



HAL
open science

Etude de faisabilité d'un détecteur dédié à la discrimination bêta/gamma

Yiyan Luo

► **To cite this version:**

Yiyan Luo. Etude de faisabilité d'un détecteur dédié à la discrimination bêta/gamma. Physique [physics]. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMC291 . tel-03510356

HAL Id: tel-03510356

<https://theses.hal.science/tel-03510356>

Submitted on 4 Jan 2022

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

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



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité PHYSIQUE

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Etude de faisabilité d'un détecteur dédié à la discrimination bêta/gamma

**Présentée et soutenue par
Yiyan LUO**

**Thèse soutenue publiquement le 04/12/2018
devant le jury composé de**

M. FRANCK MARTIN	Professeur des universités, Université Clermont Ferrand 2 Blaise Pas	Rapporteur du jury
M. ABDEL MJID NOURREDDINE	Professeur des universités, Université de Strasbourg	Rapporteur du jury
M. GILLES BAN	Professeur des universités, 14 ENSI de Caen	Président du jury
Mme VALENTINA DESGRANGES	Ingénieur, EDF	Membre du jury
M. MARC LABALME	Maître de conférences HDR, 14 ENSI de Caen	Directeur de thèse

Thèse dirigée par MARC LABALME, Laboratoire de physique corpusculaire (Caen)



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE





Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Physique

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Étude de faisabilité d'un détecteur dédié à la discrimination bêta/gamma

Présentée et soutenue par
Yiyan LUO

Thèse soutenue le 04/12/18
devant le jury composé de

M. Franck MARTIN	Professeur des universités, Université de Clermont Auvergne	Rapporteur du jury
M. Abdel Mjid NOURREDDINE	Professeur des universités, Université de Strasbourg	Rapporteur du jury
M. Gilles BAN	Professeur des universités, ENSICAEN	Membre du jury
Mme. Valentina DESGRANGES	Ingénieur Chercheur, EDF – R&D	Membre du jury
M. Marc LABALME	Maître de Conférences, ENSICAEN	Directeur de thèse

Thèse dirigée par Marc LABALME, Laboratoire de Physique Corpusculaire (Caen)



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Table des matières

Introduction générale	1
I Interaction rayonnement matière et état de l'art	3
1 Interaction rayonnement matière	7
1.1 Interaction des électrons avec la matière	7
1.1.1 Perte d'énergie, dE/dx , longueur de trajectoire et portée	7
1.1.2 Application à un scintillateur plastique	9
1.1.3 Absorption des électrons bêta	10
1.1.4 Effet Cerenkov	10
1.2 Interaction des photons avec la matière	11
1.2.1 Mécanismes d'interaction des photons avec la matière	11
1.2.2 Atténuation d'un faisceau de photons	12
1.2.3 Application à des exemples de matériaux	13
1.3 Principes de détection des rayonnements	14
1.3.1 Détecteurs gazeux	14
1.3.2 Détecteur à scintillation	16
1.4 Conclusion	19
2 Éléments de radioprotection	21
2.1 Grandeurs et unités en radioprotection	21
2.1.1 Grandeurs physiques	21
2.1.2 Grandeurs de protection	22
2.1.3 Grandeurs opérationnelles	23
2.1.4 Facteurs de conversion CIPR	24
2.2 Risques radiologiques en zone dans un CNPE	25
2.2.1 Risque d'exposition et de contamination	25
2.2.2 Problématique du ^{60}Co en CNPE	26
2.2.3 Zonage en installation nucléaire	28
2.3 Conclusion	29
3 Normes et état de l'art des contaminamètres	31
3.1 Norme ISO 11929 : mesurage des rayonnements ionisants	31

3.1.1	Seuil de décision	32
3.1.2	Limite de détection	32
3.1.3	Un exemple d'application	33
3.1.4	Interprétation de la norme ISO 11929	34
3.2	Normes ISO utilisées pour la mesure de contamination	35
3.2.1	ISO 7503-1	35
3.2.2	ISO 60325	36
3.3	Cahier des charges et son application	38
3.3.1	Extrait du cahier des charges	38
3.3.2	Application du cahier des charges	39
3.4	Contaminamètres bêta existant sur le marché	41
3.5	Conclusion	44
 II Conception des prototypes		45
 4 Méthodologie		49
4.1	Introduction à Geant4	49
4.1.1	Application développée	50
4.2	Définition des sources de rayonnement	51
4.2.1	Source gamma	51
4.2.2	Source bêta	52
4.3	Caractéristiques du détecteur	53
4.3.1	Résolution en énergie	53
4.3.2	Critère de discrimination : facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$	53
4.3.3	Seuils en énergie	55
4.4	Conclusion	55
 5 Étude de configurations basiques		57
5.1	Détecteur à un étage de détection	57
5.1.1	Scintillateur plastique	57
5.1.2	Détecteur gazeux	62
5.1.3	Effet de la présence de matière autour de la partie sensible du détecteur	65
5.1.4	Conclusion	67
5.2	Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques	68
5.2.1	Analyse TS1 : coïncidence entre les deux étages	69
5.2.2	Analyse TS2 : au moins le premier étage de scintillateur touché	79
5.2.3	Analyse TS3 : seul le premier étage touché (utilisation du deuxième étage en véto)	85
5.2.4	Conclusion	89

5.3	Détecteur composé d'un étage de détecteur gazeux et d'un étage de scintillateur plastique	90
5.3.1	Analyse TS1 : coïncidence entre les deux étages	91
5.3.2	Analyse TS2 : au moins le premier étage de gaz touché	94
5.3.3	Analyse TS3 : seul le premier étage est touché (utilisation du scintillateur en véto)	96
5.3.4	Conclusion	99
5.4	Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques et un étage de scintillateur YAP utilisé en véto	100
5.4.1	Détection bêta	100
5.4.2	Détection gamma	101
5.4.3	Discrimination bêta/gamma	103
5.5	Conclusion	104
6	Étude de configurations "réalistes" de détecteurs	107
6.1	Conditions réalistes	107
6.1.1	Spectre réaliste	107
6.1.2	Configurations "réalistes" de détecteur	107
6.2	Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques	110
6.2.1	Phoswich V1 : deux scintillateurs plastiques assemblés sans couplant	110
6.2.2	Phoswich V2 : deuxième scintillateur utilisé en véto	111
6.2.3	Conclusion pour le détecteur Phoswich en scintillateurs plastiques	112
6.3	Détecteur composé d'un étage de détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique	113
6.4	Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques et un étage de scintillateur YAP utilisé en véto	113
6.5	Conclusion	116
III	Validation expérimentale	123
7	Développement de contaminamètres à base de Phoswich en scintillateurs plastiques	127
7.1	Conception mécanique des prototypes	127
7.2	Fenêtre d'entrée	129
7.3	Assemblage des scintillateurs	129
7.3.1	Collage des scintillateurs par "chauffage"	130
7.3.2	Collage de scintillateurs avec une colle polymère	131
7.4	Pré-amplificateur	133
7.5	Système d'acquisition FASTER	133
7.6	Guide de lumière	134
7.7	Photo-multiplificateur PMT	134

7.8	Conclusion	135
8	Tests expérimentaux des détecteurs avec des sources radioactives au LPC	137
8.1	Sources radioactives utilisées au LPC	137
8.1.1	Source bêta	137
8.1.2	Source gamma	138
8.2	Traitement des données	139
8.2.1	Représentation des données	139
8.3	Tests expérimentaux du détecteur Phoswich V2	143
8.3.1	Tests et optimisation du guide de lumière	144
8.3.2	Performance du Phoswich V2 avec un guide de 2 cm	150
8.4	Conclusion	154
9	Campagnes de mesure au CNPE de Chinon	155
9.1	Dispositifs expérimentaux	156
9.1.1	Prototypes du Phoswich V1 et V2	156
9.1.2	Radiamètres utilisés	156
9.1.3	Sources bêta utilisées	157
9.1.4	Sources gamma utilisées	158
9.2	Mesures avec les sources bêta dans un bruit de fond naturel	159
9.2.1	Sources bêta de référence	159
9.2.2	Frottis	161
9.2.3	Conclusion	162
9.3	Mesures avec les sources gamma : ^{137}Cs et ^{60}Co	163
9.3.1	Phoswich V1	164
9.3.2	Phoswich V2	168
9.3.3	Conclusion	171
9.4	Mesures dans le BAN	171
9.4.1	Mesures du bruit de fond dans les trois locaux	174
9.4.2	Mesure avec la source bêta dans un bruit de fond gamma réaliste	177
9.5	Performance de discrimination bêta/gamma	181
9.6	Conclusion	183
	Conclusion générale et perspectives	187
	Bibliographie	191
	Annexe A Définition des sources gamma	197
A.1	Coefficients de conversion fluence-dose de CIPR	197
A.2	Simulation du modèle de la CIPR74	199
A.3	Modèle de référence pour les simulations	201

A.4	Flux de gamma équivalent à 100 $\mu\text{Sv/h}$	203
A.5	Conclusion	205
Annexe B Optimisation de guide de lumière par simulation		207
B.1	Caractéristiques essentiels d'un guide de lumière	207
B.2	Résultats de simulation	209
B.3	Conclusion	211
Annexe C Test expérimentaux du Phoswich à deux scintillateurs plastiques associé à un YAP		213
C.1	Dispositif expérimental	213
C.2	Représentation des trois charges avec le Dalitz plot	214
C.3	Résultats expérimentaux	215
C.4	Conclusion	218
Annexe D Tests expérimentaux du détecteur gazeux associé à un Phoswich en scintillateurs plastiques		219
D.1	Montage expérimental du détecteur gazeux associé à un Phoswich	219
D.1.1	Compteur proportionnel développé	219
D.1.2	Scintillateurs montés sur le compteur proportionnel	220
D.2	Résultats expérimentaux	222
D.3	Conclusion	223
Annexe E Étude de Phoswich composé d'un étage de ZnS et d'un étage de scintillateur plastique		225
E.1	Détection bêta	225
E.2	Détection gamma	226
E.3	Performance de discrimination bêta/gamma	228
E.3.1	Analyse TS1 : coïncidence entre les deux étages	228
E.3.2	Analyse TS2 : au moins le premier étage de scintillateur (ZnS) touché	229
E.3.3	Analyse TS3 : seul le premier étage touché (utilisation du deuxième étage en véto)	229
E.3.4	Conclusion	229
E.4	Validation expérimentale du Phoswich en ZnS et scintillateur plastique . . .	229
Annexe F Étude de détecteur à deux étages de détecteurs gazeux par simulation		231
F.1	Simulation basique	231
F.1.1	Détection bêta	231
F.1.2	Détection gamma	233
F.2	Simulation réaliste	234
F.3	Conclusion	236

Introduction générale

Le Projet « Propreté Radiologique » a pour objectif global d'assurer l'amélioration de la maîtrise de la contamination et de la non dissémination de particules radioactives hors des zones contrôlées [1]. L'amélioration de la propreté radiologique requiert des contrôles de contamination précis. La mesure de l'activité surfacique bêta est notamment essentielle pour s'assurer de sa conformité aux normes.

En zone, les contrôles de contamination sont susceptibles d'être réalisés dans des ambiances ayant des débits de dose gamma élevés. Les appareils actuels ne permettent pas de faire des mesures de contamination bêta ($0,4 \text{ Bq/cm}^2$) dans des débits de dose dépassant quelques $\mu\text{Sv/h}$. C'est pourquoi le processus actuel de mesure est indirect et est réalisé en plusieurs étapes : prélèvement (frottis), déplacement du prélèvement hors de la zone, mesure en environnement ayant un bruit de fond gamma faible. Comme cette mesure indirecte, à l'aide d'un frottis, induit un risque de dissémination de la contamination et complique les procédures de mesures, EDF/DPN a exprimé le besoin d'avoir un appareil innovant permettant de réaliser la mesure in-situ tout en conservant les mêmes performances. C'est dans ce contexte que EDF R&D a proposé cette thèse dont l'objectif est d'étudier la faisabilité d'un contaminamètre dédié à la mesure de contamination bêta dans un bruit de fond gamma élevé. La performance demandée par le cahier des charges est une détection d'une activité surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ issue du ^{60}Co dans un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$. Des exigences associées à des contraintes opérationnelles comme la surface, le poids, le prix et la robustesse ... sont également précisées dans le cahier des charges.

Pour mesurer la contamination bêta surfacique dans un débit de dose élevé, il faut un détecteur très sensible aux bêta et peu sensible aux photons. Des matériaux de détection légers de faible épaisseur seront donc à favoriser pour diminuer la probabilité d'interaction des photons. Des détecteurs à scintillation sont couramment utilisés pour la discrimination de particules, gamma/neutron [2][3], alpha/bêta [4], bêta/gamma [5], à l'aide d'une analyse en forme du signal (PSD : Pulse Shape Discrimination) notamment. Ces solutions sont largement utilisées dans les contaminamètres existant [6] [7] [4]. Dans cette étude, des efforts seront faits pour développer des configurations de détecteurs à plusieurs étages de scintillateurs et des méthodes d'analyse innovantes. Des détecteurs gazeux, compteur proportionnel et compteur Geiger Muller, sont également utilisés dans les contaminamètres existant sur le marché [8] [9] [10]. D'après le retour d'exploitation d'EDF, ils ont cependant une robustesse limitée pour une utilisation sur le terrain à cause de leur fragilité et nécessitent un rechargement en gaz

régulier. Ils seront néanmoins étudiés dans cette thèse car la faible densité du gaz pourrait leur permettre d'être moins sensible au bruit de fond gamma.

Le travail réalisé au cours de ma thèse sera exposé en trois parties. Dans une première partie, les interactions des bêta et des gamma avec la matière et leur détection seront abordés, plus particulièrement avec des détecteurs gazeux et à scintillation. Des éléments de radioprotection seront ensuite présentés en abordant les grandeurs et les risques radiologiques utilisés sur site. Les exigences, des normes ISO et du cahier des charges, seront également présentées avec un état de l'art des contaminamètres existant.

Dans une seconde partie, la conception de prototypes à l'aide de simulations Monte Carlo sera décrite. Les comparaisons des performances des différentes configurations de détecteurs étudiés seront discutées. Des tests expérimentaux serviront également à valider les résultats des simulations. Cela permettra de comparer et de choisir entre les différentes configurations de détecteurs envisagées.

Dans la troisième partie, le développement des prototypes correspondant aux configurations retenues sera présenté. Les prototypes ont été testés avec des sources radioactives et en condition réelle, en zone contrôlée, dans des locaux du CNPE de Chinon. Les conditions de mesures et les principaux résultats seront détaillés.

Première partie

Interaction rayonnement matière et état de l'art

Introduction

Le contaminamètre bêta est un détecteur de rayonnements. C'est pourquoi le Chapitre 1 permettra, après une présentation des interactions des électrons et des photons avec la matière, d'introduire les principes de détection des rayonnements. Les deux types de détecteurs qui seront étudiés par la suite, détecteur à scintillation et détecteur gazeux, seront détaillés.

Le Chapitre 2 introduira le contexte du développement du contaminamètre, en tant qu'instrument de radioprotection. Des éléments essentiels de radioprotection, dont la définition des grandeurs utilisées dans cette étude seront abordés. Enfin, seront présentés les principaux risques radiologiques en CNPE¹.

Des normes internationale existent pour le mesurage des rayonnements et plus précisément le mesurage de la contamination bêta. Suite à la présentation de ces normes, des éléments du cahier des charges du contaminamètre seront introduits dans le Chapitre 3. A partir d'une discussion sur les normes internationales et sur les détails du cahier des charges, des critères permettant de quantifier les performances du contaminamètre seront obtenus. Enfin, un état de l'art sur les contaminamètres actuels sera présenté, permettant de connaître les technologies existantes dans l'industrie et leurs performances actuelles.

1. CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Électricité

Chapitre 1

Interaction rayonnement matière

1.1 Interaction des électrons avec la matière

Les électrons sont des particules directement ionisantes. Ils perdent de l'énergie par deux mécanismes :

1. **Excitation/ionisation.** L'excitation consiste à transformer une partie de l'énergie de l'électron à un électron atomique qui passe à un état d'énergie plus élevé. Elle a lieu lorsque l'énergie transférée est inférieure à l'énergie d'ionisation. L'ionisation est un processus où l'électron incident transfère une énergie suffisante pour arracher l'un des électrons de l'atome ou de la molécule qu'il rencontre dans la matière. Cette réaction peut avoir lieu si l'énergie de l'électron incident est supérieure à l'énergie de liaison (B.E.) de l'électron atomique.
2. **Rayonnement.** L'émission de rayonnement de freinage, ou Bremsstrahlung, consiste en l'émission de rayonnements électromagnétiques à la suite de la déviation de l'électron dans le champs électrique du noyau. La section efficace de cet effet augmente avec l'énergie des électrons. Elle est très faible pour les électrons d'énergie inférieure à 10 MeV dans les matériaux légers [11].

Pour les électrons avec des énergies de quelques centaines de keV à quelques MeV, présents en CNPE, la perte d'énergie interviendra donc essentiellement par ionisation/excitation suite aux collisions avec les électrons des atomes rencontrés.

1.1.1 Perte d'énergie, dE/dx , longueur de trajectoire et portée

La perte d'énergie des électrons dépend de leur énergie incidente et des caractéristiques du matériau traversé.

Pour caractériser le processus de perte d'énergie des électrons, trois paramètres sont définis :

- Le **pouvoir d'arrêt linéique**, noté dE/dx , est la perte d'énergie par unité de longueur parcourue dans un matériau par un électron. Il est souvent exprimé en MeV/cm. Le pouvoir d'arrêt massique $dE/(\rho dx)$ en MeV cm²/g est également employé.

- Le **parcours** représente la longueur de la trajectoire ou distance réellement parcourue par un électron dans la matière jusqu'à son arrêt. Le parcours CSDA¹ [12] est une approximation de la longueur de la trajectoire parcourue par un électron lorsqu'il est ralenti jusqu'à son arrêt. Dans cette approximation, l'énergie perdue à chaque interaction sur la trajectoire est obtenue par l'intégration de son pouvoir d'arrêt. La fluctuation de perte d'énergie est négligée. C'est cette grandeur qui est tabulée dans les bases de données comme celle du NIST² [12].
- La **portée R** est la profondeur maximale atteinte par un faisceau d'électrons mono-énergétiques dans un milieu considéré. Elle sera utile par la suite car elle donne l'information de l'épaisseur de matière que l'électron traverse.

Le dépôt d'énergie dans un matériau comme un détecteur est caractérisé par le pouvoir d'arrêt linéique dE/dx : énergie moyenne perdue par unité de distance parcourue, exprimé en MeV/cm. Il peut être calculé à partir de la formule empirique de Bethe-Bloch [11] pour les électrons ou positrons :

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_e c^2)^2} + F(\tau) + \text{termes correctifs...} \right], \quad (1.1)$$

où τ est l'énergie cinétique des particules ; N_a est le nombre d'Avogadro ; r_e est le rayon classique de l'électron ; m_e est la masse de l'électron ; Z est le nombre atomique du matériau traversé ; $\beta = v/c$; I est le potentiel d'ionisation moyen du matériau.

Pour les électrons,

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\tau^2}{8} - \frac{(2r_e + 1) \ln 2}{(\tau + 1)^2}. \quad (1.2)$$

Le parcours CSDA est alors calculé [11] :

$$\text{parcours CSDA} = \int_0^{T_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \quad (1.3)$$

où T_0 est l'énergie initiale de l'électron.

La portée des électrons est inférieure au parcours car le parcours des électrons est très chaotique en raison des diffusions. La portée dans des milieux de Z léger (jusqu'à $Z = 13$) peut être calculée par la formule empirique de Katz Penfold [13], pour $0,01 \leq E \leq 3$ MeV [13] :

$$R = 0,412 \frac{E^n}{\rho}, \quad (1.4)$$

avec

$$n = 1,265 - 0,0954 \ln(E),$$

où l'énergie des électrons E est en MeV et la densité ρ est en g/cm^3 et la portée R en cm.

1. Continuous Slowing Down Approximation
2. National Institute of Standards and Technology

1.1.2 Application à un scintillateur plastique

Prenons l'exemple d'un scintillateur plastique, l'évolution du pouvoir d'arrêt massique $dE/(\rho dx)$ en fonction de l'énergie des électrons est présentée sur la Figure 1.1. Pour des énergies entre 0,01 et 1 MeV (plage qui inclut les énergies de spectre bêta du ^{60}Co $T_{\beta,max}$), le $dE/(\rho dx)$ total diminue quand l'énergie des électrons augmente. Puis il se stabilise jusqu'à environ 10 MeV, ce qui correspond au minimum d'ionisation. Au delà, la perte d'énergie par rayonnement de freinage devient dominante et induit une augmentation du $dE/(\rho dx)$.

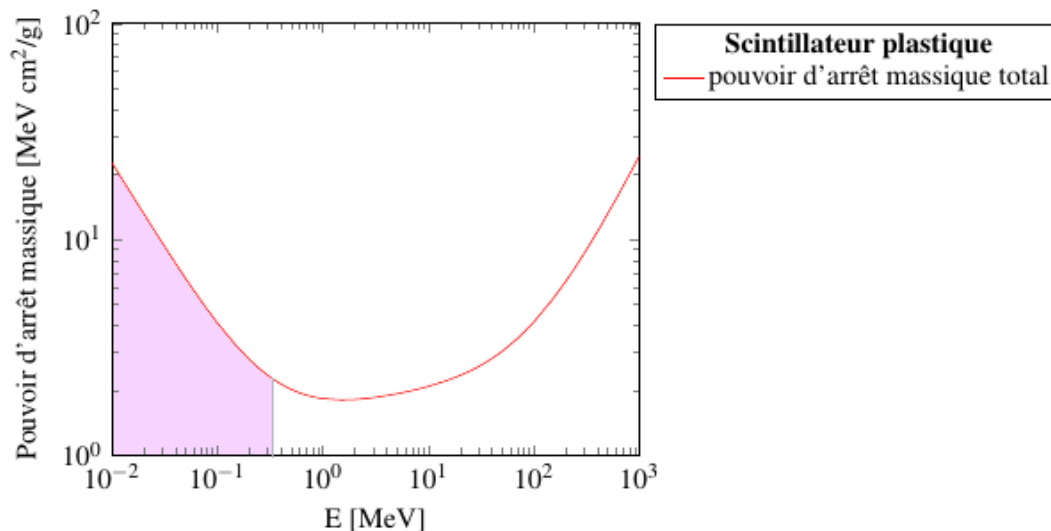


Figure 1.1 Pouvoir d'arrêt massique total d'un scintillateur plastique en fonction de l'énergie des électrons [14]. Les électrons bêta du ^{60}Co ont des énergies qui se situent dans la zone colorée.

Tableau 1.1 Pouvoir d'arrêt, parcours CSDA [15] et portée (cf. Formule 1.4) pour différentes énergies d'électrons dans le plastique (PVT)

E [MeV]	$dE/(\rho dx)$ [g/cm ²]	parcours CSDA [mm]	portée R [mm]
0,1	4,1	0,14	0,14
0,3	2,3	0,83	0,79
1	1,8	4,3	4,1

Le Tableau 1.1 présente le $dE/(\rho dx)$, le parcours CSDA [15] et la portée des électrons de différentes énergies : 0,1, 0,3 et 1 MeV dans un scintillateur plastique (PVT). On note que les bêta d'énergie inférieure à l'énergie moyenne du ^{60}Co ($E_{av} = 0,096$ MeV) perdent toute leur énergie dans $\sim 100 \mu\text{m}$ de plastique tandis que les bêta correspondant à l'énergie maximale du ^{60}Co ont un parcours de $\sim 800 \mu\text{m}$ dans un scintillateur plastique. La perte d'énergie dans les détecteurs et le parcours des électrons sont des paramètres importants pour l'optimisation du contaminamètre.

1.1.3 Absorption des électrons bêta

Les relations précédentes concernent des électrons monoénergétiques. Pour notre application, il peut être intéressant d'analyser et calculer le nombre d'électrons à travers une épaisseur de matière dans le cas d'un spectre bêta, qui est continu en énergie.

La Figure 1.2 tirée de [16] présente la courbe de transmission des électrons bêta du ^{185}W (énergie maximum de 425 keV proche de celle du ^{60}Co) à travers des épaisseurs de différents matériaux (Al, Co, Ag). Ces mesures montrent que la propagation des bêta qui traversent une épaisseur de matière diminue quasi exponentiellement avec l'épaisseur du milieu traversé, car les bêta de basse énergie sont rapidement absorbés par une faible épaisseur de matériau. Par la suite, cette atténuation exponentielle aura des conséquences importantes sur les épaisseurs optimales des détecteurs étudiés dans cette thèse.

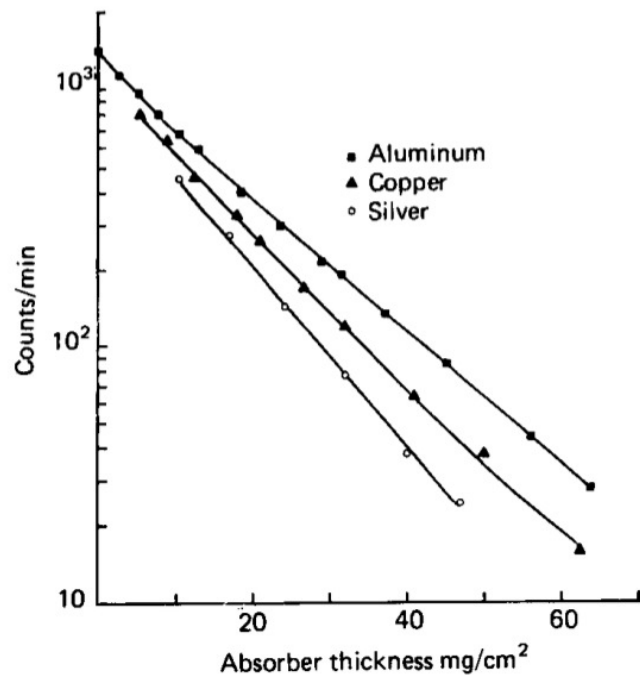


Figure 1.2 Courbe de transmission empirique des électrons en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur pour des bêta du ^{185}W . Figure extraite de [16].

1.1.4 Effet Cerenkov

Lorsqu'une particule chargée passe dans un milieu avec une vitesse (v) plus importante que celle de la lumière (c) dans ce milieu (c/n avec n l'indice de réfraction dans ce milieu), des radiations électromagnétiques (photons) sont émises. Ce phénomène est appelé effet Cerenkov.

Le spectre d'émission de photons Cerenkov est continu. L'intensité de photons émis par unité de longueur d'onde $dN/d\lambda$ est proportionnelle à $1/\lambda^2$ [11][17]. Les photons générés sont donc majoritairement à faible longueur d'onde (UV puis visible).

Ce rayonnement sera à prendre en compte dans le cas d'un scintillateur dans un bruit de fond gamma élevé suivi d'un guide de lumière en PMMA (polyméthacrylate de méthyle) : un polymère thermoplastique transparent, $n = 1,49$ (cf. paragraphe 1.3.2.1) [17]. En effet, les photons du bruit de fond peuvent interagir dans le PMMA et y créer des électrons de haute énergie. Les photons Cerenkov créés par ces électrons pourront en partie correspondre à la gamme de sensibilité, en longueur d'onde, du photomultiplicateur PMT (entre 350 et 550 nm [11]). Cet effet a été étudié et les résultats sont présentés en annexe B.2 et au paragraphe 8.3.1.2. Il est négligeable pour notre application.

1.2 Interaction des photons avec la matière

Le bruit de fond en CNPE est en grande partie dû aux photons issus du ^{60}Co . Les photons ont trois principaux types d'interactions lorsqu'ils rencontrent la matière : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paire. Pour chacune de ces interactions, la section efficace dépend de l'énergie du photon incident et du matériau traversé (densité, Z ...). Après avoir rappelé les principes de ces interactions, des exemples concrets d'interactions de photons avec un scintillateur plastique et un scintillateur inorganique ZnS seront présentés à la fin de cette section.

1.2.1 Mécanismes d'interaction des photons avec la matière

Trois mécanismes d'interaction entre les photons et la matière existent :

1. L'**effet photoélectrique** (PE) consiste en une absorption du photon incident d'énergie $h\nu$ par un électron atomique constituant le matériau traversé. Ce photon transmet toute son énergie à l'électron, ce qui permet d'arracher l'électron de l'atome. Cet électron arraché aura donc une énergie cinétique $T = h\nu - \text{B.E.}$ (B.E. : énergie de liaison de l'électron). La probabilité d'interaction photoélectrique augmente, avec le numéro atomique Z des atomes rencontrés, en Z^5 . Pour les matériaux avec un Z élevé, cet effet est prédominant pour des photons d'énergie inférieure à une centaine de keV [18].
2. La **diffusion Compton** est la diffusion de photons sur un électron faiblement lié du milieu traversé. Une partie de l'énergie du photon ($h\nu$) est cédée à l'électron, le photon est diffusé avec une énergie $h\nu'$ ($h\nu' < h\nu$) dépendant de l'angle de diffusion θ . Cet effet est l'interaction prédominante des gamma jusqu'à quelques MeV.

L'énergie cinétique T des électrons mis en mouvement lors de la diffusion est exprimée par la formule :

$$T = h\nu \left(\frac{\gamma(1 - \cos\theta)}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \right), \quad (1.5)$$

avec

$$\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2},$$

θ l'angle de déviation entre la direction initiale et finale des photons, m_e la masse de l'électron et $h\nu$ l'énergie du photon incident.

L'énergie cinétique maximale des électrons secondaires, obtenue lorsque $\theta = \pi$, est donnée par l'expression suivante :

$$T_{max} = h\nu \left(\frac{2\gamma}{1+2\gamma} \right). \quad (1.6)$$

Cette énergie maximale, qui ne dépend pas du matériau rencontré par les photons, est par exemple :

- $T_{max} = 0,028$ MeV si $h\nu = 0,1$ MeV ;
- $T_{max} = 0,33$ MeV si $h\nu = 0,5$ MeV ;
- $T_{max} = 0,80$ MeV si $h\nu = 1$ MeV.

On voit que les gamma de 500 keV peuvent créer des électrons jusqu'à 330 keV, ce qui est proche de $T_{\beta,max}$ du ^{60}Co .

3. La **création de paires électron - positron** est la matérialisation d'un photon en un électron et un positron. Du point de vue énergétique, il faut que les photons aient des énergies plus élevées que la somme des énergies de masse de ces particules créés ($E_\gamma \geq 1,022$ MeV) [11] pour que l'interaction puisse avoir lieu. Elle sera donc négligeable pour mes études car le bruit de fond est principalement dû aux gamma du ^{60}Co (1,17 et 1,33 MeV).

1.2.2 Atténuation d'un faisceau de photons

Ces trois types d'interactions vont conduire à une atténuation du nombre des photons qui traversent une épaisseur de matière. La proportion des photons qui restent après avoir traversé une épaisseur x est donnée par la formule :

$$I(x)/I_0 = \exp(-\mu x), \quad (1.7)$$

où I_0 est l'intensité du faisceau de photons incidents et μ (en cm^{-1}) est le coefficient d'atténuation linéique. μ dépend de la section efficace totale σ de trois effets présentés précédemment.

$$\mu = N \cdot \sigma = (N_a \rho / A) \sigma, \quad (1.8)$$

où N est le nombre d'atomes par cm^3 , N_a est le nombre de Avogadro, ρ est la densité du matériau traversé et A est sa masse molaire. σ est la section efficace totale par noyau $\sigma = \sigma_{P.E.} + Z\sigma_{Compton} + \sigma_{C.P.}$ ($\sigma_{P.E.}$: section efficace photoélectrique par atome, $\sigma_{Compton}$: section efficace de Compton par électron, $\sigma_{C.P.}$: section efficace de création de paires par atome).

Les formules (1.7) et (1.8) donnent :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\frac{N_A \sigma}{A} \rho x}. \quad (1.9)$$

ρx , appelé "densité surfacique", est utilisée pour normaliser des matériaux de différentes densités [11].

La section efficace σ et la densité surfacique ρx sont des facteurs importants pour déterminer l'absorption des photons pour notre application. Des matériaux à faible section efficace seront à privilégier ainsi qu'une épaisseur (ρx) la plus faible possible pour minimiser l'interaction des gamma.

1.2.3 Application à des exemples de matériaux

Deux exemples seront données pour présenter les interactions des photons dans deux matériaux pouvant être utilisés pour réaliser un contaminamètre : scintillateur plastique et scintillateur inorganique (ZnS).

Le ZnS est un scintillateur inorganique couramment utilisé dans les contaminamètres. Avec un numéro atomique Z élevé (46), il est représentatif des matériaux lourds par rapport au scintillateur plastique ($Z \approx 6$).

Les coefficients d'atténuation massique (μ/ρ) pour un scintillateur plastique et pour le ZnS sont présentés en Figure 1.3 [15]. Les trois interactions présentées précédemment sont détaillées : photo-électrique, diffusion Compton et création de paires. La plage colorée comprend les énergies caractéristiques des photons en CNPE (essentiellement en dessous de 2 MeV).

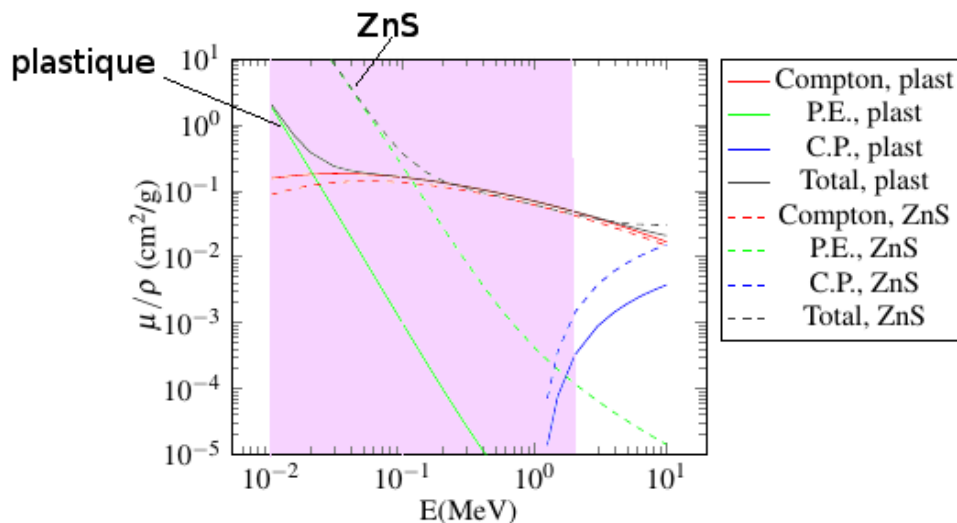


Figure 1.3 Coefficients d'atténuation massique (cm^2/g), pour un scintillateur plastique (trait continu) et pour du ZnS (trait pointillé), correspondant à la diffusion Compton, l'effet photo-électrique (P.E.), la production de paires (C.P.) et total. Les photons d'intérêt pour l'étude sont dans la plage colorée en rose : $E \leq 2$ MeV. Données obtenues de [15].

Pour les photons avec des énergies supérieures à ~ 200 keV, le μ/ρ est comparable pour les deux matériaux (plastiques et ZnS). L'effet Compton est l'interaction la plus probable.

Par contre, le coefficient d'atténuation total des deux scintillateurs diffère beaucoup à faible énergie à cause de l'effet de photo-électrique, dont la section efficace augmente en Z^5 , qui est très important dans le ZnS. Par exemple à 100 keV, le coefficient d'atténuation par effet photo-électrique est de $0,23 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour le ZnS alors que celui du plastique n'est que $9,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$ (~ 240 fois plus faible). Les matériaux de Z élevé conduisent donc à une plus grande probabilité d'interaction des gamma de faible énergie.

Les électrons bêta du ^{60}Co interagissent principalement par ionisation, excitation. Les photons de 0,1 - 2 MeV interagissent principalement par effet Compton pour des matériaux légers comme le plastique. Les matériaux plus lourds que le plastique comme le ZnS ont des sections efficaces d'effet photoélectrique importantes pour des gamma d'énergie jusqu'à ~ 200 keV. Pour développer le contaminamètre, il faudra donc probablement privilégier des matériaux de Z moyen faible (μ/ρ faible) avec une faible épaisseur massique (ρx).

1.3 Principes de détection des rayonnements

La détection des rayonnements dépend du dépôt d'énergie du rayonnement dans le matériau dédié à la détection. Ce dépôt d'énergie va être transformé en un signal électrique afin d'être traité par l'électronique de lecture du détecteur.

Les détecteurs de rayonnements ionisants peuvent se classer en deux catégories principales : détecteur à ionisation (détecteur gazeux et détecteur à semi-conducteur) et détecteur à scintillation.

Pour mesurer la contamination bêta, les détecteurs utilisés dans l'industrie sont divers : détecteurs gazeux comme le compteur proportionnel et le compteur Geiger Müller, scintillateurs en plastique ou en ZnS. Les principes des détecteurs gazeux et à scintillation seront donc discutés plus en détail dans cette section.

1.3.1 Détecteurs gazeux

Un détecteur gazeux est constitué d'un volume de gaz dans lequel est appliqué un champ électrique grâce à des électrodes. L'interaction d'une particule dans le gaz va conduire à une ionisation créant des paires électrons-ions. L'énergie moyenne d'ionisation dans les gaz est de $w \sim 30 \text{ eV}$ [11]. Les charges créées dérivent vers les électrodes sous l'effet du champ électrique et y induisent un signal. Un grand nombre de géométries différentes peuvent être réalisées : détecteur cylindrique (à fil), détecteurs à plaques parallèles, GEM (Gas Electron Multiplier) [19]...

1.3.1.1 Régimes de fonctionnement des détecteurs gazeux

En fonction du champ électrique appliqué, le mécanisme de fonctionnement du détecteur varie. Il y a principalement trois régimes de fonctionnement des détecteurs gazeux : chambre

à ionisation, compteur proportionnel et compteur Geiger Müller. La Figure 1.4 présente l'amplitude du signal électrique mesuré en fonction de la tension appliquée aux électrodes.

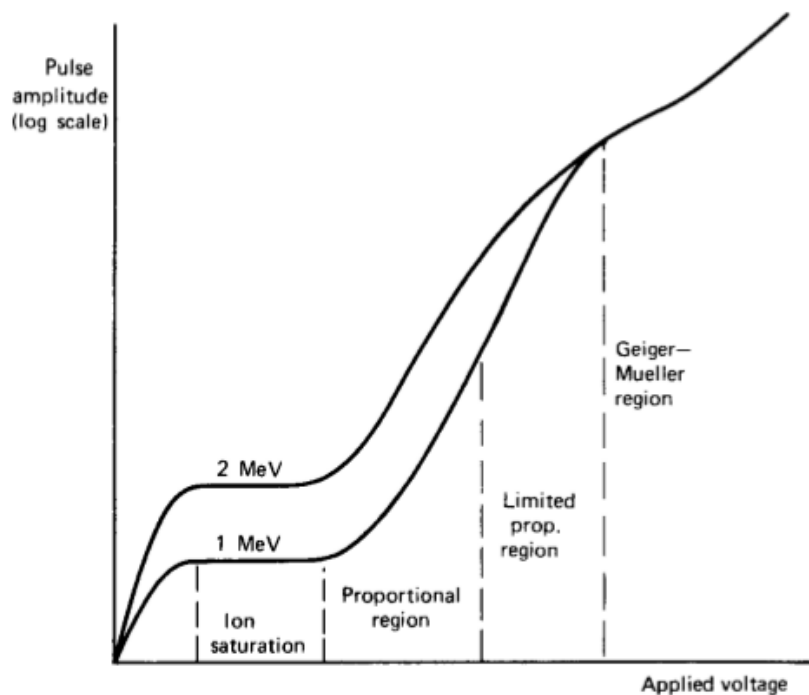


Figure 1.4 Les différents régimes de fonctionnement des détecteurs gazeux. L'amplitude du signal électrique en fonction de la tension appliquée au détecteur gazeux est représentée pour deux événements ayant déposé des énergies différentes dans le gaz. Figure extraite de Fig. 6.2 dans [17].

A faible tension, les paires électron-ions se recombinent. En augmentant la tension, de plus en plus de paires électron-ions sont collectés sur les électrodes, ce qui résulte en une augmentation de l'amplitude du signal. Quand la recombinaison est complètement supprimée, la région de saturation d'ionisation est atteinte. Dans ce régime, l'amplitude reste stable en fonction de la tension électrique appliquée. C'est la région de fonctionnement des chambres d'ionisation. Comme la chambre d'ionisation collecte directement l'ionisation due au rayonnement, l'amplitude est faible. Par exemple, pour un dépôt de 0,1 MeV, il y a environ $0,1 \text{ MeV}/w \approx 10^5 \text{ eV}/30 \text{ eV} \approx 3\,000$ paires électrons-ions. Cela correspond à une charge collectée de $5 \cdot 10^{-16} \text{ C}$. Pour un détecteur avec une capacité standard de 30 pF, l'amplitude du signal vaut environ 0,015 mV.

Si la tension continue à augmenter, l'amplitude du signal augmente car le champ électrique est suffisamment élevé pour déclencher l'avalanche électronique. Les électrons d'ionisation primaires sont suffisamment accélérés pour ioniser à leur tour les molécules de gaz. Ces interactions conduisent ainsi à la création d'électrons d'ionisation "secondaires". Cette multiplication, par un facteur de $10^4 - 10^6$, du nombre des charges va donner, au final, un signal électrique important. Dans cette région, le nombre de paires électrons-ions créés par avalanche est encore proportionnel au nombre d'électrons primaires créés et donc à l'énergie déposée dans le détecteur. Cette région est le régime de fonctionnement des compteurs proportionnels [11].

Au delà du régime "proportionnel", il y a la région de "proportionnalité limitée" où la proportionnalité est perdue. En effet, la multiplication est tellement importante que les ions positifs cumulés (vitesse de migration lente) déforment le champ électrique.

Si la tension électrique appliquée continue à augmenter, une réaction en chaîne d'avalanches se produit tout au long de l'anode. Le courant de sortie est donc saturé avec une amplitude du signal indépendante de l'énergie initiale déposée dans le détecteur. Ce régime de fonctionnement est celui des compteurs Geiger-Müller. Il a la caractéristique d'avoir une amplitude élevée mais ne permet pas de mesurer l'énergie perdue par la particule.

Concernant le choix du gaz, il est préférable d'utiliser un gaz peu électro-négatif, comme un gaz noble, pour éviter la recombinaison des charges. Les gaz fréquemment utilisés sont l'Argon ($w = 26$ eV) ou le Xénon ($w = 22$ eV selon le Tableau 6.1 de [11]). Néanmoins, le réarrangement du cortège atomique de l'atome, suite à l'ionisation, conduit à l'émission d'UV qui peuvent interagir dans les électrodes et y arracher des électrons. Pour absorber les UV sans émettre de charge électrique, un gaz poly-atomique, comme le CO_2 , le CH_4 ... est souvent rajouté au mélange. Les détecteurs gazeux utilisent couramment des mélanges Ar/ CH_4 (90%/10%) [17], Ar/ CO_2 (80%/20%)...

Pour notre application, un détecteur gazeux devrait respecter différents critères :

- L'amplitude du signal doit être assez élevée pour sortir du bruit ;
- Pour faciliter le traitement des données (sélections en énergie), il est préférable d'avoir l'information sur l'énergie déposée dans le gaz ;
- Le temps mort du détecteur doit être faible afin de permettre un taux de comptage élevé (jusqu'à 100 kHz).

Par conséquent, la chambre à ionisation est éliminée car l'amplitude du signal sera trop faible. Le compteur Geiger Müller a un temps mort de l'ordre de 50 - 100 μs [17], ce qui risque de limiter le taux de comptage. En plus, comme l'amplitude de signal n'est pas proportionnelle à l'énergie déposée dans le gaz, le compteur Geiger Müller ne permet pas d'appliquer des sélections en énergie. Finalement, seul le compteur proportionnel répond aux critères et sera envisagé pour notre application. Il produit une avalanche électronique, qui permet de multiplier la charge électrique, et qui donne un signal de forte amplitude et proportionnel à l'énergie déposée par les particules incidentes. Il est donc adapté pour mesurer des particules qui déposent peu d'énergie. L'efficacité d'un compteur proportionnel pour les particules chargées peut être très élevée 98 - 99% [11].

1.3.2 Détecteur à scintillation

Le détecteur à scintillation utilise le phénomène de scintillation. Le matériau convertit en lumière une partie de l'énergie qui y est déposée par un rayonnement ionisant. Les scintillateurs peuvent être classés en deux catégories : organique et inorganique. Ils peuvent être sous forme liquide, solide ou gazeuse. Ici, seuls les scintillateurs solides seront discutés.

Les scintillateurs organiques les plus utilisés sont en matière plastique, polyvinyltoluène, polystyrène ou polyphénylbenzène, avec une densité faible $\rho \sim 1$ g/cm³. Ils ont l'avantage

d'avoir une constante de décroissance lumineuse rapide ($\tau = 2 - 3$ ns), ce qui leur permet d'accepter des taux de comptage élevés. En plus, il existe en grandes tailles et est facile à usiner. Ils ont également un prix relativement raisonnable par rapport à d'autres détecteurs (scintillateur inorganique, semi-conducteur). Les désavantages sont des rendements lumineux assez faibles (~ 100 eV par photon de scintillation) et des résolutions en énergie moyennes.

Les scintillateurs inorganiques sont basés sur une structure cristalline, comme les NaI(Tl), CsI(Tl), BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), YAP(YAlO_3), ZnS(Ag)... Ils sont plus lents que les scintillateurs organiques (~ 20 ns [20] à ~ 1 μs [21]). Et leurs densités et Z moyen sont plus élevés. Certains d'entre eux ont une bonne résolution en énergie (7% à 662 keV pour le NaI(Tl) [22][23], 2,6% à 662 keV pour le LaBr₃ [22]) grâce à un rendement lumineux élevé.

Dans le cas des scintillateurs organiques, les molécules constituant les scintillateurs sont excitées et émettent de la lumière par fluorescence ou phosphorescence lors de leur dé-excitation. L'énergie transférée en lumière de fluorescence par unité de longueur dL/dx [MeV/cm] est donnée par la loi empirique de Birks [17] en fonction de l'énergie déposée dans le scintillateur par la particule chargée par unité de longueur (dE/dx en MeV/cm) :

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}, \quad (1.10)$$

où k sont des coefficients de quenching ; S est l'efficacité de scintillation ; kB est la constante de Birks caractéristique du milieu. Cette efficacité dépend du matériau du scintillateur et du type de particule.

Lorsque le scintillateur est excité par des électrons rapides d'une façon directe ou indirecte (créés par des photons), le quenching est faible et la formule devient :

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx}. \quad (1.11)$$

Cette formule implique la linéarité de réponse du scintillateur : la quantité de lumière émise par scintillation est proportionnelle à l'énergie déposée dans ce matériau.

En plus de la proportionnalité, un scintillateur organique a l'avantage d'avoir un temps d'émission de lumière assez court (quelques ns à quelque centaines ns), ce qui lui permet d'accepter des taux de comptage élevés.

1.3.2.1 Configuration d'un détecteur à scintillation

La lumière de scintillation doit être convertie en un signal électrique afin de faciliter la lecture et le traitement de données. Un photo-détecteur doit être utilisé pour cette fonction. Il y a plusieurs types de photo-détecteurs : tube photo-multiplicateur (PMT), photo-diode, Silicium photo-multiplicateur (SiPM), etc. Malgré le fait qu'il ait un rendement quantique plus bas que les autres ($\sim 25\%$ pour les photons de $\lambda \sim 430$ nm contre 45% pour le SiPM [24]), le PMT est choisi pour notre détecteur à scintillation car il peut être de grande surface et

permet l'analyse en forme du signal. En plus, il a un prix raisonnable, de quelques centaines d'euro.

Le schéma d'un détecteur à scintillation couplé à un PMT est présenté en Figure 1.5. Le scintillateur est couplé à un photo-multiplicateur qui émet des électrons suite à l'interactions des photons dans la photo-cathode. Les dynodes permettent de multiplier ces électrons pour obtenir un signal électrique d'amplitude élevée. Le couplage entre le scintillateur et le photomultiplicateur peut être réalisé avec de la graisse optique, un polymère en silicone ou de la colle optique, car ils possèdent un indice de réfraction proche de celui du scintillateur et du verre de la fenêtre d'entrée du PMT. Dans le cas où la taille de la surface du scintillateur est plus grande que celle du PMT, un guide de lumière peut être utilisé pour conduire la lumière vers la photo-cathode du PMT. Un réflecteur doit entourer le scintillateur et le guide de lumière afin de réfléchir la lumière créée dans le scintillateur vers la fenêtre d'entrée du PMT. En pratique, pour la détection de particules chargées de faible énergie, ce réflecteur doit être le plus fin possible en face d'entrée du scintillateur (Mylar aluminisé, feuille d'aluminium fine).

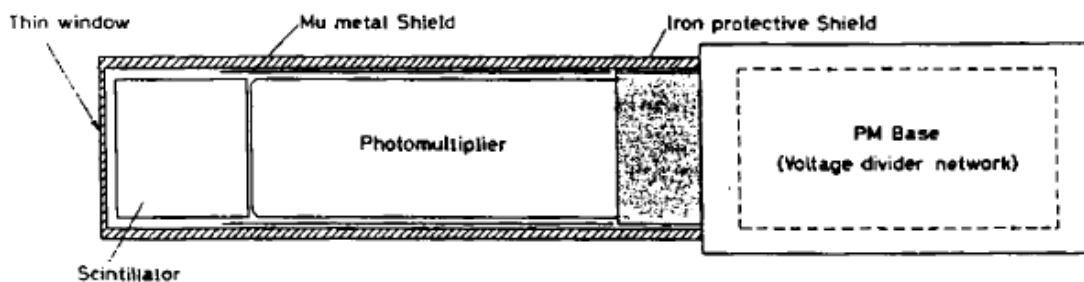


Figure 1.5 Configuration d'un détecteur à scintillation. Figure extraite de [11]

1.3.2.2 Détecteur Phoswich

Certains scintillateurs inorganiques ont une émission de lumière dont la forme en temps est fonction du type de particule qui y a interagit. Une analyse en forme du signal ou PSD (Pulse Shape Discrimination), peut alors permettre d'identifier le type de particule incidente. Ceci peut être utilisé pour identifier différents ions en physique nucléaire avec des CsI [25], de faire de la discrimination gamma/neutron avec des scintillateurs organiques [2][26] ou encore de la discrimination alpha/bêta avec un scintillateur inorganique $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ (GAGG) : Ce^{3+} [27].

Une autre application courante de cette analyse en forme du signal est l'utilisation de la technologie Phoswich (Phosphor Sandwich) pour effectuer la discrimination des particules. Un Phoswich est composé de plusieurs scintillateurs, avec des temps caractéristiques différents, couplés à un seul photo-détecteur [17]. A l'aide de l'analyse en forme du signal à posteriori, les interactions dans les différents étages du détecteur peuvent être identifiées, ce qui peut permettre de discriminer des particules les unes des autres.

Prenons l'exemple du Phoswich en scintillateurs plastiques pour expliquer le fonctionnement de cette technologie. Il est constitué d'une combinaison d'un scintillateur rapide (type EJ212 [28] avec $\tau = 2,4$ ns) et d'un scintillateur lent (type EJ240 [28] avec un temps de décroissance principale $\tau = 285$ ns). En fonction de l'interaction dans les scintillateurs (rapide, lent ou les deux), la forme de signal obtenue varie, ce qui permet d'identifier dans quel scintillateur la particule a interagi. La forme du signal obtenu avec un Phoswich est présentée en Figure 1.6. Par exemple, si la forme du signal n'a qu'une composante rapide (rouge), la particule n'a déposé de l'énergie que dans le scintillateur rapide et non dans le deuxième étage. Cet événement a donc une charge rapide élevée et une charge lente très faible. Lorsque les deux étages sont touchés, la forme de signal comprend des composantes rapide et lente (bleu).

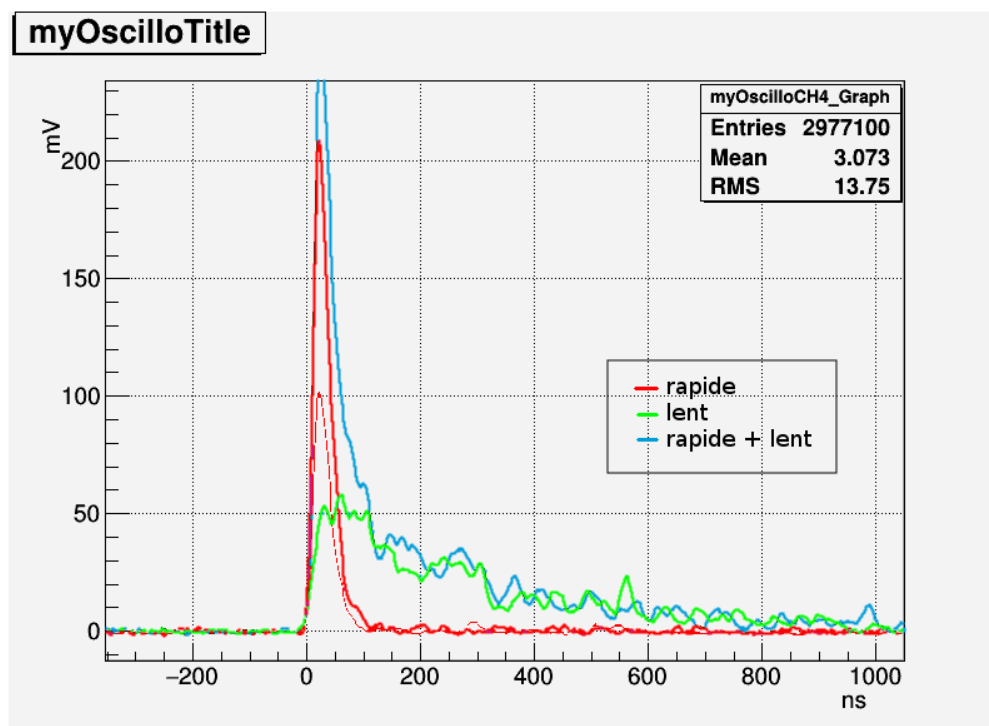


Figure 1.6 Forme du signal, issu d'un Phoswich en scintillateurs plastiques, à l'oscilloscope, quand il y a seulement la composante rapide due au EJ212 (rouge) ; seulement la composante lente due au EJ240 (vert) ; composante rapide + lente (bleu).

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'interaction des rayonnements d'intérêt pour la thèse (électrons et photons) a été discutée en se focalisant sur les électrons de quelques centaines de keV maximum et les photons jusqu'à 2 MeV.

Les mécanismes d'interaction des électrons ont d'abord été discutés. La portée permet de décrire la profondeur maximale atteinte, en moyenne, par un électron dans la matière. Par exemple, dans un plastique de densité 1, la portée est de $140 \mu\text{m}$ pour les électrons de 0,1 MeV et de $\sim 800 \mu\text{m}$ pour ceux de 0,3 MeV. Pour les électrons bêta qui ont un spectre

continu, une atténuation exponentielle du nombre d'électrons est observée avec l'épaisseur du milieu traversé. Cela aura une importance quand l'interaction des bêta dans le contaminamètre sera étudiée car une grande majorité des bêta seront arrêtés à une profondeur inférieure à celle des électrons d'énergie $T_{\beta,max}$. En ce qui concerne l'interaction des photons avec la matière, la diffusion Compton est l'interaction prédominante parmi les trois modes d'interactions avec le scintillateur plastique pour les photons d'intérêt ($E_{\gamma} < 2 \text{ MeV}$). **Compte tenu de l'objectif de la thèse, qui consiste à détecter les bêta dans un bruit de fond de photons élevé, le détecteur devra avoir un Z moyen faible et une épaisseur faible.**

Les principes de fonctionnement des scintillateurs et des détecteurs gazeux ont été rappelés dans ce chapitre. **Les candidats de détecteurs envisagés sont donc : le détecteur gazeux du type compteur proportionnel et le scintillateur organique.** Le compteur proportionnel est une option retenue pour la suite car il permet d'avoir une amplitude de signal importante avec une faible densité de matière. Le scintillateur plastique est la deuxième option retenue grâce à ses avantages comme un temps de décroissance lumineux court, une linéarité de réponse en fonction de l'énergie déposée et une densité faible. Une application importante du détecteur à scintillation est la technologie Phoswich, qui, peut permettre de discriminer les particules par analyse en forme du signal.

Chapitre 2

Éléments de radioprotection

Suivant la définition de l'ASN [29]¹, " *la radioprotection est définie comme l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes directement ou indirectement, y compris lors des atteintes portées à l'environnement. La radioprotection vise à empêcher ou à réduire les risques sanitaires liés aux rayonnements ionisants, en s'appuyant sur trois grands principes : justification, optimisation et limitation des doses de rayonnements.* "

La thèse s'inscrit dans le projet d'EDF/R&D : RODIN (Rassembler pour Optimiser les Doses sur les Installations Nucléaires). Le développement du contaminamètre vise à participer à l'amélioration des performances de contrôle de la contamination surfacique pour la radioprotection en CNPE. Les grandeurs de radioprotection qui seront utiles ainsi qu'un aperçu des risques radiologiques en CNPE vont être présentés dans ce chapitre.

2.1 Grandeurs et unités en radioprotection

Pour quantifier les risques radiologiques, la radioprotection utilise des grandeurs dosimétriques. Ces grandeurs sont basées sur des grandeurs physiques, qui multipliées par des coefficients de conversion, permettent d'obtenir des grandeurs de protection utilisées dans la réglementation. Comme les grandeurs de protection sont obtenues par des calculs et ne sont pas mesurables, des grandeurs opérationnelles ont été définies pour les estimer. Certaines publications de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) [30] [31] donnent des coefficients de conversion permettant de passer de la fluence des particules (grandeurs physiques) aux grandeurs de protection ou aux grandeurs opérationnelles.

2.1.1 Grandeurs physiques

Les grandeurs radiométriques et dosimétriques fondamentales sont les trois grandeurs physiques suivantes [13] :

1. Autorité de Sûreté Nucléaire

- **Fluence Φ** La fluence de particules est définie comme le nombre de particules N par unité de surface A [m^2].

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.1)$$

- **Dose absorbée D** Cette grandeur physique, permet d'évaluer le risque lié à une exposition. Elle a été définie avec le moins d'hypothèses possibles pour être la plus universelle. Elle correspond à une quantité d'énergie déposée par unité de masse du milieu traversé par le rayonnement ionisant.

$$D = \frac{dE}{dm}, \quad (2.2)$$

avec dE l'énergie déposée [J] dans la masse dm [kg]. L'unité de la dose absorbée est le Gray (1 Gy = 1 J/kg).

- **Kerma K** Différent de la dose absorbée qui s'intéresse à l'énergie déposée, le Kerma est défini à partir de l'énergie transférée aux particules secondaires par des particules indirectement ionisantes (photons par exemple), dans le volume d'intérêt :

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}, \quad (2.3)$$

avec dE_{tr} l'énergie transférée [J] dans la masse dm [kg]. L'unité du Kerma est identique à celle de la dose absorbée : Gray.

Pour les photons, $K = D$ lorsque la condition de l'équilibre électronique est atteinte.

Le kerma dans l'air est utilisé en pratique comme grandeur de référence mesurable pour la métrologie des photons [13].

2.1.2 Grandeurs de protection

La grandeur physique de dose absorbée (D) ne suffit pas pour décrire la nocivité du rayonnement sur les tissus humains. Pour ce faire, la CIPR, dans sa publication 74 [30], a défini des grandeurs de protection : dose équivalente et dose efficace. La dose équivalente permet de prendre en compte le type de rayonnement alors que la dose efficace prend en compte en plus la radio-sensibilité des tissus.

Dose équivalente (H_T) et facteur de pondération ω_R Cette notion de dose équivalente permet de prendre en compte la nocivité du rayonnement, qui dépend du type et de l'énergie du rayonnement. Cette nocivité spécifique est prise en compte grâce à un facteur de pondération ω_R sans unité.

$$H_T = \omega_R \times D, \quad (2.4)$$

L'unité de la dose équivalente est le sievert (Sv).

Par convention, le facteur de pondération des rayonnements électromagnétiques (e- et γ) est pris égal à $\omega_R = 1$. Les alpha, en raison de leur dE/dx plus élevé, conduisant à une toxicité pour les cellules plus grande ont un $\omega_R = 20$ [13].

Dose efficace E La dose équivalente ne prend pas en compte la sensibilité spécifique des tissus/organes, qui peut être différente pour un rayonnement donné. C'est pourquoi la dose efficace est définie pour prendre en compte la radio-sensibilité des différents organes. La dose efficace est obtenue en multipliant la dose équivalente par un facteur de pondération pour les tissus ω_T [13].

$$E = \sum_T \omega_T \times H_T = \sum_T \omega_T \times (\omega_R \times D)_T, \quad (2.5)$$

Par exemple, $\omega_T = 0,2$ pour les gonades ; $\omega_T = 0,12$ pour les moelle osseuse, colon, poumons et estomac [32]... C'est une grandeur qui permet de prendre en compte une exposition non uniforme de l'organismes. L'unité de la dose efficace est le sievert (Sv).

2.1.3 Grandeurs opérationnelles

Les grandeurs de protection ne sont pas directement mesurables. Les grandeurs opérationnelles ont donc été définies par la CIPR dans sa publication 74 [30] pour les estimer, de façon majorante.

2.1.3.1 Équivalent de dose H

L'unité des grandeurs opérationnelles est également le sievert. Les estimateurs ont deux domaines d'application :

1. Surveillance de zone : équivalent de dose ambiant $H^*(d)$, équivalent de dose directionnel $H'(d, \Omega)$;
2. Surveillance individuelle : équivalent de dose individuel $H_p(d, \alpha)$.

Dans ces notations, "d" correspond à la profondeur équivalent tissu à laquelle la dose est mesurée et Ω ou α représentent la direction suivant laquelle les rayonnements arrivent sur l'organisme.

