à un petit détecteur) se fera grâce à un programme de traitement appelé ROOT (conçu par le CERN [ROOT]). Il permettra de traiter les données brutes en affichant les spectres d'énergie mesurés sur chaque voie en imposant des conditions de traitement.

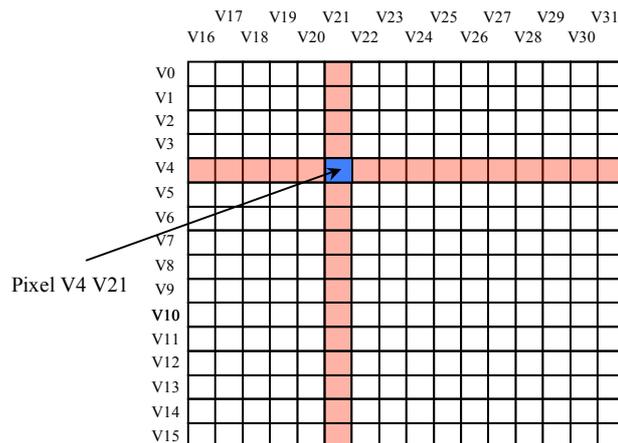
Pour afficher le spectre correspondant à la perte d'énergie dans un pixel (par exemple à l'intersection entre V4 et V21), nous donnons la condition suivante :

$$\text{ADC32\_1\_5\_V4} \{ \text{ADC32\_1\_5\_V4} > 0 \ \&\& \ \text{ADC32\_1\_5\_V21} > 0 \}$$


Voie affichée

Condition d'affichage

Cela signifie que le programme doit afficher les événements de la voie 4 lorsqu'il y a en même temps des événements sur la voie 21 (cf. figure 50).

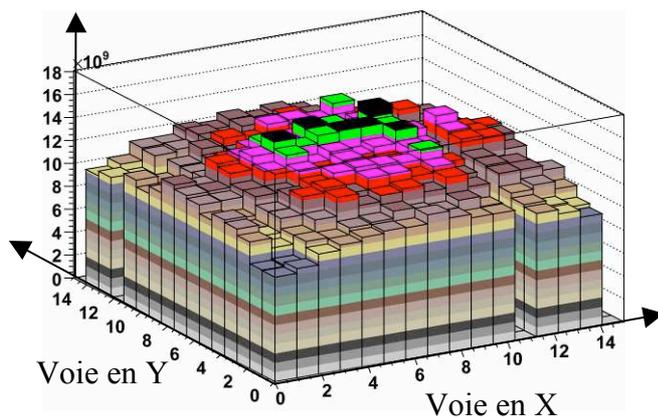


**Figure 50 : Définition du pixel V4 V21, détecteur élémentaire.**

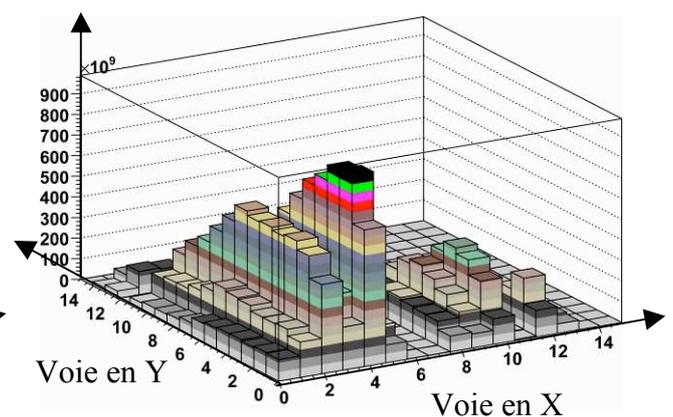
Dans ce cas on affiche bien, sur les spectres de l'informatique, les événements correspondant au pixel V4 V21.

Avec la prise en compte des informations données par les 32 voies de mesures, une reconstitution en trois dimensions donnera la position des projectiles sur le détecteur (cf. Figure 51).

Nombre total  
d'évènements



Nombre total  
d'évènements

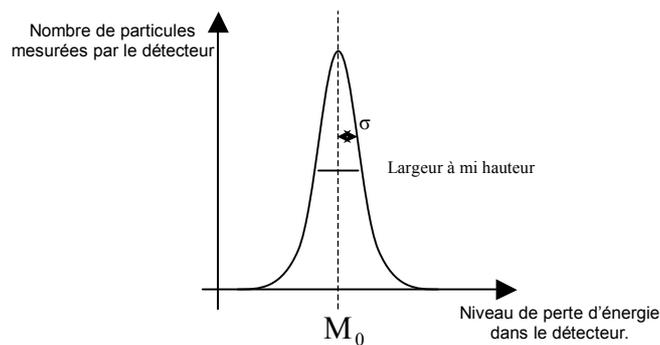


**Figure 51 : Répartition sur le détecteur sur le schéma de gauche d'alphas et sur le schéma de droite d'ions produits par l'accélérateur CIME.**

Sur la figure de gauche est représentée la répartition des alphas mesurés par le détecteur silicium. Nous pouvons observer une concentration uniforme et centrée sur le détecteur. Les voies de mesures 11 sur X et 12 sur Y ne fonctionnaient pas. Le dysfonctionnement était dû aux préamplificateurs de ces deux voies. Ces voies ont bien été identifiées avant l'expérience sous faisceau grâce à un test avec un générateur d'impulsions. Sur la figure de droite, le silicium mesure des ions provenant de l'accélérateur CIME. Le faisceau se répartit en deux paquets d'ions.

### III.8) Caractérisation des mesures en énergie de la maquette expérimentale

En physique nucléaire, pour caractériser des mesures en énergie on utilise la notion de résolution en énergie. Elle se définit par le rapport de la largeur à mi hauteur du pic par sa moyenne ( $M_0$ ) [POC05]. Ces mesures de résolution en énergie sur la maquette expérimentale seront comparées à des mesures réalisées avec un détecteur silicium standard utilisé pendant l'expérience sous faisceau.



**Figure 52 : Définition de la résolution en énergie.**

$$\text{Résolution} = \frac{\text{Largeur à mi - hauteur}}{M_0} = \frac{2 \times \sigma \times \sqrt{2 \times \ln 2}}{M_0} \approx 2,35 \times \text{écart type relatif de la distribution en énergie} \quad \text{Équation 17}$$

Pour réaliser ce calcul, nous allons déterminer par la suite les valeurs des écarts types relatifs.

### III.8.1) Évaluation des écarts types de mesure en énergie

La source (étalon ou accélérateur) fournit des particules chargées ayant une distribution en énergie qui lui est propre. Pour obtenir l'écart type lié exclusivement à la chaîne de mesure (détecteur silicium + chaîne électronique), nous réaliserons une correction liée à la distribution en énergie de la source. La figure 53 représente les différents écarts types liés à la mesure d'énergie.

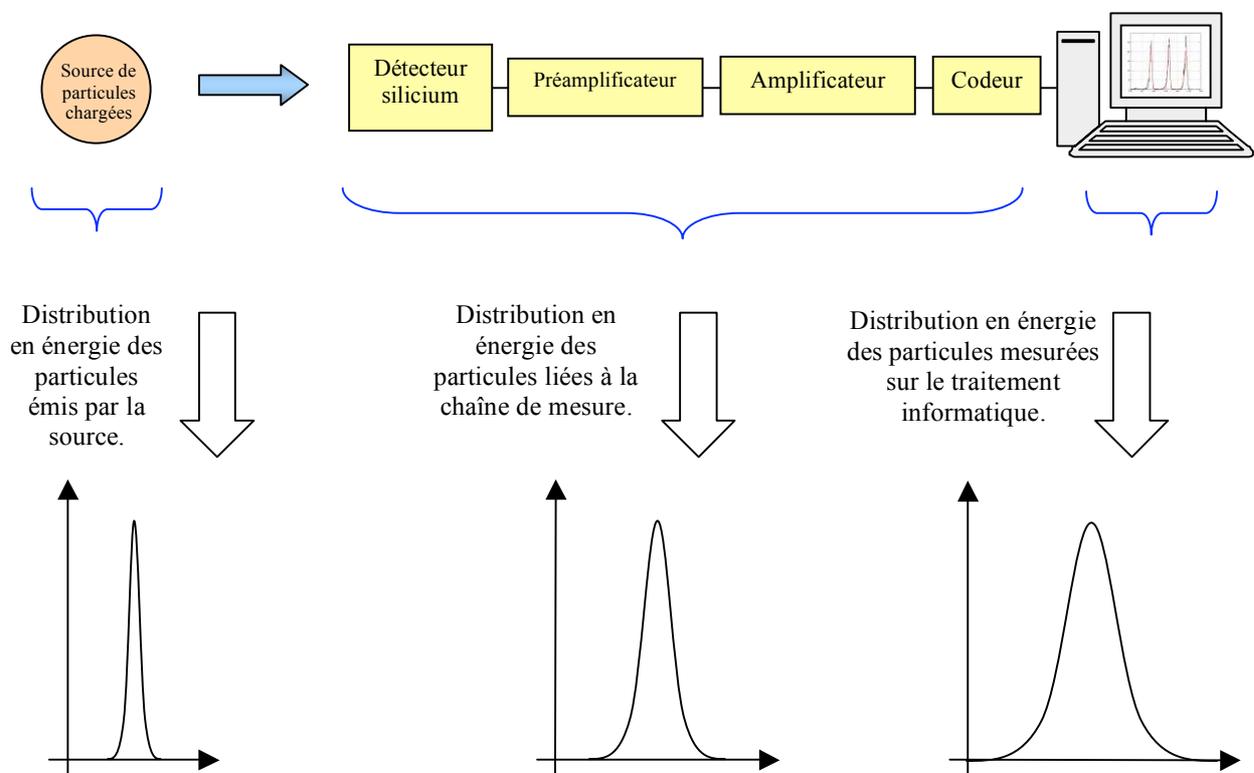


Figure 53 : Les différents écarts types de mesure d'énergie.

La variance mesurée est égale à :

$$\sigma^2_{\text{mesuré}} = \sigma^2_{\text{source}} + \sigma^2_{\text{chaîne de mesure}}$$

Équation 18

Alors 
$$\sigma_{\text{chaîne de mesure}} = \sqrt{\sigma_{\text{mesuré}}^2 - \sigma_{\text{source}}^2} \quad \text{Équation 19}$$

Ici les calculs se feront en relatif car l'objectif pour la caractérisation de la résolution en énergie est d'avoir un ordre de grandeur. Pour chaque contribution nous appliquerons l'équation suivante :

$$\sigma_{\text{relatif}} = \frac{\sigma_{\text{absolue}}}{\text{valeur centrale}} \quad \text{Équation 20}$$

### III.8.1.1) Ecart type de la chaîne de mesure en énergie avec la source alpha.

Comme nous l'avons précisé précédemment (cf. III.2.1), l'écart type relatif sur l'énergie des alphas émis par la source radioactive est négligeable (de l'ordre de  $2 \times 10^{-5}$ ) en comparaison aux ordres de grandeur de la chaîne de mesure (de l'ordre de  $2 \times 10^{-3}$ ). En conséquence, dans le cas des mesures en laboratoire, l'écart type mesuré est égal à l'écart type de la chaîne de mesure. La figure ci-dessous représente les spectres affichés par le système informatique lors de la mesure de perte d'énergie d'alphas produit par la source étalon. Les trois pics représentent respectivement les alphas produits par le plutonium 239 l'américium 241 et le curium 244 :

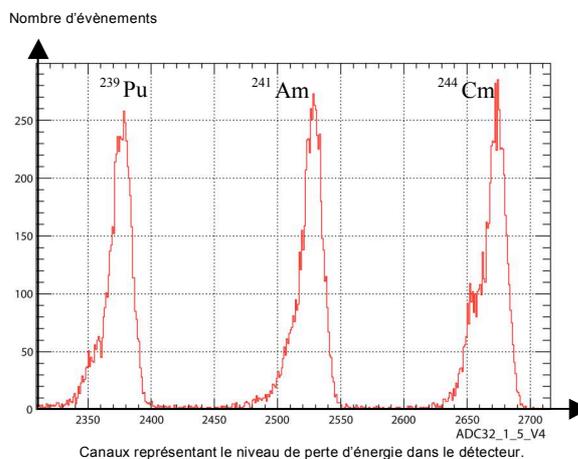


Figure 54 : Spectres représentant la perte d'énergie d'une source 3 alphas sur la voie V4 du détecteur multipiste.

