

FR 2700305

CEA-R-5361

CEA-R-5361

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

---

C.50

**MESURE DES RAYONNEMENTS IONISANTS  
MONOGRAPHIE SUR LES DETECTEURS  
A SEMI-CONDUCTEURS**

*par*

*le G. T. N. 5*

*Groupe de Travail de Normalisation n° 5  
« Définition et normalisation des méthodes  
de mesures par spectrométrie en laboratoire »  
du Comité d'instrumentation de radioprotection*

INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE

DEPARTEMENT DE PROTECTION SANITAIRE

Centre d'Etudes Nucléaires de la Vallée du Rhône

**Rapport CEA-R-5361**

## PLAN DE CLASSIFICATION DES RAPPORTS ET BIBLIOGRAPHIES CEA

(Classification du système international de documentation nucléaire SIDON/INIS)

A 11	Physique théorique	C 30	Utilisation des traceurs dans les sciences de la vie
A 12	Physique atomique et moléculaire	C 40	Sciences de la vie : autres études
A 13	Physique de l'état condensé	C 50	Radioprotection et environnement
A 14	Physique des plasmas et réactions thermonucléaires	D 10	Isotopes et sources de rayonnements
A 15	Astrophysique, cosmologie et rayonnements cosmiques	D 20	Applications des isotopes et des rayonnements
A 16	Conversion directe d'énergie	E 11	Thermodynamique et mécanique des fluides
A 17	Physique des basses températures	E 12	Cryogénie
A 20	Physique des hautes énergies	E 13	Installations pilotes et laboratoires
A 30	Physique neutronique et physique nucléaire	E 14	Explosions nucléaires
B 11	Analyse chimique et isotopique	E 15	Installations pour manipulation de matériaux radioactifs
B 12	Chimie minérale, chimie organique et physico-chimie	E 16	Accélérateurs
B 13	Radiochimie et chimie nucléaire	E 17	Essais des matériaux
B 14	Chimie sous rayonnement	E 20	Réacteurs nucléaires (en général)
B 15	Corrosion	E 30	Réacteurs nucléaires (types)
B 16	Traitement du combustible	E 40	Instrumentation
B 21	Métaux et alliages (production et fabrication)	E 50	Effluents et déchets radioactifs
B 22	Métaux et alliages (structure et propriétés physiques)	F 10	Economie
B 23	Céramiques et cermets	F 20	Législation nucléaire
B 24	Matières plastiques et autres matériaux	F 30	Documentation nucléaire
B 25	Effets des rayonnements sur les propriétés physiques des matériaux	F 40	Sauvegarde et contrôle
B 30	Sciences de la terre	F 50	Méthodes mathématiques et codes de calcul
C 10	Action de l'irradiation externe en biologie	F 60	Divers
C 20	Action des radioisotopes et leur cinétique		

Rapport CEA-R-5361

*Cote-matière de ce rapport : C.50*

### DESCRIPTION-MATIERE (mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS)

*en français*

DETECTEURS DE RAYONNEMENTS  
DETECTEURS A SEMI-CONDUCTEUR AU GE  
DETECTEURS A JONCTION  
DETECTEURS A JONCTION COMPENSES AU LI  
DETECTEURS A SEMI-CONDUCTEUR AU SI  
DETECTEURS A BARRIERE DE SURFACE  
DETECTEURS EQUIVALENTS AU TISSU  
DETECTEURS A SEMI-CONDUCTEUR AU HG 12  
PERFORMANCE  
SENSIBILITE

*en anglais*

RADIATION DETECTORS  
GE SEMICONDUCTOR DETECTORS  
JUNCTION DETECTORS  
LI-DRIFTED JUNCTION DETECTORS  
SI SEMICONDUCTOR DETECTORS  
SURFACE BARRIER DETECTORS  
TISSUE-EQUIVALENT DETECTORS  
HG12 SEMICONDUCTOR DETECTORS  
PERFORMANCE  
SENSITIVITY

RAPPORT CEA-R-5361 - Groupe de Travail de Normalisation n°5 du  
Comité d'Instrumentation de Radioprotection.

AUSSEL Jean-Pierre, Rédacteur

MESURE DES RAYONNEMENTS IONISANTS MONOGRAPHIE SUR LES DETECTEURS A  
SEMI-CONDUCTEURS.

Sommaire - Les techniques de fabrication des détecteurs nucléaires à base de matériaux semi-conducteurs évoluant sans cesse, on trouve sur le marché un éventail étendu de modèles, aux spécificités et aux caractéristiques très différentes. Ce document a pour objet, après quelques brefs rappels théoriques, de décrire les principaux types de détecteurs, leur fonctionnement ainsi que leur utilisation préférentielle.

Un tableau comparatif guidera le lecteur néophyte dans ses choix.

1986

80 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

RAPPORT CEA-R-5361 - Standardization Working Group N.5 of the Health  
Physics Instrumentation Committee.

AUSSEL Jean-Pierre, Editor

MEASUREMENT OF IONISING RADIATION SEMICONDUCTOR DETECTORS : A REVIEW.

Summary - Manufacturing techniques for nuclear detectors using semiconductors are constantly advancing, and a large range of models with different specificities and characteristics are available. After a theoretical reminder, this report describes the main types of detectors, their working and their preferential use. A comparative table guides the neophyte reader in his choice.

1986

80 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

- Rapport CEA-R-5361 -

Centre d'Etudes Nucléaires de la Vallée du Rhône  
Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire  
Département de Protection Sanitaire  
Service d'Hygiène Industrielle

MESURE DES RAYONNEMENTS IONISANTS  
MONOGRAPHIE SUR LES DETECTEURS A SEMI-CONDUCTEUR

par

le G. T. N. 5  
Groupe de Travail de Normalisation n° 5  
«Définition et normalisation des méthodes de mesures  
par spectrométrie en laboratoire»  
du Comité d'instrumentation de radioprotection

- Juin 1986 -

**DOCUMENT ETABLI PAR :**

MM. ALLARD Gilles  
BALESTRA Serge  
Mme BARDY Nicole  
MM. BRESSON Jean  
CABANNE Norbert  
CAIRE Bernard  
CANET Auguste  
Mme CHAMBART Annie  
M. DAMOY François  
Mme DESCOURS Solange  
Mme LAFON Hélène  
MM. MICHAUT François  
MILLIES-LACROIX Jean-Claude  
MOREL Jean  
PANISSET Jean-Claude  
ROBINSON Jean-Pierre

**REDACTEUR :**

M. AUSSEL Jean-Pierre  
IPSN/DPS/SHI/LATIN  
C.E.A. PIERRELATTE

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

#### 1 - RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX RAYONNEMENTS

#### 2 - PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT

#### 3 - CARACTERISTIQUES D'UN DETECTEUR

3.1 - Linéarité

3.2 - Résolution en énergie

3.3 - Résolution en temps

3.4 - Efficacité

3.5 - Rapport pic-Compton

#### 4 - DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS

4.1 - Détecteurs à base de silicium

4.1.1. Détecteur à barrière de surface

4.1.2. Détecteur à jonction diffusée

4.1.3. Détecteur à jonction implantée

4.1.4. Détecteur à jonction passivée implantée

4.1.5. Détecteur silicium-lithium

4.2 - Détecteurs à base de germanium

4.2.1. Détecteurs au germanium dopé au lithium

4.2.1.1. Détecteur à structure plane

4.2.1.2. Détecteur à structure coaxiale

4.2.1.3. Détecteur puits

4.2.2. Détecteurs au germanium hyper-pur

4.2.2.1. Détecteur à structure plane

4.2.2.2. Détecteur à structure coaxiale de type (P)

4.2.2.3. Détecteur à structure coaxiale de type (N)

4.3 - Détecteurs à base d'autres matériaux

4.3.1. Tellure de cadmium (CdTe)

4.3.2. Iodure mercurique (HgI<sub>2</sub>)

4.3.3. Arséniure de gallium (AsGa)

5 - COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS

5.1 - Détecteurs à base de silicium

5.2 - Détecteurs à base de germanium

6 - REMARQUES SUR L'ENSEMBLE DE DETECTION

6.1 - Le système cryogénique

6.2 - Les préamplificateurs

7 - CONCLUSION

oOo

DOCUMENTATION - Constructeurs  
- Index bibliographique

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ANNEXES

## INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, on assiste au développement des détecteurs à semi-conducteurs (Cf. § 2).

Cet essor est dû à leur excellent pouvoir de résolution, qui facilite l'analyse fine des échantillons étudiés.

Les deux principaux matériaux servant à réaliser ces semicteurs (Cf. ANNEXE 2) sont le **germanium** et le **silicium**.

Le germanium est employé principalement pour la détection des photons  $\gamma$ , alors que le silicium, avec un numéro atomique plus faible, est employé de préférence pour la détection des particules chargées, ou des photons X.

Initialement, il s'avérait difficile, pour des raisons technologiques, de produire du germanium de haute pureté. Ce matériau contenait alors des impuretés, qui devaient être compensées par une diffusion d'ions de lithium. Cette solution, efficace pour pallier les effets induits par le manque de pureté du cristal, obligeait le maintien permanent du détecteur à la température de l'azote liquide, pour éviter la dégradation rapide (quelques heures) de la compensation, et donc, la détérioration irrémédiable du détecteur.

Depuis peu, il est possible de produire des cristaux de germanium de haute pureté, ce qui rend inutile toute compensation. Ce type de semicteurs peut alors être ramené en dehors des périodes d'utilisation à la température ambiante, sans que leurs caractéristiques s'en trouvent altérées (1). Ces détecteurs peuvent donc supporter des réchauffements programmés ou accidentels, mais peu fréquents.



Limité dans un premier temps à la réalisation des détecteurs à structure plane, le germanium de haute pureté permet maintenant d'obtenir des détecteurs de volume important, qui possèdent une efficacité de détection élevée.

Parallèlement à cette évolution, des efforts constants sont accomplis pour trouver des matériaux susceptibles de fonctionner à la température ambiante. Mais le tellure de cadmium, l'iodure mercurique, l'arséniure de gallium, ne peuvent être produits que pour de faibles volumes (2), ce qui limite leur utilisation.

## 1 - RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX RAYONNEMENTS

### - Emission $\alpha$ -

Il s'agit de noyaux d'hélium caractérisés par deux neutrons et deux protons. En raison de leur masse importante (7297 fois celle d'un électron), ces particules sont dites chargées lourdes, elles sont peu pénétrantes et fortement ionisantes.

L'émission  $\alpha$  est caractérisée par une structure de raies spécifiques à la nature de l'émetteur considéré (Cf. ANNEXE 1).

L'interaction d'une particule  $\alpha$  avec un matériau semi-conducteur se traduit par une perte d'énergie et une création de paires électron-trou.

### - Emission $\beta$ -

Le rayonnement  $\beta$  se traduit par l'émission au niveau du noyau d'électrons positifs ( $\beta^+$  positons) ou négatifs ( $\beta^-$  négatons).

Ces particules sont légères par comparaison aux particules  $\alpha$ , donc moins ionisantes et plus pénétrantes.

L'émission  $\beta$  n'est pas caractérisée par un spectre de raies, mais par un spectre continu.

### - Emission $X$ et $\gamma$ -

Les désintégrations  $\alpha$  ou  $\beta$  laissent généralement le noyau dans un état excité; le retour vers l'état stable se traduit par l'émission

de photons  $\gamma$  ou d'électrons de conversion. Des perturbations apparaissent également au niveau du cortège électronique, elles se traduisent par l'émission de raies X et d'électrons AUGER. Ces rayonnements sont peu ionisants et très pénétrants.

Le spectre d'énergie des photons X et  $\gamma$  est un spectre de raies, spécifique au corps radio-actif considéré (Cf. ANNEXE 1).

La conversion d'énergie dans la matière se fait principalement par effet photo-électrique, effet de création de paires ou effet Compton (Cf. Fig. 1).

## 2 - PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT

Un semi-conducteur est un solide cristallin dont la résistivité se trouve comprise entre celle des conducteurs ( $10^{-5} \Omega/\text{cm}$ ) et celle des isolants ( $10^{+12} \Omega/\text{cm}$ ). Ces corps, aux nombreuses propriétés, sont utilisés dans l'industrie et la recherche.

Schématiquement, un détecteur à semi-conducteur peut être considéré comme une pastille mono-cristalline placée entre deux électrodes ; celles-ci sont reliées à une source de tension afin de créer un champ suffisamment intense à l'intérieur du cristal. Quand un rayonnement ionisant traverse un solide, il perd partiellement ou totalement son énergie par interaction avec le milieu, avec une probabilité d'autant plus grande que le numéro atomique du matériau est élevé. Cette perte d'énergie se fait de manière directe pour les particules chargées et indirectes pour les photons. Elle se traduit par une mise en mouvement de paires électron-trou. Le tableau 1 mentionne les caractéristiques principales des matériaux semi-conducteurs.

Les porteurs de charges ainsi libérées créent aux bornes de la résistance R (Cf. Fig. 2) une impulsion électrique d'amplitude proportionnelle à l'énergie perdue par le rayonnement dans le cristal.

La relation liant l'énergie libérée et la quantité d'électricité collectée est :

$$Q = n \frac{E_e}{W.C}$$

- n : Efficacité de collection
- E : Energie cédée au milieu
- e : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb)
- W : Energie moyenne de création d'une paire électron-trou
- C : Capacité du détecteur
- Q : Quantité d'électricité collectée.

La qualité d'un détecteur est liée à la collection des charges. Celle-ci est incomplète, quand le parcours de la particule est supérieur à la zone utile du détecteur ; dans ce cas l'amplitude des impulsions devient plus faible et donc n'est plus proportionnelle à l'énergie du rayonnement incident.