$H^*(d)$ est destinée à estimer la dose efficace E. Pour les rayonnements fortement pénétrants comme les rayonnements photoniques, la valeur de profondeur recommandée est $d = 10 \text{ mm}$: $H^*(10)$.

$H'(d, \Omega)$ est applicable aux rayonnements faiblement pénétrants. Pour estimer la grandeur de protection dose équivalente à la surface, une profondeur $d = 70 \mu\text{m}$ (70 mg cm^{-2}) est spécifiée.

$H_p(d)$ est l'équivalent de dose dans les tissus mous, en un point du corps situé à une profondeur d [13]. Les valeurs usuellement utilisées sont de $70 \mu\text{m}$ pour la dose en surface, 3 mm pour la dose au cristallin et 10 mm pour la dose en profondeur.

Équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ L'estimateur $H^*(10)$ va être détaillé. En effet, dans mon étude, c'est $H^*(10)$ qui permet d'obtenir le flux des photons correspondant à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$.

$H^*(10)$ est un estimateur légèrement majorant de la grandeur de protection pour les photons de 10 keV à 10 MeV [13]. Selon la CIPR74 [30], $H^*(10)$ est défini comme l'équivalent de dose à une profondeur de 10 mm dans la sphère ICRU¹ sous une fluence de rayonnements unidirectionnelle et expansée. Le schéma est représenté sur la Figure 2.1. La sphère ICRU, de diamètre 30 cm, est le modèle de référence pour simuler le corps humain dans la recommandation 74 de la CIPR. Elle est constituée d'un matériau équivalent-tissu avec la composition massique suivante : 76,2% d'O, 10,1% d'H, 11,1% de C et 2,6% de N, et une densité de 1 g/cm^3 .

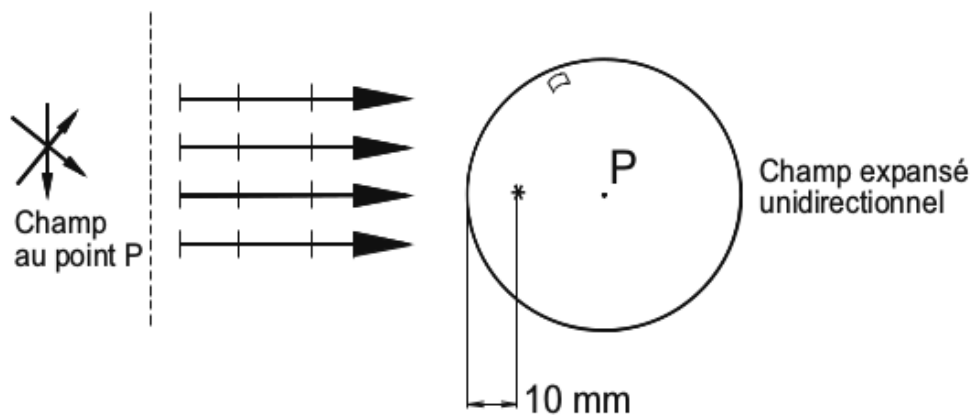


Figure 2.1 Protocole d'irradiation et de calcul de l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ pour les rayonnements fortement pénétrants au moyen d'un champ expansé et unidirectionnel sur la sphère ICRU (Figure extraite de [13]).

Le débit d'équivalent de dose dH^*/dt (en $\mu\text{Sv/h}$) est un paramètre important qui doit être mesurable par un appareil de dosimétrie. C'est une grandeur pratique permettant d'estimer la dose efficace qui permet de définir le zonage de radioprotection (cf. 2.2.3).

2.1.4 Facteurs de conversion CIPR

Les facteurs de conversion sont essentiels pour passer de la fluence Φ (cm^{-2}) à une dose efficace/équivalente (Sv). Les recommandations contenues dans la CIPR 74 donnent le facteur de conversion $H^*(10)/\Phi$ (en pSv.cm^2) pour des divers types de rayonnements d'énergies différentes (cf. Tableau A.1).

Comme évoqué précédemment, la CIPR74 a simulé le corps humain en le simplifiant par une sphère ICRU. La recommandation la plus récente de la CIPR, la publication CIPR116 [31] utilise un modèle de référence plus évolué basé sur un fantôme anthropomorphique «

1. La Commission internationale des unités et mesures radiologiques, couramment abrégée ICRU pour International Commission on Radiation Units and Measurements

voxelisé » et différentes géométries de source (antéropostérieure (AP), postéro-antérieure (PA), latérale (LAT), rotationnelle (ROT), isotrope (ISO)). Elle fournit des coefficients de conversion ($H^*(10)/\Phi$) de façon plus diversifiée (type de rayonnement, énergie de particule, direction d'émission) (cf. Tableau A.2).

Ces facteurs permettent de déduire l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ ou la dose efficace pour une fluence de rayonnement donnée : pour un type de particule, une énergie et une géométrie de source fixés. Les détails de leurs applications pour la définition des sources gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ utilisées dans la suite de la thèse sont présentés en annexe A. Il faut environ 10^6 photons par seconde sur la surface de contaminamètre pour avoir un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$.

2.2 Risques radiologiques en zone dans un CNPE

Une centrale nucléaire, appelé CNPE en France, produit de l'électricité en transformant l'énergie émise par la réaction de fission nucléaire.

Dans un réacteur à pleine puissance, le flux neutronique dans le coeur est de l'ordre de $10^{14}/\text{cm}^2/\text{s}$ [13]. Les radionucléides créés, présents dans le réacteur, peuvent se classer en trois catégories [1] :

- Produits de fission qui sont produits lors des fissions des noyaux fissiles du combustible ;
- Chaînes des actinides qui sont produits suite aux captures des neutrons par les noyaux lourds fertiles ;
- Produits d'activation créés suite aux captures des neutrons par d'autres noyaux présents dans le réacteur : matériaux de construction, eau primaire, etc.

Comme les deux premiers produits sont confinés dans les gaines des crayons combustibles (sauf en cas de rupture des gaines), ils ne sont pas dans le domaine de l'étude. Par contre, les produits d'activation ne sont pas confinés par la gaine et peuvent être problématiques, en terme de radioprotection, car ils peuvent circuler dans le circuit primaire et se déposer sur les structures. Ils peuvent alors induire des risques d'exposition externe et/ou interne des travailleurs quand ils interviennent près du circuit primaire comme dans le BR (bâtiment réacteur) ou le BAN (bâtiment des auxiliaires nucléaires).

2.2.1 Risque d'exposition et de contamination

Les risques radiologiques liés aux produits d'activation présentés précédemment se classifient principalement en deux types : exposition et contamination.

L'exposition externe correspond à une situation où la source radioactive est à l'extérieur du corps humain. Elle est quantifiée par la grandeur opérationnelle : débit de dose ambiant $dH^*(10)/dt$ pour la surveillance de zone. Si l'exposition provient de radio-éléments localisés, cet endroit est défini comme un point chaud. L'exposition interne est due à la présence d'isotopes radioactifs à l'intérieur du corps humain.

Contrairement aux risques d'exposition externe, le risque de contamination, externe ou interne, est présent dans le cas où les travailleurs ont un risque d'être en contact direct avec les radioéléments. Ce contact peut être dû à une contamination de l'environnement de travail. Si la contamination est distribuée sur une surface, l'activité par unité de surface exprimée en Bq/cm^2 est utilisée pour quantifier cette contamination surfacique. Si la contamination se disperse dans un volume, il s'agit d'une contamination volumique, en Bq/m^3 .

2.2.2 Problématique du ^{60}Co en CNPE

Pendant un arrêt de tranche, les doses issues des produits d'activation représentent 90% des doses reçues par les intervenants, comme présenté dans la Figure 2.2 (extraite de [1]). Parmi ces produits, les plus pénalisants sont le ^{60}Co et le ^{58}Co [1], qui représentent 80% du débit de dose rencontré.

Débit de dose

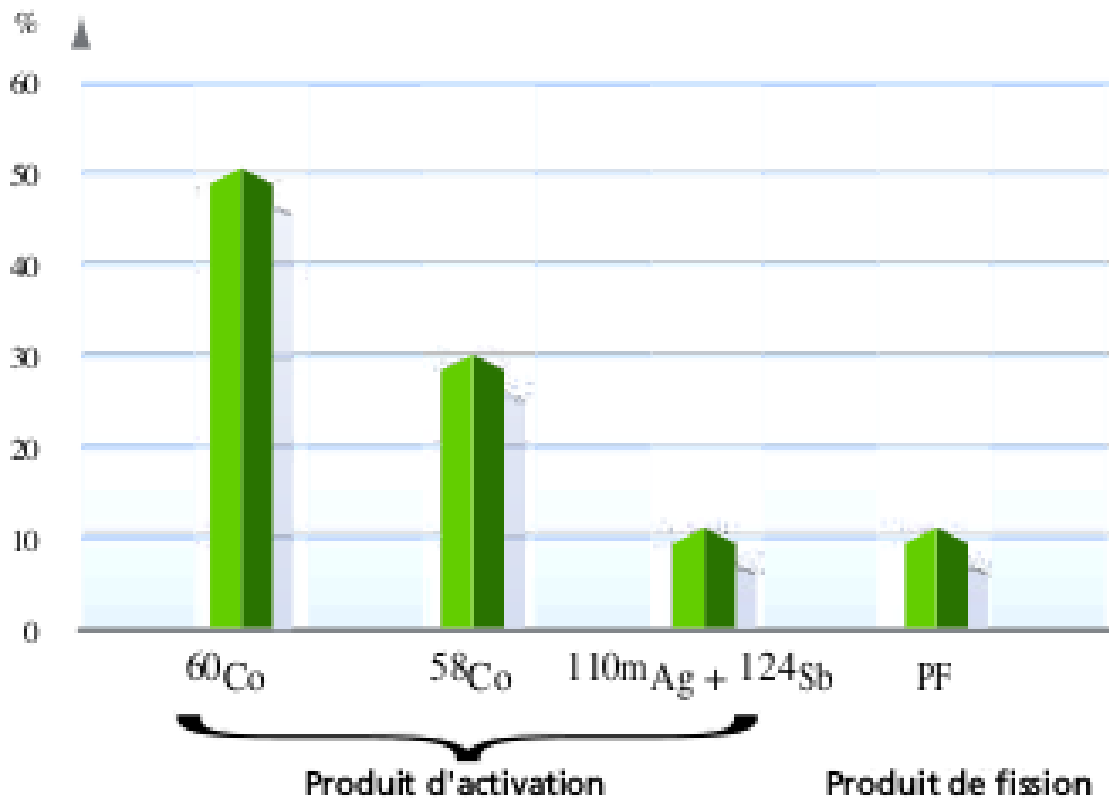


Figure 2.2 Contribution relative moyenne, de différents radio-isotopes, au débit de dose au poste de travail. Figure extraite de [1].

La Figure 2.3 [1] présente le processus de production des produits d'activation, ^{58}Co et ^{60}Co , dans le circuit primaire. Suite à un phénomène de corrosion-érosion, des produits de corrosion qui contiennent du ^{58}Ni et du ^{59}Co , sont mis en circulation dans le circuit primaire. Lors de leurs passages dans le flux neutronique du coeur, ils s'activent conduisant à

la formation d'isotopes radioactifs : ^{58}Co et ^{60}Co . Ces produits d'activation circulent dans le fluide primaire et peuvent se déposer sur les structures.

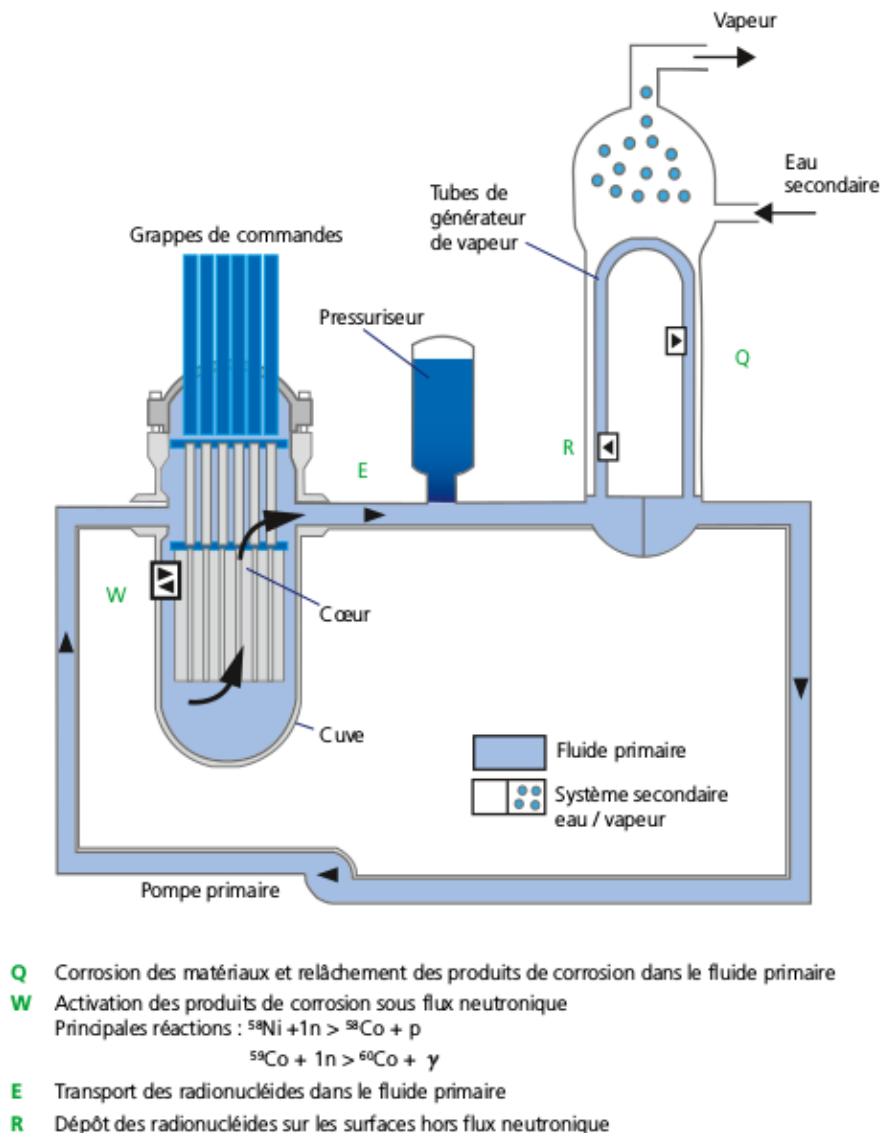


Figure 2.3 Schéma explicatif du processus de production des produits d'activation, ^{58}Co et ^{60}Co , dans le circuit primaire d'un réacteur REP (Réacteur à Eau Pressurisée). Figure extraite de [1].

Le risque d'exposition externe issu du ^{60}Co est plus important que celui du ^{58}Co pour trois raisons :

1. **abondance du ^{60}Co à cause de sa demi vie plus longue.** Avec une demi vie $T_{1/2} = 5,27$ ans, le ^{60}Co s'accumule dans le circuit primaire tandis que le ^{58}Co avec une période de $T_{1/2} = 70,86$ jours se désintègre quasiment entièrement au bout de quelques centaines de jours ;
2. **problème de dose à cause de gamma de haute énergie.** Le ^{60}Co émet deux gamma de haute énergie, à 1,17 et 1,33 MeV, alors que le ^{58}Co émet principalement un gamma de 0,81 MeV ;

3. **difficulté de détection de la contamination bêta issue du ^{60}Co à cause de la faible énergie des électrons émis.** Comme le ^{60}Co émet des particules bêta à basse énergie, $T_{\beta,max} = 0,316 \text{ MeV}$, il pose des difficultés de détection.

Par conséquent, le ^{60}Co est une source problématique en contamination, à cause de sa présence importante dans le circuit primaire et de la difficulté de détection. Il est donc important de surveiller et contrôler les risques liés au ^{60}Co . Actuellement, la détection de la contamination dûe au ^{60}Co est effectuée indirectement en faisant un frottis in situ pour une mesure ex-situ dans un bruit de gamma bas. EDF/DPN souhaite donc un appareil qui effectue cette mesure in-situ, au plus près de la zone contaminée, pour diminuer la dose reçue par les intervenants et limiter les risques de contamination de zones propres. C'est pourquoi cette thèse est destinée à étudier un appareil dédié à la mesure de contamination bêta issue principalement du ^{60}Co dans un bruit de fond gamma élevé.

2.2.3 Zonage en installation nucléaire

Afin de faciliter le contrôle et la prévention des risques radiologiques, l'espace de l'installation nucléaire est découpé en différentes zones en fonction des risques de contamination et d'exposition.

Zonage radiologique En fonction du débit de dose efficace corps entier (DeD), des zones de radioprotection : zone surveillée et zone contrôlée sont définies comme présenté sur la Figure 2.4. La grandeur de protection : dose efficace corps entier (ou dose équivalente) est utilisée pour définir les zones dans la législation. Quand le débit de dose augmente, la zone passe de zone surveillée à zone contrôlée (zone verte, jaune, orange puis rouge).

Un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ correspond donc à une zone jaune.

Zones propreté/déchets - DI104 La directive interne EDF DI. 104 [33] précise que dans le domaine des déchets, la réglementation impose de définir les zones où les déchets produits sont conventionnels, c'est-à-dire évacuables dans des filières classiques, et les zones où les déchets produits sont nucléaires, c'est-à-dire évacuables dans des filières spécialisées (centres de stockage des déchets très faiblement ou faiblement actifs). Afin de maîtriser la contamination issue des circuits véhiculant les fluides contaminés, EDF a décidé de classer les différents locaux en trois niveaux de propreté en fonction de la concentration en contamination bêta :

- locaux nucléaires propres (NP) lorsque la contamination non fixée est inférieure à $0,4 \text{ Bq/cm}^2$;
- locaux nucléaires faiblement contaminés (N1) lorsque la contamination non fixée est inférieure à 4 Bq/cm^2 ;
- locaux nucléaires contaminés (N2) lorsque la contamination non fixée est supérieure à 4 Bq/cm^2 .

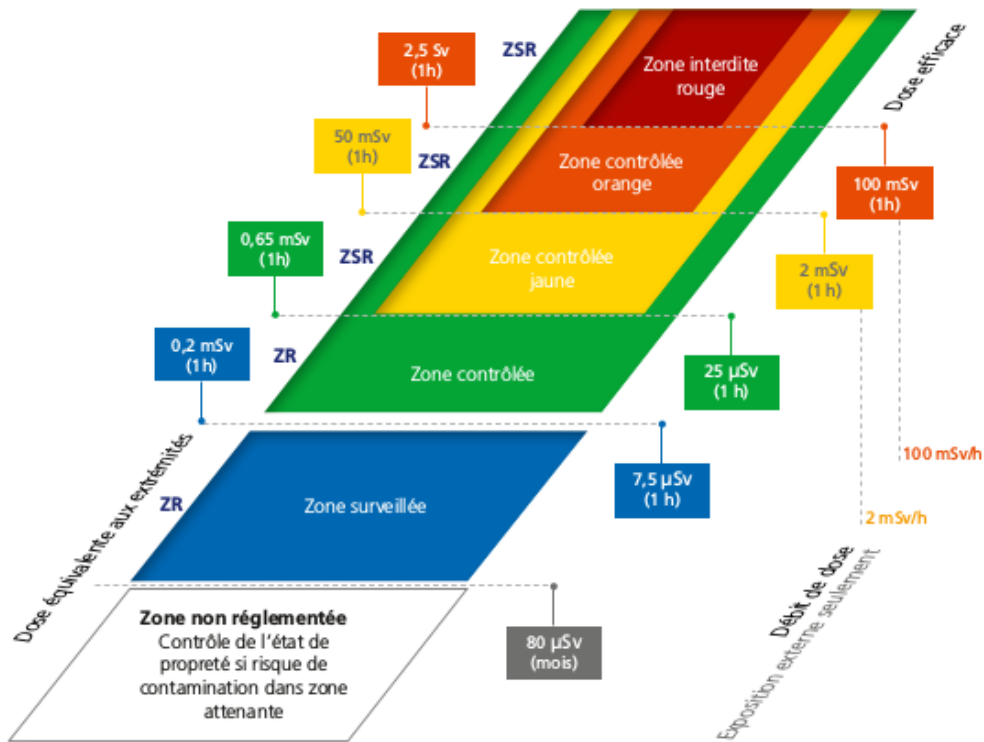


Figure 2.4 Synthèse des limites d'exposition radiologiques liées au zonage de radioprotection. Les valeurs limites pour les doses équivalentes et la dose efficace correspondent à des «doses susceptibles d'être reçues en 1 heure» (et non à des «débits de dose» au sens propre). Figure extraite de [13].

Le critère permettant de délimiter un local propre est une contamination inférieure à $0,4 \text{ Bq/cm}^2$. Ce niveau de contamination doit donc être contrôlé et constitue une performance demandée par les cahiers des charges aux appareils de mesure de contamination, comme celui imposé par notre client EDF/DPN.

2.3 Conclusion

Au cours de ce chapitre, les éléments de radioprotection ont été discutés. Les grandeurs utilisées en radioprotection ont d'abord été présentées. A partir de la grandeur physique (dose absorbée D), les grandeurs de protection (dose équivalente et dose efficace) ainsi que les grandeurs opérationnelles ont été définies. Ces dernières, comme l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$, sont mesurables et fréquemment utilisées pour la surveillance de zone.

Ensuite, les risques radiologiques en CNPE ont été abordés. Les produits d'activation contribuent à 90% de la dose reçue par les travailleurs. Parmi eux, **le ^{60}Co est le plus problématique car il pose des risques d'exposition importants et des risques de contamination bêta.** Pour mieux gérer les risques radiologiques, le zonage de radioprotection et le zonage de propreté/déchet ont été définis. **La détection de la contamination bêta à $0,4 \text{ Bq/cm}^2$, qui est la limite de la zone nucléaire propre (NP), est un enjeu majeur pour EDF.**

Chapitre 3

Normes et état de l'art des contaminamètres

Après avoir présenté les risques radiologiques en CNPE, nous allons maintenant voir comment identifier et estimer ces risques. Les instruments pour mesurer les grandeurs radiologiques existant en CNPE sont classifiés en fonction de leur utilisation.

Il y a trois principaux types d'instruments :

- Le **dosimètre individuel** permet d'avoir un suivi dosimétrique personnel ; il est essentiel à la surveillance du personnel ;
- Le **radiamètre** mesure le débit de dose ambiant ; il est utilisé pour la surveillance de zone ;
- Le **contaminamètre**/moniteur de contamination mesure la contamination, ce qui permet de contrôler la zone propreté/déchets (cf. 2.2.3).

Notre étude portera sur un contaminamètre bêta pour répondre à un besoin spécifique exprimé par EDF/DPN/GPEX.

Des normes internationales ISO¹ donnent les caractéristiques et les spécifications à utiliser systématiquement pour chacun de ces instruments. Ce chapitre va présenter et discuter la norme internationale ISO 11929-1 qui définit les principaux paramètres concernant le mesurage de rayonnements ionisants. Les normes dédiées à la mesure de contamination seront abordées. Puis, le cahier des charges du contaminamètre sera présenté. Enfin, les performances des principaux contaminamètres bêta existant actuellement sur le marché seront abordées.

3.1 Norme ISO 11929 : mesurage des rayonnements ionisants

La norme ISO 11929 [34] est intitulée "Détermination de la limite de détection et du seuil de décision des mesurages des rayonnements ionisants". La première partie de cette norme

1. International Organisation for Standardization

(ISO 11929-1) précise comment prendre la décision de présence de contamination pour un échantillon non traité, c'est à dire en mesurant l'échantillon directement sans frottis.

Pour la mesure d'un échantillon, cette norme suppose que l'instabilité de l'appareil est négligeable par rapport aux fluctuations statistiques du comptage. Cette norme consiste à faire deux mesures : une mesure sans échantillon donnant un comptage du bruit de fond N_0 pendant une durée t_0 et une mesure avec l'échantillon donnant un comptage total N_s ($N_s = N_0 + N_n$) pendant une durée t_s . L'objectif est alors de chercher les valeurs statistiques associées au comptage net (N_n) dû à la présence de rayonnement ionisant.

Il est supposé que, pour une émission radioactive constante, N_0 et N_s suivent une loi de Poisson avec des espérances respectives $\rho_0 t_0$ et $\rho_s t_s$, où ρ_0 et ρ_s représentent l'espérance mathématique du taux de comptage du bruit de fond R_0 et du taux de comptage total R_s .

Comme le taux de comptage net est $R_n = R_s - R_0$, l'espérance du taux de comptage net est $\rho_n = \rho_s - \rho_0$. La variance du taux net est $var(R_n) = var(R_0) + var(R_s)$.

Pour $\rho_n = 0$ qui est le cas à étudier quand le comptage dû à la contamination est négligeable devant celui dû au bruit de fond, cette variance est

$$var(R_n) = \rho_0(1/t_0 + 1/t_s). \quad (3.1)$$

3.1.1 Seuil de décision

Le seuil de décision est défini comme une valeur critique pour être sûr de ne pas déclencher dans le bruit de fond. Le seuil de décision associé à un taux de comptage net R_n est notée R_n^* et est donné par :

$$R_n^* = k_{1-\alpha} \sqrt{var(R_n = 0)}, \quad (3.2)$$

où $k_{1-\alpha}$ est le facteur de quantiles de la loi normale (par exemple, $k_{1-\alpha} = 1,645$ si $\alpha = 0,05$) et $\sqrt{var(R_n = 0)}$ est la variance de R_n lorsque $R_n = 0$ (ou encore $R_s = R_0$).

En supposant que les distributions statistiques suivent une loi de Poisson, nous obtenons la formule simplifiée :

$$R_n^* = k_{1-\alpha} \sqrt{R_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_s} \right)}, \quad (3.3)$$

Si la valeur du seuil de décision est inférieure au taux de comptage net, il y a une contribution du signal avec une probabilité d'erreur α de déclencher sur le bruit de fond. α est fréquemment fixé à 0,05, soit une probabilité de mauvaise décision d'existence de contamination de 5%. En conséquent, pour décider s'il y a une contribution du signal, il faut comparer les valeurs mesurées avec le seuil de décision.

3.1.2 Limite de détection

Dans la norme ISO11929-1, la limite de détection " (ρ_n^*) correspondra à la plus petite espérance mathématique du taux de comptage net ρ_n pour laquelle une mauvaise décision

survient avec la probabilité β qu'il n'y a pas contribution de l'échantillon mais seulement un bruit de fond (erreur de deuxième espèce)". Autrement dit, si le taux de comptage net égale à ρ_n^* , une décision est prise que la contamination existe avec une probabilité β de se tromper. ρ_n^* est défini de la façon suivante :

$$\rho_n^* = R_n^* + k_{1-\beta} \sqrt{\text{var}(R_n = \rho_n^*)} = k_{1-\alpha} \sqrt{\text{var}(R_n = 0)} + k_{1-\beta} \sqrt{\text{var}(R_n = \rho_n^*)}. \quad (3.4)$$

Comme en général, le taux de comptage dû à l'existence de contamination est négligeable devant le taux de comptage total (recherche d'une contamination faible), $\text{var}(R_n = 0) \approx \text{var}(R_n = \rho_n^*)$. En intégrant cette relation dans la formule 3.4, on obtient :

$$\rho_n^* = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\text{var}(R_n = 0)}, \quad (3.5)$$

En insérant la formule 3.1 dans la formule 3.5 peut être simplifiée pour donner l'expression suivante de limite de détection :

$$\rho_n^* = (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \sqrt{\rho_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_s} \right)}. \quad (3.6)$$

3.1.3 Un exemple d'application

Selon la norme ISO 11929, les valeurs fréquemment utilisées sont $\alpha = \beta = 0,05$. Ces valeurs signifient un taux de faux déclenchement α (dans le bruit de fond) et la probabilité de non détection β de 5%. Elles correspondent à des valeurs de quantiles $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,645$.

En remplaçant $k_{1-\alpha}$ et $k_{1-\beta}$ par cette valeur, les formules 3.3 et 3.6 se réduisent à :

$$R_n^* = 1,645 \sqrt{R_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_s} \right)}, \quad (3.7)$$

$$\rho_n^* = (1,645 + 1,645) \sqrt{R_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_s} \right)}. \quad (3.8)$$

Dans ce cas, le seuil de décision et la limite de détection sont fonction de la racine carré du taux de comptage du bruit de fond R_0 . Il est donc naturel de chercher à diminuer le taux de comptage du bruit afin de diminuer le seuil de décision et la limite de détection. L'autre facteur important est lié aux temps des mesures du signal et du bruit de fond. En général, le temps de mesure du signal t_s est fixé, mais si $t_0 \gg t_s$, les seuils de décision peuvent être diminués : $R_n^* \approx 1,645 \sqrt{R_0 \left(\frac{1}{t_s} \right)}$. Il y a donc intérêt à faire des mesures les plus longues possibles, notamment celle du bruit de fond de façon à rendre les fluctuations sur cette mesure négligeables devant les fluctuations sur la mesure du signal brut.

3.1.4 Interprétation de la norme ISO 11929

DOSIMEX [35], un logiciel de calcul couramment utilisé en radioprotection, donne une interprétation plus concrète et intuitive des paramètres α , β du seuil de décision et de la limite de détection. Dans les documents de référence DOSIMEX, le seuil de décision est noté "SD" et la limite de détection "LD".

Ce document repose sur l'hypothèse que le comptage du bruit de fond et le comptage total sont des paramètres Poissonien. La Figure 3.1 présente les distributions du comptage net avec les valeurs du SD et de la LD associées respectivement à leurs risques d'erreur [36]. Les tests d'hypothèse sont alors définis comme les suivants :

- **hypothèse nulle en cas d'absence d'activité H_0** : l'échantillon n'est pas radioactif, la valeur de la moyenne vraie : $\mu_{net} = 0$;
- **hypothèse alternative de présence d'activité H_1** : la valeur de la moyenne vraie est parfaitement connue (sans incertitude). Elle est égale à la limite de détection : $\mu_{net} = LD$.

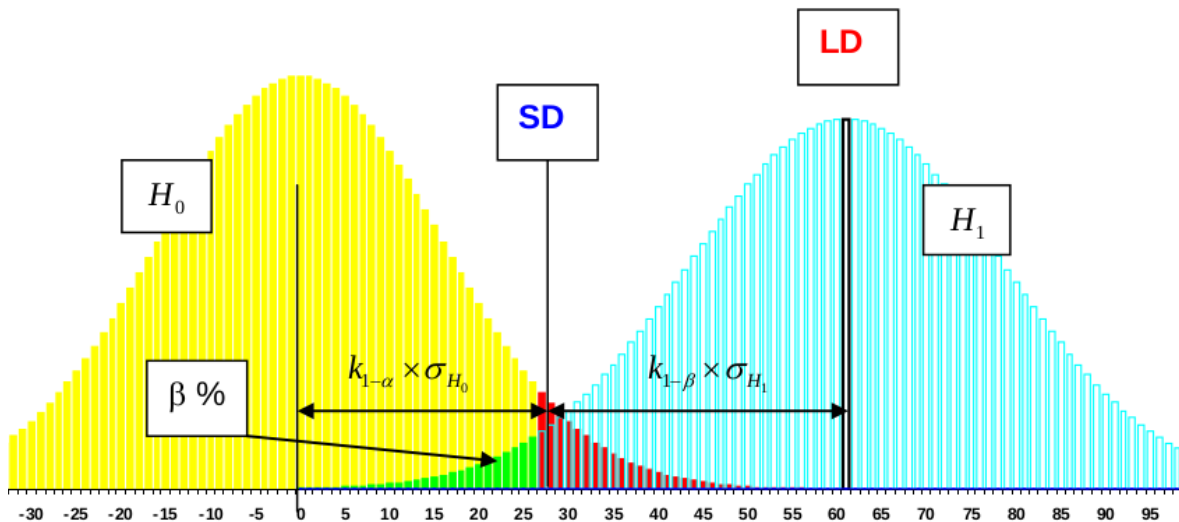


Figure 3.1 Distributions/Lois de probabilité des mesures du comptage net dans les deux hypothèse H_0 et H_1 . Le seuil de décision lié à un risque α sous l'hypothèse H_0 et la limite de détection liée à un risque β sous l'hypothèse H_1 sont représentés. Figure extraite de [36].

Si le comptage net est supérieur à SD, il y a une probabilité α (partie rouge en figure) de commettre une erreur de décider qu'il y a présence de contamination alors que ce n'est pas le cas. Autrement dit, en partant sur l'hypothèse H_0 qu'il n'y a pas de contamination, il y a α chance d'obtenir, à priori, une valeur supérieure au seuil de décision lors d'une mesure d'un échantillon sans présence de radioactivité. α représente donc une probabilité de fausse alarme.

Au contraire, si le comptage net est inférieur au seuil de décision, le résultat de la mesure n'est pas statistiquement significatif. La décision de l'absence de radioactivité devient plus délicate et il vaut mieux partir sur l'hypothèse que la radioactivité existe (hypothèse notée H_1) et s'intéresser à l'erreur de risque β . Ce risque est déterminé pour un échantillon radioactif égal, en moyenne vraie, à la limite de détection ($\mu_{net} = LD$) : lorsque le comptage égal à LD,

il y a une probabilité β de mesurer une valeur de comptage inférieure au seuil de décision (SD). Quand H_1 est vraie, il y a donc une probabilité β que le comptage net soit inférieur au SD. Une autre interprétation est qu'il y a une probabilité β qu'une contamination existe alors que l'appareil affiche un comptage net inférieur au seuil de décision.

Le "Guide de bonnes pratiques des laboratoires de mesure de radioactivité en situation post-accidentelle" de l'IRSN [37] donne les éléments importants pour interpréter les résultats. La Figure 3.2 présente que si le comptage net est inférieur au seuil de décision, la décision que l'activité est inférieure à la limite de détection est faite. Si le comptage est supérieur au seuil de décision, cela correspond à une présence de radioactivité. Par exemple, pour la recherche de contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$, le seuil de décision est fixé égal au comptage dû à une détection de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ (notons S). Quand le comptage de mesure dépasse S, il y a une contamination.

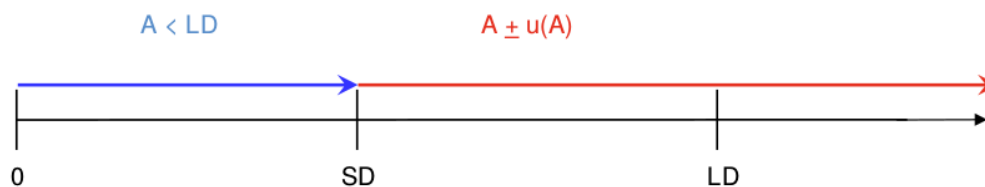


Figure 3.2 Expression du résultat en fonction du seuil et de la limite de détection. Figure extraite de [37].

Dans tous les cas, c'est le seuil de décision qui est utilisé pour prendre la décision que la radioactivité existe. Pour la suite des études, nous proposons d'appliquer le seuil de décision comme seuil de déclenchement.

3.2 Normes ISO utilisées pour la mesure de contamination

En plus de la norme qui définit la limite de détection du mesurage des rayonnements, il existe des normes ISO dédiées à la mesure de contamination, comme la norme ISO 7503 [38] qui définit les grandeurs pour la mesure de contamination et la norme ISO 60325 [39] qui précise les caractéristiques d'un appareil de contamination bêta.

3.2.1 ISO 7503-1

La norme ISO 7503-1 [38], intitulée "Évaluation de la contamination de surface : Émetteur bêta (énergie bêta maximale supérieure à $0,15 \text{ MeV}$) et émetteur alpha", spécifie les méthodes d'évaluation de la contamination et définit les grandeurs essentielles pour la mesure de contaminations alpha et bêta. Seules les sources qui émettent une particule bêta ou alpha par désintégration sont discutées dans cette norme, dont la source bêta ^{60}Co fait partie.

Les définitions du rendement de l'instrument ε_i , de l'activité surfacique A_s d'une source et du rendement de source ε_s y sont précisées.

Le rendement de l'instrument est le rapport entre le taux de comptage net de l'instrument et le taux d'émission de surface d'une source pour une configuration géométrique donnée. Pour un instrument donné, le rendement dépend de l'énergie des rayonnements émis par la source. Il est défini par les relations suivantes :

$$\varepsilon_i = \frac{n - n_B}{q_{2\pi,sc}} = \frac{n - n_B}{E_{sc} W} \quad (3.9)$$

Avec :

- $n [s^{-1}]$: Taux de comptage total mesuré ;
- $n_B [s^{-1}]$: Taux de comptage du bruit de fond ;
- $W [cm^2]$: Surface de la fenêtre de l'instrument de mesure (fenêtre d'entrée des rayonnements) ;
- $q_{2\pi,sc} [1/s]$: Taux d'émission de surface de la source de référence en dessous de la surface $W [cm^2]$ de la fenêtre sensible de la sonde ;
- $E_{sc} [1/s/cm^2]$: Taux d'émission de surface de la source de référence.

L'activité surfacique est définie comme :

$$A_s = \frac{n - n_B}{\varepsilon_i W \varepsilon_s} \quad (3.10)$$

avec ε_s le rendement de source. Il est le rapport entre le taux de particules d'un type donné, d'énergie supérieure à une énergie donnée, sortant de la surface avant d'une source ou de sa fenêtre, et le taux de particules de même type créées ou émises par la source. Par la définition, il est calculé par la formule :

$$\varepsilon_s = \frac{q_{2\pi,sc}}{A} \quad (3.11)$$

avec $A [Bq]$ l'activité de la source.

3.2.2 ISO 60325

La norme ISO 60325 : 2002 [39], intitulée "Instrumentation pour la radioprotection – Contaminamètres et moniteurs de contamination alpha, bêta et alpha/bêta (énergie des bêta > 60 keV)", est applicable à notre étude. Les éléments essentiels concernant la contamination bêta présents dans cette norme seront présentés.

3.2.2.1 Classification d'appareils de mesure de contamination

La norme ISO 60325 définit les deux appareils de mesure de contamination : moniteur de contamination bêta et contaminamètre bêta.

Le moniteur de contamination bêta mesure l'activité bêta et comporte des moyens d'alarme perceptibles (généralement visuels et/ou audibles) indiquant que l'activité surfacique A_s

associée à la contamination de la surface examinée dépasse une certaine valeur, réglable, prédéfinie.

Le contaminamètre bêta est "un appareil comprenant un ou plusieurs détecteurs de rayonnement et ensembles associés ou unités fonctionnelles de base qui est conçu pour mesurer le taux d'émission surfacique bêta associé à la contamination de la surface examinée" [39].

La différence entre les deux types d'appareils de mesure réside sur l'existence du pré-réglage du seuil d'alarme. En présence de cette alarme, l'appareil est un moniteur de contamination.

3.2.2.2 Caractéristiques sous rayonnements

Les caractéristiques de l'appareil sous rayonnements bêta et gamma sont les plus importantes pour les études. La norme ISO 60325 précise les critères à suivre pour mesurer l'uniformité de réponse surfacique, la distance source-détecteur, la réponse aux rayonnements gamma. Pour ce dernier, il est précisé que l'appareil doit être conçu pour être le moins sensible possible au bruit de fond gamma. Pour tester cette sensibilité, le détecteur doit être exposé à un débit de kerma dans l'air d'au moins $10 \mu\text{Gy/h}$ produit par une source scellée de ^{137}Cs . D'après cette norme, l'isotope de référence pour définir le bruit de fond gamma est donc le ^{137}Cs .

3.2.2.3 Temps de réponse

Selon la définition de la norme ISO 60325, le temps de réponse est le temps nécessaire après une variation brusque de la grandeur à mesurer pour que la variation du signal de sortie atteigne pour la première fois 90% de sa valeur finale M_f .

$$M_i + \frac{90}{100}(M_f - M_i), \quad (3.12)$$

où M_i est l'indication initiale et M_f l'indication finale.

La méthode d'essai pour déterminer le temps de réponse demande un facteur supérieur à 10 entre le taux de comptage initial et final. Elle précise que le temps de réponse doit être inférieur à 7 s lors d'une augmentation d'activité brusque de la contamination mesurée, et inférieur à 10 s s'il s'agit d'une baisse d'activité.

3.2.2.4 Variation de la réponse à la surface du détecteur

Le paragraphe 9.3 de la norme ISO 60325 indique les exigences de la variation de la réponse de la sonde en fonction de la position de la source par rapport à la fenêtre du détecteur. Il est précisé que la variation de réponse sur la surface du détecteur (uniformité) ne doit pas différer de plus de 25% de la valeur spécifiée par le constructeur. Il convient également que la distance entre la source et la fenêtre d'entrée soit entre 3 mm et 4 mm.

La méthode recommandée pour mesurer cette uniformité est de scinder la surface de détection en petites zones de surface proche de $25 \times 25 \text{ mm}^2$. La mesure de la réponse du détecteur est effectuée en plaçant la source devant ces différentes zones. L'uniformité de réponse est alors donnée par la formule suivante :

$$Uniformité = \pm \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}, \quad (3.13)$$

où ε_{max} est l'efficacité maximale en général obtenue lorsque la contamination se situe au centre de la surface du détecteur et ε_{min} est l'efficacité minimum en général obtenue lorsque la contamination se situe au bord du détecteur.

3.2.2.5 Limite de détection

Le calcul de la limite de détection suit la formule 3.8 définie dans la norme ISO 11929-1.

3.3 Cahier des charges et son application

Un extrait reprenant les principales exigences du cahier des charges d'EDF va être présenté. Un critère de performance (facteur de mérite) sera défini à partir de ce cahier des charges et des normes.

3.3.1 Extrait du cahier des charges

EDF/DPN/UNIE/GPEX a décrit un cahier des charges avec les exigences principales suivantes :

- Le contaminamètre cherche à détecter $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ de contamination bêta dans une ambiance gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$. Pour notre application, cette ambiance gamma est considérée comme le bruit de fond.
- La contamination bêta vient principalement du ^{60}Co . Elle peut également contenir du ^{58}Co et du ^{110m}Ag .
- Le détecteur doit fonctionner dans un bruit de fond gamma ayant des énergies variant de $0,1$ à $1,5 \text{ MeV}$.
- Le temps de mesure est de 4 s .
- Le temps de réponse suit la norme ISO 60325 (cf. 3.2) : 7 s pour une augmentation d'activité, 10 s pour une diminution d'activité.
- La surface active du contaminamètre doit être rectangulaire, avec une surface de 100 à 200 cm^2 .
- Le poids est inférieur à $1,5 \text{ kg}$.
- L'erreur de première espèce (α) est de $\alpha = 0,025$. Cette valeur est plus contraignante que les valeurs de la norme ISO 11929-1 ($\alpha = 0,05$) : 2 fois moins de fausse alarme. Le quantile associé est donc $k_{1-\alpha} = 1,96$.

— La mesure de contamination surfacique s'effectue dans diverses applications :

- contrôle des petits objets ;
- dépistage, loins du chantier ;
- contrôle des personnes à la sortie du chantier ;
- contrôle de surface.

Ce cahier des charges définit donc un appareil générique ayant des performances beaucoup plus élevées que ceux actuellement disponibles.

3.3.2 Application du cahier des charges

3.3.2.1 Calcul du seuil de décision

Comme évoqué précédemment dans 3.1.4, nous proposons d'utiliser le seuil de décision comme seuil de déclenchement. En tenant compte des exigences du cahier des charges, le temps de mesure est fixée à $t_s = 4$ s et $\alpha = 2,5\%$, la formule (3.7) devient alors :

$$R_n^* = k_{1-\alpha} \times \sqrt{R_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_s} \right)} = 1,96 \times \sqrt{R_0 \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{4} \right)}, \quad (3.14)$$

Pour rendre la notation plus intuitive, au lieu de continuer à utiliser les notation des normes, nous allons utiliser "B" pour désigner la valeur du comptage (s^{-1}) du bruit de fond pour une valeur de bruit de fond de $100 \mu\text{Sv/h}$, "SD" pour le seuil de décision et "LD" pour la limite de détection. Nous obtenons donc :

$$SD = 1,96 \times \sqrt{\frac{B \times \left(1 + \frac{4}{t_0} \right)}{4}} = 0,98 \times \sqrt{B \times \left(1 + \frac{4}{t_0} \right)}, \quad (3.15)$$

La formule montre qu'il faudra essayer d'obtenir un taux de comptage du bruit "B" le plus faible possible (appareil le moins sensible possible aux gamma). La formule 3.15 confirme également l'intérêt de faire une mesure du bruit de fond d'une durée longue. Elle va être utilisée, par la suite, pour le calcul de la performance de discrimination pour toutes les études de la thèse. La Figure 3.3 montre l'évolution du rapport $\frac{SD}{\sqrt{B}}$ en fonction de t_0 . Plus ce facteur est faible, meilleure sera la performance du contaminamètre. Le rapport du $\frac{SD}{\sqrt{B}}$ diminue rapidement de 1,39 à près de 1,1 pour un temps de mesure du bruit de fond passant de 4 s ($t_0 = t_s$) à 15 s. Il y a donc intérêt à prolonger le temps de mesure du bruit de fond à 10 - 20 s pour diminuer le seuil de décision.

3.3.2.2 Facteur de mérite : $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$

La formule 3.15 a montré que le seuil de décision est proportionnel à \sqrt{B} . Il faut donc que le taux de comptage S [1/s] dû à une contamination bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ soit au moins supérieur au seuil de décision pour que la contamination soit détectée avec une probabilité, de déclencher dans le bruit, inférieure à 2,5%. Autrement dit, pour satisfaire le cahier des charges, la relation suivante doit être satisfaite :

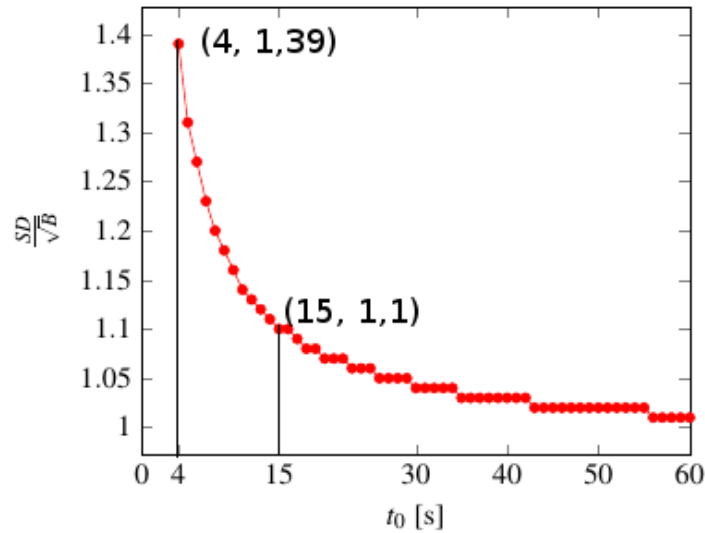


Figure 3.3 Seuil de décision sur racine carré du bruit de fond $\frac{SD}{\sqrt{B}}$ en fonction du temps de mesure de bruit de fond (t_0). $\alpha = 0,025$, temps de mesure du signal $t_s = 4$ s.

$$S > SD = 0,98 \times \sqrt{B \times \left(1 + \frac{4}{t_0}\right)},$$

d'où

$$\frac{S}{\sqrt{B}} > 0,98 \times \sqrt{\left(1 + \frac{4}{t_0}\right)}. \quad (3.16)$$

On définit donc le rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ comme facteur de mérite F.

$$F = \frac{S}{\sqrt{B}}.$$

F est le critère pour définir la performance de discrimination de différents appareils ou méthodes d'analyse. Pour la suite, nous utiliserons comme facteur de mérite ; plus le rapport $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ est élevé, meilleure est la performance.

Si $t_0 = t_s = 4$ s, il faut un rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ supérieur à 1,39. Si le temps de mesure de bruit de fond est de 15 s, ce rapport est diminué à 1,1 comme présenté sur la Figure 3.3. Autrement dit, le fait de prolonger la mesure de bruit de fond de 4 s à 15 s diminue le seuil de décision de $\sim 25\%$. Avec la même configuration de contaminamètre et dans la même condition du bruit, l'appareil est capable de détecter une activité bêta 1,25 fois plus faible.

Le temps de mesure de bruit de fond n'est pas spécifié dans le cahier des charges. Pour pouvoir comparer les différentes technologies, le facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ dans les mêmes conditions lors des études de conception ainsi que les tests du contaminamètre : un temps de mesure $t_0 = t_s = 4$ s et $\alpha = 0,025$ seront appliqués. Dans ces conditions, il faut donc atteindre $F = \frac{S}{\sqrt{B}} = 1,39$ pour répondre au cahier des charges.

A partir de ce facteur, la performance du contaminamètre s'exprime par un seuil de décision correspondant à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ (S) dans un bruit de fond (BdF), calculé de la façon suivante :

$$BdF [\mu\text{Sv/h}] = \frac{B_{max} [c/s]}{\frac{B [c/s]}{100 [\mu\text{Sv/h}]}} \quad (3.17)$$

avec B le taux de comptage gamma pour un débit de dose de 100 $\mu\text{Sv/h}$, B_{max} le taux de comptage gamma maximum pour atteindre un seuil de décision avec une contamination de 0,4 Bq/cm^2 . Selon la Formule 3.15, lorsque $t_0 = 4$ s, B_{max} se calcule par :

$$B_{max} = (S/0,98)^2/2.$$

La formule 3.17 devient donc :

$$BdF = \frac{(S/0,98)^2/2}{B} 100 [\mu\text{Sv/h}] = \frac{S^2}{B} 52 [\mu\text{Sv/h}] = 52F^2 [\mu\text{Sv/h}] \quad (3.18)$$

Le débit de dose du bruit de fond affiché est donc proportionnel au facteur de mérite au carré. Si le facteur de mérite augmente d'un facteur de 1,1, le détecteur a un seuil de décision de 0,4 Bq/cm^2 dans un bruit de fond de débit de dose 1,2 fois élevé.

3.4 Contaminamètres bêta existant sur le marché

Il existe de nombreux contaminamètres bêta sur le marché qui sont basés sur des technologies de détection différentes. Une étude de marché est effectuée pour connaître les technologies et les performances actuelles. Le Tableau 3.1 présente des exemples, classifiés par fournisseur, de contaminamètres bêta et de leurs performances.

Les technologies utilisées sont principalement les scintillateurs comme le scintillateur plastique et le scintillateur inorganique ZnS (Ag) [40], le détecteur gazeux comme le compteur Geiger Müller et le compteur proportionnel. Concernant la surface de détection, les contaminamètres ont soit de petites surfaces (15 - 50 cm^2) soit de grandes surfaces (100 - 200 cm^2) comme les CoMo 170 et RadEye AB100, qui correspondent aux exigences du cahier des charges imposé par EDF.

Sur la dernière colonne est présentée la réponse des contaminamètres aux gamma (en $c/s/\mu\text{Sv/h}$ ou $c/s/\mu\text{Gy/h}$) pour une source de ^{137}Cs sauf pour la sonde SBM-2D connectée au MIP 10, qui utilise la source ^{60}Co comme référence. Le ^{137}Cs est la source de référence définie par la norme ISO 60325 comme présenté dans le paragraphe 3.2.2.2.

La sensibilité aux gamma du ^{137}Cs est de l'ordre de 20 à 100 $c/s/\mu\text{Sv/h}$. En les extrapolant à 100 $\mu\text{Sv/h}$, 2 000 à 10 000 c/s seront détectés. Les appareils sont donc tous sensibles aux gamma. Des calculs approximatifs vont maintenant être présentés pour estimer les performances de discrimination bêta/gamma des deux principaux appareils utilisés actuellement.

Sonde SBM-2D, Canberra-Mirion En CNPE, le contaminamètre bêta le plus fréquemment utilisé en sortie de chantier est la sonde SBM-2D associée au MIP 10 [47]. Elle permet les contrôles mains/pieds, des vêtements et des objets.

Tableau 3.1 Exemples des contaminamètres/sondes bêta existant sur le marché et leurs caractéristiques. Les abréviations utilisées : NC : Non communiqué ; GM : compteur Geiger Müller ; C.P. : compteur proportionnel ; c/s : coups par seconde ; β : efficacité bêta. *source de 100 cm² ; **40% β + 6% γ ; ***30% pour la source ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y)

Appareil	Technologie	Surface sensible [cm ²]	ϵ_{β} sur 2π ⁶⁰ Co	Réponse à une activité ⁶⁰ Co [c/s/Bq]	Réponse aux gamma ¹³⁷ Cs
Bertin Instruments					
MiniTrace β [41]	GM	15,6	NC	0,125	NC
CoMo 170 [4]	ZnS (Ag)	170	23%	NC	NC
6150AD-17 [42]	GM	6,1	10%	NC	NC
BCP100 [6]	scintillateur plastique	100	NC	0,24	NC
Berthold Technologies					
LB123 [8]	GM	228	NC	NC	NC
LB124 Scint [43]	ZnS (Ag)	170	58%	NC	< 100 c/s/ μ Sv/h
LB124B [44]	C.P.	150	26%*	NC	NC
Thermo Fisher Scientific					
RadEye B20 [45]	GM	15,2	25%	NC	NC
RadEye AB100 [7]	Phoswich	100	23%	NC	~40 c/s/ μ Sv/h
Contamat FHT111M [10]	C.P.	100 /166	NC	NC	NC
Mirion - Canberra					
SB100/A [46]	scintillateur plastique	102	23%	0,13	< 25 c/s/ μ Gy/h
SBM-2D [47]	GM	2×15	46%**	0,23	12 c/s/ μ Gy/h (⁶⁰ Co)
CABV31 [9]	C.P.	200	NC***	NC	40 c/s/ μ Sv/h
Southern Scientific					
SS600B [48]	ZnS (Ag)	100	14%	NC	NC
SS400B [49]	scintillateur	19,6	23,6%	0,23	NC
Carmelec					
Dolphy β [50]	GM	15,9	NC	0,15	NC
Itech Instrument					
G5030 [51]	C.P.	52	NC	NC	NC

Cette sonde, présentée sur la Figure 3.4 (a) est constituée de deux compteurs Geiger Müller côte à côte, avec une surface active de $2 \times 15 \text{ cm}^2$. D'après les données constructeur, son efficacité de détection dans 2π est de 46% (40% β + 6% γ) pour une source de ^{60}Co . Cette efficacité lui permet d'obtenir 0,23 c/s/Bq de contamination due au ^{60}Co et sa sensibilité aux gamma du ^{60}Co est de 12 c/s/ $\mu\text{Gy/h}$. En général, la sensibilité aux gamma issus de la source de référence est légèrement supérieure que celle obtenue avec le ^{60}Co .



(a) SBM-2D



(b) CoMo 170

Figure 3.4 Photos de sonde SBM-2D [47] et de contaminamètre CoMo 170 [4].

A partir de ces données, un calcul approximatif est fait pour estimer les performances en fonction des critères du cahier des charges d'EDF. En supposant que le détecteur est soumis à une contamination β de 0,4 Bq/cm², il détecte :

$$S = 2 \times 15 \text{ cm}^2 \times 0,4 \text{ Bq/cm}^2 \times 0,23 \text{ c/s/Bq} = 2,7 \text{ c/s},$$

alors que $B = 1200 \text{ c/s}$ pour un bruit de fond de gamma de $\sim 100 \mu\text{Sv/h}$.

Cela nous donne facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ de 0,078. Suivant les caractéristiques du cahier des charges, cette sonde peut être utilisée dans un bruit de fond maximum de $\sim 0,3 \mu\text{Sv/h}$ pour détecter une contamination bêta de 0,4 Bq/cm².

Contaminamètre Como 170, Nuvia Le contaminamètre Como 170 [4] est également couramment utilisé par le service prévention des risques (SPR) en CNPE pour mesurer les contaminations α et β/γ (photo sur la Figure 3.4 (b)). Composé d'un scintillateur plastique sur lequel une couche de scintillateur inorganique ZnS est déposée, il a une efficacité de 23% dans 2π , pour une source de ^{60}Co selon le tableau 3.1. Pour une contamination de 0,4 Bq/cm², il détecte donc :

$$S = 170 \text{ cm}^2 \times 0,4 \text{ Bq/cm}^2 \times 23\%/2 = 7,8 \text{ c/s}.$$

Le CoMo 170 n'est pas capable de discriminer les bêta des gamma. Il détecte environ 15 - 25 c/s pour un débit de dose du bruit β/γ de 50 nSv/h, ce qui correspond à 30 000 - 50 000 c/s dans un bruit de fond de 100 $\mu\text{Sv/h}$.

Par conséquent, il a un rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 0,035 - 0,045. Il ne peut fonctionner que dans des bruits de fond faibles, dans un bruit de gamma inférieur à 0,1 $\mu\text{Sv/h}$, pour détecter une contamination bêta de 0,4 Bq/cm^2 .

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté la norme internationale ISO 11929-1 dédiée à la mesure des rayonnements ionisants. Le seuil de décision, qui permet de déterminer s'il y a présence de contamination, est défini à partir de la probabilité de fausse alarme α (erreur de premier espèce), du temps de mesure d'échantillon, du temps de mesure du bruit de fond et du taux de détection du bruit.

La norme ISO 7503-1 suggère la définition des paramètres essentiels associés au contaminamètre bêta : le rendement de l'instrument ε_i , le rendement source ε_s , l'activité surfacique (A_s). La norme ISO 60325 définit les exigences en temps de réponse, uniformité surfacique du détecteur, source d'étalonnage, etc. Les critères issus de ces normes vont être appliqués si le cahier des charges ne les précise pas.

Les détails du cahier des charges proposé par DPN/UNIE/GPEX ont ensuite été présentés. La performance principale exigée est une détection de 0,4 Bq/cm^2 de contamination bêta issue principalement du ^{60}Co dans un débit d'équivalent de dose ambiant de 100 $\mu\text{Sv/h}$ avec un temps de mesure de 4 s et une valeur $\alpha = 2,5\%$. **En appliquant les paramètres du cahier des charges à la définition du seuil de décision, un facteur de mérite a été défini : $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$, avec S (Signal) le nombre de coups par seconde pour une contamination bêta de 0,4 Bq/cm^2 et B (Bruit) le nombre de coups par seconde mesuré pour un bruit de fond gamma de 100 $\mu\text{Sv/h}$.** Ce facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ sera utilisé pour comparer les performances de discrimination beta/gamma des différentes technologies envisagées dans la thèse.

Un état de l'art des contaminamètres portables existant sur le marché montre que les technologies de détecteur gazeux, de scintillateur plastique et scintillateur ZnS(Ag) sont les plus utilisées. Des évaluations rapides à partir des données de fournisseurs ont été réalisées. Elles montrent que les contaminamètres utilisés en CNPE pour la mesure de bêta comme la sonde SBM-2D ou le CoMo170 ne seraient pas capables de détecter des contaminations bêta du ^{60}Co dans un bruit de gamma supérieur à 0,3 $\mu\text{Sv/h}$, loin des exigences de 100 $\mu\text{Sv/h}$ exprimées par EDF.

La suite de l'étude va donc proposer des solutions de technologies à base de scintillateurs et de détecteurs gazeux et l'optimisation de leurs configurations et les méthodes d'analyses des données par simulation. Les simulations seront validées par des mesures afin de s'approcher aux mieux des exigences de discrimination.

Deuxième partie

Conception des prototypes

Introduction

Comme évoqué dans la partie précédente, le cahier des charges demande une détection de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ de contamination surfacique bêta dans un bruit de fond de $100 \mu\text{Sv/h}$ avec une surface de détection de 100 à 200 cm^2 . Les deux technologies envisagées pour répondre à ce cahier des charges sont le détecteur à scintillation et le détecteur gazeux.

Cette partie du manuscrit présentera les études des différentes technologies de détecteur envisagées. L'outil utilisé est un logiciel de simulation Monte Carlo, Geant4 [52], qui permet de simuler la propagation des particules dans la matière. Des tests expérimentaux ont également été effectués afin de valider les simulations.

Dans le Chapitre 4, les méthodes utilisées pour les simulations et le traitement des données (par ROOT [53]) seront présentées. Dans le Chapitre 5, les études destinées à l'optimisation du contaminamètre seront détaillées. Pour commencer, des simulations de configurations basiques de détecteurs ont été réalisées, qui permettent de prendre en compte uniquement la partie sensible de détection. Des mesures ont été effectuées pour valider ces simulations. Enfin, dans le Chapitre 6, des simulations plus réalistes prenant en compte l'environnement (mécanique du détecteur, spectre en énergie photon représentatif de celui mesuré dans un CNPE notamment) ont été réalisées. Ces études ont permis de faire une comparaison des performances des différentes solutions envisagées et d'orienter le choix de la configuration des prototypes qui seront réalisés pour être testés en CNPE.

Chapitre 4

Méthodologie

Ce chapitre est destiné à présenter la méthodologie et les hypothèses faites pour les simulations des différentes configurations de détecteurs envisagées (basiques et/ou réalistes).

Après une introduction de l’outil de simulation Geant4 [52], les sources gamma et bêta utilisées dans les simulations seront définies. Enfin, les caractéristiques des détecteurs et les critères permettant d’évaluer leurs capacités de discrimination bêta/gamma seront présentés.

4.1 Introduction à Geant4

La simulation a pour objectif d’étudier les interactions des bêta et des gamma dans les différentes versions de détecteurs envisagées. L’environnement Geant4¹ (GEometry ANd Tracking) [52] a été utilisé à cette fin. Geant4 est un logiciel Monte Carlo développé par le CERN [54], codé en C++, qui permet de simuler le parcours des particules et leurs interactions dans la matière. Son domaine d’application est vaste : physique des hautes énergies, physique nucléaire, ingénierie spatiale, applications médicales, science des matériaux, radioprotection...