Le système de détection est suffisamment performant pour observer sur chaque spectre les alphas moins représentatifs (déformation en bas à gauche de chaque spectre, en effet chaque radio isotope a une émission d'alphas de différente énergie, cf. III.2.1).

Pour chaque spectre, le programme nous renseigne sur la moyenne et l'écart type (cf. tableau 9) :

Elément émetteur d'alphas	Canaux affichés par l'informatique		Tension en sortie de l'ADC (Conversion à titre indicatif)		Ecart type relatif de la chaîne de mesure
	Moyenne (canaux)	Ecart type absolu de la chaîne de mesure (canaux)	Moyenne (mV)	Ecart type absolu de la chaîne de mesure (mV)	
$^{239}\text{Pu}$	2372	$\pm 6,59$	1482,50	$\pm 4,12$	$\pm 2,78 \times 10^{-3}$
$^{241}\text{Am}$	2523	$\pm 6,75$	1576,87	$\pm 4,22$	$\pm 2,67 \times 10^{-3}$
$^{244}\text{Cm}$	2668	$\pm 6,01$	1667,50	$\pm 3,76$	$\pm 2,25 \times 10^{-3}$

**Tableau 9 : Les valeurs caractéristiques des spectres.**

Nous venons d'évaluer l'écart type relatif pour des particules de faible énergie (entre 5 à 6 MeV). Pour compléter ces mesures nous avons fait la même méthode sur des particules chargées d'une énergie plus élevée produite par le faisceau de l'accélérateur (entre 100 et 350 MeV).

### III.8.1.2) Ecart type de la chaîne de mesure avec le faisceau d'ions lourds.

Nous avons exposé le détecteur à différents types d'ions. Pour chaque élément produit par l'accélérateur il existe une distribution en énergie qui lui est propre. Cette fois ci, l'écart type relatif lié à la source de particules chargées (l'accélérateur) n'est plus négligeable en comparaison à la mesure. La figure 55 représente des spectres en énergie mesurés voie 4 :

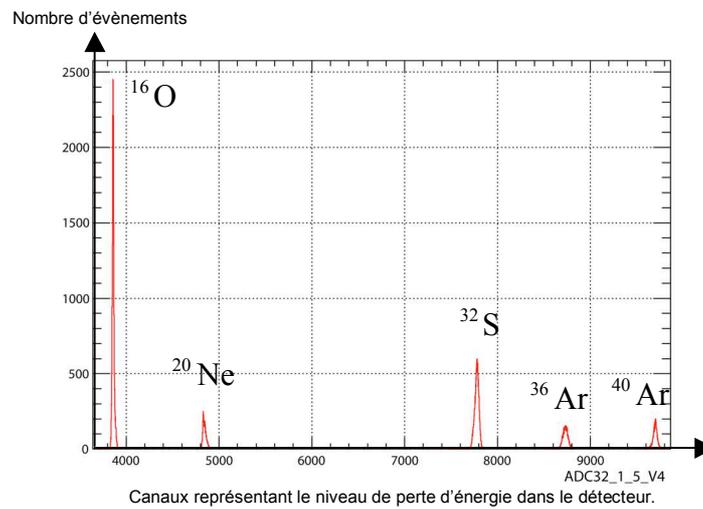


Figure 55 : Spectres représentant la perte d'énergie d'ions dans la voie 4.

Ions	Canaux affichés par l'informatique		Tension en sortie de l'ADC (Conversion à titre indicatif)		Ecart type relatif mesuré
	Moyenne (canaux)	Ecart type absolu mesuré (canaux)	Moyenne (mV)	Ecart type absolu mesuré (mV)	
$^{16}\text{O}$	3859	8,13	2411,87	5,08	$\pm 2,11 \times 10^{-3}$
$^{20}\text{Ne}$	4844	9,98	3027,50	6,24	$\pm 2,06 \times 10^{-3}$
$^{32}\text{S}$	7774	14,32	4858,75	8,95	$\pm 1,84 \times 10^{-3}$
$^{36}\text{Ar}$	8728	16,65	5455,00	10,41	$\pm 1,91 \times 10^{-3}$
$^{40}\text{Ar}$	9697	14,28	6060,62	8,92	$\pm 1,47 \times 10^{-3}$

Tableau 10 : Correspondance entre les valeurs d'énergie des différents ions et des valeurs caractéristiques.

Ici, l'écart type sur l'énergie de la source de particules chargées (ions produits par l'accélérateur) n'est pas négligeable.

L'écart type relatif de la chaîne de mesure peut être déterminé avec le tableau ci-dessous :

Ions	Ecart type relatif mesuré	Ecart type de la source (ions produits par l'accélérateur)	Ecart type relatif de la chaîne de mesure
$^{16}\text{O}$	$\pm 2,11 \times 10^{-3}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$\pm 1,86 \times 10^{-3}$
$^{20}\text{Ne}$	$\pm 2,06 \times 10^{-3}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$\pm 1,80 \times 10^{-3}$
$^{32}\text{S}$	$\pm 1,84 \times 10^{-3}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$\pm 1,54 \times 10^{-3}$
$^{36}\text{Ar}$	$\pm 1,91 \times 10^{-3}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$\pm 1,63 \times 10^{-3}$
$^{40}\text{Ar}$	$\pm 1,47 \times 10^{-3}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$\pm 1,08 \times 10^{-3}$

**Tableau 11 : Les écarts types relatifs du système de détection.**

Suite à cette étude, nous pouvons dire que pour notre mesurage l'exactitude de la chaîne est suffisante. Les écarts types mesurés sont représentatifs d'une population d'un échantillon. Pour estimer des incertitudes de mesure nous aurions dû faire une analyse sur plusieurs échantillons. L'évaluation des incertitudes de mesures feront l'objet par la suite d'un travail complémentaire.

### III.8.2) La résolution en énergie de la chaîne de mesure

Avec les écarts types relatifs calculés précédemment nous pouvons en déduire les résolutions en énergie de la chaîne de mesure définies par l'équation 17. La résolution en énergie s'exprime généralement en pourcent.

Ions	Résolution en énergie de la chaîne de mesure pour une piste du silicium multipiste	Résolution en énergie de la chaîne de mesure comprenant un silicium de 200 mm <sup>2</sup> standard (mêmes conditions expérimentales)
<sup>239</sup> Pu (alpha)	±0,65 %	-
<sup>241</sup> Am (alpha)	±0,68 %	-
<sup>244</sup> Cm (alpha)	±0,55 %	-
<sup>16</sup> O	±0,44 %	±0,42 %
<sup>20</sup> Ne	±0,42 %	±0,36 %
<sup>32</sup> S	±0,36 %	±0,44 %
<sup>36</sup> Ar	±0,38 %	±0,48 %
<sup>40</sup> Ar	±0,25 %	±0,42 %

**Tableau 12 : Tableau de comparaison de la résolution en énergie de la chaîne de mesure entre le silicium multipiste et un silicium de petite surface standard.**

Le détecteur standard de petite surface comporte les mêmes caractéristiques en termes de résolution en énergie par rapport à un silicium multipiste (cf. tableau 12).

#### **Objectif n°2 :**

**Caractérisation des mesures en énergie de la maquette expérimentale.**

#### **Conclusion n°2 :**

**La maquette expérimentale a une très bonne résolution en énergie en comparaison au détecteur standard de petite surface.**

### **III.9) Evaluation des phénomènes d'influence entre les voies de mesure en énergie.**

Les phénomènes d'influence entre les voies de mesure d'énergie peuvent, lorsqu'ils sont importants, induire des signaux parasites.

#### **III.9.1) Evaluation de la diaphonie**

La diaphonie est la perturbation entre deux voies de mesure. Elle est liée aux interférences électromagnétiques entre chaque carte électronique et au conducteur de liaison. Lors de la fabrication de la chaîne de mesure nous nous sommes placés dans les meilleures conditions pour diminuer cet effet (plan de masse entre les préamplificateurs, câbles coaxiaux blindés).

La diaphonie est aussi induite par la capacité interpiste au niveau du détecteur. Une particule identifiée sur une piste provoquerait un signal sur une piste voisine (signal d'énergie plus faible). Il y aurait alors une « fuite » de signal entre les voies de mesure liée à cette capacité interpiste (cf. figure 56).

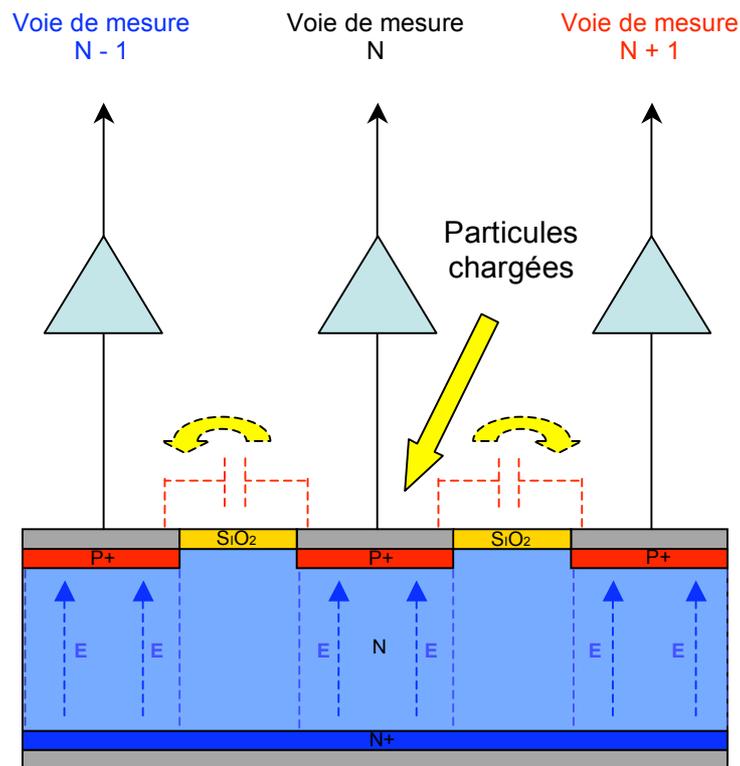


Figure 56 : Effet de la diaphonie électronique au niveau du détecteur.

Pour tenter d’observer ce phénomène, j’ai conditionné le traitement informatique de manière à avoir des mesures en énergie sur les voies N – 1 et N + 1 quand la voie N était « touché » (cf. figure 57, figure 58 et figure 59).

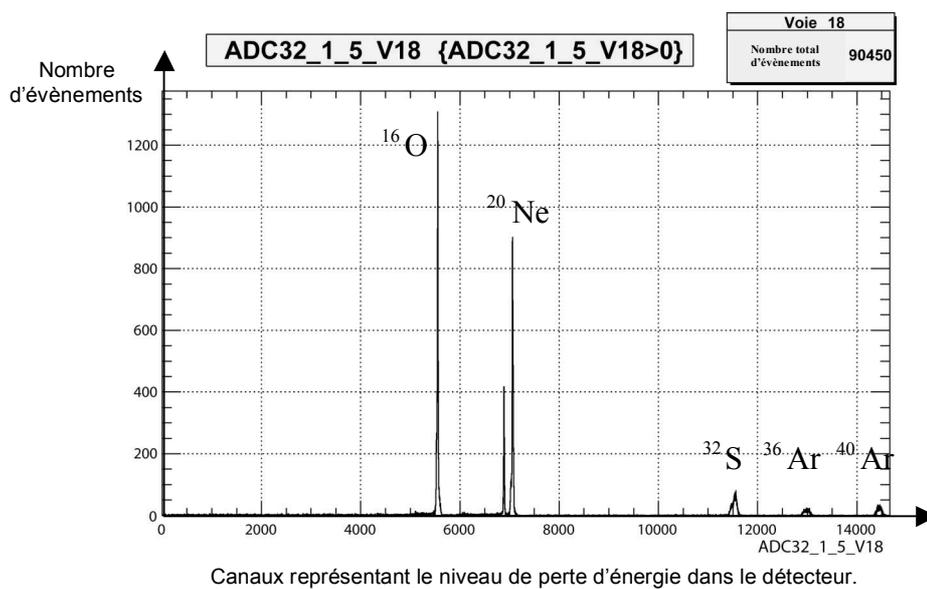


Figure 57 : Mesure en énergie sous faisceau de la voie 18 (voie d'étude N).

