

Sujet du Stage :

***Conception d'une
nouvelle électronique de
localisation d'une
chambre à fils dédiée à
la médecine nucléaire***

Présenté par : Cristóbal GONZÁLEZ DÍAZ

Assisté par : M^{elle} Angela BARR



Université Pierre et Marie Curie
4, Place Jussieu
75005 Paris
France



Laboratoire d'Électricité Générale
10, rue Vauquelin
75005 Paris
France

Février- Juin 2003

Remerciements

Je tiens d'abord à exprimer mes remerciements les plus vifs à ma responsable de stage M^{elle}. Angela BARR pour m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail ainsi que pour sa disponibilité, son assistance et ses conseils.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Jacques LEWINER, ainsi que tous les membres du Laboratoire d'Électricité Générale de l'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la ville de Paris, de m'avoir accueilli, en particulier à Mr. Stéphane HOLÉ, Mr. Thierry DITCHI et M^{elle}. Gwladys COLLIN pour leur sympathie et leurs conseils.

Je tiens à remercier Mr Damien LEBRUN, ainsi que tous les membres de la société SYNOVE pour leurs conseils

Je tiens à remercier à mes camarades de stage: Rho-Fay Xavier CHENG, Yoann PAICHARD, Matthieu RAISON, François ZIADE et Jean Marc HUI BONHOA qui ont été là pour m'aider à résoudre toutes mes interrogations.

Je tiens à remercier aussi à Monsieur J-P. GAUVRY pour sa sympathie.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je tiens à remercier enfin tous les membres du jury pour leur présence et pour avoir accepté de m'écouter et d'évaluer mon travail à sa juste valeur.

Cristóbal GONZÁLEZ DÍAZ



L'École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la Ville de Paris.

Fondée en 1882, l'Ecole supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris attire depuis plus d'un siècle les esprits scientifiques les plus créateurs : Pierre et Marie Curie, Paul Langevin, Frédéric Joliot-Curie, Pierre-Gilles de Gennes et Georges Charpak sont autant de noms qui contribuent à la renommée internationale de l'Ecole.

Les fondateurs de l'Ecole avaient, dès l'origine, pressenti le grand intérêt d'une formation pluridisciplinaire basée sur de solides fondations. La prise en compte de la complexité des scientifiques possédant des compétences élargies.

La qualité de la formation dispensée à l'ESPCI permet à ses Anciens Élèves d'être présents dans tous les secteurs de l'industrie (télécommunications, informatique, chimie, pharmacie, biologie...), principalement en Recherche et Développement.

Relations industrielles

L'ESPCI est une école d'ingénieurs qui a pour mission de former des cadres scientifiques de haut niveau. Les relations industrielles sont essentielles en ce qui concerne la formation initiale et la formation aux métiers d'ingénieur.

Des conférences, des visites de sites, des tables rondes et des simulations d'entretien d'embauche sont organisées avec les partenaires industriels à l'attention des étudiants. Chaque promotion est spécifiquement parrainée par une entreprise.

La recherche à l'ESPCI

L'ESPCI est la grande Ecole d'Ingénieurs pour laquelle recherche et enseignement sont toujours allés de pair.

L'Ecole compte aujourd'hui une vingtaine de laboratoires dont les thématiques sont largement distribuées de la physique à la biologie, de l'intelligence artificielle à la chimie, de la mesure de la pollution au contrôle non destructif, de la supraconductivité à la réalisation de prototypes pour l'industrie.

La recherche est organisée principalement autour des laboratoires d'enseignement, en étroite symbiose avec celui-ci. Elle couvre un grand nombre de spécialités en Physique et en Chimie et, depuis peu, en Biologie.

Cette recherche est ouverte sur les milieux extérieurs à l'Ecole : de nombreux chercheurs sont en relation avec les milieux scientifiques et techniques industriels ou universitaires, tant en France qu'à l'étranger.

Les activités de recherche du Laboratoire d'Electricité Générale.

Propriétés Electriques des Solides

- Etude des propriétés des matériaux supraconducteurs, Effet JOSEPHSON.
- Etude des propriétés des isolants.
- Les électrets (polymères, matériaux isolants) .

Capteurs et Instrumentation

- Etude, conception et réalisation de différents types de capteurs : Détecteurs d'aérosols, de fumée, de débit, de vitesse, de pression.
- Réseau de terrain (selon WorldFIP) à usage industriel.
- Aide à la navigation automobile et à l'exploitation de réseau de transport (INFOBUS).
- Acoustique :

Modifications des caractéristiques du son.

Réduction active de bruit par émission d'antibruit.

Imagerie et Instrumentation Médicale

- Systèmes d'imagerie bidimensionnelle d'émetteurs radioactifs (autoradiographie, blotting, coupes biologiques...).
- Conception des capteurs et des systèmes d'exploitation électroniques associés, traitement d'images.

Télécommunications

- Modélisation des champs électromagnétiques.
- Optimisation des répartitions spatiales des champs électromagnétiques.
- Filtres adaptatifs à ondes de surfaces.
- Etude et réalisation de récepteur de radiomessagerie (faible consommation / fort débit) selon les normes ERMES, DARC, FLEX, POCSAG.
- Dispositifs de téléphonie sans fils (analogique CT0, numérique DECT).
- Terminaux mobiles de télécommunication selon les normes GSM et DCS1800.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.	1
I. PRESENTATION GENERALE DE LA CHAMBRE A FILS.	2
I.1 APPLICATION À LA MÉDECINE NUCLÉAIRE (IMAGERIE MÉDICALE).	2
I.2. DESCRIPTION GÉNÉRAL DE LA CHAMBRE À FILS.	3
I.3. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE DU DÉTECTEUR.	5
I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU DÉTECTEUR.	8
I.5 LES SIGNAUX GÉNÉRÉS PAR LE DÉTECTEUR.	9
I.5.1 Présentation générale des signaux générés par le détecteur.	9
I.5.2 Le signal induit sur les fils.	11
I.5.3 Le signal induit sur les strips.	14
II. LES TECHNIQUES ACTUELLES DE LOCALISATION DES CHAMBRES À FILS.	15
II.1 TRAITEMENT ÉLECTRONIQUE ACTUELLE.	15
III. ETUDE DES SIGNAUX DE SORTIE DE LA CHAMBRE À FILS.	18
III.1 ETUDE EXPÉRIMENTALE DES VOIES D'AMPLIFICATION ET DE MISE EN FORME.	18
III.1.1 Description des voies d'amplification et de mise en forme.	18
III.1.2 Allure des signaux de sortie de la chambre à fils.	19
III.2 CARACTÉRISATION DES VOIES ÉLECTRONIQUES, RÉSULTATS PRATIQUES.	20
III.2.1 Le gain électronique en fonction de l'amplitude d'entrée.	20
III.2.2 Le gain électronique en fonction de la fréquence d'entrée.	20
III.2.3 Non-Uniformité des gains des différentes voies.	22
IV. PROPOSITION D'UNE NOUVELLE ÉLECTRONIQUE.	23
IV.1 PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA NOUVELLE ÉLECTRONIQUE.	23
IV.2 FONCTIONNEMENT DU MODULE DE TRAITEMENT.	24
V. ETUDE ET OPTIMISATION DU MODULE DE TRAITEMENT.	27
V.1 ETUDE DU MODULE DE TRAITEMENT.	27
V.1.1. Réponse du Module à un signal contenu.	27
V.1.2 Uniformité du Module de traitement.	28
V.1.3 Bruit du Module de traitement.	29
V.1.4 Seuil du Module de traitement.	29
V.2 ETUDE DES CARTES FILLES RELIÉES AU MODULE DE TRAITEMENT.	30
V.2.1 Le gain électronique en fonction de l'amplitude d'entrée.	31
V.2.1.1 Gains électroniques pour les anciennes cartes électroniques analogiques.	31
V.2.1.2 Gain électronique pour les nouvelles cartes électroniques analogiques.	32
V.2.1 Uniformité des cartes filles.	32
V.2.1.1 Uniformité des anciennes cartes électroniques analogiques.	33
V.2.1.2 Uniformité des nouvelles cartes électroniques analogiques.	34

V.3 TAUX DE COMPTAGE DU MODULE DE TRAITEMENT.	35
VI. ETUDE ET OPTIMISATION DU MODULE DE TRAITEMENT RELIÉE À LA CHAMBRE À FILS.	38
VI.1 RÉPONSE À UNE SOURCE ÉTENDUE.	40
VI.2 SÉQUENCE DES ÉVÉNEMENTS.	41
VI.3 INFLUENCE DE LA MOYENNE DES ÉCHANTILLONS SUR L'AMPLITUDE.	42
VI.4 TAUX DE COMPTAGE DU MODULE RELIÉ À LA CHAMBRE À FILS.	44
VI.5 INFLUENCE DU TEMPS D'OUVERTURE DU SIGNAL DE SYNCHRONISATION SUR LA LECTURE.	45
VI.6 INFLUENCE DE LA TENSION DES FILS D'ANODES SUR LA LECTURE.	49
VI.7 INFLUENCE DE LA TENSION DE LA DÉRIVE SUR LA LECTURE.	50
VII. PERSPECTIVES.	52
VII.1 OUVERTURE DU SIGNAL DE SYNCHRONISATION LORSQU'IL Y UN PIC.	52
VII.2 SIGNAL DE SYNCHRONISATION OUVERT EN ATTENDANT L'ARRIVÉE D'UN PIC.	53
VII.3 ARCHITECTURE GLOBALE DU NOUVEAU SYSTÈME DE LOCALISATION.	54
VIII. CONCLUSION.	55
BIBLIOGRAPHIE.	56

TABLE DES FIGURES

Figure 1: La gamma caméra.	3
Figure 2: Schéma de la structure de la gamma caméra.	6
Figure 3: Dimension des différentes zones du détecteur.	7
Figure 4: Allure des lignes de champ créées par les électrodes de la chambre à fils.	7
Figure 5: Schéma du principe de fonctionnement du détecteur.	8
Figure 6: Origine des signaux des fils.	11
Figure 7: Interpolation de la position de l'interaction primaire.	12
Figure 8: Les signaux des bandes.	14
Figure 9: Principe de la localisation actuelle.	16
Figure 10: Schéma d'une voie d'amplification.	18
Figure 11: Allure des signaux de sortie de la chambre.	19
Figure 12: Gain électronique en fonction de l'amplitude d'entrée.	20
Figure 13: Gain électrique en fonction de la fréquence d'entrée.	21
Figure 14: Mise en évidence des non-uniformités des gains.	22
Figure 15: Principe général de la nouvelle méthode de localisation.	23
Figure 16: Fonctionnement du Module de traitement.	25
Figure 17: Réponse du Module à un signal continu.	27
Figure 18: Uniformité du Module de traitement.	28
Figure 19: Bruit du Module de traitement.	29
Figure 20: Seuil du Module de traitement.	29
Figure 21: Etude des cartes électroniques analogiques.	30
Figure 22: Gain électronique (anciennes cartes).	31
Figure 23: Gain électronique (nouvelles cartes).	32
Figure 24: Uniformité des cartes électroniques analogiques (anciennes circuits).	33
Figure 25: Uniformité des cartes électroniques analogiques (nouvelles circuits).	34
Figure 26: Efficacité du signal de synchronisation.	35
Figure 27: Taux de comptage en fonction du signal d'entrée.	36
Figure 28: Taux de comptage en fonction de la fréquence de synchronisation.	37
Figure 29: Comparaison de deux programmes de comptage.	37
Figure 30: Etude et optimisation de la chambre à fils.	38
Figure 31: Source étendue et source collimateur.	39
Figure 32: Source étendue.	40
Figure 33: Séquence des événements.	41
Figure 34: Influence du nombre d'échantillons sur la moyenne.	42
Figure 35: Influence du nombre d'échantillons sur les moyennes.	43
Figure 36: Taux de comptage du Module relié à la chambre.	44

Figure 37: Signal de synchronisation.	45
Figure 38: Influence du temps d'ouverture sur la lecture.	46
Figure 39: Influence du temps d'ouverture sur les amplitudes.	47
Figure 40: Influence de la tension des fils d'anodes sur la lecture.	49
Figure 41: Influence de la tension des fils d'anodes sur les amplitudes.	50
Figure 42: Influence de la tension de la dérive sur la lecture.	51
Figure 43: Signal de synchronisation I.	52
Figure 44: Signal de synchronisation II.	53
Figure 45: Architecture globale du nouveau système de localisation.	54

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Tableau Technique de caractéristiques; V785.	26
Tableau 2: Non - Uniformité du Module de traitement.	28

INTRODUCTION.

L'utilisation d'une chambre à fils comme outil de visualisation en médecine nucléaire présente de nombreux avantages par rapport aux dispositifs actuellement utilisés. Ces derniers mettent généralement en œuvre des caméras *Gamma*, fondées sur des détecteurs à cristaux. Le très haut taux de comptage des chambres à fils permet d'effectuer de l'imagerie dynamique comme cela est nécessaire en cardiologie afin d'observer en temps réel les battements du cœur.

Le but de mon stage résidait dans l'étude et la mise en œuvre d'une méthode de localisation d'une chambre à fils, dédiée à la médecine nucléaire. Elle permet donc de visualiser les rayonnements *Gamma* émis par un radio-isotope radioactif injecté au patient, qui se fixe spécifiquement sur le tissu biologique que l'on souhaite observer.

Le dispositif actuel permet donc déjà l'imagerie des rayonnements *Gamma*, mais le principe de localisation de ces rayonnements était susceptible d'être amélioré. Dans certaines applications, une résolution aussi grande que possible est nécessaire. Mon travail s'est porté sur la mise en œuvre d'une nouvelle méthode de localisation.

La première partie de ce rapport présente la description générale de la chambre à fils, ainsi que ses applications dans le domaine de la médecine nucléaire. La deuxième partie sera consacrée à l'actuelle méthode de localisation, alors que la troisième partie présentera les expériences effectuées sur le détecteur afin de mieux connaître l'allure des signaux disponibles à sa sortie. La quatrième partie décrira la nouvelle méthode de localisation. Enfin, les cinquième et sixième parties présenteront l'optimisation et la mise en œuvre de cette nouvelle électronique.

I. PRESENTATION GENERALE DE LA CHAMBRE A FILS.

La partie qui suit décrit tout d'abord le principe général de fonctionnement de la chambre, sa géométrie et l'application à la médecine nucléaire.

I.1 Application à la médecine nucléaire (Imagerie médicale).

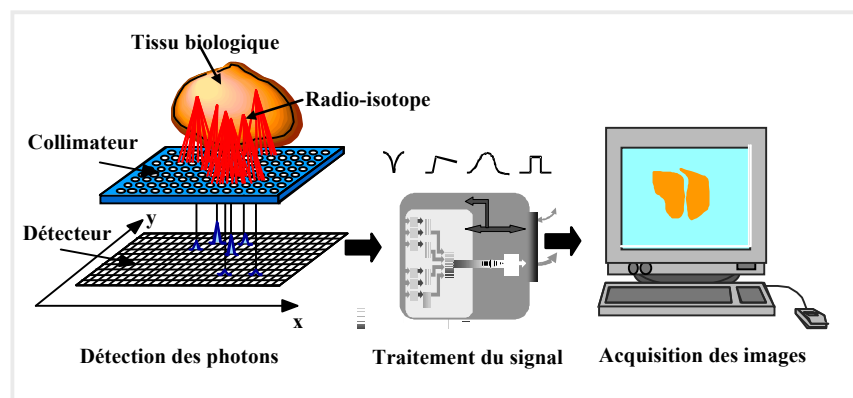
L'imagerie médicale est un outil de choix pour le médecin qui veut établir un diagnostic. En effet, en plus de l'observation des symptômes extérieurs d'un dysfonctionnement de l'organisme, le médecin peut maintenant voir le corps du patient de l'intérieur. Deux méthodes d'imagerie peut être distingué : les méthodes invasives et les méthodes non-invasives.

Les **méthodes invasives** impliquent l'introduction dans l'organisme d'un objet tel qu'un endoscope ou un cathéter. En plus d'être inconfortable pour le patient, ces méthodes peuvent provoquer une infection si des microbes ou des bactéries sont introduits en même temps que l'objet.

Les **méthodes non-invasives** sont quant à elles fondées sur le passage dans le corps de rayonnements électromagnétiques ou acoustiques. Une image est reconstituée à partir de la mesure des propriétés de propagation de ces ondes dans les tissus. La source des ondes peut être extérieure à l'organisme, comme dans le cas de l'échographie ou de la radiographie par rayons X. La source peut aussi être placée à l'intérieur du corps par injection ou administration orale d'une substance émettant des rayons gamma. Une telle substance est appelée «traceur». Les traceurs présentent la propriété de se fixer préférentiellement sur un type de tissu ou d'organe. Ainsi par exemple il existe des traceurs qui ont une affinité particulière pour les tumeurs cancéreuses, d'autres, comme l'iode, se concentrent dans la thyroïde. En recueillant les radiations émises par les traceurs, on est capable de reconstituer l'image de l'organe ou du tissu cible et de détecter d'éventuelles anomalies.

Dans la figure 1, le fonctionnement très général de la gamma caméra est présenté. Pour étudier l'intérieur du corps humain en médecine nucléaire, on injecte un radio-isotope dans l'organisme du patient. Les photons gamma émis par ce radio-isotope arrivent au collimateur. Celui-ci assure la sélection des rayons gamma se propageant perpendiculairement à la surface de la chambre à fils (on parlera plus loin du fonctionnement de la chambre à fils). Après la radiation gamma atteint la chambre. Celle-ci émet des impulsions électroniques qui sont traitées par un système électronique. Ce dernier transforme les impulsions électroniques en données numériques qui sont envoyées vers l'ordinateur. Ce procédé-ci permet de visualiser sur écran la distribution du radio-isotope dans le tissu biologique. Ce traitement électrique du signal de la chambre à fils est analogique et numérique. Le but de mon stage est d'améliorer cette méthode de traitement.

Figure 1: La gamma caméra.



1.2. Description général de la chambre à fils.

Les chambres à fils ont été inventées au C.E.R.N. en 1968 par Georges Charpak et ses collaborateurs. Elles étaient donc initialement destinées à des expériences en physique nucléaire. Leurs principales qualités, par rapport aux détecteurs déjà existants à l'époque, sont une grande rapidité et une résolution spatiale accrue.

La possibilité de localiser avec précision et de façon bi-dimensionnelle des photons Gamma de basse énergie rend possible l'utilisation de ce type de détecteur comme Gamma Caméra en médecine nucléaire, où l'énergie des rayonnements utilisés varie de quelques keV à 550 keV .

Les Gamma Caméra actuellement utilisées en médecine nucléaire sont les Gamma Caméras d'Anger ou les Gamma Caméras à cristaux, inventées dans les années cinquante.

Leur principe de fonctionnement est fondé sur la détection par un ensemble de photomultiplicateurs d'un flash lumineux induit par le passage d'un photon Gamma dans un cristal (le plus souvent NaI).

L'utilisation de chambre à fils dans des applications en médecine nucléaire présente de nombreux avantages par rapport aux Gamma Caméras d'Anger. Tout d'abord, la taille réduite des chambres à fils (moins d'un mètre cube pour notre camera) par rapport à celle des Gamma Camera à cristaux, qui occupent généralement l'ensemble d'une pièce, permet d'effectuer des examens directement en salle d'opération et de transporter le détecteur. La possibilité de détecter des rayonnements Gamma de basse énergie ($< 100\text{Kev}$) permet d'envisager l'utilisation de radioéléments de demi-vie physique courte, tel que le Tantale¹⁷⁸ et donc de diminuer la dose de radioactivité administrée au patient. Le taux de comptage (nombre d'événements détectés par seconde) plus élevé pour les chambres à fils que pour les Gamma Caméra à cristaux permet d'envisager des études dynamiques (comme cela est nécessaire en cardiologie). Enfin la résolution de la chambre à fils actuellement développée devrait être supérieure à celle des Gamma Caméras à cristaux actuelles, ce qui permettra un diagnostic plus précis du patient.