D'où nécessité, pour que la collection des charges soit complète, de satisfaire aux conditions suivantes :

- a) - le cristal ne doit pas comporter de pièges, défauts de structure ou impuretés ,
- b) - la zone de détection (encore appelée zone utile ou zone désertée) doit comporter un nombre négligeable de porteurs libres,
- c) - l'intensité du champ électrique doit être suffisante.

### 3 - CARACTERISTIQUES D'UN DETECTEUR

#### 3.1 - Linéarité

Elle caractérise la proportionnalité entre l'énergie libérée dans le détecteur par le rayonnement incident et l'amplitude du signal électrique recueillie à ses bornes.

La linéarité est d'autant meilleure que :

- a) - le rayonnement est totalement absorbé dans le volume utile du détecteur,
- b) les porteurs libres engendrés sont totalement collectés.

#### 3.2 - Résolution en énergie

En général, la résolution en énergie LTMH (Cf. ANNEXE 2) est l'expression de la mesure de la largeur à mi-hauteur d'un pic d'énergie donnée. Ce paramètre est utilisé pour caractériser la finesse d'un spectre de raies; ces dernières, à cause de déformations diverses, deviennent des pics. Sa valeur doit être la plus faible possible.

Les causes principales de dégradation de la résolution sont :

- a) Un rapport signal sur bruit défavorable : le bruit est dû essentiellement à la présence de capacités au niveau du détecteur ou de l'étage préamplificateur.

Ceci impose, pour conserver une résolution acceptable, de refroidir certains types de détecteur ainsi que les étages d'entrée du préamplificateur. Cette cause de dégradation est appelée résolution électronique; elle est liée au bruit de fond par l'expression ;

$$Le = \sqrt{Lp^2 + Ld^2}$$

Lp : bruit de fond du préamplificateur

Ld : bruit de fond du détecteur

Le : résolution électronique

- b) Les fluctuations statistiques du nombre des porteurs de charges créées par le rayonnement ionisant sont évaluées par la relation :

$$Ls = 2.35 (F.W.E.)^{1/2}$$

où :

W : Energie moyenne de création d'une paire électron-trou  
(2.98 eV dans le germanium, 3.81 eV dans le silicium à  
77° K)

E : Energie de la particule ionisante

F : Terme de corrélation entre les différentes charges  
appelé facteur de FANO (0.06 pour le Ge 0.09 pour le  
Si)

Ls : Contribution fondamentale du détecteur à l'élargissement des raies.

On peut remarquer que le nombre d'évènements élémentaires, sur lequel porte la statistique, est plus élevé pour les détecteurs à semi-conducteur que pour les détecteurs à scintillation, du fait que l'énergie de création des charges est respectivement de 3 et 30 eV : ceci explique l'excellent pouvoir séparateur des détecteurs à semi-conducteur.

c) - La collection incomplète des charges produites conduit à un élargissement ( $L_c$ ) des raies et à leur déformation : une traînée apparaît du côté des basses énergies rendant les pics asymétriques

- Ce défaut est directement lié à la qualité du matériau semi-conducteur.

En admettant une combinaison quadratique des trois causes de déformation, la résolution en énergie s'écrit :

$$R = \sqrt{L_e^2 + L_s^2 + L_c^2}$$

### 3.3 - Résolution en temps

La résolution en temps caractérise la dispersion du temps de collection des charges pour une énergie donnée .

Ce paramètre est intéressant dans les expériences de physique, où l'on recherche la simultanéité d'évènements nucléaires.

### 3.4 - Efficacité

On distingue pour les spectres de raies :



a) L'efficacité totale

C'est le rapport du nombre total d'impulsions détectées, au nombre d'évènements nucléaires émis par la source.

b) L'efficacité d'absorption totale

C'est le rapport du nombre d'impulsions détectées sous le pic d'absorption totale, au nombre d'évènements nucléaires émis par la source.

c) L'efficacité intrinsèque de détection

C'est le rapport du nombre d'impulsions détectées sous le pic d'absorption totale, au nombre de photons arrivant dans le volume sensible du détecteur. Le calcul de cette efficacité exige la connaissance de l'angle solide correspondant.

Et pour le rayonnement  $\gamma$  et  $\beta$  :

d) L'efficacité relative

L'efficacité relative est une caractéristique commerciale de comparaison. Elle est calculée à partir du pic de 1.33 Mev du  $^{60}\text{Co}$ . C'est le rapport de l'efficacité d'absorption totale du détecteur étudié sur celle d'un détecteur à scintillation type NaI du 3" x 3". Source placée dans les deux cas à 25 cm, dans l'axe du détecteur.

En règle générale, l'expérimentateur utilise l'efficacité d'absorption totale, et parfois l'efficacité totale. Elles sont fonction :

- de la distance échantillon détecteur,
- du volume et de la géométrie du détecteur. Ce choix dépend du type de rayonnement à détecter. Pour les rayonnements  $\alpha$  et  $\beta$  un grand volume n'est pas nécessaire,
- du volume et de la forme de l'échantillon,
- du type de détecteur.

### 3.5 - Rapport pic/Compton

Le rapport pic sur Compton n'intervient que pour les détecteurs de volume élevé. Pour le rayonnement  $\gamma$ , il est défini comme étant le rapport des amplitudes du sommet du pic d'absorption totale de 1.33 MeV du  $^{60}\text{Co}$  et du fond Compton correspondant, dans la région où ce dernier présente un plateau. Ce plateau s'étend entre 1040 et 1096 keV(4). Ce paramètre est lié au volume et à la géométrie du cristal détecteur (Cf. ANNEXE 1).

## 4 - DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS

### 4.1 - Détecteurs à base de silicium

Le faible pouvoir d'arrêt du silicium les destinent aux particules chargées, aux rayonnements peu pénétrants (photons X et  $\gamma$  d'énergie faible) car les épaisseurs de zone utile ne dépassent guère 5 millimètres pour les cristaux détecteurs au silicium pur et 10 millimètres pour ceux à base de silicium dopé au lithium.

Dans la spectrométrie des particules  $\alpha$ , l'obtention d'une résolution et d'une efficacité acceptables nécessite le travail sous vide. Cette contrainte peut exister en spectrométrie X, pour les rayonnements d'énergie très basse.

Le refroidissement n'est nécessaire que pour les détecteurs silicium - lithium de forte épaisseur, mais améliore la résolution en énergie des détecteurs d'épaisseur plus faible .

L'optimisation de la relation résolution-efficacité est fonction du problème à traiter. En effet, si la surface augmente, l'efficacité augmente mais la résolution diminue ! Il faut trouver le meilleur compromis (5).

#### 4.1.1 - Détecteur à barrière de surface

-----

Ces détecteurs (Cf. Fig. 3) sont constitués par une plaquette de cristal semi-conducteur, généralement silicium de type (N);

après traitement adéquat, on dépose, sous vide, une couche d'aluminium établissant un contact ohmique et, sur l'autre face, une mince couche d'inversion ( $\approx 200 \text{ \AA}$ ) réalisée par évaporation d'or. Cette dernière assure le contact (P+) (5).

Les épaisseurs utiles obtenues varient de quelques microns à environ 5 millimètres.

Ces détecteurs fonctionnent à température ambiante et peuvent avoir des surfaces atteignant  $1800 \text{ mm}^2$  tout en conservant une résolution en énergie acceptable.

Cette propriété, due au mode de fabrication de la jonction, permet une grande homogénéité de surface.

#### 4.1.2 - Détecteur à jonction diffusée

-----

Ce type de détecteur (Cf. Fig. 4) a un fonctionnement analogue aux détecteurs à barrière de surface. La différence entre les deux se situe essentiellement dans le mode de fabrication.

Sur une plaquette de silicium d'un type donné, généralement (N), on réalise une jonction par diffusion thermique d'impuretés de type opposé (bore, phosphore). Le contact arrière est réalisé par une métallisation à l'aluminium ou à l'arsenic.

L'épaisseur de la zone utile obtenue est de l'ordre de  $700 \mu\text{m}$ . Le faible pouvoir d'arrêt du silicium limite les possibilités d'avoir une bonne linéarité.

Le cycle thermique de fabrication, l'épaisseur de la fenêtre et de la zone utile font que ces détecteurs présentent des caractéristiques nucléaires moins performantes que celles

obtenues avec les détecteurs à barrière de surface. Cependant, leur robustesse fait que les utilisateurs les préfèrent pour certaines applications.

Les surfaces réalisées à l'heure actuelle atteignent quelques  $\text{cm}^2$ .

#### 4.1.3 - Détecteur à jonction implantée

-----

Basés sur le même principe que les détecteurs à barrière de surface et à jonction diffusée, ces semicteurs (Cf. Fig. 5) combinent les avantages des deux : robustesse et faible épaisseur de la fenêtre (6).

La jonction est obtenue par implantation ionique (Cf. ANNEXE 2) d'impuretés d'un type donné dans un cristal semi-conducteur de type opposé.

Cette technique permet de contrôler parfaitement la réalisation de la jonction, ainsi que la profondeur de la zone utile. Le courant inverse est très inférieur à celui des détecteurs précédemment décrits d'où un bruit de fond faible à la température ambiante, qui permet d'avoir une excellente résolution en énergie.

#### 4.1.4 - Détecteur à jonction passivée implantée

-----

Les détecteurs à jonction passivée (Cf. ANNEXE 2) implantée

se différencient des autres types par le mode de fabrication qui permet de réaliser simultanément sur la même plaquette de silicium plusieurs détecteurs (Cf. Fig. 6).

Ce procédé appelé "planar" lors de la réalisation de semi-conducteurs électroniques est appliqué aux détecteurs nucléaires. Il permet de bien reproduire les caractéristiques des jonctions. Les composants réalisés présentent un courant inverse extrêmement faible, inférieur de 50 à 100 fois à celui d'une jonction à barrière de surface, ce qui se traduit par une excellente résolution à température ambiante, même dans le domaine des rayonnements X (Cf. Fig. 7).

Le champ d'application de ces détecteurs est très vaste. Il s'étend de la spectrométrie des particules chargées  $\alpha$   $\beta$  à la spectrométrie X et  $\gamma$  et à la physique des hautes énergies.

#### 4.1.5 - Détecteur silicium - lithium

-----

Les volumes des détecteurs à barrière de surface sont limités par l'épaisseur de la zone utile du cristal qui ne dépasse guère cinq millimètres; pour obtenir des épaisseurs plus importantes et compenser la présence d'impuretés on fait migrer du lithium (N) dans du silicium de type (P). Il se forme alors une région compensée (intrinsèque) entre les zones (N) et (P) (Cf. Fig. 8) d'où obtention d'une diode NIP (Cf. ANNEXE 2).

La réalisation de ces détecteurs consiste à former une jonction par diffusion du lithium dans le silicium, puis à

faire migrer, à travers le cristal semi-conducteur, les ions  $Li^+$ , vers les régions (P), par polarisation inverse et élévation de la température de la diode ainsi formée.

Sur l'autre face, une fine couche d'or est déposée réalisant le contact (P). Les épaisseurs compensées atteignent 10 nm.

L'agitation thermique rend nécessaire le refroidissement des détecteurs d'épaisseur importante (2); pour les plus faibles ce refroidissement n'est pas obligatoire, les performances sont améliorées. Rappelons que le temps de collection augmente avec la température et avec le carré de l'épaisseur.

Ce type de semicteur est utilisé pour :

- a) La spectrométrie des particules chargées pénétrantes, les jonctions à barrière de surface n'ayant pas une épaisseur suffisante.
- b) La spectrométrie des rayonnements X et  $\gamma$ , en raison de leur faible courant inverse, de leur excellente résolution en énergie et de la faible épaisseur de leur fenêtre d'entrée. Pour mesurer des énergies supérieures à 30 keV, les détecteurs à base de germanium sont mieux adaptés.

#### 4.2 - Détecteurs à base de germanium

Par suite de son faible numéro atomique,  $Z = 14$ , le silicium ne convient pas pour la détection des photons d'énergie supérieure à 30 keV. Le germanium, avec un numéro atomique plus élevé ( $Z = 32$ ), présente alors une efficacité beaucoup plus grande.

Les détecteurs à base de ce matériau sont surtout utilisés pour les rayonnements X et  $\gamma$ .

#### 4.2.1 Détecteurs au germanium dopé au lithium

---

Le principe de fonctionnement de ces détecteurs est identique à celui des jonctions silicium dopées au lithium. Ce sont des diodes NIP. Il faut, cependant, noter que les états de surface jouent un rôle prépondérant pour la collection des charges. Le lithium a un pouvoir migrateur très élevé dans le germanium. Ceci nécessite de refroidir de manière permanente les détecteurs en germanium lithium, afin de préserver leurs caractéristiques et permettre aussi de diminuer le courant inverse.

A l'heure actuelle, les détecteurs à base de Ge/Li sont avantageusement remplacés par ceux en germanium hyper-pur.

##### 4.2.1.1 Détecteur à structure plane

Ces structures planes (Cf. Fig. 9) sont surtout employées pour les rayonnements X et  $\gamma$  limités à quelques centaines de keV, car elles présentent une bonne résolution nucléaire associée à une efficacité appréciable. Cependant, la résolution nucléaire est moins bonne que celle obtenue avec les jonctions à base de silicium dopé au lithium.

La forme de ces détecteurs les rend particulièrement sensibles à l'incidence des photons d'où leur emploi en polarimétrie  $\gamma$ .

##### 4.2.1.2 Détecteur à structure coaxiale

La structure planaire est mal adaptée à la détection des rayonnements photoniques d'énergie élevée. Au-



dessus de quelques centaines de keV, il est préférable d'utiliser des structures coaxiales, qui permettent d'obtenir des volumes importants (Cf. Fig. 10) (6).