Une simulation Geant4 se décompose en deux parties : définition des données d’entrée (géométrie, physique...) et propagation des particules dans la matière. Geant4 fournit des classes virtuelles qui permettent à l’utilisateur de définir les éléments de base pour la simulation :

- les processus physiques régissant les interactions (classe `PhysicsList`)
- les propriétés des particules primaires (classe `PrimaryGeneratorAction`)
- la géométrie et les matériaux du détecteur (classe `DetectorConstruction`)
- les informations utiles à la collecte des données d’intérêt (classes `SteppintAction`, `EventAction`, `RunAction`)

Une fois les paramètres d’entrée définis, Geant4 propage les particules qui partagent les mêmes conditions physique et la même géométrie de détecteur. Ces événements ("events") constituent un "run". Au cours d’un "event", la particule interagit avec la matière suivant plusieurs étapes ("step"). Un "step" représente l’étape la plus petite entre deux interactions.

1. La version geant4.10.02.p01. est utilisée pour la simulation.

Un événement est suivi jusqu'à ce que l'énergie de la particule soit inférieure à un seuil en énergie défini ("cutting energy") ou à ce que la particule sorte d'un volume défini par l'utilisateur : "world".

4.1.1 Application développée

Pour étudier la réponse d'un contaminamètre à la fois aux bêta (signal) et aux photons (bruit de fond), il a fallu commencer par définir les paramètres d'entrée permettant de suivre l'interaction de ces deux types de particules dans le détecteur.

Les classes principales utilisées pour l'initialisation de notre applications sont : "ContaPhysicsList", "ContaDetectorConstruction" et "ContaInitialisation".

- "ContaPhysicsList", dérivée de la classe G4VModularPhysicsList, permet de définir les processus physiques d'intérêt. Geant4 fournit des classes de "PhysicsList" modulaires de référence permettant d'adapter les interactions physiques à des applications variées. Pour notre application en radioprotection, des bêta (0 - 400 keV) et des gamma (0 - 2 MeV) seront suivis, le processus physique principal est donc électromagnétique. Le "package" choisi pour la simulation est la version "emstandard_opt3", qui est recommandée pour toutes les applications qui demandent une haute précision notamment pour les électrons [55].
- "ContaDetectorConstruction", dérivée de la classe G4VUserDetectorConstruction, permet de définir la géométrie et les matériaux utilisés pour représenter les détecteurs. Le volume de "scoring"¹ est également défini dans cette classe. C'est le volume dans lequel l'information utile (énergie déposée dans notre cas) est récupérée.
- ContaActionInitialization, dérivée de la classe G4VUserActionInitialization, permet l'initialisation des classes définies par l'utilisateur pour le suivi des particules et les enregistre dans le noyau ("ContaPrimaryGeneratorAction", "ContaRunAction", "ContaEventAction" et "ContaSteppingAction").

Après cette phase d'initialisation, la génération et le suivi des particules se font à l'aide des classes suivantes :

- "ContaPrimaryGeneratorAction" (dérivée de G4VUserPrimaryGeneratorAction) permet de définir les caractéristiques des particules primaires : type, position et direction d'émission.
- "ContaRunAction" (dérivé de G4UserRunAction) permet de définir le nom du fichier de sortie et l'initialise en définissant la structure du fichier.
- "ContaEventAction" (dérivé de G4UserEventAction) permet d'enregistrer les informations d'intérêt dans un arbre ROOT [53]. Dans notre cas, l'information d'intérêt, qui est l'énergie déposée dans les différents étages du détecteur étudié ainsi que le nombre de particules ayant interagit. Ces informations sont obtenues lors des "event".

1. Scoring : Une fonctionnalité de Geant4 qui permet d'extraire les quantités physiques comme l'énergie, la position... pour le volume défini par l'utilisateur.

- "ContaSteppingAction" (dérivé de G4UserSteppingAction) additionne les énergies déposées, dans le volume de Scoring, lors de toutes les étapes d'un événement.

La détection des rayonnements par le contaminamètre est due au dépôt de tout ou partie de leur énergie dans le détecteur. Cette énergie est transformée sous forme d'émission de lumière dans le scintillateur ou de création de paire électrons-ions dans le détecteur gazeux. Néanmoins, le signal mesuré est toujours fonction de l'énergie déposée dans le matériau utilisé pour la détection. Afin d'optimiser la configuration du détecteur le plus efficacement possible et gagner en temps de calcul, la simulation est simplifiée et ne s'intéresse donc qu'à l'énergie déposée dans la zone de détection.

Pour résumer, le programme de simulation réalisé sous Geant4 pour notre étude enregistre l'énergie déposée dans le volume d'intérêt (i.e. : chaque étage d'un détecteur) pour chaque particule primaire (bêta ou gamma). Ces énergies sont enregistrées sous forme d'arbre ROOT pour tous les "run" (configurations ou particules différentes). Ces informations permettent d'évaluer les efficacités de détection du contaminamètre en fonction de différents paramètres (épaisseurs, seuil en énergie ...).

4.2 Définition des sources de rayonnement

Comme présenté dans la première partie de la thèse (chapitre 2), en radioprotection, la contamination surfacique bêta est donnée en activité surfacique (eg : 0,4 Bq/cm²) selon la norme ISO 7530 et le bruit de fond est exprimé en débit d'équivalent de dose (eg : 100 µSv/h). Ces grandeurs sont difficilement utilisables pour la simulation, qui demande un nombre de particules à envoyer sur le détecteur. La première étape a donc été de traduire ces données opérationnelles en données d'entrée pour le code. Ce travail a été effectué pendant mon stage de fin d'études [56] dont les résultats vont être rappelés (les détails sont présentés en annexe A).

La taille de la surface du détecteur rectangulaire, de 12 × 12 cm² = 144 cm², a été choisie pour répondre aux exigences du cahier des charges qui impose une surface rectangulaire de 100 à 200 cm². Elle pourra être ajustée en fonction des contraintes lors de l'industrialisation du détecteur.

4.2.1 Source gamma

Quatre géométries de source gamma ont été définies : isotrope (ISO) ; ponctuelle à 10 cm et 50 cm du détecteur (PONC_10cm, PONC_50cm) ; et monodirectionnelle (MONO).

Des gamma mono-énergétiques (0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 0,66 ; 1 et 1,5 MeV) ont été simulés de façon à prendre en compte la gamme complète en énergies susceptibles d'être rencontrée sur site. La Figure 4.1 présente le flux de gamma (en γ/s) équivalent à un débit équivalent de dose de 100 µSv/h pour ces différentes sources. Pour toutes les sources, l'ordre de grandeur du flux de gamma à envoyer sur un détecteur ayant une surface de 144 cm², est entre 6 × 10⁵ et 10⁷ photons par seconde en fonction de l'énergie des gamma. Le flux est plus faible pour

les gamma de haute énergie en raison d'un dépôt d'énergie plus important lors de chaque interaction.

Pour un spectre gamma réaliste, avec un spectre en énergie continu, $1,6 \times 10^6$ photons/s correspondent à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ sur le détecteur. Ce spectre, estimé à partir de mesures sur site, sera présenté en Figure 6.1.

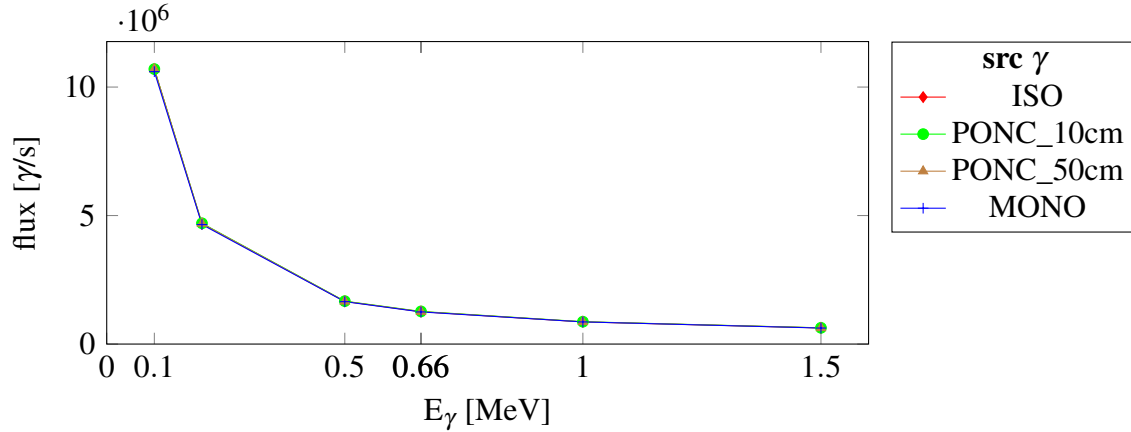


Figure 4.1 Flux de gamma simulé pour 4 sources, monodirectionnelle (MONO), isotrope (ISO) et ponctuelle à 10 cm (PONC_10cm) et à 50 cm (PONC_50cm) du détecteur, correspondant à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ sur un détecteur de surface $12 \times 12 \text{ cm}^2$.

4.2.2 Source bêta

La donnée d'entrée "terrain" pour les bêta est une contamination exprimée en activité surfacique, ce qui est plus simple à convertir en donnée d'entrée pour la simulation. La première hypothèse est que la contamination est due au ^{60}Co (cf. paragraphe 2.2.2), qui est la principale source de contamination sur le terrain et aussi la plus contraignante en terme d'énergie car ayant une $T_{\beta,max}$ faible ($T_{\beta,max} = 316 \text{ keV}$).

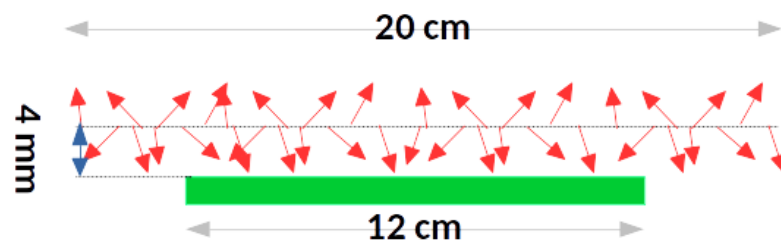


Figure 4.2 Représentation de particules bêta envoyées vers un détecteur de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ à partir d'une source surfacique de $20 \times 20 \text{ cm}^2$.

La source surfacique bêta (^{60}Co) est simulée comme présenté sur la Figure 4.2. Pour simuler une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$, 160 e-/s sont envoyés de façon isotrope, dans 4π , à partir d'une surface carrée de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ à une distance de 4 mm du détecteur, comme recommandé par la norme ISO 60325 présentée au 3.2.2.4. L'effet de bord a été pris en compte grâce à une surface de source plus importante que celle du détecteur simulé.

4.3 Caractéristiques du détecteur

4.3.1 Résolution en énergie

Pour obtenir une estimation réaliste de la réponse des détecteurs, il est nécessaire de prendre en compte leur résolution en énergie. Dans la gamme d'énergie rencontrée, elle est exprimée par la formule :

$$R[\%] = \frac{FWHM}{E},$$

où FWHM (Full Width at Half Maximum) est la largeur à mi-hauteur du pic d'énergie E.

Pour un scintillateur basé sur du PVT (Polyvinyltoluène), la résolution en énergie (en %) peut se calculer avec la formule $\frac{\Delta E}{E} = \frac{8,2}{E^{0,5}}$ (E en MeV) [57], ce qui conduit à une résolution en énergie de 47% à 30 keV et 58% à 20 keV. Par la suite, pour simplifier notre démarche, nous avons choisi de prendre une résolution constante de 50% pour les dépôts d'énergie qui seront typiquement de 20 - 30 keV.

Le scintillateur inorganique YAP, qui va être abordé dans la section 5.4 a une résolution en énergie qui évolue également en $\frac{1}{\sqrt{E}}$. Avec une résolution de 4,38% à 0,662 MeV [58], il a donc une résolution de 25% à 20 keV. Une résolution de 30% sera appliquée pour notre étude.

Pour le détecteur gazeux, de type compteur proportionnel, une résolution en énergie de 30% a été fixée pour des dépôts d'énergie de quelques keV, ce qui surestime 2 fois la résolution en énergie calculée, qui est de l'ordre de 10% - 15% pour un dépôt de 5,9 keV (Tab. 6.2 de [17]). Cette surestimation prend en compte la dégradation de la résolution en énergie pour un dépôt d'énergie inférieure à 5,9 keV [17], ce qui sera le cas pour les détecteurs fins.

4.3.2 Critère de discrimination : facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$

Il a fallu définir un critère, facteur de mérite, pour évaluer les performances relatives des différentes configurations de détecteurs étudiés.

Comme le seuil de décision est défini comme les suivants (cf. la formule 3.3 dans la partie 3.3.2.2)

$$SD = k_{1-\alpha} \sqrt{B \left(\frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_s} \right)}. \quad (4.1)$$

Il est proportionnel à la racine carrée du taux de détection gamma, le facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ a été choisi. Il sera utilisé pour comparer la performance de discrimination des différentes configurations de détecteur envisagées. Pour obtenir le facteur de mérite, le calcul des taux de détection S et B ainsi que le choix du seuil en énergie en simulation seront présentés.

L'efficacité de détection bêta (ϵ) du détecteur est définie ici comme le rapport du nombre de particules détectées (après l'application des seuils et des coupures expliqué prochainement au 4.3.3) sur le nombre de bêta émis dans 4π par la source. Pour chaque simulation, afin d'avoir suffisamment de statistique pour diminuer l'erreur associée sur l'efficacité, 5×10^5

bêta sont envoyés à partir d'une surface de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Le nombre de bêta est ensuite renormalisé à la surface du détecteur ($12 \times 12 \text{ cm}^2$) et l'efficacité est obtenue par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{nb_{det} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}}{5 \times 10^5 \times 12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}}, \quad (4.2)$$

avec nb_{det} le nombre de particules qui sont détectées pour cette simulation.

Le taux de détection bêta, S pour signal, pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ est calculé par :

$$S = \text{taux}_\beta [s^{-1}] = \varepsilon \times 0,4 \text{ Bq/cm}^2 \times 144 \text{ cm}^2. \quad (4.3)$$

Pour cette mesure, le nombre de particules détectées (nb_{det}) suit une loi de Poisson. Son écart-type σ_S est donc $\sqrt{nb_{det}}$. L'erreur relative sur le taux de détection S s'exprime donc par :

$$\frac{\sigma_S}{S} = \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{nb_{det}}}.$$

Supposant qu'il y ait 8×10^4 coups détectés pour 5×10^5 bêta (ce qui est l'ordre de grandeur si la détection bêta est maximisée), $\frac{\sigma_S}{S}$ vaut 0,4%, ce qui sera négligeable par rapport aux autres sources d'erreur. L'erreur statistique ne sera donc pas présentée lors de l'affichage des résultats du taux de détection bêta.

Le taux de détection gamma, B pour bruit, du détecteur soumis à un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ est calculé suivant la relation :

$$B = \text{taux}_\gamma [s^{-1}] = \frac{\text{coups}_{10^7}}{10^7} \times \text{taux}_{100\mu\text{Sv/h}}, \quad (4.4)$$

où coups_{10^7} est le nombre d'événements détectés pour 10^7 gamma envoyés sur le détecteur et $\text{taux}_{100\mu\text{Sv/h}}$ est le flux de gamma à envoyer sur le détecteur pour avoir $100 \mu\text{Sv/h}$ (selon la Figure 4.1).

Par analogie, l'erreur relative sur B est :

$$\frac{\sigma_B}{B} = \frac{1}{\sqrt{\text{coups}_{10^7}}}. \quad (4.5)$$

Typiquement, la valeur de coups_{10^7} varie de 10^3 à 10^5 dans nos simulations, ce qui correspond à un rapport $\frac{\sigma_B}{B}$ de 3% à 0,03%. Cette incertitude est donc négligeable et sera non visible sur les figures présentant B.

Par conséquent, le nombre de particules simulées permet d'obtenir des incertitudes statistiques, liées au taux de détection bêta et gamma, faibles : $< 0,1\%$ pour S et $< 3\%$ pour B.

Outre les erreurs statistiques, les résultats dépendent de l'analyse appliquée. Les valeurs des seuils en énergie et des coupures contribuent le plus à l'évolution des résultats. Des

fluctuations sur les valeurs vont contribuer à une erreur systématique, qui sera évaluée et prise en compte comme source d'erreur principale dans nos études.

4.3.3 Seuils en énergie

Afin de mieux rejeter le bruit du détecteur et les données dues aux interactions du bruit de fond gamma, il est nécessaire d'appliquer des seuils en énergie. Les seuils appliqués dans l'analyse des données seront choisis pour optimiser la discrimination bêta/gamma, dont le critère est le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$. Les étapes pour rechercher le seuil en énergie optimal pour toutes les configurations sont les suivantes :

1. Étudier la distribution en énergie déposée dans le détecteur pour les bêta et les gamma séparément et déterminer l'analyse à appliquer pour différencier les signaux bêta et gamma ;
2. Appliquer l'analyse choisie (sélections en énergies) avec un seuil en énergie E_0 ;
3. Calculer les taux de comptage S_0 , B_0 et le facteur de mérite $\frac{S_0}{\sqrt{B_0}}$ (signal sur racine carré du bruit de fond) correspondant au seuil E_0 (cf. formules 4.3 et 4.4 pour le calcul de S et B) ;
4. Faire varier le seuil et répéter les étapes 2 et 3 ;
5. Le seuil en énergie optimisé est celui correspondant à un facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ le plus élevé.

Le seuil en énergie influence le résultat du facteur de mérite car il influence le taux de détection des particules : S et B. Son influence est largement liée aux spectres en énergie déposée dans le détecteur pour les bêta et les gamma. L'ordre de grandeur de l'erreur sur le facteur de mérite est de $\pm 10\%$ pour une variation de la valeur du seuil de $\pm 30\%$ autour du seuil optimal. Des exemples concrets d'effet du seuil en énergie sur le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ seront présentés aux paragraphes 5.1.1.3 et 5.1.2.3.

4.4 Conclusion

L'outil de simulation Geant4 a été introduit et les sources gamma et bêta utilisées dans les simulations ont été définies. **Sur une surface de détecteur fixée à $12 \times 12 \text{ cm}^2$, il est nécessaire d'envoyer, 6×10^5 à 10^7 photons/s pour des énergies de gamma allant de 1,5 MeV à 0,1 MeV pour atteindre un débit de dose dû au bruit de fond photons de $100 \mu\text{Sv/h}$. La contamination surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ correspond à 160 e-/s générés sur 4π à partir d'une surface de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ à une distance de 4 mm du détecteur.**

Les simulations ont été réalisées avec 5×10^5 électrons bêta et 10^7 photons, conduisant à des erreurs statistiques faibles sur le signal S (inférieures à 1%) et sur le bruit B (inférieures à 3%), qui ne seront pas présentées sur les résultats.

Le facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ a été défini comme critère qui sera utilisé pour évaluer les performances de discrimination bêta/gamma des différentes configurations. Il est calculé à partir des efficacités de détection bêta et gamma, obtenues par simulation.

Les autres caractéristiques des détecteurs utilisées pour le traitement des données comme le seuil en énergie, la résolution en énergie ont été spécifiées. L'erreur introduite sur le facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$, par une fluctuation de la valeur du seuil en énergie de $\pm 30\%$, qui est la principale source d'incertitude a été estimée à $\pm 10\%$. Cette erreur de l'ordre de 10% sera donc celle prise en compte pour nos résultats.

Chapitre 5

Étude de configurations basiques

Une première série d'études a été réalisée afin de faire ressortir les principaux paramètres d'influence sur les efficacités gamma et bêta. Cette série d'études a consisté en des simulations avec des configurations simples de contaminamètre, n'incluant que les zones sensibles de détection, sans prendre en compte l'environnement (fenêtre d'entrée, PMT, guide de lumière, mécanique...) sauf en cas de nécessité. Ces études permettent d'obtenir des informations générales afin d'optimiser les épaisseurs des détecteurs et d'étudier des versions à plusieurs étages de détection (de 1 à 3). Pour ces simulations basiques, la source bêta surfacique (sur $20 \times 20 \text{ cm}^2$) et la source gamma isotrope (ISO) ont été utilisées.

5.1 Détecteur à un étage de détection

Ce détecteur bêta, le plus simple, doit être composé d'un matériau léger afin de minimiser l'interaction des gamma tout en étant efficace aux bêta. Dans ce but, deux matériaux ont été envisagés : scintillateur plastique et gaz.

Une première étude a été réalisée pour déterminer l'efficacité d'un étage aux gamma et aux bêta en fonction du type de matériau utilisé et de son épaisseur. Des simulations ont donc été réalisées avec des sources bêta et gamma représentatives des conditions rencontrées en CNPE : bêta du ^{60}Co et gamma mono-énergétique allant de 0,1 à 1,5 MeV.

5.1.1 Scintillateur plastique

Un étage de scintillateur plastique (proportion massique : 92% C et 8% H) d'une surface de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ a été simulé. Seul l'air entourant le scintillateur est pris en compte, la structure du détecteur (fenêtre d'entrée, PMT, guide de lumière, etc) est négligée dans un premier temps. Dans cette partie, trois scintillateurs d'épaisseurs différentes ont été choisis pour la simulation : $25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$. Ce sont des épaisseurs de scintillateurs qui sont fines afin de minimiser les interactions des photons, et disponibles chez les fournisseurs.

5.1.1.1 Détection bêta

La Figure 5.1 présente le spectre en énergie déposée par les bêta du ^{60}Co dans les scintillateurs de différentes épaisseurs. Étant donné que le scintillateur est fin, une grande partie des électrons bêta cèdent seulement une partie de leur énergie en traversant le matériau. L'énergie cédée augmente donc avec l'épaisseur du scintillateur, ce qui va conduire à une influence plus ou moins importante, du seuil en énergie appliqué, sur l'efficacité de détection.

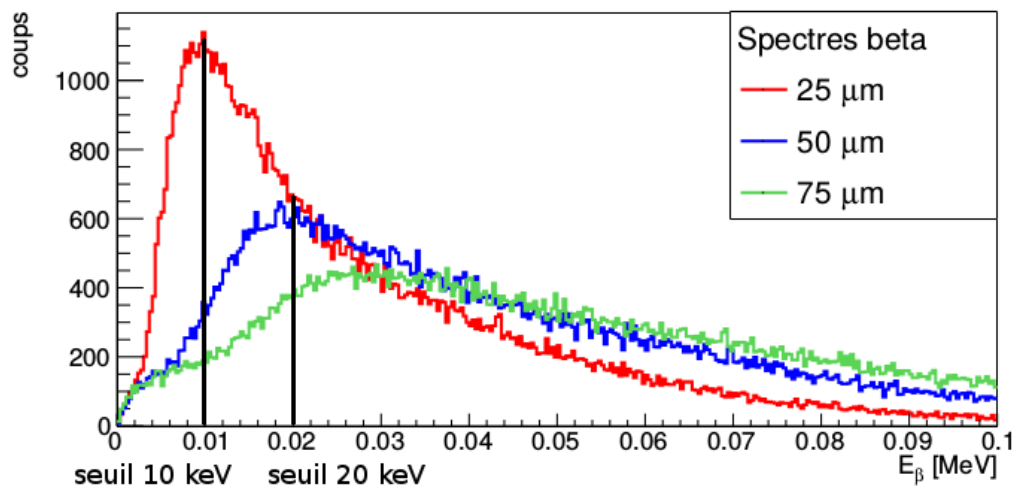


Figure 5.1 Spectres en énergie déposée dans un scintillateur fin pour un spectre bêta de ^{60}Co . Différentes épaisseurs de scintillateur sont simulées.

Le Tableau 5.1 présente l'effet du seuil en énergie sur l'efficacité de détection bêta. Sans seuil en énergie, les trois détecteurs ont la même efficacité totale de détection bêta, 52% pour une source isotrope, ce qui correspond à une efficacité de détection intrinsèque de $\sim 100\%$.

Tableau 5.1 Efficacité de détection bêta (ϵ) et taux de détection bêta (S) pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans le Phoswich en scintillateurs plastiques en fonction de leurs épaisseurs et du seuil en énergie appliqué (seuil représenté sur la Figure 5.1 : 10 keV pour 25 μm et 20 keV pour 50 et 75 μm)

Seuil [keV]	Efficacité ϵ			Taux S [/s]		
	25 μm	50 μm	75 μm	25 μm	50 μm	75 μm
0	52%	52%	52%	29,9	29,9	29,9
10	42%	49%	49%	24,3	28,3	28,7
15	34%	45%	48%	19,5	26,2	27,6
20	27%	40%	45%	15,8	23,3	26,0
25	22%	35%	41%	13,0	20,5	24,0
30	18%	31%	38%	10,7	18,0	22,0

Néanmoins, toutes les particules ayant déposé une énergie supérieure à 0 keV ne peuvent pas être détectées à cause du bruit (eg : électronique) expérimental. Pour étudier cet effet, nous avons appliqué des seuils de 10 à 30 keV.

Dans le cas d'un scintillateur de 25 μm , l'efficacité passe de 52% à 42% quand un seuil de 10 keV (seuil réaliste expérimentalement) est appliqué alors qu'elle reste de 49% pour

les épaisseurs supérieures. Pour une même efficacité de détection, un scintillateur plus épais permet donc d'appliquer un seuil en énergie plus élevé (comme représenté par les cellules colorées en bleu du Tableau 5.1). A moins d'avoir des seuils expérimentaux très faibles, il risque donc d'être difficile de descendre en dessous de $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur pour un détecteur utilisant des scintillateurs plastiques car l'énergie qui y est déposée par les bêta serait trop faible.

Le taux de détection bêta, S , est alors obtenu en multipliant l'efficacité par le taux d'émission ($0,4 \times 144 \text{ cm}^2 = 57,6 \beta/\text{s}$) selon la Formule 4.3. Ces taux de détection bêta sont représentés dans le Tableau 5.1. Pour les épaisseurs de 50 ou $75 \mu\text{m}$ et un seuil en énergie de 10 keV , $\sim 28 \text{ e-/s}$ sont détectés pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ de ^{60}Co .

5.1.1.2 Détection gamma

La Figure 5.2 présente les spectres en énergie déposée dans un scintillateur de $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur par des gamma de différentes énergies. Les gamma de basse énergie ($0,1$ et $0,2 \text{ MeV}$) ont un dépôt d'énergie moyen plus élevé que les gamma de haute énergie. En effet, à partir de 500 keV , la plupart des électrons créés, lors de l'interaction des photons, traversent le scintillateur plastique et n'y laissent qu'une partie de leur énergie avec un pic autour de 10 keV correspondant à un $dE/dx \approx 2 \text{ MeV/cm}$ (cf. Figure 1.1). Par conséquent, si un seuil en énergie expérimental de 10 ou 20 keV est appliqué, une grande proportion des gamma d'énergie supérieure à $0,5 \text{ MeV}$ seront éliminés pour un contaminamètre composé d'un seul étage de scintillateur. Pour cette configuration, les gamma de faible énergie qui seront probablement les plus problématiques.

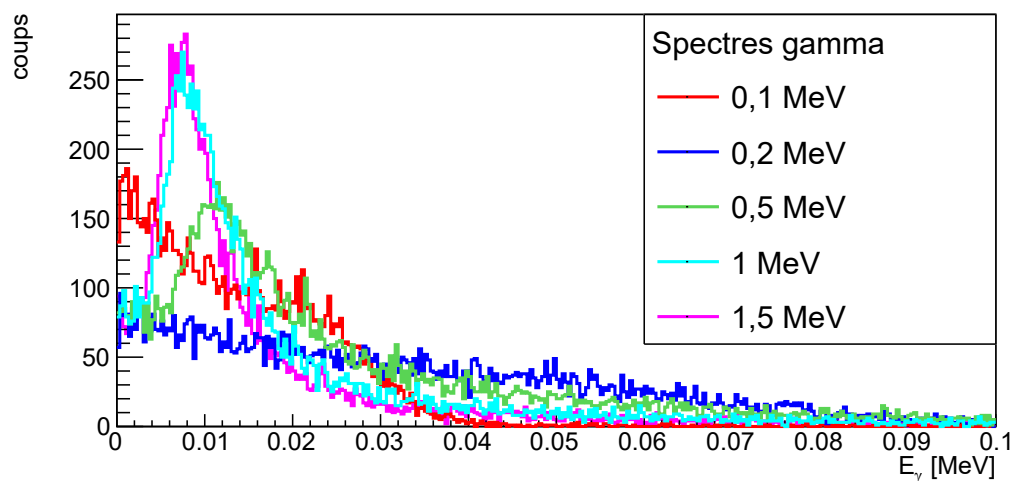


Figure 5.2 Spectre en énergie déposée dans un scintillateur d'épaisseur $50 \mu\text{m}$ par 10^7 gamma incidents en fonction de l'énergie initiale des gamma E_γ .

Seules 5 énergies, en plus de $0,66 \text{ MeV}$ (gamma émis par le ^{137}Cs) ont été simulées pour des questions de temps. Entre deux énergies simulées, les valeurs pour les énergies intermédiaires sont obtenues par extrapolation. Cette représentation sera utilisée pour toutes

les études concernant les gamma mono-énergétiques. La Figure 5.3 présente les taux de gamma détectés pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ pour les trois épaisseurs de scintillateur envisagées : 25, 50 et $75 \mu\text{m}$ avec le même seuil appliqué. Comme attendu, plus l'étage de scintillateur est épais, plus le taux de gamma détecté est important.

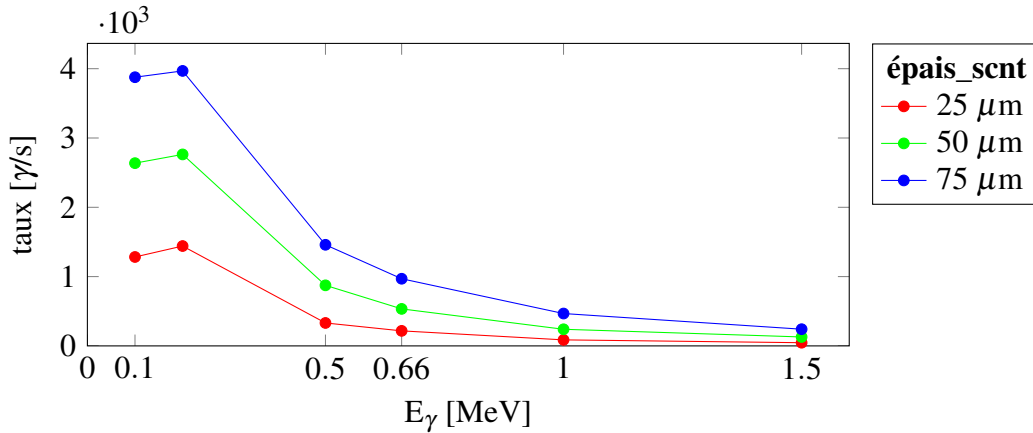


Figure 5.3 Taux de gamma détecté (B) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie des gamma (E_γ), pour un étage de scintillateur d'épaisseurs différentes ("épais_scnt") avec un seuil en énergie de 20 keV. Les lignes liant les points de simulation permettent de guider l'œil.

Une autre observation est que le taux de détection de gamma est plus élevé pour des gamma de basse énergie avec quelques milliers de γ/s contre quelques centaines par seconde au dessus de 1 MeV avec un seuil en énergie de 20 keV. Cette tendance est principalement due à la définition de la source : il faut 17 fois plus de gamma à 0,1 MeV que de gamma à 1,5 MeV pour obtenir un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ (cf. partie 4.2) alors que la probabilité de détection des gamma (avec un seuil de 0,02 MeV) à 1 MeV n'est que 2 à 3 fois plus élevée qu'à 0,1 MeV.

5.1.1.3 Performance de discrimination

Les simulations précédentes ont permis d'étudier les efficacités de détection bêta et gamma pour différentes épaisseurs de scintillateur plastique. Pour optimiser la configuration du contaminamètre il faut qu'il soit à la fois le plus sensible possible aux bêta, qui constituent le signal à mesurer (S), et le moins sensible possible aux gamma, qui constituent le bruit de fond (B). Le facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ est donc utilisé pour optimiser la performance de discrimination bêta/gamma comme décrit au paragraphe 4.3.2.

La Figure 5.4 présente l'évolution du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma du bruit de fond pour différents seuils en énergie appliqués à un scintillateur d'épaisseur $50 \mu\text{m}$. Un seuil en énergie final de 20 keV a été choisi car il maximise le facteur $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$. En faisant varier ce seuil de $\pm 30\%$ (entre 15 et 25 keV), le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ varie de 10% pour des énergies de gamma $\geq 0,2$ MeV. Pour des gamma de 0,1 MeV, la distribution en énergie est faible et donc plus sensible au seuil en énergie, conduisant à une variation de 50%. Cette incertitude de 10% sera celle que nous retiendrons pour les résultats des simulations de scintillateurs.

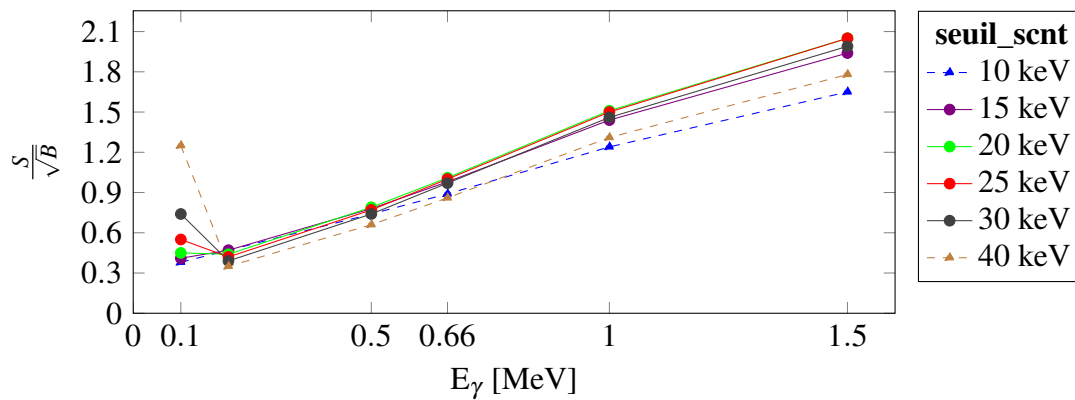


Figure 5.4 Évolution du facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des photons (E_γ) du bruit de fond pour un étage de scintillateur de $50 \mu\text{m}$ avec différents seuils en énergie, 10 à 40 keV.

Une étude semblable a été menée pour des épaisseurs de $25 \mu\text{m}$ conduisant à un seuil en énergie optimal de 10 keV, 50 et $75 \mu\text{m}$ conduisant à un seuil optimal de 20 keV.

La Figure 5.5 présente le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma pour les trois épaisseurs de scintillateurs étudiées ($25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$) avec le seuil en énergie optimisé.

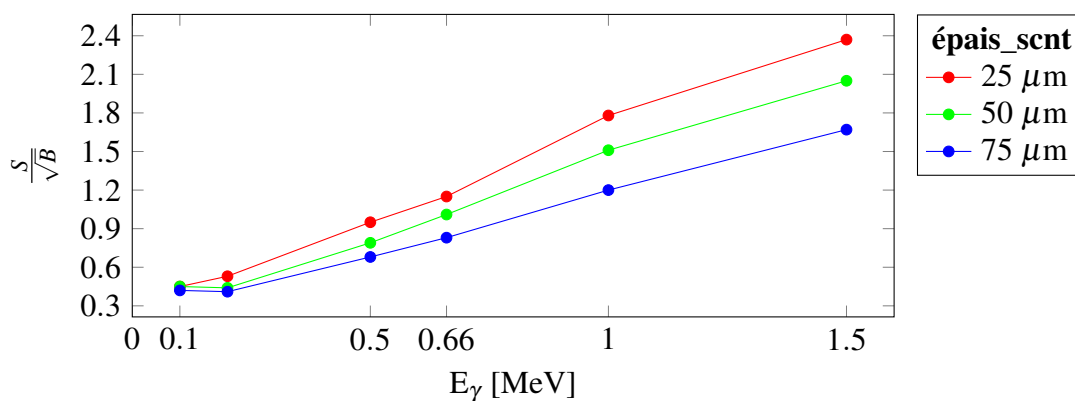


Figure 5.5 Évolution du facteur de mérite $F = \frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des photons (E_γ) du bruit de fond pour un étage de scintillateur avec des seuils optimisés : 10 keV pour $25 \mu\text{m}$ et 20 keV pour des épaisseurs de $50 \mu\text{m}$ et de $75 \mu\text{m}$.

Plus le scintillateur est fin, plus le facteur de mérite est élevé et meilleure est la discrimination bêta/gamma. Il y a donc intérêt à choisir un scintillateur le plus fin possible pour optimiser la performance de discrimination. Malgré cette conclusion, il va falloir prendre en compte d'autres paramètres comme le fait que le scintillateur d'épaisseur $25 \mu\text{m}$ a un signal lumineux tellement faible qu'il sera difficilement utilisable en pratique comme nous le verrons par la suite (paragraphe 5.2.1.4).

Pour un scintillateur de $50 \mu\text{m}$, un facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ supérieur à 1,5 est obtenu pour des gamma d'énergie supérieure à 1 MeV. Par contre, à basse énergie, ce facteur descend entre 0,45. En prenant en compte la probabilité de fausse alarme α de 2,5%, ces valeurs correspondent à un seuil de détection de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de 10 - 30 $\mu\text{Sv/h}$ pour des gamma d'énergie inférieures à 0,5 MeV et 120 - 200 $\mu\text{Sv/h}$ pour des gamma d'énergie supérieure à 1 MeV.

Pour conclure, la simulation d'un seul étage de scintillateur plastique montre qu'il faut minimiser l'épaisseur du scintillateur, si possible à 50 μm . Cette épaisseur permet d'obtenir un seuil de décision répondant au cahier des charges : pour un bruit de fond gamma d'énergie $E \leq 0,5 \text{ MeV}$ et dans un bruit de fond de 120 - 200 $\mu\text{Sv/h}$ pour les gamma d'énergie supérieure à 1 MeV. Cette conclusion ne prend cependant pas en compte la mécanique du détecteur qui risque de dégrader les performances, son effet sera discuté plus tard (cf. la partie 5.1.3).

5.1.2 Détecteur gazeux

La conclusion obtenue pour les scintillateurs, montre qu'un détecteur contenant moins de matière est favorable à la discrimination car peu de gamma y interagissent. Le gaz, qui a une densité d'environ un millième de celle du scintillateur pourrait donc être un bon candidat car il serait aussi sensible aux particules chargées que le scintillateur tout en étant moins sensible aux gamma.

De la même façon que pour les scintillateurs, un détecteur composé d'un étage de gaz avec une surface de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ a été simulé sans mécanique associée. Il est composé d'un mélange de gaz : Ar (80%) et CO_2 (20%) de densité $\rho = 1,7 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$. Différentes épaisseurs de gaz ont été testées : 4 mm, 6 mm, 9 mm, 15 mm et 30 mm, ce qui correspond à une masse surfacique équivalente à un scintillateur plastique de ~ 10 à 50 μm d'épaisseur.

5.1.2.1 Détection bêta

La source bêta a une surface de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ mais seuls les électrons passant par la face avant du détecteur sont pris en compte. La Figure 5.6 présente la distribution en énergie déposée par les bêta du ^{60}Co pour les cinq épaisseurs de gaz. Plus le gaz est épais, plus l'énergie déposée dans le gaz est importante, et moins il sera sensible au seuil en énergie appliqué comme dans le cas des scintillateurs.

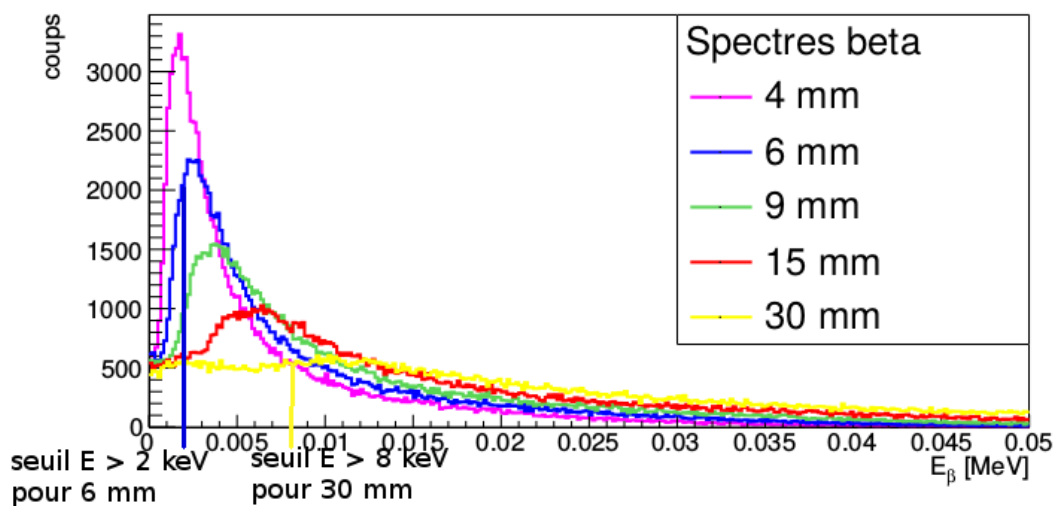


Figure 5.6 Spectres en énergie déposée dans un étage de gaz par des bêta de ^{60}Co .

Le Tableau 5.2 montre l'évolution de l'efficacité bêta issue d'une source bêta de ^{60}Co , en fonction du seuil en énergie appliqué pour différentes épaisseurs de gaz. Comme pour les scintillateurs, un étage de gaz plus épais peut être avantageux parce qu'il est moins sensible au seuil en énergie. Par exemple, avec un étage de gaz de 30 mm, l'efficacité ne diminue que de 49% pour un seuil de 1 keV à 40% pour un seuil à 8 keV tandis qu'il diminue de 48% à 14% pour 4 mm de gaz. Le seuil en énergie optimal est donc fonction de l'épaisseur de détecteur gazeux. Si le détecteur est très fin, il faudra être capable d'appliquer expérimentalement des seuils de 1 à 2 keV.

Tableau 5.2 Efficacité de détection bêta, ε , pour différentes épaisseurs de gaz (80% Ar et 20% CO_2) et des seuils en énergie différents

Seuil [keV]	Efficacité ε				
	4 mm	6 mm	9 mm	15 mm	30 mm
0	50%	50%	50%	50%	50%
1	48%	49%	49%	49%	49%
2	38%	45%	47%	47%	48%
3	30%	38%	44%	46%	46%
4	24%	32%	39%	45%	45%
6	18%	24%	31%	40%	43%
8	14%	19%	25%	34%	40%

5.1.2.2 Détection gamma

L'étude de sensibilité gamma d'un détecteur gazeux est également effectuée avec un étage de gaz sans matière autour et derrière pour s'intéresser seulement à l'interaction des photons dans le gaz. Les distributions en énergie déposées par les gamma mono-énergétiques dans un étage de gaz de 30 mm d'épaisseur est présentée sur la Figure 5.7. Leurs formes ressemblent aux spectres gamma obtenus dans un scintillateur de 50 μm (cf. Figure 5.2) avec une énergie moyenne déposée d'environ $\sim 50\%$ de celle du scintillateur plastique.

Le taux de détection gamma sans seuil en énergie est d'abord présenté sur la Figure 5.8 pour différentes énergies gamma. Sans seuil en énergie, on ne s'intéresse qu'à la probabilité d'interaction entre le gaz et les photons sans que la forme du spectre en énergie entre en jeu. Comme attendu, une épaisseur plus fine de détecteur gazeux conduit à un taux de comptage plus faible surtout pour les gamma à basse énergie ($E = 0,1 - 0,2 \text{ MeV}$).

Le taux de gamma avec un scintillateur plastique de 50 μm , qui a une masse superficielle équivalente au gaz de 30 mm d'épaisseur est également représenté en Figure 5.8. Il confirme que la probabilité d'interaction est comparable pour les deux configurations avec le même ρx .

5.1.2.3 Performance de discrimination

La Figure 5.9 présente le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour deux épaisseurs de gaz (6 et 30 mm) avec des seuils en énergie adaptés à leurs configurations. Elle montre qu'une épaisseur de

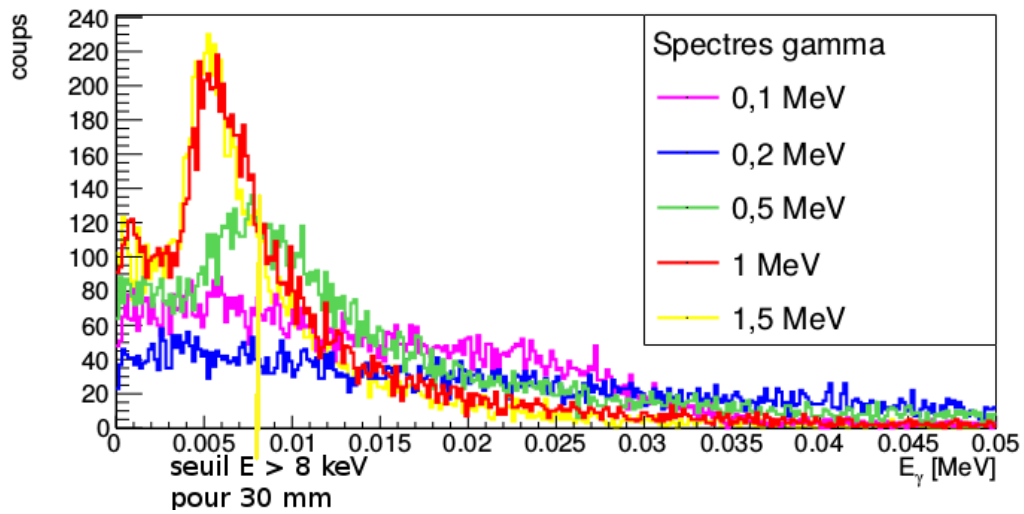


Figure 5.7 Spectres en énergie déposée dans un étage de gaz de 30 mm par 10^7 gamma mono-énergétiques d'énergie (E_γ) allant de 0,1 à 1,5 MeV.

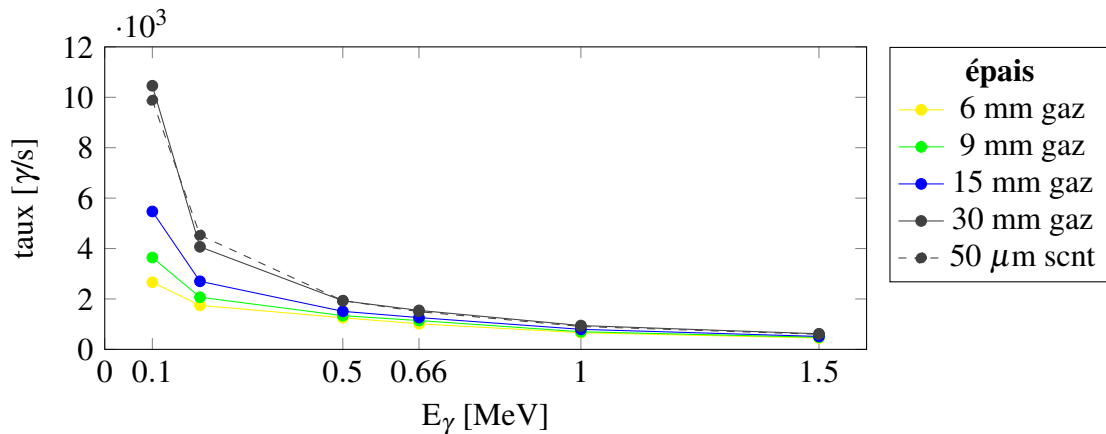


Figure 5.8 Taux de gamma détecté (B) pour un bruit de fond de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie de gamma (E_γ), pour différentes épaisseurs de gaz : 6 mm, 9 mm, 15 mm, 30 mm et un scintillateur plastique de $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur (50 μm scnt), sans seuil en énergie.

gaz plus fine donne de meilleures performances. Avec un gaz d'épaisseur 6 mm, le $\frac{S}{\sqrt{B}}$ varie donc de 0,5 à 2,2 (seuil_gaz supérieur à 2 keV), légèrement (10%) plus élevé que celui obtenu avec un scintillateur de 50 μm (cf. Figure 5.5 : $\frac{S}{\sqrt{B}}$ varie de 0,45 à 2). Une épaisseur plus importante de gaz donne des performances moindres.

Cette figure permet également de donner un ordre de grandeur d'incertitude causée par le choix du seuil en énergie, une évolution de $\pm 30\%$ sur le seuil donne une variation du $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 10% comme pour les scintillateurs.

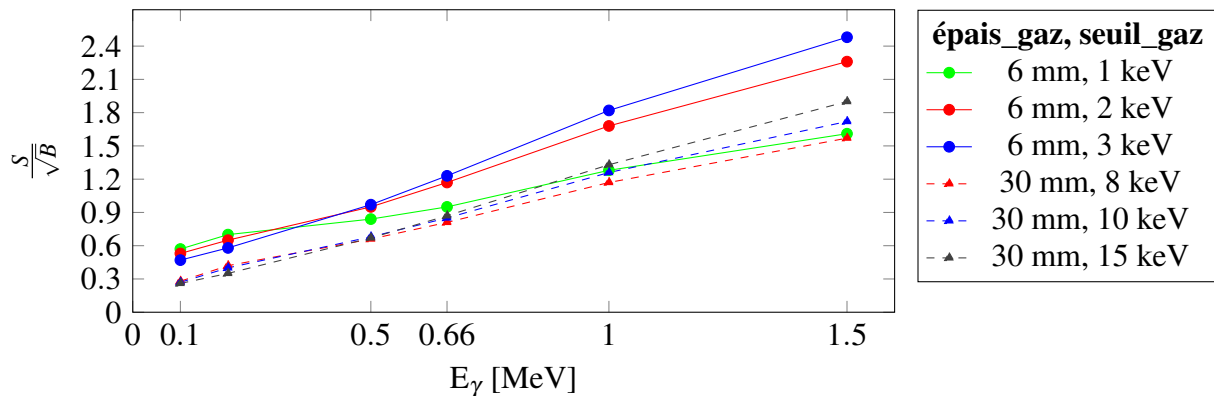


Figure 5.9 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie de gamma (E_γ) pour un étage de gaz avec des seuils en énergie appliqués différents.

La simulation d'un étage de détecteur gazeux montre qu'une épaisseur fine favorise la discrimination bêta/gamma. Ceci est d'autant plus vrai que l'énergie des gamma augmente. Ce point est vérifié en simulation, expérimentalement il faudra faire attention à ce que l'énergie déposée par les bêta soit supérieure au seuil en énergie du détecteur quand l'épaisseur de gaz diminue et à l'influence de la présence de la mécanique du détecteur. En comparant le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu par le détecteur gazeux de 6 mm avec celui du scintillateur de 50 μm , les simulations donnent un facteur de mérite légèrement plus élevé (+10%) pour le détecteur gazeux, mais qui reste dans la barre d'erreur, qui est également 10%.

5.1.3 Effet de la présence de matière autour de la partie sensible du détecteur

Dans les simulations précédentes, une simplification a été faite en simulant uniquement un étage de scintillateur ou de gaz entouré d'air. Ceci a permis de réaliser un grand nombre de simulations rapides pour comprendre le comportement des différents types de détecteur envisagés. Dans un cas réaliste, il y a toujours de la matière autour de la zone de détection, due à la mécanique ou au système de collection du signal. Par exemple, la lumière créée par le scintillateur doit être lue, par un PMT par exemple, qui impose de la matière proche du scintillateur.

Pour vérifier l'effet de la présence de matière sur la discrimination bêta/gamma, des simulations de détecteurs à base de scintillateurs ont été faites en simulant la présence d'un

PMT derrière le scintillateur par une épaisseur de verre de 2 mm avec la même surface ($12 \times 12 \text{ cm}^2$) que le scintillateur et collé directement derrière le scintillateur.

L'ajout de matière derrière le scintillateur ne perturbe pas la détection bêta. Les résultats précédents pour les bêta, ne seront donc pas modifiés. Par contre, cet ajout influence la détection gamma. La Figure 5.10 compare, pour différentes épaisseurs de scintillateur, le taux de gamma détecté pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ avec et sans verre ajouté derrière le scintillateur (seuils optimisés de 10 keV pour les épaisseurs de $25 \mu\text{m}$ et 20 keV pour 50 et $75 \mu\text{m}$). Plus l'énergie des gamma est élevée, plus l'augmentation du taux de détection gamma en présence de verre est importante. Par exemple, ~ 2 fois plus de gamma de 0,5 MeV sont détectés alors que ce facteur est de ~ 5 à 1 MeV. Ce facteur ne dépend pas de l'épaisseur du scintillateur. En effet, cette évolution s'explique car les gamma à haute énergie ($E \geq 0,5 \text{ MeV}$) en interagissant dans le verre (Compton ou photoélectrique) émettent des électrons secondaires avec une énergie suffisante pour traverser une importante épaisseur de verre (parcours de $200 \mu\text{m}$ pour les électrons de 0,2 MeV) et atteindre le scintillateur. Les électrons secondaires créés par les gamma à basse énergie s'arrêtent, quant à eux, rapidement dans le verre.

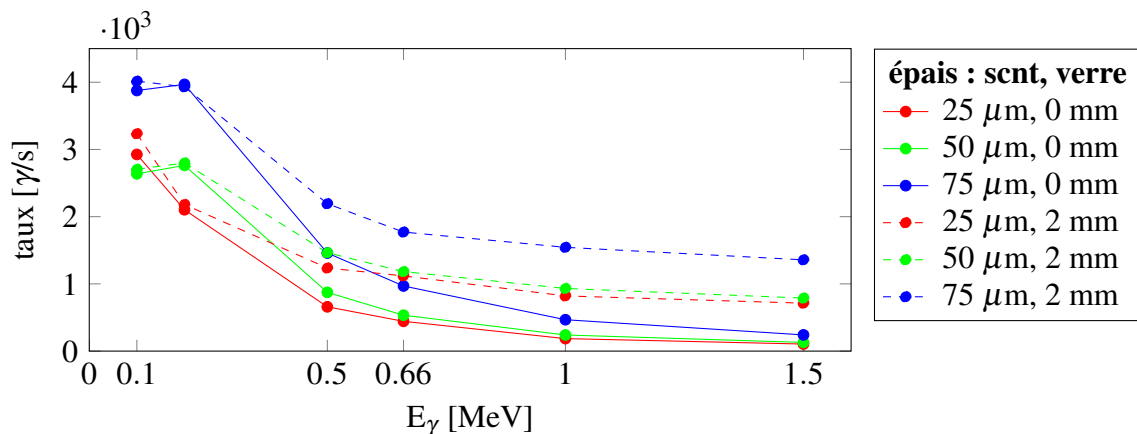


Figure 5.10 Taux de gamma détecté (B) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$, par un étage de scintillateur plastique des épaisseurs différentes avec et sans matière derrière (2mm de verre) le scintillateur en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ). Le seuil en énergie est adapté en fonction des différentes épaisseurs du premier étage de scintillateur : 10 keV pour $25 \mu\text{m}$ et 20 keV pour $50 \mu\text{m}$ et $75 \mu\text{m}$.

A cause de cet effet, le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ se dégrade pour les gamma de haute énergie en présence de matière derrière le scintillateur, comme montré Figure 5.11. Le facteur de mérite reste inférieur à 0,9 pour les gamma de toutes les énergies quand de la matière est présente. De plus, la présence de matière réduit la différence d'efficacité de discrimination quand l'épaisseur de scintillateur diminue. La détection des électrons secondaires créés dans le verre par le scintillateur ne dépend pas de l'épaisseur du scintillateur.

Les mêmes études sur l'effet de la présence de matière ont été effectuées pour un étage de détecteur gazeux, montrant une diminution du facteur de mérite à 0,5 - 0,8 contre 0,6 - 2,2 sans verre pour un étage de 6 mm.

Par conséquent, le détecteur à un seul étage ne suffit pas pour répondre aux exigences de détection imposées par le cahier des charges, qui demande un facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 1,39.

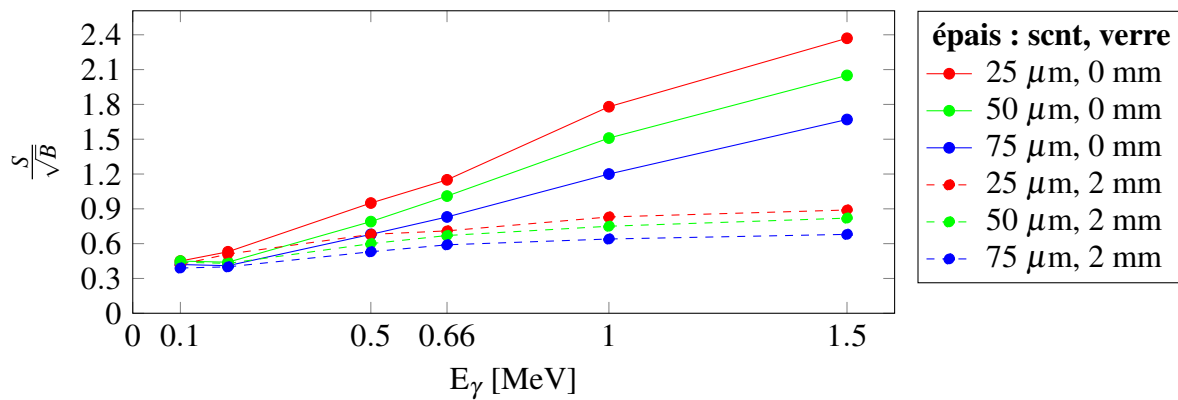


Figure 5.11 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie de gamma incidents (E_γ) pour un étage de scintillateur avec et sans PMT. Le seuil en énergie est adapté en fonction des différentes épaisseurs du premier étage de scintillateur : 10 keV pour 25 μm et 20 keV pour 50 μm et 75 μm .

5.1.4 Conclusion

Dans cette partie ont été simulées des étages simples de scintillateur plastique et de gaz. Ces solutions permettent d'obtenir d'excellentes efficacités bêta, de l'ordre de 50%.

Une épaisseur la plus fine possible permet d'améliorer la discrimination bêta/gamma. Par contre, la présence de matière autour de la zone sensible du détecteur dégrade les performance car les électrons secondaires créés par les photons, surtout de haute énergie, augmentent le taux de comptage des gamma. Si le bruit de fond est composé de gamma issus du ^{137}Cs , un étage de scintillateur plastique de 75 μm permettrait d'obtenir un seuil de décision correspondant à une contamination de 0,4 Bq/cm² dans un bruit de fond gamma de 20 $\mu\text{Sv/h}$. Un étage de détecteur gazeux de 6 mm conduirait à un seuil de décision de 0,4 Bq/cm² de contamination dans un bruit de fond gamma de 25 $\mu\text{Sv/h}$. Comme montré dans la Formule 3.18, le bruit de fond maximal est proportionnel au facteur de mérite au carré. L'incertitude, estimée à 10% sur le facteur de mérite, donne donc une variation de 20% sur ces valeurs du débit de dose.

La tâche suivante consiste donc à étudier des solutions permettant de minimiser la sensibilité des détecteurs aux gamma et, si possible, de garder une efficacité aux bêta maximale pour augmenter le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$. Des configurations de détecteurs à deux étages vont être proposées. Suite aux conclusions des simulations de détecteurs à un étage, le premier étage de ces configurations doit contenir peu de matière pour être le moins sensible possible aux gamma. La composition du deuxième étage et l'analyse des signaux reste à optimiser.

Plusieurs solutions ont été étudiées. Seules les études réalisées pour les configurations de détecteurs à deux étages les plus prometteuses vont être présentées ici :

- détecteur Phoswich constitué des deux étages de scintillateurs plastiques ;
- détecteur à deux étages avec le premier étage constitué de gaz et le deuxième de scintillateur plastique.

5.2 Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques

Comme évoqué au chapitre 1 (paragraphe 1.3.2.2), le Phoswich est une technologie utilisée pour effectuer la discrimination des particules. Il est composé de deux (ou plusieurs) scintillateurs avec des temps caractéristiques différents, couplés à un seul photo-détecteur. À l'aide d'une analyse en forme du signal (Pulse Shape Analysis), il est alors possible d'identifier dans quel étage de scintillateur les particules qui ont interagi et ainsi de les discriminer.

Pour notre application de discrimination bêta/gamma, le matériau choisi pour la détection est le scintillateur plastique du fait de sa faible densité qui permet une faible probabilité d'interaction gamma. Avec une configuration de détecteur Phoswich à deux étages de scintillateurs dont le premier est fin, les bêta déposent de l'énergie dans le premier et le deuxième étage (s'ils traversent le premier), alors qu'une majorité de gamma qui interagissent dans la zone de détection ne déposent de l'énergie que dans le deuxième étage. L'analyse "classique" consiste à faire la coïncidence entre les deux étages pour discriminer les bêta des gamma.

Plus concrètement, la Figure 5.12 présente le dépôt d'énergie dans deux étages de détection successifs : énergie déposée dans le premier étage (E_1) en fonction de l'énergie déposée dans le deuxième étage (E_2). Les électrons et les gamma sont tous présentés sur la même distribution afin d'illustrer la différence des distributions du dépôt d'énergie entre ces deux types de particules. Cette différence sera utilisée pour chercher la méthode d'analyse des données permettant la meilleure discrimination bêta/gamma possible. Les électrons (points

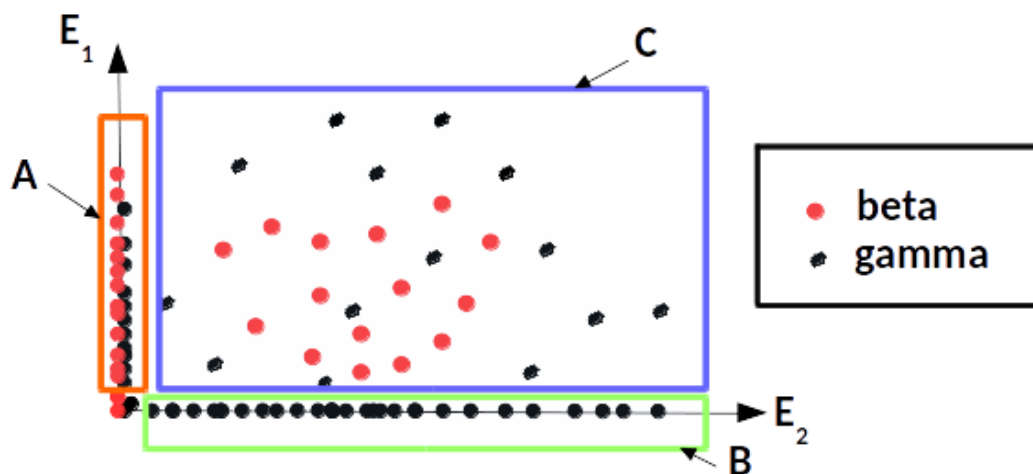


Figure 5.12 Représentation des particules bêta et gamma sur une distribution en énergie déposée dans un détecteur à deux étages ; énergie déposée dans le premier étage (E_1) en fonction de l'énergie déposée dans le deuxième étage (E_2). Zone A : Particules qui n'interagissent que dans le premier étage ; Zone B : Particules qui n'interagissent que dans le deuxième étage ; Zone C : Particules qui interagissent dans les deux étages (en coïncidence).

rouges), venant de l'avant du détecteur, déposent forcément de l'énergie dans le premier étage. En fonction de la configuration du détecteur (épaisseur du premier étage de détecteur, existence de matière entre les deux étages de détection), une proportion d'électrons traversent

le premier étage et interagissent dans le deuxième (zone C). Les électrons de faible énergie ne déposent de l'énergie que dans le premier étage (zone A).