1.3. Description de la structure du détecteur.

Afin de pouvoir utiliser ces termes dans la suite du rapport, on décrit dès maintenant les différents éléments de la caméra.

La Gamme Caméra comporte donc :

- Le ***collimateur***, qui assure la sélection des rayons Gamma se propageant perpendiculairement à la surface du détecteur.
- La ***fenêtre d'entrée***, qui doit être aussi transparente que possible aux photons incidents; cette fenêtre est en fait la face avant de l'enceinte étanche en aluminium contenant les différentes électrodes du détecteur et son gaz de remplissage sous pression. On utilise ici un mélange de Xénon et d'Ethane en proportion 90-10.
- La ***cathode de dérive («drift»)*** et les électrodes de dérive formées par une plaque de métal portée à une tension négative de l'ordre du kV.
- La ***grille («grid»)*** formée par un plan de 192 fils parallèles de 20 μ m de diamètre espacés de 1.27mm. Le potentiel de ces électrodes est de quelques kV et négatif.
- Le plan de ***fils d'anode*** constitué de 192 fils parallèles de 20 μ m de diamètre espacés de 1.27mm, placés perpendiculairement aux fils de la grille et portés à un potentiel positif de quelques kV.
- Le plan de ***bandes de cathode*** constitué de 192 bandes parallèles placées perpendiculairement aux fils d'anode également espacées de 1.27mm. Ils sont portés à un potentiel négatif de l'ordre de la centaine de volts.

Le schéma de la structure globale de la gamma caméra étudiée est représenté dans la figure 2 ci-dessous:

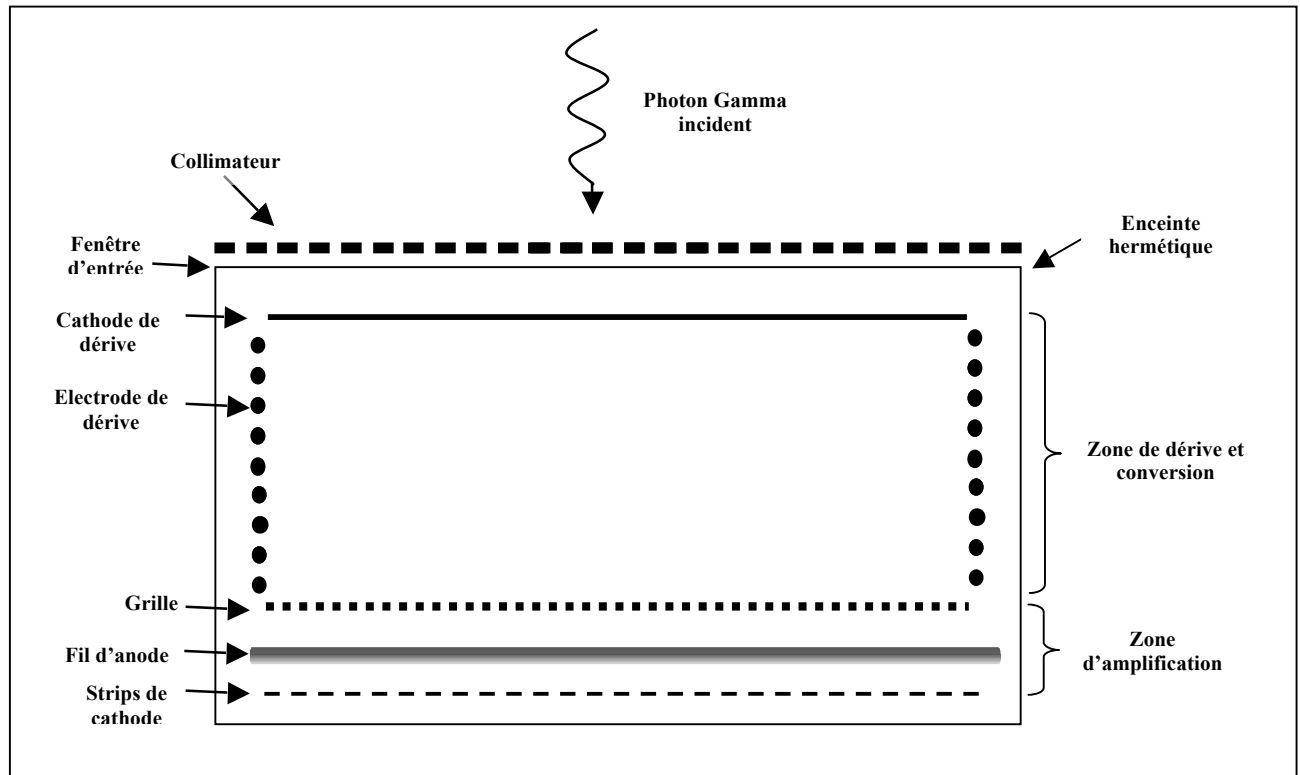


Figure 2: Schéma de la structure de la gamma caméra.

L'enceinte hermétique contenant l'ensemble des électrodes est donc remplie d'un gaz sous pression (un mélange Xénon-Ethane en proportion 90-10) qui permet la détection du photon Gamma comme on le verra plus loin.

A l'intérieur du détecteur on peut distinguer deux zones:

- La **zone de dérive et de conversion** délimitée par la cathode de dérive, les électrodes de dérive et la grille (toutes portées à un potentiel négatif). Le positionnement des différentes électrodes permet d'obtenir dans toute cette zone un champ électrique uniforme, perpendiculaire à la fenêtre d'entrée (voir figure 4).
- La **zone d'amplification** regroupant trois plans d'électrodes: la grille portée à un potentiel négatif, le plan des fils d'anode porté à un potentiel positif, le plan des bandes de cathode porté à un potentiel négatif.

Les dimensions des différentes zones du détecteur sont indiquées sur la figure 3 ci-dessous.

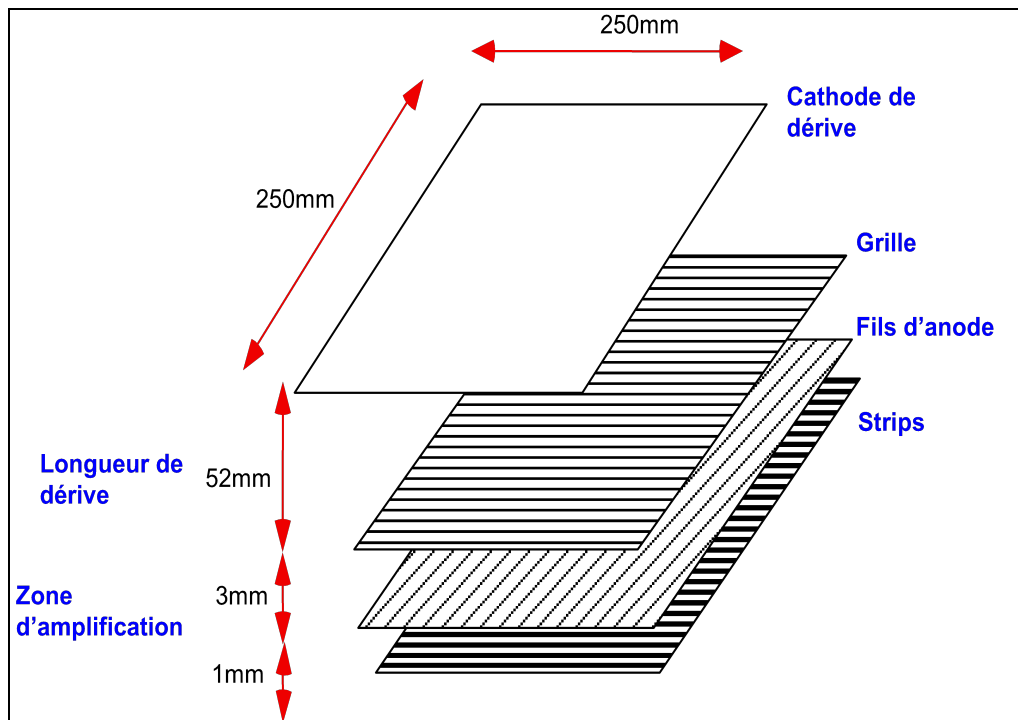


Figure 3: Dimension des différentes zones du détecteur.

Lorsque les tensions appropriées sont appliquées aux différentes électrodes, dans l'enceinte du détecteur s'obtiennent les lignes de champ de la figure 4. La structure du détecteur est telle que les champs appliqués dans la zone de dérive et dans la zone d'amplification sont indépendants.

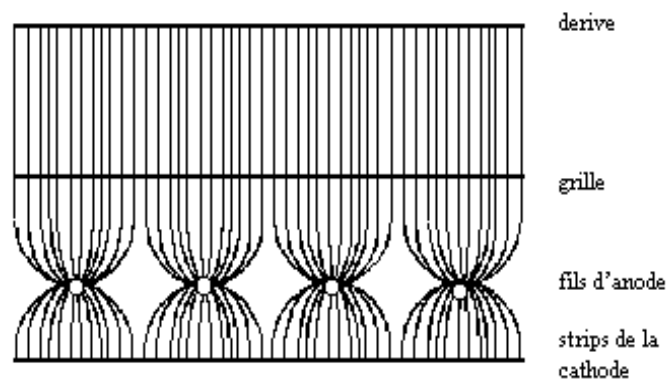


Figure 4: Allure des lignes de champ créées par les électrodes de la chambre à fils.

I.4 Principe de fonctionnement du détecteur.

Cette partie décrit schématiquement le principe de fonctionnement du détecteur.

La figure 5 ci-dessous illustre l'enchaînement des différents phénomènes physiques permettant la localisation bi-dimensionnelle de la position d'un photon Gamma incident.

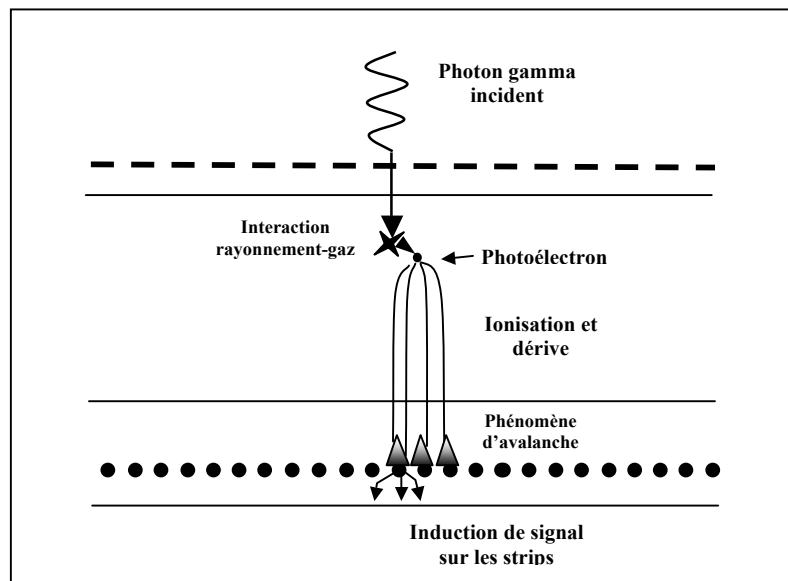


Figure 5: Schéma du principe de fonctionnement du détecteur.

Le collimateur assure la sélection des photons gamma incidents perpendiculaires à la fenêtre d'entrée du détecteur. Lorsque le photon pénètre dans la zone de conversion, il va interagir avec un atome de gaz qui va libérer un électron. Cet électron de haute énergie va à son tour interagir avec des atomes et produire d'autres électrons par ionisation. Sous l'effet du champ de dérive, l'ensemble de ces électrons migre vers la grille et les cations correspondants, migrent en sens contraire.

Tous les électrons franchissent la grille et sont attirés vers les fils d'anode portés à un potentiel positif. Si les tensions de la grille, des fils d'anode et des strips ont été convenablement réglées, il se produit alors un phénomène d'avalanche au voisinage du fil le plus proche à proximité du fil d'anode, les électrons sont accélérés sous l'effet du champ électrique intense. Ils gagnent suffisamment d'énergie pour ioniser d'autres atomes de gaz et donc produire d'autres électrons qui vont à leur tour gagner de l'énergie et produire d'autres ionisations, ce processus multiplicatif est responsable de l'avalanche. La taille de l'avalanche

est donc proportionnelle au nombre d'électrons - issus des ionisations dans la zone de conversion – qui franchit la grille juste au-dessus du fil.

Un **signal électrique négatif est donc induit sur le fil** où se produit l'avalanche suite à la collection des électrons, alors qu'un **signal positif est induit sur les strips** environnants par le mouvement des cations qui fuient la zone de l'avalanche.

Les fils d'anode étant positionnés perpendiculairement aux strips de cathode, il est possible de déterminer la position de l'avalanche dans deux directions. La coordonnée le long des fils s'obtient à partir des signaux sur les strips et la coordonnée dans une direction perpendiculaire aux fils s'obtient à partir des signaux sur les fils.

1.5 Les signaux générés par le détecteur.

La partie qui suit décrit les signaux électriques délivrés par le détecteur lors de la collection des électrons de l'avalanche par les fils d'anode.

1.5.1 Présentation générale des signaux générés par le détecteur.

Supposons qu'un électron franchisse la grille du détecteur sous l'influence du champ de dérive: il va alors être attiré vers le fil d'anode le plus proche porté à un potentiel positif. Très proche de la surface du fil d'anode (à une distance équivalente à quelques rayons de ce fil), il règne un champ électrique très intense, et une avalanche multiplicative va se développer et créer un grand nombre de paires électron ion. Les électrons vont alors être collectés par le fil d'anode. Cependant, les cations qui vont migrer vers les bandes de cathode traverseront l'ensemble de la différence de potentiel V et vont donc induire sur le fil d'anode une impulsion de charge d'amplitude Q , soit toute la charge créée lors de l'avalanche.

Le **signal induit sur le fil** où s'est développée l'avalanche **est donc négatif** car les cations quittent ce fil, alors que le signal engendré par le courant de cation sur les fils et **les strips** environnants **est positif**. Il est important de remarquer que la charge collectée par les fils est proportionnelle au nombre d'électrons de l'avalanche, soit au nombre d'électrons initialement créés lors de l'interaction primaire. A partir du signal sur les fils d'anode on peut donc théoriquement retrouver la nature de l'interaction primaire.

Dans le cas de la chambre à fils étudiée, chaque fil et chaque strip est équipé d'un circuit d'amplification et de mise en forme du signal de charge reçu. A la sortie de ces voies d'amplification et de mise en forme, on obtient donc un signal de tension ayant la forme d'une impulsion dont l'amplitude maximale correspond à la charge induite sur chaque fil ou strip. L'information contenue dans les signaux générés par la chambre est donc constituée de deux éléments:

- Une information purement **géométrique**: la présence ou l'absence de signal sur une voie électronique nous informe sur la présence ou non d'un événement le long de cette voie.
- Une information **énergétique**: l'amplitude de l'impulsion est proportionnelle à la taille de l'avalanche, donc au nombre d'électrons présents et donc à l'énergie déposée par le photon incident dans le détecteur.

C'est à partir de ces signaux que la position de l'avalanche peut être déterminée, ainsi que nous le verrons dans les parties qui suivent.

1.5.2 Le signal induit sur les fils.

Plan de la grille
(cathode)

Le nuage électronique issu de l'ionisation primaire possède une certaine extension spatiale. Il est donc susceptible de créer une avalanche sur plusieurs fils. L'allure des lignes de champs créées par les fils dans un plan perpendiculaire aux fils (voir figure 3) est responsable de la convergence des électrons franchissant la grille vers le fil d'anode le plus proche. En effet, il est alors possible de déterminer la position de l'interaction primaire par interpolation des signaux générés sur les différents fils.

La figure 6 illustre le phénomène décrit.

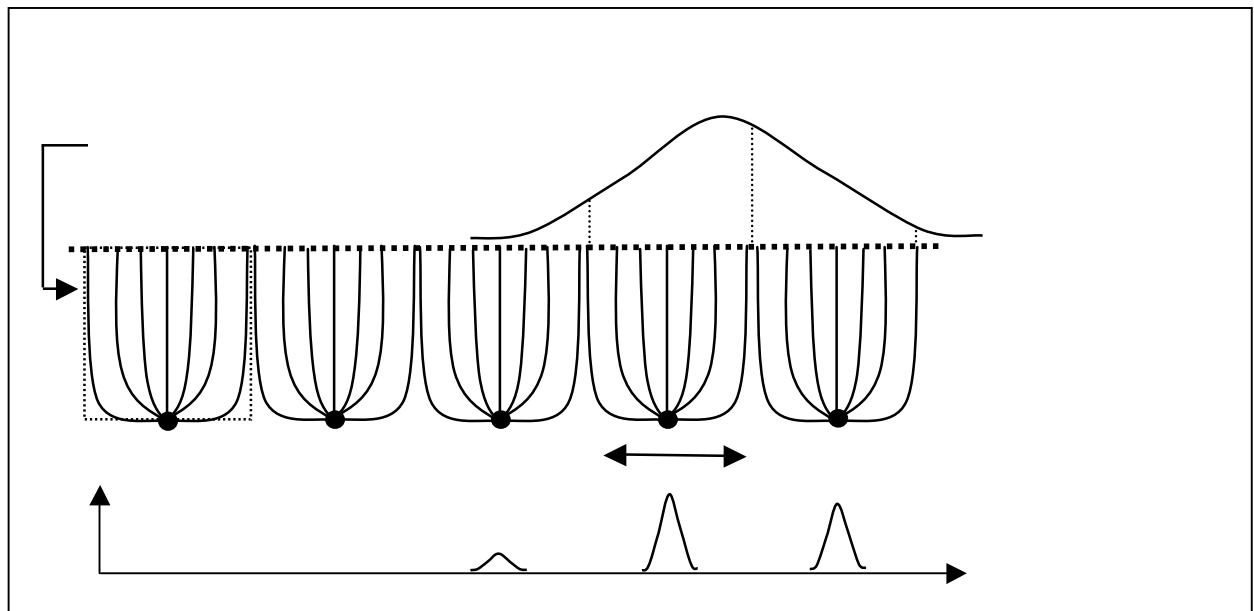


Figure 6: Origine des signaux des fils.

Si un électron franchit la grille en passant dans la région AA, du fait de la convergence des lignes de champ, il va être responsable d'une avalanche sur le fil a. De même s'il franchit la région BB, il sera responsable d'une avalanche sur le fil b. On voit apparaître ici l'effet de discrétisation des signaux engendrés par les fils.

Supposons, comme sur la figure 6, que le profil de la distribution de charge du nuage électronique est gaussien et s'étend sur plusieurs fils: les fils c,d et e sur la figure 6. Le signal délivré par un de ces fils sera proportionnel au nombre d'électrons ayant franchi la grille à l'aplomb de ce fil, donc à l'intégrale de la distribution de charge sur l'intervalle, I, centré sur le fil de longueur équivalente à la distance entre deux fils. Par la suite, on parlera de "cellule"

pour caractériser la colonne à l'aplomb du fil, ayant comme largeur la distance entre deux fils (voir figure 6).

Une attention particulière est portée au fait que le signal détecté n'est pas proportionnel à la valeur de la distribution à l'aplomb du fil, mais au nombre total d'électrons dans la cellule du fil. A partir des signaux délivrés par les fils c, d et e, la position du sommet de la distribution des charges peut être donc interpolée, et donc déterminer le lieu de l'ionisation primaire.