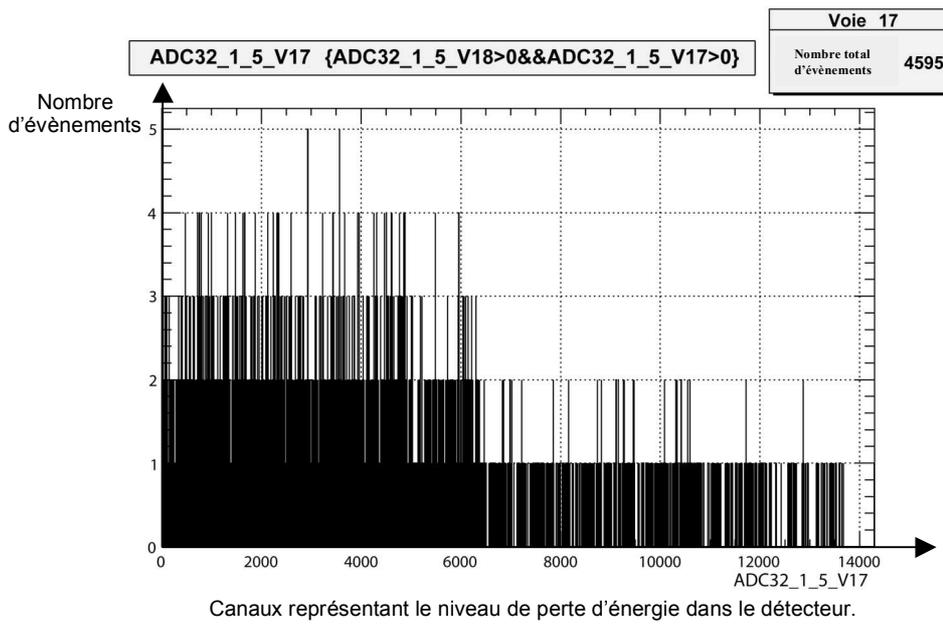


Figure 58 Mesure en énergie sous faisceau de la voie 17 quand la voie 18 est touchée (voie d'étude N-1).

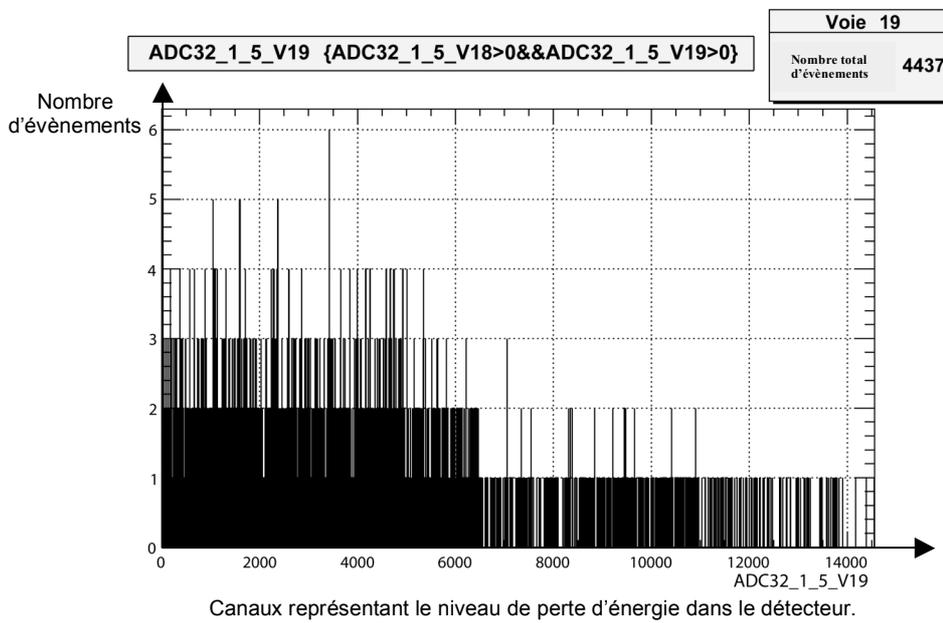
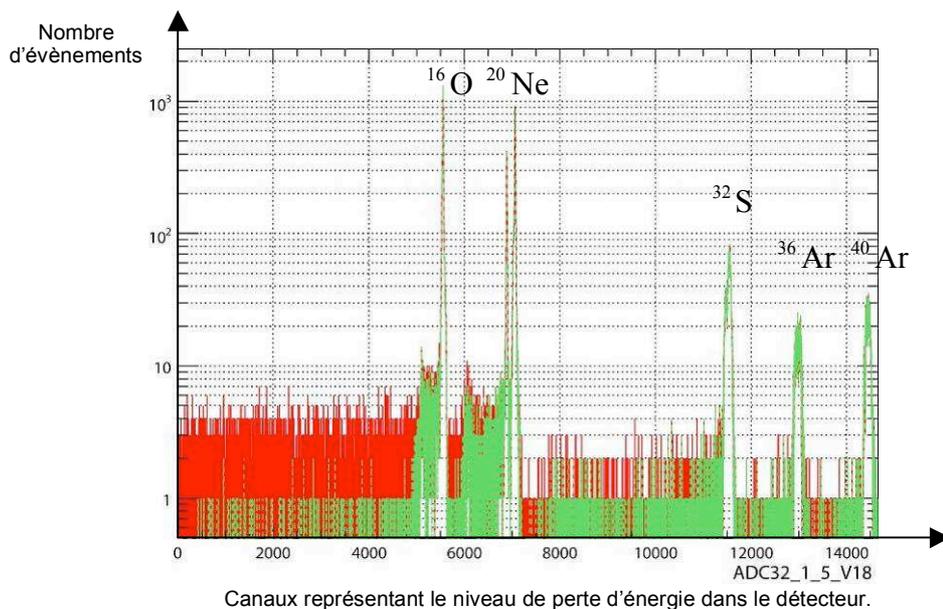


Figure 59 : Mesure en énergie sous faisceau de la voie 19 quand la voie 18 est touchée (voie d'étude N+1).

Si la maquette expérimentale avait présenté de la diaphonie électronique nous aurions dû observer des spectres (pic) à des énergies plus basses que celles des ions mesurés sur la voie N, or cela n'a pas été le cas. Malgré tout, il y a une influence entre les voies étant donné que nous avons des évènements arrivant en même temps sur deux pistes voisines. Dans notre exemple, il y a 4 595 évènements en même temps sur la voie 17 et la voie 18 et 4 437 évènements simultanément sur la voie 19 et la voie 18. Nous pourrions alors dire que le nombre total d'évènements arrivant sur la voie 18 (90 450, cf. figure 57) inclus 9 032 évènements (4 437+ 4 595) provenant des pistes voisines. Dans ce cas il y aurait environ 10 % des évènements mesurés sur la voie 18 liés à une influence entre les deux pistes voisines.

Affichons, en superposition, les spectres de la voie 18 (brute) et les spectres de la voie 18 sans les évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines (cf. figure 60). Une échelle logarithmique en Y permet de faire un agrandissement. Le spectre vert est nettoyé et se superpose au spectre brut en rouge.



**Figure 60 : En rouge, spectres de la voie 18 brute, en vert, spectres de la voie 18 sans les évènements arrivant sur les pistes voisines (attention échelle logarithmique en y).**

Nous remarquons que ce phénomène n'influe pas sur la position des pics (niveau énergétique identique). De plus le nombre d'évènements formant les pics reste similaire. Par conséquent, ce phénomène n'influe pas sur la discrimination en énergie des particules.

Il semblerait que les 10 % d'évènements arrivant en même temps sur deux pistes voisines d'une voie d'étude soient essentiellement liées aux particules tombant dans les interpistes du détecteur.

### III.9.2) Evaluation de l'influence de l'interpiste

L'interpiste est l'isolation électrique entre chaque voie d'un même plan (dioxyde de silicium pour la face coté P et implantation P+ pour la face N). Il représente environ 7% de la surface du détecteur. Lorsqu'une particule chargée traverse cette zone, les charges produites vont être collectées simultanément par les deux voies de mesure. La répartition des charges se fera en fonction du lieu d'impact dans l'interpiste. La voie de mesure la plus proche de l'impact collectera plus de charges (cf. figure 61).

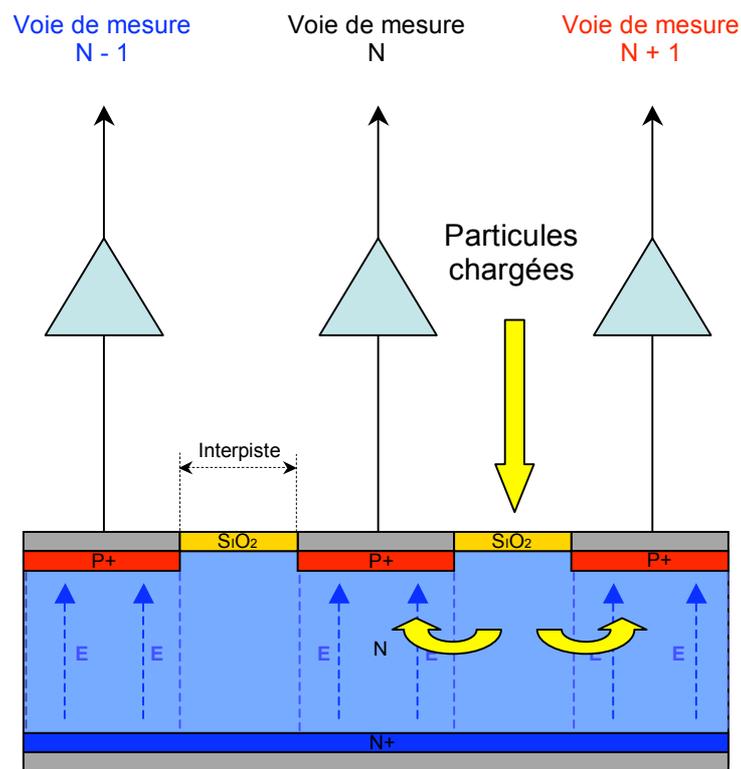


Figure 61 : Représentation de l'interpiste sur le silicium multipiste.

Pour observer ce phénomène, j'ai conditionné le programme d'analyse pour avoir un affichage des événements d'une piste N en fonction d'une piste N+1 et un autre affichage de la même voie N en fonction de N-1 (cf. figure 62).

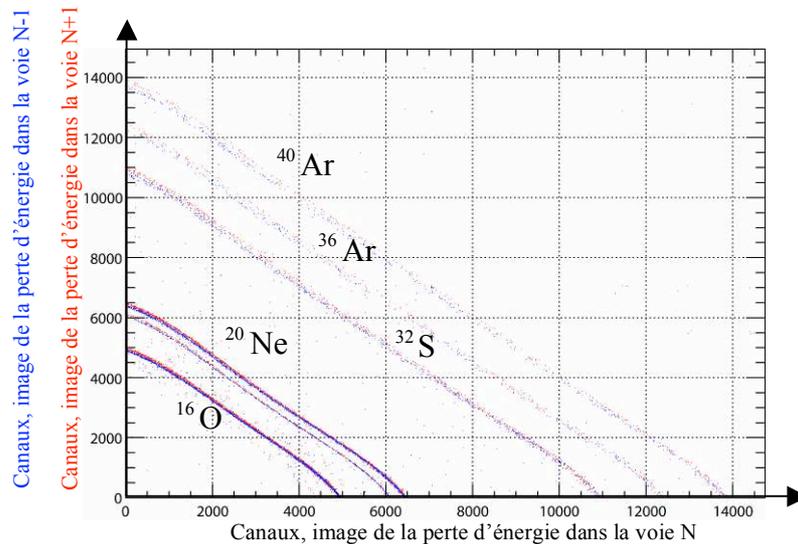


Figure 62 : En rouge, évènement sur la voie N en fonction de la voie N+1, en bleu, évènement sur la voie N en fonction de la voie N-1 (mesures réalisées avec le faisceau d'ions).