Le dépôt d'énergie dû aux gamma (en noir) se distribue différemment de celui des bêta. Aux énergies rencontrées, les gamma peuvent interagir avec le matériau du détecteur par effet Compton ou par effet photo-électrique ce qui conduit à un transfert d'énergie à des électrons du milieu. Ces électrons créés dans l'un des deux étages vont déposer de l'énergie dans le premier et/ou le deuxième étage. Une majorité des gamma qui interagissent conduisent à un signal que dans le premier étage (zone A) ou que dans le deuxième étage (zone B). Cependant, quelques électrons mis en mouvement lors de l'interaction des gamma peuvent introduire un signal dans les deux étages (zone C). Ces gamma risquent donc d'être identifiés comme des électrons et conduire au bruit de fond qu'il faudra minimiser.

Cette section traitera des Phoswich composés de deux scintillateurs plastiques. Les paramètres de configurations étudiés sont : l'épaisseur du premier étage de scintillateur plastique, l'épaisseur du deuxième étage de scintillateur plastique et l'épaisseur de couplant optique entre les deux scintillateurs.

5.2.1 Analyse TS1 : coïncidence entre les deux étages

Le traitement de données "classique", appelé TS1, consiste à faire une coïncidence entre les deux étages (zone C) du détecteur afin d'identifier les bêta. L'analyse TS1 a pour but principal d'optimiser le rejet de bruit de fond dû aux gamma. Cette coïncidence va conduire à rejeter les gamma qui ne déposent de l'énergie que dans un seul étage, mais elle risque probablement de diminuer l'efficacité de détection bêta en ne sélectionnant pas les électrons qui s'arrêtent dans le premier étage de détecteur.

Comme pour le scintillateur à un étage, une configuration simplifiée avec deux étages de scintillateurs entouré par de l'air sera premièrement étudiée. L'influence de différents paramètres géométriques sur l'efficacité de détection bêta, l'efficacité de détection gamma et la capacité de discrimination (facteur de mérite) sera étudiée. Une validation expérimentale sera présentée pour déterminer une configuration réaliste.

5.2.1.1 Détection bêta

Cette étude du spectre bêta a été réalisée pour un spectre en énergie bêta correspondant à celui du ^{60}Co ($T_{\beta,max} = 316 \text{ keV}$) et un flux de bêta correspondant à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ placée 4 mm devant le scintillateur. Pour toutes nos études, un seuil en énergie de 0,02 MeV (identique à celui pris pour le scintillateur à un étage) est appliqué aux deux scintillateurs. En plus de ce seuil, une condition sur l'énergie déposée dans le deuxième étage, $E2 < 0,3 \text{ MeV}$, a été appliquée car les électrons bêta n'y déposent pas plus de 0,3 MeV. Le taux de détection et l'efficacité bêta sont présentés dans le Tableau 5.3 pour différentes configurations du Phoswich. La comparaison des résultats obtenus permet d'étudier l'effet des

épaisseurs : du premier étage de scintillateur, du couplant optique entre les deux scintillateurs (graisse optique) et du deuxième étage de scintillateur.

Tableau 5.3 Efficacité (ϵ) bêta et taux de détection (S) pour une contamination surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ devant le Phoswich en scintillateurs plastiques en fonction des épaisseurs de scintillateurs et du couplant optique. Les sélections en énergie pour l'analyse TS1 en coïncidence entre les deux étages sont appliquées : $E1 > \text{seuil}$, $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$. Le seuil en énergie est adapté en fonction des différentes épaisseurs du premier étage de scintillateur : 10 keV pour $25 \mu\text{m}$ et 20 keV pour $75 \mu\text{m}$

Épaisseur			efficacité ϵ	taux S [/s]
1er [μm]	couplant [μm]	2ème [mm]		
25	0	1	22%	12,5
50	0	1	16%	9,0
75	0	1	14%	8,3
75	50	1	7%	4,3
75	0	0,3	14%	8,2
75	0	0,5	14%	8,3
75	0	2	14%	8,3

Effet de l'épaisseur du premier étage de scintillateur Comme attendu pour cette méthode de sélection en coïncidence TS1, l'efficacité de détection pour les bêta de faible énergie issus du ^{60}Co est faible ($< 15\%$), même en minimisant l'épaisseur de matière avant le deuxième étage. En effet, quand l'épaisseur du premier étage augmente, d'avantage de bêta n'arrivent pas à atteindre le deuxième scintillateur, conduisant à la diminution du taux de détection bêta. Avec ce type d'analyse en coïncidence TS1, il faudra donc minimiser l'épaisseur du premier étage pour optimiser l'efficacité bêta.

Effet de la présence d'une épaisseur de couplant optique Pour un premier étage d'épaisseur $75 \mu\text{m}$, l'ajout de $50 \mu\text{m}$ de couplant optique, de type graisse optique [59], entre les deux étages de scintillateur diminue par deux l'efficacité de détection bêta (de $8,3 \text{ e-/s}$ à $4,3 \text{ e-/s}$). Cet ajout augmente l'épaisseur à traverser avant d'atteindre le deuxième étage, ce qui rejette la partie basse énergie du spectre bêta. Avec l'analyse en coïncidence, pour maximiser la détection bêta, il ne faut donc pas avoir du couplant optique entre les deux étages de scintillateur. Expérimentalement, ceci oblige à développer des méthodes d'assemblage de scintillateurs sans couplant optique.

Malgré toutes les optimisations (premier étage de $50 \mu\text{m}$, sans couplant), l'efficacité bêta est faible, $\sim 15\%$, avec l'analyse TS1. En comparant cette efficacité avec celles du Tableau 5.1 correspondant aux configurations à un seul étage de scintillateur de $50 \mu\text{m}$, l'efficacité bêta diminue de 40% à 15% quand la coïncidence est exigée (seuil à 2 keV).

Par conséquent, pour favoriser la détection des bêta, un premier étage de scintillateur et un couplant les plus fins possibles doivent être choisis. Le deuxième étage de scintillateur n'a pas d'effet sur la détection bêta, son épaisseur sera discutée pour le rejet des gamma.

5.2.1.2 Détection gamma

Avant d'étudier l'effet de la configuration du détecteur sur la détection gamma, la distribution de l'énergie déposée dans les deux étages de scintillateur lors des interactions de photons ainsi que les sélections en énergie sont présentées en Figure 5.13. Seules les particules qui interagissent dans les deux étages sont représentées. Ces distributions en énergie sont obtenues pour différentes énergies de gamma et pour une configuration de Phoswich avec un premier étage d'épaisseur $75 \mu\text{m}$, un deuxième étage d'épaisseur 1 mm sans épaisseur de couplant optique entre les deux étages. Concernant l'énergie déposée dans le deuxième étage de scintillateur (E2), l'énergie moyenne déposée (Mean x sur Figure 5.13) augmente avec l'énergie des gamma (de $0,1$ à 1 MeV).

L'énergie déposée dans le deuxième étage de scintillateur par des gamma plus énergétiques que $0,5 \text{ MeV}$ peut être supérieure à $0,3 \text{ MeV}$, ce qui n'est pas le cas pour les bêta du ^{60}Co ($T_{\beta, \text{max}} = 0,316 \text{ MeV}$). Cette différence de distribution pourrait permettre d'améliorer la discrimination bêta/gamma en appliquant une coupure à $0,3 \text{ MeV}$. La coupure sur l'énergie maximale dans le deuxième étage ($E2 < 0,3 \text{ MeV}$) ainsi que les deux seuils en énergie ($E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $E2 > 0,02 \text{ MeV}$) seront appliqués dans la suite des études de l'analyse TS1.

La Figure 5.14 présente l'évolution du taux de détection gamma (B) dû à un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ pour différentes épaisseurs du premier étage de scintillateur ("scnt1" en figure) et différentes épaisseurs du couplant optique ("couplant" en figure) entre les deux scintillateurs. L'épaisseur du deuxième étage de scintillateur est fixée à 1 mm .

Effet de l'épaisseur du premier étage de scintillateur Lorsque l'épaisseur de couplant optique est fixée, le taux de détection des gamma diminue avec l'épaisseur du premier étage de scintillateur. Prenons le cas sans couplant en exemple, pour un flux de gamma correspondant à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$, le taux de gamma ($E_{\gamma} = 0,5 \text{ MeV}$) détecté diminue de $1500 \gamma/\text{s}$ pour un scintillateur de $75 \mu\text{m}$ à $1000 \gamma/\text{s}$ pour un scintillateur de $50 \mu\text{m}$.

Effet de l'épaisseur de couplant optique entre les deux scintillateurs La Figure 5.14 montre également que pour une épaisseur du premier étage de scintillateur fixée, la présence du couplant optique entre les deux scintillateurs permet de diminuer le taux de détection gamma, surtout pour les gamma d'énergie $\simeq 0,5 \text{ MeV}$. Ceci s'explique par le fait qu'un certain nombre d'électrons secondaires créés lors de l'interaction des photons s'arrêtent dans l'épaisseur de couplant optique et ne vont donc pas toucher le deuxième scintillateur. Cette conclusion est cependant contraire à celle obtenue pour maximiser la détection bêta, qui impose l'absence du couplant optique. Comme l'effet sur l'efficacité bêta est plus important (facteur 2), les simulations seront réalisées sans couplant optique par la suite.

Effet du deuxième étage de scintillateur Les épaisseurs du premier étage de scintillateur ($75 \mu\text{m}$) et du couplant ($0 \mu\text{m}$) sont fixées. La Figure 5.15 montre l'évolution du taux de

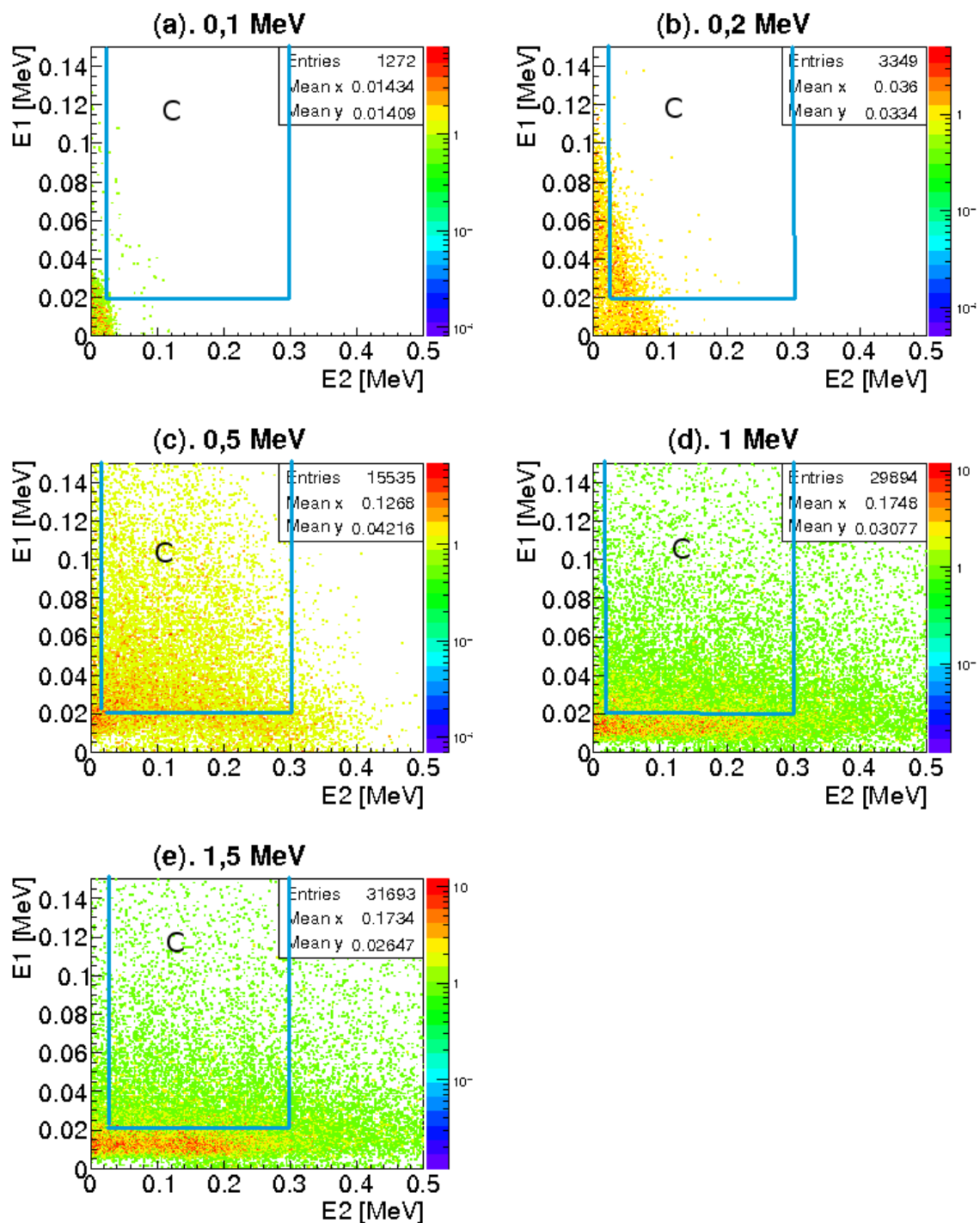


Figure 5.13 Distributions en énergie déposée dans le Phoswich (premier étage de $75 \mu\text{m}$, sans couplant, deuxième étage de 1 mm) pour des gamma de différentes énergies. Seuls les gamma ayant interagit dans les deux étages sont représentés. La sélection en énergie de l'analyse TS1 est présentée sur les spectre par le rectangulaire bleu, zones notées "C". Ils correspondent aux région C de la Figure 5.12. (10^7 gamma envoyés sur le détecteur).

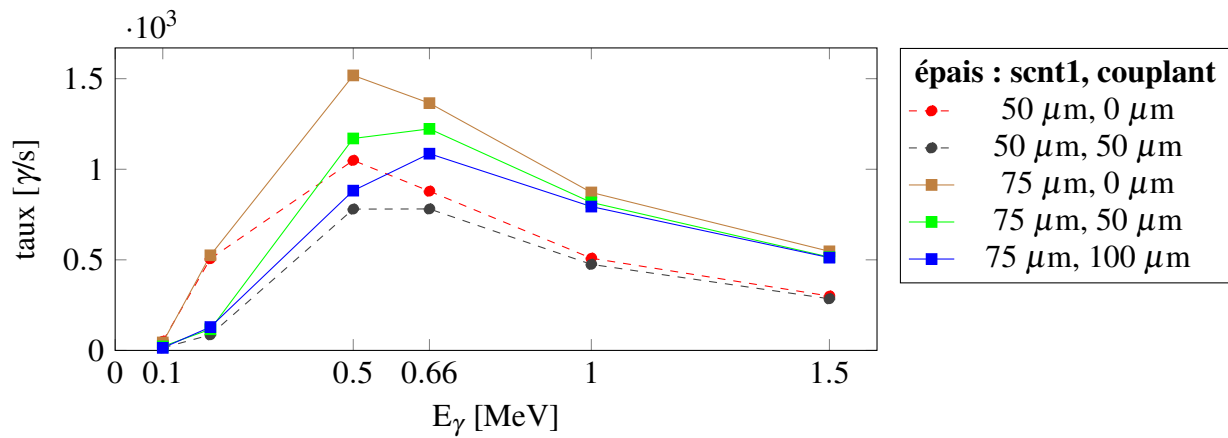


Figure 5.14 Taux de gamma détecté (B) pour un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie de gamma incidents pour un Phoswich associant différentes épaisseurs du premier étage ("scnt1") et du couplant optique ("couplant"). L'épaisseur du deuxième scintillateur est fixée à 1 mm. L'analyse TS1 est appliquée avec des sélections en énergie : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$.

gamma détecté en fonction de l'épaisseur du second étage de scintillateur ("épais_scnt2" de 0,3 mm à 5 mm en figure). Le taux de gamma augmente avec l'épaisseur du deuxième scintillateur jusqu'à 2 mm. Le taux de gamma détecté reste ensuite stable pour des épaisseurs allant de 2 mm à 5 mm. Ceci s'explique par le fait que les électrons créés dans le deuxième étage (au delà de 2 mm) par les gamma n'ont pas un parcours permettant d'atteindre le premier étage.

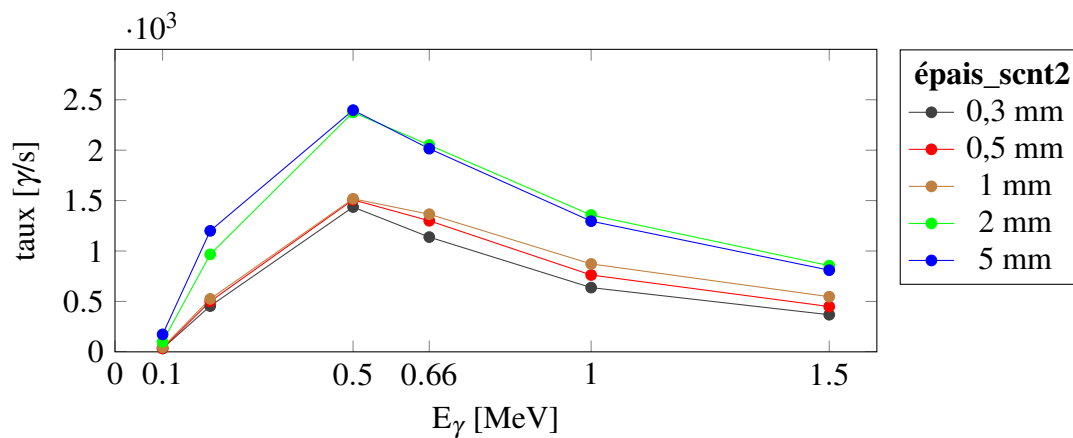


Figure 5.15 Taux de gamma détecté (B) pour un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$, par un Phoswich avec un premier étage de $75 \mu\text{m}$ d'épaisseur et différentes épaisseurs du deuxième étage de scintillateur ("épais_scnt2") associés sans couplant (pas de matière derrière le deuxième étage de scintillateur). L'analyse TS1 est appliquée avec des sélections en énergie : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$.

D'après ces résultats de simulation avec l'analyse TS1, il faut donc un deuxième étage de scintillateur le plus fin possible. Cette conclusion est applicable pour les configurations du Phoswich qui ne prennent pas en compte la présence de matière autour de la zone de détection.

Influence de la présence de matière autour de la zone de détection Comme pour le détecteur à un étage, pour étudier l'effet de la présence de matière autour des scintillateurs, un

PMT, approximé par une épaisseur de verre de 2 mm, est ajouté derrière le deuxième étage de scintillateur. Le taux de gamma détecté pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ est représenté sur la Figure 5.16. Cette figure compare le taux de gamma avec verre (trait pointillé) et sans verre (trait continu) pour deux épaisseurs du deuxième scintillateur ("scnt2") : 0,5 et 2 mm. Comme sur la Figure 5.15, la tendance avec le deuxième scintillateur de 0,5 mm est représentative pour les épaisseurs de 0,3 à 1 mm et celle de 2 mm est représentative pour les épaisseurs de 2 à 5 mm.

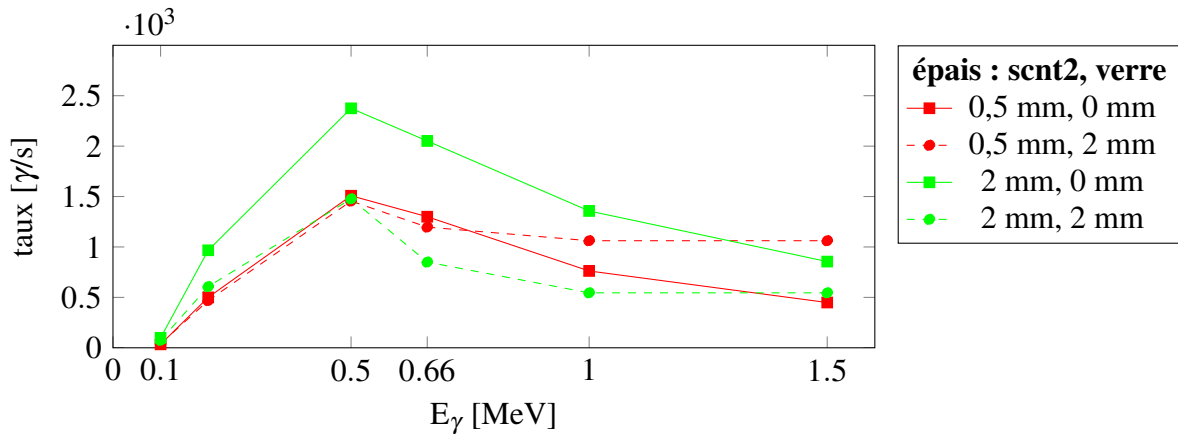


Figure 5.16 Comparaison du taux de gamma détecté (B) pour un bruit de fond de $100 \mu\text{Sv/h}$, par un Phoswich (premier étage de $75 \mu\text{m}$, sans couplant) en fonction de l'épaisseur du deuxième étage avec et sans PMT derrière (simulé comme une épaisseur de verre de $2 \text{ mm} \times 12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$). Les sélections en énergie pour l'analyse TS1 en coïncidence entre les deux étages sont appliquées : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$, $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$.

Pour le scintillateur d'épaisseur 0,5 mm, la présence de verre derrière le Phoswich n'influence pas la détection gamma de basse énergie (0,1 - 0,5 MeV) alors qu'elle augmente le taux de gamma détecté à haute énergie ($\geq 1 \text{ MeV}$) d'un facteur ~ 2 . Cette augmentation est due aux électrons secondaires, créés par les gamma de haute énergie ($T_{max} = 0,8 \text{ MeV}$ pour 1 MeV) dans le verre, qui arrivent à traverser le deuxième étage de 0,5 mm et atteint le premier.

L'effet du verre sur le Phoswich avec un deuxième scintillateur de 2 mm d'épais est opposé à celui de 0,5 mm. Le verre permet de diminuer le taux de gamma de 30 - 40% pour les gamma de toutes les énergies (0,1 - 1,5 MeV). En effet, lorsque le deuxième étage de scintillateur est assez épais (2 - 5 mm), les électrons secondaires créés dans le verre sont arrêtés dans le deuxième scintillateur et/ou y déposent une énergie supérieure à la coupure à 0,3 MeV. Le verre fait alors effet de blindage contre les gamma.

Contrairement au cas où il n'y a pas de matière derrière le détecteur, si le PMT est pris en compte, un deuxième étage plus épais (2 - 5 mm) favorise le rejet du bruit gamma surtout à haute énergie (1 - 1,5 MeV). L'amélioration du rejet de gamma de haute énergie avec un deuxième étage plus épais s'explique par la distribution en énergie différente dans le deuxième scintillateur. La Figure 5.17 présente les distributions en énergie pour les gamma de 1,5 MeV qui ont interagis dans les deux étages (gauche) et ceux qui sont pris comme signal après l'analyse TS1 (droite). L'énergie déposée dans le deuxième scintillateur de 0,5 mm ($E2$) est centrée sur 0,1 MeV alors qu'elle est plus étendue pour 2 mm. Avant les coupures en énergie, le nombre de gamma qui interagissent en coïncidence est comparable (49273 contre 50079),

avec les coupures, il y a ~ 2 fois de moins de gamma détectés avec une épaisseur de deuxième étage de 2 mm. Par conséquent, un deuxième étage de scintillateur de 2 à 5 mm est alors optimal pour un meilleur rejet dû aux gamma de haute énergie si l'analyse TS1 est appliquée.

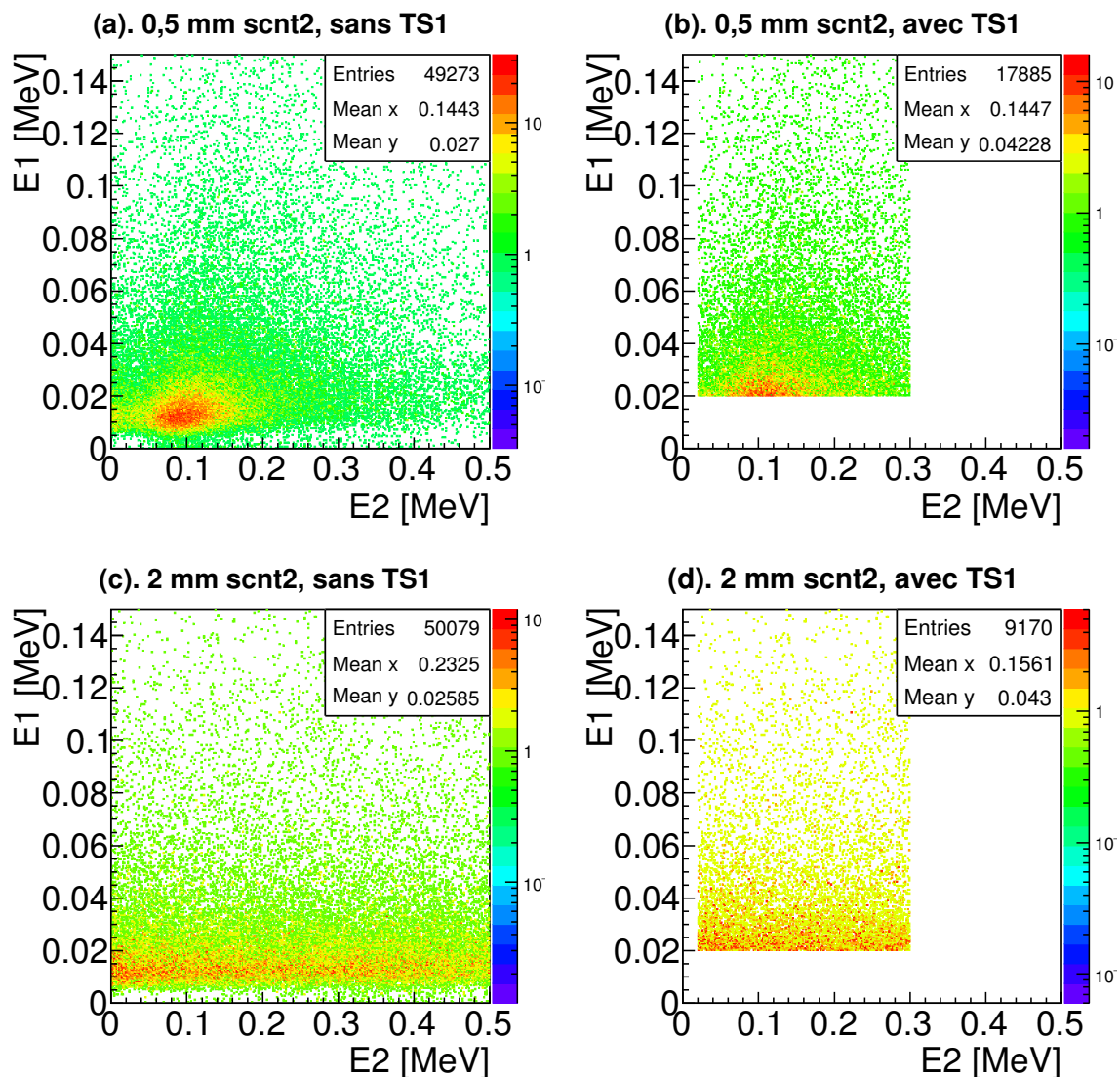


Figure 5.17 Distributions en énergie ($E1$ vs $E2$) des gamma de 1,5 MeV qui ont déposé de l'énergie dans les deux étages du Phoswich (premier étage de $75 \mu\text{m}$, sans couplant) pour deux épaisseurs du deuxième scintillateur : 0,5 mm et 2 mm. Le PMT simulé comme verre d'épaisseur de 2 mm est placé derrière le deuxième scintillateur. Les spectres avant (sans TS1) et après les sélections en énergies (avec TS1) sont présentés. (10^7 gamma envoyés sur le détecteur).

En résumé, en présence de matière derrière le Phoswich, pour diminuer le plus possible la détection gamma avec l'analyse TS1, le choix d'épaisseur de différents étages du scintillateurs sont les suivants :

1. premier étage de scintillateur le plus fin possible ;
2. pas de couplant optique ;
3. deuxième étage de scintillateur d'épaisseur de 2 à 5 mm pour rejeter les gamma de haute énergie.

5.2.1.3 Discrimination bêta/gamma

Nous avons montré que la présence de matière autour de la zone active de détection influence les résultats. Comme le PMT est indispensable, les études suivantes prendront en compte la présence de matière derrière le deuxième étage de scintillateur.

L'évolution du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma pour différentes épaisseurs des scintillateurs ("scnt1", "scnt2") du Phoswich (suivi par un verre de 2 mm) est représentée sur la Figure 5.18 dans le cas où les deux scintillateurs plastiques sont associés sans couplant optique pour maximiser la détection bêta.

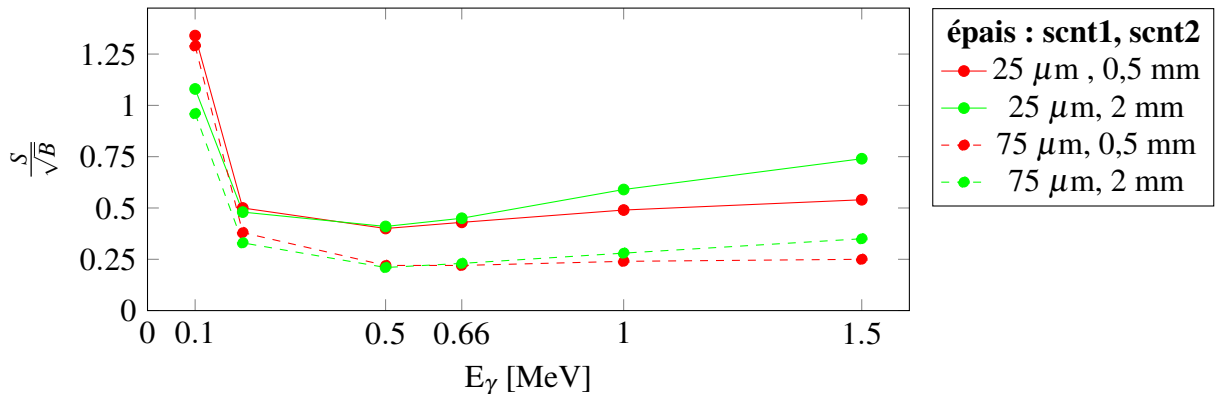


Figure 5.18 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) pour un Phoswich en scintillateurs plastiques associés sans couplant pour différentes épaisseurs du premier étage de scintillateur ("scnt1") et du deuxième étage de scintillateur ("scnt2"). Une épaisseur de verre de 2 mm est placée derrière le deuxième scintillateur. Les sélections en énergie pour l'analyse TS1 en coïncidence entre les deux étages sont appliquées : $E1 > \text{seuil}$, $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$. Le seuil en énergie est adapté en fonction des différentes épaisseurs du premier étage de scintillateur : 10 keV pour 25 μm et 20 keV pour 75 μm .

Le Phoswich sans couplant traité avec l'analyse TS1 est très efficace pour rejeter les gamma de basse énergie ($\leq 0,1 \text{ MeV}$) car la plupart des électrons secondaires créés dans un étage de scintillateur n'atteignent pas l'autre. Pour les gamma de 0,5 MeV, il est moins efficace car les électrons secondaires créés dans les scintillateurs ont des énergies ($T_{max} = 0,33 \text{ MeV}$ cf. paragraphe 1.2.1) similaires à celles des bêta du ^{60}Co , ce qui conduit à une efficacité gamma élevée.

Un premier étage fin améliore le facteur de mérite et est à privilégier. Un deuxième étage de scintillateur d'épaisseur 2 mm améliore le facteur de mérite par rapport à 0,5 mm pour les gamma à haute énergie : $\sim 1,5$ fois plus élevé pour les gamma de 1,5 MeV et $\sim 1,2$ fois pour les gamma d'1 MeV. L'épaisseur du deuxième scintillateur de 2 mm est donc à privilégier pour améliorer le rejet de gamma de haute énergie.

Le premier étage de scintillateur de 25 μm a un facteur de mérite ~ 2 fois plus élevé que celui de 75 μm pour les gamma d'énergie supérieure à 0,5 MeV. Ce facteur est très important et il est donc essentiel de déterminer l'épaisseur minimale du premier étage de scintillateur utilisable expérimentalement. Il faut en effet créer suffisamment de lumière pour sortir du bruit.

5.2.1.4 Validation expérimentale du Phoswich en scintillateurs plastiques avec une source bêta

Les résultats des simulations précédentes montrent qu'un premier étage de scintillateur le plus fin possible favorise la discrimination bêta gamma. Afin de déterminer quelle épaisseur est utilisable pratiquement, des tests expérimentaux ont été effectués pendant mon stage [56]. Elle sera déterminée pour toutes la suites des études.

Deux scintillateurs circulaires (un rapide et un lent) de petite surface, diamètre $\phi = 2,5$ cm, ont été couplés avec de la graisse optique. Le premier étage est composé d'un scintillateur rapide de type EJ212 [60] dont on a fait varier l'épaisseur (25, 50 ou 75 μm). Le deuxième étage est un scintillateur lent de type EJ240 [61] de 2 mm d'épaisseur. L'épaisseur de graisse optique est fine, elle a été estimée, par mesure, à ~ 50 μm .

La Figure 5.19 représente le montage expérimental utilisé pour les tests. Les scintillateurs sont couverts par un Mylar aluminisé pour réfléchir la lumière vers le PMT. Il est très fin (1,5 μm d'épais) pour minimiser son effet sur la détection des bêta et des gamma. Les scintillateurs sont assemblés directement à un PMT de type "XP2020" [62], de diamètre 5,1 cm ($> \phi = 2,5$ cm), par de la graisse optique. Les signaux en sortie du PMT sont envoyés au système d'acquisition FASTER, qui sera décrit dans la partie 7.5. Ce système d'acquisition est capable de fonctionner en mode "QDC" (Charge Analog to Digital Converter) avec 4 portes d'intégration en temps.

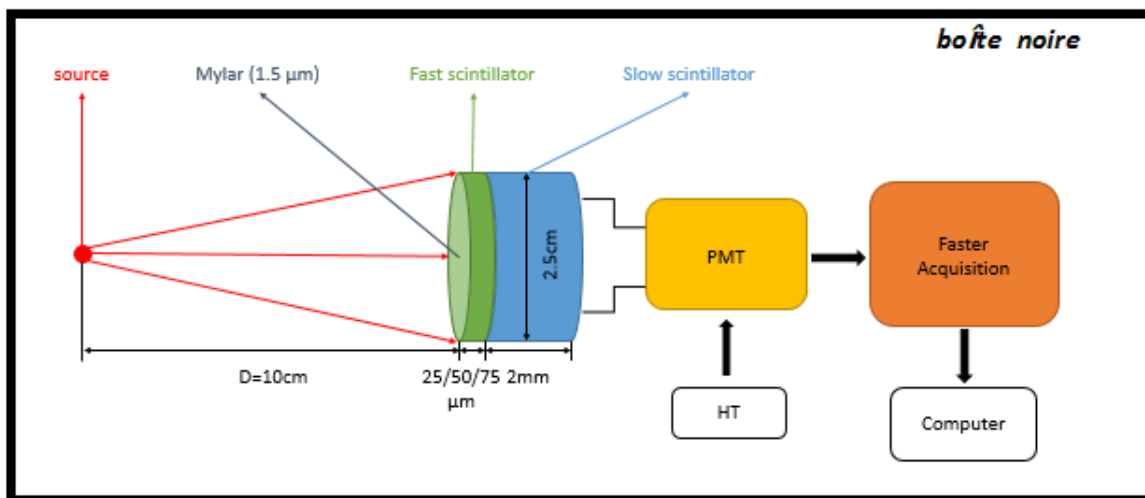


Figure 5.19 Schéma du dispositif expérimental utilisé pour tester les Phoswich de petite surface 5 cm^2 . [56]

Deux portes d'intégration ont été utilisées dans cette étude pour récupérer les signaux dus au scintillateur rapide et au scintillateur lent. Une porte d'intégration allant de -5 ns à 20 ns est choisie pour intégrer les charges rapides et une porte allant de 40 à 600 ns pour intégrer la partie lente du signal. La distribution des charges (charges rapides en fonction de charges lentes) est équivalente à la distribution en énergie obtenue en simulation.

La Figure 5.20 compare la distribution en charges pour trois épaisseurs de scintillateurs rapides différentes : (a) 25 , (b) 50 et (c) 75 μm . Ces tests ont été réalisés avec une source bêta de ^{137}Cs , qui émet des bêta de $T_{\beta,max} = 0,51$ MeV (95%) et 1,17 MeV (5%) ainsi que

des électrons de conversion de 0,63 MeV et des gamma de 0,66 MeV. Comme le montrent (b)

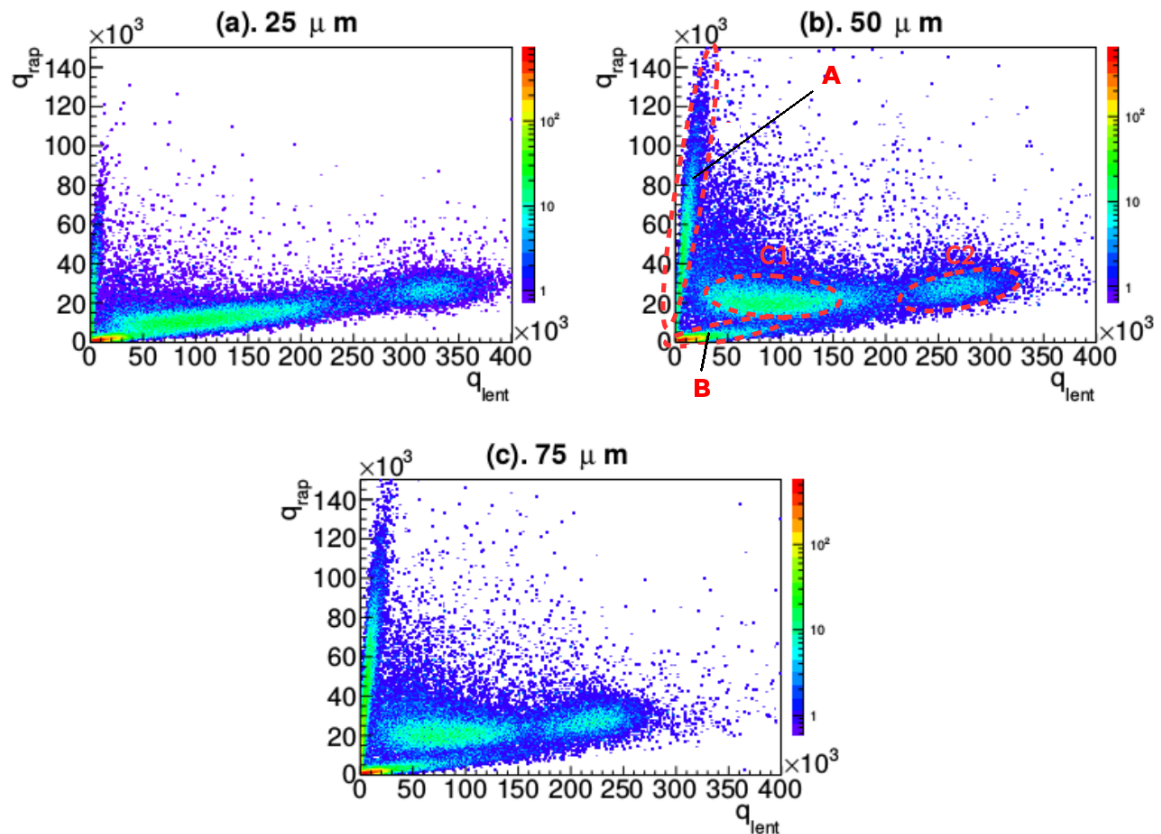


Figure 5.20 Distributions expérimentales de charges (charges rapides, q_{rap} , en fonction de charges lentes, q_{lent}) pour différentes épaisseurs de scintillateur rapide pour une source bêta de ^{137}Cs . La configuration du détecteur est : 50 μm de graisse optique entre les deux scintillateurs, 2 mm de scintillateur lent et une surface active de $\sim 5 \text{ cm}^2$.

et (c), quatre contributions distinctes sont observables sur le spectre. La contribution proche de l'axe vertical q_{rap} (zone A) est due aux bêta qui n'interagissent que dans le premier étage de scintillateur (correspondant à la zone A sur la Figure 5.12). La contribution près de l'axe horizontal q_{lent} (zone B) représente les gamma du ^{137}Cs qui ne déposent de l'énergie que dans le scintillateur lent. Les deux autres régions réparties au milieu du spectre (C1 et C2) correspondent aux particules qui touchent les deux scintillateurs (zone C sur la Figure 5.12). La distribution à gauche (C1), qui est plus allongée, est due aux bêta du ^{137}Cs . Celle à droite (C2), qui a une distribution plus concentrée, est due aux électrons de conversion du ^{137}Cs , qui ont une énergie plus élevée.

La discrimination bêta/gamma n'est plus aussi bonne avec un premier étage de scintillateur de 25 μm . Sur la Figure 5.20 (a), la contribution due aux électrons qui interagissent dans les deux scintillateurs (zones C1 et C2) se superpose à celle due aux gamma (zone B). A cause de la faible épaisseur du premier étage de scintillateur rapide, la lumière créée par les électrons est trop faible. La détection correcte du signal bêta n'est donc pas réalisable avec une épaisseur aussi fine.

Ces tests expérimentaux montrent que le scintillateur rapide de 25 μm d'épaisseur n'est pas approprié à cause de la faible quantité de lumière émise. Bien que la simulation montre

qu'un scintillateur rapide le plus fin possible est favorable à l'efficacité de détection bêta, pratiquement il ne sera pas possible de descendre en dessous de $50 \mu\text{m}$.

Ces mesures permettent d'éliminer un premier étage rapide de $25 \mu\text{m}$. Par la suite, une épaisseur de $75 \mu\text{m}$ sera choisie car la présence du guide de lumière pour des scintillateurs de grande taille dégradera encore la collection de lumière.

5.2.1.5 Conclusion

L'analyse en coïncidence TS1 est appliquée au Phoswich en scintillateurs plastiques. Elle demande un premier étage le plus fin possible, car elle optimise à la fois la détection bêta et le rejet du bruit gamma. L'épaisseur minimale utilisable en pratique est de $75 \mu\text{m}$, d'après les tests expérimentaux avec des scintillateurs de petite surface (5 cm^2).

Lorsqu'il y a de la matière (PM simulé comme une épaisseur de verre de 2 mm) derrière le deuxième scintillateur, la configuration optimisée consiste à associer sans couplant les deux étages avec un deuxième étage d'épaisseur de 2 à 5 mm.

Pour les gamma d'énergie supérieure à 0,2 MeV, le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ est alors de 0,2 - 0,35, ce qui est inférieur à celui obtenu avec un détecteur à un seul étage de scintillateur, qui donne un facteur de mérite de 0,45 - 0,75 (cf. Figure 5.11). La raison est que la double coïncidence fait diminuer l'efficacité bêta de 45% (cf. Tableau 5.1) à 14% (cf. Tableau 5.3) pour un premier étage de scintillateur de $75 \mu\text{m}$ ($S_{TS1} \approx 0,3 S_{1\text{étage}}$). Pour améliorer le facteur de mérite, il faudrait que l'analyse TS1 appliquée au Phoswich permette un taux de détection gamma $B_{TS1} < 0,3^2 B_{1\text{étage}}$, ce qui n'est pas le cas. La perte d'efficacité bêta n'est donc pas compensable par l'amélioration du rejet des gamma.

Par conséquent, la coïncidence entre les deux scintillateurs (analyse TS1) donne un seuil de décision correspondant à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de gamma de ^{137}Cs de $3 \mu\text{Sv/h}$ ($\frac{S}{\sqrt{B}} = 0,24$). Cette analyse en coïncidence sera donc abandonnée.

5.2.2 Analyse TS2 : au moins le premier étage de scintillateur touché

En fixant l'épaisseur du premier étage de scintillateur à $75 \mu\text{m}$, nous continuons les simulations pour optimiser le Phoswich en scintillateurs grâce à d'autres méthodes d'analyse.

L'analyse en coïncidence appliquée au Phoswich n'a pas amélioré la performance de discrimination parce que son effet sur la diminution de l'efficacité de détection bêta est trop important. Pour éviter cet effet, une autre méthode d'analyse est proposée pour le Phoswich : en plus des signaux qui sont en coïncidence entre les deux étages de scintillateurs, les particules qui s'arrêtent dans le premier étage de scintillateur sont également prises en compte. Cette analyse correspond à sélectionner les zones A et C sur la Figure 5.12. Cette méthode, appelée TS2, pourrait permettre de maximiser l'efficacité de détection bêta par rapport à l'analyse TS1 sans trop augmenter la détection de bruit gamma. Son effet sur la discrimination bêta/gamma sera étudié.

5.2.2.1 Détection bêta

Pour illustrer le fonctionnement de l'analyse TS2, la Figure 5.21 présente la distribution en énergie brute et après application des coupures en énergie utilisées pour l'analyse. Ces spectres sont obtenus pour un Phoswich constitué d'un premier étage de 75 μm , assemblé sans couplant au deuxième étage de 1 mm, suivi par une épaisseur de 2 mm de verre.

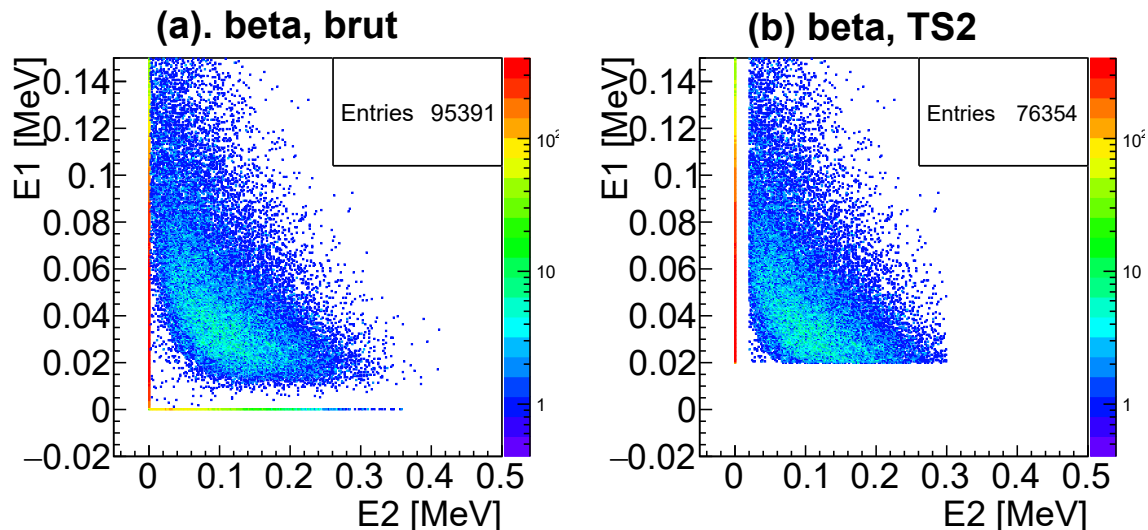


Figure 5.21 Distributions en énergie ($E1$ vs $E2$) dues à des bêta issus du ^{60}Co pour un Phoswich ayant un premier étage d'épaisseur 75 μm , sans couplant, et un deuxième étage de 1 mm. Cette figure compare les résultats obtenus sans sélection (a) et avec l'analyse TS2 (b) pour 5×10^5 électrons envoyés. Les sélections en énergie de l'analyse TS2 sont : $E1 > 0,02$ MeV et ($E2 = 0$ ou $0,02$ MeV $< E2 < 0,3$ MeV).

Les sélections appliquées sur la distribution en énergie déposée dans le premier étage en fonction de celle déposée dans le seconde sont :

1. $E1 > 0,02$ MeV et $E2 = 0$ MeV : pour prendre en compte les électrons qui s'arrêtent dans le premier étage en y déposant plus de 0,02 MeV, ce qui correspond à la zone A de la Figure 5.12.
2. $E1 > 0,02$ MeV et $0,02$ MeV $< E2 < 0,3$ MeV : pour prendre en compte les électrons en coïncidence qui déposent de l'énergie dans les deux scintillateurs, ce qui correspond à la zone C de la Figure 5.12.

Grâce à cette sélection, $\sim 80\%$ des bêta qui atteignent le détecteur sont détectés, maximisant l'efficacité bêta comme dans le cas d'un seul étage de scintillateur. Avec un rendement de source de 50%, on retrouve ainsi une efficacité bêta de $\sim 40\%$.

5.2.2.2 Détection gamma

Les mêmes sélections en énergie sont ensuite appliquées aux spectres gamma. La Figure 5.22 présente les distributions en énergie brutes et après la sélection de l'analyse TS2 pour trois énergies de gamma. En comparant le "Entries" avec et sans analyse, 90% des gamma de haute énergie, de 0,5 MeV et de 1 MeV, sont éliminés. Cette proportion monte à 98% pour les gamma de 0,1 MeV. Cependant, en comparant cette analyse à l'analyse TS1, le taux

de gamma détecté va augmenter car les gamma, qui n'interagissent que dans le scintillateur rapide (trait vertical en $E_2 = 0$ sur la Figure 5.22) sont également pris en compte.

Effet du couplant Les configurations avec une épaisseur de couplant optique entre les deux scintillateurs ont également été étudiées. La Figure 5.23 présente le taux de détection gamma, B , pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'épaisseur de couplant optique en fixant l'épaisseur du deuxième étage à 1 mm. Une épaisseur de couplant optique entre les deux étages de scintillateur dégrade les performances. Par exemple, un Phoswich avec un couplant de $500 \mu\text{m}$ d'épaisseur détecte 1,3 fois plus de gamma ($E = 1$ et $1,5 \text{ MeV}$) que sans couplant. Il y a peu de différence pour les gamma à basse énergie.

Par la suite, seules les configurations sans épaisseurs du couplant optique seront donc étudiées.

Effet du deuxième étage de scintillateur La Figure 5.24 présente l'évolution du taux de détection gamma, B , dans un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ pour différentes épaisseurs du deuxième scintillateur. Pour des gamma de haute énergie, ce taux diminue quand l'épaisseur du deuxième étage de scintillateur augmente jusqu'à 2 mm. L'explication est identique à celle de l'analyse TS1 : la coupure en énergie $E < 0,3 \text{ MeV}$ est plus efficace si le deuxième scintillateur est plus épais (cf. Figure 5.17). Donc, pour cette analyse TS2, la meilleure configuration serait un Phoswich sans couplant et avec une épaisseur de deuxième étage de scintillateur de 2 à 5 mm.

Pour la configuration optimale (épaisseur du deuxième scintillateur de 5 mm et sans couplant), le taux de gamma de basse énergie détecté en utilisant cette analyse est très élevé (autour de $3500/\text{s}$) puis il diminue quand l'énergie des gamma augmente ($< 1000/\text{s}$ pour les gamma à $1,5 \text{ MeV}$). Par rapport à l'analyse en coïncidence TS1, le taux de gamma de basse énergie détecté augmente énormément (de $40 - 500 \gamma/\text{s}$ à $\sim 3500 \gamma/\text{s}$ pour $E_\gamma = 0,1$ et $0,2 \text{ MeV}$ cf. Figure 5.16) car il est plus probable que des gamma à basse énergie conduisent à un dépôt d'énergie dans le premier étage seul. Ces valeurs se rapprochent alors de celles obtenues avec un seul étage de scintillateur (cf. Figure 5.10 : $75 \mu\text{m}$).

A l'inverse des gamma à basse énergie, l'interaction des gamma plus énergétiques ($E \geq 1 \text{ MeV}$) conduit de façon peu probable à un dépôt d'énergie seulement dans le premier étage. C'est pourquoi le rejet des gamma d'énergie allant de 1 à $1,5 \text{ MeV}$ avec l'analyse TS2 (980 et $600/\text{s}$ pour un deuxième scintillateur de 2 mm cf. Figure 5.24) donne des taux de détection comparables à ceux obtenus avec TS1 (850 et $550/\text{s}$ cf. Figure 5.16). L'analyse TS2 est donc aussi performante pour éliminer les gamma à haute énergie que l'analyse TS1 et 1,5 à 2 fois plus efficace qu'un détecteur à un seul étage de scintillateur pour rejeter les gamma de 1 à $1,5 \text{ MeV}$ (cf. Figure 5.10).

En résumé, le rejet des gamma est optimisé avec un Phoswich sans couplant, et un deuxième étage de scintillateur de 2 - 5 mm. Avec un taux de gamma élevé de $\sim 3500 \gamma/\text{s}$, les gamma de basse énergie pourraient être cependant problématiques avec cette analyse TS2.

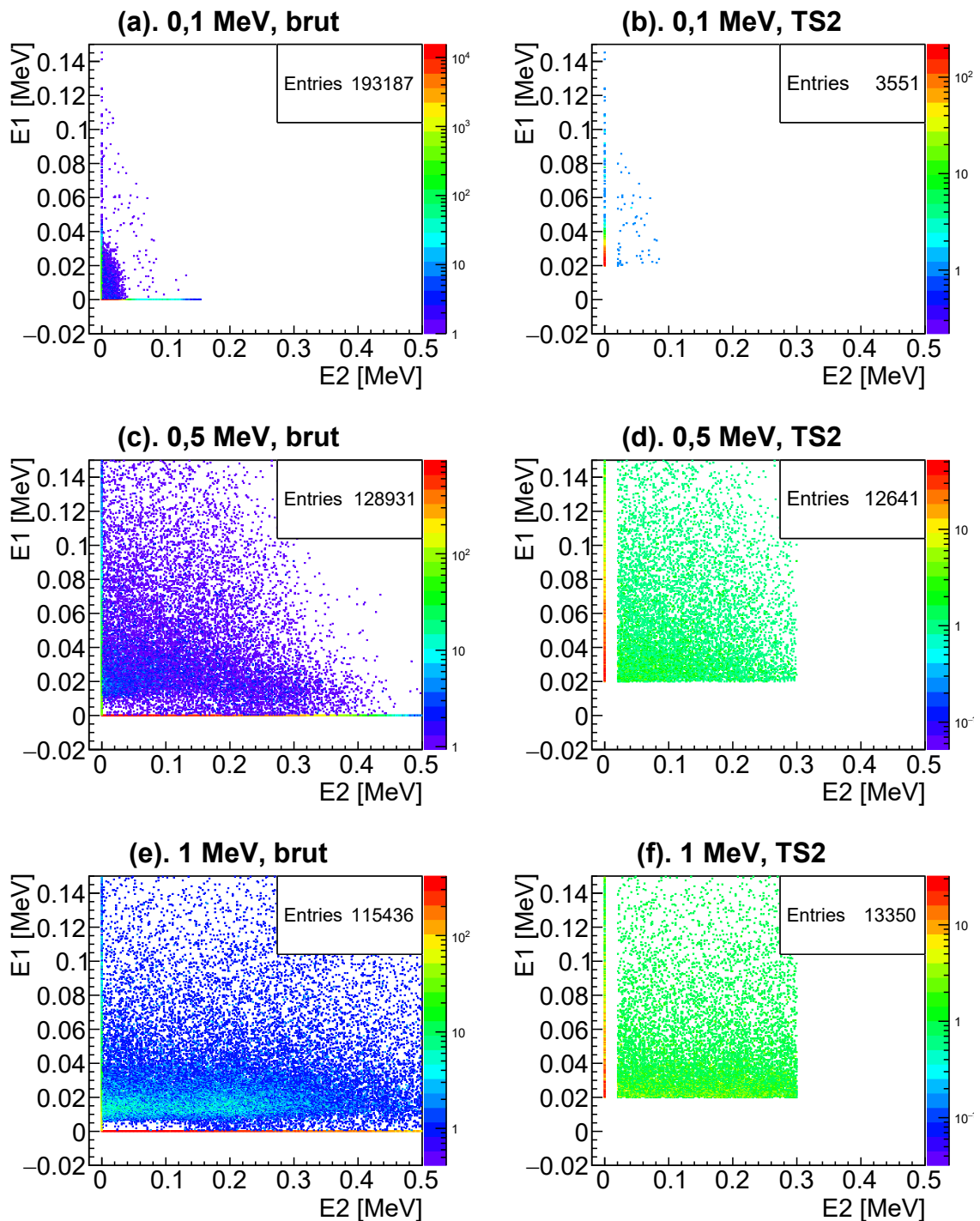


Figure 5.22 Distributions en énergie (E1 vs E2) brute et avec les sélections en énergie due à des gamma de différentes énergies ((a) 0,1 MeV, (b) 0,5 MeV et (c) 1 MeV) pour un Phoswich ayant un premier étage d'épaisseur $75 \mu\text{m}$, sans couplant, et un deuxième étage de 1 mm. Cette figure compare les résultats obtenus sans sélection (brut) et avec l'analyse TS2 pour 10^7 gamma envoyés. Les sélections en énergie : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0 \text{ MeV}$ ou $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$).

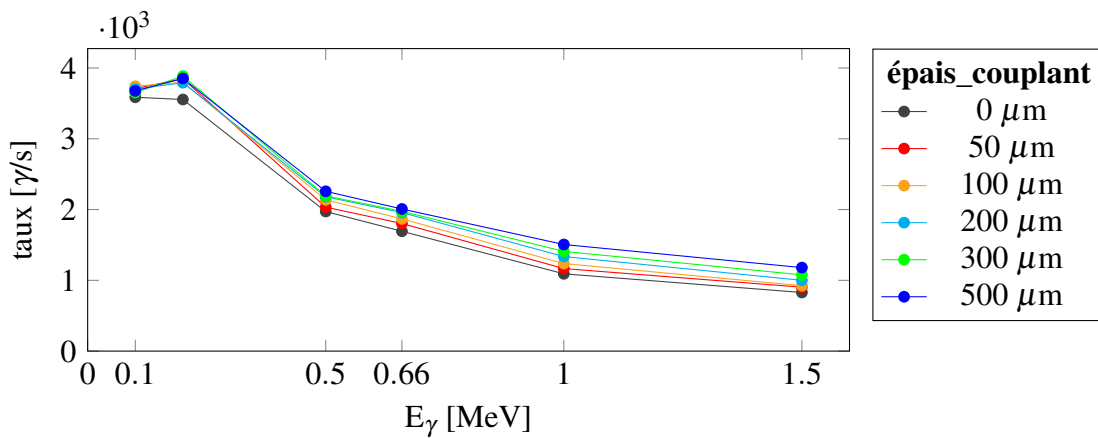


Figure 5.23 Taux de gamma détecté (B) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) avec un Phoswich (premier étage de scintillateur de $75 \mu\text{m}$ et deuxième scintillateur de 1 mm) pour différentes épaisseurs du couplant optique entre les deux étages. L'analyse TS2 est appliquée avec des sélections en énergie : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0 \text{ MeV}$ ou $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$).

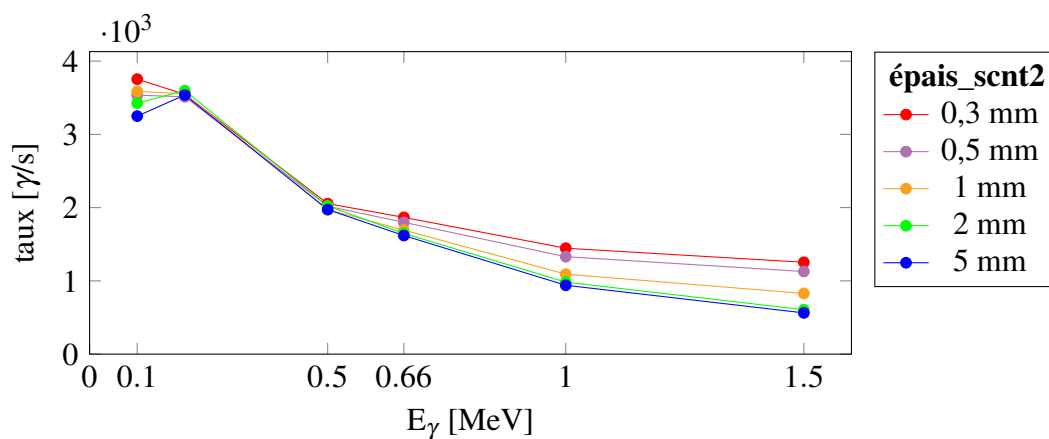


Figure 5.24 Taux de gamma détecté (B) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) avec un Phoswich (premier étage de scintillateur de $75 \mu\text{m}$ et sans couplant entre les deux scintillateurs) pour différentes épaisseurs du deuxième étage de scintillateur (scnt2). L'analyse TS2 avec des sélections en énergie sont appliquées : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0 \text{ MeV}$ ou $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$).