Profil de charge du nuage d'électron
d'ionisation après diffusion.

Cette interpolation est également possible si l'expansion spatiale du nuage électronique est inférieure à la distance entre deux fils. Comme la figure 7 le montre, si le nuage électronique est "à cheval" sur deux cellules, les signaux délivrés par ces fils adjacents auront la même amplitude si le centre de la distribution de charge du nuage électronique est à l'intersection des deux cellules (cas A). Si le sommet de la distribution est plus proche du "fil a" que du "fil b" (cas B), les électrons dans la cellule de "a" seront plus nombreux que les électrons dans la cellule de "b". Le signal du "fil a" sera donc de plus grande amplitude que le signal du "fil b". On pourra en conclure que le photo-électron primaire a été libéré plus près du "fil a" que du "fil b" et donc estimer sa position à une demi distance inter-fils près.

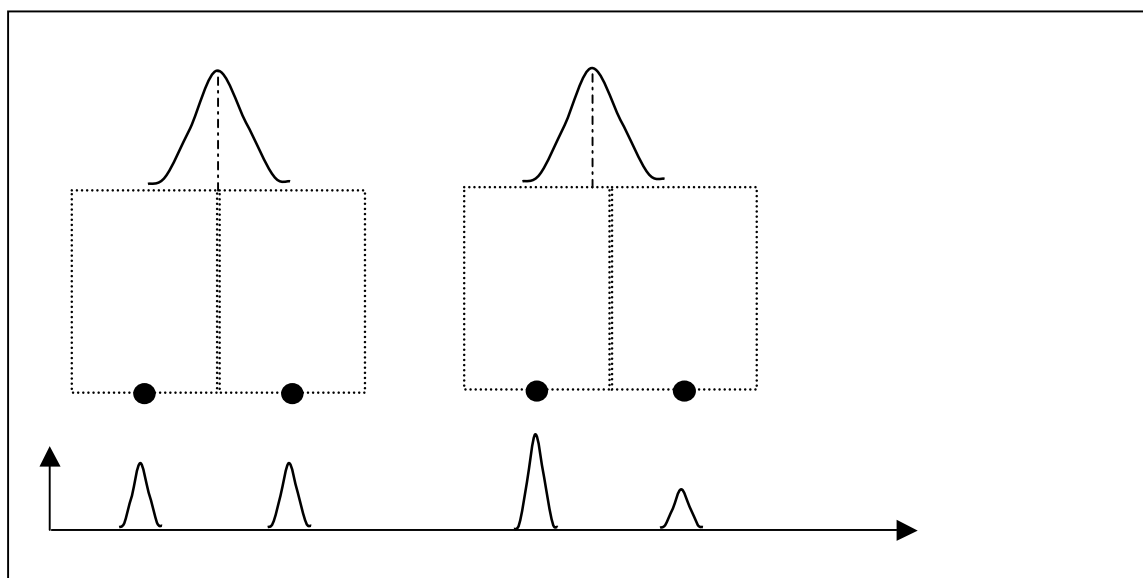


Figure 7: Interpolation de la position de l'interaction primaire.

Si l'interaction du photon incident engendre un signal sur plusieurs fils, une interpolation de ces signaux permet la localisation du lieu de cette interaction (dans la direction perpendiculaire aux fils) avec une précision supérieure à la distance entre deux fils.

Conception d'une nouvelle électronique de localisation d'une chambre à fils appliquée à la médecine nucléaire

Il faut cependant avoir à l'esprit que la taille du nuage électronique est fonction de plusieurs paramètres:

- Le ***type d'interaction*** entre le photon incident et les atomes de gaz, la taille initiale du nuage électronique d'ionisation primaire dépendant de l'énergie transférée par le photon au photo-électron.
- La ***profondeur*** à laquelle s'est produite l'interaction initiale. Cette profondeur influence en effet la longueur sur laquelle le nuage électronique diffuse.
- Le ***champ de dérive*** et la nature du gaz qui influencent les caractéristiques de la diffusion.

L'extension spatiale est donc tout comme les interactions photon-atome de nature stochastique: il n'est pas possible de calibrer la taille des nuages électroniques. Ainsi, pour des événements ne produisant des signaux que sur un fil, il n'est pas possible d'interpoler la position de l'interaction primaire: ces événements ne sont localisables qu'à la distance inter-fils près.

I.5.3 Le signal induit sur les strips.

Le signal induit sur les strips suite à une avalanche est dû à la collection des cations créés lors de cette avalanche. Du fait de la géométrie des lignes de champ entre les fils et les strips, l'effet de discrétisation qu'on observe pour les fils n'existe pas pour les signaux des strips (voir figure 8 ci-dessous).

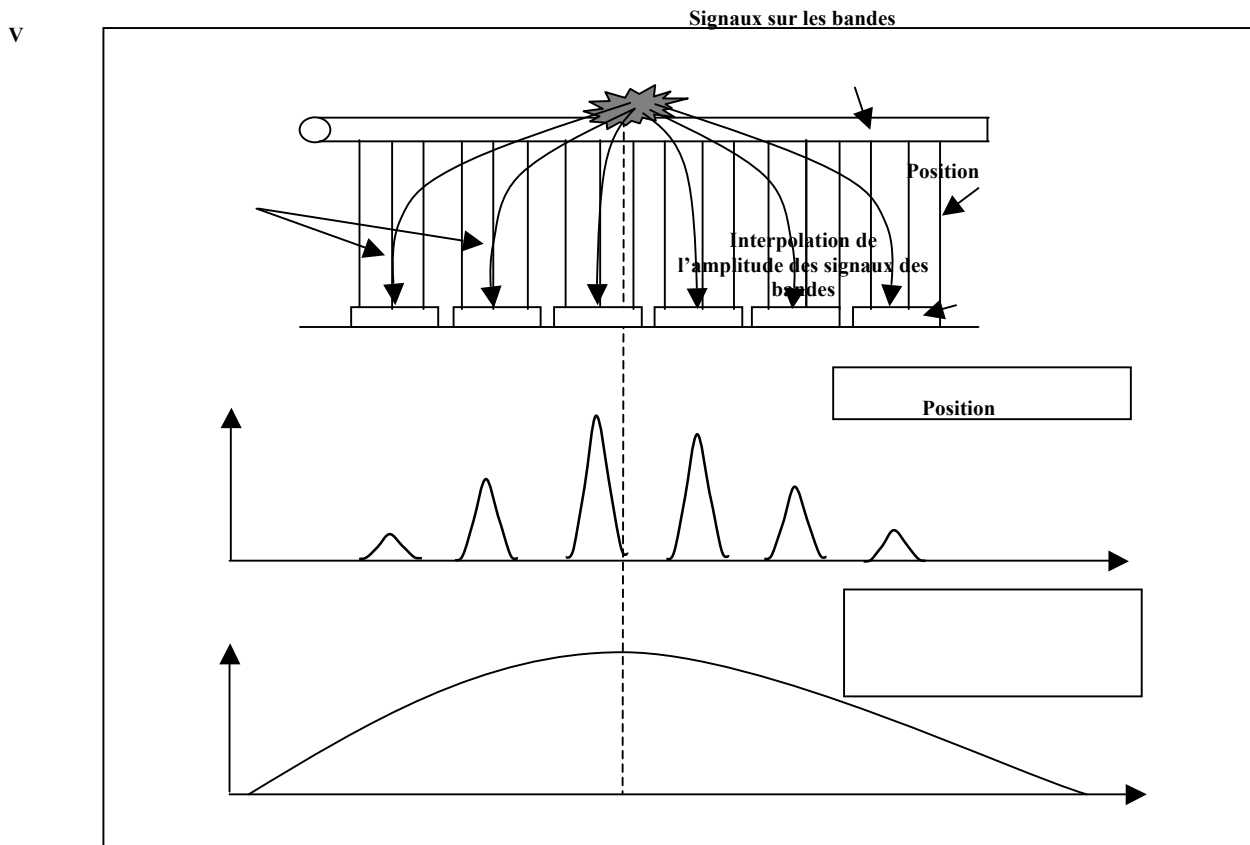


Figure 8: Les signaux des bandes.

Comme les lignes de champ entre le fil d'anode et les strips de cathode sont parallèles, la charge induite sur les strips par le courant de cation est gaussienne. En déterminant le centre de gravité de la distribution en amplitude des signaux de chaque strips, la position de l'avalanche le long des fils est déterminée.

Si un événement crée des avalanches sur plusieurs fils, la remarque précédente reste valable. En effet, les avalanches sur les différents fils se produisent à la même abscisse le long des fils. Les charges qu'elles vont induire sur les strips de cathodes vont donc s'additionner. Ceci prouve que la localisation d'un événement le long des fils n'est pas influencée par la taille du nuage électronique initial.

II. Les techniques actuelles de localisation des chambres à fils.

Au cours de l'histoire il y a eu plusieurs méthodes permettant la localisation des chambres à fils.

- La *méthode des fils résistifs*, c'est une des premières méthodes permettant la localisation unidimensionnelle le long d'un fil d'anode. Celle-ci utilise le principe de la division de charge ou d'amplitude le long d'un fil d'anode résistif.
- La *mesure du centre de gravité par des lignes à retard*, elle permet par un «traitement physique», lors de la transmission des signaux des strips à une ligne de retard, d'interpoler ces signaux et donc de déterminer directement le sommet de la distribution de charge induite grâce au signal de sortie de la chambre à fils.
- Le *méthode utilisant le couplage capacitif des fils*, cette méthode n'est pas à proprement parler une méthode de localisation de l'avalanche mais une méthode de mesure des tensions des fils d'anode.
- Les *méthodes numériques de discrimination* qui comptent le nombre des signaux sur chaque fil au-dessus d'un certain seuil.

II.1 Traitement électronique actuelle.

La méthode de localisation actuellement utilisée pour traiter les signaux de la Gamma caméra est une méthode numérique de discrimination avec les signaux des fils et des strips.

Pour cette méthode, chaque fil et strip est équipé de sa propre électronique de traitement. Chaque fil et chaque strip se comporte comme un détecteur indépendant qui fournit en sortie une impulsion d'amplitude dont la valeur est proportionnelle au signal induit par l'avalanche. Le principe de la détection est donc local, contrairement à celui de la ligne à retard que l'on peut, en comparaison à ce dernier, qualifier de global.

Le principe de la méthode de localisation est illustré sur la figure 9 ci-dessous.

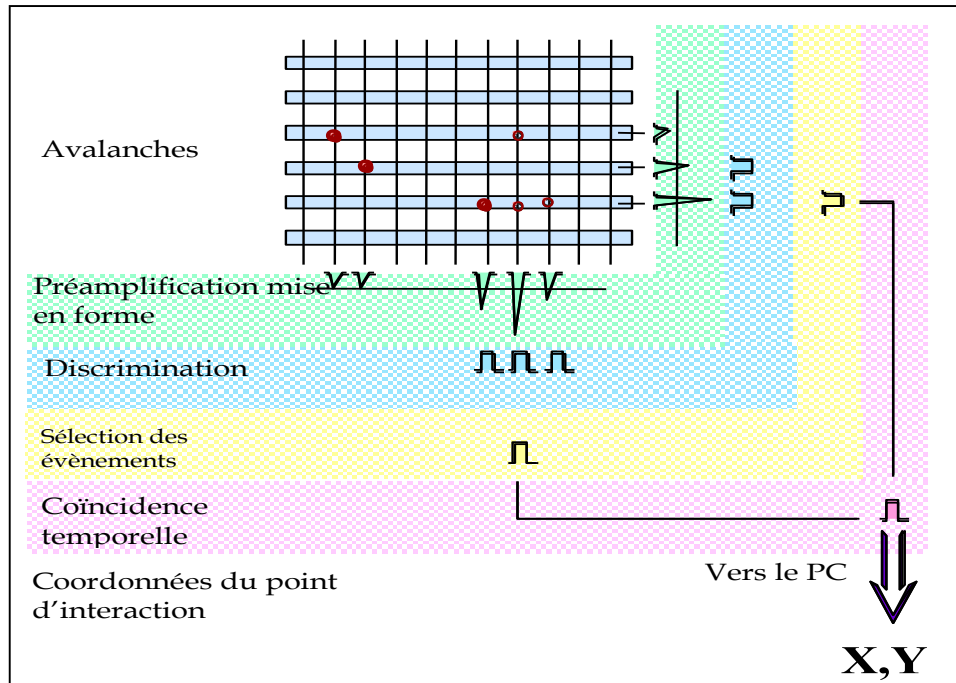


Figure 9: Principe de la localisation actuelle.

L'ensemble du traitement des signaux, jusqu'à la détermination des coordonnées de l'événement, est effectué par des moyens électroniques. Le pré-traitement analogique des signaux issus de la chambre est réalisé grâce à des cartes analogiques et la localisation des événement est effectuée par une carte mère construite en technologie de *ASIC* (Application specific integrated circuit).

Pour chaque fil et chaque strip, la charge collectée lors de la détection d'un photon est amplifiée et mise en forme. Les signaux obtenus passent alors dans un discriminateur dont le seuil est programmable : si l'amplitude des signaux excède la valeur du seuil, une impulsion logique est alors émise.

L'étape suivante du traitement électronique consiste à sélectionner les événements pour lesquels moins de trois signaux logiques adjacents ont été émis en même temps. Les signaux des fils et des strips doivent de plus être émis pendant une même fenêtre temporelle; ainsi on s'assure que les signaux des strips et des fils correspondent au même événement.

Pour déterminer la position de l'événement on procède de la façon suivante:

- Dans le cas où trois signaux adjacents sont produits, le signal du milieu correspondra à la coordonnée de l'événement (dans la direction des strips pour les signaux des fils et dans la direction des fils pour les signaux des bandes). Dans le cas où deux signaux sont produits sur des voies adjacentes, l'électronique choisira alternativement la voie paire ou la voie impaire.
- Les coordonnées de l'événement ainsi déterminées sont alors envoyées à un ordinateur, via une carte PCI, où elles sont enregistrées.

Avec cette méthode de traitement des signaux de la chambre à fils, on obtient donc une image de rayonnement gamma, dont la taille des pixels correspond à la distance entre deux fils (et entre deux strips) soit $1.27\text{mm} \times 1.27\text{mm}$. Un inconvénient de cette méthode est dû à la discrimination des signaux de la chambre qui ne permet pas de prendre en compte l'information précieuse contenu dans leur amplitude (voir partie I.5.1)

Cette méthode a cependant l'immense avantage de garantir un taux de comptage optimal et de fonctionner à des fréquences très élevées, ce qui permet d'effectuer de l'imagerie dynamique.

III. Etude des signaux de sortie de la chambre à fils.

Dans cette partie nous procéderons successivement à une étude expérimentale des voies d'amplification et de mise en forme des signaux de la chambre, puis à la caractérisation de certaines propriétés du détecteur, et enfin à une étude de la résolution du détecteur en fonction de différents paramètres.

III.1 Etude expérimentale des voies d'amplification et de mise en forme.

La partie qui suit a pour but de décrire les propriétés des voies électroniques d'amplification et de mise en forme des signaux engendrés par une avalanche. La description de ces voies et de leurs signaux de sortie est suivie de la caractérisation du gain des différentes voies.

III.1.1 Description des voies d'amplification et de mise en forme.

La structure globale d'une voie est illustrée par la figure 10 ci-dessous.

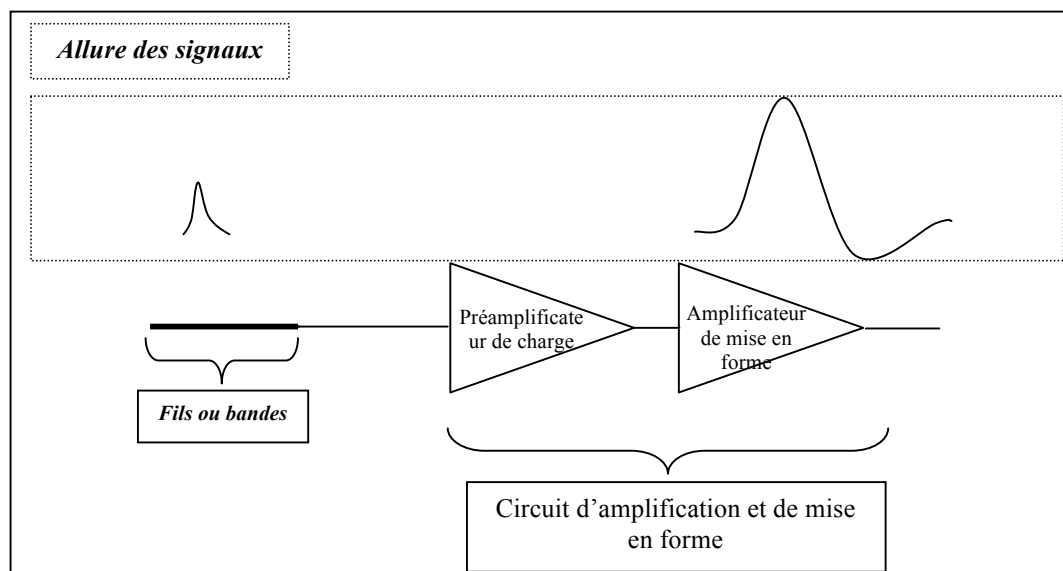


Figure 10: Schéma d'une voie d'amplification.

Le signal de charge créé par l'avalanche sur un fil ou une bande est amplifié par un préamplificateur de charge et mise en forme. La mise en forme permet d'obtenir un signal

dont l'amplitude est proportionnelle à la charge initiale, de durée plus longue que le signal initial (dont la durée est fonction du temps de collection des charges).

III.1.2 Allure des signaux de sortie de la chambre à fils.

Après leur amplification et leur mise en forme (par les cartes filles), les signaux des fils et des bandes ont l'allure présentée sur la figure 10:

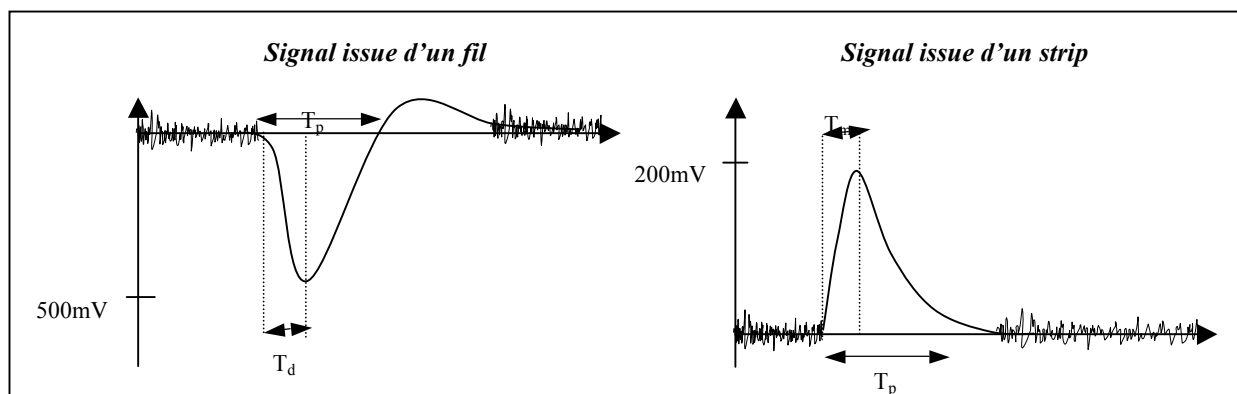


Figure 11: Allure des signaux de sortie de la chambre.