Chaque pente correspond à la perte d'énergie d'un type ion dans l'interpiste. Le schéma ci-dessous illustre comment sont tracées les pentes. Par exemple, l'évènement 1 en traversant l'interpiste produira des charges qui vont migrer vers la voie N+1 et la voie N. La voie N+1 récoltera l'équivalent de 4 MeV et la voie N, l'équivalent de 1 MeV (cf. figure 63).

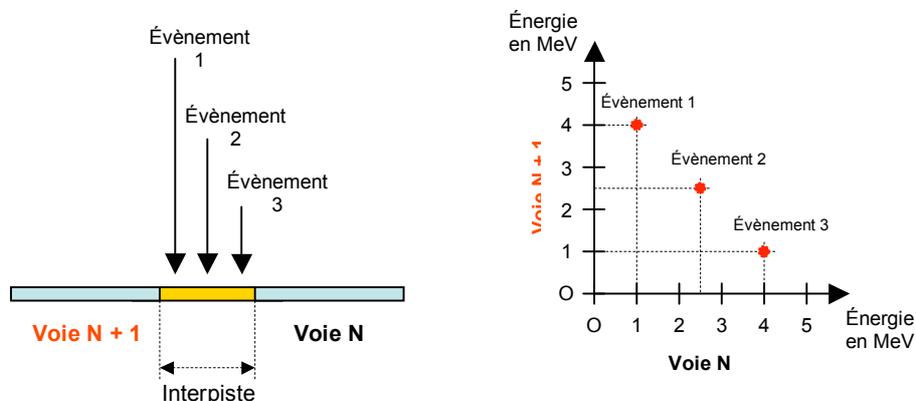
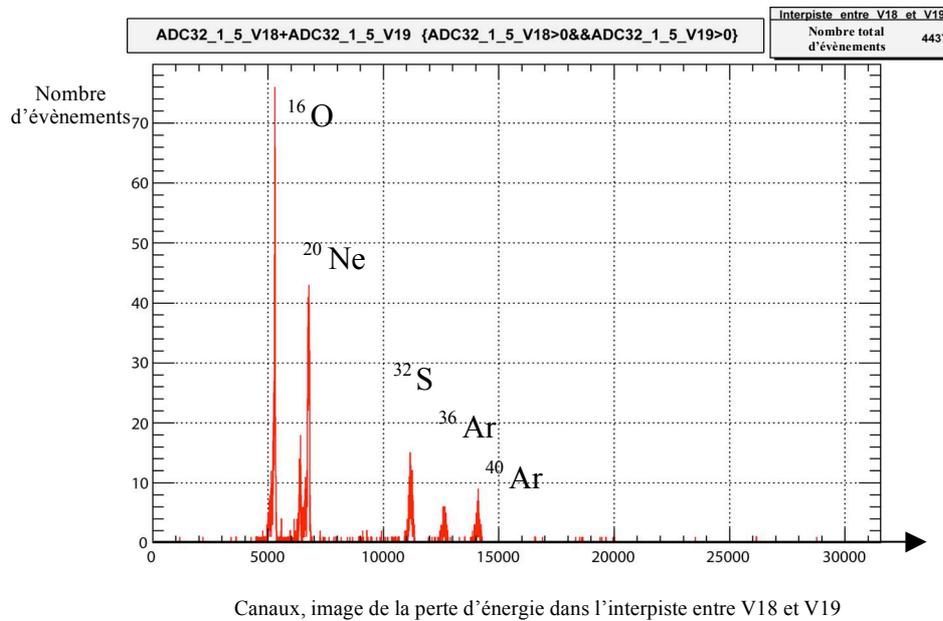


Figure 63 : A gauche, schéma représentant l'interpiste, à droite, énergie mesurée sur la voie N en fonction de l'énergie mesurée sur la voie N+1.

En additionnant ces deux pertes d'énergie (addition des évènements sur la voie N+1 et la voie N, pour les évènements arrivant simultanément), nous pouvons reconstituer l'énergie totale déposée par la particule (cf. figure 64).



**Figure 64 : Reconstitution de la perte d'énergie des ions traversant l'interpiste entre V18 et V19.**

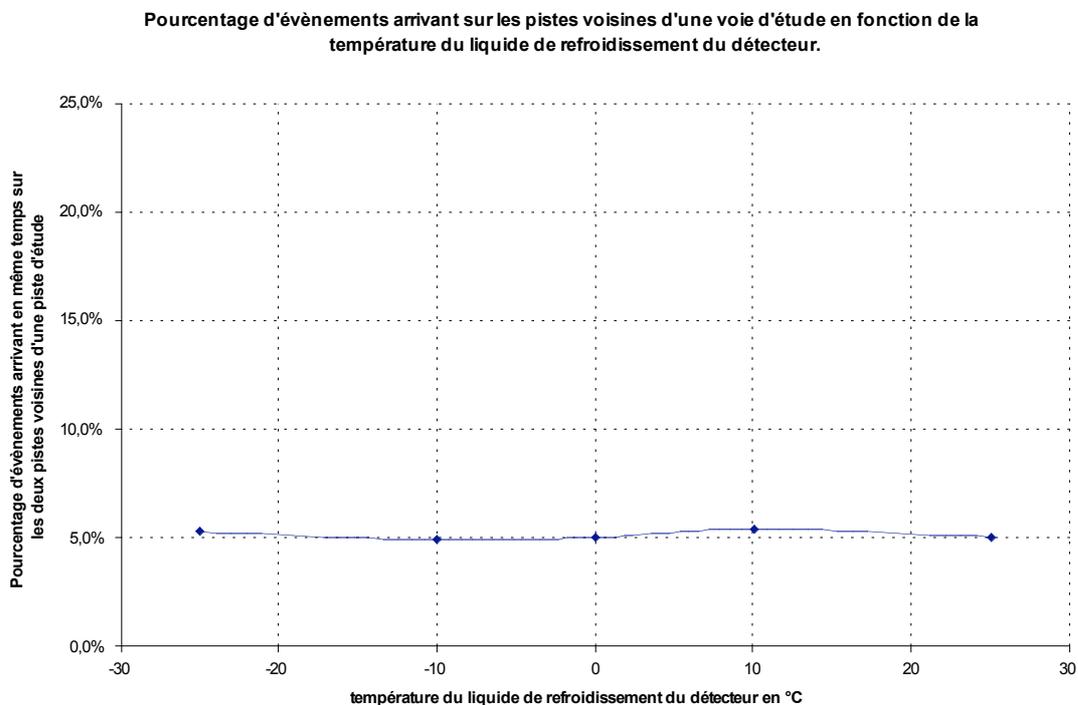
Ainsi après traitement informatique la zone interpiste devient une zone de détection à part entière.

Les mesures en laboratoire avec une source alpha étalon m'ont permis d'observer l'influence de deux facteurs, la température et la tension de polarisation du détecteur, sur le phénomène lié à l'interpiste.

Le tableau ci-dessous regroupe les mesures réalisées avec une source alpha. Nous avons fait varier la température du liquide de refroidissement du détecteur (cf. tableau 13).

Température du liquide de refroidissement du détecteur	Nombre d'évènements arrivant sur la voie 4 (voie d'étude N)	Nombre d'évènements arrivant en même temps sur la voie 4 et la voie 3 (voie d'étude N - 1)	Nombre d'évènements arrivant en même temps sur la voie 4 et la voie 5 (voie d'étude N + 1)	Pourcentage d'évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines d'une voie d'étude
+ 25 °C	17257	417	463	5,1%
+ 10 °C	20163	604	498	5,5%
0 °C	25125	548	726	5,1%
- 10 °C	19141	446	502	5,0%
- 25 °C	17780	446	501	5,3%

**Tableau 13 : Calcul du pourcentage d'évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines d'une voie d'étude en faisant varier la température du liquide de refroidissement du détecteur.**

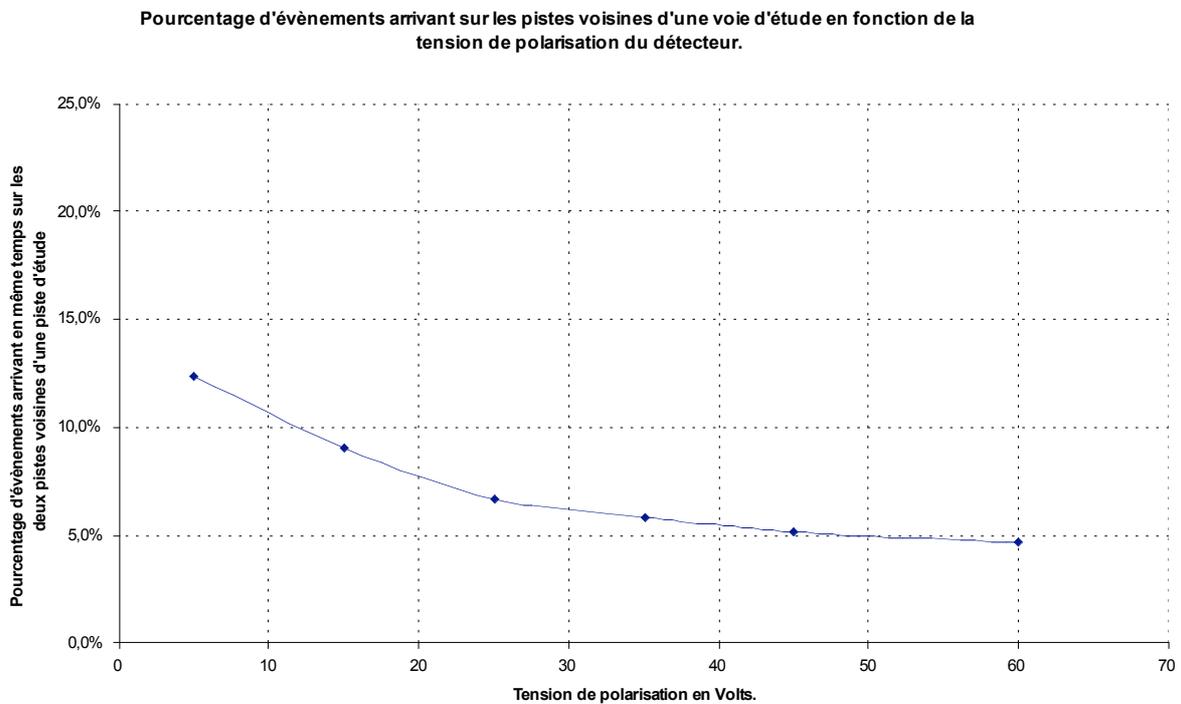


**Figure 65 : Pourcentage d'évènements arrivant sur les pistes voisines d'une voie d'étude en fonction de la température du liquide de refroidissement du détecteur.**

Nous remarquons sur la figure 65 que le pourcentage d'évènements arrivant sur les pistes voisines d'une voie d'étude ne varie pas avec la température. Le tableau ci-dessous regroupe les mesures réalisées en faisant varier la polarisation du détecteur.

Température du liquide de refroidissement du détecteur	Nombre d'évènements arrivant sur la voie 4 (voie d'étude N)	Nombre d'évènements arrivant en même temps sur la voie 4 et la voie 3 (voie d'étude N - 1)	Nombre d'évènements arrivant en même temps sur la voie 4 et la voie 5 (voie d'étude N + 1)	Pourcentage d'évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines d'une voie d'étude
5 V	40513	2114	2904	12,4%
15 V	23659	939	1211	9,1%
25 V	19414	756	548	6,7%
35 V	11169	277	382	5,9%
45 V	16394	388	463	5,2%
60 V	13373	276	349	4,7%

**Tableau 14 : Calcul du pourcentage d'évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines d'une voie d'étude en faisant varier la tension de polarisation.**



**Figure 66 : Pourcentage d'évènements arrivant sur les pistes voisines d'une voie d'étude en fonction de la tension de polarisation du détecteur.**

Nous constatons sur la figure 66, que plus la tension de polarisation du détecteur est grande, plus le pourcentage d'évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines de la voie d'étude est faible. Les tensions inférieures à 30V sont en dehors du fonctionnement nominal du détecteur. En effet le détecteur est complètement déplété à partir de 30V. Ceci expliquerait le pourcentage élevé d'évènements arrivant en même temps sur les pistes voisines. Le pourcentage de particules collectées simultanément sur 2 voies est lié au champ électrique.