5.2.2.3 Performance de discrimination

Comme l'analyse TS2 maximise la détection bêta, pour choisir la meilleure configuration du Phoswich, il suffit de choisir celle qui minimise la détection du bruit gamma. Il faut donc éviter une épaisseur de couplant optique entre les deux étages de scintillateur et choisir un deuxième étage de scintillateur épais. La Figure 5.25 présente le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour un Phoswich avec le premier étage de 75 μm associé, sans couplant, à un deuxième étage de différentes épaisseurs. L'évolution du facteur de mérite en fonction de différentes épaisseurs du deuxième étage de scintillateur est présentée. L'épaisseur du deuxième étage influence peu ($\leq 7\%$) le rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour les gamma d'énergie inférieure ou égale à 0,5 MeV. Par contre, un scintillateur plus épais permet d'améliorer le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour les gamma de haute énergie (eg : de 0,7 à 1 avec un scintillateur de 0,3 à 5 mm avec $E_\gamma = 1,5$ MeV), grâce à une sélection en énergie plus efficace.

Avec la configuration optimisée, sans couplant et avec un deuxième étage de 2 - 5 mm, le rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ se situe entre 0,4 et 1 en fonction de l'énergie des gamma du bruit de fond. Pour les gamma du ^{137}Cs ($E = 0,662$ MeV), ce Phoswich optimisé a un facteur de mérite de $\sim 0,6$, correspondant à un seuil de décision de 0,4 Bq/cm² de contamination dans un bruit de fond gamma de ~ 20 $\mu\text{Sv/h}$.

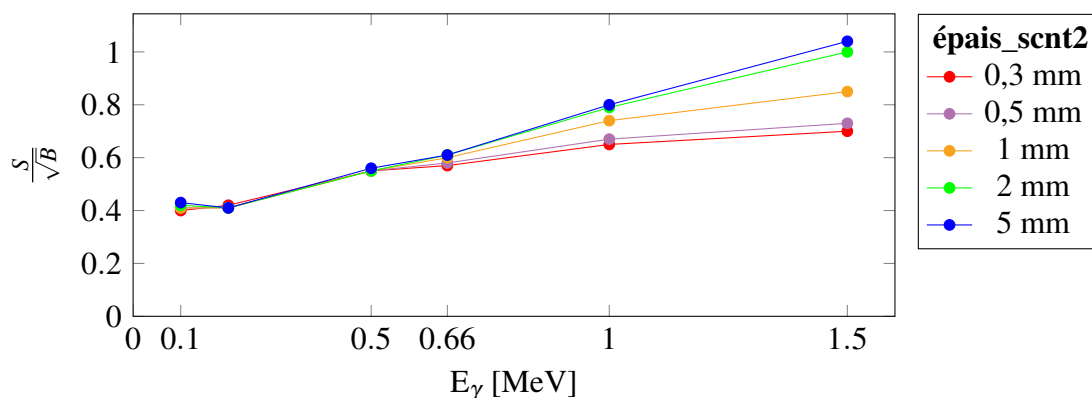


Figure 5.25 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu pour un Phoswich (premier étage de scintillateur de 75 μm , sans couplant) en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) pour différentes épaisseurs du deuxième étage de scintillateur (scnt2). L'analyse TS2 avec des sélections en énergie sont appliquées : $E1 > 0,02$ MeV et ($E2 = 0$ MeV ou $0,02$ MeV $< E2 < 0,3$ MeV).

Pour conclure, si l'analyse TS2 est appliquée au Phoswich avec un premier étage de 75 μm d'épaisseur, il faut éviter d'utiliser du couplant entre les deux scintillateurs et avoir un deuxième étage de scintillateur de 2 - 5 mm, ce qui correspond aux conclusions obtenues pour l'analyse TS1. Grâce à l'analyse TS2, la performance de discrimination est améliorée par rapport à l'analyse TS1 sauf à basse énergie 0,1 MeV ($\frac{S}{\sqrt{B}}$ de $\sim 0,4$ pour TS2 et ~ 1 pour TS1) car les gamma à basse énergie ont de forte probabilité de s'arrêter dans le premier et sont pris en compte par l'analyse TS2. Cela confirme la conclusion de la partie précédente qui a conduit à abandonner l'analyse TS1 pour le Phoswich en scintillateurs plastiques. En outre, cette analyse donne des performances meilleures que celles obtenues avec un seul étage de scintillateurs notamment pour les

gamma de haute énergie $E_\gamma > 0,66$ MeV. Ce Phoswich optimisé permet d'obtenir un seuil de décision correspondant à $0,4$ Bq/cm² de contamination dans un bruit de fond gamma du ¹³⁷Cs de ~ 20 μ Sv/h.

5.2.3 Analyse TS3 : seul le premier étage touché (utilisation du deuxième étage en véto)

Les résultats précédents ne permettent pas de répondre au cahier des charges, cela nous a conduit à envisager une nouvelle méthode d'analyse. L'analyse TS3 est une extrapolation de l'analyse TS2, utile quand la configuration du détecteur et/ou l'énergie des bêta conduit une majorité de ces derniers à s'arrêter dans le premier étage, ce qui est le cas pour les bêta de basse énergie du ⁶⁰Co ($T_{\beta,max} = 0,316$ MeV). Elle consiste à prendre en compte les particules qui ne déposent de l'énergie que dans le premier étage (zone A en Figure 5.12). Tous les événements ayant interagis dans le deuxième étage sont rejetés. Le deuxième étage fait alors office de "véto" et l'épaisseur de couplant optique entre les deux scintillateurs correspond à une "zone morte" qui permet aux bêta de s'y arrêter pour éviter d'atteindre ce véto.

Sur la Figure 5.26 sont présentées les distributions brutes en énergie, pour les bêta issus du ⁶⁰Co, déposées dans les deux étages de scintillateurs (premier étage de scintillateur d'épaisseur 75 μ m, deuxième étage de 1 mm) pour différentes épaisseurs de couplant optique (0 , 50 , 200 et 300 μ m). Quand l'épaisseur de couplant augmente, la proportion des électrons qui interagissent dans les deux étages (zone C) diminue. La tendance observée est vraie pour des épaisseurs du deuxième étage de 1 à 5 mm.

Pour ce type de configuration avec une analyse qui prend en compte les particules qui n'interagissent pas dans le deuxième étage (zone A), il est nécessaire d'avoir une zone morte entre les deux étages.

5.2.3.1 Détection bêta

Avec l'analyse TS3, l'épaisseur du deuxième étage de scintillateur n'influence pas la détection bêta, nous la fixons à 1 mm pour étudier l'effet de l'épaisseur de couplant optique sur le taux de détection bêta.

Le Tableau 5.4 présente le taux de détection bêta soumis à une contamination surfacique bêta de $0,4$ Bq/cm² pour différentes épaisseurs du couplant optique entre les deux scintillateurs. Quand l'épaisseur de couplant optique augmente de 0 à 200 μ m, le taux de détection bêta augmente de $\sim 50\%$ (de $16,3/s$ à $24,4/s$) car moins de bêta sont éliminés par le véto. Une épaisseur de couplant optique encore plus importante est peu utile pour les électrons issus du ⁶⁰Co car elle ne donne qu'une légère augmentation de l'efficacité qui est comprise dans les incertitudes du facteur de mérite (de 10% de notre étude). La combinaison d'un premier étage de scintillateur d'épaisseur 75 μ m et de 200 μ m de couplant optique donne une efficacité bêta, pour l'analyse TS3, de $\sim 42\%$.

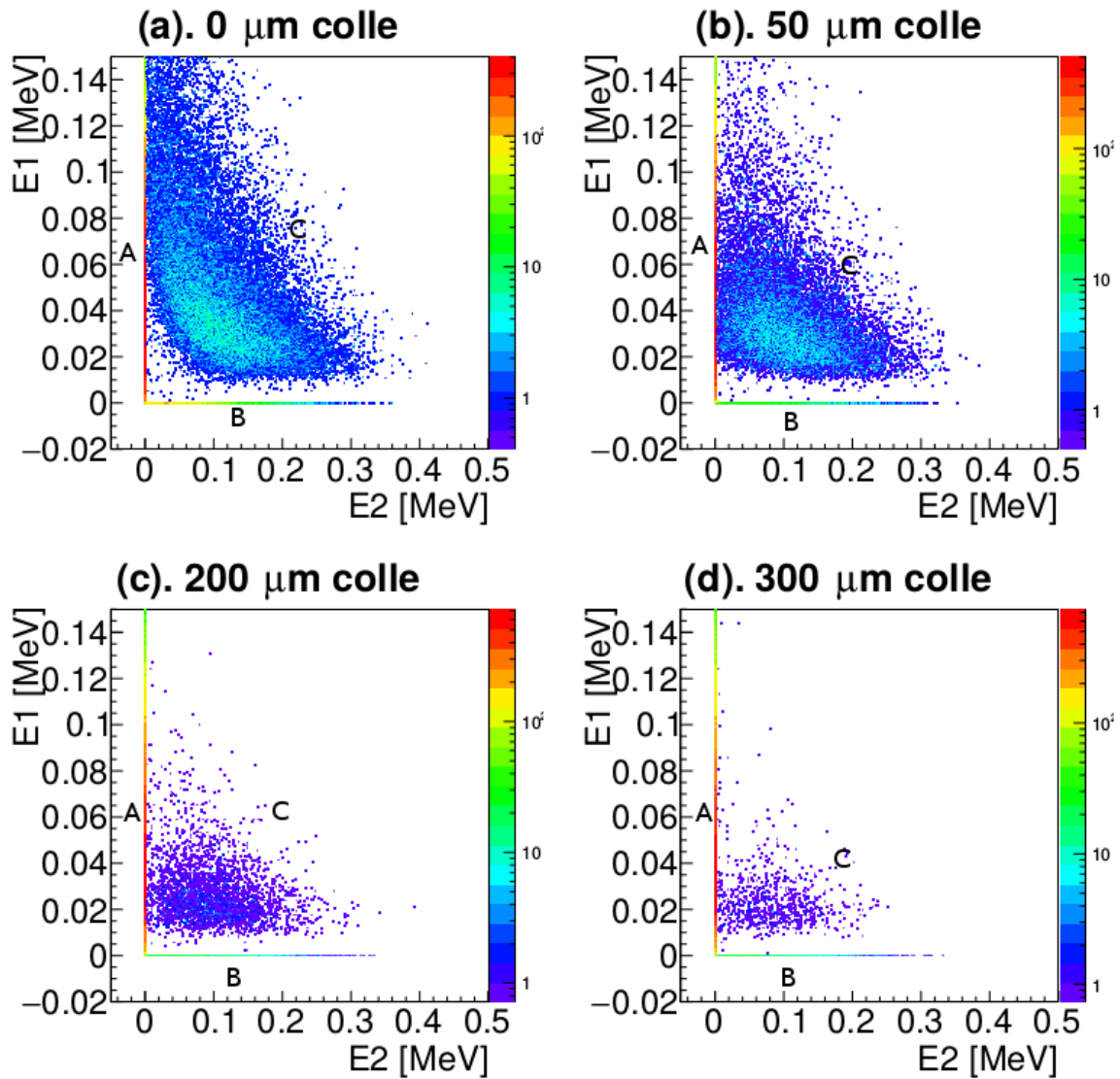


Figure 5.26 Distributions en énergie ($E1$ vs $E2$) brute due aux béta du ^{60}Co pour un Phoswich avec un premier étage de scintillateur de $75\ \mu\text{m}$ d'épais, deuxième étage de $1\ \text{mm}$ en fonction de l'épaisseur de couplant optique. 5×10^5 béta envoyés à partir d'une surface de $20 \times 20\ \text{cm}^2$. Chaque distribution est séparée en 3 zones : zone A, les béta qui n'interagissent qu'ils s'arrêtent dans le premier étage ; zone B, les béta qui n'interagissent que dans le deuxième étage ; zone C, les béta qui interagissent dans les deux étages.

Tableau 5.4 Taux de béta détecté (S) correspondant à une contamination de $0,4\ \text{Bq/cm}^2$ pour le Phoswich en scintillateurs plastiques qui utilise le deuxième étage comme véto. Le premier étage est de $75\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et le deuxième étage de $1\ \text{mm}$ d'épaisseur. Les résultats ont été obtenus avec l'analyse TS3 : $E1 > 0,02\ \text{MeV}$ et $E2 = 0\ \text{MeV}$

Couplant [μm]	Taux S [1/s]
0	16,3
50	20,4
100	22,6
200	24,4
300	24,9
500	25,2

5.2.3.2 Détection gamma

Après avoir étudié l'effet de l'épaisseur de couplant optique sur l'efficacité de détection bêta, nous allons étudier l'influence des paramètres sur la détection des gamma.

Effet de l'épaisseur du deuxième étage de scintillateur La Figure 5.27 présente le taux de détection gamma pour un Phoswich avec différentes épaisseurs du deuxième scintillateur. Le premier étage est de $75 \mu\text{m}$ et le couplant a une épaisseur de $200 \mu\text{m}$.

L'épaisseur du deuxième étage de scintillateur, de $0,5 \text{ mm}$ à 5 mm , n'influence pas l'efficacité de détection des gamma de haute énergie $E > 0,5 \text{ MeV}$. Ce scintillateur plastique, qui sert à éliminer tous les événements qui y ont interagit, fonctionne comme veto. Il est par contre peu sensible aux gamma, et donc fonctionne rarement en "anti-Compton" (élimination des gamma diffusés dans le premier étage). Il fonctionne plutôt par interaction d'électrons secondaires émis dans le premier étage de scintillateur.

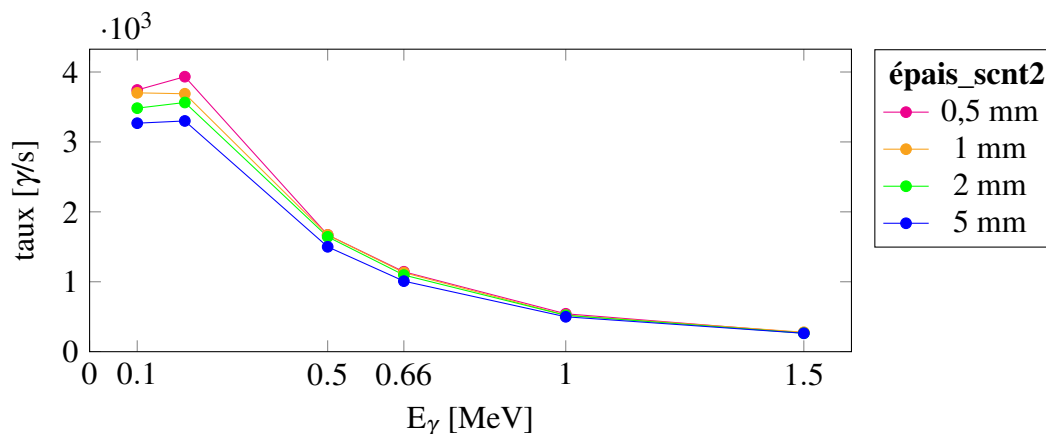


Figure 5.27 Taux de gamma détecté (B) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ , par un Phoswich ayant un premier étage de $75 \mu\text{m}$ et un couplant de $200 \mu\text{m}$ pour différentes épaisseurs du deuxième étage de scintillateur. L'analyse TS3 est appliquée avec les sélections en énergies : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $E2 = 0 \text{ MeV}$.

Pour les faibles énergies de photon, $E < 0,5 \text{ MeV}$, un deuxième scintillateur plus épais (2 à 5 mm) permet de rejeter $\sim 15\%$ de gamma en plus par rapport à un scintillateur fin ($0,5 \text{ mm}$). Le choix de l'épaisseur du deuxième étage ne semble pas très important et sera fixé par les mesures.

Effet de l'épaisseur de couplant entre les deux scintillateurs Sur la Figure 5.28 est présentée l'évolution du taux de détection gamma pour différentes épaisseurs du couplant optique en fixant l'épaisseur du premier étage à $75 \mu\text{m}$ et celle du deuxième étage à 5 mm .

Le taux de gamma détecté augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de couplant optique (de 0 à $500 \mu\text{m}$). Les électrons mis en mouvement lors des interactions des photons ($E_\gamma > 0,2 \text{ MeV}$) dans le couplant peuvent atteindre le premier étage de scintillateur, ce qui provoque une augmentation du taux de gamma détectés (eg : $2 - 4$ fois plus élevé avec un couplant de $500 \mu\text{m}$ que sans couplant pour $E \geq 0,5 \text{ MeV}$). Il semble donc intéressant de

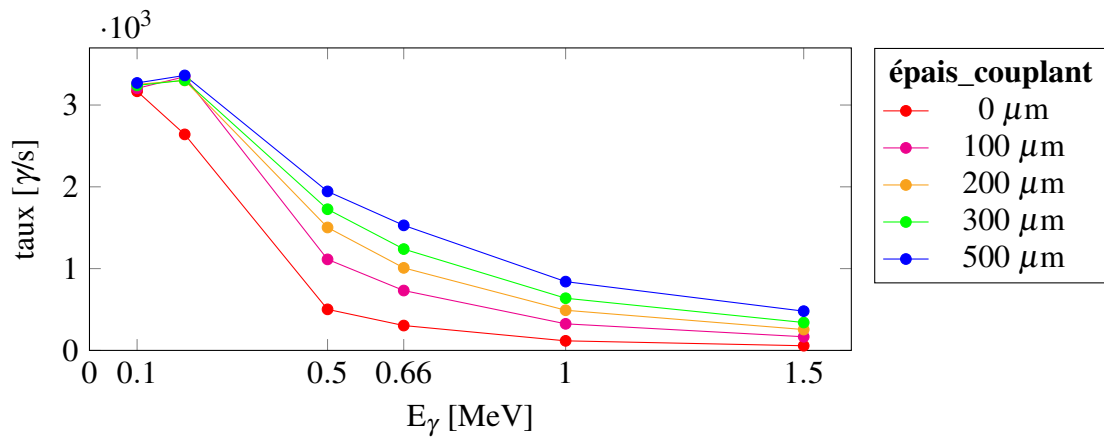


Figure 5.28 Taux de gamma détecté (B) en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$, par un Phoswich ayant un premier étage de $75 \mu\text{m}$ pour différentes épaisseurs du couplant optique (épaisseur du deuxième étage de scintillateur fixée à 5 mm). L'analyse TS3 est appliquée avec les sélections en énergies : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $E2 = 0 \text{ MeV}$.

minimiser l'épaisseur de couplant optique, ce qui va à l'encontre de la conclusion pour la détection bêta. Ces sont donc les performances de discrimination qui permettront d'optimiser cette épaisseur.

5.2.3.3 Performance de discrimination

L'épaisseur du deuxième étage de scintillateur est fixée à 5 mm , celle du premier à $75 \mu\text{m}$.

Effet de l'épaisseur de couplant entre deux scintillateurs La Figure 5.29 présente l'évolution du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour différentes épaisseurs de couplant optique.

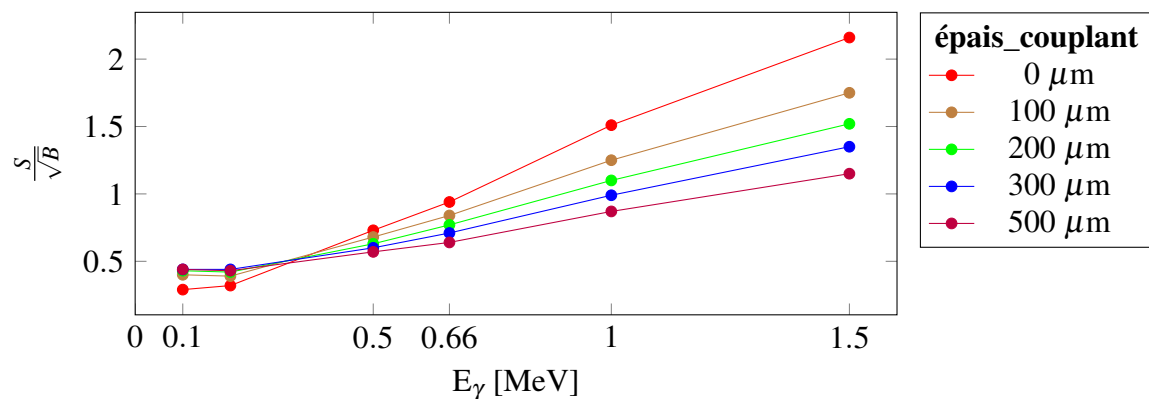


Figure 5.29 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ obtenu avec un Phoswich ayant un premier étage de scintillateur de $75 \mu\text{m}$ pour différentes épaisseurs du couplant optique (deuxième scintillateur fixé à 5 mm). L'analyse TS3 est appliquée avec les sélections en énergies : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $E2 = 0$.

Le choix optimal d'épaisseur de couplant optique varie en fonction de l'énergie des gamma. Pour les gamma à basse énergie : $0,1$ et $0,2 \text{ MeV}$, le couplant d'épaisseur $200 - 500 \mu\text{m}$ est plus performant que des épaisseurs plus fines, puis cette performance ne varie plus si l'épaisseur de couplant optique augmente encore. A partir de $\sim 0,4 \text{ MeV}$, un couplant le plus fin possible optimise la performance de discrimination bêta/gamma.

La meilleure configuration dépend donc du spectre en énergie du bruit de fond gamma. Si c'est un spectre dominé par les gamma à haute énergie, le Phoswich sans couplant est à favoriser, qui permet d'atteindre un facteur de mérite variant de 0,3 ($E = 0,1$ MeV) à 2,2 ($E = 1,5$ MeV). Si, par contre, il y a plus de gamma de basse énergie, au moins $200 \mu\text{m}$ du couplant optique semble améliorer les performances, avec un facteur de mérite allant de 0,4 à 1,5. Avec un spectre en énergie continu allant de 0,1 à 1,5 MeV, une épaisseur de couplant de 100 à $200 \mu\text{m}$ serait donc un bon compromis. A $0,662$ MeV, un facteur de $0,77$ est obtenu avec un couplant d'épaisseur $200 \mu\text{m}$, il correspond à un seuil de décision correspondant à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond de $\sim 30 \mu\text{Sv/h}$.

5.2.4 Conclusion

Les tests expérimentaux avec un Phoswich de petite surface (5 cm^2) ont permis de fixer l'épaisseur du premier étage de scintillateur à $75 \mu\text{m}$ afin d'obtenir une bonne séparation du signal et du bruit en pratique.

L'étude des Phoswich en scintillateurs plastiques a débuté avec une analyse classique (TS1) utilisant la coïncidence entre les deux étages de scintillateur. Il est rapidement apparu que cette analyse conduit à un rejet trop important des électrons du ^{60}Co (bêta de basse énergie) et ne permet d'obtenir qu'un seuil de décision de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans $3 \mu\text{Sv/h}$ issus du ^{137}Cs . L'analyse TS1 est donc abandonnée pour le Phoswich en scintillateurs plastiques.

Des analyses prenant en compte les électrons s'arrêtant dans le premier étage ont donc été mises en œuvre. L'analyse TS2, qui prend en compte les particules qui ont au moins interagité dans le premier étage, est optimisée pour un Phoswich qui n'a pas de couplant optique entre les deux étages. L'analyse TS3 prend en compte les particules qui n'ont interagité que dans le premier scintillateur. Elle utilise le deuxième scintillateur comme véto, et demande une épaisseur de couplant optique ("zone morte") entre les deux scintillateurs (de 100 à $200 \mu\text{m}$) pour arrêter les électrons qui traversent le premier étage.

Pour l'analyse TS2, un deuxième scintillateur plus épais ($2 - 5 \text{ mm}$) favorise le rejet des gamma de haute énergie ($E \geq 1 \text{ MeV}$) d'un facteur de $1,5$ à 2 . Pour l'analyse TS3, un deuxième étage épais améliore un peu (facteur de $1,15$) le rejet des gamma de basse énergie ($0,1 - 0,2 \text{ MeV}$).

La performance du Phoswich optimisé avec les analyses TS2 (Figure 5.25) et TS3 (Figure 5.29) est comparée à l'aide du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$. Il varie de $0,4$ (à $0,1 \text{ MeV}$) à 1 (à $1,5 \text{ MeV}$) pour l'analyse TS2 et de $0,4$ ($E_\gamma = 0,1 \text{ MeV}$) à $1,5$ ($E_\gamma = 1,5 \text{ MeV}$) pour l'analyse TS3 avec une épaisseur de couplant optique compris entre 100 et $200 \mu\text{m}$. Pour les gamma de basse énergie, les deux méthodes d'analyse ont des performances comparables.

Si on compare ces performances de discrimination des Phoswich en plastique avec celle d'un étage de scintillateur, qui donne un facteur de mérite de $0,4$ (à $0,1 \text{ MeV}$) à $0,8$ (à $1,5 \text{ MeV}$) en fonction de l'énergie de gamma. Le Phoswich permet d'améliorer la performance de discrimination surtout à haute énergie.

Par conséquent, les analyses TS2 et TS3 qui permettent d'avoir des performances comparables ont été retenues pour la configuration du Phoswich en scintillateurs plastiques et seront étudiées expérimentalement. Si le bruit de fond gamma provient du ^{137}Cs ($E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$), comme préconisé dans la norme ISO 60325, la configuration optimale de l'analyse TS2 donne un facteur de mérite de $\sim 0,6$ et celle de l'analyse TS3 $\sim 0,77$. Cela correspond à un seuil de décision pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond de $\sim 20 \mu\text{Sv/h}$ pour l'analyse TS2 et $\sim 30 \mu\text{Sv/h}$ pour l'analyse TS3.

Un autre Phoswich basé sur un premier étage très fin de ZnS [40] couramment utilisé pour la discrimination alpha/beta (cf. 3.4) en industrie a été également étudiée. Les détails de l'étude sont présentés en annexe E. Il a été démontré que cette configuration était très sensible aux gamma à basse énergie et que les électrons ne déposent pas suffisamment d'énergie dans l'étage de ZnS pour pouvoir réaliser la discrimination bêta/gamma. Cette configuration est donc abandonnée.

Dorénavant, la configuration du détecteur Phoswich en scintillateurs plastiques optimisée (sans couplant) avec l'analyse TS2 est appelée "Phoswich V1" et celle (avec couplant) avec l'analyse TS3 est appelée "Phoswich V2". La différence réside dans l'existence ou non d'une épaisseur de couplant optique (100 à 200 μm) entre les deux étages de scintillateurs.

5.3 Détecteur composé d'un étage de détecteur gazeux et d'un étage de scintillateur plastique

Pour améliorer la performance de discrimination par rapport au Phoswich en scintillateurs plastiques, les efforts ont été faits pour diminuer la masse surfacique du premier étage. Une solution est d'utiliser un détecteur gazeux comme premier étage de détection. La simulation d'un étage de gaz (6 mm) a montré qu'il est moins sensible aux gamma qu'un étage de scintillateur (75 μm). Cependant, comme dans le cas d'un étage de scintillateur, un seul étage de gaz est très sensible à la présence de matière (mécanique du détecteur) autour du gaz (cf. 5.1.3). Cette section s'intéresse à la performance de discrimination bêta/gamma d'un détecteur à deux étages dont le premier est un détecteur gazeux et le deuxième un scintillateur plastique.

Comme cette configuration utilise un scintillateur plastique en second étage, un PMT est obligatoire pour le bon fonctionnement de l'ensemble du détecteur. C'est pourquoi, en plus des deux zones de détection, une épaisseur de verre de 2 mm sera placée derrière le scintillateur pour simuler la présence du PMT. Étant donné que ce détecteur contient deux étages de détection, les trois méthodes d'analyses définies précédemment, TS1, TS2 et TS3, seront évaluées.

5.3.1 Analyse TS1 : coïncidence entre les deux étages

La faible masse surfacique du premier étage permettrait à une importante proportion des électrons du ^{60}Co d'atteindre le deuxième étage. Ceci pourrait rendre l'analyse TS1 à nouveau intéressante pour cette configuration.

Les seuils optimaux pour l'énergie déposée dans le gaz sont choisis pour obtenir le meilleur facteur de mérite. Ils sont détaillés sur le Tableau 5.5.

Tableau 5.5 Les seuils optimisés (E_{Thres}) utilisés pour différentes épaisseurs du premier étage de gaz

Gaz [mm]	6	9	15	30	50	100
E_{Thres} [keV]	2	3	5	12	18	20

5.3.1.1 Détection bêta

Le Tableau 5.6 présente le taux de bêta détectés pour une contamination au ^{60}Co de 0,4 Bq/cm² pour différentes configurations de ce détecteur avec l'analyse TS1. Les seuils E_{Thres} optimisés avec le facteur de mérite sont soulignés en bleu. Les résultats du tableau montrent

Tableau 5.6 Taux de bêta détectés (S) pour une contamination ^{60}Co de 0,4 Bq/cm² en appliquant l'analyse TS1 pour différents seuils en énergie déposée dans l'étage de gaz. La configuration du détecteur est composé d'un étage de gaz associé à un scintillateur plastique. Coupures en énergie : $E1 > E_{Thres}$ et $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,25 \text{ MeV}$. Les seuils E_{Thres} optimisés avec le facteur de mérite sont soulignés en bleu pour chaque configuration

Épaisseur [mm]		Taux S [/s] avec seuil du gaz [keV]						
Gaz	Scintillateur	1	2	3	5	12	18	20
6	5	17,6	16,0	13,2	8,7	5,1	2,9	1,5
9	5	15,1	14,9	13,8	10,4	6,7	4,1	2,2
15	5	11,8	11,8	11,8	10,9	8,2	5,5	3,2
30	5	7,0	7,0	7,0	7,0	6,9	5,9	4,0
50	5	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,3
6	0,3	17,6	16,0	13,1	8,6	5,1	3,0	1,5

que pour une épaisseur de scintillateur fixée à 5 mm, l'augmentation de l'épaisseur de gaz conduit à une diminution du taux de détection bêta pour un seuil en énergie fixé car d'avantage d'électrons s'arrêtent dans le gaz quand son épaisseur augmente, ce qui diminue le taux de détection en coïncidence (TS1).

Pour les épaisseurs de gaz variant de 15 à 50 mm, les seuils de 1 - 3 keV ne modifient pas le taux de détection bêta car les électrons ayant traversé le gaz déposent plus de 3 keV dans le gaz, ce qui permet d'appliquer un seuil en énergie plus élevé. Une épaisseur plus importante de gaz rend donc la détection moins sensible au seuil en énergie.

En comparant le taux de détection des bêta de la configuration optimisée du Phoswich en scintillateurs plastiques selon le Tableau 5.3, un premier étage de détecteur gazeux de 6

mm d'épaisseur associé à un scintillateur plastique détecterait ~ 2 fois plus d'électrons qu'un Phoswich associant deux étages de scintillateur plastique (16,0 e-/s avec un seuil de 2 keV par rapport à 8,3 e-/s).

Par conséquent, avec l'analyse TS1, presque 2 fois plus de bêta peuvent être détectés avec un premier étage de gaz de 6 mm à la place d'un premier étage en scintillateur plastique de 75 μm . Le choix de l'épaisseur de l'étage de détecteur gazeux dépendra donc du seuil en énergie applicable expérimentalement.

L'épaisseur optimale du gaz sera comprise entre 6 et 10 mm pour optimiser la détection bêta lorsque l'analyse TS1 est appliquée.

5.3.1.2 Détection gamma

Nous avons fait varier les épaisseurs du scintillateur et du détecteur gazeux pour étudier leur influence sur le taux de détection gamma dans un bruit de fond de 100 $\mu\text{Sv/h}$.

Effet de l'épaisseur du scintillateur plastique La Figure 5.30 présente le taux de détection gamma en fonction de l'épaisseur du scintillateur en fixant l'épaisseur du gaz à 6 mm. L'influence de l'épaisseur du scintillateur est faible pour les gamma de faible énergie.

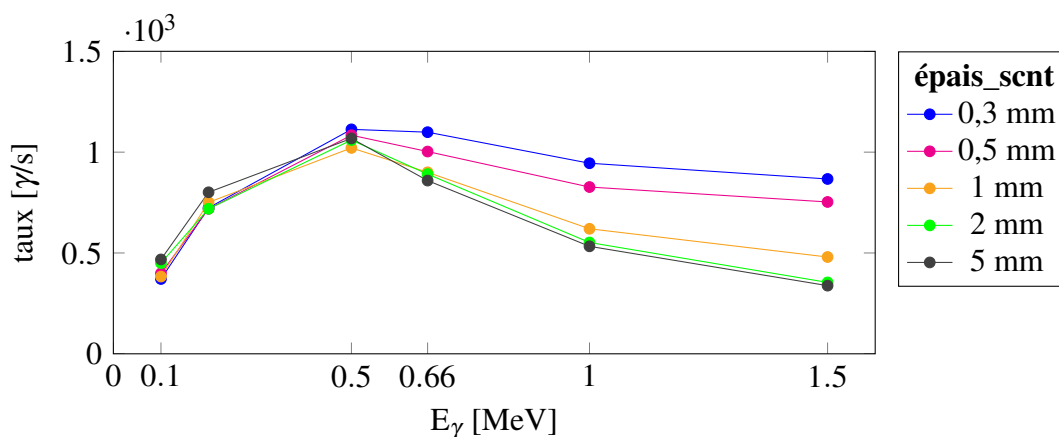


Figure 5.30 Taux de gamma détecté (B) pour un bruit de fond de 100 $\mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) pour un détecteur gazeux de 6 mm associé à un scintillateur plastique de différentes épaisseurs (épais_scnt). Une épaisseur de verre de 2 mm est simulée derrière le scintillateur plastique pour prendre en compte l'effet du PMT. L'analyse TS1 est appliquée avec des sélections en énergie : pour le premier étage de gaz : cf. Tableau 5.6 ; pour le scintillateur : $0,02 \text{ MeV} < E_2 < 0,25 \text{ MeV}$.

En revanche, le taux de détection des gamma à haute énergie (1 MeV et 1,5 MeV) baisse si le scintillateur devient plus épais, jusqu'à 2 mm, puis reste quasiment identique quand l'épaisseur continue à augmenter (jusqu'à 5 mm). Deux fois plus de gamma à haute énergie sont rejetés en passant de 0,5 à 2 - 5 mm. Cela nous conduira, comme le Phoswich à deux scintillateurs, à privilégier une épaisseur de 2 - 5 mm pour les gamma à haute énergie.

Un détecteur avec un premier étage de gaz de 6 mm et un deuxième étage de scintillateur d'épaisseur fixée à 2 mm détecte $\sim 30\%$ moins de gamma pour $E_\gamma \geq 0,5 \text{ MeV}$ et 4 fois plus de gamma 0,1 MeV que le détecteur avec un premier étage de scintillateur de 75 μm .

L'effet de l'épaisseur du gaz sur le taux de détection gamma reste mineur devant son effet sur la détection bêta avec l'analyse TS1. Son effet sur la discrimination sera directement discuté.

5.3.1.3 Discrimination bêta/gamma

Après avoir étudié séparément, les efficacité bêta et gamma, il est important d'étudier l'effet de ce premier étage de détecteur gazeux sur l'efficacité de discrimination bêta(S)/gamma(B).

Le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour différentes épaisseurs de gaz est présenté sur la Figure 5.31. Les résultats donnent un rapport optimisé pour un premier étage de gaz le plus fin possible. Il est dominé par l'amélioration de l'efficacité bêta quand l'épaisseur du premier étage diminue.

Concernant l'effet de l'épaisseur du deuxième étage de scintillateur, comme il ne modifie pas la détection bêta, le rapport dépend donc de l'évolution du taux de détection gamma. Un deuxième scintillateur fin favorise donc la discrimination bêta/gamma pour les gamma de faible énergie, 0,1 - 0,2 MeV. Par contre, si les gamma ont une énergie supérieure à 0,5 MeV, un deuxième scintillateur plus épais donne une meilleure discrimination bêta/gamma.

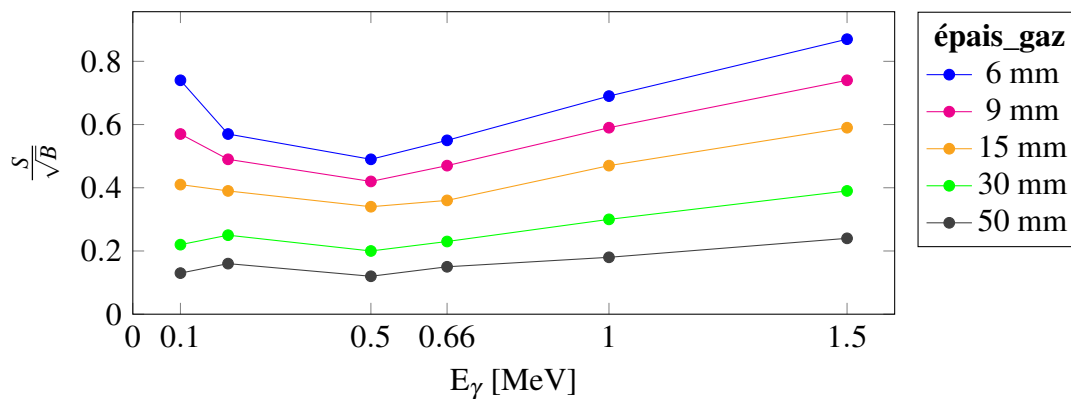


Figure 5.31 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) obtenu avec l'analyse en coïncidence TS1 pour un détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique. Le deuxième scintillateur fait 5 mm d'épaisseur et 2 mm de verre est simulé derrière pour prendre en compte l'effet d'un PMT. Coupures en énergie appliquées : $E1 > E1_{Thres}$ avec $E1_{Thres}$ sur le Tableau 5.6 ; pour le scintillateur : $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,25 \text{ MeV}$.

L'utilisation d'un détecteur gazeux comme premier étage au lieu du scintillateur plastique permet d'améliorer la discrimination bêta/gamma par rapport au Phoswich utilisant deux scintillateurs plastiques (cf. Figure 5.18) sauf à 0,1 MeV. Cette amélioration est principalement due à une meilleure efficacité de détection bêta.

Grâce à un premier étage de gaz permettant une faible masse surfacique ρx , l'analyse en coïncidence TS1 redeviendrait envisageable pour la configuration : un détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique. Afin d'optimiser la discrimination bêta/gamma l'épaisseur du premier étage de gaz doit être minimisée (6 - 10 mm), et un scintillateur plastique de quelques millimètres d'épaisseur (2 - 5 mm) utilisé. La configuration avec 6 mm permet d'obtenir des facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ qui varient entre 0,5 et 0,9. Avec les gamma du ^{137}Cs , le facteur de mérite vaut 0,6 et correspond à une détection de 0,4

Bq/cm² dans un bruit de fond de 20 μ Sv/h, comparable aux performances obtenues avec un Phoswich en scintillateurs plastiques sur lequel l'analyse TS2 est appliquée.

5.3.2 Analyse TS2 : au moins le premier étage de gaz touché

Pour le Phoswich en scintillateurs plastiques, l'analyse TS2 qui prend en compte toutes les particules déposant de l'énergie au moins dans le premier étage, améliore la performance de discrimination par rapport à l'analyse TS1.

5.3.2.1 Détection bêta

L'analyse TS2 est destinée à maximiser la détection bêta en prenant en compte également les électrons qui s'arrêtent dans le premier étage. Le Tableau 5.7 présente le taux de détection bêta pour une contamination surfacique de 0,4 Bq/cm² due à du ⁶⁰Co pour des épaisseurs de gaz et de scintillateur différentes. Pour chaque configuration, plusieurs seuils en énergie ont été appliqués afin d'étudier la sensibilité au seuil.

Comme le montre le Tableau 5.7, avec le même seuil, l'efficacité bêta augmente avec l'épaisseur de gaz car cela permet à d'avantage d'électrons d'y déposer une énergie supérieure au seuil fixé. Une augmentation de l'épaisseur va en outre rendre l'efficacité aux bêta moins sensible à la valeur du seuil en énergie appliqué. Comme attendu, le taux de détection bêta ne dépend pas de l'épaisseur du deuxième étage en scintillateur.

Tableau 5.7 Taux de bêta détectés (S), pour une contamination ⁶⁰Co de 0,4 Bq/cm², par différentes configurations du détecteur gazeux couplé à un scintillateur plastique et pour différents seuils en énergie appliqués au gaz. L'analyse TS2 est utilisée avec les coupures en énergie : $E1 > E_{Thres}$ et $(E2 = 0 \text{ ou } 0,2 \text{ MeV} < E2 < 0,25 \text{ MeV})$. Les seuils optimisés $E1_{Thres}$ pour chaque épaisseur de gaz sont présentés sur le Tableau 5.5. Les taux correspondant au seuil optimisés sont soulignés en bleu

Épaisseur [mm]		Taux S [/s] avec seuil du gaz [keV]						
Gaz	Scintillateur	1	2	3	5	12	18	20
6	5	26,3	<u>24,1</u>	20,6	15,0	10,2	6,8	4,0
9	5	26,5	<u>25,6</u>	<u>23,8</u>	19,2	14,1	9,9	6,3
15	5	27,1	26,4	25,7	<u>23,4</u>	19,0	14,5	6,3
30	5	27,6	26,9	26,2	24,8	<u>22,8</u>	19,7	15,3
50	5	27,9	27,2	26,5	25,1	23,2	<u>21,0</u>	17,8
6	0,3	26,4	<u>24,1</u>	20,6	15,0	10,2	6,8	4,0

Pour résumer, l'analyse TS2 maximise la détection bêta, avec un taux de détection bêta de 21 à 24 e-/s détectés en fonction de l'épaisseur de gaz (et pour un seuil en énergie optimisé) soumis à une activité surfacique de 0,4 Bq/cm². Cette efficacité est maximale pour des épaisseurs fines s'il est possible de fixer des seuils en énergie bas.

5.3.2.2 Détection gamma

Effet de l'épaisseur du scintillateur plastique Comme pour le Phoswich V1 avec l'analyse TS2 (cf. paragraphe 5.2.2.2), un deuxième étage de scintillateur épais (2 - 5 mm) diminue le taux de détection des gamma à haute énergie d'un facteur ~ 2 par rapport à des scintillateurs fins (0,3 - 1 mm). L'épaisseur du scintillateur épais n'a pas d'effet sur les gamma à basse énergie ($E < 0,5$ MeV).

Effet de l'épaisseur du gaz La Figure 5.32 présente le taux de gamma détecté, pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$, pour différentes épaisseurs de détecteur gazeux couplé à un étage de scintillateur (épaisseur fixée à 5 mm). Comme pour l'analyse en coïncidences, avec l'analyse TS2, le taux de détection des gamma de basse énergie augmente avec l'épaisseur du gaz. Il y a donc intérêt à minimiser l'épaisseur du gaz pour optimiser l'élimination du bruit de fond gamma.

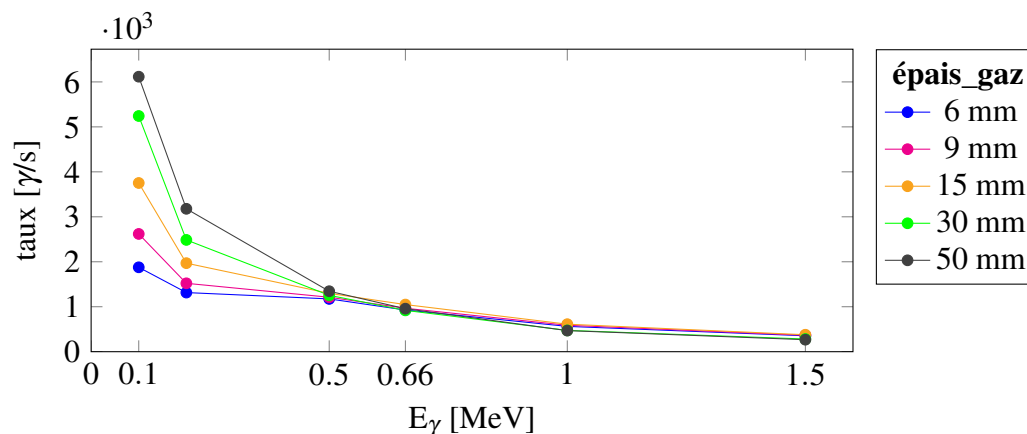


Figure 5.32 Taux de gamma détecté (B) pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$, par différentes configurations du détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique (épaisseur fixée à 5 mm), derrière lequel est ajouté 2 mm de verre. L'analyse TS2 est appliquée pour différentes épaisseurs du gaz pour simuler un PMT. L'analyse TS2 est appliquée avec les sélections en énergies : $E1 > E1_{Thres}$ et ($E2 = 0$ MeV ou $0,2 \text{ MeV} < E2 < 0,25 \text{ MeV}$) avec $E1_{Thres}$ sur le Tableau 5.5.

5.3.2.3 Discrimination bêta/gamma

Le facteur de mérite pour différentes épaisseurs du scintillateur est présenté sur la Figure 5.33. Avec la meilleure configuration : un étage de gaz de 6 mm d'épaisseur et un scintillateur plastique de 2 - 5 mm, le facteur de mérite varie entre 0,55 et 1,3 en fonction de l'énergie des gamma du bruit de fond. L'analyse TS2 est donc plus efficace que l'analyse TS1 (cf. Figure 5.31 : $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 0,5 - 0,9), surtout pour les gamma de haute énergie.

Le facteur de mérite a une valeur de 0,8 pour les gamma du ^{137}Cs avec cette configuration optimisée. Cette valeur correspond à un seuil de décision pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond de $30 \mu\text{Sv/h}$.

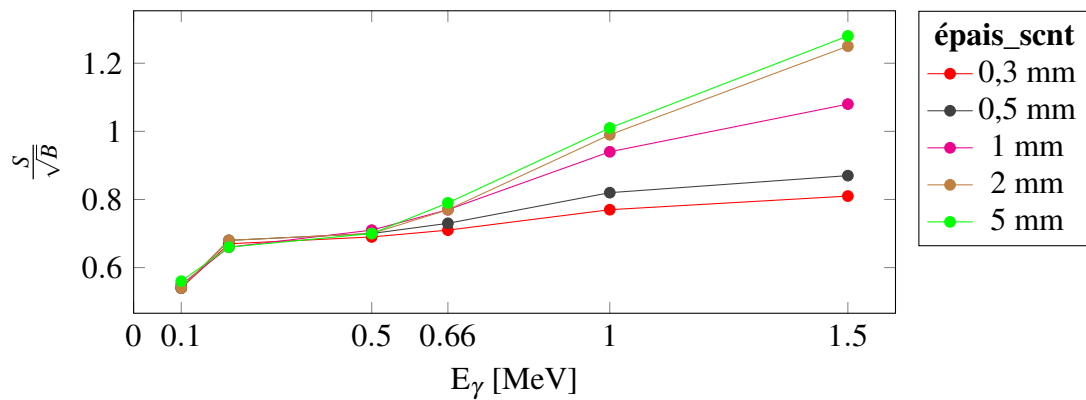


Figure 5.33 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu en fonction de l'énergie des gamma incidents (E_γ) pour un étage de détecteur gazeux (épaisseur fixée à 6 mm) associé à un scintillateur plastique de différentes épaisseurs, derrière lequel est ajouté 2 mm de verre pour simuler un PMT. L'analyse TS2 est appliquée avec les sélections en énergies sur les deux étages : $E1 > 0,002$ MeV et ($E2 = 0$ MeV ou $0,2$ MeV $< E2 < 0,25$ MeV).

5.3.3 Analyse TS3 : seul le premier étage est touché (utilisation du scintillateur en véto)

L'analyse TS3 consiste à prendre comme signal utile les particules qui ont interagit seulement dans le premier étage du détecteur (étage de détecteur gazeux dans ce cas) et n'ont pas atteint le deuxième.

Selon les résultats obtenus pour les Phoswich en scintillateurs (cf. paragraphe 5.2.3.3), pour que l'analyse TS3 soit efficace, il est nécessaire d'avoir une épaisseur de matière ("zone morte") entre les deux étages qui permet d'arrêter les électrons avant le deuxième étage. Comme le plastique est assez efficace pour ralentir les électrons ($dE/dx \approx 2$ MeV/cm cf. Figure 1.1), une épaisseur en plastique (PVT) est utilisé, dans les simulations, pour simuler cette "zone morte". Plusieurs configurations du détecteur gaz-scintillateur ont été simulées en faisant varier les épaisseurs du gaz, de la zone morte et du scintillateur plastique.

5.3.3.1 Détection bêta

Comme avec l'analyse TS2, l'épaisseur du deuxième étage en scintillateur plastique n'influence pas l'efficacité de détection des bêta (cf. Tableau 5.7).

Comme le Phoswich avec l'analyse TS3, l'épaisseur de "zone morte" est le facteur clé qui influence la détection bêta (Tableau 5.4). L'effet de l'épaisseur de la "zone morte" pour la configuration gaz-scintillateur est illustré par le Tableau 5.8 qui présente le taux de détection bêta en fonction de cette épaisseur. L'épaisseur de gaz est fixé à 6 mm et celle de scintillateur à 5 mm. Le seuil optimisé de 2 keV pour l'étage de gaz est appliqué. Le taux de détection augmente avec l'épaisseur de plastique jusqu'à une épaisseur de 200 μm à 300 μm .

Ces résultats conduiraient au choix d'une zone morte de 200 μm à 300 μm d'épaisseur pour optimiser l'efficacité de détection bêta. Comme attendu, cette épaisseur est comparable à celle obtenue pour le Phoswich V2 (cf. Tableau 5.4).

Tableau 5.8 Taux de bêta détecté (S), pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$, par un détecteur gazeux (épaisseur de 6 mm) associé à un scintillateur plastique (5 mm) en appliquant l'analyse TS3. Les résultats correspondant aux différentes épaisseurs de "zone morte" en plastique sont présentés. Les coupures en énergie pour analyse TS3 sont : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et $E2 = 0 \text{ MeV}$

zone morte (μm)	Taux S [/s]
0	8,1
100	21,1
200	24,4
300	25,3
500	25,6

5.3.3.2 Détection gamma

Comme pour l'analyse TS2, un étage de gaz le plus fin possible favorise le rejet du bruit de fond (cf. Figure 5.32). Il sera donc fixé à 6 mm.

Effet de l'épaisseur du scintillateur plastique Comme pour la configuration du Phoswich V2 avec l'analyse TS3 (cf. 5.2.3.2), il est montré qu'un scintillateur plastique plus épais favorise légèrement ($\sim 10\%$) l'élimination des gamma, surtout à basse énergie par rapport à une épaisseur de 0,5 mm. Bien que cette amélioration reste mineure, l'épaisseur du scintillateur sera fixée à 5 mm.

Effet de l'épaisseur de la zone morte Le taux de détection gamma dans un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ pour différentes épaisseurs de zone morte en plastique est présenté sur la Figure 5.34. L'épaisseur de la zone morte a une influence importante sur le taux de détection

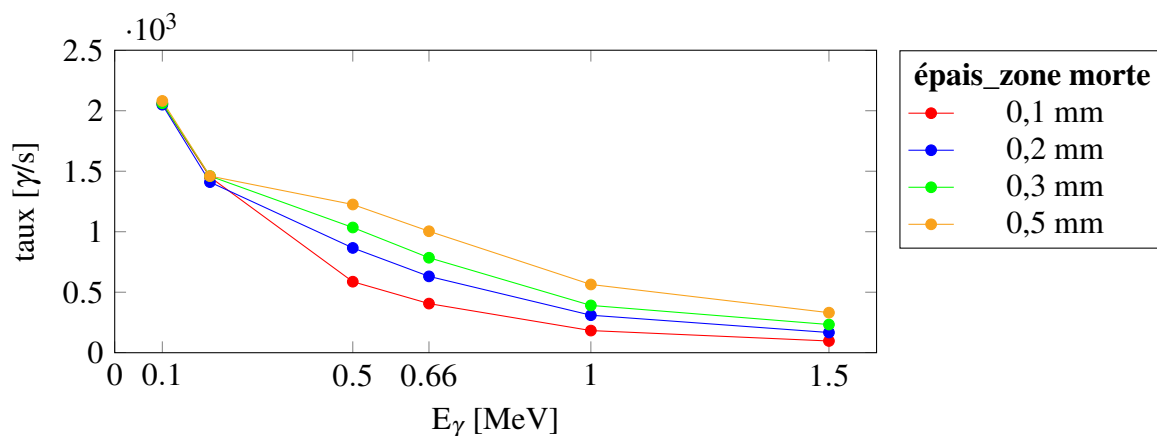


Figure 5.34 Taux de détection gamma (B) pour un bruit de fond de $100 \mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ , avec l'analyse TS3 pour une configuration du détecteur gazeux (épaisseur de 6 mm) associant un scintillateur plastique (épaisseur de 5 mm) derrière lequel une épaisseur de verre de 2 mm d'épais est ajoutée. Des configurations avec différentes épaisseurs de zone morte plastique sont étudiées. Les coupures en énergie pour analyse TS3 sont : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et $E2 = 0 \text{ MeV}$.

gamma surtout pour les gamma de haute énergie, 0,5 à 1,5 MeV. A ces énergies, le taux de détection augmente d'un facteur 2 à 3 quand cette épaisseur passe de 0,1 mm à 0,5 mm.

Cette sensibilité aux gamma en fonction de l'épaisseur de la zone morte est comparable à celle observée pour le Phoswich V2 en scintillateurs plastiques (cf. Figure 5.28). Concernant le taux de détection, avec la même épaisseur de zone morte, la configuration avec le premier étage en gaz diminue le taux de détection gamma d'un facteur de 1,5 à 2 par rapport à celui obtenu avec le Phoswich V2.

En conséquence, afin de minimiser la détection du bruit de fond gamma de haute énergie, il y a intérêt de minimiser l'épaisseur de la zone morte, ce qui va à l'encontre de la conclusion obtenue pour maximiser la détection bêta, qui demande une épaisseur de 200 à 300 μm de plastique. Il faudra donc trouver un optimal en étudiant le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$.

5.3.3.3 Discrimination bêta/gamma

D'après les résultats précédents, l'épaisseur de la zone morte doit avoir une importance forte sur la discrimination bêta/gamma. La Figure 5.35 illustre l'évolution du facteur de mérite en fonction de l'épaisseur de zone morte (de 100 à 500 μm).

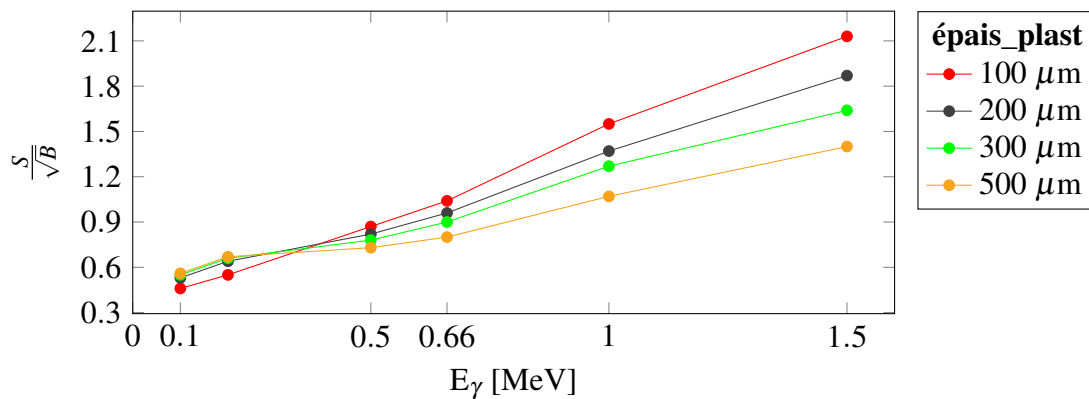


Figure 5.35 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ pour un premier étage de détecteur gazeux d'épaisseur 6 mm associé à un scintillateur plastique d'épaisseur 5 mm séparés par une zone morte en plastique (épais_plast) de différentes épaisseurs (100 μm à 500 μm). Une épaisseur de verre de 2 mm a été simulée derrière le scintillateur pour prendre en compte l'effet du PMT. L'analyse TS3 est appliquée avec des sélections en énergie : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et $E2 = 0$.

Pour les gamma de haute énergie, une épaisseur de zone morte plus fine améliore la discrimination bêta/gamma. Par exemple, 100 μm d'épaisseur donne un facteur de mérite de 2,1 pour une énergie de 1,5 MeV contre un facteur de mérite de 1,4 pour une épaisseur de 500 μm . Comme l'évolution du taux de bêta détecté est faible pour ces épaisseurs (21,1/s à 25,6/s comme illustré dans le Tableau 5.8), l'évolution du rapport signal sur racine du bruit $\frac{S}{\sqrt{B}}$ est dominé par l'augmentation du taux de détection des gamma (100/s pour 100 μm à 330/s pour 500 μm cf. Figure 5.34).

Par contre, pour les gamma de faible énergie, 0,1 - 0,2 MeV, une épaisseur de zone morte plus importante ($\geq 200 \mu\text{m}$) permet d'éliminer le bruit plus efficacement (rapport $\frac{S}{\sqrt{B}} \sim 1,2$ fois plus élevé pour 100 μm). Ceci s'explique par la faible énergie des électrons secondaires mis en mouvement lors des interactions des photons de basse énergie dans la zone morte. A ces énergies inférieures à 200 keV, les électrons secondaires ont un parcours qui ne leur permet

pas de traverser plus de $\sim 100 \mu\text{m}$ de plastique. L'épaisseur de la zone morte n'influence donc pas le taux de détection des gamma (cf. la Figure 5.34) alors que son augmentation conduit à une augmentation du taux de détection bêta (cf. Tableau 5.8).

En résumé, les résultats des simulations pour l'analyse TS3 avec la configuration associant un détecteur gazeux (l'épaisseur du gaz est fixée à 6 mm) à un scintillateur plastique séparée par une zone morte ont montré que le choix de l'épaisseur de la zone morte est dépendant du spectre en énergie du bruit de fond gamma : l'idéal étant plutôt de $100 \mu\text{m}$ pour les gamma de haute énergie, 200 à $300 \mu\text{m}$ pour les gamma de basse énergie. Un facteur de mérite de 0,5 (0,1 MeV) à 1,9 (1,5 MeV) est obtenu pour une épaisseur de zone morte de $200 \mu\text{m}$ et une épaisseur du scintillateur plastique de 5 mm.

Pour un bruit de fond dominé par des gamma du ^{137}Cs , le facteur de mérite est de 1, ce qui correspond à un seuil de décision correspondant à une contamination surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de $50 \mu\text{Sv/h}$.

Cette performance est supérieure à celle obtenue pour l'analyse TS2 ($\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 0,55 - 1,3) pour les gamma de haute énergie et supérieure à celle obtenue avec les Phoswich en scintillateurs plastiques.

5.3.4 Conclusion

Les trois méthodes d'analyses ont été appliquées aux résultats des simulations de la configuration de contaminamètre composée d'un premier étage de détecteur gazeux suivi par un deuxième étage de scintillateur plastique.

Toutes les analyses demandent un premier étage de gaz le plus fin possible (dans la limite où le seuil appliqué ne dégrade que peu la détection bêta). Un étage de 6 mm d'épaisseur a donc été fixé pour étudier l'influence des autres paramètres dans les simulations. Le seuil de 2 keV est appliqué au détecteur gazeux. Toutes les analyses sont également optimisées pour une épaisseur de scintillateur épaisse de 5 mm.

Parmi les trois analyses, l'analyse TS1 en coïncidence semble la moins performante car elle ne permet pas d'obtenir une bonne efficacité bêta même avec un premier étage de faible épaisseur. L'analyse TS3 utilisant le deuxième étage en véto donne donc la meilleure performance que l'analyse TS2, surtout à haute énergie.

Avec cette configuration, l'analyse TS3 (section 5.3.3), qui utilise le deuxième étage comme véto, donne les meilleurs résultats. Dans ce cas, une épaisseur de zone morte entre les deux étages est nécessaire pour arrêter les bêta. Une épaisseur de $200 \mu\text{m}$ permet d'atteindre un facteur de mérite de 0,5 à 1,9 en fonction de l'énergie des gamma du bruit de fond.

Si le bruit de gamma vient du ^{137}Cs , la performance est un seuil de décision correspondant à $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond de $\sim 50 \mu\text{Sv/h}$. La performance atteinte est meilleure que celle obtenue avec un Phoswich optimisé à deux scintillateurs plastiques pour le Phoswich en scintillateurs plastiques ($30 \mu\text{Sv/h}$) dans un bruit de gamma issu de ^{137}Cs .

Il faudra vérifier si l'épaisseur de 6 mm pour le détecteur gazeux est réalisable expérimentalement et permet d'appliquer un seuil en énergie bas (~ 2 keV).

Le détecteur n'atteint donc pas de la performance demandée par le cahier des charges, c'est pourquoi nous allons maintenant étudier des configurations plus complexes. Des configurations à deux étages de gaz ont été étudiées, mais elles conduisent à des performances moins bonnes.

5.4 Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques et un étage de scintillateur YAP utilisé en véto

D'après les résultats précédents, les configurations envisagées avec un ou deux étages de détection ne permettent pas de détecter une contamination surfacique bêta ^{60}Co de $0,4$ Bq/cm² dans un débit de dose gamma de 100 $\mu\text{Sv/h}$.

Pour essayer d'atteindre une meilleure performance de discrimination, des configurations utilisant trois étages de détection successifs vont être envisagées. L'intérêt de ces configurations est de profiter de l'information dans les deux premiers étages et d'ajouter un troisième étage qui agirait comme "véto" ou "anti Compton" pour les gamma. Ce troisième étage, pourrait ainsi permettre d'éliminer plus de bruit de fond gamma.

La configuration envisagée va intégrer un étage de scintillateur inorganique (eg : YAP), derrière les deux premiers étages de scintillateurs plastiques.

La première difficulté sera de réussir à séparer les signaux issus des trois scintillateurs qui sont lus par le même photo-multiplicateur. Pour que les signaux de ces trois scintillateurs soient différenciables par une analyse en forme du signal, le scintillateur ajouté doit avoir un temps de décroissance lumineux bien différent de ceux des scintillateurs plastiques. Le YAP (YAlO_3) est un bon candidat pour cette application car il a un temps de décroissance de 40 ns qui se situe entre les 2 ns de temps de décroissance du scintillateur plastique rapide et les 285 ns du scintillateur plastique lent. La réalisation pratique de cette analyse en forme à trois signaux basées sur une représentation en "Dalits plot" sera décrite en détails dans l'annexe C de ce manuscrit.