La migration du lithium se fait sur un cristal cylindrique, de la surface extérieure vers l'axe qui correspond à la zone (P) (5). Cette dernière doit présenter un diamètre de 6 à 8 mm. On obtient alors une diode coaxiale vraie (Cf. Fig. 10). Si, sur l'une des faces, on dépose également du lithium, nous obtenons une diode coaxiale fermée appelée fausse coaxiale, ou diode asymétrique (Cf. Fig. 10).

Dans cette structure, la zone compensée est relativement plus importante, mais la zone morte sur la fenêtre d'entrée augmente et peut absorber une partie du rayonnement. Le champ électrique n'étant pas uniforme, la résolution en temps se trouve légèrement dégradée. Les deux types de structures ont des caractéristiques pratiquement identiques.

Les détecteurs de forme coaxiale présentent une efficacité importante, liée au volume du cristal, une bonne résolution en énergie, en temps, un excellent rapport pic-Compton (Cf. Tabl. 2).

#### 4.2.1.3 Détecteur puits

Quand l'échantillon à mesurer présente une faible activité sous un faible volume, on a intérêt à augmenter l'angle solide de détection. Ceci est obtenu en pratiquant au centre du cristal détecteur (vrai ou faux coaxial) un puits dans lequel on place l'échantillon

à analyser (Cf. Fig. 11). Pour une résolution nucléaire comparable à celle d'un détecteur classique, l'efficacité est meilleure puisque l'angle solide de détection est voisin de  $4\pi$ , et le rapport pic sur Compton est amélioré. Les détecteurs puits favorisent la simultanéité des transitions  $\gamma\gamma$  en cascade, ce qui, pour certaines applications, peut apparaître comme un inconvénient (5).

Malgré des applications spécifiques dans l'analyse ou le comptage des échantillons biologiques, géologiques, en médecine nucléaire, en radio protection etc., ces détecteurs peuvent être utilisés comme des détecteurs coaxiaux classiques mais avec une légère perte de résolution nucléaire (Cf. Tab. 3).

#### 4.2.2 Détecteurs au germanium hyper-pur

-----

La compensation du germanium par du lithium était nécessaire pour neutraliser les impuretés présentes dans le cristal. Mais la présence de lithium dans la zone compensée engendrait des inconvénients, puisqu'il pouvait y avoir précipitation des ions lithium et perte de la compensation dès que la diode se trouvait accidentellement mise à la température ambiante, entraînant la détérioration du détecteur. Pour y remédier, on a cherché à purifier au maximum les cristaux de germanium jusqu'à  $10^{10}$  atomes /cm<sup>3</sup> de présence d'impuretés.

Avec des cristaux préalablement sélectionnés, le lithium est cependant employé pour réaliser un contact redresseur N+ par diffusion. Le contact ohmique P est réalisé par dépôt d'une couche d'or ou de palladium. (Nous obtenons alors une diode N.P et non NIP) (Cf. Fig. 15).

L'application d'une tension de polarisation inverse sur un matériau possédant une concentration Nd-Na (ions donneurs - accepteurs) produit une zone désertée d'épaisseur égale à :

$$X = \left( \frac{2 \quad \epsilon v}{e (Nd - Na)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

v = tension de polarisation

$\epsilon$  = 16.2 = constante diélectrique du matériau

e = charge de l'électron

X = épaisseur de la zone désertée

Avec une concentration en impuretés de  $10^{10}$  atomes par  $\text{cm}^3$ , l'épaisseur de la zone désertée est de dix millimètres, pour une tension de 1200 volts, de seize millimètres pour 3000 volts.

La configuration du champ électrique dans des cristaux détecteurs au germanium hyper-pur est différente de celle des germanium-lithium. Ce champ varie en fonction de l'inverse de la distance au centre pour ces derniers alors qu'il est sensiblement linéaire dans le cas des diodes au germanium hyper-pur en structure coaxiale (Cf. Fig. 12) (2). Ce fait n'a pas d'incidence dans les mesures en énergie, mais peut avoir une influence sur la résolution en temps.

Ce type de détecteurs est cyclable en température et n'est pas détérioré par un réchauffement accidentel à condition qu'il ne soit pas sous tension. On les réalise avec des fenêtres minces qui les rendent utilisables en spectrométrie X (1) en concurrence avec les détecteurs au silicium-lithium, du moins au-dessus de 30 keV. Pour les énergies inférieures, les raies d'échappement deviennent importantes et les détecteurs à base de silicium-lithium sont mieux adaptés (6). (Cf. Tab. 4).

Les performances, la souplesse des détecteurs au germanium hyper-pur font que ceux-ci, malgré leur coût plus élevé, remplacent désormais les détecteurs germanium-lithium.

#### 4.2.2.1 Détecteur à structure plane

Ces détecteurs (Cf. Fig. 13) sont surtout utilisés pour la spectrométrie des rayonnements X et  $\gamma$  de faible énergie.

En spectrométrie X, ils sont toujours de faible dimension (de l'ordre de  $200 \text{ mm}^2$ ) associés à un pré-amplificateur refroidi, ou à contre-réaction opto-pulsée; les résolutions obtenues sont de l'ordre de quelques centaines d'électron-volts, avec une efficacité d'absorption totale proche de la valeur de l'angle solide, variant peu entre 30 et 100 keV (Cf. Fig. 14). En-dessous 30 keV, l'importance des raies d'échappement, due à la discontinuité K du germanium, devient gênante et on leur préfère les structures planes en silicium-lithium.

Dans la mesure des rayonnements  $\gamma$ , les surfaces réalisées peuvent atteindre  $20 \text{ cm}^2$ , avec des épaisseurs utiles allant jusqu'à 20 mm. Leur faible capacité, inter-électrodes permet, en les associant à des pré-amplificateurs refroidis, l'obtention d'une excellente résolution.

Le domaine préférentiel de travail de ces détecteurs se situe en-dessous de 200 keV, où ils remplacent avantageusement les détecteurs à base de germanium-lithium.

#### 4.2.2.2 Détecteur à structure coaxiale de type (P)

Le tirage des cristaux de germanium hyper-pur permet la réalisation de détecteurs coaxiaux atteignant des volumes de  $150 \text{ cm}^3$ , en structure vraie ou fausse coaxiale (Cf . Fig. 15), de forme classique ou puits (Cf . Tab. 5).

Les épaisseurs de fenêtre d'entrée obtenues dans la réalisation de ces détecteurs (toujours plus épaisses pour les diodes fausses coaxiales), limitent le seuil de détection en énergie à environ 30 keV. Pour la détection des rayonnements d'énergie inférieure, les structures planes sont mieux adaptées.

Ces détecteurs sont toujours associés à un pré-amplificateur refroidi. Les performances obtenues sont identiques à celles des diodes au germanium lithium.

Leur zone de travail préférentielle se situe pour des rayonnements d'énergie comprise entre 100 keV et 2 MeV.

#### 4.2.2.3 Détecteur à structure coaxiale de type (N)

Le détecteur idéal devrait permettre la mise en évidence des rayonnements X et  $\gamma$  d'énergie élevée avec une bonne efficacité et une bonne résolution.

Pour réaliser ces conditions, la fenêtre d'entrée devrait être de faible épaisseur et le cristal de volume important. Dans un détecteur coaxial type (P), la condition du volume est respectée, mais l'électrode la plus mince est l'électrode située dans son axe.

On a cherché à la placer à l'extérieur (d'où le nom : 'reverse electrode germanium'). (Cf. Fig. 16). Cette solution, théoriquement simple, pose encore de gros problèmes technologiques. Le contact périphérique de type (P) est obtenu par implantation ionique et son épaisseur est de l'ordre de  $0.3 \mu\text{m}$ . Ceci autorise une bonne efficacité avec les rayonnements X comparable à celle obtenue avec des structures planes (Cf. Fig. 17.18).

Ces détecteurs sont utilisables de 5 keV à 10 MeV. Ils existent avec des efficacités relatives de 40 %.

Comparés aux coaxiaux classiques de type (P), ils présentent comme avantages :

- a) - d'être plus résistants aux dommages causés par les neutrons et les particules chargées,

- b) - d'avoir une bonne efficacité avec les rayonnements X.

Sur ce dernier point, deux restrictions sont à faire:

- a) - La résolution en énergie, sensiblement égale de 10 à 100 keV, ne permet pas une analyse fine des raies X (résolution supérieure à 800 eV),
- b) - en présence de photons  $\gamma$  d'énergie élevée, les raies X peuvent être noyées dans le fond Compton

A l'heure actuelle, les détecteurs de type (N) présentent un léger surcoût par rapport aux détecteurs de type (P).

#### 4.3 - Détecteurs à base d'autres matériaux

Le germanium, le silicium en raison des limitations qu'ils imposent dans l'utilisation des détecteurs de spectrométrie X et  $\gamma$  ne constituent pas des matériaux idéaux. Leur numéro atomique est peu élevé, d'où une efficacité faible, et leur largeur de bande interdite (du moins pour le Ge) ne permet pas le travail à température ambiante. (Cf. Tab. 1). Aussi, depuis quelques années, des efforts notables ont été accomplis pour développer d'autres matériaux. Il s'agit essentiellement : du tellurure de cadmium (CdTe), de l'iodure mercurique (HgI<sub>2</sub>), et de l'arséniure de gallium (AsGa) (Cf. Tab. 6). Les difficultés technologiques de cristalllogénèse de ces composés font qu'à l'heure actuelle on ne peut disposer que de volumes faibles (2).

#### 4.3.1 Tellurure de cadmium (CdTe)

-----

Ce matériau est intéressant à la fois par son numéro atomique élevé ( $Z \approx 48-52$ ) et par la largeur de sa bande interdite ( $eV \approx 1.5$ ) qui permet le travail à la température ambiante.

Cependant, la collection incomplète des charges, due au piégeage des porteurs, provoque une dissymétrie importante des pics (Cf. Fig. 19). La réalisation de structures cylindriques permet l'atténuation de ce défaut et l'obtention d'une bonne résolution. Un autre inconvénient est lié aux difficultés d'obtention de volumes supérieurs à  $1\text{ cm}^3$ . De plus, les détecteurs réalisés avec des volumes de cette importance ne sont pratiquement utilisables que pour effectuer du comptage. En spectrométrie, on ne dépasse guère  $0.1\text{ cm}^3$ .

La résolution est alors de 6 keV, sur la raie 122 keV du  $^{57}\text{Co}$ .

#### APPLICATIONS POSSIBLES :

Spectrométrie et comptage des rayonnements photoniques de 30 à 600 keV.

#### 4.3.2 Iodure mercurique ( $\text{HgI}_2$ )

-----

Avec un numéro atomique élevé ( $Z \approx 80-53$ ), l'iodure mercurique permet de réaliser des détecteurs de rayonnements X, de bonne efficacité. A titre d'exemple, à une énergie de 100 keV, 1 millimètre de ce matériau présente la même absorption par effet photo-électrique, que 10 millimètres de germanium (6).



Sa grande largeur de bande interdite ( $\approx 2.14$  eV), ainsi qu'un courant inverse faible, lui permet de travailler à température ambiante avec une excellente résolution en énergie (Cf. Fig. 20).

Cependant, la faible mobilité des trous dégrade très rapidement la résolution, dès que l'énergie augmente :

Ex : pour un détecteur de  $25 \text{ mm}^2$  de surface :

RAIE	RESOLUTION EN ENERGIE
6 keV	1 keV
50 keV	5 keV
122 keV	10 keV
661 keV	50 keV

En refroidissant ces détecteurs à  $-1^\circ \text{C}$ , les résolutions s'améliorent de façon importante (Cf. Fig. 21).

Ces détecteurs sont utilisables en spectrométrie X et  $\gamma$ , jusqu'à quelques centaines de keV. Pour des photons d'énergie supérieure, ils ne peuvent être utilisés que pour faire du comptage.

Des mosaïques sont à l'étude pour la réalisation des détecteurs à grande surface.

APPLICATIONS POSSIBLES :

Spectrométrie X et  $\gamma$  et comptages des rayonnements photoniques.

#### 4.3.3 Arseniure de gallium (AsGa)

---

L'arseniure de gallium, de numéro atomique proche de celui du germanium ( $Z \approx 31-33$ ), possède une bande interdite ( $\approx 1.4$  eV) lui permettant de travailler à température ambiante.

La difficulté d'obtenir des volumes suffisamment grands, puisqu'à l'heure actuelle, on ne sait le produire qu'en couches ( $\approx 100 \mu\text{m}$ ), limite le développement des détecteurs à base de ce matériau.

## 5 - COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE DETECTEUR

Chaque type de détecteur présenté a un domaine d'application différent.

D'une manière générale pour la détection des particules chargées ( $\alpha$  ou  $\beta$ ), les détecteurs silicium sont employés. Pour la détection des rayonnements X, les détecteurs silicium sont également employés, mais ils sont concurrencés par les structures planes au germanium hyper-pur.

Pour la détection des rayonnements  $\gamma$ , les détecteurs au germanium conviennent mieux.

La figure N° 22 donne les différents domaines d'utilisation des différents types de détecteurs, en fonction de l'énergie, pour les rayonnements X et  $\gamma$ .

### 5.1 - Détecteurs à base de silicium

Leurs principales caractéristiques sont récapitulées dans le tableau N° 7.

### 5.2 Détecteurs à base de germanium

Leurs principales caractéristiques sont récapitulées dans le tableau n° 8.

## 6 - REMARQUES SUR L'ENSEMBLE DE DETECTION

### 6.1 - Le système cryogénique

Il est chargé de maintenir à la température de 77° Kelvin, durant les périodes d'utilisation et de stockage, les cristaux détecteurs qui l'exigent.