**Objectif n°3 :****Evaluation des phénomènes d'influence entre les voies de mesure en énergie.****Conclusion n°3 :**

**Avec les conditions de mesure en laboratoire et sous faisceau (seuil de détection de 2,8 MeV en laboratoire et 16,7 MeV sous faisceau, cf. III.2.1), nous n'avons pas observé de phénomènes mesurable lié à la diaphonie.**

**Cependant, lorsque des particules traversent la zone interpiste du détecteur il y a création de signaux sur les deux voies de mesure adjacentes. Cette réaction ne varie pas avec la température du détecteur mais elle varie avec sa tension de polarisation. Nous avons vu que ces évènements n'influent pas sur la discrimination des particules sur la voie de mesure et après un traitement informatique la zone interpiste devient une zone active de détection. A ce stade, nous n'avons donc pas observé de phénomènes d'influence entre les voies pouvant entacher la mesure en énergie.**

## Conclusion

Le projet international FAZIA s'inscrit dans la construction d'un nouveau type de multidétecteur. Celui-ci devra posséder des performances en termes de résolution angulaire, de granularité et d'efficacité géométrique permettant d'affiner la modélisation de la matière.

Une grande surface de détection couvrira l'espace autour de la cible de réaction. Un faisceau d'ions projectiles sera envoyé sur la cible générant des réactions nucléaires d'où seront émises des particules. Des modules de détection composés de 3 étages les identifieront. Au stade actuel d'avant-projet, environ 10 000 modules télescopes seraient prévus pour construire le multidétecteur et ainsi répondre aux caractéristiques souhaitées. Chaque module serait composé de deux étages de silicium (300  $\mu\text{m}$  et 700  $\mu\text{m}$ ) et d'un étage scintillateur couplé d'une photodiode.

Le groupe « détecteurs silicium » a mis en place deux équipes projet. L'une concerne l'analyse de la solution silicium mono-cellule et l'autre analyse la solution utilisant le silicium multipiste.

Ce mémoire s'est déroulé dans le cadre de l'équipe projet étudiant la solution « silicium multipiste ».

Le projet a été mené en deux phases. Dans la première, j'ai réalisé l'analyse géométrique mettant en évidence les avantages en termes de nombre de détecteurs, d'efficacité géométrique et de coût en comparaison à la solution mono-cellule. Cette étude a montré l'intérêt technique et économique de la technologie multipiste (cf. page 44, tableau 5).

Dans une seconde phase expérimentale, nous avons réalisé la préparation de l'expérience concernant la mise en place du détecteur sous faisceau. Pendant cette période j'ai eu un rôle de coordination technique. Cette fonction de médiateur m'a permis de comprendre comment s'articulait chaque élément de la chaîne de mesure dans le contexte d'une expérience de physique nucléaire.

L'objectif de la phase expérimentale était de caractériser la mesure en énergie du détecteur silicium multipiste et d'évaluer la présence de phénomènes d'influence entre chaque voie de mesure.

Malgré les différentes contraintes en termes de délai d'approvisionnement, d'environnement technique, d'aléas techniques divers, nous avons respecté la contrainte en temps liée à la date de l'expérience. Durant une semaine, l'accélérateur CIME nous a fourni une gamme d'énergie de faisceaux d'ions lourds entre 100 et 350 MeV.

Suite à cette période j'ai installé la chaîne de mesure en laboratoire afin d'observer le comportement du détecteur soumis aux rayonnements d'une source étalon radioactive. Ces mesures en laboratoire ont complété l'analyse du capteur dans une gamme d'énergie basse.

Dans cette configuration, il était plus simple de faire varier des paramètres comme la température et la tension de polarisation du détecteur.

Le « dépouillement » des données, a montré que la résolution en énergie, en comparaison à un détecteur silicium de petite surface, était très bonne (inférieure au pourcent).

Dans ce cadre expérimental, nous n'avons pas observé de phénomènes mesurables liés à la diaphonie. Toutefois, des effets liés à la zone interpiste ont été mesurés. Lorsque des particules interagissent dans cette zone, des signaux sont observés sur les deux voies de mesure adjacentes à l'interpiste. Il a été intéressant de remarquer que la somme des signaux en énergie récoltés sur deux pistes voisines permet de reconstituer la perte d'énergie de la particule dans cette zone. Cette zone qui au premier abord aurait pu être une zone morte serait en fin de compte, après traitement informatique, une zone capable, avec des performances moindres, de discriminer des particules.

Ainsi, la maquette expérimentale a montré des performances très intéressantes du point de vue économique et technique. La solution silicium multipiste serait une solution indispensable pour la construction du multidétecteur FAZIA.

Cependant il sera nécessaire de comparer les résultats de la solution multipiste avec un détecteur de grande dimension.

De plus, une méthode novatrice en termes d'identification de particules est en cours dans d'autres groupes de travail au sein de la collaboration FAZIA. Ce mémoire concerne l'utilisation de préamplificateurs de courant. Elle permettrait de discriminer les particules grâce à la forme du signal courant. Une base de données serait alors réalisée. Cette méthode est en cours d'étude avec le silicium mono cellule. Nous allons donc dans l'année à venir nous insérer dans ce nouveau challenge et l'appliquer aux siliciums multipistes.

Sur le plan personnel, ce projet a été pour moi très enrichissant. Il y a 2 ans, je n'avais aucune connaissance dans le domaine de la détection de particules. Aujourd'hui, ce travail m'a donné une bonne vision globale de l'instrumentation en physique nucléaire, car j'ai participé à toutes les étapes allant de la conception, à la mise en place des expériences jusqu'au dépouillement des données. L'enseignement acquis par les cours du C.N.A.M. m'a permis de gérer au mieux ce projet de haute technologie et ainsi de mieux appréhender la fonction d'ingénieur.

## Annexes

### Annexe A : Formule de Bethe Bloch en fonction du projectile et du milieu traversé.

Généralement dans le domaine de la physique nucléaire la formule de Bethe Bloch est utilisée. Elle définit la perte d'énergie d'une particule incidente par unité de longueur traversée dans le milieu interceptif [LEO84] :

$$\frac{-dE}{dx} = 2\pi \times N_A \times r_e^2 \times m_e \times c^4 \times \frac{\rho \times z^2 \times Z}{v^2 \times A} \times \left[ \ln \frac{2m_e v^2 \gamma^2 \times W_{\max}}{I^2} - 2\beta^2 \right] \quad \text{Équation 21}$$

- $dE$  : La perte d'énergie dans le milieu en eV  
 $dx$  : L'épaisseur traversée par la particule incidente dans le détecteur en m  
 $N_A$  : La constante d'Avogadro égale à  $6,0221415 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (incertitude standard :  $0,0000010 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )  
 $r_e$  : Le rayon de l'électron égale à  $2,817940325 \times 10^{-15} \text{ m}$  (incertitude standard :  $0,000000028 \times 10^{-15} \text{ m}$ )  
 $m_e$  : La masse de l'électron égale à  $9,1093826 \times 10^{-31} \text{ kg}$  (incertitude standard :  $0,0000016 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )  
 $\beta$  : Le rapport entre la vitesse de la particule incidente et la vitesse de la lumière ( $\frac{v}{c}$ )  
 $v$  : La vitesse de la particule incidente en  $\text{m.s}^{-1}$   
 $c$  : La vitesse de la lumière égale à  $299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$   
 $Z$  : Le numéro atomique, ou nombre de proton du milieu traversé  
 $z$  : Le numéro atomique, ou nombre de proton de la particule incidente  
 $\rho$  : La masse volumique du milieu traversé en  $\text{kg.m}^{-3}$   
 $A$  : La masse atomique du milieu traversé en  $\text{kg.mol}^{-1}$   
 $\gamma$  :  $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$   
 $I$  : Potentiel moyen d'excitation en eV  
 $W_{\max}$  : Transfert maximum d'énergie dans une collision simple en eV

Avec l'ensemble d'accélérateurs dont nous disposons au GANIL, la vitesse des ions projectiles est de l'ordre à 1/3 de la vitesse de la lumière ( $\beta = \frac{v}{c} = 0,3$ ). Le terme entouré en rouge varie très faiblement. Le terme entouré en vert est une constante, pour un milieu donné et pour une particule fixée ayant une vitesse établie (cf. équation 21).

La perte d'énergie par unité de longueur est donc égal à :

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2}{v^2} \times \frac{\rho \times Z}{A} \times K1$$

Équation 22

K1 : Facteur en  $eV \cdot mol^{-1} \cdot m^2$

Le premier terme de cette formule ( $\frac{z^2}{v^2}$ ) dépend des caractéristiques du projectile et le deuxième terme ( $\frac{\rho \times Z}{A}$ ) des caractéristiques du milieu traversé. Nous remarquons qu'avec cette équation, plus le z des particules traversant un même milieu sera grand, plus elles déposeront de l'énergie.

Exemple : rapport entre un ion de calcium et un ion d'hélium.

Pour le calcium  $Z=20$ , pour l'hélium  $Z=2$

$$\frac{-dE}{dx} = z^2 \times K2 \qquad \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{calcium}}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{hélium}}} = \frac{20^2}{2^2} = 100$$

Équation 23

K2 : Facteur en  $eV \cdot m^{-1}$  pour un milieu traversé donné et une vitesse de projectile connue.

Alors, l'ion de calcium déposera 100 fois plus d'énergie que l'ion d'hélium dans le milieu traversé. Ainsi, plus les particules auront un  $z$  important, plus elles s'arrêteront vite dans le détecteur.

Aussi pour un même projectile, plus la densité du milieu traversé est grande, plus le dépôt d'énergie est important :

$$-dE = \frac{\rho Z}{A} \times dx \times K3 \quad \text{Équation 24}$$

K3 : Facteur en  $eV \cdot mol^{-1} \cdot m^2$  pour une particule incidente donnée.

Exemple : comparaison entre les étages

Caractéristiques du 1<sup>er</sup> étage (chambre à ionisation) :

- Chambre à ionisation sous 40 mbar de pression avec du  $C_3F_8$  (octafluoropropane)
- Masse volumique  $\rho = 8,17 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-3}$  à 1 bar et 15°C
- Masse volumique à 40 mbar est  $\rho = 3,27 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-3}$
- Masse atomique 188  $\text{g.mol}^{-1}$
- Numéro atomique du carbone  $Z = 6$
- Numéro atomique du fluor  $Z = 9$
- Nous estimons un numéro atomique moyen de  $Z = 8$
- Epaisseur 5 cm

Caractéristiques du 2<sup>ème</sup> étage (silicium) :

- Silicium
- Masse volumique  $\rho = 2,33 \text{ g.cm}^{-3}$
- Masse atomique 28,1  $\text{g.mol}^{-1}$
- Numéro atomique  $Z = 14$
- Epaisseur 0,03 cm

Caractéristiques du dernier étage (scintillateur) :

- Iodure de Césium
- Masse volumique  $\rho = 4,51 \text{ g.cm}^{-3}$
- Masse atomique  $259,8 \text{ g.mol}^{-1}$
- Numéro atomique pour le césium = 55
- Numéro atomique pour l'iode = 53
- Nous estimons un numéro atomique moyen de  $Z = 54$
- Epaisseur 14 cm

Ainsi entre la chambre à ionisation et le silicium :

$$\frac{(-dE)_{\text{silicium}}}{(-dE)_{\text{chambre \_ \_ \_ ionisation}}} = \frac{\frac{2,33 \times 14 \times 0,03}{28,1}}{\frac{3,27 \times 10^{-4} \times 8 \times 5}{188}} = 500$$

Pour des particules ayant les mêmes caractéristiques, la perte d'énergie est d'environ 500 fois plus importante dans un détecteur silicium d'une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$  que dans la chambre à ionisation d'une épaisseur de 5 cm.