A la sortie des cartes - analogiques les signaux des bandes et des fils ont donc l'allure d'impulsions dont la durée totale, T_p , est de l'ordre de $5\mu s$. La durée du front descendant, T_d , des impulsions des fils est de l'ordre de $0.5\mu s$; la durée du front montant, T_m , des impulsions des bandes est d'environ $1\mu s$. Selon les cartes filles utilisées, ces durées et la forme des impulsions peuvent légèrement varier. Certaines cartes, dont celles utilisées par l'électronique de localisation actuelle, inverse la polarité des fils afin d'obtenir uniquement des signaux positifs.

Les amplitudes des impulsions issues des fils sont plus grandes que celles des impulsions issues des bandes, du fait même des phénomènes physiques qui leur donnent naissance. On arrive à des rapports signal sur bruit de l'ordre de 25 sur les fils et de l'ordre de 4 sur les bandes.

III.2 Caractérisation des voies électroniques, résultats pratiques.

Une entrée sur les cartes-filles permet de simuler une avalanche sur un fil (elle sera dite «test pulse» par la suite). On injecte pour cela un signal « porte », d'amplitude «A» Volts et de fréquence «F», directement sur le condensateur de charge de 1pF.

A partir de ce circuit-test, on peut caractériser le gain : le front montant (T_m), le front descendant (T_d), la linéarité des différentes voies électroniques en injectant des créniaux de différentes amplitudes et de différentes fréquences et en observant la taille des impulsions de sortie.

Les parties suivantes présentent les résultats obtenus pour les différentes valeurs des amplitudes et de fréquences d'entrée.

III.2.1 Le gain électronique en fonction de Amplitude d'entrée.

Pour cette partie qui suit l'amplitude du signal d'entrée (test pulse) a été variée.

Les résultats obtenus pour trois voies différentes sont présentés sur la figure 12.

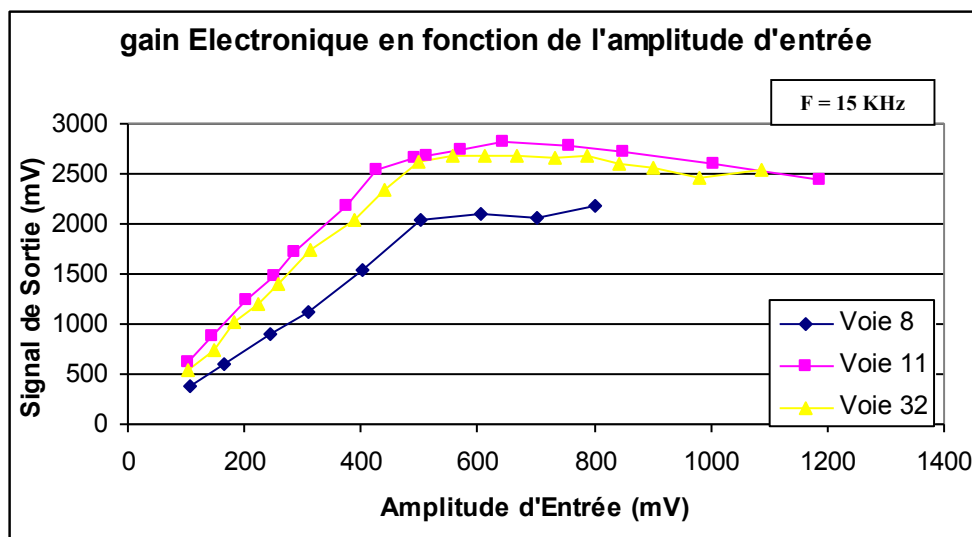


Figure 12: Gain électronique en fonction de l'amplitude d'entrée.

La réponse des voies d'amplification et de mise en forme n'est linéaire que pour des signaux d'entrée d'amplitude inférieure à environ 500 mV, c'est à dire 500 fc, au-delà de cette valeur les cartes filles atteignent la saturation et l'amplification reste constante, (cf figure 12).

III.2.2 Le gain électronique en fonction de la fréquence d'entrée.

Conception d'une nouvelle électronique de localisation d'une chambre à fils appliquée à la

Maintenant on garde l'amplitude d'entrée constante et on fait varier la fréquence d'entrée, les résultats obtenus pour la voie 11 pour deux valeurs d'amplitude différentes d'entrée sont représentés dans la figure 13.

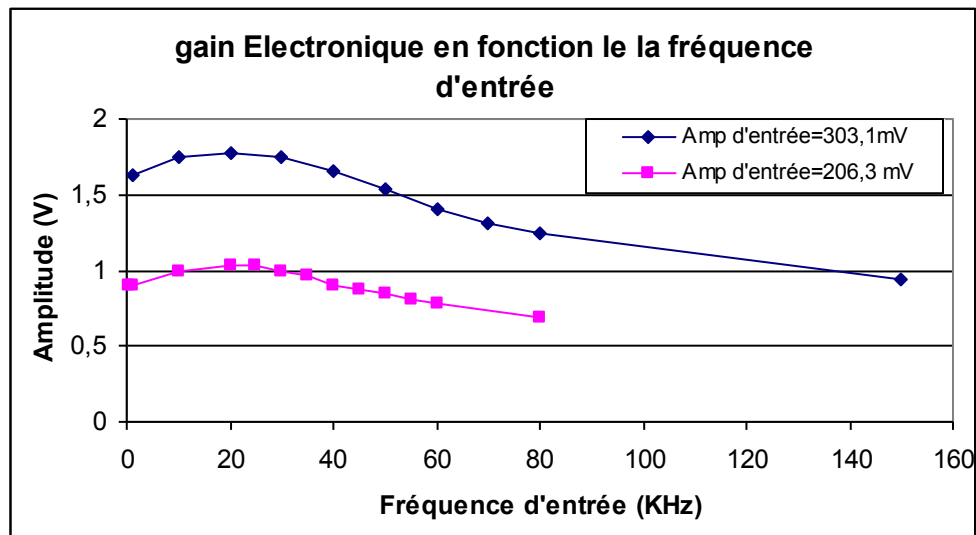


Figure 13: Gain électrique en fonction de la fréquence d'entrée.

Dans la figure 13, on constate que jusqu'à une certaine valeur l'amplification reste plus ou moins constante (basse fréquence), et après l'amplification commence à descendre linéairement.

III.2.3 Non-Uniformité des gains des différentes voies.

Dans cette partie on remarque une certaine non uniformité des gains des différentes voies électroniques. Les histogrammes de la figure 14, ci-dessous, mettent en évidence ce fait.

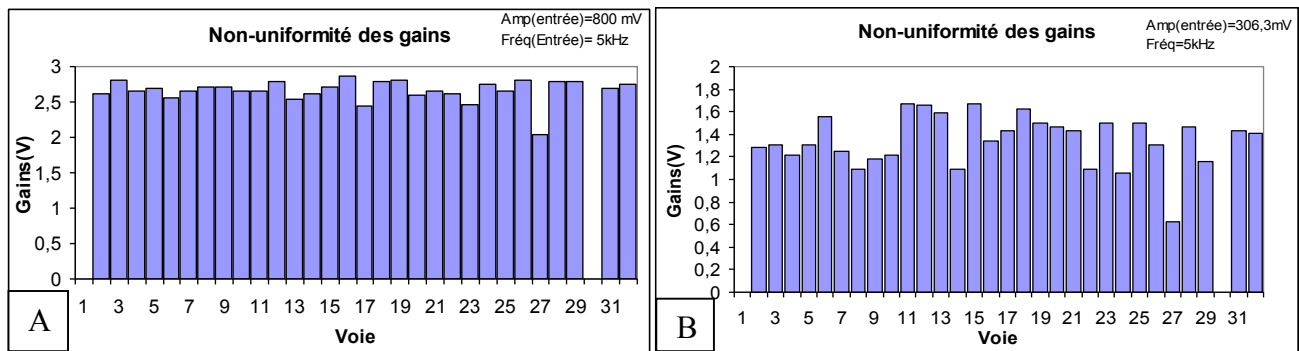


Figure 14: Mise en évidence des non-uniformités des gains.

Il existe donc une variation des gains électroniques d'une voie à l'autre due au non-homogénéité des composants de chaque voie. On peut remarquer aussi que si l'amplitude d'entrée dépasse la valeur de 500 mV (500 fc), les gains sont plus uniformes parce qu'il y a plus de voies qui ont atteint la saturation. Dans la figure 14-A les gains électroniques sont plus uniformes (amplitude d'entrée = 800 mV) que dans la figure 14-B (amplitude d'entrée = 306,3 mV).

Le gain moyen des 32 voies est un facteur compris entre 4 et 6, selon des voies. Ici les voies 1 et 30 ne sont pas prises en compte puisqu'elles ne fonctionnent pas.

IV. Proposition d'une nouvelle électronique.

Comme on l'a déjà signalé, la méthode de localisation actuelle ne permet pas de prendre en compte *l'information précieuse contenue dans les amplitudes de chaque voie* (Voir partie II.1), elle ne prend en compte que l'information purement géométrique, c'est à dire, la présence ou l'absence de signal sur les voies électroniques. Ceci nous informe sur la présence ou non d'un événement le long de cette voie. Pour prendre en compte cette information une nouvelle méthode va être testée.

IV.1 Principe générale de la nouvelle électronique.

Le principe de la nouvelle méthode de localisation est illustré sur la figure 15, ci-dessous.

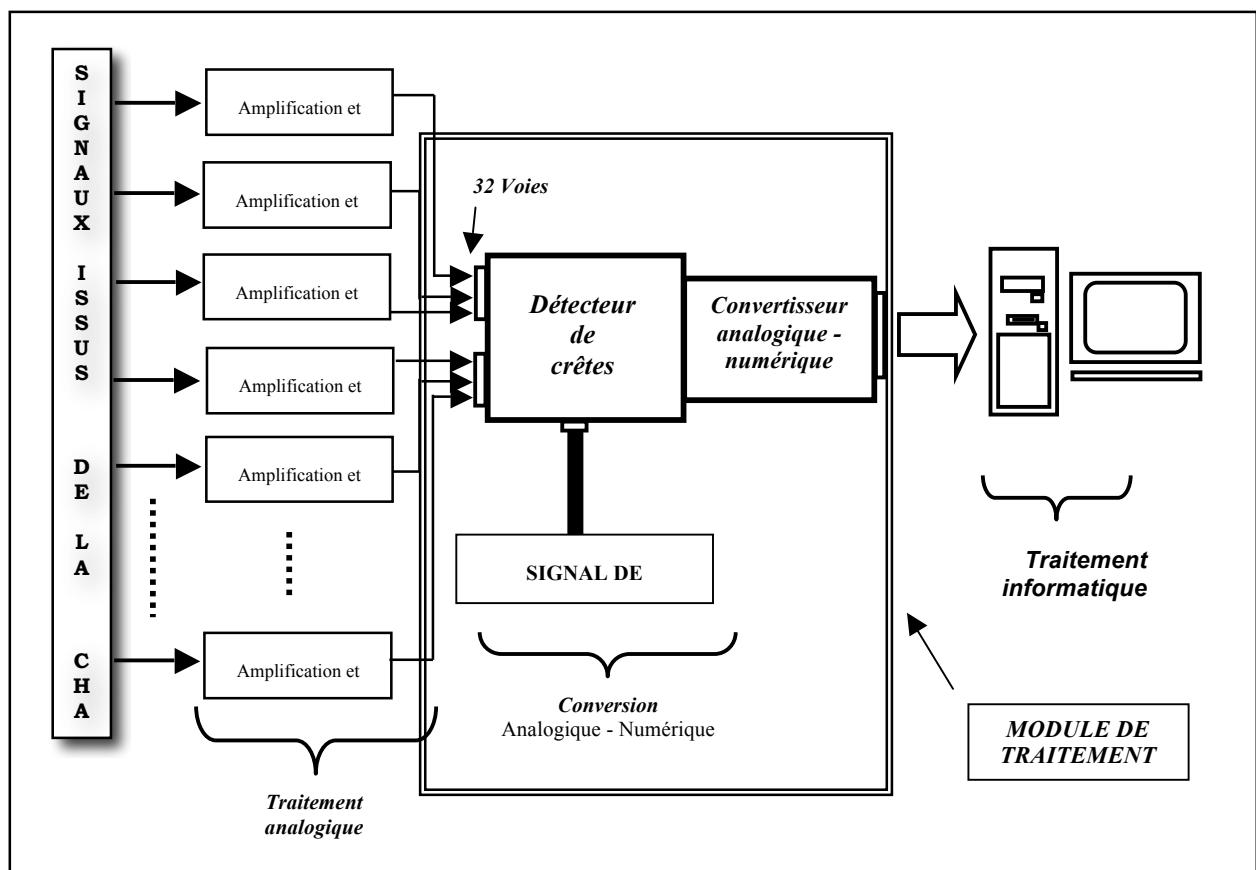


Figure 15: Principe général de la nouvelle méthode de localisation.

Cette détection de crête et numérisation permet en théorie de traiter intégralement et avec une précision dépendant du traitement utilisé les signaux de la chambre à fils. Si l'on a

accès à toute l'information délivrée par les signaux primaires du détecteur, les signaux de chaque fil et de chaque bande, on peut espérer obtenir une résolution très proche de sa limite théorique.

Avec cette méthode la géométrie et l'amplitude de chaque événement sont prise en compte, mais pour le bon fonctionnement du Module de traitement **il faudra bien régler le SIGNAL SYNCHRONISATION**. Je parlerais plus en détail du fonctionnement du Module de traitement dans les parties suivantes.

IV.2 Fonctionnement du Module de traitement.

Le Module de traitement choisi pour effectuer la détection de crête et leur conversion est le MOD. V 785 32 Peak sensing converter [3]. Avec ce Module les amplitudes des voies sont prises en compte donc on pourra savoir le type d'interaction qui a eu lieu.

Le Module utilisé est une unité de 32 canaux de conversion analogique – numérique, chaque canal peut détecter et convertir les crêtes des signaux analogiques positifs. Les valeurs des signaux d'entrée (analogique) doivent être compris entre 0 et 4V, caractéristiques du Module en table 1.

Le Module a 32 canaux d'entrée et une entrée de SIGNAL DE SYNCHRONISATION (ECL/NIM) commun à tous les canaux. Le Module ne lit les pics que lorsque le signal de synchronisation est actif, dans ce cas le Module de traitement fait la conversion en une tension.

Seulement les valeurs supérieures à un seuil, programmable auparavant, seront prises en compte et les autres valeurs seront rejetées.

Le principe de fonctionnement du Module de détection et numérisation de crête est illustré sur la figure 16, ci-dessous.

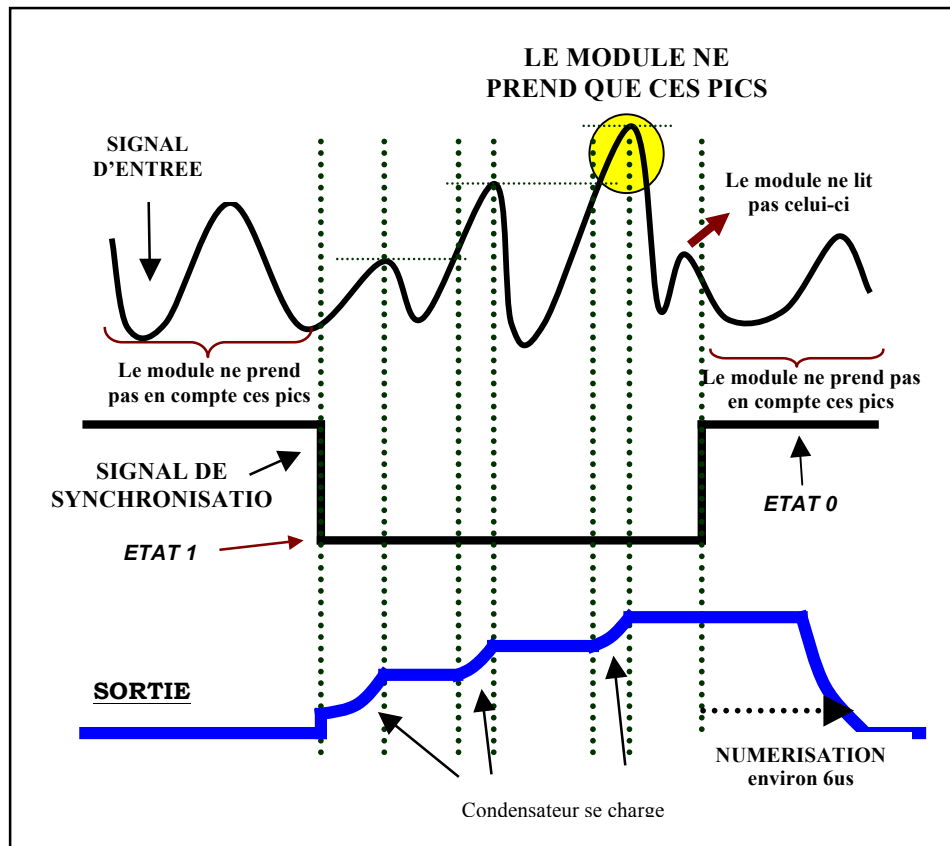


Figure 16: Fonctionnement du Module de traitement.

Dans la figure 16 on peut voir le fonctionnement du Module, lorsque le signal de synchronisation se trouve dans «l'état 0», le Module ne prend pas en compte les signaux d'entrée. C'est lorsque le signal de synchronisation se trouve dans «l'état 1» que le Module prend en compte les signaux d'entrée.

Sur la figure 16, on observe que lorsque le signal de synchronisation se trouve dans «l'état 1», le condensateur se charge à mesure que le signal d'entrée monte jusqu'à ce que le signal d'entrée atteigne le pic. Le condensateur ne se charge plus si le signal d'entrée ne dépasse pas la valeur de l'ancien pic, mais si le signal d'entrée dépasse cette valeur le condensateur va continuer en chargeant jusqu'à ce que le signal d'entrée atteigne un nouveau pic. C'est pour cela que lorsque le signal de synchronisation se trouve dans «l'état 1» le Module prend en compte la valeur plus élevée.

On a dit que pour prendre en compte le signal d'entrée, le signal de synchronisation du Module devait être dans «l'état 1», mais la numérisation de ce signal se produit après, lorsque le signal de synchronisation se trouve dans «l'état 0».

La sortie de ce Module est relié à l'ordinateur, avec lequel nous pourrions avoir accès à la lecture des données pour son traitement ultérieur. Le logiciel informatique utilisé est LabView. Les valeurs de lecture fournies pour le Module oscillent entre 0 et 3840 mV. Tandis que les valeurs comprises entre 3841 et 4095 sont de valeurs non correctes. Le tableau suivant montre les principales caractéristiques du Module utilisé.

TABLEAU TECHNIQUE DE CARACTERISTIQUES : V785	
Entrées	32 canaux, 1 kOhm impédance, polarité positive, DC
Résolution	12 bits
Echelle (Sortie)	4 V
Min détectable signal	1 mV
Min temps de montée	50 ns
Max. largeur de porte	100 μ s
Temps clair rapide	600 ns
Temps de conversion	5.7 μ s pour tous les canaux
Signal synchronisation	NIM signal, haut impédance

Tableau 1: Tableau Technique de caractéristiques; V785.

V. Etude et optimisation du Module de traitement.

La partie qui suit présente les différentes étapes suivies pour atteindre l'optimisation du fonctionnement du Module de traitement relié à la chambre à fils. Le Module de traitement va être étudié simplement, pour se familiariser à son fonctionnement, pour observer son uniformité et ses limites (lectures minimales, maximales). Puis nous étudierons l'uniformité et l'amplification des cartes filles et terminerons par l'optimisation du Module de traitement relié à la chambre à fils.