Compte tenue des études précédentes, l'épaisseur du premier étage de scintillateur plastique est fixée à 75 μm . Les épaisseurs du deuxième étage de scintillateur plastiques et du YAP vont être optimisées dans cette partie. L'analyse appliquée sera l'analyse TS2, qui sélectionne les évènements qui ont touchés au moins le premier étage de scintillateur plastique, à laquelle sera ajoutée la condition imposant que le YAP ne soit pas touché.

5.4.1 Détection bêta

L'analyse TS2 maximise la détection bêta du Phoswich V1 (cf. paragraphe 5.2.2.1). Afin de garantir que l'ajout du YAP derrière les deux scintillateurs plastique ne diminue pas la détection bêta du contaminamètre, il faut que les bêta n'interagissent pas dans le

véto. L'interaction des bêta dans cette configuration est comparable à celle du Phoswich V2, présentée en Figure 5.36. Il y a trois types d'interaction des bêta : ceux qui s'arrêtent dans le premier étage (β_1), ceux qui s'arrêtent dans le deuxième (β_2) et ceux qui traversent les deux premier étages et touchent le véto (β_3). Pour le Phoswich V2, il a fallu une épaisseur de couplant optique de 200 μm afin de maximiser la détection bêta, c.à.d. β_1 et β_2 (cf. Tableau 5.4) et rendre la proportion de β_3 faible ($< 5\%$). Comme le scintillateur plastique a une composition similaire au couplant optique, il lui faut également au moins 200 μm d'épaisseur pour minimiser les bêta qui atteignent l'étage de YAP.

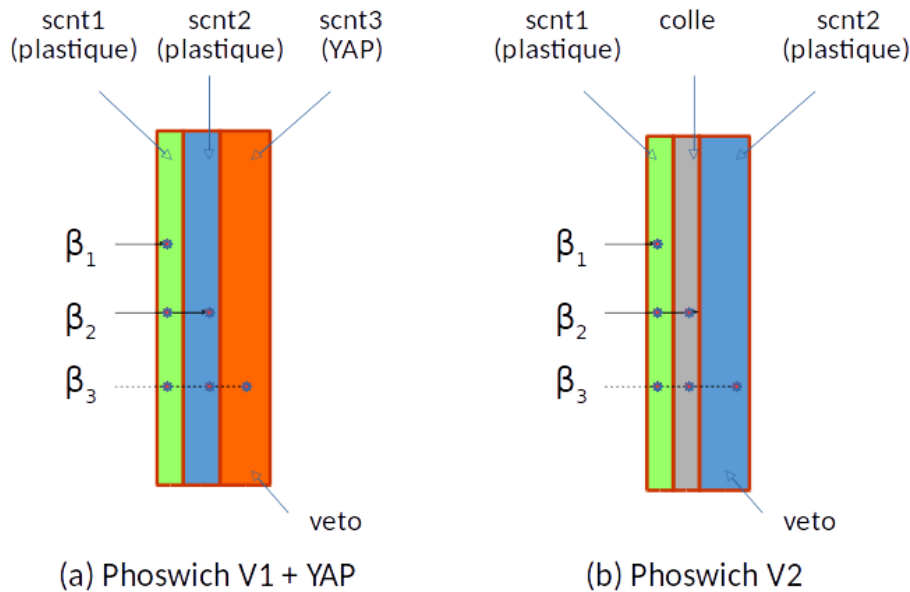


Figure 5.36 Comparaison de configurations (a). Phoswich V1 associé à un étage de YAP et (b). Phoswich V2. Scnt1 : premier étage de scintillateur, scnt2 : deuxième étage de scintillateur ; scnt3 : troisième étage de scintillateur.

Cette version permet de détecter ~ 24 e-/s pour une contamination surfacique de 0,4 Bq/cm² dû à du ⁶⁰Co. Les sélections en énergie appliquées aux deux scintillateurs plastiques sont les mêmes que pour le Phoswich à deux étages (V1).

5.4.2 Détection gamma

La Figure 5.37 présente le taux de détection gamma pour différentes épaisseurs du deuxième étage de scintillateur plastique et du YAP.

Effet de l'épaisseur du deuxième étage de scintillateur plastique Lorsque l'épaisseur du YAP est fixée à 1 mm, un deuxième étage de scintillateur plastique plus fin rend le détecteur plus efficace pour éliminer le bruit de fond gamma de haute énergie. Quand l'épaisseur du deuxième scintillateur passe de 0,5 mm à 0,2 mm, le taux de détection diminue de $\sim 40\%$ pour les gamma de $E \geq 0,5$ MeV.

Cette conclusion d'un deuxième étage de scintillateur moins épais va à l'encontre de la conclusion du Phoswich V1 qui privilégie un deuxième étage de scintillateur plus épais permettant d'éliminer les gamma de haute énergie. En effet, dans le cas du Phoswich en scintillateurs plastiques, les gamma de haute énergie déposent plus d'énergie dans un deuxième étage de scintillateur plus épais, ce qui rend les sélections en énergie plus efficaces (cf. paragraphe 5.2.2.2). Par contre, avec un étage actif de YAP derrière les scintillateurs plastiques, il faut plutôt maximiser la probabilité que les gamma ou les électrons secondaires créés par ces gamma atteignent le YAP. Dans ce cas, une épaisseur fine de deuxième étage de scintillateur permet de rejeter un plus grand nombre de gamma. Par conséquent, un scintillateur lent de 200 μm semble être optimal pour une meilleure élimination du bruit de fond gamma.

Effet de l'épaisseur du scintillateur inorganique YAP La Figure 5.37 présente aussi l'évolution du taux de détection gamma en fonction de l'épaisseur du YAP. Il est évident que le détecteur est plus efficace pour éliminer le bruit de fond gamma avec un étage de YAP plus épais.

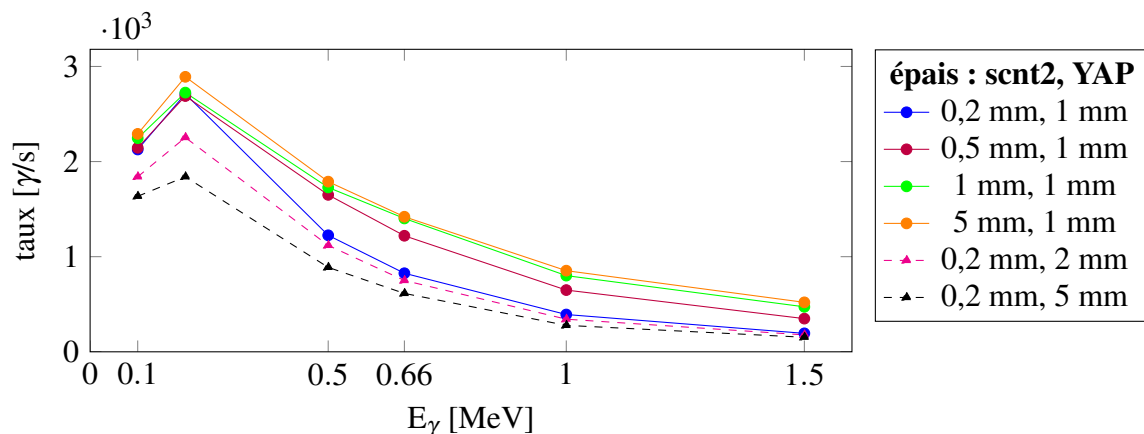


Figure 5.37 Taux de gamma détecté (B), pour un bruit de fond gamma de 100 $\mu\text{Sv/h}$, en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ par un Phoswich ayant deux scintillateurs plastiques associés à un scintillateur inorganique YAP (une épaisseur de 2 mm de verre est simulée derrière les scintillateurs pour prendre en compte l'effet de la présence d'un PMT). L'analyse TS2 est appliquée avec les sélections en énergies : $E_1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E_2 = 0$ ou $0,02 \text{ MeV} < E_2 < 0,3 \text{ MeV}$) et $E_3 = 0$. (E_3 est l'énergie déposée dans le YAP).

Cette augmentation de l'épaisseur du YAP, qui a des sections efficaces gamma plus élevées que le plastique, nous oblige cependant à faire attention à un autre paramètre : le taux de détection dans les différents étages du contaminamètre. Comme le détecteur est destiné à fonctionner dans un bruit de fond gamma élevé (débit de dose de 100 $\mu\text{Sv/h}$), équivalent à quelques millions de γ/s sur le détecteur, il ne faut pas que le taux de comptage dans les scintillateurs introduise une saturation de l'acquisition ou des empilements de signaux. Étant donné les temps de décroissance des scintillateurs (de quelques centaines de nanosecondes), il semble raisonnable de garder des taux de comptage inférieurs à $\sim 10^6$ coups par seconde.

Selon la Figure 5.38, le taux d'interaction dans le YAP augmente avec son épaisseur. Dans un débit de dose gamma de 100 $\mu\text{Sv/h}$, une épaisseur de YAP de 5 mm, permet de garder des taux de détection inférieurs à 10^6 c/s que pour les gamma de haute énergie $E \geq 0,5 \text{ MeV}$. Ce

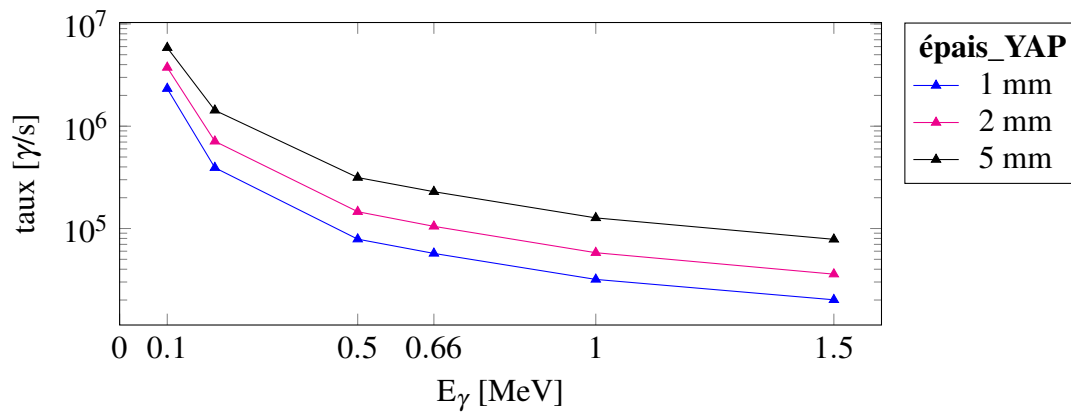


Figure 5.38 Taux d'interaction dans différentes épaisseurs de YAP, en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ , pour un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$. Le Phoswich est composé d'un premier étage de scintillateur plastique de $75 \mu\text{m}$ associé à un deuxième étage de scintillateur plastique de $0,2 \text{ mm}$, suivi par un étage de YAP derrière lequel une épaisseur de verre de 2 mm est ajoutée pour prendre en compte la présence d'un PMT. L'analyse TS2 est appliquée avec les sélections en énergies : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0$ ou $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$) et $E3 = 0$. ($E3$ est l'énergie déposée dans le YAP).

n'est cependant plus le cas à basse énergie, par exemple, pour des gamma de $0,1 \text{ MeV}$, le taux atteint $6 \times 10^6/s$, ce qui pourrait engendrer une saturation de l'acquisition ou du pile-up. Par conséquent, un étage de YAP de 5 mm n'est probablement pas applicable si le bruit de fond a une composante importante à basse énergie et conduira donc à un choix d'une épaisseur plus fine. La faisabilité de l'utilisation d'un YAP de 5 mm sera cependant étudiée dans la partie 6.4 pour un spectre gamma réaliste.

5.4.3 Discrimination bêta/gamma

Cette configuration de Phoswich utilisant l'analyse TS2 et couplé à un étage de YAP optimise la détection bêta, la meilleure configuration sera donc celle qui conduit à un meilleur rejet du bruit de fond gamma. Cette configuration optimale est donc composée d'un premier étage de scintillateur plastique de $75 \mu\text{m}$, d'un deuxième étage de scintillateur plastique d'épaisseur $200 \mu\text{m}$ et d'un étage de YAP d'épaisseur 5 mm si le spectre gamma est dominé par les hautes énergies (cf. Figure 5.37). Pour cette configuration, le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$, s'améliore avec l'énergie des gamma : de $0,6$ ($0,1 \text{ MeV}$) à $1,9$ ($1,5 \text{ MeV}$). Avec un facteur de mérite de $0,9$ pour les gamma de ^{137}Cs , cette configuration optimisée donne un seuil de décision pour une contamination surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de $40 \mu\text{Sv/h}$. Il est $\sim 1,5 - 2$ fois plus efficace en rejet de gamma de ^{137}Cs par rapport à la configuration optimisée du Phoswich à deux scintillateurs plastiques.

Pour conclure, la présence d'un troisième étage de détection composé d'un scintillateur inorganique, YAP de 5 mm dans ce cas, permettrait d'améliorer le rejet des gamma. La réalisation pratique d'un tel détecteur à trois étages devra cependant être validée expérimentalement en termes de taux de comptage, de possibilité de discriminer les signaux issus des différents étages... De plus, le coût lié à l'ajout de cet étage en

scintillateur inorganique risque d'être rédhibitoire pour un appareil commercial. Ces points seront étudiés dans la partie expérimentale de cette thèse.

Une autre configuration à trois étages couplant un détecteur gazeux à un Phoswich V2 a été également étudiée, mais n'améliore pas la performance par rapport au détecteur "GazPlastScnt". Cette solution n'a donc pas été retenue.

5.5 Conclusion

Différentes configurations basiques ont été étudiées, avec uniquement la zone sensible de détection et la présence de matière autour de cette zone sensible (PMT, mécanique) simulée par 2 mm de verre. Les études ont permis de comparer ces différentes configurations et les différentes analyses de données envisagées. Le facteur de mérite, $\frac{S}{\sqrt{B}}$, a été utilisé pour comparer les performances de discrimination bêta/gamma. L'incertitude sur ce facteur de mérite a été estimé à 10% si le seuil en énergie évolue de $\pm 30\%$ pour des détecteurs basés sur des scintillateurs et sur des détecteurs gazeux. Ceci correspond à une incertitude de 20% sur le débit de dose du bruit de fond donné dans cette partie.

La Figure 5.39 présente les facteurs de mérite obtenus pour les détecteurs à un, deux et trois étages de détection. Toutes les configurations sont plus performantes dans un bruit de fond gamma de haute énergie.

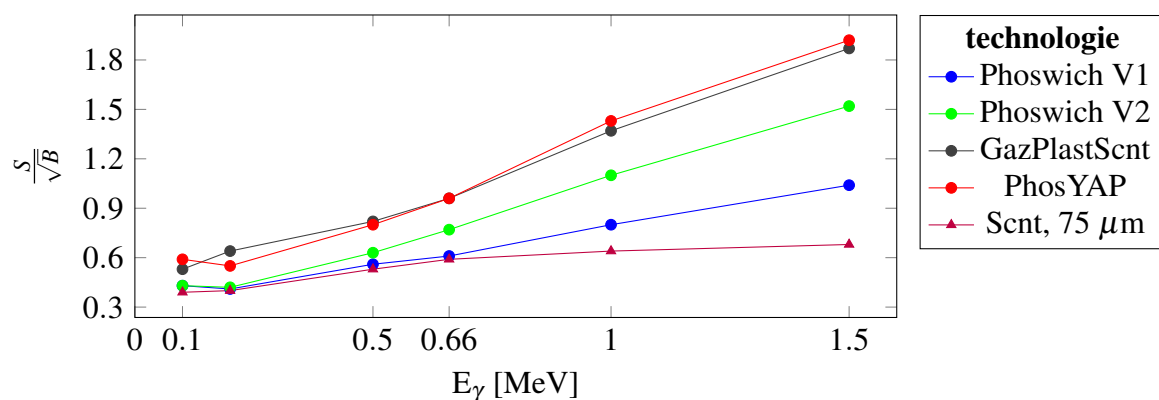


Figure 5.39 Facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie de gamma (E_γ) obtenus avec les principales technologies étudiées en simulation basique. Toutes les performances ont pris en compte la matière (verre de 2 mm) derrière le détecteur.

Les configurations à un étage et les Phoswich à deux étages en scintillateur plastique donnent des résultats comparables pour un bruit de fond gamma inférieur à 0,5 MeV. Cependant, à haute énergie les Phoswich sont plus performants. Le Phoswich V2 a de meilleure performance que le Phoswich V1, surtout à haute énergie ($E_\gamma > 0,5$ MeV).

Les versions utilisant un premier étage de détecteur gazeux ("GazPlastScnt") semblent permettre d'obtenir de meilleures performances bien que plus complexes à réaliser. Enfin, l'ajout d'un véto en scintillateur inorganique derrière le Phoswich ("PhosYAP") améliore les performances mais sa faisabilité expérimentale est à démontrer.

Trois configurations de détecteurs à deux étages de détection sont retenues pour des études plus poussées, Phoswich V1 et V2, "GazPlastScnt", et une configuration à trois étages de détection "PhosYAP".

Chapitre 6

Étude de configurations "réalistes" de détecteurs

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié des détecteurs avec des configurations simplifiées, comprenant essentiellement les étages de détection, en s'intéressant à des sources isotropes de gamma mono-énergétiques pour maîtriser l'influence de l'énergie des gamma sur la réponse du contaminamètre. Nous allons maintenant nous intéresser à la performance des options retenues en conditions plus réalistes ; c'est-à-dire en intégrant un spectre gamma continu en énergie et des configurations de détecteurs plus complètes. La performance en fonction du type de source gamma (ponctuelles, isotropes ...) va également être étudiée.

6.1 Conditions réalistes

6.1.1 Spectre réaliste

Comme présenté au chapitre 5, les performances dépendent de l'énergie des gamma, c'est pourquoi le spectre gamma "réaliste" présenté en Figure 6.1 va maintenant être appliqué à ces détecteurs avec des configurations plus complètes. Ce spectre, mesuré en CNPE et non déconvolué de la réponse du détecteur Germanium, n'est pas le spectre gamma source. Il est cependant une approximation des conditions qui pourront être rencontrées.

Pour ces études, trois sources gamma seront simulées : source isotrope (appelé ISO), source ponctuelle 50 cm devant la face avant du détecteur (PONC) (PONC_50cm dans la Figure A.7) et source ponctuelle 50 cm derrière le détecteur (PONBH) comme définies en annexe A.4. Les photons sont envoyés dans une angle solide qui couvre toute la surface du détecteur.

6.1.2 Configurations "réalistes" de détecteur

Les simulations "basiques" ont permis d'étudier l'interaction des rayonnements avec les étages de détection du contaminamètre et ont permis d'optimiser la configuration du détecteur et les méthodes de traitement de signal. Néanmoins, il n'est pas suffisant d'avoir seulement la

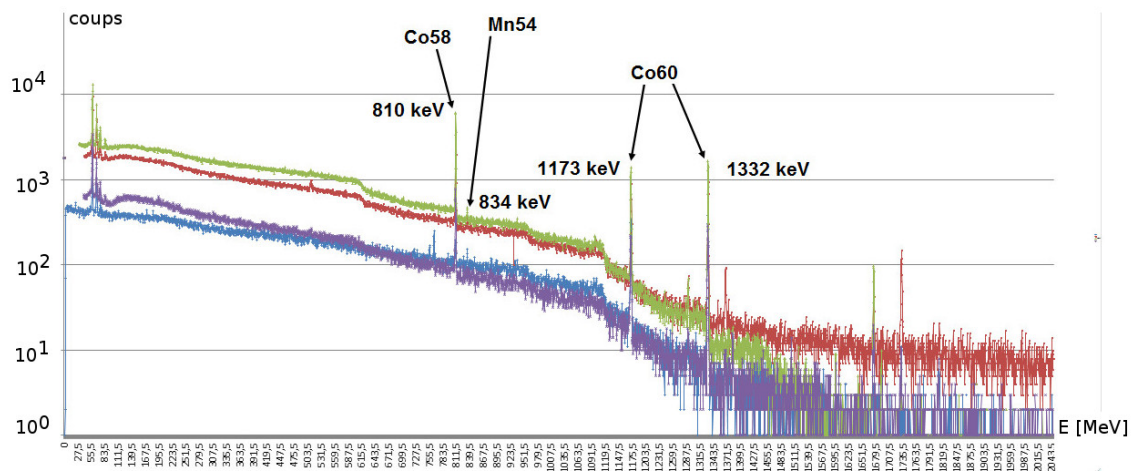


Figure 6.1 Spectre gamma expérimental mesuré dans 4 centrales différentes par un détecteur Germanium.

partie active du détecteur. En effet, un contaminamètre portable basé sur un/des scintillateur(s) nécessite une grille de protection, sa fenêtre d'entrée, en plus du guide de lumière et du photomultiplicateur. Le détecteur gazeux demande des feuilles d'entrée en Mylar et des grilles de protection. Bien que ces composants ne soient pas dédiés à la discrimination bêta/gamma, ils peuvent l'influencer. Les configurations réalistes étudiées intégrant ces éléments sont schématisées sur la Figure 6.2. Les composants sont maintenant détaillées.

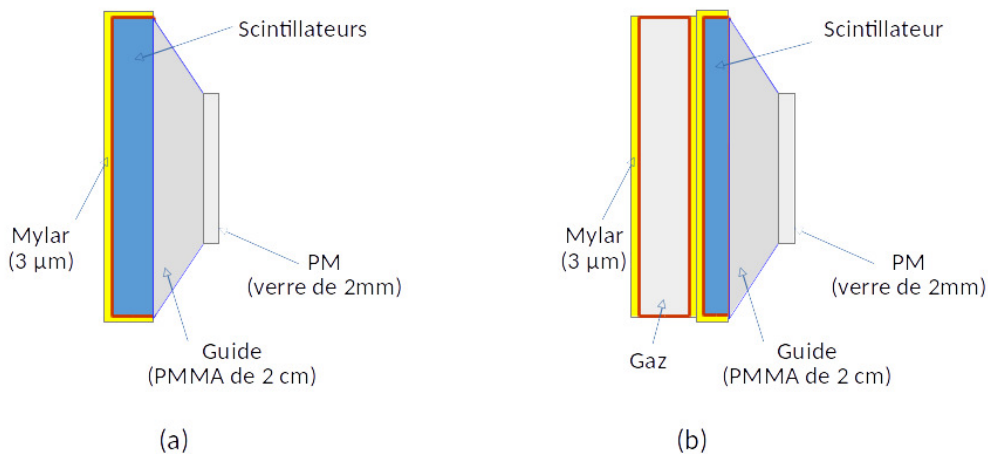


Figure 6.2 Comparisons des configurations réalistes étudiées : (a) détecteurs Phoswich et Phoswich couplé à un étage de YAP ; (b) détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique.

Guide de lumière Le guide de lumière est un composant essentiel pour un détecteur composé de scintillateur(s) afin de guider un maximum de photons de scintillation vers le PMT et d'obtenir une bonne uniformité de réponse sur toute la surface. Le contaminamètre a une surface de scintillateur carrée de 144 cm^2 , et le PMT est plus petite. Il est donc nécessaire d'avoir un guide de lumière qui a été optimisé afin de guider la lumière de scintillation vers un

PMT de plus petite taille. Le travail d'optimisation (longueur, forme, matériaux) a été effectué par simulation Geant4 par un stagiaire de l'ENSICAEN Y. Shan [63] que j'ai co-encadré. Les détails sur l'étude de ce guide sont présentés en annexe B.2.

Ses études de différentes géométries du guide, ont montré qu'un PMT d'une surface carrée ($76 \times 76 \text{ mm}^2$) est à privilégier. Il permet d'avoir un guide de forme pyramidale tronquée, permettant d'atteindre une meilleure uniformité de réponse qu'un guide associé à un PMT circulaire. En outre, ce guide donne une bonne uniformité de réponse avec une épaisseur réduite (1 cm à 2 cm), ce qui en réduit le poids. Le guide optimisé est composé de PMMA, qui est le meilleur matériau car il permet une meilleure collection de lumière.

Pour les simulations suivantes, un guide de lumière en PMMA sous forme de pyramide tronquée de 2 cm d'épaisseur comme présenté en Figure 6.2 (a) et (c) est ajouté derrière le(s) scintillateur(s). Par rapport à la configuration basique sans guide, l'ajout de ce guide en PMMA diminue le taux de détection des gamma de basse énergie d'environ 10% et n'a pas d'effet pour les gamma à haute énergie. Cette conclusion est valide pour les configurations de Phoswich en scintillateurs plastiques (V1 et V2).

Photo-multiplicateur simulé Le photomultiplicateur choisi est le R6237 [64]. C'est un PMT avec une surface carrée de $76 \times 76 \text{ mm}^2$. Dans les simulations, une épaisseur de verre de 2 mm avec une surface de $76 \times 76 \text{ mm}^2$ a été définie pour représenter le PMT.

Mylar Pour que la lumière de scintillation soit réfléchiée vers le guide de lumière et le PMT, un Mylar aluminisé a été placé devant et autour des scintillateurs. Le Mylar simulé a une épaisseur de $3 \mu\text{m}$, comme celui du contaminamètre CoMo 170 E [4]. Avec une densité de $1,39 \text{ g/cm}^3$, il a la composition suivante : $C_{10}H_8O_4$ [65]. Il va principalement influencer la détection des bêta car il absorbera une partie de leur énergie.

Le fonctionnement d'un détecteur gazeux demande le confinement du gaz et la création d'un champ électrique à l'aide d'électrodes. A cette fin, deux plans de Mylar (épaisseur totale de $3 \mu\text{m}$) ont été simulés devant et derrière l'épaisseur de gaz, comme présenté en Figure 6.2 (b). Ce détecteur, contenant à la fois un scintillateur et un détecteur gazeux, a les étages de Mylar qui se succèdent.

En pratique, le Mylar est métallisé en aluminium pour le scintillateur et en or pour le détecteur gazeux. Cette épaisseur de métal varie en fonction du fournisseur et n'est pas pris en compte par la simulation.

Grille de protection Les contaminamètres existants sur le marché ont une grille de protection devant la fenêtre d'entrée pour éviter qu'elle ne soit percée ou déchirée. Le type de grille, matériaux et transparence varie d'un fournisseur à l'autre. Par exemple, la grille du CoMo 170 E [4], a une grille d'épaisseur 0,5 mm et une transparence de 85,5%.

Pour nos études, la grille n'est pas prise en compte dans les simulations car elle est très dépendante du constructeur. Des simulations ont néanmoins été faites pour étudier l'effet d'une grille sur l'efficacité de détection bêta. La présence d'une grille plastique de 0,5 mm

d'épaisseur induit une perte d'efficacité bêta de l'ordre de 15% à 20% pour une transparence de $\sim 90\%$.

La configuration réaliste consiste en un guide de lumière en PMMA d'épaisseur 2 cm et d'une forme de pyramide tronquée. La grande section du guide est couplée à un/des scintillateurs, l'autre section l'est avec le PMT qui est simulé par 2 mm de verre. L'ensemble de scintillateur(s) est couvert par une feuille de Mylar de 3 μm d'épaisseur. Dans les études présentées ci-dessous, cette configuration sera utilisée pour tous les contaminamètres qui nécessitent l'utilisation de scintillateurs.

6.2 Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques

Les simulations basiques ont permis de faire ressortir 2 configurations de Phoswich à deux étages de scintillateurs plastiques : V1 et V2. L'épaisseur du premier étage de scintillateur est fixée à 75 μm car c'est la plus fine utilisable en pratique. Les simulations basiques ont permis de définir les épaisseurs du couplant optique entre les deux scintillateurs et du deuxième étage de scintillateur plastique, qui optimisent le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$. Le choix des épaisseurs va maintenant être validé avec des simulations plus réalistes. Les mêmes sélections en énergie que celles de la simulation basique sont appliquées aux résultats des simulations réalistes.

Pour les deux versions de Phoswich, le taux de bêta détectés (S) diminue de 3 e-/s par rapport aux simulations basiques, avec 22 e-/s détectés pour une contamination de 0,4 Bq/cm², ce qui correspond à une efficacité de détection de 38% (42% pour la simulation basique). Cette diminution est due à la présence du Mylar de 3 μm , qui dégrade le spectre bêta et arrête les électrons de basse énergie.

6.2.1 Phoswich V1 : deux scintillateurs plastiques assemblés sans couplant

Cette version du Phoswich est assemblée sans couplant (aucune épaisseur de matière entre les deux étages) et analysée avec l'analyse TS2 qui exige qu'au moins le premier étage de scintillateur soit touché.

6.2.1.1 Performance de discrimination bêta/gamma

La Figure 6.3 présente l'évolution du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour le Phoswich V1 en fonction de trois positions de source gamma : PONC (ponctuelles devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière le détecteur) et pour plusieurs épaisseurs du deuxième étage de scintillateur plastique. Le Phoswich V1 est plus performant si les gamma proviennent de l'avant du détecteur (PONC).

Une épaisseur du deuxième étage de scintillateur plus importante (2 à 5 mm) améliore la discrimination bêta/gamma, ce qui a permis de confirmer la configuration optimale du contaminamètre avec une épaisseur du premier étage de scintillateur de 75 μm , sans couplant

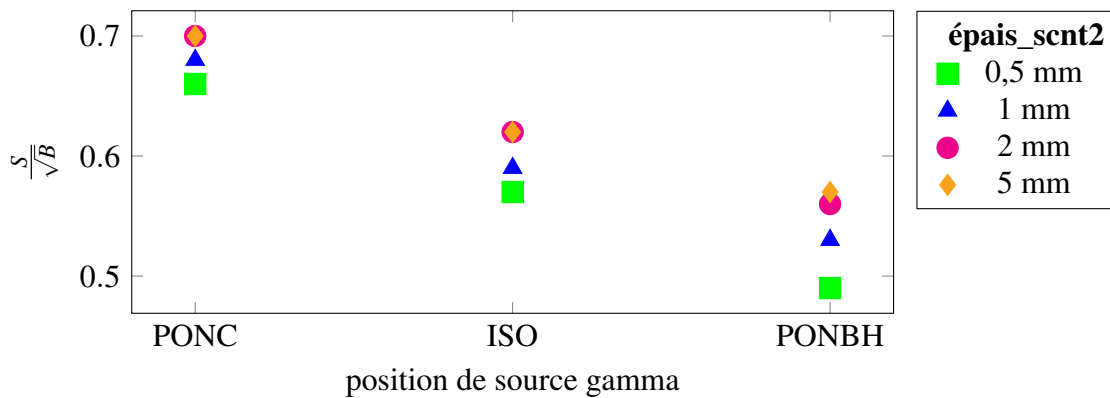


Figure 6.3 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour un Phoswich en scintillateurs plastiques ayant un premier étage de 75 μm , sans couplant et un deuxième scintillateur plastique d'épaisseurs (épais_scnt2) différentes en appliquant l'analyse TS2. Cette figure compare le facteur de mérite pour les 3 sources gamma : PONC (ponctuelle devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière). Les sélections en énergie appliquées sont identiques à celles de simulation basique : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0 \text{ MeV}$ ou $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$).

entre les deux étages et un deuxième étage de scintillateur de 2 à 5 mm (cf. paragraphe 5.2.2.3).

Cette configuration du Phoswich V1 réaliste permet d'atteindre un facteur de mérite de $\sim 0,62$ pour la source gamma isotrope. Il correspond à un seuil de décision de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma réaliste de $\sim 20 \mu\text{Sv/h}$, comparable à la performance de simulations basiques pour les gamma du ^{137}Cs (0,662 MeV). L'épaisseur de 3 μm de Mylar dégrade l'efficacité bêta d'environ 10%, le taux de gamma avec le spectre gamma réaliste correspond au taux obtenu en simulation basique pour des photons qui ont des énergies entre 0,66 et 1 MeV (plus proche de 1 MeV).

6.2.2 Phoswich V2 : deuxième scintillateur utilisé en véto

Cette version de Phoswich a une épaisseur de couplant optique, entre les deux étages de scintillateur, suffisante pour arrêter les bêta du ^{60}Co . Le deuxième étage sert alors de véto (analyse TS3).

6.2.2.1 Performance de discrimination

Le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ est présenté en Figure 6.4 pour le Phoswich V2, avec un premier étage fixé à 75 μm , un deuxième étage de scintillateur de 5 mm utilisé en véto et différentes épaisseurs de "zone morte".

Lorsque la source est derrière le détecteur (PONBH), une épaisseur de couplant plus épais diminue le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$. Cela s'explique par le fait que l'ajout de l'épaisseur de couplant introduit des interactions des gamma avec le couplant qui créent des électrons pouvant entrer dans le premier étage. Le taux de détection gamma pour une source derrière augmente donc avec l'épaisseur de couplant. Cette dégradation de performance le rend moins performant que celle avec une source gamma devant pour des épaisseurs de couplant allant de 300 à 500 μm .

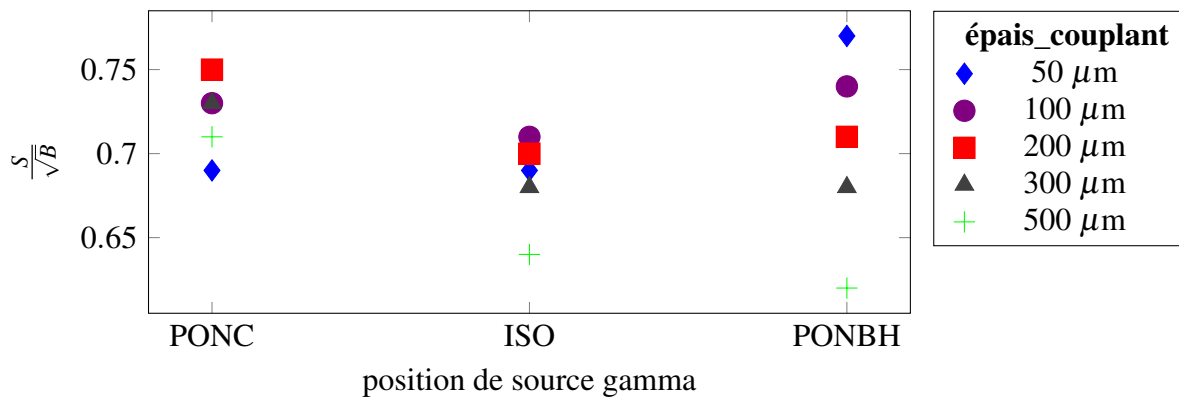


Figure 6.4 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour un Phoswich en scintillateurs plastiques avec un premier étage de 75 μm et un deuxième de 5 mm assemblé par du couplant (épais_couplant) d'épaisseurs en appliquant l'analyse TS3. Cette figure compare le taux de gamma pour les 3 sources gamma : PONC (ponctuelle devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière). Les mêmes sélections en énergies que Phoswich V2 basique sont appliquées : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et $E2 = 0$.

Le Phoswich avec une épaisseur de polymère de 100 - 200 μm entre les deux étages donne la meilleure performance de discrimination. Avec des facteurs de mérite de $\sim 0,7$ pour la source isotrope. Le Phoswich V2 donne un seuil de décision équivalent à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond réaliste de $\sim 25 \mu\text{Sv/h}$.

Cette conclusion est légèrement plus faible aux conclusions obtenues avec les simulations basiques dans la partie 5.2.3 pour un bruit de fond gamma dû au ^{137}Cs . En effet, le taux de gamma détecté correspond à celui obtenu avec le ^{137}Cs en simulation basique, la diminution du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de $\sim 0,77$ à $0,7$ est associée à la baisse du taux de détection bêta avec les Mylar ajoutés.

6.2.3 Conclusion pour le détecteur Phoswich en scintillateurs plastiques

Des configurations plus réalistes de Phoswich (avec l'ajout de Mylar et du guide de lumière) et du spectre en énergie continu du bruit de fond gamma ont été simulées. Deux configurations de contaminamètre : Phoswich V1 et V2 ont été étudiées. Elles privilégient un deuxième scintillateur relativement épais, $\sim 5 \text{ mm}$. Une diminution de $\sim 10\%$ de l'efficacité bêta est observée avec la configuration réaliste. Le taux de gamma détecté par Phoswich V1 en simulation réaliste correspond à celui obtenu avec les gamma de 0,66 et 1 MeV en simulation basique. Pour Phoswich V2, le taux de gamma détecté en simulation réaliste correspond à celui obtenu avec les gamma de 0,66 MeV en simulation basique. Avec leurs configurations optimisées, un facteur de mérite de 0,6 est obtenu pour le Phoswich V1 et 0,7 pour le Phoswich V2. Le Phoswich V2 donne un seuil de décision équivalent à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond réaliste de $25 \mu\text{Sv/h}$. Cette valeur est de $20 \mu\text{Sv/h}$ pour le Phoswich V1. Elles s'approchent des performances obtenues avec des simulation basiques lorsque le bruit de fond gamma est comparé aux gamma issus du ^{137}Cs . Des prototypes de contaminamètres basés sur ces deux configurations vont être développés et testés expérimentalement.

6.3 Détecteur composé d'un étage de détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique

Les simulations basiques ont montré l'intérêt d'associer un détecteur gazeux (comme premier étage de détecteur) à un scintillateur plastique (utilisé comme véto) avec une zone morte en plastique entre les deux étages de détection ; configuration appelée "GazPlastScnt". Cette configuration, qui permettrait d'atteindre de meilleures performances de discrimination bêta/gamma que les Phoswich à deux étages, va maintenant être étudiée avec un spectre gamma réaliste et avec la méthode d'analyse TS3 (cf. paragraphe 5.3.4) utilisant le scintillateur en véto.

Ces études comprennent un étage de détecteur gazeux de 6 mm séparé, par une épaisseur de plastique (PVT), et d'un deuxième étage de scintillateur plastique dont l'épaisseur est optimisée à 5 mm. Des épaisseurs de 3 μm de Mylar sont mises autour de chaque étage de gaz (cf. Figure 6.2 (c)) pour représenter les électrodes ainsi qu'en face avant du scintillateur pour représenter le réflecteur. Un guide de lumière en PMMA de 2 cm d'épaisseur et une épaisseur de verre de 2 mm sont ajoutés derrière le scintillateur.

Avec les seuils optimisés précédemment ($E_1 > 2 \text{ keV}$) que la simulation basique, le taux de détection bêta en configurations réalistes diminue encore une fois de $\sim 10\%$ par rapport à celui obtenu en simulation basique (cf. Tableau 5.8).

Concernant le taux de détection gamma du détecteur dans un bruit de fond gamma de 100 $\mu\text{Sv/h}$, il correspond à celui obtenu dans les simulations basiques pour les gamma d'énergies comprises entre 0,5 MeV et 0,66 MeV (10% plus élevé que le taux obtenu avec les gamma de 0,66 MeV). Ceci est dû à une sensibilité importante à la matière autour (feuilles de Mylar). Cela confirme que cette configuration est plus sensible à l'ajout de matière autour du gaz.

Pour déterminer les épaisseurs optimales de la zone morte en plastique, le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ est présenté sur la Figure 6.5 pour différentes épaisseurs de zone morte. Une épaisseur de zone morte $\sim 200 \mu\text{m}$ donne le meilleur facteur de mérite, ce qui correspond aux conclusions de simulations basiques (cf. paragraphe 5.3.3.3). Avec une valeur de $\sim 0,8$, quelque soit la source, la performance correspond à un seuil de décision équivalent à une contamination de 0,4 Bq/cm^2 dans un bruit de fond de $\sim 35 \mu\text{Sv/h}$. Cette performance semble inférieure à celle obtenue en simulation basique ($\sim 30\%$). Elle est cependant meilleure que celles des Phoswich V1 et V2.

6.4 Détecteur à deux étages de scintillateurs plastiques et un étage de scintillateur YAP utilisé en véto

Nous venons de montrer que les contaminamètres à deux étages ne permettent pas de répondre au cahier des charges. Cependant, l'intérêt d'avoir un étage de détection utilisé comme véto pour rejeter les gamma a été montré. Dans cette partie sera étudiée une version

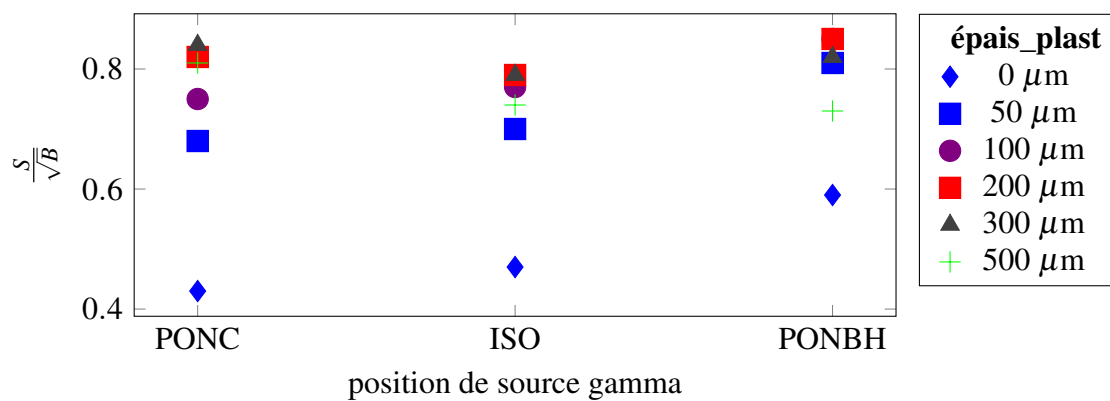


Figure 6.5 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu pour un détecteur gazeux (6 mm) associé à un scintillateur plastique (5 mm) avec différentes épaisseurs de zone morte plastique (épais_plast) entre les deux étages. Trois positions de sources gamma ont été simulées : PONC (ponctuelle devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière). L'analyse TS3 est appliquée avec les sélections en énergie : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et $E2 = 0$.

de contaminamètre, plus complexe, comprenant deux étages de détection en scintillateur plastique auxquels s'ajoute un étage de scintillateur inorganique YAP utilisé comme véto.

L'ajout du YAP n'influence pas l'efficacité de détection bêta. Comme précédemment, le taux de détection obtenu est de $\sim 22 \text{ e-/s}$ pour une contamination ^{60}Co de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$.

La Figure 6.6 présente le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu pour différentes épaisseurs de YAP en fixant l'épaisseur du deuxième étage à son optimum : 0,2 mm (cf. paragraphe 5.4.3).

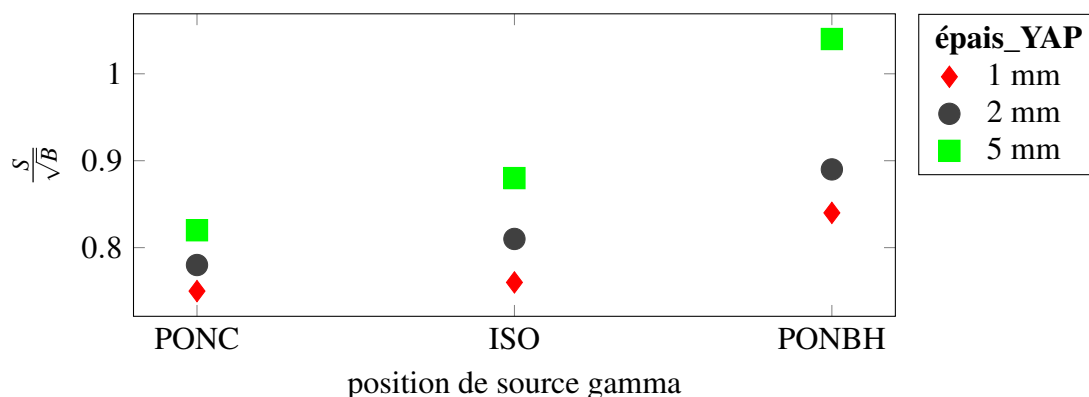


Figure 6.6 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu pour le Phoswich (premier scintillateur de $75 \mu\text{m}$ associé sans couplant à deuxième scintillateur de 0,2 mm d'épaisseur) associé à un YAP en appliquant l'analyse TS2. Trois positions de sources gamma ont été simulées : PONC (ponctuelle devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière). Les sélections en énergie sont : $E1 > 0,02 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0 \text{ MeV}$ ou $0,02 \text{ MeV} < E2 < 0,3 \text{ MeV}$) et $E3 = 0$.

Cette configuration est plus performante pour une source gamma venant de l'arrière du détecteur que de l'avant. Le facteur de mérite s'améliore quand l'épaisseur du YAP augmente car cela permet de rejeter plus efficacement le bruit de fond gamma.

Le facteur de mérite atteint des valeurs près de 0,9 avec une source isotrope pour un Phoswich avec une configuration optimisée : un premier étage de scintillateur plastique de $75 \mu\text{m}$, un deuxième étage de scintillateur plastique de $200 \mu\text{m}$ et un étage de YAP de 5 mm.

La présence d'un YAP plus épais est donc très avantageuse (1,2 fois de facteur de mérite avec 5 mm qu'avec 1 mm de YAP), par contre cet étage de scintillateur inorganique va être très sensible aux gamma.

Le taux de comptage de l'étage de YAP est donc un facteur essentiel pour déterminer quelle épaisseur est réaliste. Le taux de comptage du YAP est présenté en Figure 6.7 pour un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$. Quand la source est derrière le détecteur, le taux de comptage dans le YAP est 1,4 fois plus élevé que si elle est devant. Ce taux augmente avec l'épaisseur du YAP. Pour une épaisseur de YAP de 5 mm, le taux est de l'ordre $10^6 \gamma/\text{s}$, ce qui risque d'entraîner de l'empilement des signaux et/ou une saturation du système d'acquisition. Malgré le fait que le YAP de 5 mm d'épaisseur soit le plus performant pour éliminer le bruit de fond, il ne sera probablement pas utilisable dans un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$. Dans ce cas, un YAP plus fin de 1 mm permettrait de descendre à des taux de détection dans le YAP autour de $2 \text{ à } 4 \times 10^5 \gamma/\text{s}$. La conséquence est une dégradation de la performance de rejet du bruit de fond avec un facteur de mérite de 0,75 à 0,8, s'approchant du facteur de mérite du Phoswich V2 (0,7 cf. paragraphe 6.2.2.1).

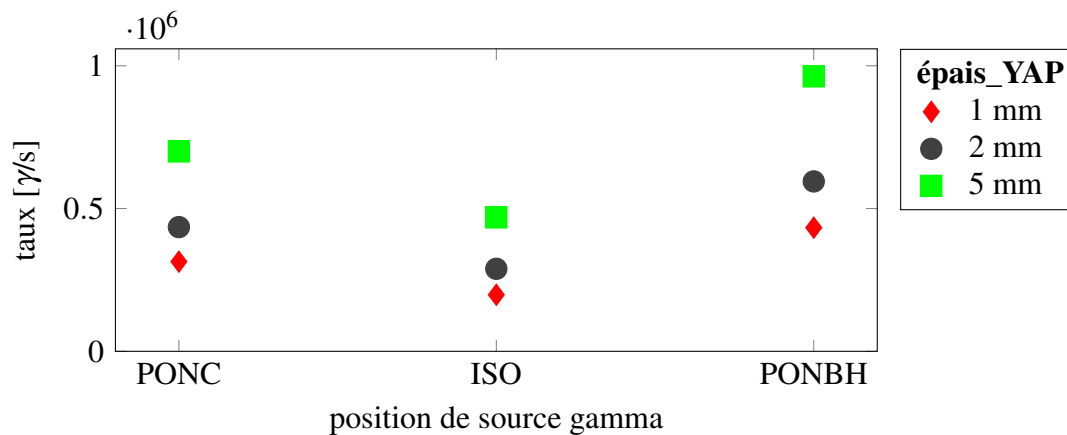


Figure 6.7 Taux de comptage dans le YAP ($E3 > 0$) pour un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ avec un spectre en énergie réaliste et une configuration réaliste. Contaminamètre composé d'un Phoswich de scintillateurs plastiques (premier scintillateur de $75 \mu\text{m}$ et deuxième de $0,2 \text{ mm}$ d'épaisseur) associé à un YAP dont l'épaisseur varie. Trois positions de sources gamma ont été simulées : PONC (ponctuelle devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière).

En résumé, le Phoswich V1 (premier scintillateur de $75 \mu\text{m}$ et deuxième de $0,2 \text{ mm}$ d'épaisseur) couplé à un étage de YAP (5 mm) utilisé comme véto permet d'atteindre des valeurs de facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 0,9 pour une source gamma isotrope si le YAP est épais, ce qui correspond à un seuil de décision pour une contamination ^{60}Co de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma isotrope de $\sim 40 \mu\text{Sv/h}$. Cette valeur est meilleure que celle sans véto, démontrant l'intérêt de ce dernier.

Cette performance doit encore être validée, l'utilisation du YAP pouvant engendrer plusieurs problématiques comme le coût de cet étage supplémentaire ou le taux de comptage dans le YAP, qui peut atteindre $10^6/\text{s}$, et contraindra probablement à utiliser des épaisseurs de YAP plus fines donnant des performances moins bonnes et comparables à celles obtenues

avec un Phoswich V2. La faisabilité d'une analyse en forme du signal utilisant trois temps de décroissance différents devra en outre être démontrée expérimentalement.

6.5 Conclusion

Des configurations plus réalistes : détecteurs Phoswich à deux étages de scintillateurs plastiques, détecteur gazeux associé à un étage de scintillateur, détecteur Phoswich à trois étages de scintillateurs ont été étudiées afin d'évaluer leurs performances de discrimination.

Une diminution du taux de bêta détectés de $\sim 10\%$ par rapport à la configuration basique est observée pour toutes les configurations étudiées à cause des feuilles de Mylar ajoutées en face avant du détecteur. Les efficacités bêta sont obtenues pour une source placée à 4 mm du scintillateur, cette efficacité de détection se dégrade rapidement avec la distance source-détecteur : 15% de moins à une distance de 10 mm. Le taux de comptage obtenu pour un spectre gamma continu en énergie correspond à celui obtenu pour des simulations basiques avec des énergies gamma $E_\gamma = 0,66$ à 1 MeV, sauf la configuration du "GazPlastScnt" (correspond à celui du 0,5 à 0,66 MeV).

Les configurations optimisées donnent des performances qui correspondent à celles retenues suite aux simulations basiques. Le Tableau 6.1 présente leurs performances avec une incertitude estimé à 10% sur facteur de mérite et à $\pm 20\%$ sur le bruit de fond.

Tableau 6.1 Un tableau de performance de discrimination pour les configurations choisies par les simulations réaliste. Abréviations : SD : seuil de décision ; scnt. : scintillateur plastique ; plast. plastique ; PhosYAP : Phoswich à deux étages de scintillateurs plastiques associé à un étage de YAP. Le débit de dose affiché a une erreur de $\pm 20\%$ avec une variation du seuil en énergie de $\pm 30\%$

Nom	Analyse	$\frac{S}{\sqrt{B}}$	SD à 0,4 Bq/cm ² dans un bruit de fond de
Phoswich V1	TS2	0,6	$\sim 20 \mu\text{Sv/h}$
Phoswich V2	TS3	0,7	$\sim 25 \mu\text{Sv/h}$
GazPlastScnt	TS3	0,8	$\sim 35 \mu\text{Sv/h}$
PhosYAP (5 mm YAP)	TS2	0,9	$\sim 40 \mu\text{Sv/h}$
PhosYAP (2 mm YAP)	TS2	0,8	$\sim 35 \mu\text{Sv/h}$

Les deux détecteurs Phoswich ont des performances comparables si on prend en compte les incertitudes. Le détecteur associant un étage de gaz à un scintillateur ("GazPlastScnt") semble plus performant de $\sim 40\%$ en terme de rejet des gamma.

Par conséquent, les Phoswich V1, V2, le Phoswich associé à un étage de YAP et le détecteur gazeux couplé à un scintillateur sont choisis comme des solutions prometteuses pour la suite des nos études. Des prototypes vont être développés et testés afin de prendre en compte les aspects pratiques et valider les prédictions de simulation.

En plus des configurations présentées qui cherchent à améliorer la performance de discrimination bêta/gamma à l'aide d'étages de détection successifs, d'autres voies ont été également étudiées. Par exemple, l'ajout d'un blindage en plomb autour du détecteur peut

atténuer les photons. Néanmoins cette solution demande l'ajout de quelques kg de Pb pour atteindre les performances du cahier des charges, ce qui excède le poids maximal défini dans le cahier des charges. L'ajout de fines épaisseurs de plomb pourra cependant être envisagé pour améliorer les performances des prototypes.

Conclusion

Cette partie a décrit l'optimisation de différentes configurations de contaminamètre et des méthodes d'analyse associées. Cette optimisation a été réalisée par des simulations GEANT4 validées par des tests expérimentaux.

Des simulations basiques, qui ont pris en compte uniquement la partie sensible de détection, ont été premièrement effectuées pour définir la configuration optimale et les performances des détecteurs en fonction de l'énergie des gamma. Des mesures expérimentales ont été réalisées afin de prendre en compte les conditions expérimentales. Ces études ont permis de définir quatre configurations de détecteurs qui ont été étudiées de façon plus approfondie par des simulations plus réalistes, qui ont pris en compte les accessoires (guide de lumière, Mylar, PMT ...) autour de la zone de détection et un spectre en énergie du bruit de fond des photons tiré de mesures dans un CNPE. L'incertitude sur le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ a été estimée à 10%, ce qui engendre une incertitude de 20% sur les valeurs de débit de dose du bruit de fond qui sont données.

La configuration la plus simple qui a été étudiée est basée sur un détecteur à un étage de scintillateur ou de gaz. Ces études ont montré qu'un seul étage de détection n'était pas suffisant pour répondre aux exigences du cahier des charges. En effet, les interactions des photons dans la matière environnant la zone active conduisent à une sensibilité au bruit de fond trop important. Ces études ont permis de confirmer l'intérêt d'utiliser un matériau de détecteur de faible masse superficielle, ρx et un faible coefficient d'atténuation μ pour diminuer le taux de gamma détecté. Cela confirme le choix du matériau pour construire la zone de détection bêta : scintillateur plastique ou détecteur gazeux.

Comme le détecteur à un étage de détection n'est pas suffisant, des détecteurs assemblant deux étages de détection ont été proposés. Les configurations qui ont été étudiées sont les suivantes :

- détecteur Phoswich à deux étages de scintillateur plastique ;
- détecteur avec un premier étage de détecteur gazeux et un deuxième étage en scintillateur plastique.

Afin de diminuer l'efficacité de détection gamma, la méthode "classique" réalisant une coïncidence entre les deux étages, est appelée "analyse TS1" dans cette thèse. Les simulations ont montré que cette analyse n'est pas applicable car elle conduit à une diminution importante du taux de détection bêta. En effet, l'analyse TS1 ne prend pas en compte les électrons qui s'arrêtent dans le premier étage du détecteur, ce qui est fréquent pour les électrons du ^{60}Co

qui ont des énergies faibles ($T_{\beta,max} = 0,316$ MeV). Cette analyse est donc abandonnée pour nos études.

Pour maximiser la détection bêta, deux autres analyses ont été proposées :

- analyse TS2 qui prend en compte les particules interagissant au moins dans le premier étage ;
- analyse TS3 qui prend en compte les particules interagissant seulement dans le premier étage. Le deuxième étage est donc utilisé en véto.

En appliquant l'analyse TS2, la configuration optimisée du détecteur Phoswich en scintillateurs plastiques est composée d'un premier étage de $75 \mu\text{m}$ et d'un deuxième étage de scintillateur plastique de 2 à 5 mm assemblés sans couplant entre les deux étages. Cette configuration, appelée "Phoswich V1", permet d'obtenir un seuil de décision équivalent à une détection de contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma réaliste de $\sim 20 \mu\text{Sv/h}$. En appliquant l'analyse TS3, un polymère de $200 \mu\text{m}$ est utilisé pour assembler les deux étages de scintillateurs. Cette configuration, appelée "Phoswich V2", donne un seuil de décision correspondant à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma réaliste de $\sim 25 \mu\text{Sv/h}$, performance légèrement supérieure à celle du Phoswich V1. Concernant la sensibilité aux énergies de gamma, la version V2 a des performances comparables pour les gamma de basse énergie à celles du V1 mais est plus efficace (facteur 2) pour rejeter les gamma à haute énergie.

Enfin la configuration, appelée "GazPlastScnt", à un étage de détecteur gazeux associé à un scintillateur plastique a été étudiée qui a montré que l'analyse TS3 était encore une fois plus performante que l'analyse TS2. La configuration optimisée consiste en un premier étage de gaz de 6 mm couplé à un étage de scintillateur plastique avec une zone morte en plastique de $200 \mu\text{m}$ entre les deux étages. Elle permet d'atteindre un seuil de décision équivalent à une détection de contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma réaliste de $\sim 35 \mu\text{Sv/h}$. Cette performance est supérieure à celles obtenues avec le détecteur Phoswich.

Comme ces versions ne répondent pas au cahier des charges, un détecteur à trois étages, appelé "PhosYAP", a repris la configuration de détecteurs à deux étages en ajoutant un troisième étage actif en plus, utilisé comme véto afin d'améliorer le rejet des gamma. Cette configuration associe un premier scintillateur de $75 \mu\text{m}$, à un deuxième scintillateur de 0,2 mm auquel est ajouté un étage de scintillateur inorganique YAP, de 5 mm. Avec un seuil de décision correspondant à une contamination surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma réaliste de $\sim 40 \mu\text{Sv/h}$, elle améliore la performance par rapport au Phoswich à deux scintillateurs plastiques. Expérimentalement, il faudra s'assurer que le taux de comptage dans le YAP dans un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ est acceptable et que l'on est capable de séparer efficacement les signaux issus des trois scintillateurs et que le prix reste conforme aux exigences du cahier des charges.

Les "Phoswich V1" et "Phoswich V2", qui offrent une performance moindre que les autres solutions, vont être testés car ils ont des contraintes techniques plus simples. En outre ils

répondent au souhait, exprimé par EDF, d'éviter l'utilisation d'un détecteur gazeux qui est plus fragile sur le terrain.

Les configurations "Phoswich V1" , "Phoswich V2", "PhosYAP" et "GazPlastScent" vont donc être fabriquées et testées. Ces développements vont être discutés dans la partie suivante.

Troisième partie

Validation expérimentale

Introduction

Dans la partie précédente, les résultats des simulations ont conduit à garder deux configurations de Phoswich en scintillateurs plastiques appelées V1 et V2, une configuration associant un détecteur gazeux à un scintillateur plastique "GazPlastScnt", et une configuration à trois étages de détection "PhosYAP".

Après des tests, les mesures plus approfondies avec les prototypes "PhosYAP" et "Gaz-PlastScnt" ont été abandonnés essentiellement à cause de difficultés de mise en oeuvre conduisant à des performances inférieures à celles attendues. Bien que le détecteur "PhosYAP" ait la meilleure performance en simulation, le prix élevé du YAP ainsi que la problématique de séparation des signaux issus de trois scintillateurs sont rédhibitoires pour de grandes dimensions de détecteur. La configuration testée a donné une performance en pratique comparable au Phoswich V2. Cette piste n'a donc pas été poursuivie, les détails des différents tests réalisés sont présentés en annexe C. Une configuration du détecteur "GazPlastScnt" avec un étage de gaz de 7 mm suivi du Phoswich V2 a été testée mais a montré des performances comparables aux Phoswich. Comme son optimisation (eg : épaisseur de gaz) aurait demandé du temps et qu'EDF/DPN souhaite éviter les détecteurs gazeux à cause de leur moindre robustesse en utilisation sur site, cette configuration n'a pas été étudiée plus en détails.

Dans cette partie, le développement ainsi que les tests expérimentaux des détecteurs Phoswich en scintillateurs plastiques, "Phoswich V1" et "Phoswich V2" seront présentés. L'enjeu des mesures est de confirmer les résultats des simulations et de valider la ou les technologies choisies ainsi que la méthode d'analyse, pour définir un prototype final à tester sur site.

Dans le chapitre 7, le développement et la mise en oeuvre des détecteurs seront présentés. Les tests expérimentaux du Phoswich V2 au laboratoire seront ensuite discutés au chapitre 8. Les résultats obtenus au laboratoire ont permis de choisir le guide de lumière ainsi que de chercher les pistes pour améliorer les conditions de mesures (sources radioactives, spectre gamma réaliste). Les deux prototypes retenus ont été testés sur site au CNPE de Chinon. Leurs performances en situation réelle seront présentées au chapitre 9.

Chapitre 7

Développement de contaminamètres à base de Phoswich en scintillateurs plastiques

Les contaminamètres portables à base de scintillateurs sont composés de plusieurs éléments essentiels à leur bon fonctionnement. Une fenêtre d'entrée de faible épaisseur permet d'isoler le détecteur de la lumière ambiante et de réfléchir la lumière de scintillation vers le photomultiplicateur PMT. Un guide de lumière est nécessaire pour coupler les scintillateurs au PMT. Le PMT sert à convertir la lumière en signal électrique et à l'amplifier. Le signal à la sortie de l'embase du PMT est envoyé à un préamplificateur pour être mis en forme afin d'être traité par le système d'acquisition. A partir des données acquises, les analyses seront effectuées et la performance des contaminamètres évaluée .

7.1 Conception mécanique des prototypes

Pour répondre aux exigences du cahier de charges, les prototypes développés ont une surface de détection de $12 \times 12 \text{ cm}^2$, comprise entre 100 et 200 cm^2 , avec une surface rectangulaire. L'ensemble des composants sont contenus dans un boîtier mécanique parallélépipédique de section carrée ($15 \times 15 \text{ cm}^2$), en aluminium de 3 mm d'épaisseur. Deux prototypes ont été développés afin de faciliter des comparaisons de technologies.

La Figure 7.1 présente le mécanisme et la photographie d'un prototype. Pour isoler le détecteur de la lumière ambiante, les jonctions des pièces mécaniques (vis, connecteurs) sont colmatées avec des joints ou de l'adhésif noir. Lors de la conception de la mécanique du prototype, le facteur de poids n'a pas été une contrainte. Il devra être optimisé lors de l'industrialisation. La fenêtre d'entrée est montée sur un cadre vissé sur le boîtier. Deux préamplificateurs rapides ont été utilisés lors des études. Le préamplificateur, développé au LPC, est directement inséré dans le boîtier alors que le préamplificateur au format NIM, Phillips 776, est dans un châssis (les détails seront présentés au paragraphe 7.4).