Ces ensembles (Cf. Fig. 23) se composent essentiellement d'un réservoir rempli d'azote liquide, dans lequel plonge un cryostat (doigt froid, généralement en cuivre) qui maintient par conductibilité thermique le cristal à la température adéquate. Ce dernier est protégé des agressions extérieures par une enceinte maintenue sous vide par cryosorption sur des zéolithes.

Dans les systèmes portatifs, l'azote liquide n'est pas libre, mais absorbé par un matériau poreux qui a la faculté d'emmagasiner une grande quantité de liquide au niveau du doigt froid, ce qui évite les problèmes de transmission thermique et de microphonie dus aux mouvements du liquide. Pour les détecteurs portatifs devant être maintenus à basse température, même durant les périodes de stockage, ces systèmes cryogéniques se connectent à des réservoirs plus importants, assurant ainsi une meilleure marge de sécurité vis-à-vis d'un réchauffement accidentel.

A noter que sur le principe des systèmes cryogéniques portatifs, on réalise des sondes géologiques (Cf. Fig. 23), où l'ensemble de détection a un diamètre ne dépassant pas 65 mm (5).

La contenance des réservoirs peut aller de quelques litres à 35 litres ( $\approx$  20 jours d'autonomie). La position du détecteur par rapport au réservoir peut être haute, basse, droite, coudée

etc. (Cf. Fig. 24). De même, les épaisseurs et la nature des matériaux composant le capot de protection, peuvent varier. Le choix de ces paramètres est fonction des applications envisagées; à titre d'exemple :

- Dans les cas où une excellente résolution est exigée (quelques centaines d'eV), on choisira de préférence des détecteurs à canne plongeante ou à doigt latéral; la microphonie due à l'ébullition de l'azote est alors moins importante (7).

La quantité d'azote liquide restant dans le réservoir doit être surveillée en permanence. Ce contrôle peut s'effectuer :

- soit par pesée permanente,
- soit par des moyens électroniques (thermistances implantées sur le cryostat). Un niveau minimal détecté déclenche une alarme et coupe la tension de polarisation du détecteur.

## 6.2 - Les préamplificateurs

Le rôle du préamplificateur est d'amener les impulsions électriques, apparaissant aux bornes du cristal détecteur, à un niveau suffisant pour être exploité par le restant de la chaîne de spectrométrie. Ce sont des amplificateurs faibles signaux à contre-réaction. Cette dernière a pour effet d'augmenter l'impédance d'entrée qui doit être élevée par rapport à celle du cristal, d'élargir la bande passante pour une transmission fidèle des impulsions, de stabiliser le gain.

La contre-réaction consiste en la réinjection, en opposition de phase, d'une portion du signal de sortie à l'entrée du préamplificateur. Cette opération est effectuée de deux façons principales :

- par une résistance ; c'est le cas des préamplificateurs dits à contre réaction résistive (Cf. Fig. 25). L'agitation thermique, se produisant dans cet élément, engendre un bruit important, nécessitant le refroidissement du préamplificateur.
  
- par système opto-électronique (Cf. Fig. 25). Les préamplificateurs équipés de ce système ont la particularité d'avoir une diode électroluminescente à la place de la résistance de contre-réaction. Ce composant permet d'améliorer la résolution en énergie grâce à son faible bruit électronique, mais ce système peut présenter des inconvénients dans les applications quantitatives.

Le choix de préamplificateur de ce type est impératif en spectrométrie X et  $\gamma$  de basse énergie.

## 7. CONCLUSION

La technique de fabrication des détecteurs de rayonnements nucléaires, à base de germanium et de silicium, a fait des progrès considérables.

L'utilisateur potentiel trouvera chez les constructeurs un large éventail de modèles, de souplesse d'utilisation accrue, aux caractéristiques de plus en plus performantes, autorisant ainsi une meilleure analyse des échantillons.

Les recherches sur les détecteurs à base de matériaux semi-conducteurs à numéro atomique et à largeur de bande interdite élevée se poursuivent. Elles devraient aboutir par la réalisation de détecteurs de faible volume, pouvant fonctionner à la température ambiante.

## DOCUMENTATION

Les spectres et les caractéristiques citées proviennent des notices des constructeurs, ainsi que des laboratoires du groupe de travail de normalisation n° 5 (GTN.5).

### CONSTRUCTEURS :

- CANBERRA ELECTRONIQUE  
8 Rue de pentièvre BP 23  
77170 BRIE COMTE ROBERT  
Tél : (6) 405.43.12
  
- EG-G instruments  
4, place de la Balance  
94150 RUNGIS  
Tél : (1) 687.25.71
  
- ENERTEC SCHLUMBERGER  
Département Instrumentation nucléaire  
rue de la Roseaie  
Parc des tanneries  
67380 LINGOLSHEIM - FRANCE  
Tél : (88) 78.57.10
  
- PRINCETON GAMMA-TECH  
Distribué par la société INEL  
1261 rue Louis Blériot  
78530 BUC  
Tél : (3) 956.31.90



INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

1) B.BORNANT -A. FRIANT

Etude bibliographique sur les détecteurs de rayonnements au germanium de haute pureté utilisés en spectrométrie gamma et X.

Bibliographie CEA - BIB - 230, Mars 1979

2) JP. MORUCCI - A. LANSIART - JL. MORETTI - B. DANET - R. GUIRAUD - A. LEBLANC.

La détection et la visualisation des rayonnements en médecine nucléaire.

Les presses universitaires de Montréal: MASSON, 1982

3) R. HENCK

Les détecteurs de rayonnements nucléaires à semi-conducteurs.

Société Enertec - Division instruments et systèmes, Département équipements, 1980

4) IEEE Standard test procedure for gamma - ray detectors

5) Détection - 1974 -

Catalogue de la société Schlumberger.

6) A. FRIANT - A. LANSIART

Détecteurs nucléaires

Techniques de l'ingénieur, E 4810.1, 1980

7) A. FRIANT - H. GUILLOIN - M. HODET - N. RADULT

Spectrométrie nucléaire avec semicteurs

Bull. Instrum. Nuci. (Suppl. au BIST), 1972, n°4

8) A. FRIANT

Communication au groupe de travail de normalisation n° 5 (GTN,5),

Avril 1982

*Manuscrit reçu le 4 juin 1986*

## LISTE DES TABLEAUX

- 1 - Principales caractéristiques des matériaux semi-conducteurs
- 2 - Exemple de caractéristiques de détecteurs germanium-lithium à structure coaxiale
- 3 - Exemple de caractéristiques de détecteurs germanium-lithium puits
- 4 - Exemple de caractéristiques de détecteurs en germanium hyper-pur à structure coaxiale
- 5 - Exemple de caractéristiques de détecteurs germanium hyper pur, puits
- 6 - Caractéristiques des détecteurs CdTe, HgI<sub>2</sub> et AsGa
- 7 - Détecteurs à base de silicium
- 8 - Détecteurs à base de germanium

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS

MATERIAU	Z	Largeur de bande interdite (eV)	Energie de création d'une paire (eV)	Meilleure résolution obtenue sur une raie (FWHM)
Si (300 K)	14	1.12	3.61	-
Ge (77 K)	32	0.74	2.98	420eV à 100keV 920eV à 660keV 1300eV à 1330keV
CdTe (300K)	48 52	1.47	4.43	3800eV à 122keV 7500eV à 661keV
HgI <sub>2</sub> (300K)	80 53	2.13	4.2	850eV à 6keV 3500eV à 122keV
GaAs (300K)	31 33	1.43	4.2	650eV à 60keV 2600eV à 122keV

TABLEAU N° 1  
=====

## EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DE DETECTEURS GERMANIUM-LITHIUM

## STRUCTURE COAXIALE

TYPE	Efficacité	VRAI COAXIAL		FAUX COAXIAL	
		Résolution (keV)	pic Compton	Résolution (keV)	pic Compton
EGL 17	10 %	2,2	32	1,9	37
EGL 15	15 %	2,3	33	2,0	39
EGL 20	20 %	2,4	36	2,0	43
EGL 25	25 %	2,4	38	2,1	45
EGL 30	30 %	2,5	40	2,1	48

TABLEAU N° 2

=====

## EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DE DETECTEURS GERMANIUM LITHIUM PUIITS

TYPE	PUITS Ø (mm)	VOLUME UTILE (cm <sup>3</sup> ) *	EFFICACITE ABSOLUE		SPECIFICATIONS A 1,33MeV	
			1,33MeV (%)	662 keV (%)	RESOLUTION (keV)	PIC/ COMPTON
EGL 13 P.11	11	68	3	7,5	2,4	43
EGL 13 P.15	15	62	2	5,5	2,6	26
EGL 18 P.11	11	96	5	11	2,5	50
EGL 18 P.15	15	84	3,5	7	2,7	40
EGL 24 P.11	11	120	6	12	2,6	55
EGL 24 P.15	15	108	4	8	2,8	45

\* Valeurs approximatives

TABLEAU N° 3

=====

## EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DE DETECTEURS EN GERMANIUM

## HYPER PUR A STRUCTURE COAXIALE

TYPE	SPECIFICATION DES DETECTEURS			
	EFFICACITE %	RESOLUTION à 1,33 MeV (keV)	PIC/COMPTON	RESOLUTION à 122 keV (keV)
EGPC 06 A	6	1,9	27	0,8
EGPC 06 B	6	2,2	23	1,1
EGPC 08 A	8	1,9	32	0,8
EGPC 08 B	8	2,2	28	1,1
EGPC 10 A	10	1,9	35	0,9
EGPC 10 B	10	2,2	29	1,1
EGPC 12 A	12	2,0	37	1,0
EGPC 12 B	12	2,3	32	1,2
EGPC 15 A	15	2,0	38	1,0
EGPC 15 B	15	2,3	34	1,2
EGPC 18 A	18	2,1	39	1,1
EGPC 18 B	18	2,4	34	1,4
EGPC 20 A	20	2,2	39	1,1
EGPC 20 B	20	2,5	34	1,3

TABLEAU N° 4

=====

## EXEMPLE DE CARACTERISTIQUES DE DETECTEURS GERMANIUM HYPER PUR PUIITS

TYPE	PUITS Ø (mm)	VOLUME UTILE (cm3) *	EFFICACITE ABSOLUE		SPECIFICATIONS A 1,33MeV	
			1,33MeV (%)	662 keV (%)	RESOLUTION (keV)	PIC/ COMPTON
EGPC 15 P.11	11	65	3	7,5	2,4	43
EGPC 15 P.15	15	59	2	5,5	2,6	26
EGPC 20 P 11	11	94	5	11	2,5	50
EGPC 20 P.15	15	82	3,5	7	2,7	40

\* Valeurs approximatives

TABLEAU N° 5

=====



CARACTERISTIQUES DES DETECTEURS CdTe , HgI<sub>2</sub> et AsGa (8)

MATERIAU	CdTe	HgI <sub>2</sub>	AsGa
Z	48-52	80-53	31-33
Largeur de bande interdite (électron-volts)	1.47	2.13	1.43
Courant de fuite à 20° (ampère)	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-11</sup> - 10 <sup>-12</sup>	-
Energie moyenne de création de paires (electron-volts)	4.4	4.2	4.2
Mobilité des porteurs $\mu_e$ (cm <sup>2</sup> v <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1000 80	100 5	8600 400
Surfaces et épaisseurs utiles			
comptage	s e	0.5 cm <sup>2</sup> 0.5 cm	2 - 5 cm <sup>2</sup> 1.5 cm
spectrométrie	s e	3 cm <sup>2</sup> 0.1 cm	1 cm <sup>2</sup> 0.1 cm
RESOLUTION (meilleures performances publiées kilo électron volts)			
Al k $\alpha$ 1.5 keV	-	0.3	-
Mn k $\alpha$ 5.9 "	1.1	0.325	-
241 Am 59.6 "	1.7	1.2	1
57 Co 12.2 "	3.5	2	3
137 Cs 660 "	7.1	4.5	-

TABLEAU N° 6

=====

DETECTEURS A BASE DE SILICIUM

TYPE	BARRIERE DE SURFACE	JONCTION DIFFUSEE	JONCTION IMPLANTEE	JONCTION PASSIVEE IMPLANTEE	DIODES Hip Si (11)
EPAISSEUR ZONE UTILE	$\mu\text{m} < e < 5 \text{ mm}$	maximum 700 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m} < e < 100 \mu\text{m}$	60 $< e < 500 \mu\text{m}$	maximum 10 mm
EPAISSEUR FENETRE	200 $\text{Å} < e < 1000 \text{ Å}$	0,2 $\mu\text{m} < e < 1 \mu\text{m}$	2000 $\text{Å}$	2000 $\text{Å}$	$\approx 0,1 \mu\text{m}$
SURFACE	$\text{mm}^2 < s < 1800 \text{ mm}^2$	10 $\text{mm}^2 < s < \text{quelques cm}^2$	450 $\text{mm}^2$	20 $< s < 1700 \text{ mm}^2$ $\alpha$ B 25 $< s < 100 \text{ mm}^2$ X Y	10 $< s < 800 \text{ mm}^2$ X Y 10 $< s < 600 \text{ mm}^2$ $\alpha$
RESOLUTION	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$ $\beta$ X Y	$\alpha$ $\alpha$ X Y
Rayonnement :					
Surface $\text{mm}^2$ :	100	750	12	100	100
Energie :	5,4 MeV	5,4 MeV	5,4 MeV	5,4 MeV ** 14,4* 122*	5,4 MeV 5,9* 122*
Valeur keV :	20	50	27	22 17	14 B 4 4,1
ZONE D'ENERGIE X Y				10 $\text{Å}$ 200 keV	200 eV $\text{Å}$ 50 keV
AVANTAGES :	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fabrication sans cycle thermique</li> <li>- bonne résolution</li> <li>- fenêtre d'entrée mince,</li> <li>- travail à T° ambiante,</li> <li>- existent en nettoyables</li> <li>- excellent temps de montée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- robustesse</li> <li>- faible coût</li> <li>- travail à température ambiante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- robuste</li> <li>- fenêtre mince</li> <li>- courant inverse faible</li> <li>- travail à T° ambiante</li> <li>- recuit possible, pour minimiser les dégats causés par irradiation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- robuste</li> <li>- courant inverse faible</li> <li>- excellente résolution</li> <li>- stabilité dans le temps au vide et au recuit</li> <li>- bonne résolution en temps</li> <li>- existent en nettoyables</li> <li>- existent en mosaïques</li> <li>- large éventail d'applications</li> <li>- travail à température ambiante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- selon application refroidissement nécessaire</li> </ul>
INCONVENIENTS :	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fragilité mécanique</li> <li>- évolution des caractéristiques sous rayonnements dans le temps et sous vide</li> <li>- sensible à l'humidité et à la température</li> <li>- courant inverse élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cycle thermique à la fabrication</li> <li>- fenêtre épaisse</li> <li>- linéarité moins élevée que les barrières de surface</li> <li>- courant inverse élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cycle thermique à la fabrication</li> <li>- onéreux</li> <li>- sensibilité à la lumière</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zone utile ne dépassant pas 500 <math>\mu\text{m}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- excellente efficacité et résolution en dessous 30 keV</li> </ul>

\* keV  
 \*\* générateur test  
 \*\*\* refroidi à - 20° C.