Ainsi entre le scintillateur et le silicium

$$\frac{(-dE)_{\text{iodure \_ de \_ césium}}}{(-dE)_{\text{silicium}}} = \frac{\frac{4,51 \times 54 \times 14}{259,8}}{\frac{2,33 \times 14 \times 0,3}{28,1}} = 37,7$$

Pour des particules de mêmes caractéristiques, la perte d'énergie est environ 38 fois plus importante dans le scintillateur d'une épaisseur de 14 cm que dans le détecteur silicium d'une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$ .

## Annexe B : Formule de Bethe Bloch en fonction des caractéristiques du projectile.

Comme nous avons vu précédemment la formule de Bethe Bloch peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2}{v^2} \times \frac{\rho \times Z}{A} \times K1 \quad \text{Équation 25}$$

- $dE$  : La perte d'énergie dans le milieu en eV  
 $dx$  : L'épaisseur traversée par la particule incidente dans le détecteur en m  
 $z$  : Le numéro atomique, ou nombre de proton de la particule incidente  
 $v$  : La vitesse de la particule incidente en  $m.s^{-1}$   
 $Z$  : Le numéro atomique, ou nombre de proton du milieu traversé  
 $\rho$  : La masse volumique du milieu traversé en  $kg.m^{-3}$   
 $A$  : La masse atomique du milieu traversé en  $kg.mol^{-1}$   
 $K1$  : Facteur en  $eV \cdot mol^{-1} \cdot m^2$

Pour un même milieu traversé donné, nous pouvons écrire :

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2}{v^2} \times K4 \quad \text{Équation 26}$$

- $K4$  : Facteur en  $eV \cdot m \cdot s^{-2}$  pour un milieu traversé donné

En non relativiste, l'énergie cinétique d'une particule est :

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Dans notre cas  $m = A_p$ , la masse atomique du projectile en  $kg \cdot mol^{-1}$

Ainsi 
$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2}{v^2} \times \frac{\frac{1}{2} \times A_p}{\frac{1}{2} \times A_p} \times K4$$

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2}{E_c} \times \frac{1}{2} \times A_p \times K4$$

Alors

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2 A_p}{E_c} \times K5$$

Équation 27

K5 : Facteur en  $eV^2 \cdot m^{-1} \cdot kg^{-1} \cdot mol$  pour un milieu traversé donné

### Annexe C : Estimation des surfaces de chaque calotte de la structure FAZIA.

Les calculs seront basés sur la structure mécanique donnée dans le cahier des charges (cf. I.3.4). Le multidétecteur serait formé de plusieurs calottes. Celles-ci seront disposées à différentes distances de la cible (cf. figure 67).

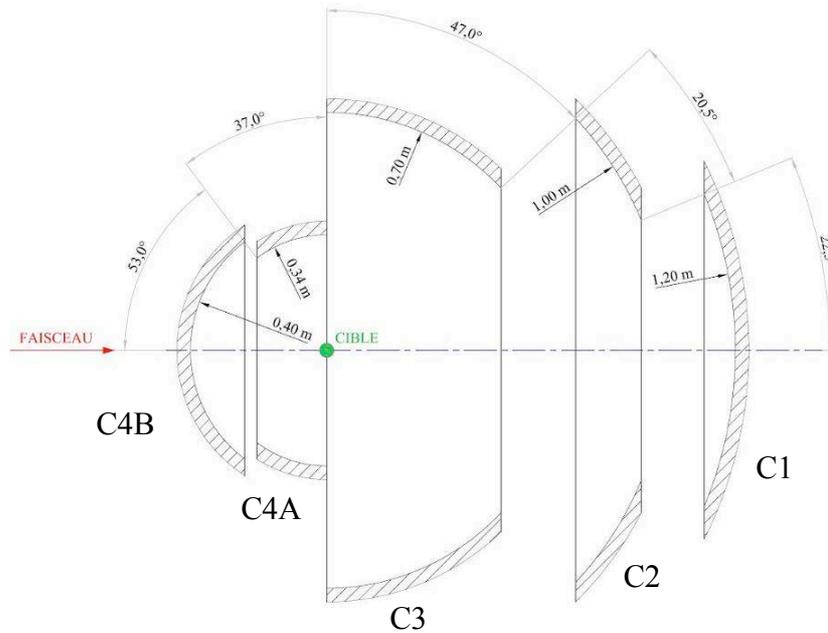


Figure 67 : Vue en coupe des différentes calottes du futur multidétecteur FAZIA

La définition de la surface d'une calotte entière est :

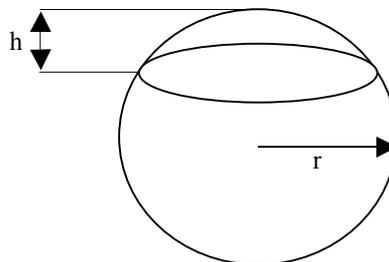


Figure 68 : Surface d'une calotte entière.

$$\text{Surface\_d'une\_calotte\_entière} = 2 \times \pi \times r \times h \quad \text{Équation 28}$$

Quelle est la valeur de h ?

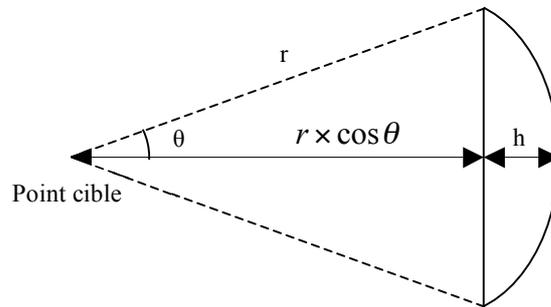


Figure 69 : Schéma d'une calotte par rapport au point cible.

$$r = (r \times \cos \theta) + h \quad \text{Équation 29}$$

$$h = r \times (1 - \cos \theta) \quad \text{Équation 30}$$

Donc la surface d'une calotte entière est égale à :

$$\text{Surface\_d'une\_calotte\_entière} = 2 \times \pi \times r^2 \times (1 - \cos \theta) \quad \text{Équation 31}$$

Cette formule est valable pour les calottes C1 et C4B. Les autres calottes ont une ouverture en leur centre.

La définition de la surface d'une calotte avec une ouverture est :

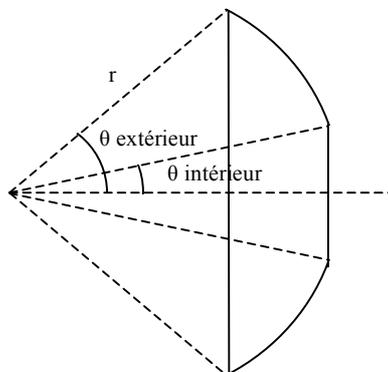


Figure 70 : Surface d'une calotte ouverte.

$$\text{Surface\_d'une\_calotte\_ouverte} = 2 \times \pi \times r^2 \times (\cos\theta_{\text{int}} - \cos\theta_{\text{ext}})$$

Équation 32

La surface de chaque calotte est alors égale à :

<b>Calotte</b>	<b>r (distance cible détecteur) en m</b>	<b>θ intérieur en degré</b>	<b>θ extérieur en degré</b>	<b>Surface en m<sup>2</sup></b>
C1	1,2	0	22,5	0,688
C2	1	22,5	43	1,210
C3	0,7	43	90	2,252
C4A	0,34	53	90	0,437
C4B	0,4	0	37	0,400
Surface totale				4,987

**Tableau 15 : Surface de chaque calotte.**

## Annexe D : Démonstration de l'équation de la tension de sortie du préamplificateur en fonction de la charge électrique.

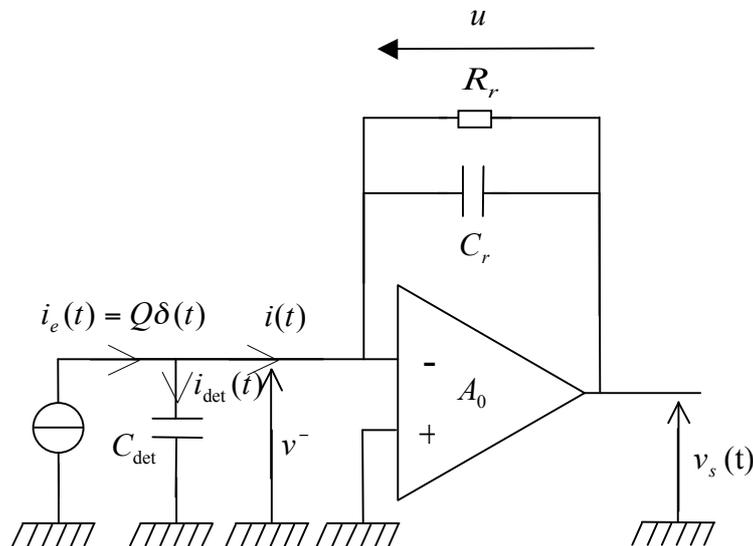


Figure 71 : Schéma de principe d'un préamplificateur couplé à un détecteur silicium.

L'étage d'entrée de l'AOP est constitué d'un transistor à effet de champ (FET). Ce composant a un très faible courant d'entrée (quelques fA) du fait de sa grande impédance. Nous considérons donc que l'AOP est parfait en entrée (impédance d'entrée et bande passante infinie ; le gain  $A_0$  est indépendant de la fréquence). Le gain en boucle ouverte n'est pas parfait ( $A_0$  est une valeur finie, généralement de l'ordre de  $10^5$ ).

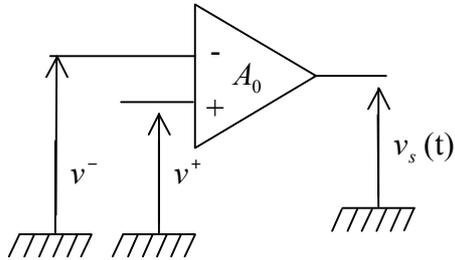
- $i_e(t)$  : Le courant en Ampère produit par le déplacement des charges dans le détecteur, dû au dépôt d'énergie de la particule incidente.
- $C_{det}$  : La capacité électrique équivalente du détecteur en Farad
- $v_s(t)$  : La tension de sortie du préamplificateur en Volt
- $t$  : Le temps en seconde
- $Q$  : La charge électrique en Coulomb
- $R_r$  : La résistance de la boucle de retour de l'amplificateur en ohm
- $C_r$  : La capacité électrique équivalente de la boucle de retour de l'amplificateur en Farad

Nous savons que dans le cas général :

$$v_s = A_0(v^+ - v^-)$$

Dans notre cas  $v^+$  est connecté à la masse.

Nous obtenons alors la relation:



$$v_s(t) = -A_0 v^-$$

Figure 72 : Schéma d'un AOP, cas général.