V.1 Etude du Module de traitement.

V.1.1. Réponse du Module à un signal contenu.

Dans cette partie seulement le Module de traitement a été étudié. Le circuit utilisé est présenté dans la figure suivante.

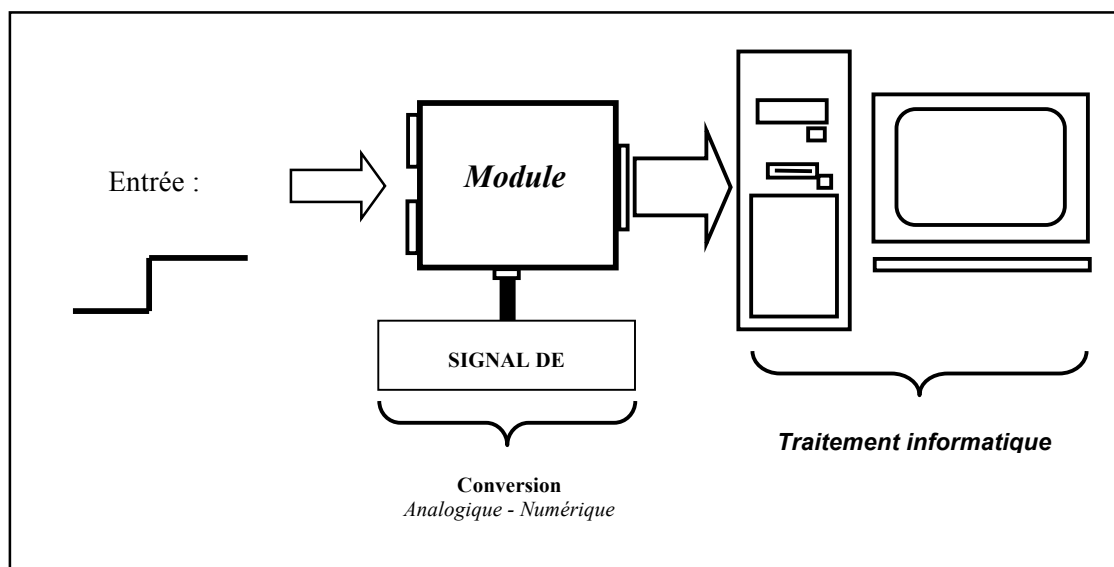


Figure 17: Réponse du Module à un signal continu.

Le signal d'entrée du Module est un signal continu connu. Différentes mesures ont été réalisées au cours de cette étude. Toutes les voies d'entrée sont reliées à la même valeur, pour étudier leur uniformité. Une voie est reliée à un potentiel constant et les autres reliées à zéro (masse).

V.1.2 Uniformité du Module de traitement.

Pour cette partie le signal d'entrée dans le Module est identique pour toutes les voies et d'une valeur constante connue. Les résultats pour deux valeurs différentes sont montrés dans la figure suivante.

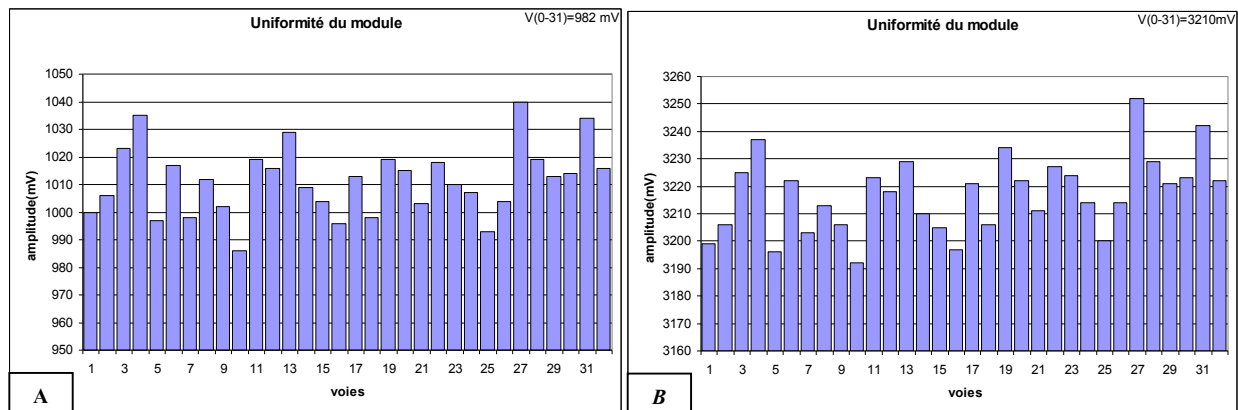


Figure 18: Uniformité du Module de traitement.

Dans la figure 18, on peut remarquer la non-uniformité du Module, la lecture n'est pas la même pour toutes les voies. Le tableau suivant montre plus clairement ces différences :

Figure	Signal d'entrée(mV)	Signal de Sortie(mV) (Moyenne)	Déviations(mV)
18-A	3210	3207	30
18-B	982	1006.9	27

Tableau 2: Non - Uniformité du Module de traitement.

Dans le tableau 2, on peut voir que la valeur d'entrée (identique et constante pour toutes les voies) ne correspond pas avec le signal de sortie (moyenne). La déviation n'est pas assez grande.

V.1.3 Bruit du Module de traitement.

Dans la partie qui suit le signal d'entrée est égal à zéro (à la masse) pour toutes les voies. Dans la figure ci-dessous on peut remarquer la présence d'un bruit dû au Module de traitement.

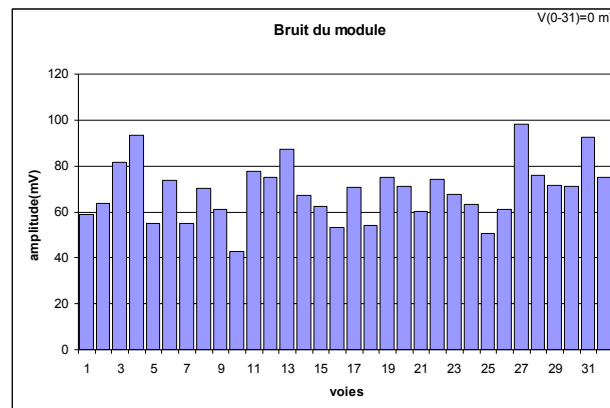


Figure 19: Bruit du Module de traitement.

Dans la figure 19, la moyenne de la tension du Module est $V = (64.90 \pm 27.65) \text{ mV}$ quand elle devrait être nulle. On remarque ici les limites du Module de traitement.

V.1.4 Seuil du Module de traitement.

Dans cette partie, toutes les voies sont branchées à la masse sauf la voie numéro sept, qui est branchée à un potentiel d'environ 1130 mV. Cette fois on a utilisé l'option du seuil, c'est à dire, tous les signaux qui ne dépassent pas une valeur fixée seront rejetées. Le seuil est utilisé sur les 16 premières voies, et a une valeur d'environ 500 mV. Il n'a pas été appliqué dans les 16 dernières voies.

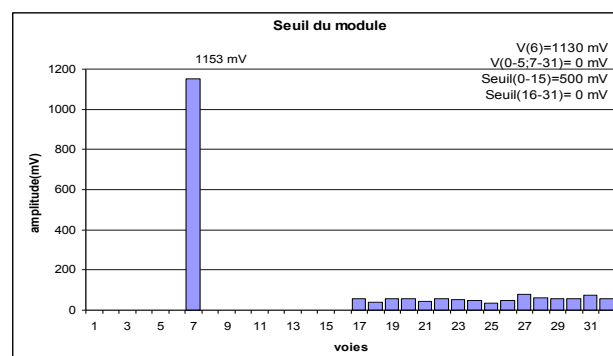


Figure 20: Seuil du Module de traitement.

Dans la figure 20 on remarque que dans les 16 premières voies il y a un signal seulement sur la voie 7 qui dépasse le seuil (500 mV), mais sur les 16 dernières voies où on n'a pas fixé de seuil, on constate la présence du bruit.

V.2 Etude des cartes filles reliées au Module de traitement.

A la présent, au circuit de la partie précédente on ajoute les cartes électroniques analogiques. C'est à dire maintenant les signaux qui arrivent au Module viennent des cartes électroniques analogiques d'amplification et de mise en forme. Le circuit utilisé est présenté dans la figure ci-dessus. Pour simuler un signal de charge on utilise un signal carré émis par un générateur de fréquence appelé « test pulse ».

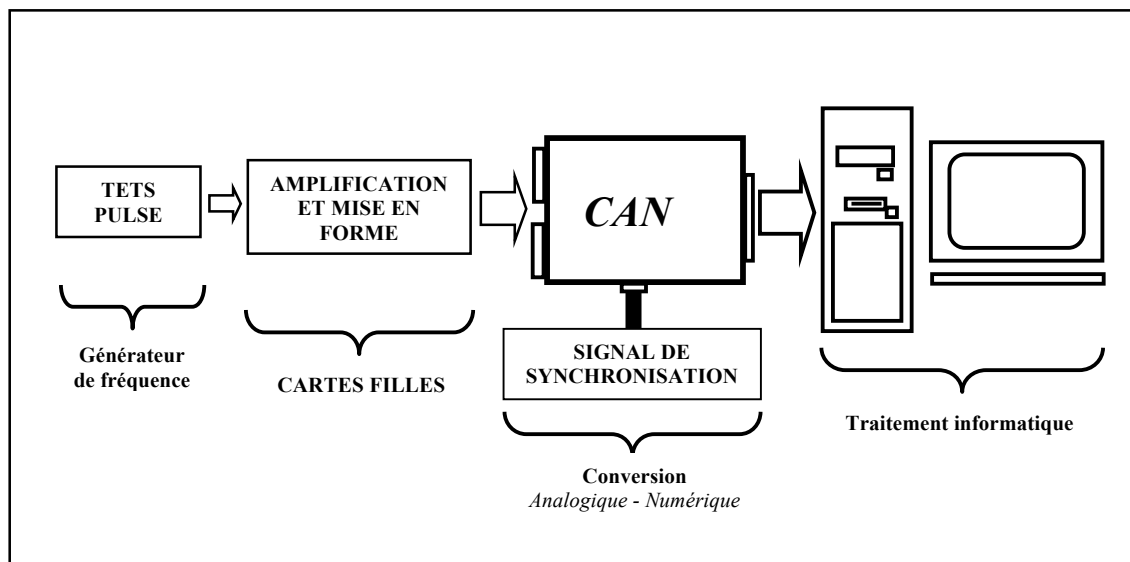


Figure 21: Etude des cartes électroniques analogiques.

Deux études pour deux jeux cartes électroniques ont été réalisées. La réponse doit être la même, sauf l'amplification. Cette dernière est plus élevée dans les circuits de la plus nouvelle chambre que dans les circuits de l'ancienne chambre puisque les circuits dans la nouvelle sont plus puissances.

V.2.1 Le gain électronique en fonction de l'amplitude d'entrée.

Dans cette partie le signal «Test pulse» est utilisé avec différentes valeurs d'amplification («A») et avec la même valeur de fréquence (1.5 KHz).

Les gains des anciennes et des nouvelles cartes ont été étudiées, pour mettre en évidence leurs différences.

V.2.1.1 Gains électronique pour les anciennes cartes électroniques analogiques.

Les résultats obtenus pour trois voies différentes sont présentés sur la figure 22.

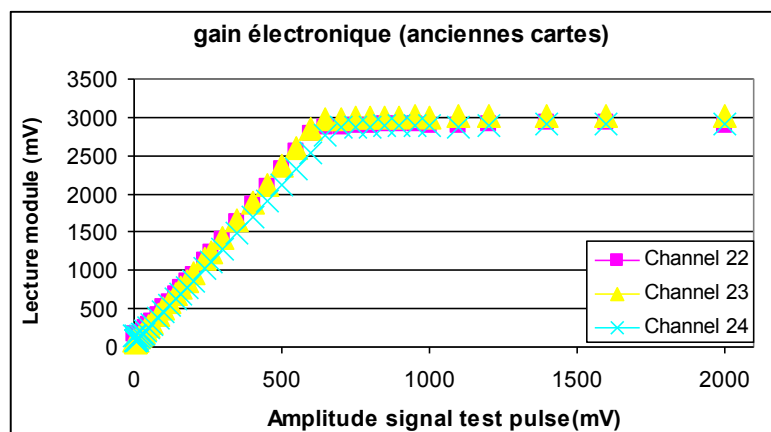


Figure 22: Gain électronique (anciennes cartes).

La réponse des anciennes voies d'amplification et de mise en forme n'est linéaire que pour des signaux d'entrée d'amplitude inférieure à environ 600 mV. Dans cet intervalle la droite a une pente d'environ 4.5 (facteur d'amplification), cette valeur dépend des voies choisies. Pour ce calcul, la voie choisie a été la 22. Après cette valeur les cartes électroniques analogiques atteignent la saturation et l'amplification reste constante, voir figure 22.

V.2.1.2 Gain électronique pour les nouvelles cartes électroniques analogiques.

Les résultats obtenus pour trois voies différentes sont présentés sur la figure 23.

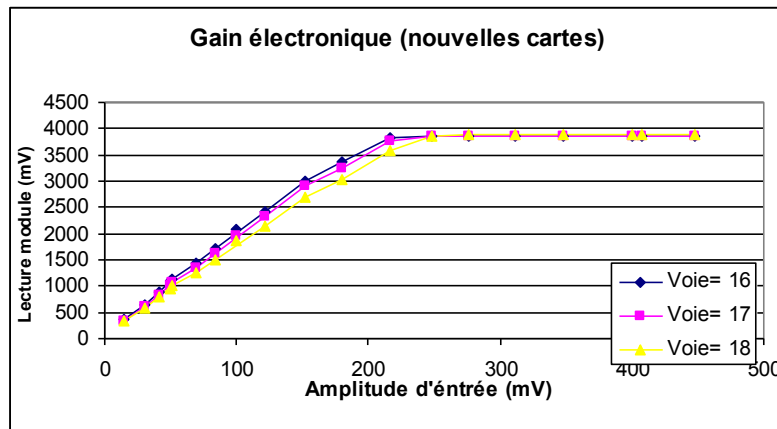


Figure 23: Gain électronique (nouvelles cartes).

La réponse des nouvelles voies d'amplification et de mise en forme n'est linéaire que pour des signaux d'entrée d'amplitude inférieure à environ 215 mV. Dans cet intervalle la droite a une pente d'environ 19.37 (facteur d'amplification), cette valeur dépend de la voie choisie. Pour ce calcul, la voie choisie est la 16. Après cette valeur les cartes filles atteignent la saturation et l'amplification reste constante, voir figure 23.

V.2.1 Uniformité des cartes filles.

Dans cette partie l'uniformité et l'amplification des cartes filles sont étudiées.

Pour étudier l'amplification et la mise en forme des cartes électroniques analogiques on utilise pour certaines voies un signal « test pulse » avec différentes valeurs d'amplitudes et de même fréquence. Avec cette montage, la linéarité et la saturation des cartes filles sont montrées.

V.2.1.1 Uniformité des anciennes cartes électroniques analogiques.

L'uniformité des anciennes cartes filles pour deux valeurs différentes d'amplitude d'entrée est illustrée sur la figure 24.

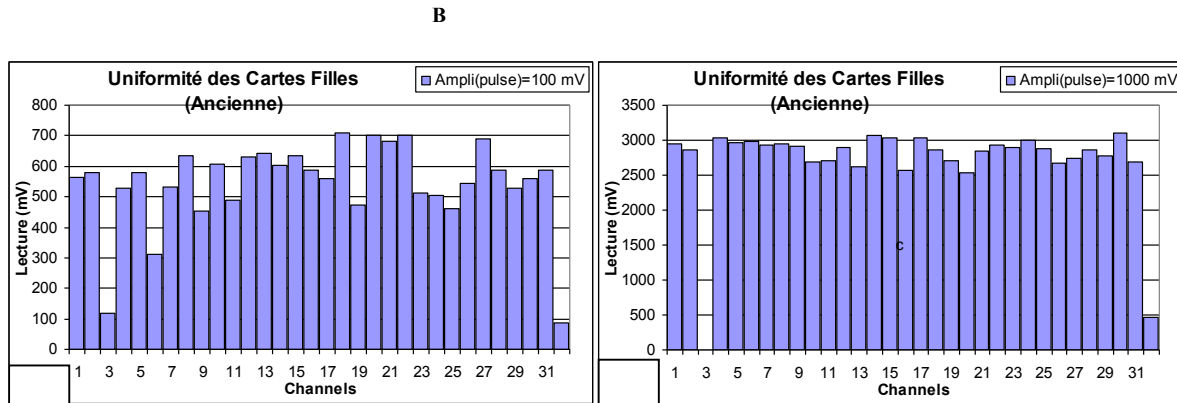


Figure 24: Uniformité des cartes électroniques analogiques (anciennes circuits).

Dans la figure 24-A l'amplitude d'entrée est 100 mV. A cette valeur les circuits d'amplification et de mise en forme n'ont pas encore atteint la saturation donc l'uniformité est moins bonne que celle obtenu à la figure 24-B, où l'amplitude d'entrée est 1000 mV. A cette valeur les circuits d'amplification et de mise en forme ont déjà atteint la saturation donc l'uniformité est meilleur. Mais on remarque une certaine non-uniformité dans les gains des différentes voies électroniques. Il existe donc une variation des gains électroniques d'une voie à l'autre due sans doute au vieillissement des circuits et à la non-équivalence des composants de chaque voie.

Le gain moyen des 32 voies est un facteur compris entre 4 et 7, selon voies. Les voies 1 et 30 ne sont pas prises en compte puisqu'elles ne fonctionnent pas.

V.2.1.2 Uniformité des nouvelles cartes électroniques analogiques.

L'uniformité des nouvelles cartes filles par deux différentes valeurs d'amplitude d'entrée est illustrée sur la figure 25.

A

B

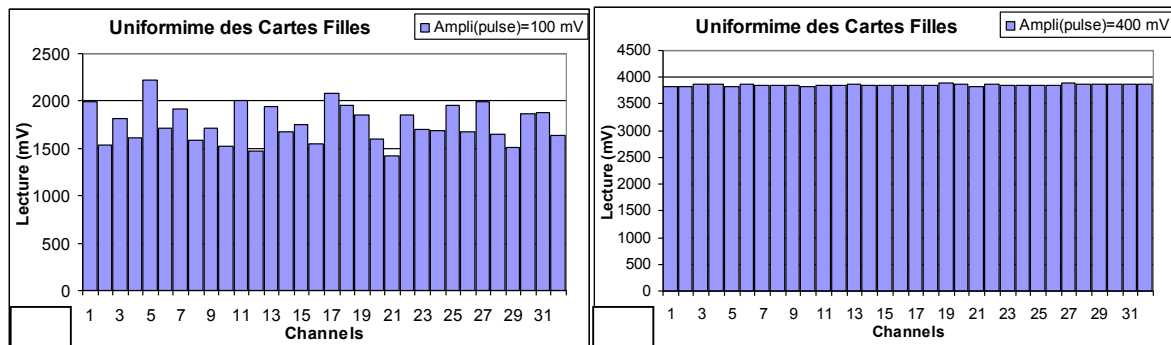


Figure 25: Uniformité des cartes électroniques analogiques (nouvelles circuits).

La non-uniformité des voies d'amplification et de mise en forme est illustrée dans la figure 25-A. Il existe donc une variation des gains électroniques d'une voie à l'autre due à la non-équivalences des composants de chaque voie. Sur la figure 25-B; l'uniformité des voies d'amplification et de mise en forme est illustrée, les gains électroniques sont similaires pour toutes les voies car celles-ci ont atteint la saturation. On reviendra sur ce point en détails dans la partie suivante.