TABLEAU N° 7  
 \*\*\*\*\*

DETECTEURS A BASE DE GERMANIUM

TYPE	PLANAIRE Ge Li			PLANAIRE Ge Hp			COAXIAL (P) Ge Li			COAXIAL (P) Ge Hp			COAXIAL (H) Ge Hp																	
	SURFACE $\text{mm}^2$ EPAISSEUR mm	20 < s < 1000 3 < e < 5			20 < s < 10000 5 < e < 15			/			/			/																
EFFICACITE RELATIVE Epaisseur fenêtre - détecteur - cryostat	/			/			5 < n < 40 %			5 < n < 40 %			5 < n < 40 %																	
RESOLUTION surface $\text{mm}^2$ efficacité relative Energies :	1 $\mu\text{m}$ Be: 10 < e < 250 $\mu\text{m}$			0,4 $\mu\text{m}$ Be: 10 < e < 250 $\mu\text{m}$			0,1 < e < 1 mm Be: 250 $\mu\text{m}$ < e < 0,2 mm			0,1 < e < 1 mm Be: 250 $\mu\text{m}$ < e < 0,2 mm			$\approx$ 0,3 $\mu\text{m}$ Be: 0,5 mm																	
5,9 keV 122 keV 1332 keV	250eV 600eV	300eV 650eV	600eV 900eV	150eV 480eV	180eV 500eV	400eV 750eV	0,9keV 1,8keV	1 keV 1,9keV	1,1keV 2 keV	1 keV 1,9 keV	1,1keV 2 keV	1,2keV 2,2keV	- 2 keV	800 eV 2 keV	850eV 2 keV															
Rapport pic-Compton	-			-			37	44	52	37	46	54	36	44	46															
ZONE D'ENERGIE - possible - préférentielle	2keV 30keV			1MeV 200keV			2keV 30keV			1MeV 200keV			40keV 100keV			10keV 2MeV			20keV 50keV			10MeV 2MeV			5keV 15keV			10MeV 2MeV		
PREAMPLIFICATEUR	Refroidi			Refroidi ou opto-pulsé			Refroidi			Refroidi			Refroidi ou opto-pulsé																	
REMARQUES GENERALES	- efficacité constante entre 30 et 100 keV - présence de pics d'échappements pour des énergies < 30 keV - non réchauffable			- efficacité constante entre 30 et 100 keV - présence de pics d'échappements pour des énergies < 30 keV - réchauffable			- efficacité directement liée au volume - pour certaines applications, les détecteurs puits autorisent une géométrie de 4 $\pi$ - non réchauffable			- efficacité directement liée au volume - pour certaines applications, les détecteurs puits autorisent une géométrie de 4 $\pi$ - réchauffable			- efficacité directement liée au volume - très résistants aux dommages causés par les neutrons ou les particules chargées - réchauffable																	
APPLICATIONS	Spectrométrie X et Y Laboratoire, physique nucléaire, médecine			Spectrométrie Y industrielles, laboratoire, analyse, environnement médecine			Spectrométrie Y industrielles, laboratoire, analyse, environnement médecine			Spectrométrie Y industrielles, laboratoire, analyse, environnement médecine			Spectrométrie Y industrielles, laboratoire, analyse, environnement médecine			Spectrométrie Y industrielles, laboratoire, analyse, environnement médecine														

TABLEAU N° 8

## LISTE DES FIGURES

- 1 - Absorption d'un rayonnement ionisant dans le germanium et le silicium
- 2 - Principe d'un détecteur à semi-conducteur
- 3 - Détecteur silicium à barrière de surface
- 4 - Détecteur silicium à jonction diffusée
- 5 - Détecteur silicium à jonction implantée
- 6 - Détecteur silicium à jonction passivée - implantée
- 7 - Spectre de l'américium 241 obtenu à température ambiante avec un détecteur à jonction passivée implantée
- 8 - Détecteur silicium-lithium
- 9 - Détecteur germanium-lithium de structure plane
- 10 - Détecteurs germanium - lithium de structure coaxiale
- 11 - Détecteur germanium - lithium puits
- 12 - Variation du champ en fonction de la distance dans un détecteur germanium type (P), coaxial deux cas :
  - germanium-lithium
  - germanium hyper-pur
- 13 - Détecteur germanium hyper-pur structure plane
- 14 - Exemple de courbes d'efficacité d'absorption totale de détecteurs au germanium hyper-pur

15 - Détecteurs germanium hyper-pur de type (P) structure coaxiale

16 - Détecteur germanium hyper-pur de type (N) structure coaxiale

17 - Spectre d'un mélange d'émetteurs  $\gamma$  vu par :

- détecteur coaxial classique Ge - Hp
- détecteur structure plane
- détecteur coaxial Ge - Hp type (N)
- détecteur plan grande surface au Ge - Hp

18 - Spectres observés avec différents types de détecteurs

19 - Spectre de  $^{57}\text{Co}$  obtenu à température ambiante avec un détecteur au CdTe

20 - Spectre de  $^{57}\text{Co}$  obtenu à température ambiante avec un détecteur HgI<sub>2</sub>

21 - Spectre de  $^{55}\text{Fe}$  obtenu à la température de - 1° centigrade avec un détecteur HgI<sub>2</sub>

22 - Domaine d'utilisation des différents types de détecteurs en fonction des énergies