D'après la figure 71 nous avons cinq équations principales :

$$v_s(t) = -A_0 v^-$$

$$v^- - u(t) - v_s(t) = 0$$

$$i(t) = i_e(t) - i_{\text{det}}(t)$$

$$i_{\text{det}}(t) = \frac{v^-}{Z_{\text{det}}}$$

avec  $Z_{\text{det}}$  l'impédance de la capacité électrique du détecteur.

$$u(t) = Z_r i(t)$$

avec  $Z_r$  l'impédance de contre réaction.

$$v^- = -\frac{v_s(t)}{A_0}$$

$$-\frac{v_s(t)}{A_0} - v_s(t) = u(t)$$

$$-v_s(t)\left(\frac{1}{A_0} + 1\right) = Z_r(i_e(t) - i_{\text{det}}(t))$$

$$-v_s(t)\left(\frac{1}{A_0} + 1\right) = Z_r\left(i_e(t) + \frac{v_s(t)}{A_0 Z_{\text{det}}}\right)$$

$$-v_s(t)\left(\frac{1}{A_0} + 1\right) - \frac{Z_r v_s(t)}{A_0 Z_{\det}} = Z_r i_e(t) \quad -v_s(t)\left(\frac{1}{A_0} + 1\right) + \frac{Z_r}{A_0 Z_{\det}} = Z_r i_e(t)$$

$$-v_s(t)\left(\frac{Z_r + (1 + A_0)Z_{\det}}{A_0 Z_{\det}}\right) = Z_r i_e(t) \quad \frac{-v_s(t)}{i_e(t)} = \frac{A_0 Z_r Z_{\det}}{Z_r + (1 + A_0)Z_{\det}}$$

$$\frac{-v_s(t)}{i_e(t)} = \frac{A_0 Z_r}{\frac{Z_r}{Z_{\det}} + (1 + A_0)}$$

Avec la transformé de Laplace :

L'impédance de la contre réaction est égale à :

$$Z_r = \frac{R_r}{1 + R_r C_r p} \quad Z_{\det} = \frac{1}{C_{\det} p} \quad \frac{Z_r}{Z_{\det}} = \frac{R_r C_{\det} p}{1 + R_r C_r p}$$

$$\frac{-V_s}{I_e} = \frac{A_0 R_r}{1 + R_r C_r p} \times \frac{1}{\frac{R_r C_{\det} p}{1 + R_r C_r p} + 1 + A_0}$$

$$\frac{-V_s}{I_e} = \frac{A_0 R_r}{R_r C_{\det} p + (1 + A_0)(1 + R_r C_r p)}$$

$$\frac{-V_s}{I_e} = \frac{A_0 R_r}{R_r C_{\det} p + 1 + R_r C_r p + A_0 + A_0 R_r C_r p}$$

$$\frac{-V_s}{I_e} = \frac{A_0 R_r}{1 + A_0 + p(R_r C_{\text{det}} + R_r C_r + A_0 R_r C_r)} = \frac{\frac{A_0}{C_{\text{det}} + C_r(A_0 + 1)}}{\frac{(1 + A_0)}{R_r C_{\text{det}} + R_r C_r(1 + A_0)} + p}$$

$$\frac{-V_s}{I_e} = \frac{1}{\frac{C_{\text{det}}}{A_0} + C_r(\frac{1}{A_0} + 1)} \times \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_r C_{\text{det}}}{(1 + A_0)} + R_r C_r} + p}$$

Si  $i_e = Q\delta(t)$  alors en Laplace  $I_e = Q$

$$-V_s = \frac{Q}{\frac{C_{\text{det}}}{A_0} + C_r(\frac{1}{A_0} + 1)} \times \frac{1}{\frac{1}{\frac{R_r C_{\text{det}}}{(1 + A_0)} + R_r C_r} + p}$$

En fonction du temps :

$$v_s(t) = \frac{-Q}{\frac{C_{\text{det}}}{A_0} + C_r(\frac{1}{A_0} + 1)} \times e^{\frac{-t}{\frac{R_r C_{\text{det}}}{(1 + A_0)} + R_r C_r}}$$

Si le gain  $A_0$  est très grand (de l'ordre de  $10^5$ ), la tension de sortie sera équivalente à :

$$v_s(t) \approx \frac{-Q}{C_r} \times e^{\frac{-t}{R_r C_r}}$$

Équation 33

## **Annexe E : Choix de la résistance de contre réaction en fonction de l'influence du taux de comptage.**

Comme nous l'avons vu précédemment, les particules arrivent aléatoirement et peuvent produire des empilements d'impulsions en sortie du préamplificateur. Ce phénomène provoque des fluctuations de la ligne de base.

Le théorème de Campbell est utilisé pour donner la valeur de l'écart type des fluctuations :

$$\sigma = S \times E \times \sqrt{\left(\frac{N_{\text{Comptage}} \times \tau_r}{2}\right)} \quad \text{Équation 34}$$

$\sigma$  : L'écart type de la fluctuation de la ligne de base en Volt

$S$  : La sensibilité du préamplificateur en  $V/MeV$

$E$  : L'énergie maximum mesurée en MeV

$N_{\text{Comptage}}$  : Le taux de comptage des événements produits sur une voie de mesure en coups par seconde

$\tau_r$  : La constante de temps de la boucle de retour du préamplificateur en seconde

La valeur maximale des fluctuations (en Volt) de la ligne de base (pour 99% des impulsions) est égale à :

$$V_{\text{max\_fluctuations}} = 2,58 \times \sigma \quad \text{Équation 35}$$

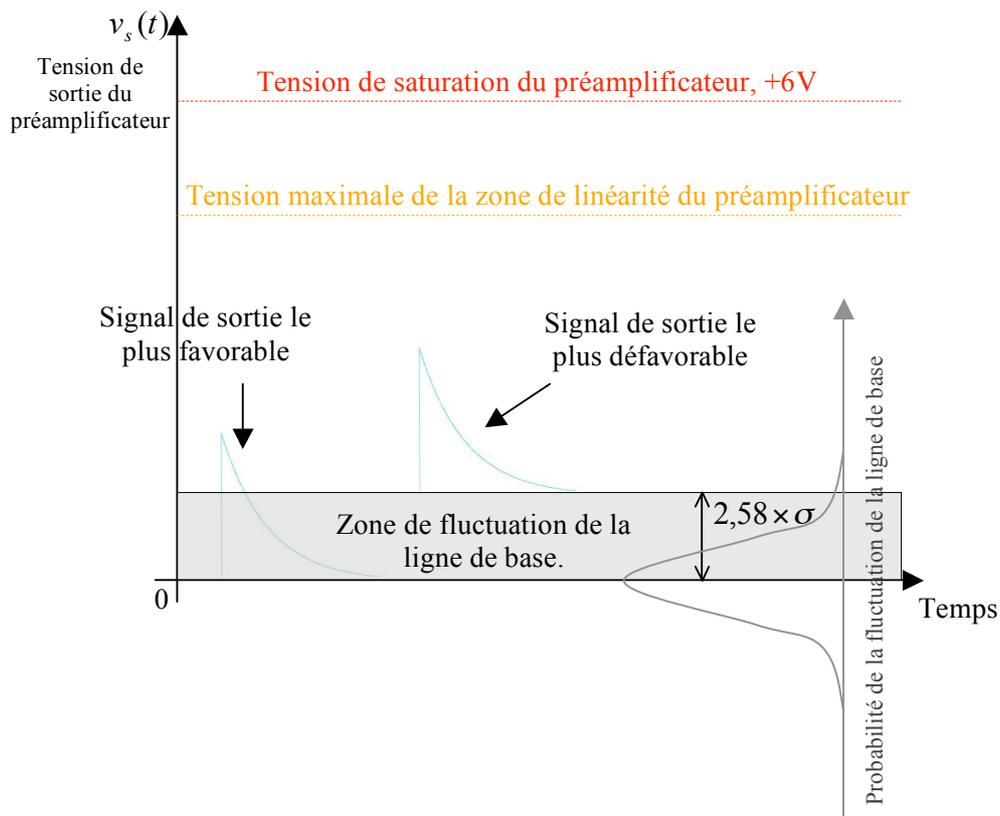


Figure 73 : Représentation de la tension de sortie du préamplificateur en fonction du temps, variation de la ligne de base.

Nous savons que la dynamique du préamplificateur est de 600 MeV (maximum de la zone de linéarité), la tension de sortie est alors égale à :

$$v_{s\_max\_linéarité\_préamplificateur}(t) = \frac{Q}{C_r} = \frac{W_d \times q_e}{W_p \times C_r} = \frac{600 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19}}{3,6 \times 12 \times 10^{-12}} = 2,22 \text{ V}$$

Nous savons aussi que nous pouvons mesurer dans le pire cas des ions d'une énergie maximum de 350 MeV, la tension de sortie du préamplificateur est égale à :

$$v_{s\_max\_mesuré}(t) = \frac{W_d \times q_e}{W_p \times C_r} = \frac{350 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19}}{3,6 \times 12 \times 10^{-12}} = 1,3 \text{ V}$$

Nous pouvons aussi écrire d'après la figure 73 :

$$v_{s\_max\_linéarité}(t) > v_{s\_max\_mesuré}(t) + 2,58\sigma$$

$$\sigma < \frac{v_{s\_max\_linéarité}(t) - v_{s\_max\_mesuré}(t)}{2,58}$$

$$S \times E \times \sqrt{\left(\frac{N_{Comptage} \times \tau_r}{2}\right)} < \frac{v_{s\_max\_linéarité}(t) - v_{s\_max\_mesuré}(t)}{2,58}$$

$$\frac{N_{Comptage} \times \tau_r}{2} < \left(\frac{v_{s\_max\_linéarité}(t) - v_{s\_max\_mesuré}(t)}{2,58 \times S \times E}\right)^2$$

$$\tau_r < \left(\frac{v_{s\_max\_linéarité}(t) - v_{s\_max\_mesuré}(t)}{2,58 \times S \times E}\right)^2 \times \frac{2}{N_{Comptage}}$$

Avec  $\tau_r = R_r \times C_r$ . Alors, nous pouvons écrire :

$$R_r < \left(\frac{v_{s\_max\_linéarité}(t) - v_{s\_max\_mesuré}(t)}{2,58 \times S \times E}\right)^2 \times \frac{2}{N_{Comptage} \times C_r}$$

Équation 36

$$v_{s\_max\_linéarité}(t) = 2,22 \text{ V}, v_{s\_max\_mesuré}(t) = 1,3 \text{ V}, S = 3,7 \times 10^{-3} \text{ V}, E = 350 \text{ MeV}$$

$$N_{Comptage} = 1000 \text{ coups/seconde et } C_r = 12 \mu\text{F}$$

$$R_r < \left( \frac{2,22 - 1,3}{2,58 \times 3,7 \times 10^{-3} \times 350} \right)^2 \times \frac{2}{1000 \times 12 \times 10^{-12}} = 12,6 \text{ M}\Omega$$

Nous avons choisi dans notre cas 10 M $\Omega$ . Avec cette résistance le préamplificateur fonctionne correctement tant que le taux de comptage ne dépasse pas 1 000 coups par seconde. Ainsi pour la surface entière du détecteur (16 pistes sur une face) le taux de comptage peut atteindre 16 000 coups par seconde.

## Annexe F : Droites de calibration en énergie.

### 1) Droite de calibration pour la gamme 0 – 6 MeV (mesures avec la source alpha)

Le tableau ci-dessous permettra de tracer la droite de calibration. Il y aura alors une correspondance entre les canaux affichés sur l'informatique de traitement et la perte d'énergie correspondante aux éléments identifiés :

Elément émetteur d'alphas	Energie de la source alpha		Canaux représentant la perte d'énergie	
	Energie de l'alpha en keV	Ecart type absolu sur l'énergie de l'alpha en keV	Moyenne du spectre en canaux	Ecart type absolu en canaux
<sup>239</sup> Pu	5156,59	± 0,14	2372	± 6,59
<sup>241</sup> Am	5485,56	± 0,12	2523	± 6,75
<sup>244</sup> Cm	5804,77	± 0,05	2668	± 6,01

**Tableau 16 : Les valeurs énergétiques de la source étalon en correspondance avec les spectres affichés par l'informatique.**

Pour tracer la courbe de calibration, la méthode d'ajustement des moindres carrés sera utilisée. Elle a comme équation :

$$y_e = ax_e + b \quad \text{Équation 37}$$

L'incertitude sur le  $y_e$  se détermine de la façon suivante [TAY82] :

$$\sigma_{y_e} = \sqrt{\frac{(y_e - (ax_e + b))^2}{n}} \quad \text{Équation 38}$$

Où les coefficients a et b sont égaux à :

$$a = \frac{n(\sum x_e y_e) - \sum x_e \times \sum y_e}{n \times \sum x_e^2 - (\sum x_e)^2} \quad \text{Équation 39}$$

$$b = \frac{(\sum y_e) \times (\sum x_e^2) - (\sum x_e) \times (\sum x_e y_e)}{n \times \sum x_e^2 - (\sum x_e)^2} \quad \text{Équation 40}$$

Chaque coefficient a une incertitude qui se définit par :

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{n \times \sigma_{y_e}^2}{n \times \sum x_e^2 - (\sum x_e)^2}} \quad \text{Équation 41}$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sigma_{y_e}^2 \times \sum x_e^2}{n \times \sum x_e^2 - (\sum x_e)^2}} \quad \text{Équation 42}$$

Le tableau 16 regroupe les différents calculs pour déterminer les caractéristiques de la droite de calibration. Ainsi la figure 74 représente la droite de calibration dans la gamme de mesure 0 – 6 MeV.