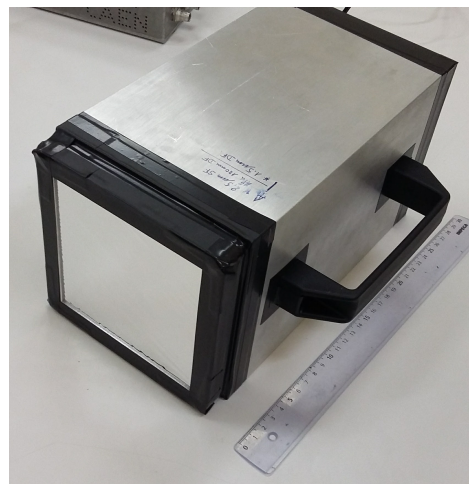
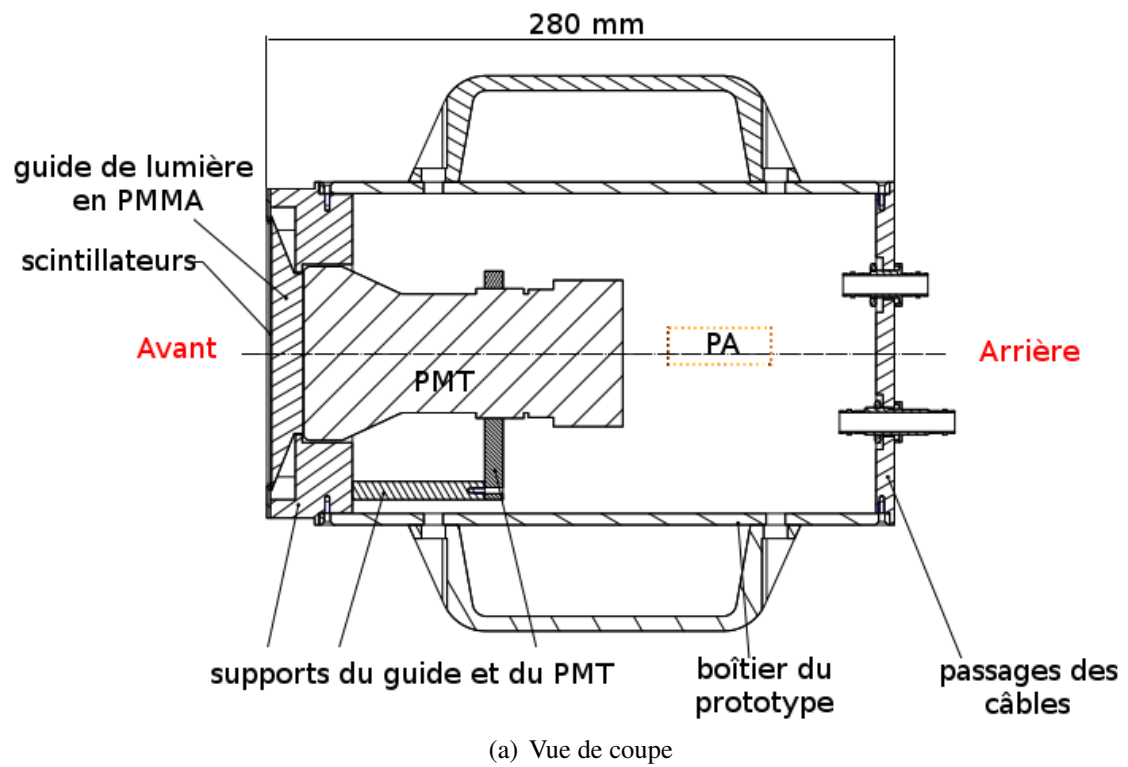


Figure 7.1 Dessin technique et photographie du prototype de contaminamètre développé à base de scintillateurs. PA : préamplificateur.

Dans la suite du document, le coté fenêtre d'entrée est défini comme l'avant du contaminamètre ; le coté PMT est donc l'arrière du détecteur.

7.2 Fenêtre d'entrée

La fenêtre d'entrée est un élément essentiel pour le contaminamètre portable. Elle a les caractéristiques suivantes :

1. Étanchéité à la lumière ambiante. En effet, le PMT, destiné à détecter la lumière de scintillation (longueur d'onde $\lambda \sim 420$ nm pour les scintillateurs utilisés), est également sensible à la lumière visible.
2. Réflexion de lumière de scintillation vers le guide de lumière.
3. Épaisseur de fenêtre d'entrée la plus fine possible. Comme le contaminamètre vise à détecter les bêta de basse énergie ($T_{\beta,max} = 316$ keV), la perte énergie due à l'existence de matière devant le scintillateur peut ne pas être négligeable. C'est pourquoi nous cherchons à minimiser l'épaisseur de matière composant cette fenêtre.

Avec le service instrumentation du LPC, une solution basée sur du Mylar aluminisé a été développée. Le Mylar aluminisé, de $1,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur, vendu commercialement, n'est pas étanche à la lumière à cause d'un dépôt d'aluminium de faible épaisseur et non homogène. Nous avons donc dû évaporer une épaisseur d'aluminium sur le Mylar aluminisé pour améliorer son étanchéité à la lumière.

Lors de cette étude, l'épaisseur d'aluminium et/ou le nombre de feuille de Mylar ont été ajustés. La fenêtre d'entrée finale est composée de deux feuilles de Mylar aluminisé commerciales de $1,5 \mu\text{m}$. Le premier est un Mylar aluminisé commercial plaqué sur la face avant du scintillateur comme présenté sur la Figure 7.2. Le rôle de cette feuille est de réfléchir la lumière de scintillation. Le deuxième Mylar commercial avec une évaporation de 300 nm d'aluminium sur chaque face (600 nm d'Al au total déposés sur le Mylar), permet d'obtenir une bonne étanchéité à la lumière ambiante. Après le montage, ce Mylar est à une distance de 1 à 2 mm des scintillateurs, ce qui ne sera pas optimal pour minimiser la distance entre la source et les scintillateurs.

Selon la simulation, l'ajout de 600 nm d'aluminium diminuera l'efficacité bêta de $\sim 10\%$.

7.3 Assemblage des scintillateurs

Afin de différencier les composants de scintillation issus des deux étages, un scintillateur fin avec un temps de décroissance lumineuse court (scintillateur rapide) est utilisé pour le premier étage de détection et un scintillateur épais avec un temps de décroissance lumineuse long (scintillateur lent) est utilisé comme deuxième étage.

Le scintillateur rapide est de type EJ212 [60], avec un temps de décroissance de 2,4 ns. Il a une épaisseur de $75 \mu\text{m}$ comme définie au paragraphe 5.2.1.4. Cette épaisseur permet d'avoir

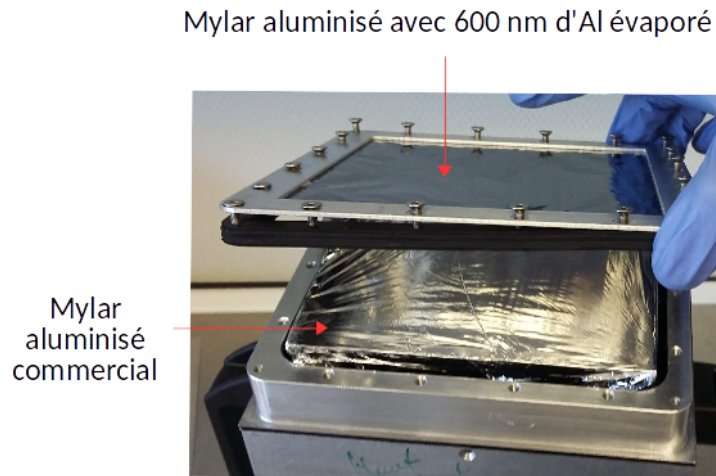


Figure 7.2 La composition de la fenêtre d'entrée : 1 Mylar aluminisé de $1,5 \mu\text{m}$ et 1 Mylar aluminisé de $1,5 \mu\text{m}$ avec 600 nm d'Al déposé collé sur le cadre. La fenêtre d'entrée a une distance de 1 à 2 mm après le montage.

suffisamment d'énergie déposée dans le scintillateur pour les bêta afin de permettre une bonne discrimination bêta/gamma et est disponible commercialement en surface supérieure à 100 cm^2 . Le scintillateur lent est de type EJ240 [61], avec un temps de décroissance de 285 ns . Des épaisseurs de $0,5$, 1 et 5 mm ont été utilisées pour les tests.

Les épaisseurs du scintillateur plastique sont fournies par le fournisseur Eljen et comportent des fluctuations sur toute la surface de scintillateur, surtout pour les faibles épaisseurs. Les épaisseurs des scintillateurs ont été mesurées à 5 endroits différents avec un micromètre, la moyenne des résultats sont donnés dans le Tableau 7.1. Le scintillateur rapide "de $75 \mu\text{m}$ ", qui nous a permis de valider l'épaisseur minimale utilisable expérimentalement et qui sera utilisé par la suite, a donc une épaisseur réelle de $\sim 100 \mu\text{m}$.

Tableau 7.1 Épaisseurs des scintillateurs plastiques utilisées données par le fournisseur Eljen et mesurées au LPC par un micromètre

Données	épaisseur de scintillateurs			
Fournisseur	$50 \mu\text{m}$	$75 \mu\text{m}$	2 mm	5 mm
Mesuré	$(70 \pm 9) \mu\text{m}$	$(102 \pm 15) \mu\text{m}$	$(2,07 \pm 0,01) \text{ mm}$	$(5,31 \pm 0,10) \text{ mm}$

7.3.1 Collage des scintillateurs par "chauffage"

D'après les résultats de simulation, le Phoswich V1 demande un scintillateur rapide de $75 \mu\text{m}$ d'épaisseur et un scintillateur lent de $2 - 5 \text{ mm}$ d'épaisseur associés sans épaisseur de matière. L'assemblage des scintillateurs plastiques pour construire ce "Phoswich V1" exige donc une absence de matière entre les deux étages ainsi qu'une bonne conduction de la lumière. Pour assurer cette conduction, il faut éviter d'avoir une lame d'air entre les deux scintillateurs.

Deux solutions sont alors envisageables pour lier les deux scintillateurs. La première est de les faire chauffer à une température proche de leur température de fusion ; la deuxième est d'utiliser un solvant pour les faire fondre en surface. Ces deux techniques ont été testées. Seule celle utilisant le chauffage a permis d'obtenir des résultats satisfaisants.

La température de ramollissement (Softening temperature)¹ des scintillateurs EJ212 et EJ240 est de 75 °C. Les températures de fusion des scintillateurs plastiques ne sont pas bien définies. Pour chercher la condition de chauffage permettant de coller les deux scintillateurs plastiques, de nombreux tests ont été réalisés à différentes températures et avec différentes pressions exercées sur les scintillateurs. Pour obtenir un bon résultat, il faut appliquer une température de 90 °C et un poids de 0,3 kg/cm³ sur les scintillateurs. Ces conditions permettent un collage sans déformer les scintillateurs.

La recherche de la bonne température et du poids ont été réalisées sur des petits échantillons de scintillateurs (2×2 cm²). Une fois validée, le collage des scintillateurs de taille 12 × 12 cm² a été effectué suivant la procédure :

1. Préchauffer l'étuve à 90 °C.
2. Placer le scintillateur rapide de 75 μm sur une plaque de verre propre. Enlever les bulles d'air entre le verre et le premier scintillateur (fin) en appliquant au mieux les surfaces.
3. Placer le deuxième scintillateur lent (épais) sur le premier.
4. Placer l'ensemble du dispositif dans la chambre à vide pour dégazer.
5. Placer l'ensemble à plat dans l'étuve à 90 °C avec un poids permettant d'obtenir ~0,3 kg/cm² posé sur l'ensemble des scintillateurs. Au bout d'une heure, éteindre l'étuve et laisser refroidir dans l'étuve.

Cette procédure permet de coller les deux scintillateurs sans les déformer ni les faire fondre.

7.3.2 Collage de scintillateurs avec une colle polymère

La configuration optimisée du "Phoswich V2" est composée d'un premier étage de scintillateur rapide de 75 μm d'épaisseur couplé à un scintillateur lent de 2 - 5 mm d'épaisseur associé avec un couplant de 200 μm d'épaisseur. Cette version demande un collage de scintillateurs avec une épaisseur de 200 μm entre les deux étages pour arrêter les électrons du ⁶⁰Co.

Afin de garantir le transport de lumière, le produit utilisé doit permettre une bonne transmission de lumière avec un indice de réfraction proche à celui des scintillateurs (n = 1,58).

Les produits couramment utilisés sont soit de la graisse optique comme Eljen EJ550 [59] (indice de réfraction 1,46), soit de la résine optique comme Eljen EJ500 [66] (indice de

1. Softening temperature : température à laquelle la résistance mécanique d'une matière thermoplastique devient insuffisante. Elle est utilisée pour représenter la résistance thermique d'un matériau qui n'a pas de température de fusion bien définie comme le plastique et verre.

réfraction 1,57), soit un polymère optique comme le Nusil LS6943 [67] (indice de réfraction 1,43). Comme la graisse optique est visqueuse et son épaisseur difficile à garantir, le polymère optique est utilisé. Sa condition de polymérisation est un chauffage à 60 ° C pendant 1 h. Après polymérisation, son épaisseur reste stable au cours du temps.

La difficulté de l'assemblage réside dans la maîtrise de l'homogénéité de l'épaisseur sur une surface importante ($12 \times 12 \text{ cm}^2$), de la faible épaisseur du scintillateur fin ($75 \mu\text{m}$) qui est facilement déformé, de la surface carrée du scintillateur. La méthode utilisée consiste à mettre des fils de pêche de Caperlan Axion Grenn de diamètre $200 \mu\text{m}$ entre les deux étages à assembler. L'assemblage suit les étapes :

1. Préchauffer l'étuve à 60 °C.
2. Préparer le mélange de polymère LS6943 (portion A 7 g et B 0,7 g) et le dégazer dans une chambre à vide.
3. Placer le scintillateur fin de $75 \mu\text{m}$ sur une plaque de verre propre. Évacuer les bulles d'air entre le verre et le scintillateur fin (rapide) en appliquant au mieux les surfaces.
4. Tendre 3 fils de pêche ($D = 200 \mu\text{m}$) parallèles et équidistants au dessus du scintillateur fin.
5. Verser le polymère dégazé sur le scintillateur fin sous forme de croix(cf. Figure 7.3), pour faciliter l'étalement du polymère sur la surface carrée du scintillateur.
6. Mettre le scintillateur épais sur le scintillateur fin et étaler le polymère sur toute la surface en appuyant dessus.
7. Une fois étalé, essuyer le polymère qui déborde et mettre une plaque de verre sur le scintillateur épais.
8. Placer l'ensemble du dispositif dans la chambre à vide pour dégazer.
9. Placer l'ensemble horizontalement dans l'étuve à 60 °C. Au bout d'une heure, éteindre l'étuve et laisser refroidir dans l'étuve.

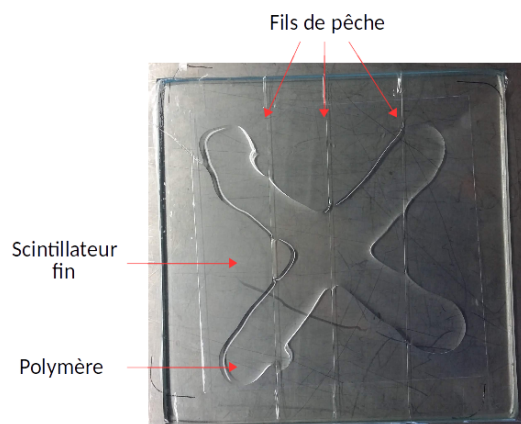


Figure 7.3 Dépôt du polymère sur le scintillateur fin pour assembler deux scintillateurs plastiques à Phoswich V2.

Cette méthode a permis d'obtenir des collages d'épaisseur homogènes sur toute la surface.

7.4 Pré-amplificateur

Pour les mesures au laboratoire, le pré-amplificateur de modèle 776 de Phillips Scientific [68] a été utilisé avec un gain de 10 ou 100 si besoin. Ce module est un préamplificateur rapide, bas bruit (bruit RMS : inférieur à $25 \mu\text{V}$) et stable en gain avec un temps de montée inférieur à 1,3 ns, adapté pour une utilisation permettant une analyse en forme des signaux avec un signal rapide (de l'ordre de la ns) comme dans notre cas. Comme le modèle 776 est un module NIM, un préamplificateur de petite taille, qui peut être intégré dans la mécanique des prototypes, a été développé au LPC (Figure 7.4). C'est un pré-amplificateur un gain de 25, composé de deux cartes THS4303 [69]. Il est bas bruit (bruit RMS : 2 mV) et rapide avec un temps de montée inférieur à 350 ps. Il permet donc de suivre la forme du signal en sortie du PMT.

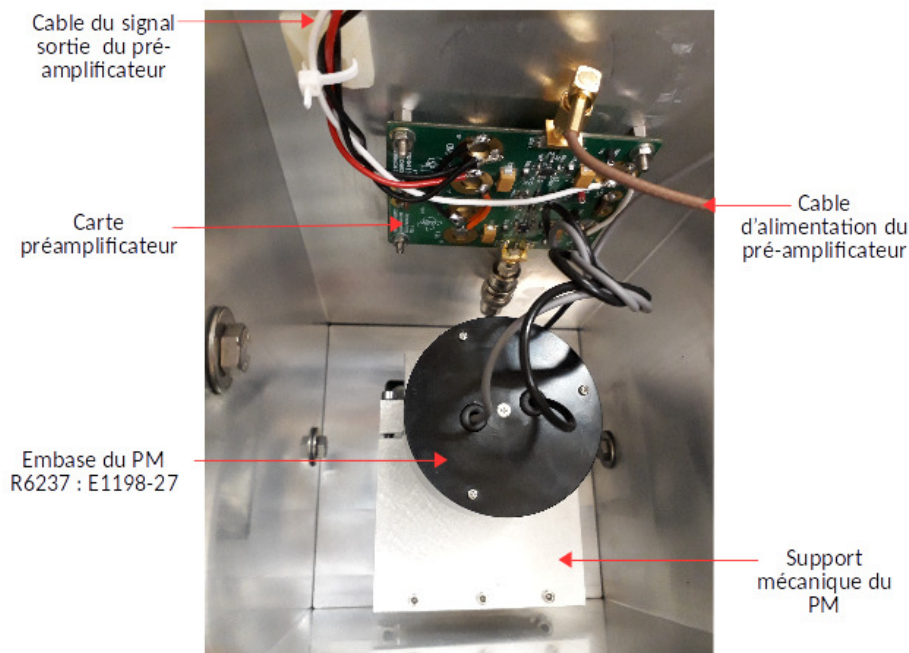


Figure 7.4 Photo de l'intérieur du prototype Phoswich (vue depuis l'arrière). Le signal du PMT est envoyé au préamplificateur dont le signal est envoyé au système d'acquisition FASTER.

7.5 Système d'acquisition FASTER

Les signaux issus du préamplificateur sont numérisés directement par le système d'acquisition numérique modulaire FASTER [70] développé au LPC Caen. Ce système d'acquisition numérise toutes les 2 ns le signal et permet d'utiliser des fonctions comme des filtres passe-bas, une restauration de ligne de base automatisée qui permettent de diminuer le bruit. En plus, les utilisateurs peuvent régler les paramètres comme les seuils de déclenchement, et portes d'intégration des signaux [71].

La version que nous utilisons pour nos prototypes est composée d'une ou deux entrées qui fonctionnent avec des algorithmes QDC : Charge to Digital Converter. Cet algorithme fournit 4 portes d'intégration en charges pour le même signal. Deux portes d'intégration ont été utilisées afin de récupérer le composant rapide et le composant lent du signal. Le réglage de portes d'intégration a été présentés dans le paragraphe 5.2.1.4.

7.6 Guide de lumière

Un guide de lumière est nécessaire pour guider les photons de scintillation d'une surface de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ vers la surface de $7,6 \times 7,6 \text{ mm}^2$ du PMT. D'après les résultats d'optimisation du guide par la simulation effectuée par Y. Shan [63], une forme de pyramide tronquée est optimale. Trois guides de lumières ont été fabriqués pour les tests : deux en PMMA (a) et (b)

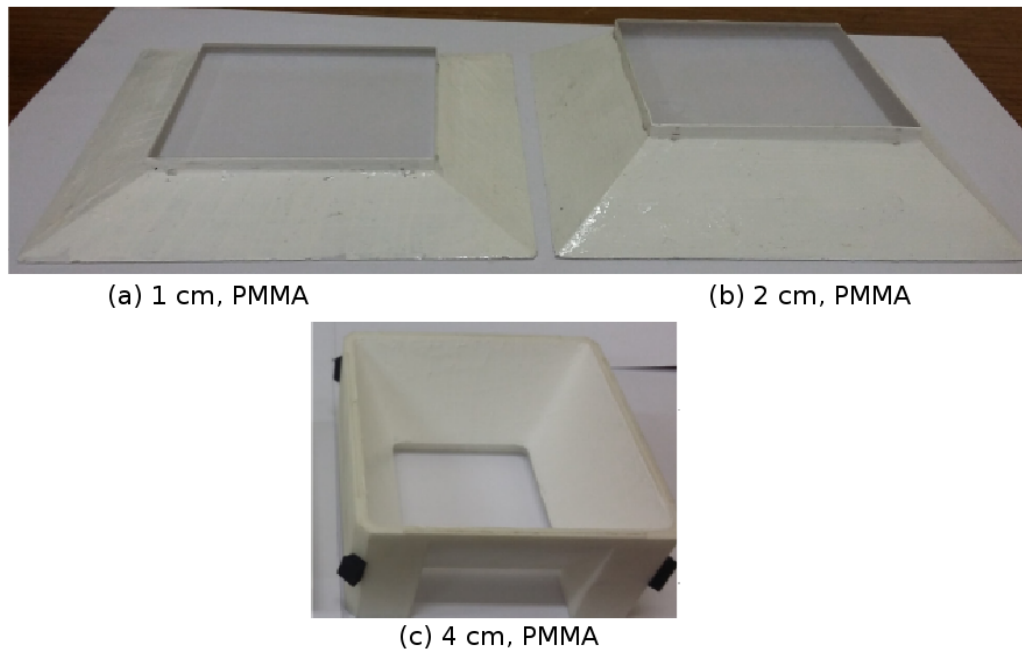


Figure 7.5 Photo de 3 guides fabriqués pour les tests. (a) guide en PMMA de 1 cm de longueur ; (b) guide en PMMA de 2 cm de longueur ; (c). guide creux de 4 cm de longueur.

et un guide creux (c) comme présentées sur la Figure 7.5. Les deux guides en PMMA ont des épaisseurs de 1 cm et de 2 cm et le guide creux une épaisseur de 4 cm.

Les guides en PMMA sont polis sur toutes les surfaces et les côtés, peints en blanc pour diffuser et réfléchir la lumière de scintillation. Le guide creux est fabriqué par impression 3D avec de la résine. Ses quatre surfaces intérieures sont peintes en blanc.

7.7 Photo-multiplicateur PMT

Le photo-multiplicateur utilisé est de type R6237 avec une embase adaptée de type Hamamatsu E1198-27 [72]. Du fait de la forme carrée du scintillateur et pour une transmission

de lumière optimisée, le PMT choisi a une surface carrée de $76 \times 76 \text{ mm}^2$ dont la photocathode est de $70 \times 70 \text{ mm}^2$, adapté au guide choisi. Son efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde des photons atteint 30% à $\sim 400 \text{ nm}$.

7.8 Conclusion

Le dispositif expérimental pour les détecteurs à base de scintillateurs a été décrit. La fenêtre d'entrée est composée de deux feuilles de Mylar aluminisé, qui rend le contaminamètre étanche à la lumière.

Pour associer optiquement les deux étages de scintillateur, deux procédures de collage ont été mises au point : l'une basée sur la fusion des scintillateurs (Phoswich V1), l'autre sur un collage avec une épaisseur de polymère entre les deux scintillateurs (Phoswich V2). Pour le Phoswich V1, le collage par chauffage est effectué à $90 \text{ }^\circ\text{C}$, sous un poids exerçant $\sim 0,3 \text{ kg/cm}^2$.

Le signal issu du PMT étant d'amplitude relativement faible, un préamplificateur de gain 25 a été développé au LPC. Ce préamplificateur rapide a des propriétés adaptées pour permettre l'analyse en forme du signal du PMT.

Nous disposons donc maintenant de prototypes que nous allons pouvoir tester avec des sources ou sur site en CNPE.

Chapitre 8

Tests expérimentaux des détecteurs avec des sources radioactives au LPC

Une fois les détecteurs montés, ils ont été testés au LPC avec des sources radioactives bêta et gamma pour évaluer leurs performances.

8.1 Sources radioactives utilisées au LPC

Dans le but de vérifier l'efficacité des détecteurs pour mesurer une contamination bêta, le contaminant principal, une source bêta de ^{60}Co a été utilisée. Une source gamma de ^{137}Cs a été utilisée pour étudier la sensibilité des prototypes au bruit de fond gamma car elle est la source de référence définie dans la norme ISO 60325.

8.1.1 Source bêta

La source bêta de ^{60}Co est une source scellée du type VZ-599 de Echert & Ziegler [73]. Elle a une activité de 41 kBq mesurée en mars 2017, ce qui correspond à une contamination surfacique élevée de 284 Bq/cm^2 pour la surface de détection de notre contaminamètre : 144 cm^2 . Avec une demie vie de 5,27 ans, sa perte d'activité a été prise en compte au cours des mesures réalisées pendant la thèse.

La structure de la source est présentée sur la Figure 8.1. Elle est constituée d'un dépôt protégé par une feuille de titane fine, de $5 \mu\text{m}$, pour éviter la contamination de l'environnement. Comme le spectre bêta du ^{60}Co est de basse énergie ($T_{\beta, \text{max}} = 0,316 \text{ MeV}$), l'influence de l'épaisseur du titane n'est pas négligeable sur la forme du spectre en énergie et sur le flux d'électrons après la feuille. Le spectre résiduel en énergie, après les pertes dans le titane, n'est donc pas garanti par le fournisseur. C'est pourtant un facteur essentiel pour quantifier l'efficacité de détection bêta du contaminamètre. C'est pourquoi des simulations Geant4 ont été réalisées en reproduisant la géométrie de la source pour étudier le rendement de source. La source a été simulée pour des bêta distribués de façon uniforme sur la surface et envoyés dans

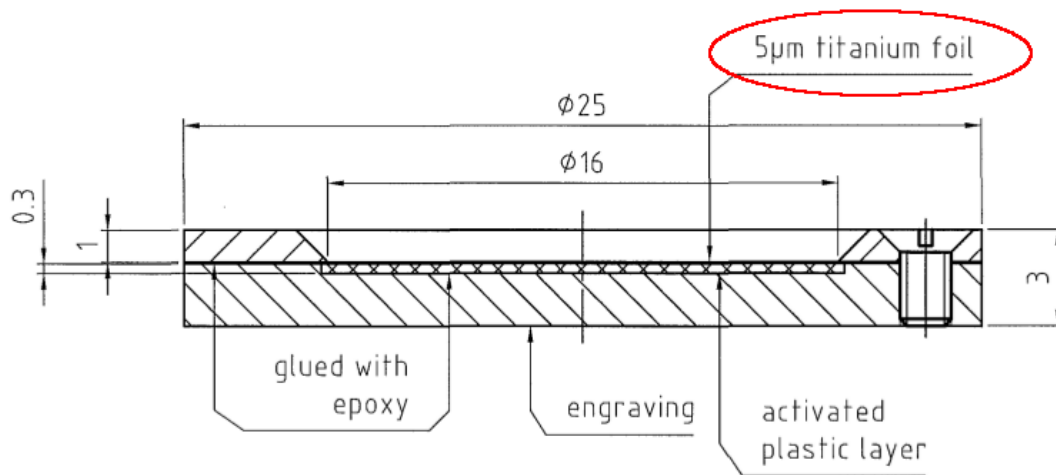


Figure 8.1 Configuration de la source bêta de ^{60}Co utilisée au laboratoire LPC. Elle a une feuille de Titane de $5\ \mu\text{m}$ qui couvre la source. [73]

4π . En sortie du titane, le rendement de source ϵ_{sc} n'est que 30% contre 50% et le spectre en énergie est dégradé comme présenté Figure 8.2.

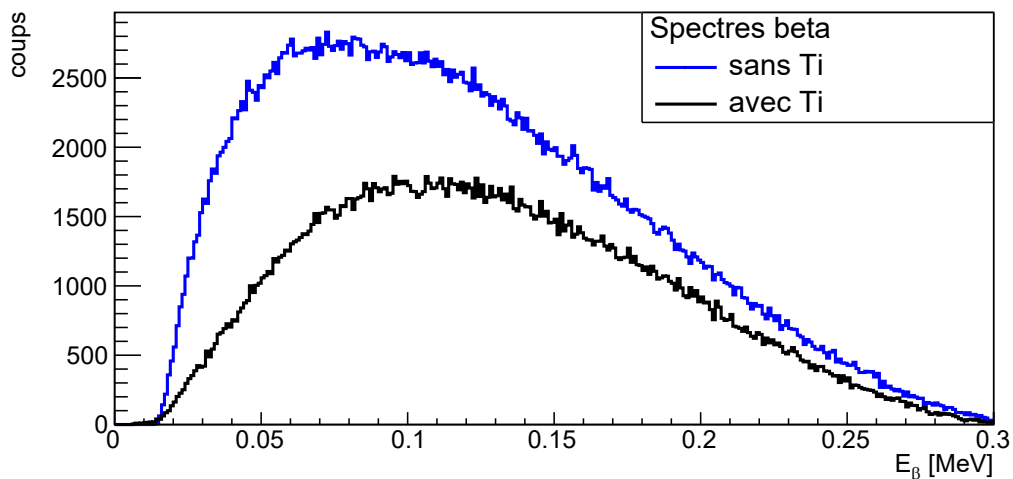


Figure 8.2 Spectre bêta qui sort de la source bêta avec et sans la feuille de Titane de $5\ \mu\text{m}$ couvrant la source.

Ce facteur devra donc être pris en compte lors de nos études ; les efficacités ($\epsilon = \epsilon_i \epsilon_s$) obtenues au LPC avec cette source seront donc probablement plus faibles qu'avec une source bêta de ^{60}Co non protégée à cause du rendement de source ϵ_{sc} inférieur.

8.1.2 Source gamma

Pour caractériser la réponse du détecteur au bruit gamma, une source gamma de ^{137}Cs est utilisée. La source disponible au LPC avait une activité d'ordre de 3,7 MBq en août 2015. Avec une demi vie de 30,1 ans, elle a une activité de 3,6 MBq lors des mesures réalisées pour la thèse.

La source est collimatée avec du plomb, comme présentée sur la Figure 8.3. Nous pouvons la placer à 30 à 50 cm du détecteur pour qu'il soit exposé sur toute la surface.

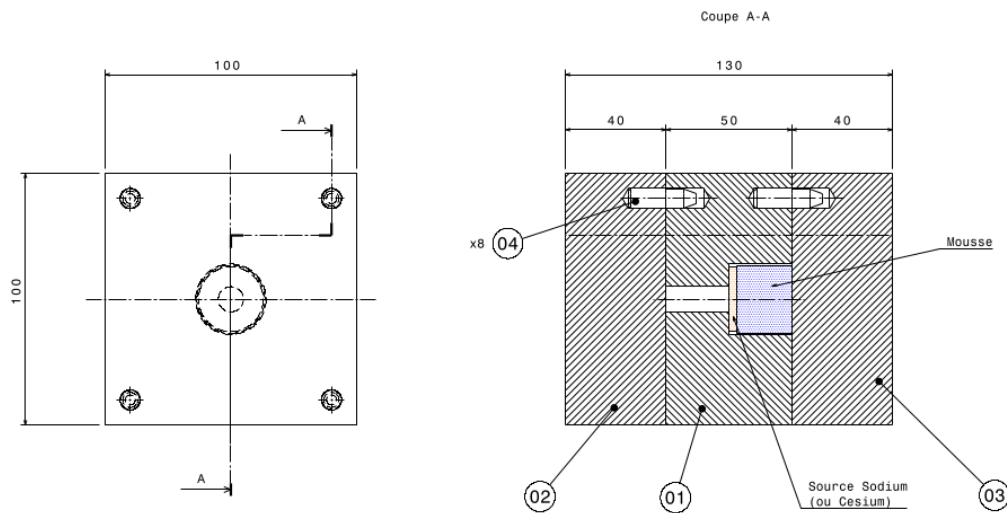


Figure 8.3 Schéma de la géométrie de la source gamma de ^{137}Cs blindée par le Plomb. La partie de 02 est enlevée lors de mesures.

En considérant que la source ponctuelle à une distance source-détecteur de 30 cm, le débit de dose est estimé à $1,1 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h/Bq}$ [74]. Pour une activité de 3,6 MBq et à une distance de 50 cm, le débit de dose est de $1,4 \mu\text{Sv/h}$. Ce débit de dose a été vérifié par un radiamètre Radiagem 2000 [75]. Il est environ 7 fois supérieur au bruit de fond environnemental ($0,2 \mu\text{Sv/h}$ en France) mais inférieur aux exigences du cahier des charges. Il faudra donc extrapoler ces données à $100 \mu\text{Sv/h}$.

8.2 Traitement des données

Les charges rapides (q_{rap}) et les charges lentes (q_{lent}), correspondant à l'intégration des parties rapides et lentes du signal, mesurées par FASTER sont proportionnelles à l'énergie déposée dans le scintillateur rapide et dans le scintillateur lent. Nous allons maintenant présenter leur traitement.

8.2.1 Représentation des données

Pour mieux expliquer les méthodes de traitement des données, un Phoswich V2 avec la configuration suivante est utilisé comme exemple : scintillateur rapide d'épaisseur $75 \mu\text{m}$ séparé du scintillateur lent de 1 mm d'épaisseur par une couche de polymère de $200 \mu\text{m}$.

8.2.1.1 Distribution des charges : q_{rap} vs q_{lent}

De la même façon que pour l'énergie déposée dans les scintillateurs représentée dans les simulations, la distribution des charges mesurées peut également être présentée sous la forme d'un spectre bidimensionnel : charges rapides (q_{rap}) en fonction de charges lentes (q_{lent}).

D'une manière indicative, une distribution avec une source bêta est donnée sur la Figure 8.4 (a). Les trois zones : A, B et C, correspondent à celles identifiées sur les distributions en

énergie obtenues en simulation (cf. Figure 5.12). Les particules qui déposent de l'énergie

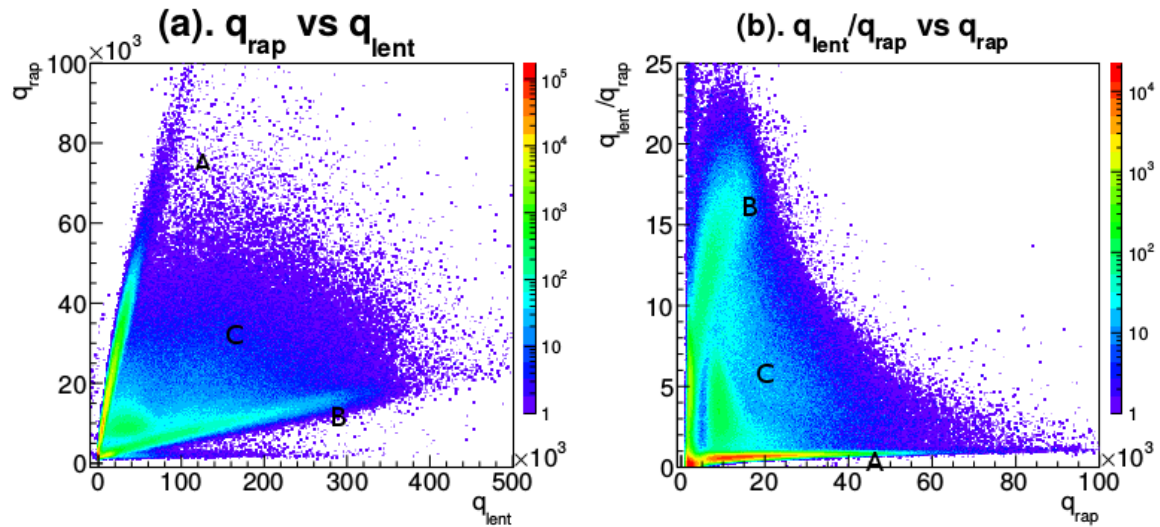


Figure 8.4 Deux représentations de la distribution des charges rapides et charges lentes pour une source bêta de ^{60}Co mise devant un prototype Phoswich V2. (a). Distribution des charges (charges rapide q_{rap} en fonction de charges lent q_{lent}). (b). Distribution du ratio $q_{\text{lent}}/q_{\text{rap}}$ en fonction de charges rapide q_{rap} . La zone A correspond à celles qui n'interagissent que dans le premier étage (scintillateur rapide); la zone B correspondent à celles qui n'interagissent que dans le deuxième étage (scintillateur lent) et la zone C présente ceux qui interagissent dans les deux étages.

uniquement dans le premier scintillateur se situent dans la zone A, celles qui n'interagissent seulement dans le deuxième scintillateur sont dans la zone B, celles qui déposent de l'énergie dans les deux scintillateurs sont dans la zone C. Les bêta, émis par le ^{60}Co , contribuent à la zone A et C car tous les électrons passent par le scintillateur rapide d'abord et y déposent forcément de l'énergie.

La raison pour laquelle les zones A et B ne sont pas sur les deux axes comme présenté par la Figure 5.12 est que les charges rapides prises à partir de la fenêtre d'intégration comprennent une partie des charges lentes et vice versa.

L'analyse TS3, qui sélectionne les particules qui n'ont touché que le premier étage (2ème étage utilisé en véto), pour le Phoswich V2 (cf. section 5.2.3), consiste à ne sélectionner que les événements de la zone A comme signal utile.

Cette distribution de charges rapides en fonction de charges lentes sera utilisée pour comparer les données entre deux positions différentes de source ou deux configurations différentes de détecteurs par exemple.

8.2.1.2 Distribution du ratio des charges : $q_{\text{lent}}/q_{\text{rap}}$ vs q_{rap}

Pour analyser les charges dues à deux scintillateurs, le ratio de charges est couramment appliqué, comme pour la discrimination neutron/gamma [76] [77]. Pour notre application, la distribution du ratio $q_{\text{lent}}/q_{\text{rap}}$ en fonction de q_{rap} est proposée. Sa distribution est présentée dans la Figure 8.4 (b) pour la même mesure que la Figure 8.4 (a). La zone A (avec un ratio de $q_{\text{lent}}/q_{\text{rap}} \sim 0$) représente les signaux à prendre en compte avec l'analyse TS3.

8.2.1.3 Représentation du taux de comptage en fonction du temps

Afin de déterminer les coupures et les méthodes d'analyse adaptées pour nos prototypes de Phoswich V1 et V2, une grande statistique est nécessaire. Des acquisitions de 15 min et de 1 h ont été réalisées. Une fois les sélections en charges et seuils fixés, des mesures en temps réel du taux de comptage peuvent être réalisées pour représenter le fonctionnement en conditions réelles du contaminamètre.

Pour prendre en compte le temps de mesure de 4 s, imposé par le cahier des charges, le taux de comptage intégré sur 4 secondes doit être affiché toutes les secondes. Pour ce faire, le traitement utilisant une moyenne mobile ou moyenne glissante sera utilisé.

Moyenne mobile Dans le cas où une mesure continue est réalisée, il est possible de diminuer le bruit aléatoire (écart-type du taux de comptage) et de garder une réponse rapide à la présence de contamination en réalisant le calcul de la moyenne mobile. Ce filtrage numérique a une vitesse d'exécution courte par rapport aux autres filtres numériques comme les filtres Gaussian and Blackman [78][79]. Une interprétation graphique est présentée sur la Figure 8.5.

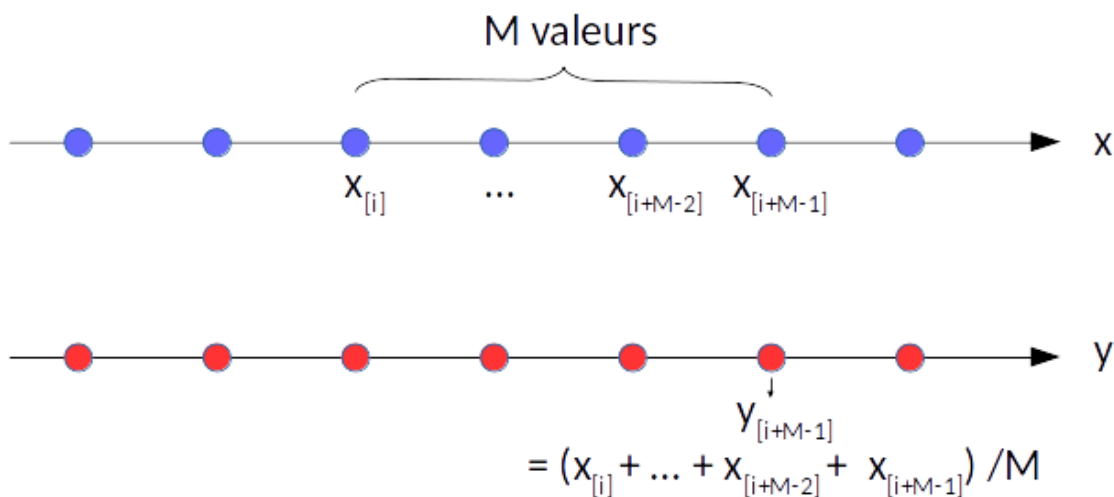


Figure 8.5 Interprétation du moyen mobile. Les points sur x sont le signal d'entrée et y le signal de sortie.

Le calcul de la moyenne mobile prend la valeur moyenne d'un nombre, sélectionné, de points du signal d'entrée pour reproduire le signal de sortie. Sa formule se représente sous la forme suivante [79] :

$$y[i + M - 1] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j], \quad (8.1)$$

où $x[]$ est le signal d'entrée, $y[]$ est le signal de sortie, et M est le nombre de points pris pour calculer la moyenne.

Dans notre cas, le signal d'entrée est le taux de comptage total pour une mesure d'une seconde et le signal de sortie est le taux de comptage pour une mesure de 4 s, qui peut être obtenu en moyennant les mesures sur 4 secondes (de $t-3$ à t).

Cette méthode permet de diminuer le rms du bruit et du signal tout en gardant les valeurs moyennes de S et de B. Elle lisse donc le signal en éliminant les composants du bruit aléatoire mais risque d'enlever des structures fines qui existent dans le signal et ralentit le signal si l'intégration se fait sur un temps trop long. Pour appliquer ce filtre, il faut faire attention à ce que le temps de réponse du détecteur reste conforme aux exigences du cahier des charges.

Cette représentation sera utilisée en mesures au CNPE de Chinon pour une mesure dynamique avec une évolution de la contamination bêta (eg : Figure 9.4) et pour prendre en compte les évolutions statistiques du taux de comptage (eg : Figure 9.8).

8.2.1.4 Choix des sélections en charges

Comme présenté précédemment, il est crucial de définir une sélection en charges (sélection graphique sur les distributions du ratio des charges) selon l'analyse et le seuil optimisé à appliquer. Pour chaque configuration, le choix dépend des distributions pour les bêta et les gamma. Les sélections dans les deux scintillateurs sont optimisées de la manière suivante :

1. Sélectionner la zone correspondant à l'interaction des bêta sur la distribution bêta du ratio (q_{lent}/q_{rap} vs q_{rap}). Par exemple, pour Phoswich V2, c'est la zone entourée par le polygone sur la Figure 8.6.

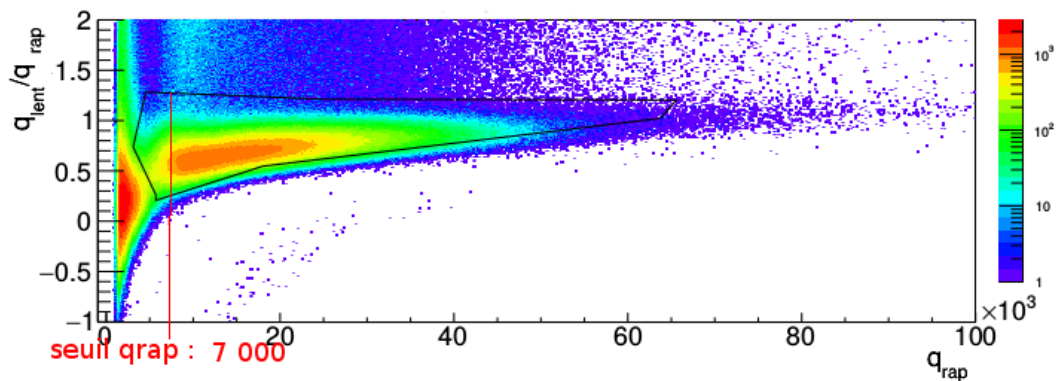


Figure 8.6 Distribution du ratio q_{lent}/q_{rap} en fonction des charges rapides q_{rap} pour une source bêta. (zoom de 8.4(b)). La coupure graphique appliquée est représentée par le polygone en noir. Elle prend en compte les électrons qui interagissent dans le scintillateur rapide et ne touchent pas le scintillateur lent.

Une fois la sélection appliquée, calculer l'efficacité de détection ε et le taux de détection bêta (S) lorsque le détecteur est soumis à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$. Notons le S_0 :

$$S_0[1/s] = 0,4 \text{ Bq/cm}^2 \times 144 \text{ cm}^2 \times \varepsilon_\beta = 58 \text{ Bq} \times \frac{\text{coups}_\beta / t_{ACQ}[s] - \phi_{bruit_{envir}}[1/s]}{A[\text{Bq}]} \quad (8.2)$$

Avec A l'activité de la source bêta utilisée pour la mesure (en Bq) ; coups_β le nombre d'événements dans la sélection en charges ; t_{ACQ} le temps d'acquisition pour cette mesure (en seconde) ; $\phi_{bruit_{envir}}$ le taux de comptage du bruit environnemental (en 1/s) dans la sélection en charges lorsqu'il n'y a pas de source radioactive.

2. Appliquer la sélection en charges sur la distribution gamma du ratio des charges. Puis calculer le taux de comptage par seconde. Extrapoler le taux à 100 $\mu\text{Sv/h}$. Ce taux extrapolé est noté B_0 et il est calculé de la façon suivante :

$$B_0[1/s] = 100 \mu\text{Sv/h} \times \frac{\phi_\gamma - \phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}}{\text{DeD} [\mu\text{Sv/h}]} = 100 \mu\text{Sv/h} \times \frac{\text{coups}_\gamma / t_{\text{ACQ}}[s] - \phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}[1/s]}{\text{DeD} [\mu\text{Sv/h}]} \quad (8.3)$$

où DeD est le débit de dose produit par la source gamma à l'endroit du contaminamètre (en $\mu\text{Sv/h}$), ϕ_γ le taux de comptage (1/s) du contaminamètre dans la sélection en charges quand la source gamma est présente, $\phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}$ le taux de comptage (1/s) du contaminamètre dans la sélection en charges en absence de source ; coups_γ le nombre d'événements dans la sélection en charges pour une mesure avec la source ^{137}Cs qui dure t_{ACQ} secondes.

3. Calculer le facteur de mérite $F_0 = \frac{S_0}{\sqrt{B_0}}$ correspondant à l'application de la sélection en charges choisie.
4. Appliquer sur les charges rapides un seuil q_{rap} pour les distributions bêta et gamma, en plus de la sélection en charges précédente. Ce seuil est ajouté à la sélection en charges car c'est la partie du spectre qui influence principalement la valeur du facteur de mérite. La Figure 8.6 donne un exemple du seuil à 7 000 canaux. Répéter les étapes 1, 2, 3 pour différentes valeurs de seuil.
5. Représenter les valeurs de la figure de mérite F en fonction du seuil q_{rap} appliqué. Retenir le seuil qui optimise F. En faisant varier le seuil sur les charges rapides autour du seuil optimisé, une variation du facteur de mérite est obtenue, qui permet de prendre en compte d'éventuelles fluctuations de gain de l'électronique et d'estimer l'incertitude sur F issue du choix du seuil.

Comme en simulation, le choix du seuil est un des facteurs importants qui contribuent à l'erreur sur le résultat affiché.

8.3 Tests expérimentaux du détecteur Phoswich V2

Suite aux études préalables, deux versions de Phoswich, V1 et V2, ont été choisies pour le développement. Les deux prototypes ont été soumis aux mêmes tests et donnent des résultats comparables au laboratoire, seules les mesures avec le Phoswich V2 au LPC seront détaillées dans ce chapitre.

L'objectif des tests des Phoswich avec des sources au laboratoire est :

- d'étudier les caractéristiques des guides de lumière ;
- de tester la sensibilité du prototype aux bêta et aux gamma.

Pour chaque configuration, il y a trois types de mesures effectuées avec chacune son propre objectif :

1. Une mesure du bruit environnemental est effectuée sans source radioactive. Ce taux de comptage $\phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}[1/s]}$ devra être soustrait aux taux de détection gamma ou bêta.
2. Des mesures avec la source bêta permettent :
 - (a) de définir la sélection en charges correspondant au signal des électrons bêta et le seuil optimisé ;
 - (b) d'étudier l'uniformité de réponse du contaminamètre ;
 - (c) de déduire l'efficacité de détection bêta.
3. Des mesures avec la source gamma permettent
 - (a) de définir le seuil optimisé ;
 - (b) de déduire la sensibilité du contaminamètre au bruit de fond gamma (taux de détection à un DeD donné) ;
 - (c) d'étudier la sensibilité du contaminamètre en fonction de la position de la source.

Les mesures ont été effectuées dans les conditions suivantes :

- La source bêta est placée devant la fenêtre d'entrée, le plus près possible : à ~ 5 mm de distance. Elle est placée à différentes positions pour étudier l'uniformité de réponse. Une fois l'uniformité connue, elle est placée systématiquement au centre de la fenêtre d'entrée. Les mesures durent 10 à 20 min pour avoir une statistique suffisante.
- La source gamma est placée à deux positions différentes par rapport au détecteur : 40 - 50 cm devant la fenêtre d'entrée et 40 - 50 cm derrière le détecteur. Chaque mesure dure 1 à 2 heures pour obtenir suffisamment de statistique.

Les tests expérimentaux pour choisir le guide de lumière à partir des caractéristiques déduites de ces mesures sera présenté en premier. Avec le guide choisi, la performance de discrimination bêta/gamma sera détaillée. Les résultats sont donnés pour la version du Phoswich V2 avec la configuration suivante : scintillateur rapide d'épaisseur $75 \mu\text{m}$ séparé du scintillateur lent de 1 mm par une couche de polymère de $200 \mu\text{m}$. Le préamplificateur utilisé est le Phillips 776, avec un gain de 10.

8.3.1 Tests et optimisation du guide de lumière

Les simulations réalisées pour optimiser le guide de lumière (en annexe B) ont conduit à la réalisation de trois guides de lumière qui seront étudiés dans cette partie (cf. 7.6) :

- un guide en PMMA de 1 cm d'épaisseur ;
- un guide en PMMA de 2 cm d'épaisseur ;
- un guide creux en air de 4 cm d'épaisseur.

Les paramètres d'intérêt d'un guide de lumière sont les suivants :

- Uniformité de la réponse. Elle est définie en terme de rendement de détection bêta mesuré à différents endroits sur la surface du détecteur (cf. Formule 3.13).
- Amplitude du signal. Plus le guide est efficace pour guider la lumière vers le PM, meilleure est la séparation du signal et du bruit.

- Influence sur la discrimination bêta/gamma : facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$.
- Lumière due au Cerenkov. Pour les guides en PMMA, la lumière Cerenkov créée par l'interaction des gamma dans le PMMA peut introduire du bruit.
- Poids et volume. Un détecteur portable doit être léger, < 1,5 kg selon le cahier des charges. Le guide de lumière a une contribution non négligeable (quelque centaines de gramme) dans le poids total du détecteur.

Les trois guides sont montés sur le même Phoswich V2 l'un après l'autre pour les mesures avec les sources bêta et gamma.

8.3.1.1 Uniformité de réponse, amplitude du signal et discrimination bêta/gamma

La norme ISO 60325 spécifie que l'uniformité du détecteur doit être meilleure que $\pm 25\%$. En outre, une amplitude du signal (charges) plus importante donnera probablement une meilleure discrimination bêta/gamma.

Afin d'étudier l'uniformité de réponse et l'amplitude du signal pour les différents guides de lumière, la méthode de mesure consiste à utiliser la source bêta de ^{60}Co du LPC qui a une petite surface active (de surface $\pi \times 8^2 \text{ mm}^2 = 2 \text{ cm}^2$) par rapport à la surface de détecteur (144 cm^2) et de la placer à différents endroits de la fenêtre d'entrée comme présenté sur la Figure 8.7. Afin d'éviter les effets de bord liés au fait que la source émet des bêta de façon isotrope et non collimatée, les zones situées à moins de 8 mm du bord ne sont pas utilisées. Les efficacités bêta obtenues pour les positions qui ont un rendement maximum et minimum, permettent de calculer l'uniformité de réponse surfacique pour la configuration du détecteur testé (cf. Formule 3.13).

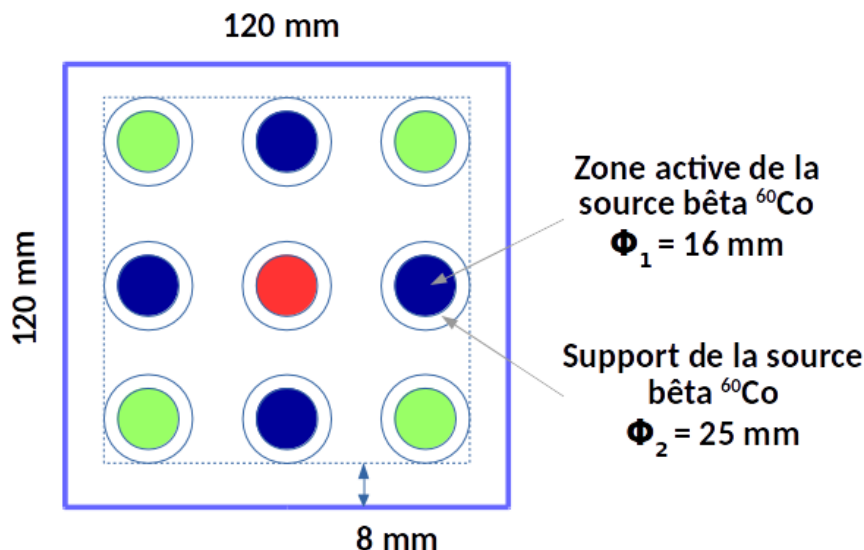


Figure 8.7 Positions de la source bêta pour les mesures sur la surface de détecteur : au centre (rouge), sur le côté (bleu) et dans le coin (vert).

La Figure 8.8 présente le ratio des charges q_{lent}/q_{rap} en fonction de q_{rap} pour les trois guides étudiés et les positions de source donnant la meilleure efficacité (centre) et la moins bonne (coin).

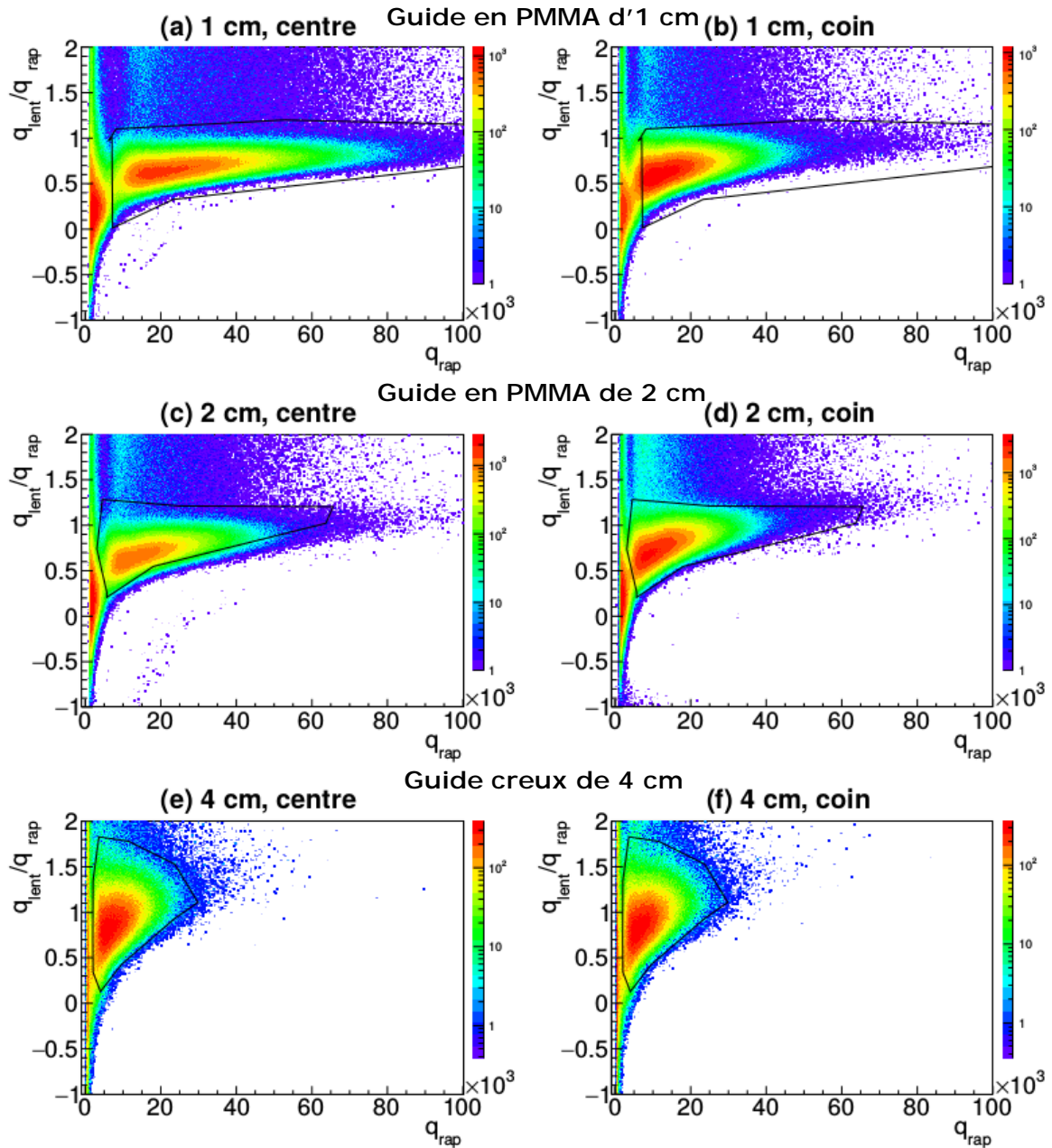


Figure 8.8 Ratio des charges q_{lent}/q_{rap} en fonction de q_{rap} avec une configuration de Phoswich V2 ($75 \mu\text{m}$ rapide, $200 \mu\text{m}$ colle, 1 mm lent) couplé à différents guides de lumière : guide en PMMA de 1 cm , guide en PMMA de 2 cm et guide creux de 4 cm . La figure compare la distribution lorsque la source bêta de ^{60}Co est au centre et au coin du détecteur.

Il est évident que l'amplitude du signal diminue avec la longueur du guide en PMMA qui permet un meilleur guidage que le guide creux. Compte tenu cette variation sur la Figure 8.8, le guide creux de 4 cm a une amplitude faible et un gain de 100 du pré-amplificateur a donc été utilisé pour les mesures avec ce guide pour faciliter l'analyse.

Les résultats expérimentaux montrent que le guidage de la lumière est le moins bon lorsque la source est dans le coin (zone en vert sur la Figure 8.7) et est maximisé lorsqu'elle

est au centre (zone en rouge sur la Figure 8.7). Les efficacités de bêta pour ces deux positions de source sont donc retenues pour calculer l'uniformité de réponse du détecteur.

L'efficacité de discrimination bêta/gamma est évaluée grâce au facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$. S est calculé avec la source bêta du LPC pour une contamination bêta équivalente de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ et B est ramené à un débit de dose équivalent à $100 \mu\text{Sv/h}$.

L'évolution du facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ et de l'uniformité de réponse pour les trois guides sont présentées sur la Figure 8.9. Deux facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ sont présentés : l'un avec la source bêta placée au centre (noté centre en figure), l'autre dans le coin (noté coin en figure) ; B est obtenu avec la source de ^{137}Cs derrière le prototype.

Les deux facteurs de mérite augmentent et puis diminuent quand le seuil appliqué augmente. L'uniformité se dégrade quand le seuil q_{rap} augmente pour les trois guides de lumière car cela rejette de plus en plus de signal (de faible amplitude) quand la source bêta est dans le coin. Le guide de 4 cm est le moins sensible au seuil en charges rapides, quelque soit la position de la source bêta, mais a la moins bonne collection de lumière et conduit au moins bon facteur de mérite.

Le guide de 1 cm donne les meilleures performances de discrimination avec un facteur allant à 0,5 ($q_{rap} = 1,2 \times 10^4$ canaux) si la source bêta est au centre. Néanmoins, le facteur de mérite diminue fortement quand la source bêta est dans un coin. L'ensemble donne une uniformité de $\pm 30\%$ à ce seuil en énergie et ne répond pas aux exigences de l'uniformité. La dégradation de l'uniformité avec le seuil nous oblige à appliquer un seuil plus bas pour ce guide.