Entre les anciennes et les nouvelles cartes d'amplification et de mise en forme il y a des différences. Les nouvelles cartes sont plus uniformes que les anciennes cartes, et ont une amplification plus grande que les anciennes cartes.

Le gain moyen des 32 voies est un facteur compris entre 15 et 22, en fonction des voies. Il est donc plus élevé que dans les anciennes cartes.

V.3 Taux de comptage du Module de traitement.

Dans cette partie le taux de comptage est étudié. Comme on l'a déjà vu auparavant, pour que le Module prenne en compte les événements, lorsque le pic arrive, le signal de synchronisation doit être dans «l'état 1» quelques instants avant. Voir figure 26.

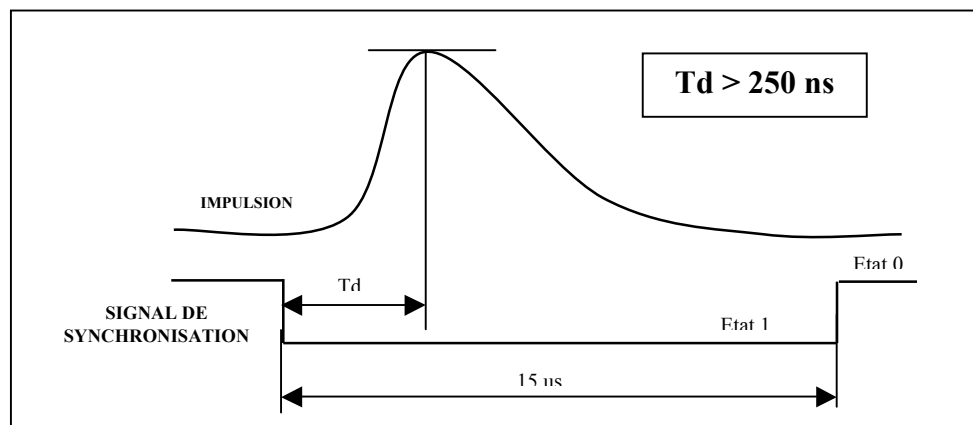


Figure 26: Efficience du signal de synchronisation.

Dans la figure 26; on voit bien que le signal de synchronisation doit être dans «l'état 1» 250 ns (temps minimum selon le fournisseur) en avance pour être sûr de la lecture du pic par le Module de traitement.

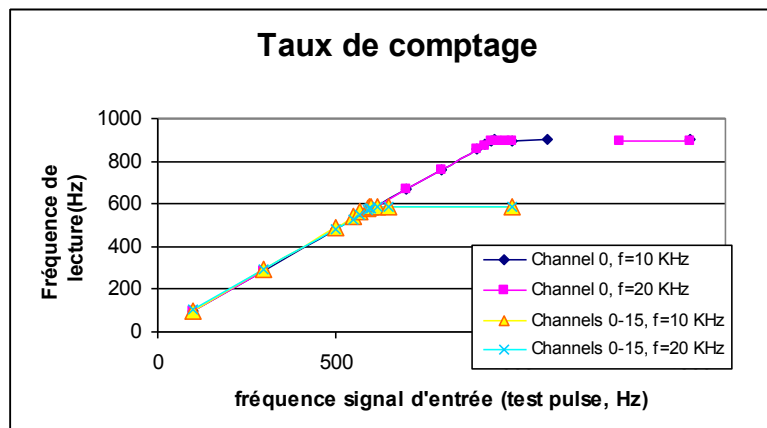
Jusqu'à maintenant, dans les expérimentations réalisées, la fréquence et l'amplitude du signal d'entrée sont connues. Régler la fréquence du signal de synchronisation pour ne pas rater des événements n'est pas très difficile. Il faut que la valeur de la fréquence du signal de synchronisation soit égale ou plus élevée que la fréquence d'impulsions.

Si la fréquence du signal de synchronisation est égale à la fréquence du signal d'entrée, alors à chaque déclenchement du signal de synchronisation il y a un seul pic à lire.

Si la fréquence du signal de synchronisation est plus élevée que la fréquence du signal d'entrée, il n'y aura pas de pic à lire parfois pendant le déclenchement du signal de synchronisation.

La figure suivante montre le taux de comptage du Module en fonction de la fréquence d'entrée du signal d'impulsions pour deux fréquences différentes du signal de synchronisation. Le circuit utilisé est le même que précédemment (cf. figure: 21).

Figure 27: Taux de comptage en fonction du signal d'entrée.



Dans la figure 27, on voit que le taux de comptage sature. La fréquence de saturation dépend aussi du nombre de voies branchées au Module de traitement. Si la lecture des données se fait sur 16 voies la saturation se produit à une valeur environ 600 Hz (figure 27). Alors que si la lecture se fait uniquement sur une voie, la saturation du programme a une valeur environ 900 Hz (figure 27).

Si la fréquence du signal de synchronisation a une valeur plus élevée que celle de la fréquence d'entrée et de celle de saturation des programmes, les résultats sont les mêmes pour différentes fréquences de synchronisation, voir figure 27. On obtient des résultats identiques pour deux fréquences de synchronisation différentes.

Si la fréquence du signal de synchronisation a une valeur plus petite que celle de la fréquence d'entrée et celle de saturation des programmes, le taux de comptage dépend de la fréquence du signal de synchronisation, voir figure 28.

Dans la figure 28 ci-dessous, on a représenté le taux de comptage en fonction de la fréquence du signal de synchronisation pour une fréquence constante du signal d'entrée.

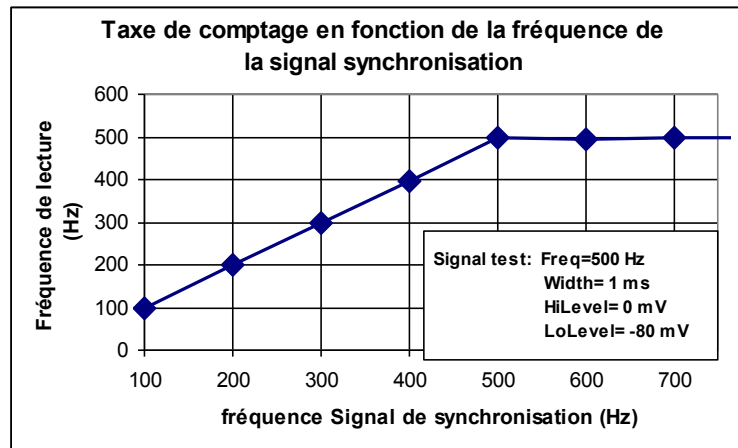


Figure 28: Taux de comptage en fonction de la fréquence de synchronisation.

Dans la figure 28, jusqu'à 500 Hz (fréquence du signal d'impulsion d'entrée) le taux de comptage dépend de la fréquence du signal de synchronisation et au-dessus 500 Hz, le taux de comptage dépend de la fréquence du signal d'impulsion.

Un nouveau programme de comptage a été développé pour essayer d'augmenter le niveau de saturation. Voici la comparaison entre les deux:

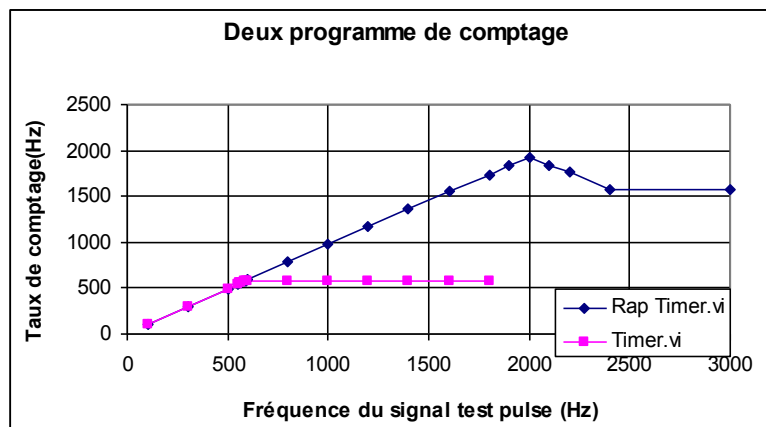


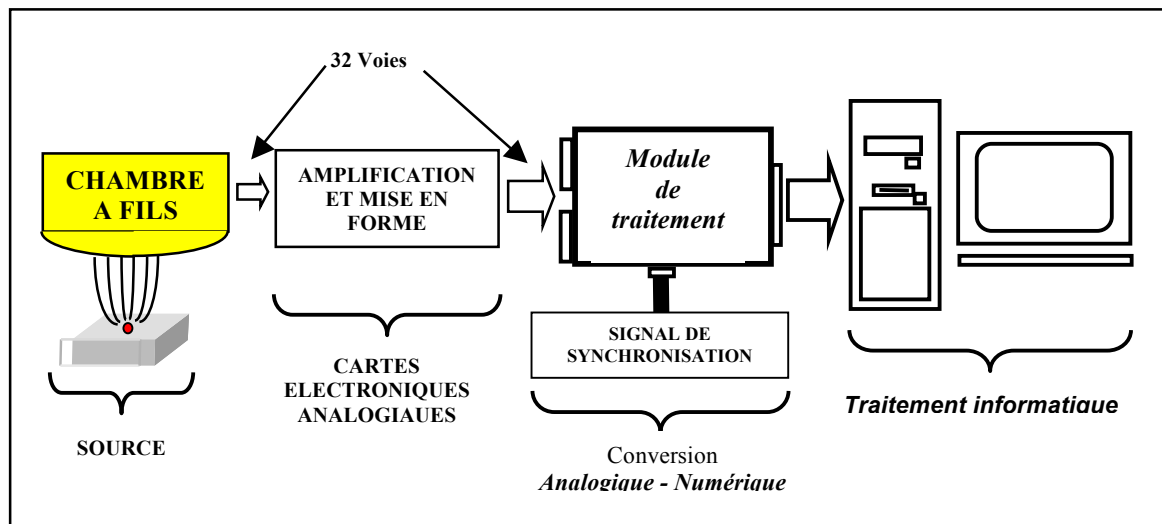
Figure 29: Comparaison de deux programmes de comptage.

Avec ce nouveau programme la saturation du taux de comptage atteint une valeur élevée, cette valeur dépend aussi du nombre de programmes ouverts en même temps dans l'ordinateur.

VI. Etude et optimisation du Module de traitement reliée à la chambre à fils.

A présent, au circuit des parties précédentes on ajoute la chambre à fils. Les impulsions qui arrivent aux cartes électroniques analogiques viennent de la chambre à fils, ces impulsions sont produites par une source radioactive. Le circuit utilisé pour l'étude et l'optimisation du Module de traitement reliée à la chambre à fils est présenté dans la figure suivante, ci-dessous.

Figure 30: Etude et optimisation de la chambre à fils.



Dans cette partie, la nouvelle méthode de localisation des photons est étudiée et optimisée. Un certain nombre d'expérimentations effectuées avec différentes valeurs de fréquence de synchronisation et de haute tension ont été réalisées pour atteindre l'optimisation de la nouvelle méthode de localisation. Nous étudions également le taux de comptage de ce nouveau montage.

La chambre a 192 fils et 192 bandes. Notre Module a seulement 32 entrées, donc seulement 32 voies qui peuvent être reliées en même temps. Nous avons relié 32 fils adjacents au Module de traitement, les fils utilisés se trouvent dans le milieu de la chambre, ce sont ceux de 64 à 95.

Le but de la partie qui suit est de trouver les meilleurs paramètres du Module de traitement (fréquence du signal de synchronisation) et de la chambre à fils (pression de la

chambre à fils, tension appliquée aux fils d'anodes, tension appliquée à la cathode, tension des bandes et la tension de la grille) pour l'optimisation de la chambre à fils.

La figure 31, ci-dessous, nous explicitons les différences entre une source étendue et source collimateur.

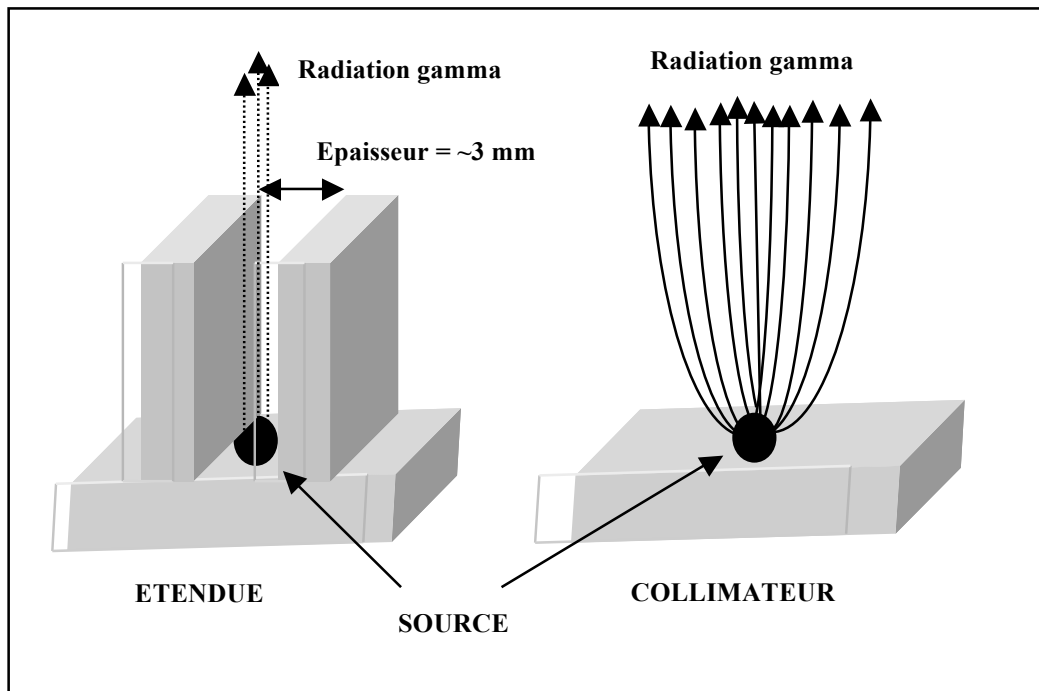


Figure 31: Source étendue et source collimateur.

VI.1 Réponse à une source étendue.

La figure suivante montre les résultats de la lecture des données provenant de la chambre à fils lorsque la source est étendue, toutes les voies sont touchées par cette source.

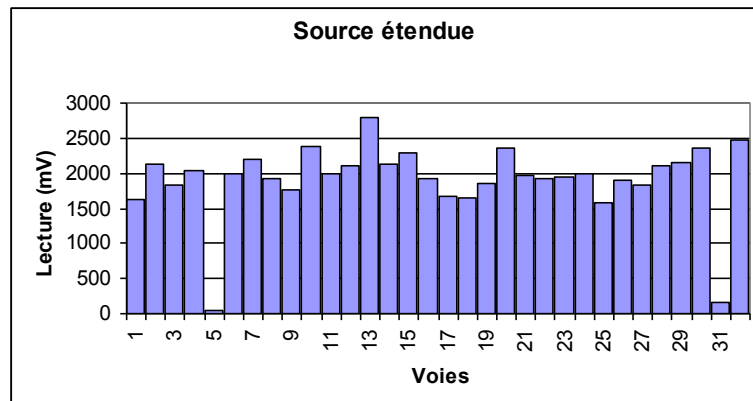


Figure 32: Source étendue.

Dans la figure 32 nous voyons que si la source est étendue toutes les voies sont touchées sauf les voies numéro 5 et 31 qui ne marchent pas. Les amplitudes des voies ne sont pas les mêmes puisque:

- Les voies ne sont pas toutes touchées avec le même nombre d'électrons, par conséquent les amplitudes des impulsions ne sont pas égales.
- Les voies du Module de traitement ne sont pas toutes uniformes.
- Les voies d'amplification et de mise en forme ne sont pas uniformes.

VI.2 Séquence des événements.

Dans cette partie une séquence d'événements est représentée. Chaque graphique correspond à une impulsion différente. Dans ces graphiques la source a été collimateur par deux briques de plomb.

Dans ces graphiques l'amplitude n'est pas constante, puisque les types d'interactions sont différents. La position des voies touchées est aussi étudiée, pour vérifier le type d'interaction des photons.

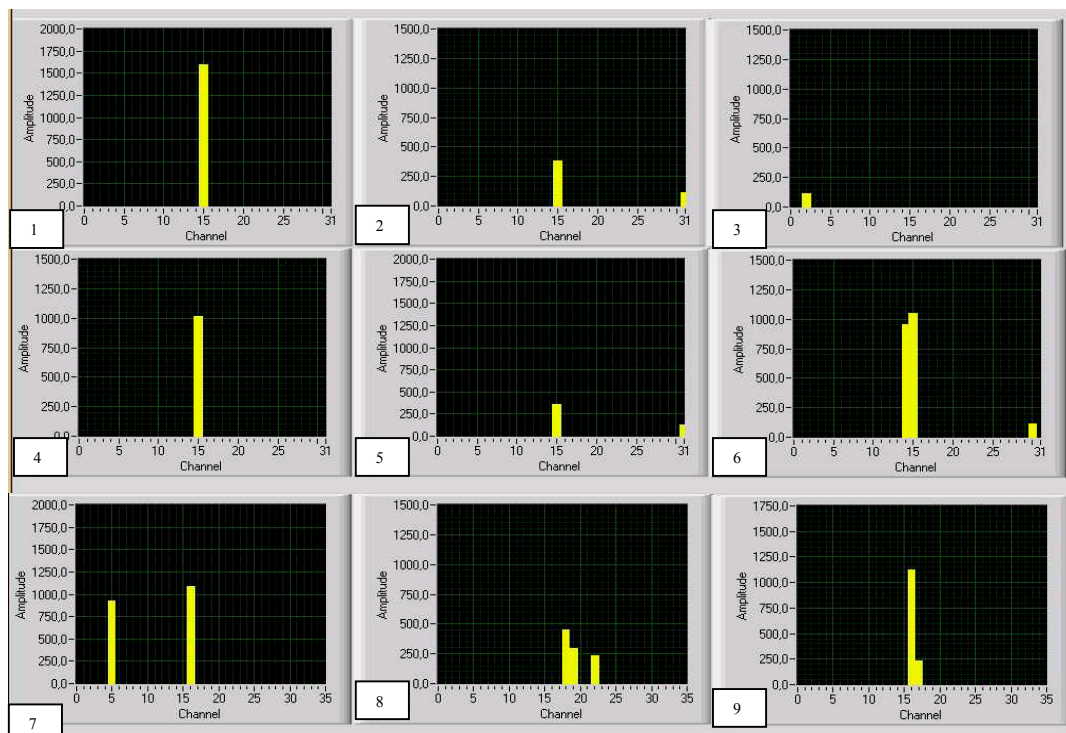


Figure 33: Séquence des événements.

Dans les graphiques 1, 2, 4 et 5 de la figure 33, la voie touchée est le numéro 15. Il y a quelques différences d'amplitude, surtout entre les graphiques 1 et 2 et entre les graphiques 4 et 5, puisque les impulsions ne sont pas produites pour le même type d'interaction. Dans le graphique numéro 3 il n'y a pas de voie touchée, exprimant le manque d'interactions. Dans le graphique 6 et 9, il y a deux voies adjacentes touchées (14 et 15), ici la source se trouve entre les deux voies, mais se trouve plus proche d'une des deux (on peut dire cela grâce à l'information donnée par l'amplitude), et enfin dans les graphiques 7 et 8 les voies touchées peuvent être des électrons diffusés ou fluorescences.

Conception d'une nouvelle électronique de localisation d'une chambre à fils appliquée à la

VI.3 Influence de la moyenne des échantillons sur l'amplitude.