23 - Le système cryogénique

24 - Principales positions du détecteur par rapport au réservoir d'azote liquide

25 - Principe de la contre-réaction dans les préamplificateurs de spectrométrie

# ABSORPTION D'UN RAYONNEMENT IONISANT DANS LE GERMANIUM ET LE SILICIUM

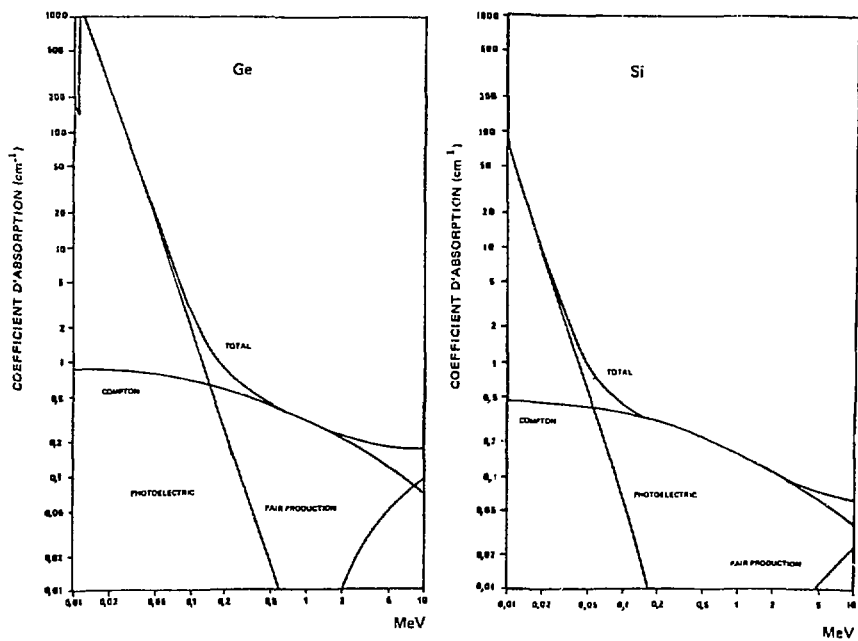


FIGURE N° 1

# PRINCIPE D'UN DETECTEUR A SEMI-CONDUCTEUR

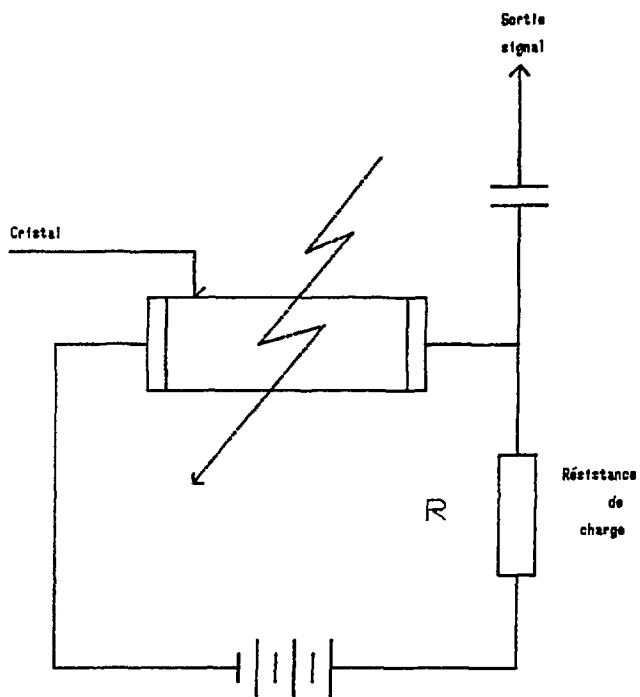


FIGURE N° 2

# DETECTEUR SILICIUM A BARRIERE DE SURFACE

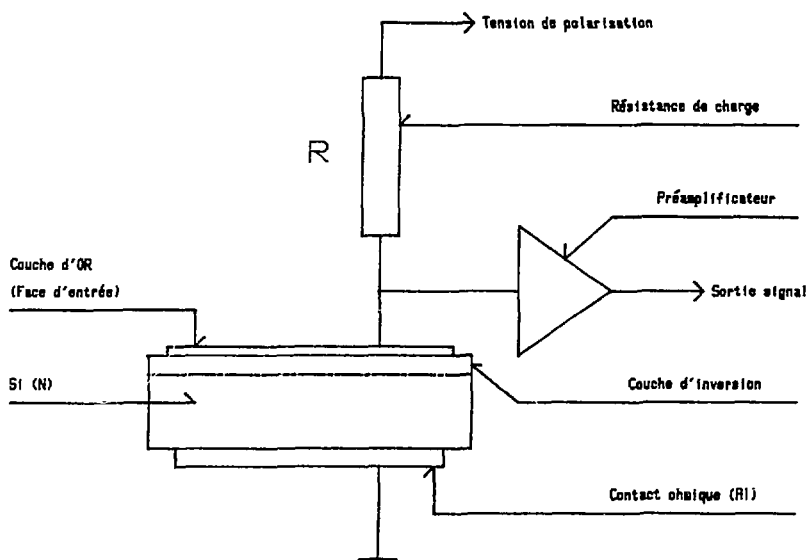


FIGURE N° 3



# DETECTEUR SILICIUM A JONCTION DIFFUSEE

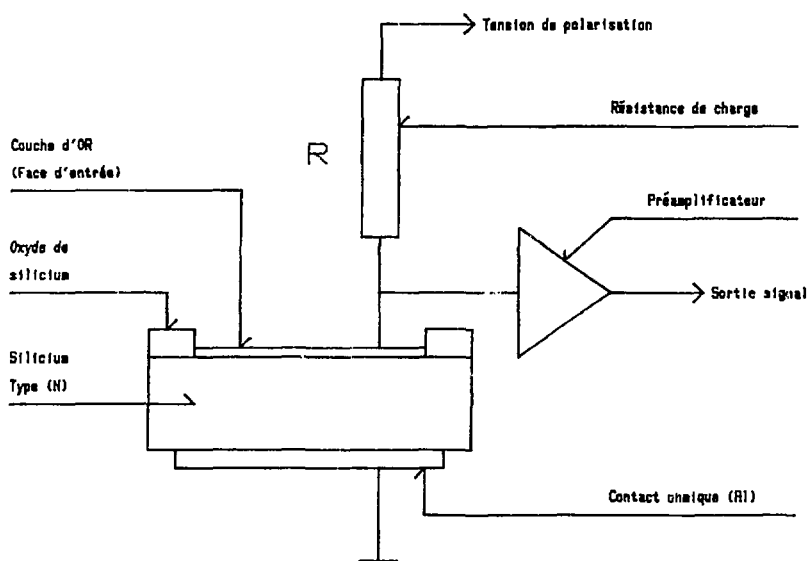


FIGURE N° 4

# DETECTEUR SILICIUM A JONCTION IMPLANTEE

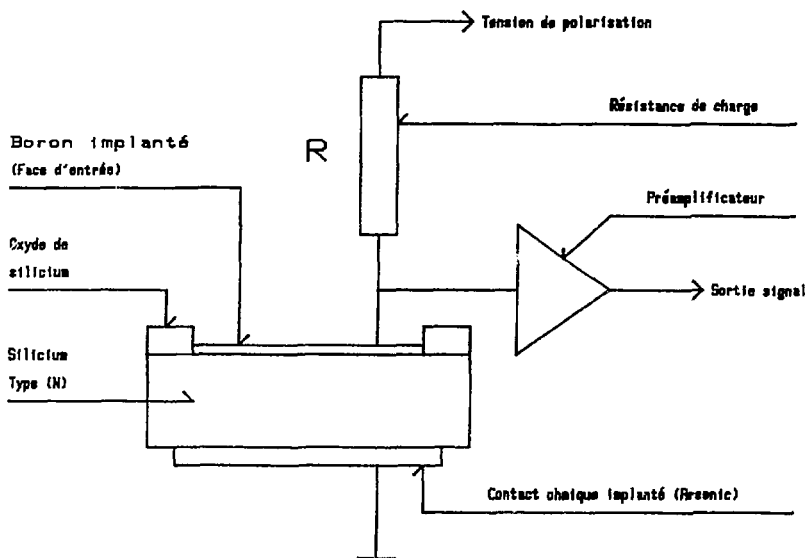
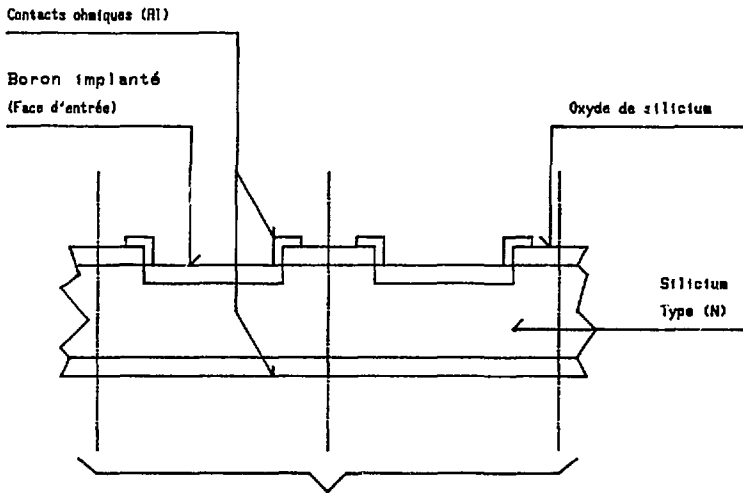


FIGURE N° 5

**DETECTEUR AU SILICIUM A JONCTION PASSIVEE , IMPLANTEE**



**AXES de DECOUPAGE**  
**pour la réalisation de deux DETECTEURS**

**FIGURE N° 6**

SPECTRE DE L'AMERICIUM 241 OBTENU  
A TEMPERATURE AMBIANTE AVEC UN DETECTEUR  
A JONCTION PASSIVEE IMPLANTEE

Surface = 25 mm<sup>2</sup>  
Epaisseur de la fenetre = 300 micromètres  
Résolution à 60 KeV = 2.2 KeV

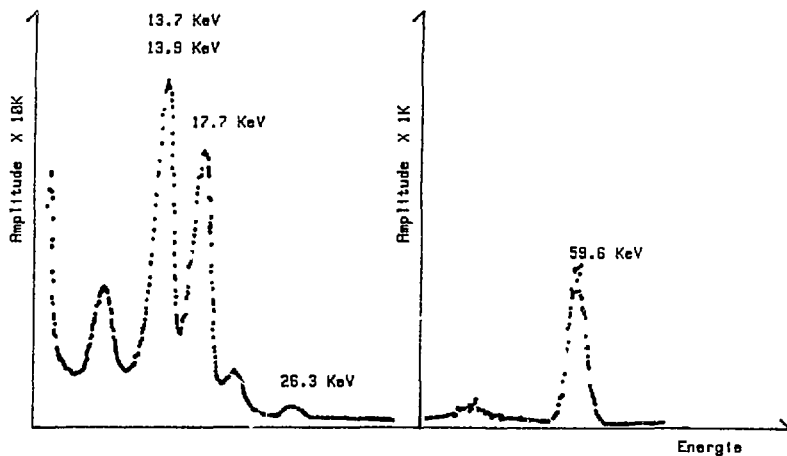


FIGURE N° 7

# DETECTEUR AU SILICIUM LITHIUM

Electrode en OR , contact (P)  
(Face d'entrée)

Zone compensée (Intrinsèque)

Lithium , contact (N)

Sillon permettant la diminution  
du courant de fuite périphérique

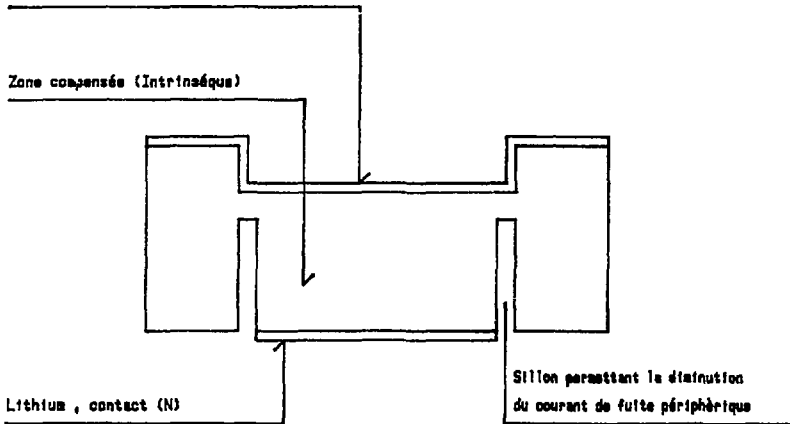


FIGURE N° 8

# DETECTEUR GERMANIUM LITHIUM DE STRUCTURE PLANE

Electrode en OR , contact (P)  
(Face d'entrée)

Zona compensée (Intrinsèque)

Lithium , contact (N)

Sillon permettant la diminution  
du courant de fuite périphérique

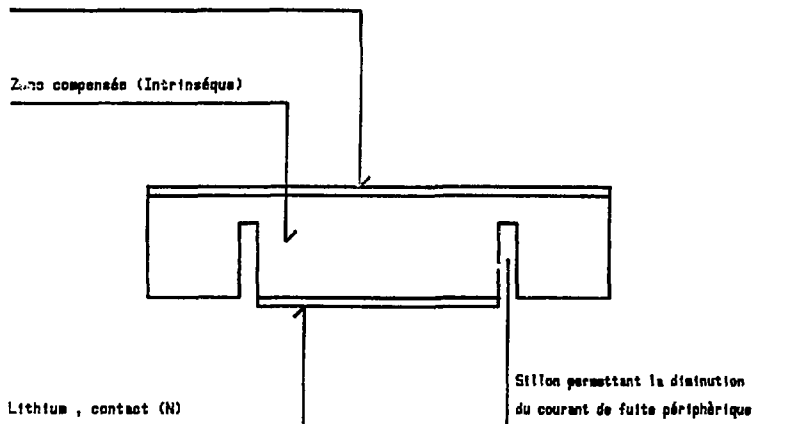
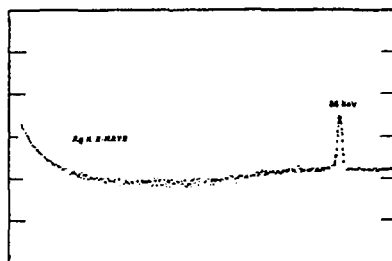


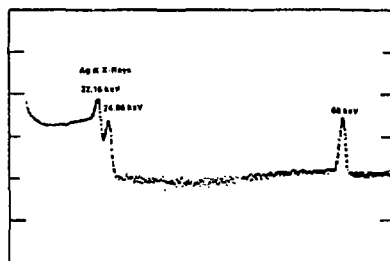
FIGURE N° 9

# SPECTRES OBSERVES AVEC DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS

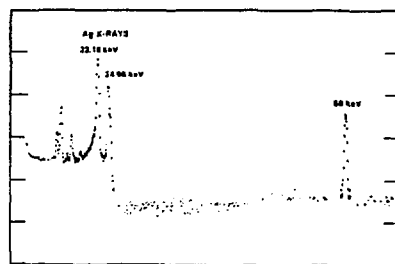
Emetteur Gamma = CADMIUM 109



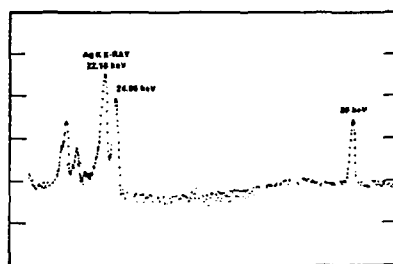
Détecteur coaxial Ge(Hp) type (P)  
de 10% d'efficacité relative



Détecteur coaxial Ge(Li)  
de 10% d'efficacité relative



Détecteur plan Ge(Hp)  
( 5 cm<sup>2</sup> X 18 mm )



Détecteur coaxial Ge(Hp) type (N)  
de 10% d'efficacité relative

FIGURE N° 18

# DETECTEUR GERMANIUM LITHIUM PUIITS

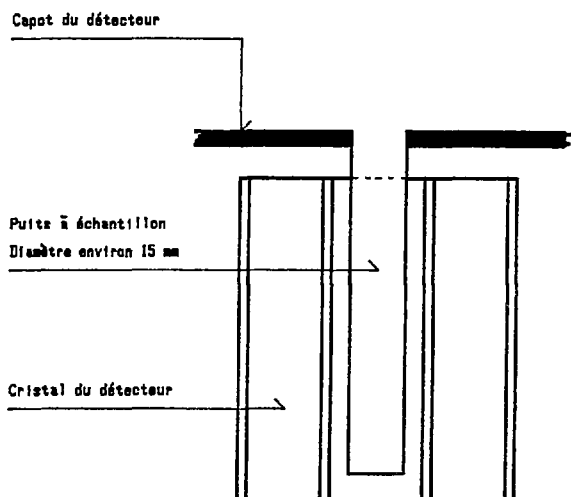


FIGURE N° 11



VARIATION DU CHAMP ELECTRIQUE EN FONCTION DE LA DISTANCE  
DANS UN DETECTEUR AU GERMANIUM TYPE (P) COAXIAL , DEUX CAS :

- GERMANIUM-LITHIUM
- GERMANIUM HYPER-PUR

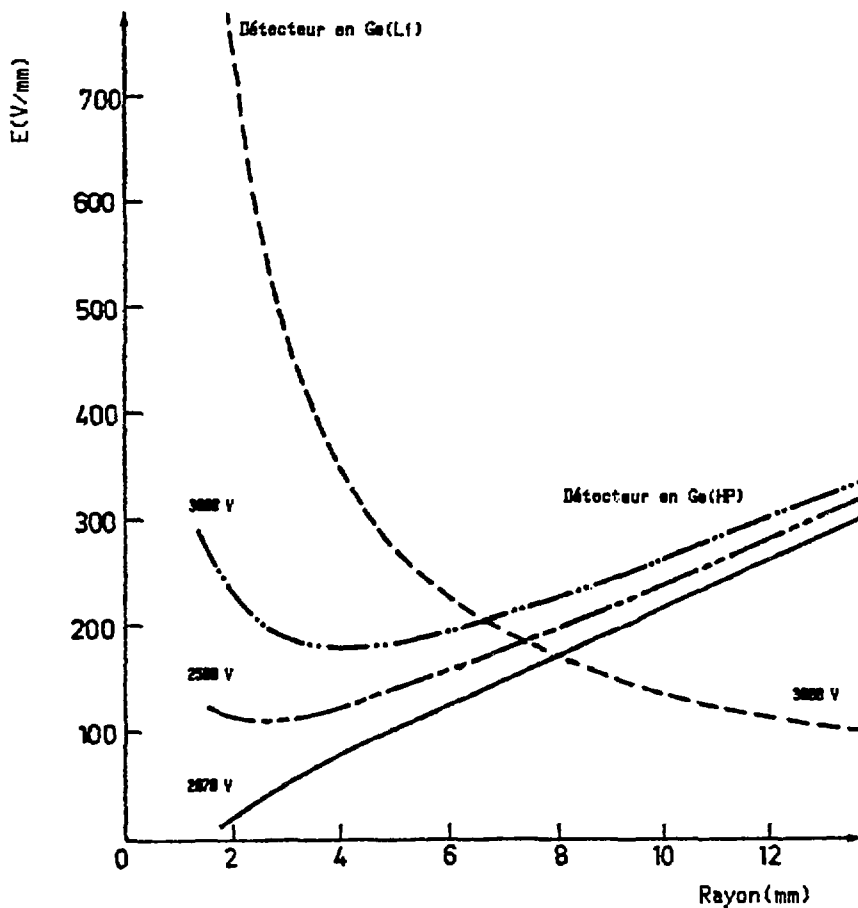


FIGURE N° 12

DETECTEUR GERMANIUM HYPER PUR STRUCTURE PLANE

Electrode OR ou ARGENT , contact (P)  
(Face d'entrée)

Germanium hyper-pur

Lithium , contact (N)