Source Alpha	Canaux		Energie en keV			
	Xe	Ye	Xe <sup>2</sup>	Xe.Ye	aXe+b	(Ye-(aXe+b)) <sup>2</sup>
PU 239	2372	5156,59	5626384	12231431,5	5156,04	0,304306984
AM 241	2523	5485,56	6365529	13840067,9	5486,69	1,268117039
CM 244	2668	5804,77	7118224	15487126,4	5804,20	0,330012059
Somme Xe	7563					
(Somme Xe) <sup>2</sup>	57198969					
Somme Ye		16446,92				
Somme Xe <sup>2</sup>			19110137			
Somme (Xe.Ye)				41558625,7		
Somme (Ye-(aXe+b)) <sup>2</sup>						1,90
n (nombre de points)	3					
a	2,190					
σ a	0,004					
b	-37,978					
σ b	9,602					
σ Ye	0,80					

Tableau 17 : Le tableau permet de calculer les coefficients a et b de la droite de calibration avec l'utilisation des équations 22 et 23.

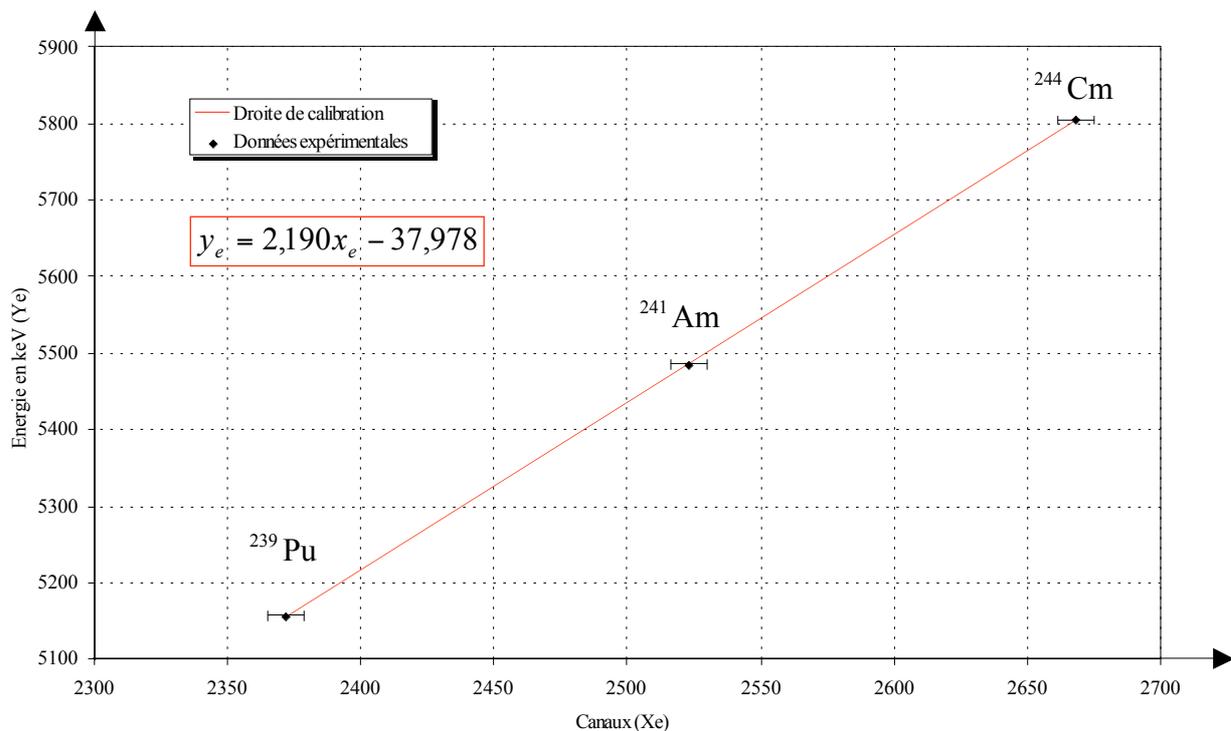


Figure 74 : La droite de calibration dans la gamme 0 - 6 MeV ( gain amplificateur à 56).

2) Droite de calibration pour la gamme 100 – 350 MeV (mesures avec le faisceau)

Ions	Canaux	Energie en MeV				
	Xe	Ye	Xe <sup>2</sup>	Xe.Ye	aXe+b	(Ye-(aXe+b)) <sup>2</sup>
O 16	3859	138,96	14891881	536246,64	138,68	0,078523365
Ne 20	4844	173,7	23464336	841402,8	173,85	0,022133549
S 32	7774	277,92	60435076	2160550,08	278,46	0,295001603
Ar 36	8728	312,66	76177984	2728896,48	312,53	0,018146039
Ar 40	9697	347,4	94031809	3368737,8	347,12	0,076721542
Somme Xe	34902					
(Somme Xe) <sup>2</sup>	1218149604					
Somme Ye		1250,64				
Somme Xe <sup>2</sup>			269001086			
Somme (Xe.Ye)				9635833,8		
Somme (Ye-(aXe+b)) <sup>2</sup>						0,49
n (nombre de points)	5					
a	0,0357					
σ a	0,0001					
b	0,8959					
σ b	0,5888					
σ Ye	0,40					

Tableau 18 : Le tableau permet de calculer les coefficients a et b de la droite de calibration avec l'utilisation des équations 22 et 23.

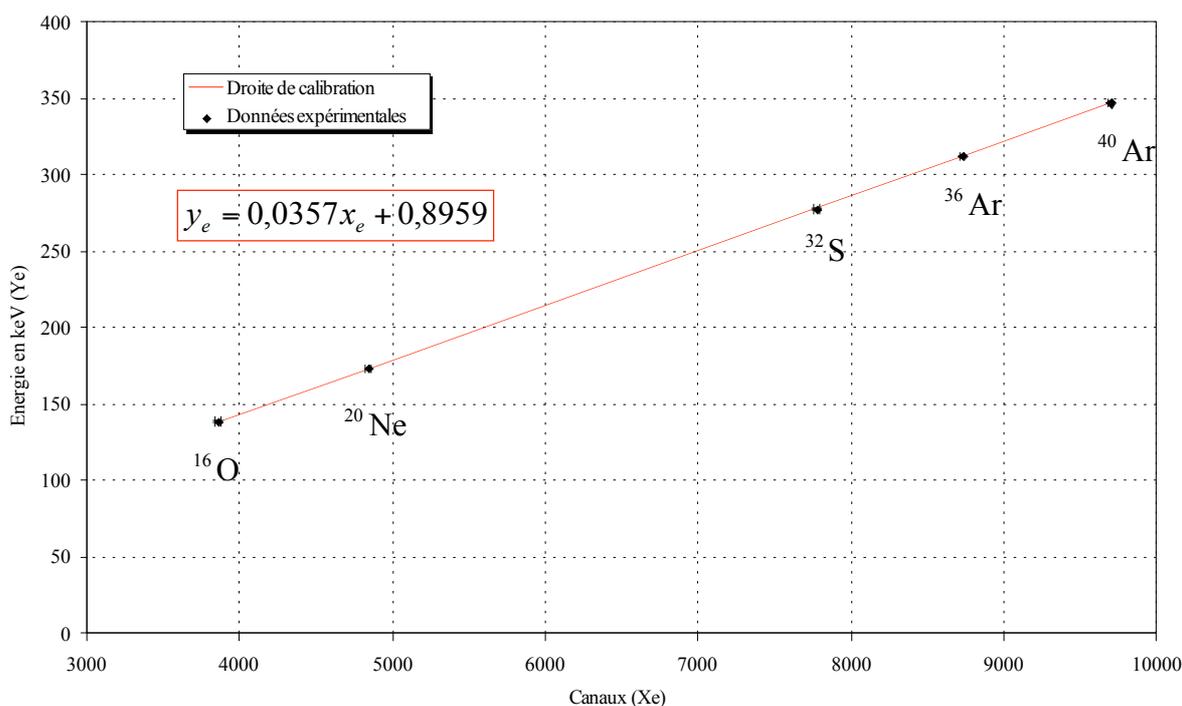


Figure 75 : Courbe de calibration avec les ions produits par l'accélérateur (gain des amplificateurs à 4).

# Bibliographie

## Ouvrages :

- [KNO89] GLENN F.KNOLL, Radiation detection and measurement (second edition), Wiley International Editions.
- [LEO84] WILLIAM R. LEO, Techniques for nuclear and particle physics experiments, édition Springer-Verlag.
- [LID04] DAVID R.LIDE, Handbook of chemistry and physics 85<sup>th</sup>, édition 2004-2005  
CRC PRESS.
- [POU94] JOEL POUTHAS, INDRA a  $4\pi$  charged product detection array at GANIL,  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A357, Elsevier 1994.
- [TAY82] JOHN R. TAYLOR, An introduction to error analysis, Oxford University press  
1982.
- [POU96] JOEL POUTHAS, The electronics of the INDRA  $4\pi$  detection array, Nuclear  
Instruments and Methods in Physics Research A369, Elsevier 1996.

Documentations techniques :

- [POC05] THIERRY POCHET, Détecteurs nucléaires principes physiques de fonctionnement, techniques de l'ingénieur BN 3 480.
- [BOU04] Christian Bourgeois, Interaction particules matière, détecteur, technique de l'ingénieur AF 3 531.
- [LAU05] Ets LAUDA, Mode d'emploi Ecoline Staredition cryothermostats RE105, version août 2005, page 30.

Thèses :

- [COP90] NOËL COPINET, Multidétecteur  $4\pi$  INDRA Simulation de la géométrie et étude des détecteurs au silicium, thèse soutenu le 23 novembre 1990.

Liens internet :

- [TOR196] R.B. FIRESTONE (LBNL, Berkeley, USA) et L.P. EKSTRÖM (Department of Physics, Lund University, Sweden), Table Of Radioactive Isotopes, <http://ie.lbl.gov/toi/perchart.htm> Version 2.1, January 2004
- [ROOT] Programme de traitement informatique utilise pour l'analyse des données, <http://root.cern.ch/>

## RESUME ET MOTS CLES

# Analyse de la solution multipiste dans le cadre du projet FAZIA

Mémoire d'ingénieur C.N.A.M., Caen 2007

---

Le projet FAZIA consiste à construire un multidétecteur  $4\pi$  capable de détecter les produits d'une réaction nucléaire. Cet instrument permettrait de sonder la matière avec une meilleure résolution angulaire et une meilleure granularité par rapport aux multidétecteurs actuels. Des télescopes composés de trois étages (deux siliciums et un scintillateur couplé à des photodiodes) seraient disposés autour d'une cible de réaction. Deux axes de choix technologique pour les étages de silicium sont à l'étude. La première alternative concerne le silicium mono cellule et la seconde le silicium multipiste. Ce mémoire, analysant la solution multipiste, se décompose en deux parties. La première, permet de montrer les avantages et les inconvénients en termes de géométrie pour l'utilisation du silicium multipiste, la deuxième est une phase expérimentale caractérisant la résolution en énergie de la chaîne de mesure. Dans cette phase de tests, nous avons aussi évalué les phénomènes d'influences entre les voies de mesure en énergie. Nous concluons que la solution multipiste dans le cadre du projet FAZIA constitue une alternative très intéressante pour la construction du futur multidétecteur  $4\pi$ .

Mots clés : Silicium multipiste double faces – Multidétecteur – Diaphonie – Effet interpiste – Mesures de perte d'énergie.

---

The purpose of FAZIA Project is to build a four pi multi-detector which is capable to find the products of a nuclear reaction. This instrument will be able to probe the matter with a better angular resolution and clarity than today's multi-detectors. The telescopes are made with three layers, two silicone layers and one scintillator layer with photodiodes, which will lie next to the target. Two technological approaches using the silicone layer are studied. The first approach uses the mono cell of silicone and the second approach is the multistrip silicone. This paper will demonstrate two points. The first point is to show the advantages and disadvantages of the multistrip silicone configuration. The second point is an experimental phase to show a characteristic from energy resolution of the measure chain. In this part, we also estimated some influences between the channel energy measures. In Project FAZIA, we shall see that the multistrip silicone detector is a very interesting solution for the future four pi multi-detector.

Keywords: double side strips silicon – multidetector – crosstalk – interstrip effect – loss energy measures.