Dans cette partie la variation de la lecture des données en fonction du nombre d'échantillons est étudiée

Les graphiques suivants montrent la variation de la moyenne en fonction du nombre d'échantillons.

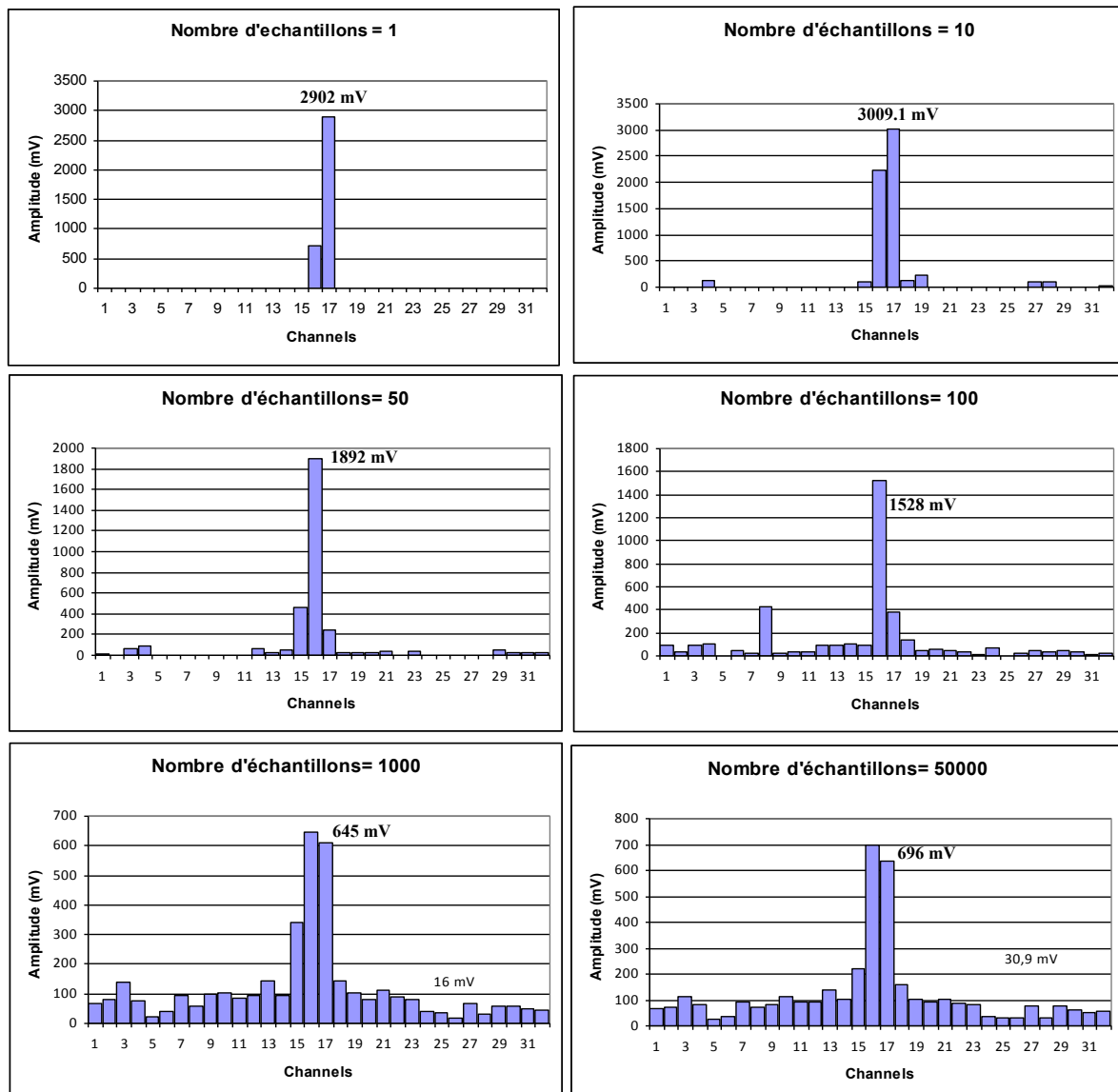


Figure 34: Influence du nombre d'échantillons sur la moyenne.

Dans la figure 34 nous pouvons voir que si le nombre d'échantillons est petit l'amplitude du signal est aussi petite. Si le nombre d'échantillons est petit la moyenne est plus précise et le bruit est plus faible.

Si le nombre d'échantillons est égal à 1 (cas du premier graphique de la figure 34), la moyenne s'effectue uniquement sur un pic. Celui-ci peut être grand ou petit. L'amplitude du pic dépend de l'impulsion qui sort de la chambre à fils. Dans ce cas (nombre d'échantillon=1), l'amplitude du pic avant de rentrer dans le Module de traitement se corresponde assez bien avec la lecture prise sur l'oscilloscope (amplitudes des grandes pics).

Les graphiques suivants représentent les maximums d'amplitude en fonction du nombre d'échantillons.

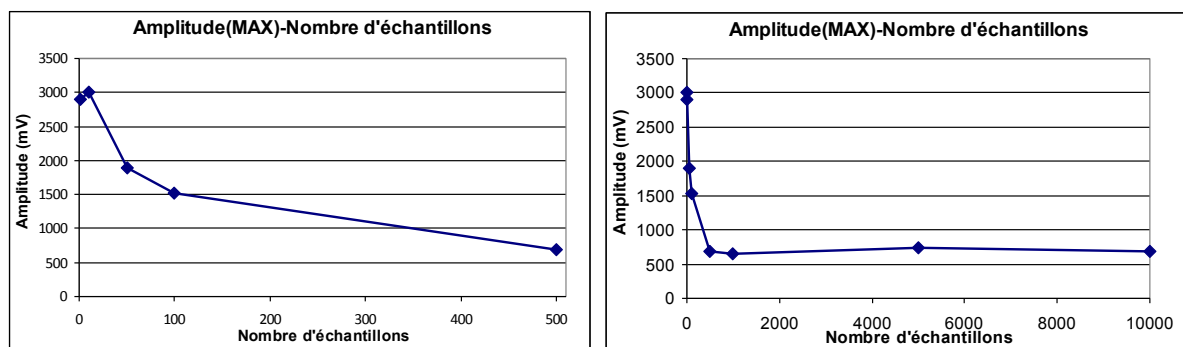


Figure 35: Influence du nombre d'échantillons sur les moyennes.

Dans la figure 35 nous observons que plus le nombre d'échantillons augmente plus l'amplitude diminue jusqu'à atteindre la moyenne de 700 mV. L'amplitude est alors constante entre 500 et une infinité d'échantillons.

L'explication de la variation d'amplitude en fonction du nombre d'échantillons est assez simple. Si le nombre d'échantillons est petit la probabilité d'obtenir un pic de grande amplitude est plus élevée que si le nombre d'échantillons est grand. Si le nombre d'échantillons est grand il y aura des grands pics et petits pics, mais le nombre de petits pics sera plus élevé que le nombre de grands pics, alors la moyenne des amplitudes est plus faible puisqu'il y a plus de petits pics. Normalement la chambre à fils émet plus de petits pics que grands pics.

Pour être sûre des amplitudes qui lit le Module de traitement, il faudra étudier échantillon par échantillons.

VI.4 Taux de comptage du Module relié à la chambre à fils.

Dans cette partie nous étudions le taux de comptage du Module de traitement relié à la chambre à fils. Dans ces expériences la fréquence des impulsions n'est pas connue. Le réglage de la fréquence du signal de synchronisation est plus difficile que lorsque les impulsions sont produites par un générateur de fréquence (test pulse) dont la fréquence d'entrée est connue. Pour ne pas rater des événements il fallait avoir une fréquence du signal de synchronisation plus élevée que la fréquence du signal « test pulse ».

La figure 36 ci-dessous, illustre le taux de comptage en fonction du signal de synchronisation.

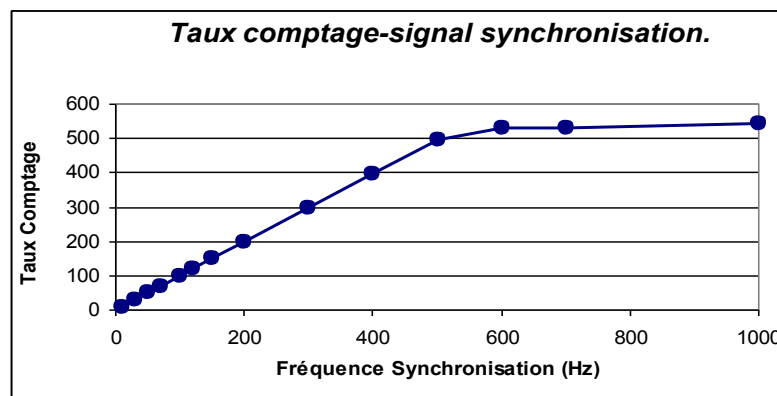


Figure 36: Taux de comptage du Module relié à la chambre.

Dans la figure 36 on voit bien que le taux de comptage est linéaire jusqu'à la fréquence d'environ 550 Hz, où le Module atteint la saturation. Cette saturation peut être due au programme LabView utilisé pour prendre les données ou la rapidité de l'ordinateur utilisé. Avant la saturation le taux de comptage est limité par la fréquence du signal de synchronisation, celle-ci est plus petite que la fréquence des impulsions qui viennent de la chambre à fils.

VI.5 Influence du temps d'ouverture du signal de synchronisation sur la lecture.

Dans cette partie on va essayer de trouver la fréquence optimale du signal de synchronisation pour rater le minimum de pics qui viennent de la chambre à fils. Dans la suite nous allons parler du temps d'ouverture du signal de synchronisation, temps dont le signal se trouve dans «l'état 1». Le temps dont le signal de synchronisation se trouve dans «l'état 0» est toujours constant, le fournisseur affirme que ce temps doit être égal à $5.7 \mu\text{s}$ (temps de conversion). Ce temps a été mis dans le Module de traitement et il n'arrivait pas à lire les données, nous avons donc pris $7.5 \mu\text{s}$ pour être sûre que le Module de traitement effectuait bien la conversion.

La figure 37 montre le signal de synchronisation qui a été utilisé, les valeurs des tensions sont toujours constantes.

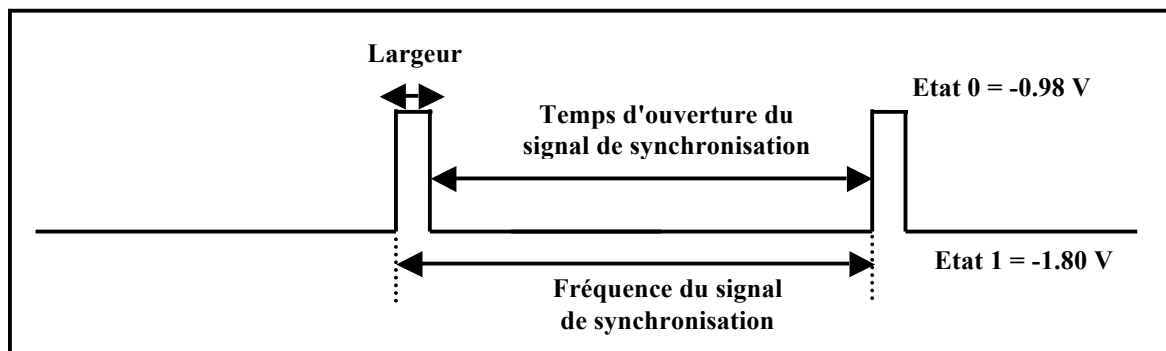


Figure 37: Signal de synchronisation.

Dans cette partie, les différents paramètres (conditions expérimentales) de la chambre à fils (tension et pression) et du Module (seuil) sont montrés ci-dessous :

- Pression = environ 6 bars.
- $HV_{\text{DERIVE}} = 4500 \text{ V}$.
- $HV_{\text{GRILLE}} = -2200 \text{ V}$.
- $HV_{\text{ANODES}} = 2100 \text{ V}$.
- $HV_{\text{STRIPS}} = -600 \text{ V}$.
- Seuil (tous les canaux) = 109,8 mV

*Paramètres initiaux de
la chambre à fils et du
Module.*

Les valeurs des tensions seront aussi optimisées dans les parties postérieures. Les figures suivantes montrent les différents résultats obtenus pour différentes valeurs de temps d'ouverture du signal de synchronisation (seulement les meilleurs résultats sont montrés).

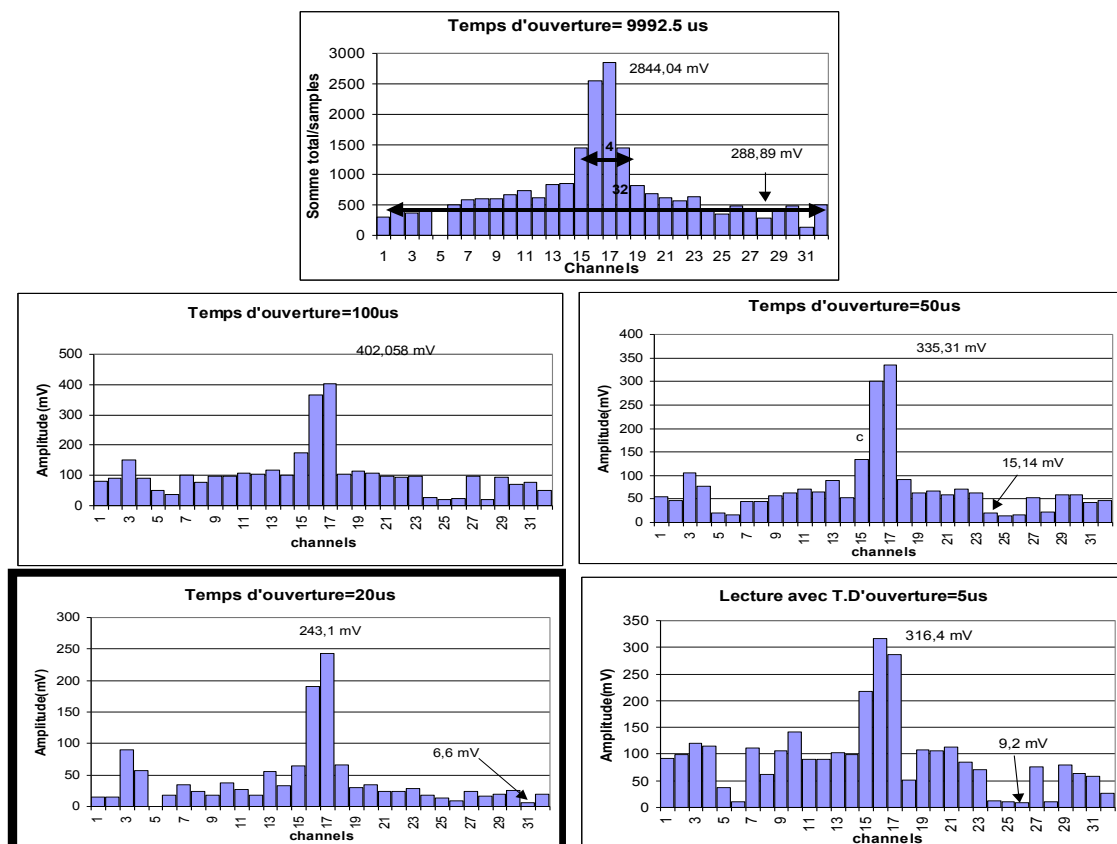


Figure 38: Influence du temps d'ouverture sur la lecture.

Dans la figure 38 nous pouvons voir l'influence du temps d'ouverture du signal de synchronisation sur la lecture des données qui viennent de la chambre à fils.

Dans les cinq graphiques de la figure 38, nous observons que la source collimateur se trouve dans le milieu des 32 voies reliées, où il y a deux voies plus touchées que les autres (16 et 17).

Nous pouvons remarquer aussi que si le temps d'ouverture est grand, les valeurs des amplitudes (maximales et minimales) sont plus élevées, mais si le temps d'ouverture est assez grand, beaucoup de pics sont ignorés, puisque dans le même déclenchement du signal de synchronisation il y aura plus d'un pic.

Les graphiques suivants (figure 39) représentent les amplitudes maximales (entre les 32 voies), les amplitudes minimales (entre les 32 voies) et le rapport entre les deux (signal/bruit) en fonction du temps d'ouverture.

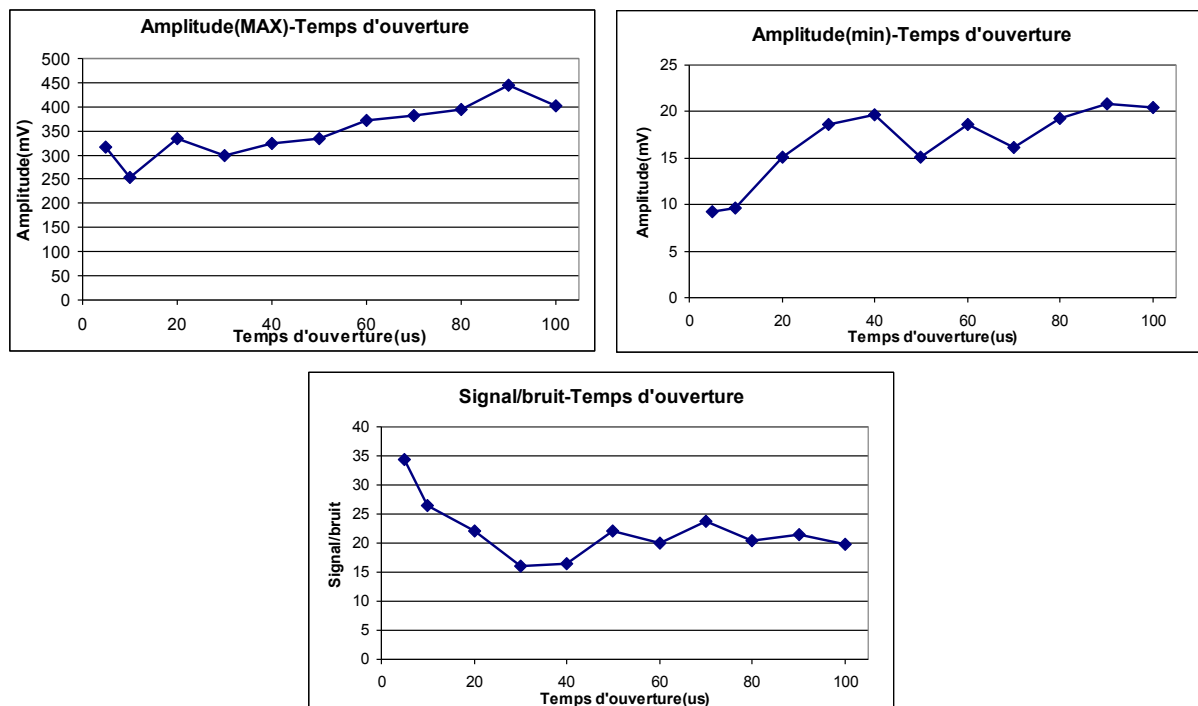


Figure 39: Influence du temps d'ouverture sur les amplitudes.

Dans les graphiques de la figure 39 nous observons que plus les temps d'ouverture sont grands, plus les valeurs des amplitudes sont grandes (maximales et minimales).

Si le temps d'ouverture du signal de synchronisation est assez grand dans cette période, il y aura beaucoup de pics dont s'il y a un grand pic, le Module le prend et ne prend pas en compte les petits. C'est pour cela que les amplitudes sont plus grandes si le temps d'ouverture est grand. A chaque fois que les mesures sont faites, plusieurs échantillons sont pris en compte. Le résultat que le programme LabView donne, est la moyenne de tous les échantillons pris.