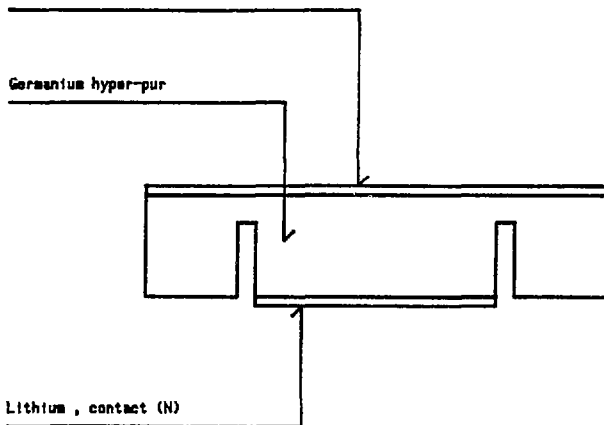
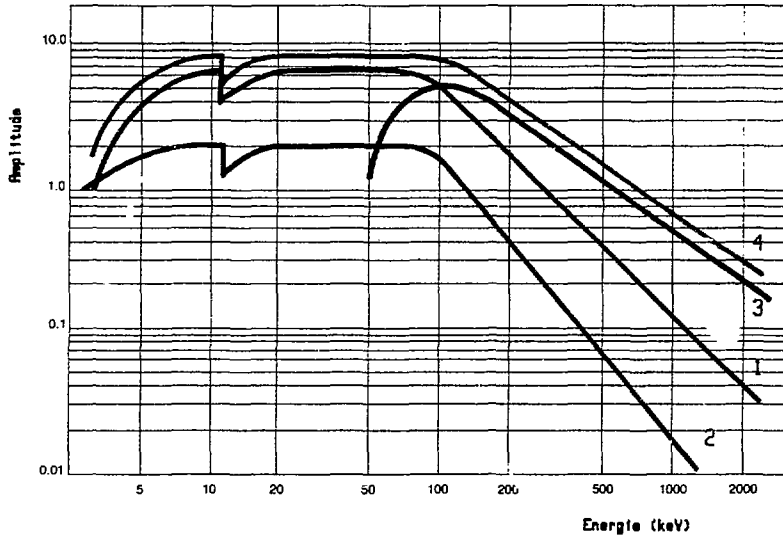


FIGURE N° 13

EXEMPLE DE COURBES D'EFFICACITE D'ABSORPTION TOTALE  
DE DETECTEURS AU GERMANIUM HYPER PUR



- 1- Détecteur plan grande surface (10 cm<sup>2</sup> X 10 mm)
- 2- Détecteur plan (200 mm<sup>2</sup> X 10 mm)
- 3- Détecteur coaxial type (P) de 10% d'efficacité relative
- 4- Détecteur coaxial type (N) de 15% d'efficacité relative

FIGURE N° 14

DETECTEURS AU GERMANIUM HYPER-PUR DE TYPE (P)  
STRUCTURE COAXIALE

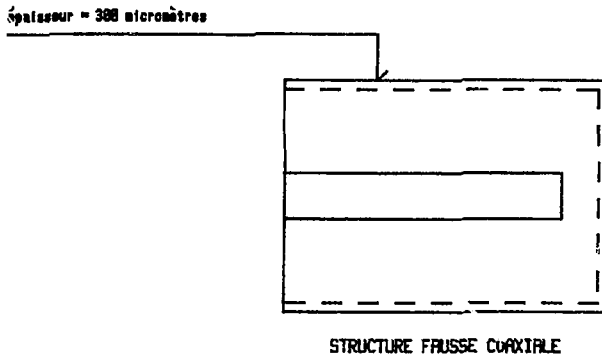
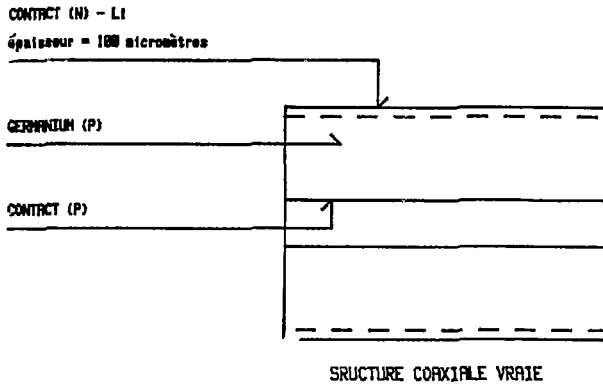


FIGURE N° 15

DETECTEUR EN GERMANIUM HYPER-PUR DE TYPE (N)  
STRUCTURE COAXIALE

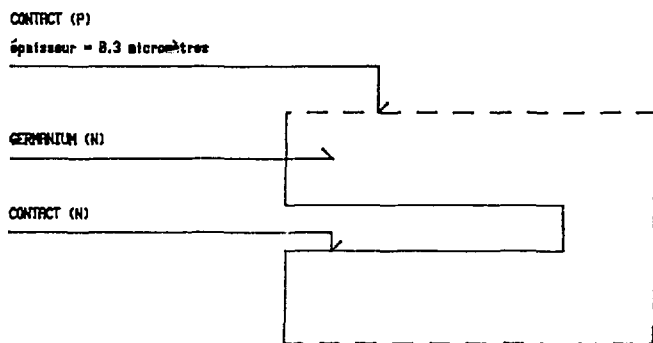


FIGURE N° 16

SPECTRE D'UN MELANGE D'EMETTEURS GAMMA VU PAR :

- 1- Détecteur coaxial au germanium hyper-pur type (P) . 18% efficacité relative
- 2- Détecteur structure plane au germanium hyper-pur . (288cm<sup>2</sup> X 18cm)
- 3- Détecteur coaxial au germanium hyper-pur type (N) . 11% efficacité relative
- 4- Détecteur plan grande surface au germanium hyper-pur . (18cm<sup>2</sup> X 15mm)

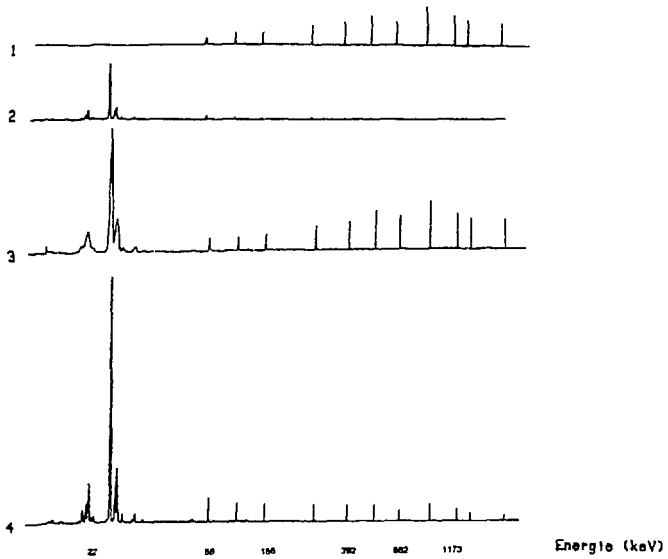
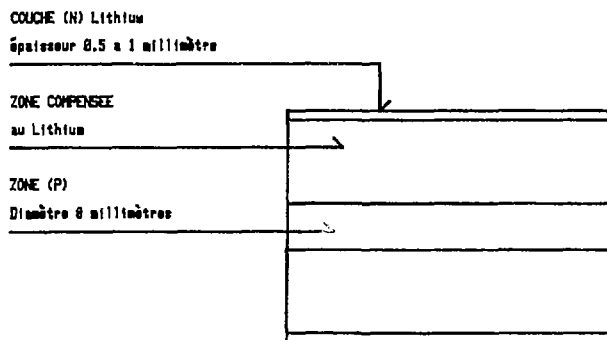
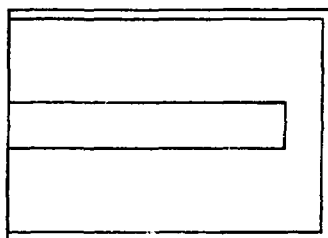