Si le temps d'ouverture est petit dans cette période, il y aura moins de pics et la probabilité d'existence d'un pic avec grande amplitude sera plus petite. Il y aura plusieurs échantillons avec petits pics qu'avec des grands pics. C'est pourquoi la moyenne nous donne une petite amplitude.

Nous avons choisi comme temps d'ouverture du signal de synchronisation optimum : 20 μ s. C'est cette valeur qui sera utilisée par la suite. Il faut prendre en compte aussi que l'élargissement des pics qui arrivent au Module mesure environ 20 μ s. Donc si le temps d'ouverture est plus petit, le convertisseur peut ne pas prendre le pic au complet.

VI.6 Influence de la tension des fils d'anodes sur la lecture.

Dans cette partie la tension des fils d'anodes est optimisée. Pour cette partie les paramètres initiaux de la chambre sont pris, (les mêmes que dans la partie précédente). Le temps d'ouverture est $20 \mu s$.

Les graphiques suivants (figure 40) présentent l'évolution de la lecture des données en fonction de la tension des fils d'anodes.

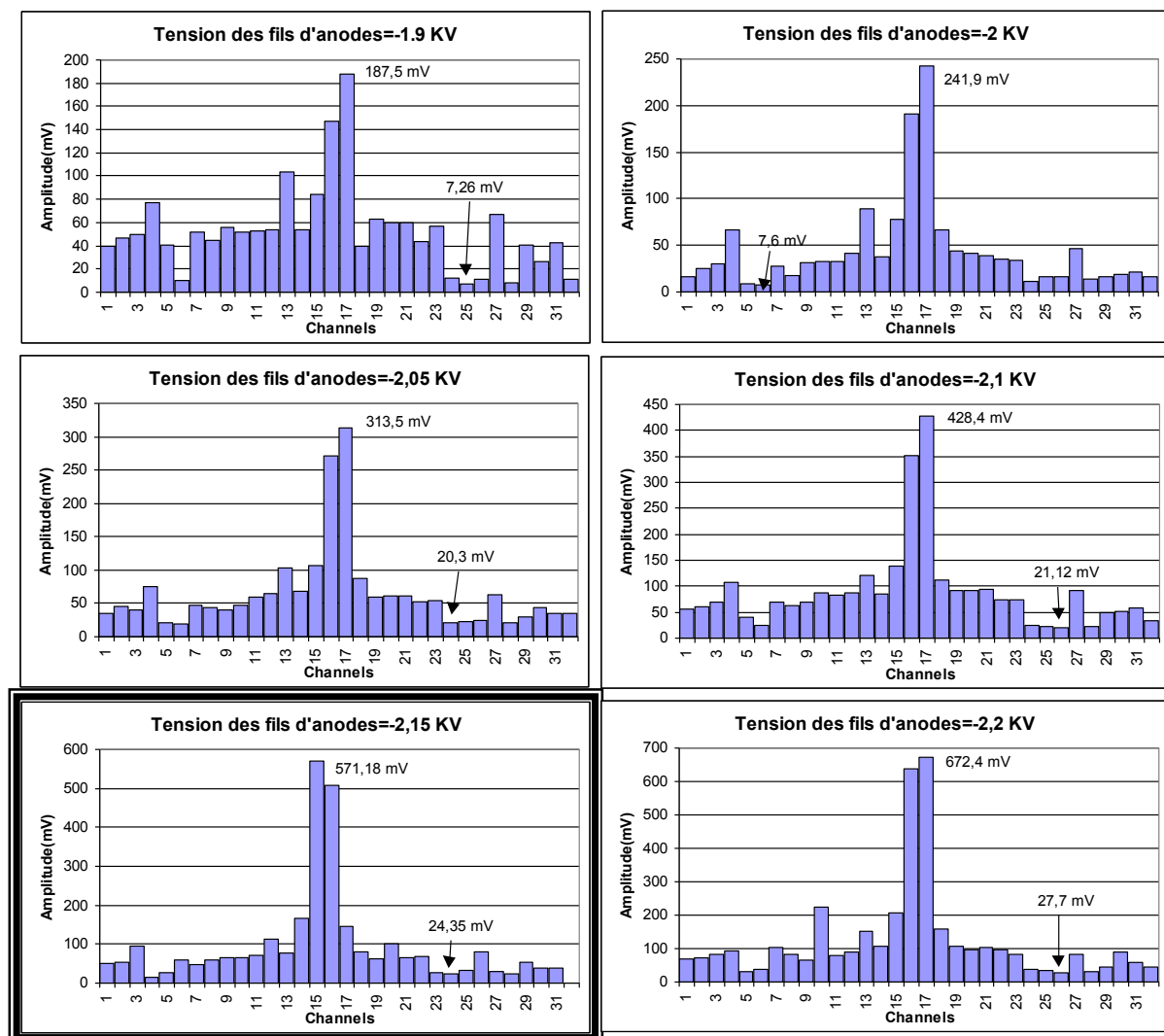


Figure 40: Influence de la tension des fils d'anodes sur la lecture.

Dans la figure 40 nous pouvons voir que si la tension des fils d'anode augmente en valeurs absolues, les amplitudes augmentent, c'est à dire l'amplification augmente, aussi et le bruit diminue.

Les graphiques suivants représentent les amplitudes maximales (entre les 32 voies) et les amplitudes minimales (entre les 32 voies), en fonction de la tension des fils d'anodes.

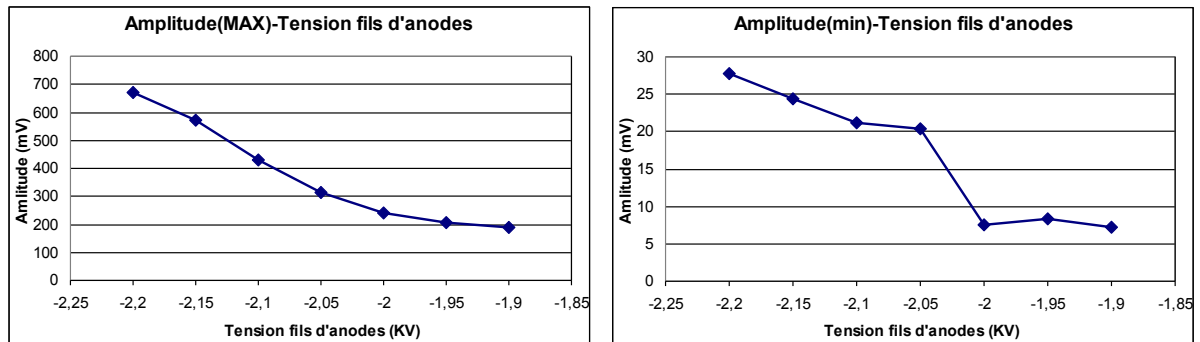


Figure 41: Influence de la tension des fils d'anodes sur les amplitudes.

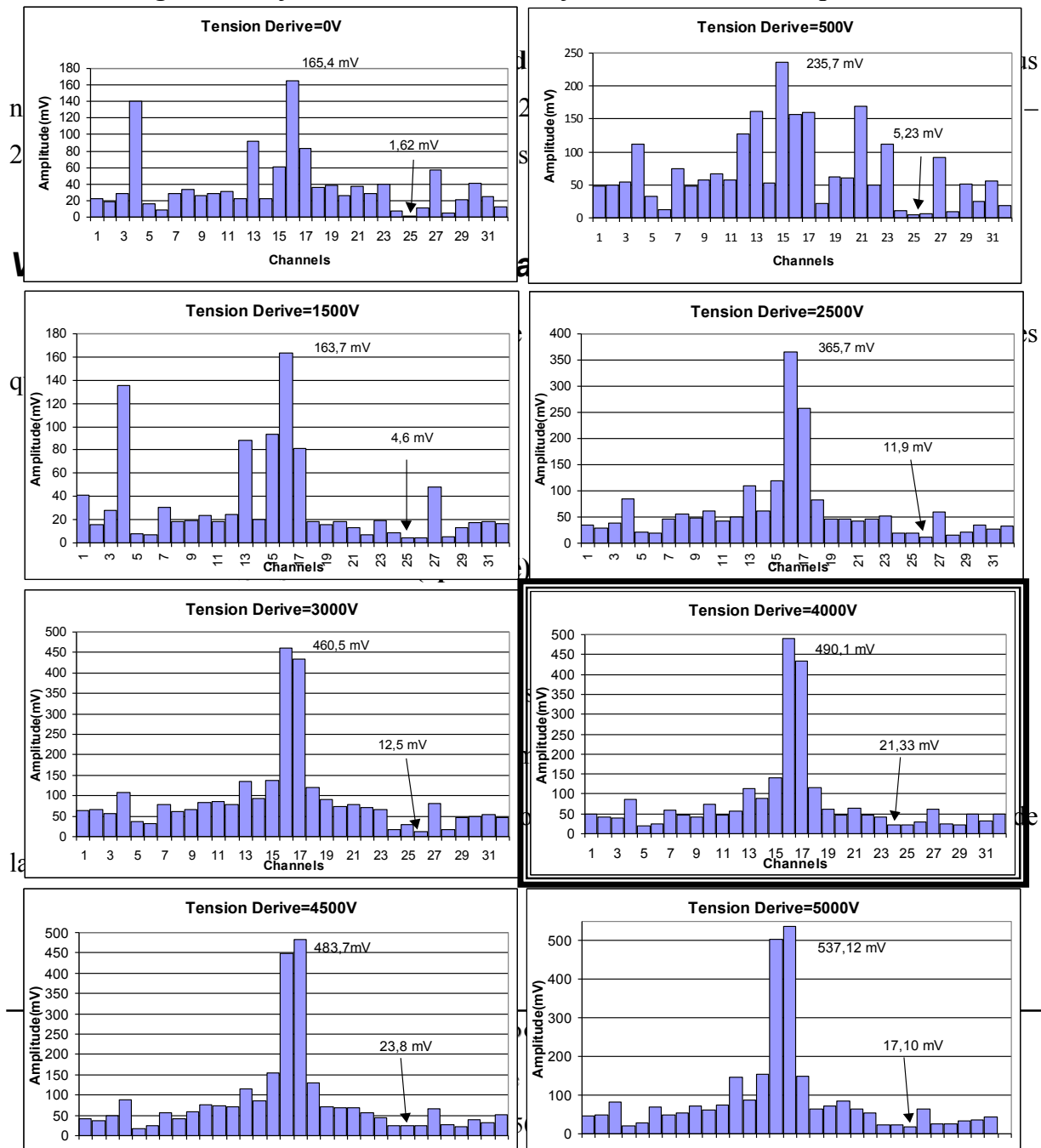


Figure 42: Influence de la tension de la dérivation sur la lecture.

Dans la figure 42 nous pouvons observer que si la tension de la dérivation augmente les amplitudes augmentent aussi et le bruit diminue. Ceci s'explique puisque si la tension de la dérivation augmente la diffusion diminue et le nuage électronique est plus localisé.

Nous avons choisi comme tension de la dérivation optimum 4.0 KV. Ici, nous n'avons pas choisi comme tension de la dérivation ni 4.5 KV ni 4.5 KV puisque l'on risque d'endommager le détecteur si la tension est plus élevée que cette valeur.

VII. Perspectives.

Le signal de synchronisation (utilisé pour faire fonctionner le Module de traitement) est produit par un générateur de fréquence. Ce signal est constant (temps d'ouverture constant) alors que la fréquence des impulsions ne l'est pas. A l'avenir, pour prendre en compte tous les événements, il faudra construire un circuit capable de générer un signal de synchronisation qui permet la lecture d'un pic et un seul par voie dans la même ouverture. Pour faire ce circuit nous avons pensé à deux possibilités :

- L'ouverture du signal de synchronisation lorsqu'il y a un pic.
- Signal de synchronisation ouvert en attendant l'arrivée d'un pic.

VII.1 Ouverture du signal de synchronisation lorsqu'il y a un pic.

Le principe de cette méthode est montrée dans la figure suivante :

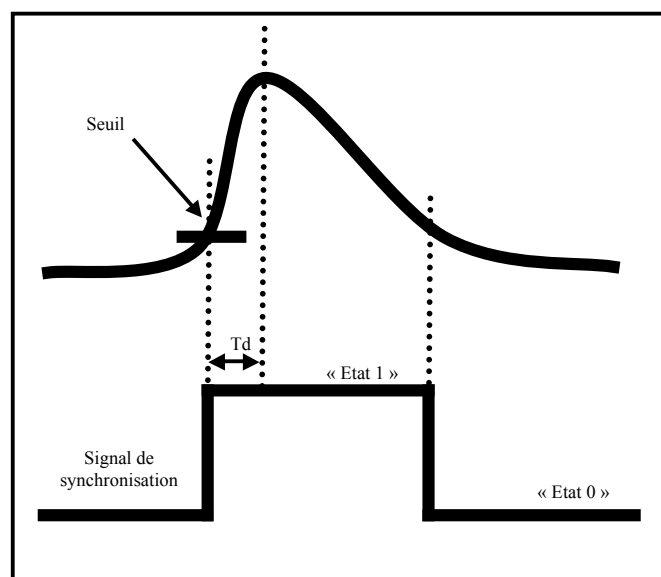


Figure 43: Signal de synchronisation I.

Si le signal d'entrée dépasse une certaine valeur, le signal de synchronisation se déclenche et se ferme après un certain temps (à étudier) en attendant le pic suivant.

Les inconvénients de ce système sont les suivants :

- Le signal de synchronisation doit être ouvert avant l'arrivée du pic pour la lecture de celui.
- Le temps T_d doit être plus grand que 250ns pour être sûr que le Module de traitement lit correctement le pic.

VII.2 Signal de synchronisation ouvert en attendant l'arrivée d'un pic.

Le principe de cette méthode est montrée dans la figure suivante :

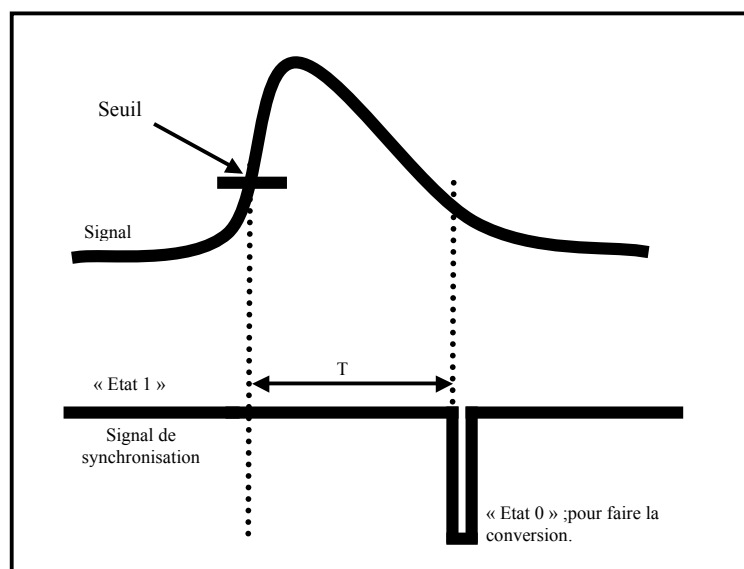


Figure 44: Signal de synchronisation II.

Ici, le principe est le suivant : le signal de synchronisation est laissé tout le temps dans «l'état 1» en attendant l'arrivée d'un pic. Quand le signal d'entrée dépasse le seuil, il faut attendre un temps «T» (à régler) pour fermer le signal de synchronisation (pour faire la conversion) et rouvrir le signal en attendant le pic suivant.

VII.3 Architecture globale du nouveau système de localisation.

Le principe de ce nouveau système est montré dans la figure suivante :

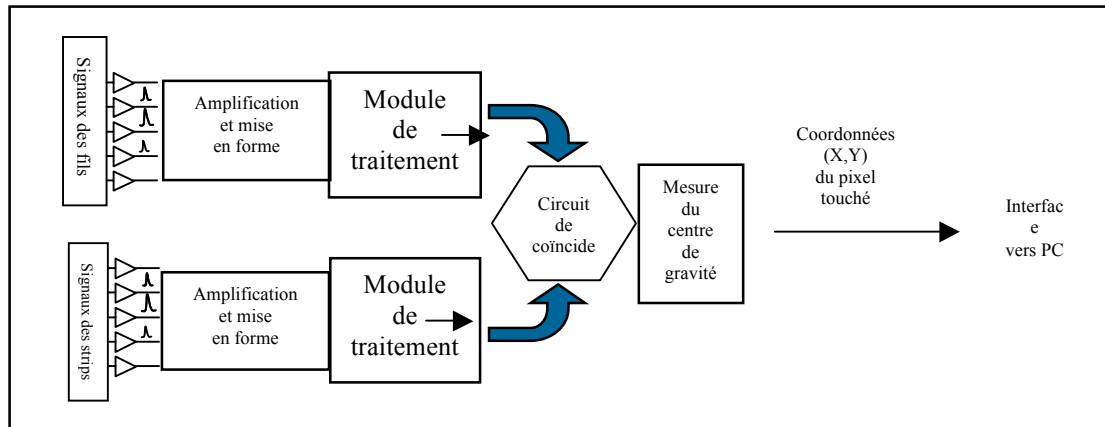


Figure 45: Architecture globale du nouveau système de localisation.

Il faudra équiper toutes les voies (les 192 voies des fils et les 192 voies des bandes de cathode) avec la nouvelle électronique, c'est à dire, le signal qui sort de la chambre à fil est envoyé vers les cartes analogiques d'amplification et de mise en forme, après vers les Modules de traitement, on fait la coïncidence temporelle, (pour déterminer si les deux signaux sont produit pour le même photon, on fait la mesure du centre de gravité pour déterminer quelle voie a été touchée et pour finaliser, les coordonnées X, Y sont envoyées vers l'ordinateur pour le traitement informatique.

VIII. Conclusion.

La conception d'une nouvelle électronique de localisation, qui permettra d'améliorer la précision du détecteur sans nuire à ses qualités, a été étudiée et mise en fonctionnement. Cette nouvelle méthode base son principe sur la numérisation de toutes les informations utiles délivrées par le détecteur. On sera ainsi capable de réduire le bruit lors de la réalisation d'une image en éliminant les événements dont la visualisation n'est pas souhaitée (électrons de fluorescence).

Cette nouvelle méthode va nous permettre d'obtenir des informations sur la position et le type d'interactions des photons dans la chambre à fils. Les premiers résultats obtenus correspondent à ce qui était attendu.

A terme, il sera nécessaire de fabriquer une carte qui permettra de générer le signal de synchronisation adéquat afin de prendre en compte tous les événements. Le développement d'un tel circuit a été lancé pour l'équipe de Cynove.

Bibliographie.

1. **G. CHARPAK, G PETERSEN, A. POLICARPO et F. SAULI** : Progress in high-accuracy proportional chambers. Août 1977.
2. **R.A. LEWIS, C.J. HALL, B. PARKER, A. JONES, W. HELSBY, J.W. SHELDON, P. CLIFFORT, M. HILLON, N. FORE**. The Daresbury fast multi-wire linear X-ray detector system. 1977.
3. **Angela BARR** : Application à l'imagerie médicale d'une chambre à fils en régime proportionnel. Thèse de doctorat. 2000.
4. **Timmy FLOUME** : Etude et optimisation des performances d'une chambre à fils dédiée à la médecine nucléaire. Rapport de stage de D.E.A. 2001
5. **C.A.E.N.** : Manuel de information technique. MOD. V 785 – 32 Channel peak sensing converter. Révision numéro 6, 18 Novembre 2002.
6. **C.A.E.N.** : Manuel de information technique. MOD. V 718 – VME parallel port interface. Révision numéro 2, 18 novembre 2002.