FIGURE N° 17

# DETECTEURS GERMANIUM-LITHIUM DE STRUCTURE COAXIALE



STRUCTURE COAXIALE VARIE



STRUCTURE FRUSSE COAXIALE

FIGURE N° 10

SPECTRE DE  $^{57}\text{Co}$  OBTENU A TEMPERATURE AMBIANTE  
AVEC UN DETECTEUR EN TELLURURE DE CADMIUM

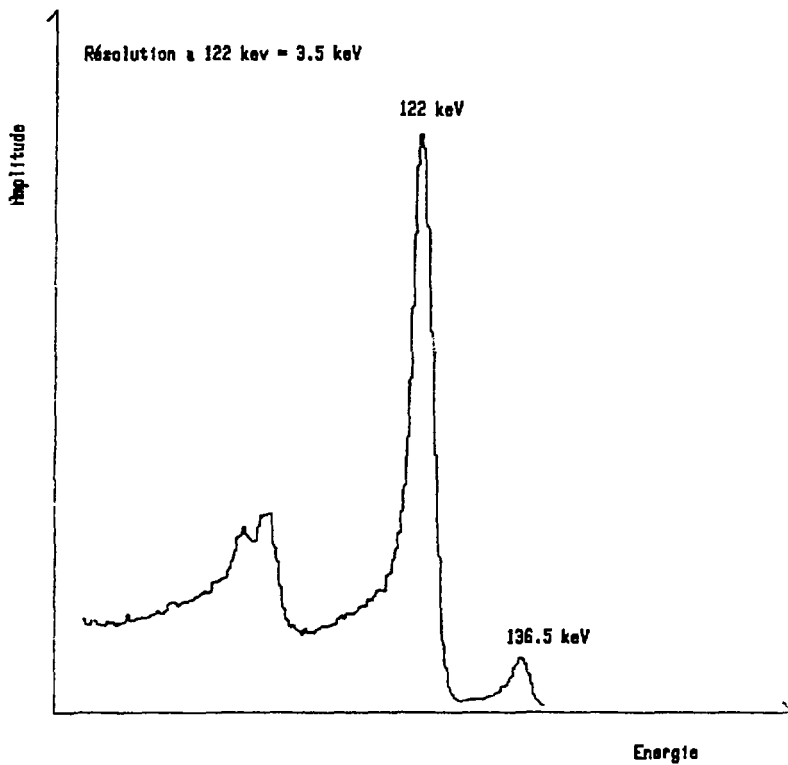


FIGURE N° 19



SPECTRE DE  $^{57}\text{Co}$  OBTENU A TEMPERATURE AMBIANTE  
AVEC UN DETECTEUR EN IODURE MERCURIQUE

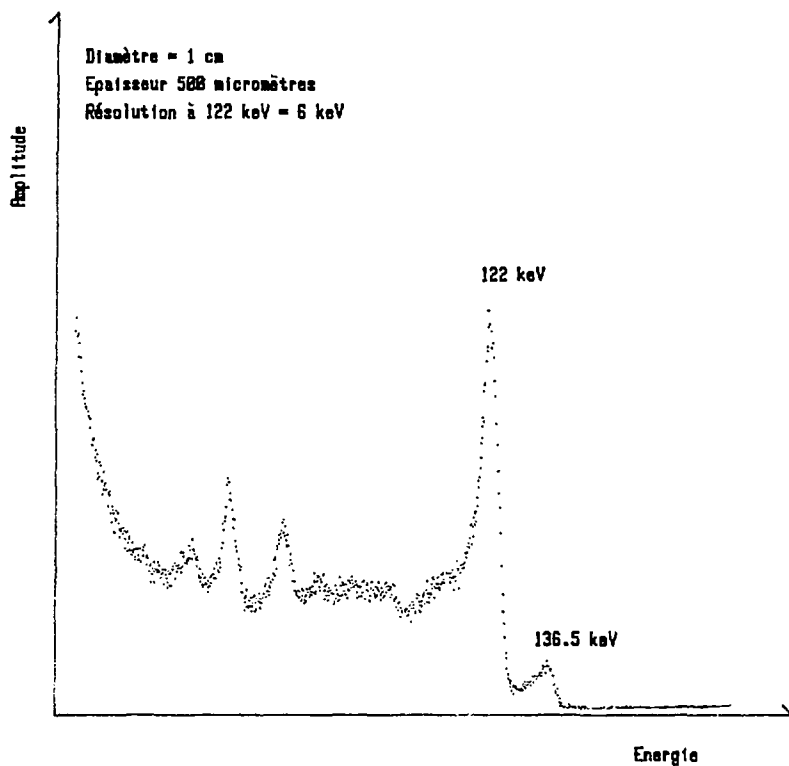


FIGURE N° 20

SPECTRE DE  $^{55}\text{Fe}$  OBTENU A LA TEMPERATURE DE  $-1^{\circ}\text{C}$   
AVEC UN DETECTEUR EN IODURE MERCURIQUE

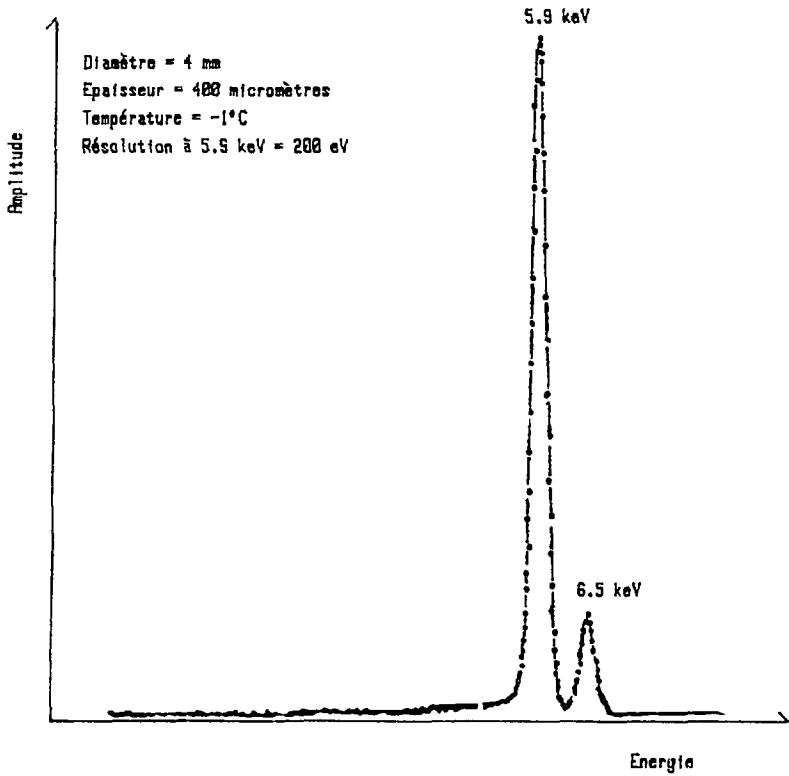


FIGURE N° 21

DOMAINE D'UTILISATION DES DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS EN FONCTION DES ENERGIES GAMMA

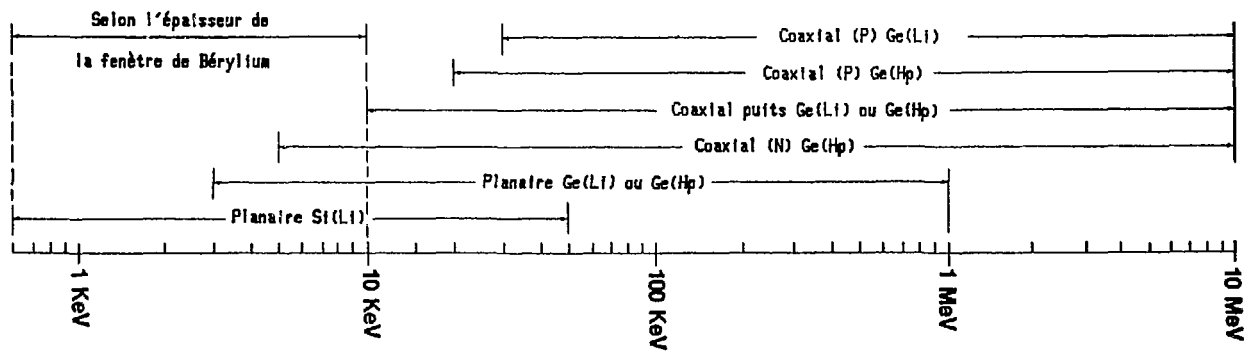
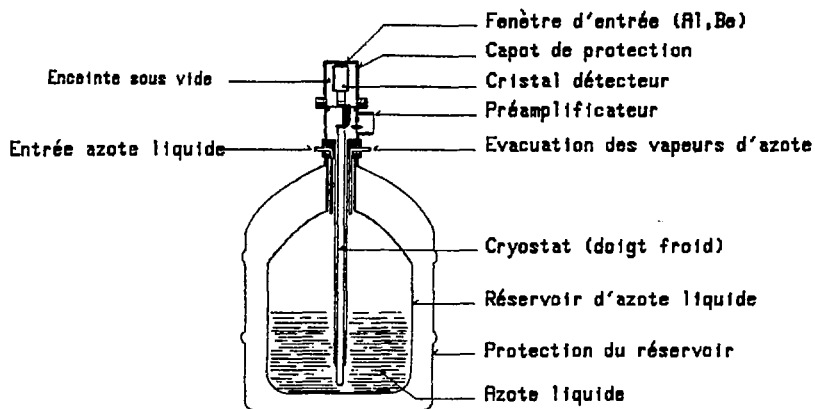
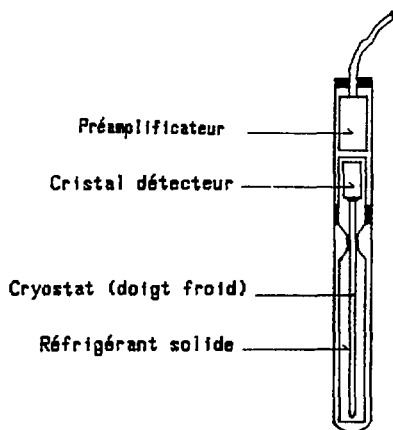


FIGURE N° 22

## LE SYSTEME CRYOGENIQUE

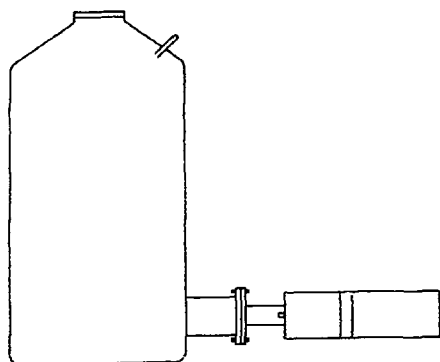


A)-Ensemble détecteur et système cryogénique

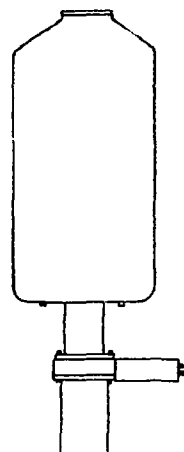


B)-Sonde géologique

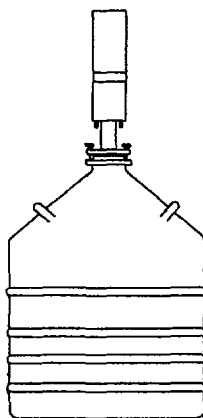
PRINCIPALES POSITIONS DU DETECTEUR PAR RAPPORT AU RESERVOIR  
D'AZOTE LIQUIDE



Ensemble détecteur  
à doigt latéral

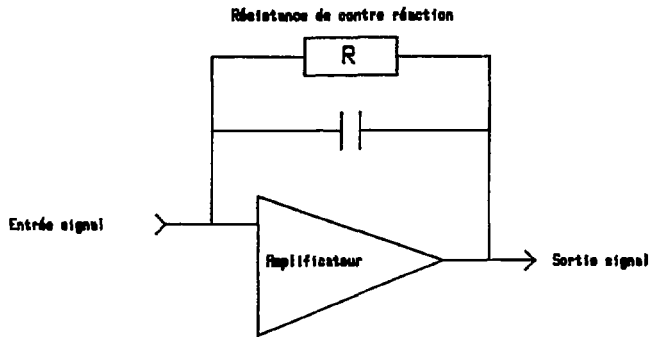


Ensemble détecteur  
à sortie basse

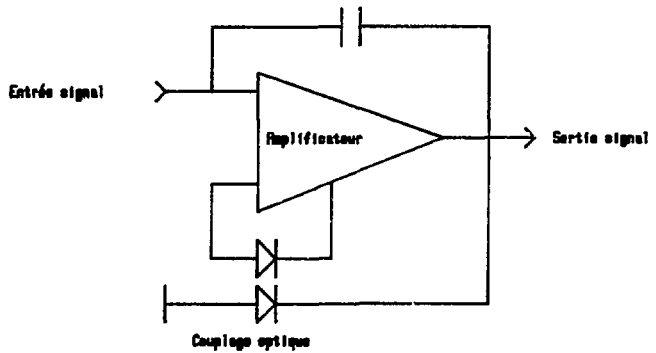


Ensemble détecteur  
à canne plongeante

PRINCIPE DE LA CONTRE-REACTION DANS LES  
PREAMPLIFICATEURS DE SPECTROMETRIE



A) -Préamplificateur à contre-réaction résistive



B) -Préamplificateur à contre-réaction opto-pulsée

## **LISTE DES ANNEXES**

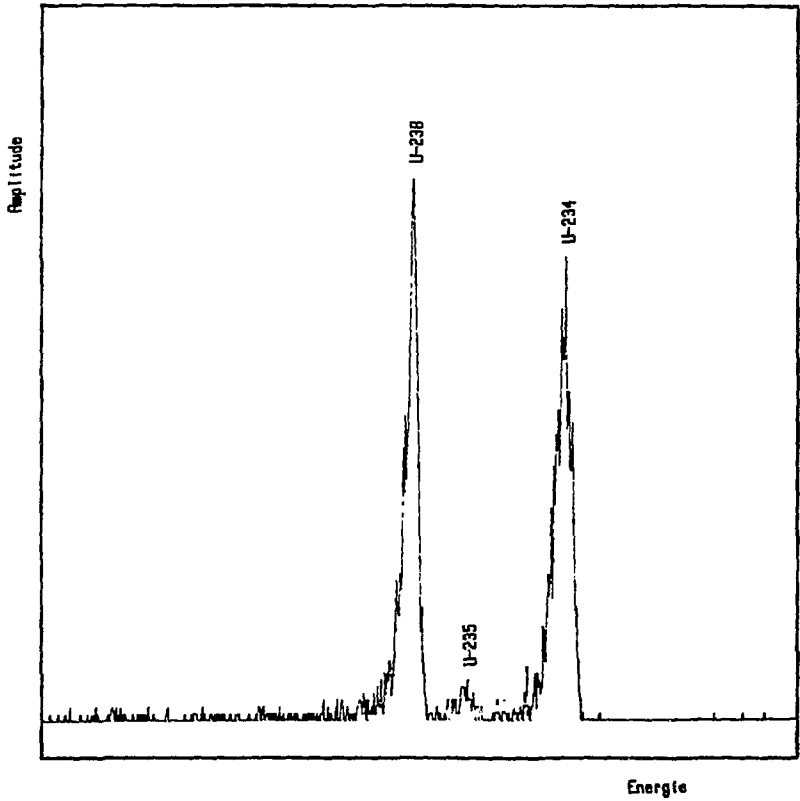
**1 - SPECTRES EXEMPLES**

**2 - GLOSSAIRE**

**3 - TABLES ET RECUEIL DE SPECTRES**

ANNEXE 1

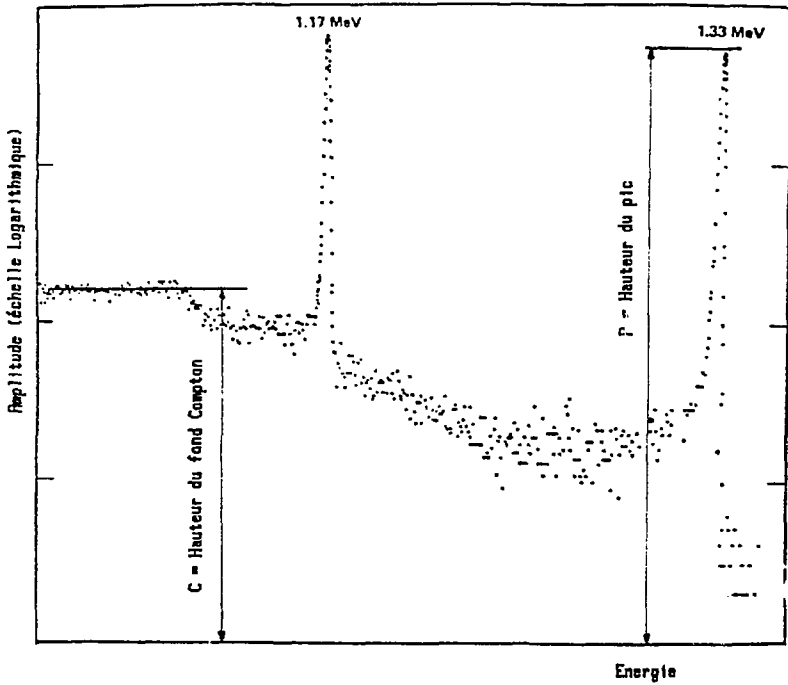
SPECTRE DES RAIES ALPHA DES PRINCIPAUX ISOTOPES DE L'URANIUM





ANNEXE I

SPECTRE DE COBALT 60 , VU PAR UN DETECTEUR Ge(LI) , MONTRANT  
LE PRINCIPE DE CALCUL DU RAPPORT PIC/COMPTON



## ANNEXE 2

### GLOSSAIRE :

- SEMICTEUR : C'est un détecteur à semi-conducteur. Ce mot est formé de la combinaison et de la contraction des termes semi-conducteur et détecteur.

Ce terme a été admis par les commissions du vocabulaire.

- IMPLANTATION IONIQUE : Cette opération permet d'implanter des ions accepteurs dans un semi-conducteur de type (N) ou donneurs dans un semi-conducteur de type (P).

Un appareil, appelé implantateur, génère des ions d'un matériau donné. Ceux-ci sont accélérés par un champ électrique et bombardent le matériau à implanter. Le réglage de l'intensité du champ permet le contrôle précis de la profondeur d'implantation.

- PASSIVATION : Cette opération consiste à évaporer, sur le cristal détecteur terminé, une couche de quelques Å d'un oxyde neutre. Ceci afin d'isoler la surface du cristal de l'ambiance extérieure et d'enrayer une dégradation possible des caractéristiques.

- NIP : Abréviation de zone (N), zone intrinsèque, zone (P).

## ANNEXE 2

LTMH - Abréviation de largeur totale à mi-hauteur, en anglais FWHM (Full Width Half Maximum). Ce terme représente la résolution à mi-hauteur pour un pic d'absorption totale d'énergie donnée.

On utilise parfois la largeur au dixième de la hauteur FWTH (Full Width Ten Maximum).

### ANNEXE 3

Données Nucléaires recommandées par le GTN.5

- VADE - MECUM du technicien  
Table des isotopes - R. PANNETIER
- FICHER DE REFERENCES NUCLEAIRES "LARA"  
LMRI - SACLAY
- TABLE DE RADIONUCLEIDES  
LMRI - SACLAY
- BANQUE DE DONNEES DU DRE/DRF
- TABLE OF ISOTOPES  
by C.M. LEDERER, J.M. HOLLANDER, and I. PERLMAN

*Achévé d'imprimer*  
*par*  
*le CEA, Service de Documentation, Saclay*  
*Juin 1986*

*DEPOT LEGAL*  
*2ème trimestre 1986*

ISSN 0429 - 3460

*La diffusion des rapports et bibliographies du Commissariat à l'Énergie Atomique est assurée par le Service de Documentation, CEN-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cédex, (France)*

*Reports and bibliographies of the Commissariat à l'Énergie Atomique are available from the Service de Documentation, CEN-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cédex, (France)*