Le seuil optimal est donc celui qui permet d'avoir le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ le plus élevé en gardant une valeur d'uniformité meilleure que $\pm 20\%$. Ils sont présentés sur la Figure 8.9 par des lignes verticales pointillées pour les deux positions de source bêta. Des lignes verticales continues représentent un compromis des seuils entre ces seuils. Les seuils optimaux dépendent de la position de la source bêta ; ils sont très différents pour le guide d'1 cm (9 000 pour le coin et 15 000 pour le centre). Le seuil choisi est donc un compromis entre les deux positions.

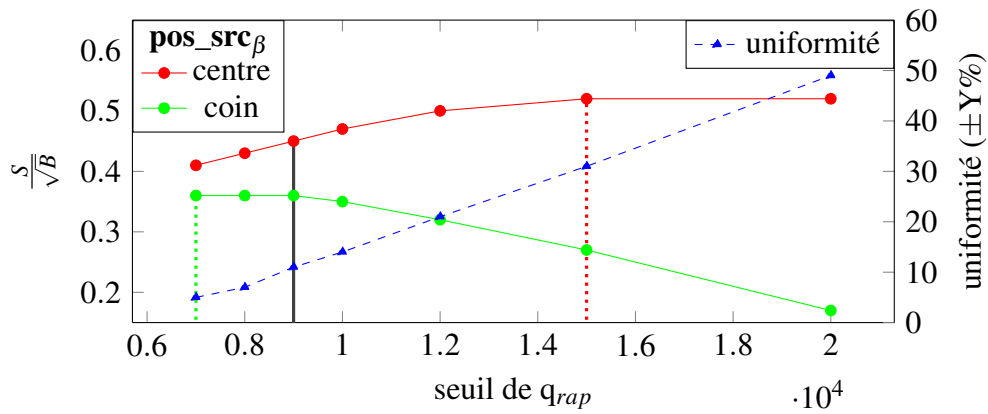
En appliquant le seuil optimal choisi, les facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ et l'uniformité de réponse sur la surface de contaminamètre sont présentés sur le Tableau 8.1.

L'incertitude sur l'uniformité et sur le facteur de mérite sont données pour une évolution du seuil q_{rap} de $\pm 30\%$ autour du seuil optimal.

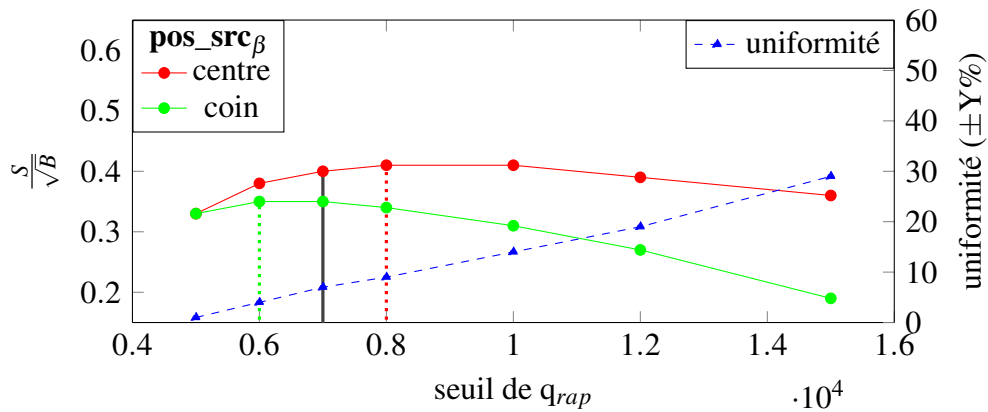
Les trois guides montrent des performances de discrimination comparables ($\frac{S}{\sqrt{B}} \sim 0,4$ et uniformité inférieure à $\pm 20\%$). Par contre, le guide de lumière de 4 cm a la meilleure uniformité mais son amplitude du signal est le moindre, obligeant à utiliser un préamplificateur de gain plus élevé (100 contre 10 pour les deux autres).

8.3.1.2 Effet Cerenkov

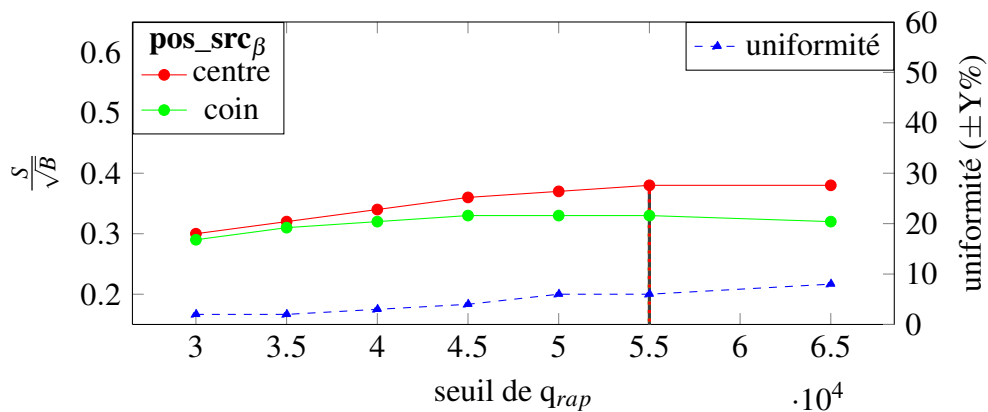
Afin de vérifier si la lumière Cerenkov créée dans le guide de PMMA augmente le taux de détection, des mesures ont été effectuées avec les deux guides de lumière en PMMA et le



(a) Guide en PMMA d'1 cm



(b) Guide en PMMA de 2 cm



(c) Guide creux de 4 cm

Figure 8.9 Facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ pour deux positions de source bêta (pos_src_{β}) : au centre et au coin et uniformité de réponse en fonction du seuil expérimental pour le Phoswich V2 avec des guides différents : (a). 1 cm, (b). 2 cm et (c). 4 cm. B est le taux de gamma détecté correspondant à un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ lorsque la source de ^{137}Cs est derrière le contaminamètre. Les seuils optimisés sont présentés en lignes verticales : vertes avec la source positionnée dans le coin, rouges au centre, et noires un compromis des deux positions.

Tableau 8.1 Comparaison des caractéristiques des trois guides de lumière : facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$, uniformité, amplitude du signal par rapport au guide en PMMA de 1 cm et poids. Les incertitudes sur résultats sont obtenues en faisant varier le seuil q_{rap} de $\pm 30\%$. *Le poids du guide creux dépend de sa méthode de fabrication

Guide	$\frac{S_{centre}}{\sqrt{B}}$	$\frac{S_{coin}}{\sqrt{B}}$	Uniformité [%]	Amplitude du signal	Poids [g]
PMMA, 1 cm	$0,45 \pm 0,03$	$0,36 \pm 0,02$	12 ± 6	1	150
PMMA, 2 cm	$0,40 \pm 0,01$	$\pm 0,35 \pm 0,02$	9 ± 4	0,7	250
Creux, 4 cm	$0,38 \pm 0,02$	$\pm(0,33 \pm 0,01)$	5 ± 2	0,4	400*

guide creux. Pour ce faire, seuls les guides (sans scintillateurs) sont montés au PMT et les mesures suivantes ont été réalisées.

- (a) Mesure du bruit environnemental pendant 1 h.
- (b) Mesure avec la source gamma de ^{60}Co pendant 1 h.

Pour cette étude, la source de ^{60}Co a été rapprochée du détecteur pour créer un débit de dose important. La source placée à ~ 1 cm du guide, ne donne donc pas un débit de dose uniforme sur la surface de détecteur. Le débit de dose mesuré au niveau du guide se situe entre 10 et 40 $\mu\text{Sv/h}$ (suivant la position du radiamètre Radiagem 2000 [75]).

Une comparaison de distributions du ratio de charges (q_{lent}/q_{rap} vs q_{rap}) sans source et avec la source de ^{60}Co lorsque le guide en PMMA de 2 cm est présentée sur la Figure 8.10. La sélection en charges (polygone noir) ainsi que le seuil sur q_{rap} (7 000) sont présentés. La différence entre les deux distributions est essentiellement à basse énergie (basses charges q_{rap}). La contribution de l'effet Cerenkov en une grande partie éliminée par l'application du seuil sur q_{rap} . Dans la zone du signal (zone en vert), le taux détecté augmente de 0,8 c/s en présence de source. En extrapolant ce taux à 100 $\mu\text{Sv/h}$, le nombre de coups dû à l'effet Cerenkov est < 10 c/s, ce qui est faible en comparaison du taux de détection du bruit de fond B, de l'ordre de 1000 c/s (ce qui va détaillé au paragraphe 8.3.2.2).

Le guide creux a été monté au PMT également pour les mesures du bruit environnemental et avec la source ^{60}Co . Il y a également une augmentation du taux de comptage total en présence de la source, inférieur à 10 c/s pour un débit de dose extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$.

L'effet Cerenkov dû à l'interaction des photons avec le guide de lumière et les interactions avec la fenêtre d'entrée du PMT sont donc négligeables une fois le seuil q_{rap} optimisé appliqué. Cet effet est donc négligeable, un guide en PMMA pourra donc être utilisé.

8.3.1.3 Conclusion

Les trois guides sont utilisables pour notre application en terme d'uniformité et de séparation du bruit et du signal. Le choix final dépendrait du cahier des charges qui précise la priorité des caractéristiques : poids, uniformité et séparation du signal et du bruit. Le guide de lumière de 2 cm correspond pour tous les paramètres, à des valeurs moyennes de l'ensemble des mesures.

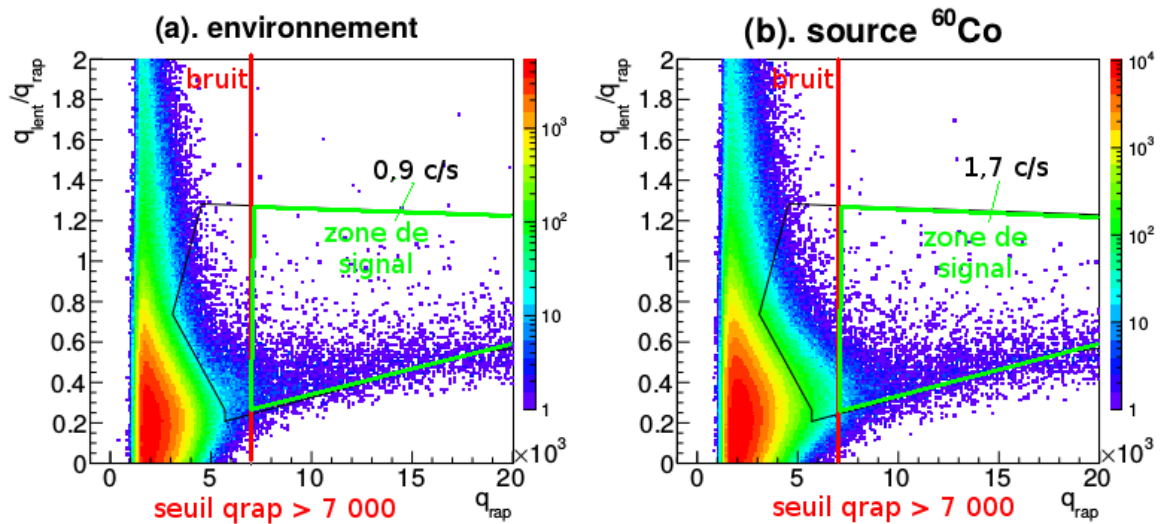


Figure 8.10 Comparaison de la distribution du ratio de charges $q_{\text{lent}}/q_{\text{rap}}$ en fonction du q_{rap} pour un guide en PMMA de 2 cm : avec le bruit environnemental (a) et avec la source gamma du ^{60}Co (b) qui crée un bruit de fond de 10 - 40 $\mu\text{Sv/h}$ sur la surface du guide de lumière. Le temps d'acquisition est 1 h pour les deux mesures. La zone entourée en vert est la zone d'intérêt après la coupure graphique et l'application du seuil.

Le facteur de mérite optimal varie beaucoup pour un guide de 1 cm en fonction de la position de source bêta à cause du guidage de la lumière. Le guide creux a une faible amplitude du signal qui nécessite un gain du préamplificateur plus élevé, conduisant à compliquer son design et également le coût. **Pour la suite de nos mesures, le guide de 2 cm est utilisé, qui est un compromis entre l'uniformité, l'amplitude du signal, et la discrimination bêta/gamma.**

8.3.2 Performance du Phoswich V2 avec un guide de 2 cm

Ce paragraphe est destiné à quantifier l'efficacité bêta et la réponse aux gamma du ^{137}Cs de la configuration Phoswich V2 avec un guide en PMMA de 2 cm.

8.3.2.1 Détection bêta

Après avoir appliqué la sélection en charges et le seuil optimisé (7 000 canaux comme présenté en Figure 8.9 (b)), l'efficacité bêta sera calculée à partir du taux d'événements dans les sélections et de l'activité de source.

Tableau 8.2 Calcul de l'efficacité bêta ε et du taux de détection (S) du bêta de ^{60}Co pour une contamination de 0,4 Bq/cm^2 avec les données expérimentales lorsque la source bêta est positionnée au centre du Phoswich V2

ϕ_{β} [1/s]	$\phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}$ [1/s]	S [1/s]	ε
7384	1,5	11	19%

Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.2. Le bruit environnemental est négligeable. L'efficacité de détection bêta est de $\varepsilon = 19\%$, ce qui donne un taux de détection bêta pour une

contamination surfacique de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ de 11 coups par secondes. Cette valeur correspond à 55% de la valeur obtenue en simulation ($\sim 20 \text{ e-/s}$ cf. 7.2). La raison qui explique la différence entre les mesures et la simulation est le rendement de la source bêta de ^{60}Co du LPC, qui est plus faible à cause de la feuille de titane : $\varepsilon_s = 30\%$ (valeur déduite en simulation) et son spectre en énergie dégradée comme présentée précédemment (paragraphe 8.1.1). Alors que la source de contamination en simulation a un rendement de source $\varepsilon_s = 50\%$. En supposant que le rendement de l'instrument ne varie pas avec le spectre en énergie dégradé [38], nous pouvons extrapoler les résultats expérimentaux à une source de rendement $\varepsilon_s = 50\%$. Dans ces conditions, le contaminamètre serait capable de détecter 18 e-/s lorsqu'il est soumis à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$.

L'efficacité de détection bêta sera validée avec une source bêta de référence pendant les mesures au CNPE de Chinon (paragraphe 9.2.1).

8.3.2.2 Détection gamma

La source gamma de ^{137}Cs est placée soit devant soit derrière le prototype pour étudier la sensibilité du détecteur au bruit gamma venant de différentes directions.

Les distributions du ratio des charges brutes sont présentées dans la Figure 8.11 lorsque la source est placée devant et derrière le détecteur. La zone d'intérêt est dans le polygone en vert.

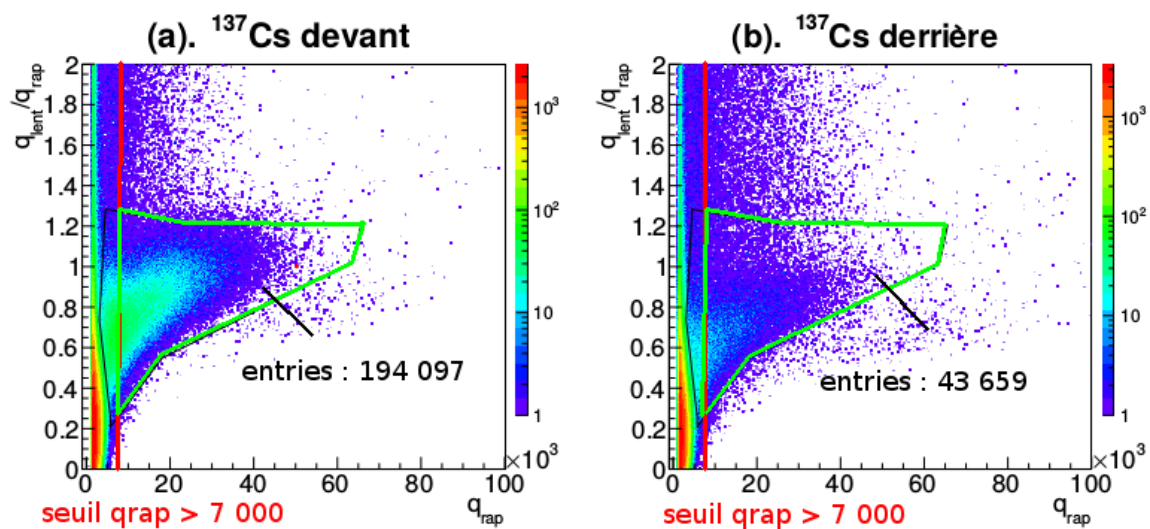


Figure 8.11 Distribution du ratio $q_{\text{lent}}/q_{\text{rap}}$ en fonction de charges rapide q_{rap} pour une source gamma du ^{137}Cs . Les deux mesures durent 1 h. (a) La source est devant le détecteur à 40 cm de distance. (b) La source est derrière le détecteur à 50 cm de distance des scintillateurs.

Les gamma ont une contribution différente lorsque la source change de position par rapport au détecteur. Le nombre d'événements dans la sélection ("entries" = coups_γ) est utilisé pour calculer le taux de détection gamma "B" extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$ selon la formule 8.3. Les paramètres et les résultats sont présentés dans le Tableau 8.3. En intégrant les événements sur 1 h, l'incertitude sur le taux de détection par seconde est négligeable (inférieur à 1%).

Tableau 8.3 Calcul du taux de détection gamma (B) extrapolé à un bruit de fond de 100 $\mu\text{Sv/h}$ produit par une source gamma du ^{137}Cs positionnée devant et derrière le Phoswich V2. La configuration du Phoswich a un scintillateur rapide de 75 μm et un scintillateur lent de 1 mm assemblés par une épaisseur de polymère de 200 μm

Position	coups_γ	$t_{ACQ}[s]$	$\phi_\gamma[1/s]$	$\phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}[1/s]$	DeD [$\mu\text{Sv/h}$]	B [1/s]
Devant	194097	3600	53,9	0,8	2,5	2100
Derrière	43659	3600	12,1	0,8	1,6	700

En comparant les taux de détection gamma extrapolés à un débit de dose de 100 $\mu\text{Sv/h}$, le détecteur détecte ~ 3 fois plus de gamma quand la source est devant (2100 γ/s) que quand elle est derrière (700 γ/s) le détecteur. Ce facteur n'est pas observé en simulation quand la source gamma réaliste est appliquée (cf. paragraphe 6.2.2.1). Une simulation de cette configuration réaliste avec une source gamma de 0,662 MeV a été effectuée, qui montre que 1200 γ/s sont détectés si elle est derrière et 800 γ/s détectés si elle est devant. L'incohérence de la sensibilité aux gamma en fonction de la position de la source pourraient être les suivantes :

1. Pour la source placée devant, les gamma qui ne sont pas émis dans l'angle solide formé par la source gamma et le prototype peuvent augmenter le taux de gamma détecté. Par exemple, ils peuvent interagir avec la matière environnante (air, boîtier, supports ...) en créant des électrons secondaires et des gamma diffusés. Cette hypothèse sera vérifiée par simulation au paragraphe 8.3.2.3.
2. Pour la source derrière, les gamma traversent le boîtier du prototype, constitué d'aluminium qui n'avait pas été pris en compte en simulation. Or, 5 mm d'aluminium peut atténuer de 10% le taux de gamma de 0,6 MeV incidents (coefficient d'atténuation massique dans l'aluminium $\mu = 0,078 \text{ cm}^2/\text{g}$ pour les gamma de 0,6 MeV [15]).

8.3.2.3 Problématique de la matière environnante

Le taux de détection gamma élevé pour une source placée devant le prototype est probablement dû à l'interaction des photons avec la matière environnante. Pour étudier cet effet, une simulation proche de la réalité a été effectuée. La matière environnante : le boîtier du prototype en aluminium, le cadre en aluminium entourant le PM et le guide, l'embase du PM (simulé comme 3 cm de plastique), le sol en béton [80] ont été pris en compte comme présenté en Figure 8.12 (a).

Les gamma sont envoyés dans un angle solide ($0,14 \pi \text{ sr}$) 5 fois plus importante que celui du détecteur, comme présentée Figure 8.12 (b). Cela permet de prendre en compte les gamma qui sont diffusés vers le prototype ainsi que les électrons secondaires issus de ces gamma.

Deux positions de source gamma de ^{137}Cs à 50 cm des scintillateurs ont été simulées : source devant et source derrière.

Le taux de gamma détecté B extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$ avec la source devant est de 2000/s, ce qui est comparable au résultat obtenu en expérience (2100/s cf. Tableau 8.3), et confirme que les mesures effectuées avec une source devant le détecteur sont influencées par la pro-

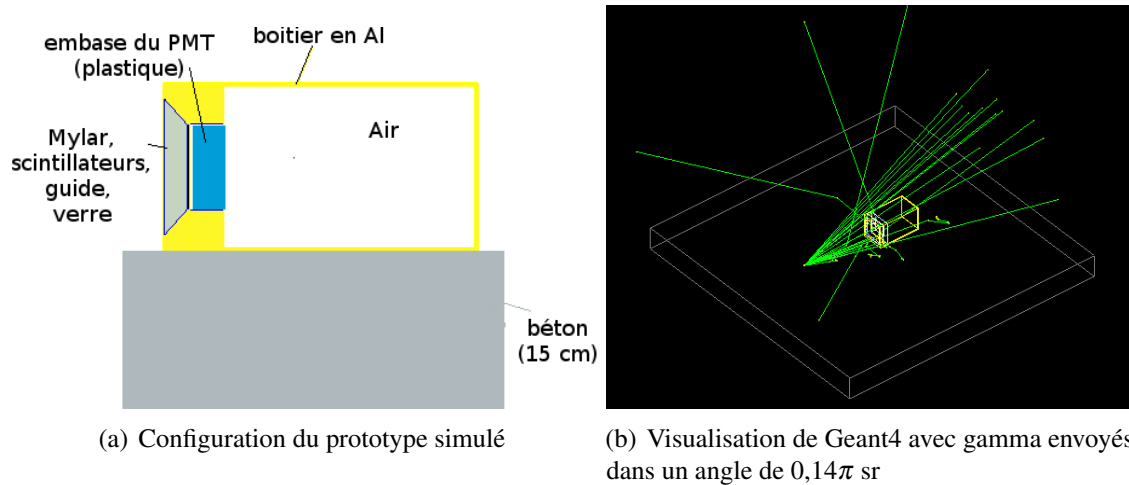


Figure 8.12 Présentation de la simulation du prototype proche de la réalité.

blématique de matière environnante. Pour la source derrière, la simulation donne un taux de 1500/s alors qu'en mesures, il n'y a que 700/s détectés. Cela pourrait s'expliquer par le support du PM en aluminium, le préamplificateur qui n'ont pas été pris en compte et peuvent encore d'avantage atténuer les gamma. L'écart peut également due à l'erreur expérimentale. L'autre incertitude peut être liée à une distance de 30 à 50 cm, à un biais du positionnement de la source du ^{137}Cs engendrant une exposition non uniforme ou partielle sur la surface de scintillateurs, cela pourraient diminuer le taux de comptage expérimental. Il y a donc l'intérêt à effectuer des mesures avec la source gamma à une distance source-détecteur plus importante afin de diminuer l'erreur dû au dispositif expérimental.

8.3.2.4 Discrimination bêta/gamma

A partir des mesures avec les sources, nous pouvons évaluer la performance de discrimination bêta/gamma en calculant le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ (S du Tableau 8.2 et B du Tableau 8.3).

Le meilleur rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ est donc de $0,40 \pm 0,01$ (incertitude causée par la variation du seuil) (cf. Tableau 8.1), obtenu lorsque la source est derrière le contaminamètre. Cette configuration correspond à un seuil de décision pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de 3 ou $9 \mu\text{Sv/h}$ suivant que la source est devant ou derrière le prototype. La différence de performance par rapport à la simulation ($25 \mu\text{Sv/h}$) provient principalement du facteur 1,8 sur l'efficacité bêta (20 e-/s en simulation) dû à la source du LPC, qui dégrade le spectre en énergie et diminue le rendement de source. Une mesure devra donc être réalisée sur site avec une source bêta de calibration.

L'autre limitation de ces mesures est qu'à 40 - 50 cm, le débit de dose créé par la source de ^{137}Cs est de $\sim 2 \mu\text{Sv/h}$, ce qui ne correspond pas aux recommandations de la norme ISO 60325 ($\text{DeD} \geq 10 \mu\text{Sv/h}$) ne permet pas de négliger le bruit environnemental ($1,5/\text{s}$) surtout quand la source est derrière le prototype (taux total $12,1/\text{s}$). En plus, à cette distance, il est difficile de garantir une exposition complète ou uniforme du détecteur avec cette source

collimatée. Pour diminuer les incertitudes introduites par la mesure du bruit environnemental, des mesures avec des sources gamma de plus haute activité sont nécessaires pour créer un débit de dose beaucoup plus élevé que celui de l'environnement.

8.4 Conclusion

Les performances en terme de discrimination bêta/gamma des prototypes des Phoswich V1 et V2 ont été évaluées à l'aide de sources au laboratoire.

Trois guides de lumière ont été testés (deux en PMMA et un en air). En terme de performance de discrimination (facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$), uniformité et amplitude du signal et effet Cerenkov. Les résultats ne montrent pas de différences importantes entre ces guides. Le guide de 1 cm offre la meilleure performance en terme de guidage de lumière mais une moindre uniformité alors que le guide creux de 4 cm est peu performant en terme de guidage de lumière et nécessite une électronique avec un gain élevé. Pour la suite de nos études, le guide en PMMA de 2 cm va être utilisé, qui est un bon compromis entre l'uniformité et l'amplitude du signal.

La source gamma de ^{137}Cs disponible au laboratoire a permis de tester les prototypes, dans un débit de dose uniforme de 1 à 2 $\mu\text{Sv/h}$, avec la source placée devant et derrière les prototypes. Seules les performances du Phoswich V2 ont été détaillées, le Phoswich V1 donnant des performances comparables. Un taux de comptage de 2100 c/s a été obtenu pour un débit de dose gamma extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$ lorsque la source est devant le prototype. L'influence des interactions des gamma sur la matière environnante et dans l'air est importante dans ce cas. Avec la source gamma derrière, un taux de gamma de 700 γ/s est détectés, qui est inférieur à celui de la simulation en raison de l'effet du blindage du mécanique et l'erreur expérimentale (eg : positionnement de source gamma).

Le taux de détection bêta obtenu avec la source bêta est de 11 e-/s pour une activité surfacique de 0,4 Bq/cm² sur toute la surface de contaminamètre, à comparer à 20 e-/s en simulation (Mylar et Al pris en compte). Le faible rendement source (30%) de la source bêta de ^{60}Co disponible au laboratoire explique ces valeurs faibles. Si les rendements sources bêta sont normalisés à ceux des sources étalons qui ont été retenus en simulation, $\varepsilon_{sc} = 50\%$, les performances des prototypes testés correspondraient à un seuil de décision de 0,4 Bq/cm² de contamination bêta dans un bruit de fond gamma de 8 à 25 $\mu\text{Sv/h}$. Ces performances confortent les résultats obtenus en simulation (0,4 Bq/cm² dans 25 $\mu\text{Sv/h}$) mais, elles devront être validées avec des sources de calibration.

Les mêmes mesures ont été effectuées avec le Phoswich V1. Il montre des performances comparables à celles du Phoswich V2 : même sensibilité aux bêta de ^{60}Co et aux gamma de ^{137}Cs . Les deux prototypes de Phoswich seront testés au CNPE de Chinon. Des sources bêta de référence et gamma d'activité plus importante sont accessibles pour déterminer les performances du contaminamètre ainsi que des zones réalistes autour de réacteur.

Chapitre 9

Campagnes de mesure au CNPE de Chinon

Les deux versions de Phoswich ont été testées pour comparer les deux configurations. Les études menées sur les Phoswich au laboratoire, ont montré la nécessité d'utiliser une source bêta de référence ainsi que des sources gamma de plus haute activité.

Les tests ont été réalisés au CNPE de Chinon avec des sources dans le local source et dans des locaux des BAN¹ dans un bruit de fond réaliste. Ces mesures permettent de :

1. Valider l'efficacité bêta par des mesures avec une source bêta de calibration ;
2. Valider l'efficacité bêta par des mesures avec un frottis (émetteur bêta) ;
3. Étudier la réponse des prototypes à des énergies différentes avec du ¹³⁷Cs (662 keV) et du ⁶⁰Co (deux raies gamma de 1,17 et 1,33 MeV) ;
4. Étudier la linéarité de réponse en fonction du débit de dose (allant de 6 μ Sv/h à 80 μ Sv/h) créé par les sources gamma de haute activité ;
5. Tester la réponse des prototypes à un bruit de fond réaliste en zone contrôlée ;
6. Étudier la réponse, en zone, du contaminamètre à une présence de contamination dans un bruit de fond gamma élevé.

Cette partie présente les mesures effectuées pendant deux campagnes d'une semaine en novembre 2017 et en juin 2018 au CNPE de Chinon. La première campagne de mesures a permis de tester les Phoswich V1 et V2, la deuxième de tester deux versions de Phoswich V2.

Dans un premier temps, les dispositifs expérimentaux seront présentés. Dans un second temps, les mesures avec la source bêta de référence et le frottis seront détaillées. Ensuite, les mesures avec les sources gamma de ¹³⁷Cs et ⁶⁰Co seront présentées. Puis, les mesures des deux prototypes, en zone contrôlée, dans un bruit de fond réaliste, seront discutées. Ces études permettront de faire une comparaison des performances des Phoswich V1 et V2 et d'orienter le choix de la configuration des prototypes.

1. Bâtiment des Auxiliaires Nucléaires

9.1 Dispositifs expérimentaux

Les configurations des prototypes seront d'abord détaillées. Les radiamètres utilisés lors des tests pour mesurer le débit de dose gamma seront ensuite présentés. Enfin, les caractéristiques des sources bêta et gamma utilisées seront décrites.

9.1.1 Prototypes du Phoswich V1 et V2

Les configurations des Phoswich testés sont présentés dans le Tableau 9.1.

Tableau 9.1 Configurations des prototypes testés pour les essais au CNPE de Chinon. Les épaisseurs des scintillateurs données par le fournisseur sont présentés. Le préamplificateur (PA) développé au LPC est utilisé

Numéro	Prototypes	Épaisseur				Gain du PA	Essai
		Rapide	Colle	Lent	Guide		
1	Phoswich V1	75 μm	0	0,5 mm	2 cm	25	1 ^{er}
2	Phoswich V2	75 μm	200 μm	1 mm	2 cm	25	1 ^{er} , 2 ^{ème}
3	Phoswich V2	75 μm	200 μm	5 mm	2 cm	25	2 ^{ème}

Par rapport aux mesures au LPC, seul le préamplificateur a été modifié. Un préamplificateur de gain 25 a été développé a été utilisé à la place du module 776 (cf. 7.4).

Afin de s'adapter aux conditions sur site, notamment pour diminuer les risques de contamination, les prototypes et leurs alimentations ont été emballés dans du Vinyle avant d'entrer en zone. Un boîtier contenant des filtres a été fabriqué pour protéger le système d'acquisition FASTER, qui est ventilé.

9.1.2 Radiamètres utilisés

Pour la mesure du débit de dose produit par les sources gamma et dans le BAN, deux radiamètres ont été utilisés comme présenté sur la Figure 9.1. Les conditions d'utilisation sont présentées sur le Tableau 9.2.

- Le Radiagem 2000 de Mirion [75] a été utilisé pour la mesure du bruit de fond en zone lors de la première campagne d'essais dans le BAN car il était disponible au SPR¹ du BAN. Cela éviterait de faire entrer du matériel en zone, qui pourrait être contaminé. Il a une sensibilité de 0,83 c/s par $\mu\text{Sv/h}$, ce qui permet d'obtenir une précision de $\pm 15\%$ sur le débit de dose.
- Le Thermo Fisher FH 40G-L, d'APVL [81] compte 2,0 c/s par $\mu\text{Sv/h}$, valeur 2,4 fois plus élevée que celle du Radiagem 2000. Il a donc une meilleure précision de $\pm 10\%$ (valeur déduite à partir des sensibilités des deux radiamètres). Lors de la première campagne d'essais, le FH 40G-L a été utilisé pour la mesure du débit de dose produit par les sources gamma afin d'enregistrer le DeD_{max} . Afin d'avoir une mesure du bruit

1. Service Prévention des Risques

de fond en temps réel, le logiciel FH40G.exe a été installé pour enregistrer le débit de dose toutes les 5 secondes lors de la deuxième campagne d'essais.



(a) FH 40G-L, APVL [81] (b) Radiagem 2000, Mirion [75]

Figure 9.1 Radiamètres utilisés pour la mesure du débit de dose auquel les prototypes sont soumis au CNPE de Chinon.

Tableau 9.2 Les situations d'utilisation de radiamètres et les valeurs du débit de dose utilisés. DeD_{max} : débit de dose maximale pendant une mesure ; \overline{DeD} : débit de dose moyen pendant une mesure

	Local de mesures	Radiamètre	DeD mesuré	Position du radiamètre
1 ^{er} essai	Local sources	FH-40G-L	DeD_{max}	entre les deux prototypes
	Locaux du BAN	Radiagem	\overline{DeD}	entre les deux prototypes
2 ^{ème} essai	Local sources	FH-40G-L	\overline{DeD}	sur un prototype
	Locaux du BAN	FH-40G-L	\overline{DeD}	sur un prototype

Pour la première campagne d'essais, les mesures de deux prototypes ont été effectuées en même temps et le radiamètre a été placé entre les deux prototypes, avec la zone sensible du radiamètre à la même distance de la source que les scintillateurs. Les incertitudes sur la mesure du débit de dose sont importantes dans ces conditions (probablement 20%) surtout lorsque la source est proche (< 1 m) du prototype car le débit de dose varie en $(1/R)^2$. En plus de cela, le débit de dose maximal utilisé lors de cette campagne surestime (de 10% à 20%) le débit de dose moyen.

Ce point a été amélioré pendant la deuxième campagne d'essais en plaçant le radiamètre au dessus du centre d'un prototype et en ne testant qu'un prototype à la fois. En plus de cela, la deuxième campagne d'essais a permis de mesurer la valeur du débit de dose moyenné sur une mesure.

9.1.3 Sources bêta utilisées

Pour cet essai, deux types de sources bêta ont été utilisés : une source de référence de ^{60}Co et un frottis réalisé en zone contrôlée qui contient les radioéléments rencontrés en situation réaliste.

9.1.3.1 Source bêta du ^{60}Co

La source de référence CO60ESAL20 [82] est une source étalon Catégorie 1 du Bureau National de Métrologie (BNM) selon la norme ISO 8769 [83]. Elle est la source de référence pour le contrôle des contaminamètres surfacique.

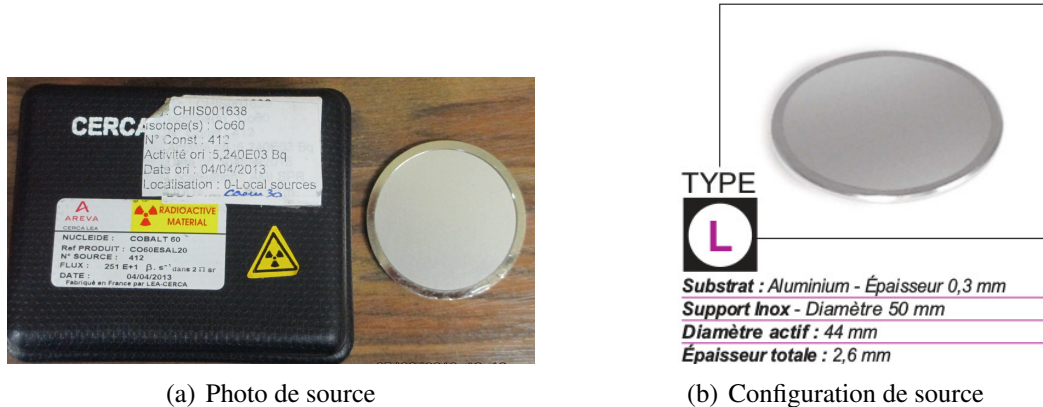


Figure 9.2 Source bêta de ^{60}Co utilisée pour les mesures au CNPE de Chinon.

Le ^{60}Co est électro-déposé directement sur le support en aluminium, permettant à presque tous les électrons bêta de sortir du dépôt. Cette source est étalonnée en flux émergent de particules bêta dans un angle solide de 2π à $\pm 6\%$, exprimé en β/s . La surface active de cette source a un diamètre de 44 mm, avec une surface active de 15 cm^2 , qui est 7,5 fois plus importante que celle de la source bêta au LPC (2 cm^2).

Deux sources de ce type ont été utilisées, une pour la mesure au local source, l'autre, dans le BAN. La source utilisée dans le local sources avait une activité de $A = 5,24 \times 10^3 \text{ Bq}$, avec une émission de particule bêta de $q_{2\pi,sc} = 2,51 \times 10^3 \beta/s$, selon les données du fournisseur. Elle correspondait à un rendement de source $\varepsilon_s = q_{2\pi,sc}/A = 48\%$ (cf. formule 3.11) et son activité était de $2,8 \times 10^3 \text{ Bq}$ le jour de la mesure.

La source utilisée dans le BAN avait une activité de $1,9 \times 10^3 \text{ Bq}$ le jour de la mesure. En normalisant l'activité à la surface du contaminamètre (144 cm^2), cela correspond à une activité surfacique de 13 Bq/cm^2 .

9.1.3.2 Frottis dans le BAN

Dans le BAN, un frottis (émetteur bêta) a été réalisé dans une zone contaminée. Son activité, de 40 Bq, a été quantifiée par le passeur de frottis Mirion NT200 [84]. Cette source correspond donc à une activité surfacique de contamination de $40 \text{ Bq}/144 \text{ cm}^2 = 0,28 \text{ Bq/cm}^2$ quand l'activité est normalisée à la surface du contaminamètre.

9.1.4 Sources gamma utilisées

La source de ^{60}Co correspond à la principale source de bruit de fond (cf. paragraphe 2.2.2). La source de ^{137}Cs , avec $E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$, est une source gamma qui est à moyenne

énergie en radioprotection. Son utilisation est recommandée par les normes car elle moyenne les énergies des gamma du ^{60}Co et du ^{58}Co ainsi que leurs diffusés. Les deux sources avec des activités élevées, collimatées par du Pb, sont choisies pour les mesures :

- Source gamma de ^{137}Cs , de référence CS137SGD01 fournie par CERCA, avec une activité de $A = 3,6 \cdot 10^8$ Bq le jour de la mesure.
- Source gamma de ^{60}Co de référence SSC-10 de Berthold, avec une activité $A = 1,7 \cdot 10^8$ Bq le jour de la mesure.

Tableau 9.3 Débit de dose (DeD) produit par les deux sources gamma : ^{137}Cs et ^{60}Co lorsqu'elles sont placées à différentes distances du point de mesures. La fluctuation du débit de dose est due aux mesures à différents endroits de mesures (± 30 cm)

Source	distance source-contaminamètre [m]	DeD mesuré [$\mu\text{Sv/h}$]
^{137}Cs	0,64	$51,0 \pm 10$
	1	$19,1 \pm 0,6$
	1,5	$12,1 \pm 0,9$
	2	$6,4 \pm 0,6$
^{60}Co	1	48,0
	2	$11,4 \pm 3,1$

L'activité des sources gamma utilisées a permis d'obtenir des débits de dose de l'ordre de 5 à 50 $\mu\text{Sv/h}$ sur la surface des contaminamètres.

9.2 Mesures avec les sources bêta dans un bruit de fond naturel

Une mesure du taux de comptage dans un bruit de fond environnemental a été réalisé dans le local, sans source bêta, qui donne un taux de comptage de 3 c/s.

Des mesures avec les sources bêta de référence ont été réalisées dans un débit de dose "naturel" dans le local sources pour estimer l'efficacité bêta de nos prototypes et leur uniformité de réponse. A cette fin, des mesures avec la source bêta placée à deux positions différentes de la fenêtre d'entrée de chaque prototype (centre et coin) ont été réalisées.

L'efficacité de détection bêta a d'abord été validée par des mesures avec la source bêta étalon. Dans un deuxième temps, un frottis contenant une contamination "réaliste" a été utilisé pour comparer l'efficacité bêta obtenue avec ce frottis avec celle obtenue avec la source d'étalon.

9.2.1 Sources bêta de référence

La Figure 9.3 présente les distributions des charges et du ratio des charges pour les deux prototypes exposés à la source bêta de référence. Compte tenu de la différence des deux

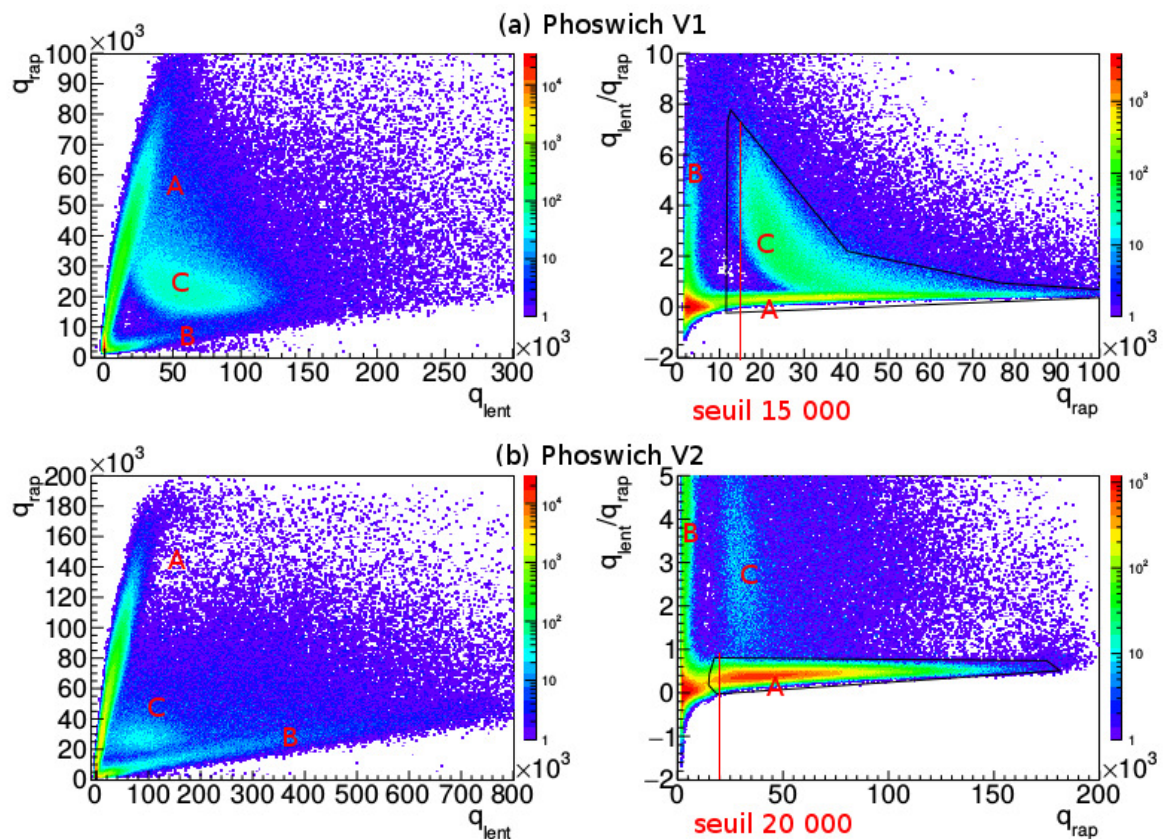


Figure 9.3 Distributions brutes des charges (q_{rap} vs q_{lent}) à droite et du ratio (q_{lent}/q_{rap} vs q_{rap}) à gauche avec la source bêta de ^{60}Co placée au centre de la surface du contaminamètre pour les deux prototypes : (a) Phoswich V1, (b) Phoswich V2.

prototypes de Phoswich (avec la zone morte ou pas), les distributions bêta et l'analyse à appliquer sont différentes pour chacun des deux.

La différence entre les deux prototypes se trouve dans la zone C qui correspond aux particules ayant touché les deux étages de détection. Pour le Phoswich V1 (a), la contribution de C est plus importante que celle du Phoswich V2 (b) car la version V2 dispose d'une zone morte qui arrête les électrons et peu de bêta atteignent le deuxième étage (lent).

Pour le Phoswich V1, l'analyse TS2 est appliquée pour récupérer les bêta qui interagissent au moins dans le scintillateur rapide : zones A et C. La sélection en charges et le seuil en charges rapides à appliquer sont présentés sur la distribution.

Pour le Phoswich V2, les événements dans la zone A, correspondant aux électrons qui ne déposent de l'énergie que dans le scintillateur rapide et pas dans le lent, sont pris comme signal utile pour l'analyse TS3. Parmi ceux qui ont interagissent dans le premier étage (rapide) en créant des charges supérieures au seuil de 20 000 canaux, il y a $\sim 5\%$ d'événements qui interagissent également dans le deuxième (lent) (zone C du (b)). Cela est dû aux électrons de haute énergie (ceux qui ont un parcours supérieur à $275 \mu\text{m}$ de plastique + $3 \mu\text{m}$ de Mylar + 600 nm d'Al + quelques mm d'air) et qui ne s'arrêtent pas dans le polymère constituant la zone morte.

Le Tableau 9.4 présente l'efficacité et le taux de détection bêta extrapolé à une activité surfacique de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ déposée sur la surface des prototypes ($A = 0,4 \text{ Bq/cm}^2 \times 144 \text{ cm}^2 =$

57,6 Bq émis dans 4π). Les efficacités des deux prototypes ont été calculées à partir du taux de comptage net dû à la source bêta.

Tableau 9.4 Efficacités de détection (ϵ_{max} avec la source au centre et ϵ_{min} au coin), taux de détection bêta (S) extrapolé à une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ sur la surface de prototypes Phoswich V1 et V2. L'uniformité de réponse calculé à partir de ϵ_{max} et ϵ_{min} est également présentée. L'analyse TS2 est appliquée au Phoswich V1 et TS3 au Phoswich V2 comme présenté en Figure 9.3

Prototype	Centre		Coin		Uniformité
	ϵ_{max}	S_{max} [1/s]	ϵ_{min}	S_{min} [1/s]	
Phoswich V1	29,3%	16,9	26,4%	15,2	$\pm 5\%$
Phoswich V2	29,9%	17,2	25,3%	14,6	$\pm 8\%$

Comme attendu, les deux prototypes donnent des efficacités bêta comparables. Expérimentalement, le taux de détection bêta soumis à une activité bêta surfacique de $A_s = 0,4 \text{ Bq/cm}^2$ sur toute la surface de contaminamètre est de 15 - 17 e-/s pour les deux prototypes en fonction de positions de source. En comparant avec la prédiction des simulation qui donne 20 e-/s, les 3 -/s perdus seraient dû à la distance entre la source et les scintillateurs de 8 - 10 mm, qui est plus importante que les 4 mm, recommandés par la norme ISO 60235 et simulés.

En comparant l'efficacité de détection bêta obtenue avec la source bêta étalon et celle obtenue avec la source bêta du LPC (cf. paragraphe 8.3.2.1), l'efficacité totale augmente d'un facteur 1,5 (19% à 29%) avec la source positionnée au centre. Supposant que le rendement de l'instrument ϵ_i reste stable pour les deux sources bêta, la différence de l'efficacité dépend de la variation du rendement de source ϵ_s . Cette source de référence, avec un ϵ_s de 48%, est 1,6 fois plus élevé que celui de la source bêta au LPC. Ce facteur est donc comparable avec le facteur d'amélioration de l'efficacité de détection bêta.

En comparant le taux de détection bêta au centre et dans le coin, l'uniformité vaut $\pm 5\%$ pour le Phoswich V1 et $\pm 8\%$ pour le Phoswich V2. (cf. Tableau 8.1 : pour le guide de 2 cm : $\pm(9 \pm 4)\%$). La mesure avec la source bêta de référence confirme donc la bonne uniformité de réponse surfacique obtenue avec la source bêta du LPC.

9.2.2 Frottis

L'objectif de la mesure avec le frottis est d'étudier l'efficacité de détection bêta ϵ des deux contaminamètres soumis à une contamination réaliste et à une activité surfacique plus près de l'exigence du cahier des charges : $0,28 \text{ Bq/cm}^2$. La mesure du frottis a été réalisée en zone dans un couloir du BAN où le débit de dose ambiant, mesuré par le Radiagem [75], est d'environ $0,2 \mu\text{Sv/h}$.

Pour une mesure du bruit de fond de 15 min, 2 min de mesure avec le frottis placé à ~ 1 cm devant le centre de la fenêtre d'entrée ont été réalisées : 2 fois durant $\Delta t = 30$ s et 1 fois durant $\Delta t = 60$ s.

Cette mesure contient des variations du flux bêta, il est donc intéressant d'afficher le taux de comptage des prototypes en fonction du temps. La Figure 9.4 présente le taux de comptage intégré sur 4 secondes en fonction du temps de mesure pour les deux prototypes. Pour chaque passage du frottis, l'augmentation du taux de comptage est visible. Le taux de comptage du bruit de fond ("BdF") et du bruit de fond avec le frottis ("Frottis + BdF") sont donc obtenus, la différence des deux donne le taux de comptage net, qui a permis de calculer l'efficacité bêta ϵ . Le Tableau 9.5 donne l'efficacité bêta (ϵ) calculée à partir du taux de comptage net et

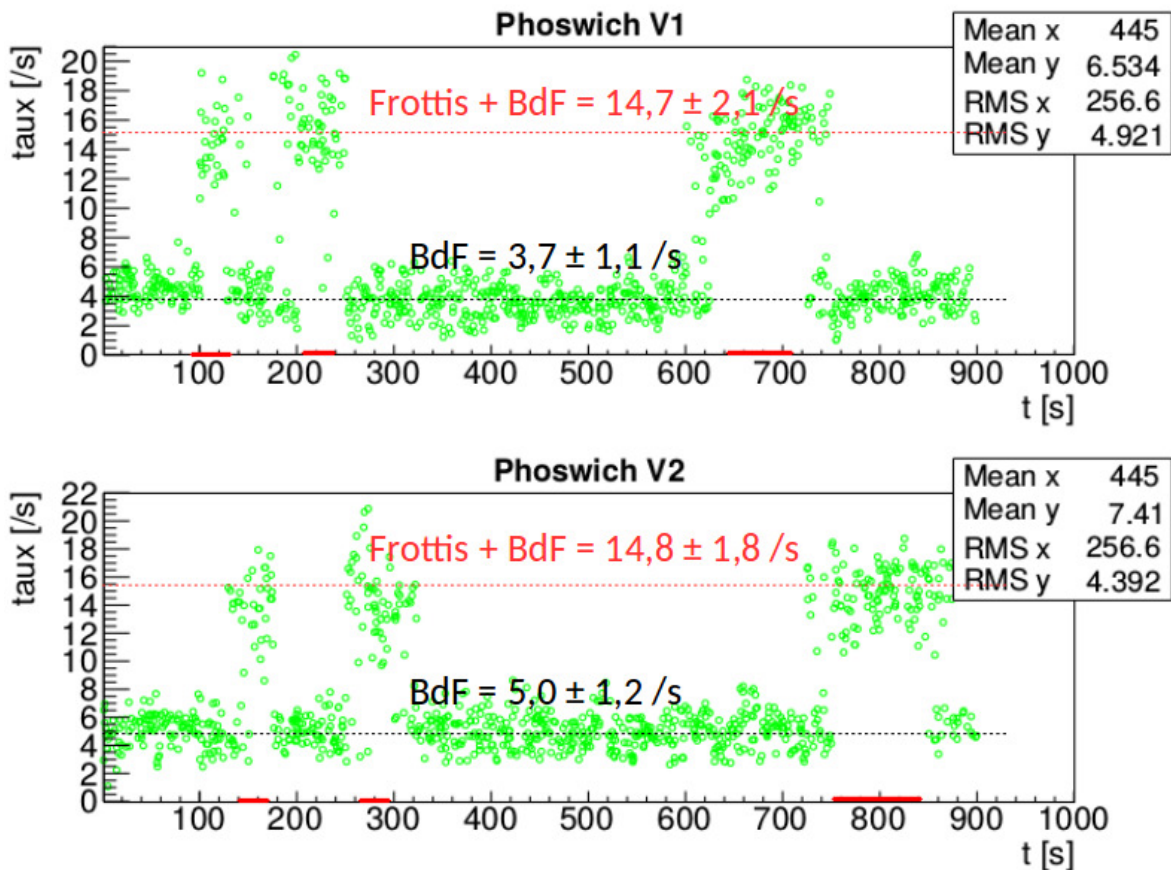


Figure 9.4 Le taux de comptage total mesuré par les deux prototypes : Phoswich V1 et Phoswich V2 pour un frottis de $0,28 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond de $\sim 0,2 \mu\text{Sv/h}$. Le taux, affiché toutes les secondes, est obtenu en moyennant le comptage sur 4 s. Les trois périodes du temps où le frottis est positionné devant la fenêtre d'entrée du prototype sont colorées en rouge sur l'axe du temps. Le taux de comptage du bruit de fond ("BdF" sur la graphe) et total ("Frottis + BdF" sur la graphe) sont affichés.

l'activité du frottis (40 Bq).

Les valeurs d'efficacité obtenues avec le frottis (Tableau 9.5), placée à $\sim 1 \text{ cm}$ des détecteurs sont équivalentes à celle obtenue avec la source bêta de référence : (29% cf. Tableau 9.4), ce qui valide le rendement de l'instrument ϵ_i pour une contamination réelle.

9.2.3 Conclusion

Les mesures avec la source bêta étalon et le frottis permettent de valider expérimentalement l'efficacité beta. Les deux prototypes donnent des résultats comparables. Avec une efficacité bêta de 25% - 29% en fonction des positions de source, cela correspond à un taux de détection

Tableau 9.5 Calcul du taux de comptage net [1/s] issu du frottis d'activité $A = 40 \text{ Bq}$ et de l'efficacité de détection (ϵ) des prototypes de Phoswich V1 et V2. L'erreur affichée est l'écart-type des taux de comptage du bruit de fond seul (BdF) et pour le bruit de fond avec le frottis devant ("Frottis + BdF") et celle de l'efficacité obtenue par propagation des erreurs

Prototypes	Taux de comptage [1/s]			ϵ
	BdF[1/s]	Frottis + BdF [1/s]	Net (Frottis)[1/s]	
Phoswich V1	$3,7 \pm 1,1$	$14,7 \pm 2,1$	$11,0 \pm 2,4$	$(27,5 \pm 6,0)\%$
Phoswich V2	$5,0 \pm 1,2$	$14,8 \pm 1,8$	$9,8 \pm 2,2$	$(24,5 \pm 5,5)\%$

S de 15 à 17 e-/s pour un rendement de source de 48%. L'uniformité obtenue est de $\pm 5\%$ à $\pm 8\%$, ce qui correspond au résultat obtenu au laboratoire. Par rapport à la simulation, qui prédit un taux de détection S de 20 /s, la diminution de l'efficacité de 15% proviendrait de la distance source-détecteur qui est plus importante (8 à 10 mm) que les 4 mm simulés suivant la recommandation de la norme ISO 60325. Des simulations réalisées confirment cette dégradation du taux S en fonction de l'épaisseur de l'air entre la source et les scintillateurs comme présentée sur la Figure 9.5.

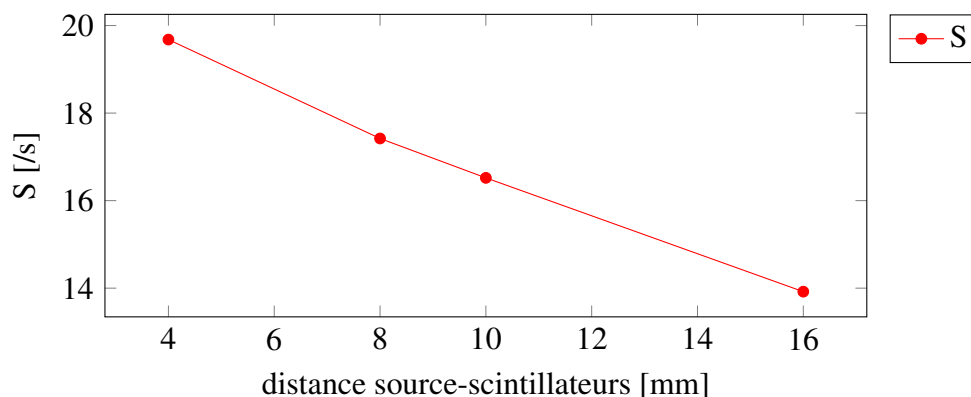


Figure 9.5 Évolution du taux de détection bêta (S) pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ issue du ^{60}Co en fonction de l'épaisseur de l'air entre la source bêta et les scintillateurs. Résultats obtenus en simulant une source bêta de petite surface devant le Phoswich V2 réaliste (Mylar de $3 \mu\text{m}$ et Al de 600 nm devant les scintillateurs).

9.3 Mesures avec les sources gamma : ^{137}Cs et ^{60}Co

Les deux sources gamma permettent de produire des débits de dose élevés (5 à $50 \mu\text{Sv/h}$) en garantissant une distance de source - détecteur importante (1 à 2 m). Une telle distance permet une irradiation homogène sur toute la surface du contaminamètre.

Pour ces mesures, les prototypes ont été positionnés suivant différentes orientations par rapport aux sources gamma afin d'étudier l'influence directionnelle des photons. La Figure 9.6 présente les photos du dispositif pour les mesures effectuées dans le local source avec la source gamma de ^{60}Co lors de la deuxième campagne d'essais. En définissant comme référence la position de la source positionnée devant le détecteur, les directions étudiées sont : (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° et (d) 180° .

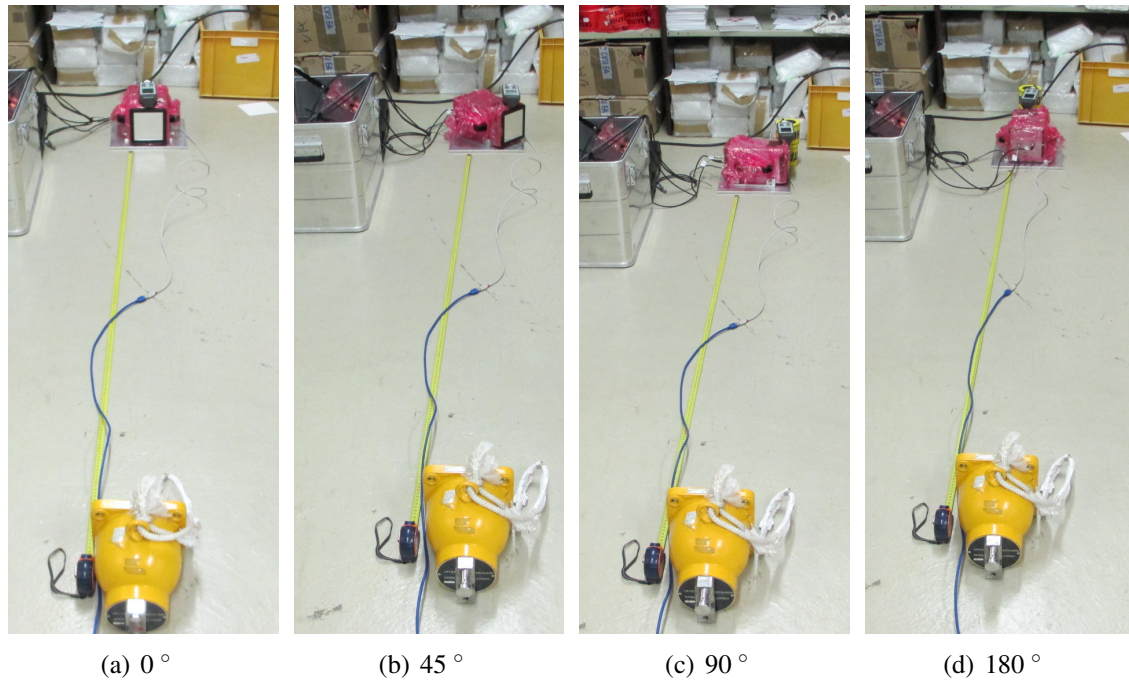


Figure 9.6 Photos des mesures réalisées lors du deuxième essai dans le local sources du CNPE de Chinon avec la source gamma de ^{60}Co (jaune en photo) placée à ~ 2 m de distance du contaminamètre (Phoswich V2). L'orientation du contaminamètre par rapport à la source varie : 0° (devant), 45° , 90° , 180° (derrière).

Pour une orientation du prototype, des mesures ont été réalisées à différentes distances de la source pour permettre de faire varier les valeurs de débit de dose. Ceci a pour objectif de confirmer la linéarité de réponse du détecteur en fonction du débit de dose. Des mesures répétitives faites au même endroit ont également été effectuées pour estimer l'incertitude sur les valeurs mesurées dans un débit de dose gamma donné.

9.3.1 Phoswich V1

Les résultats obtenus avec le Phoswich V1 vont d'abord être présentés. Les distributions brutes des charges obtenues avec les deux sources gamma positionnées à différentes positions sont présentées sur la Figure 9.7. En fixant l'orientation du prototype, la distribution diffère pour les deux sources. Les charges lentes, correspondant à l'énergie déposée dans un deuxième étage de 1 mm d'épaisseur, atteignent des valeurs plus importantes avec la source de ^{60}Co qu'avec la source ^{137}Cs . Les charges lentes pourraient donc permettre d'estimer les énergies des gamma incidents. En prenant en compte le nombre d'interactions dans le scintillateur lent, cet étage pourrait servir à suivre le débit de dose gamma ambiant. Les distributions serviront également, en les comparant avec les distributions obtenues dans le BAN plus tard, à estimer l'énergie moyenne des photons sur site.

9.3.1.1 Dispersion statistique du taux de comptage intégré sur 4 s

A partir de ces données, l'analyse TS2 (avec des sélections en charges et un seuil q_{rap} optimisé) est appliquée pour obtenir le taux de détection ϕ_γ . Comme la représentation du taux

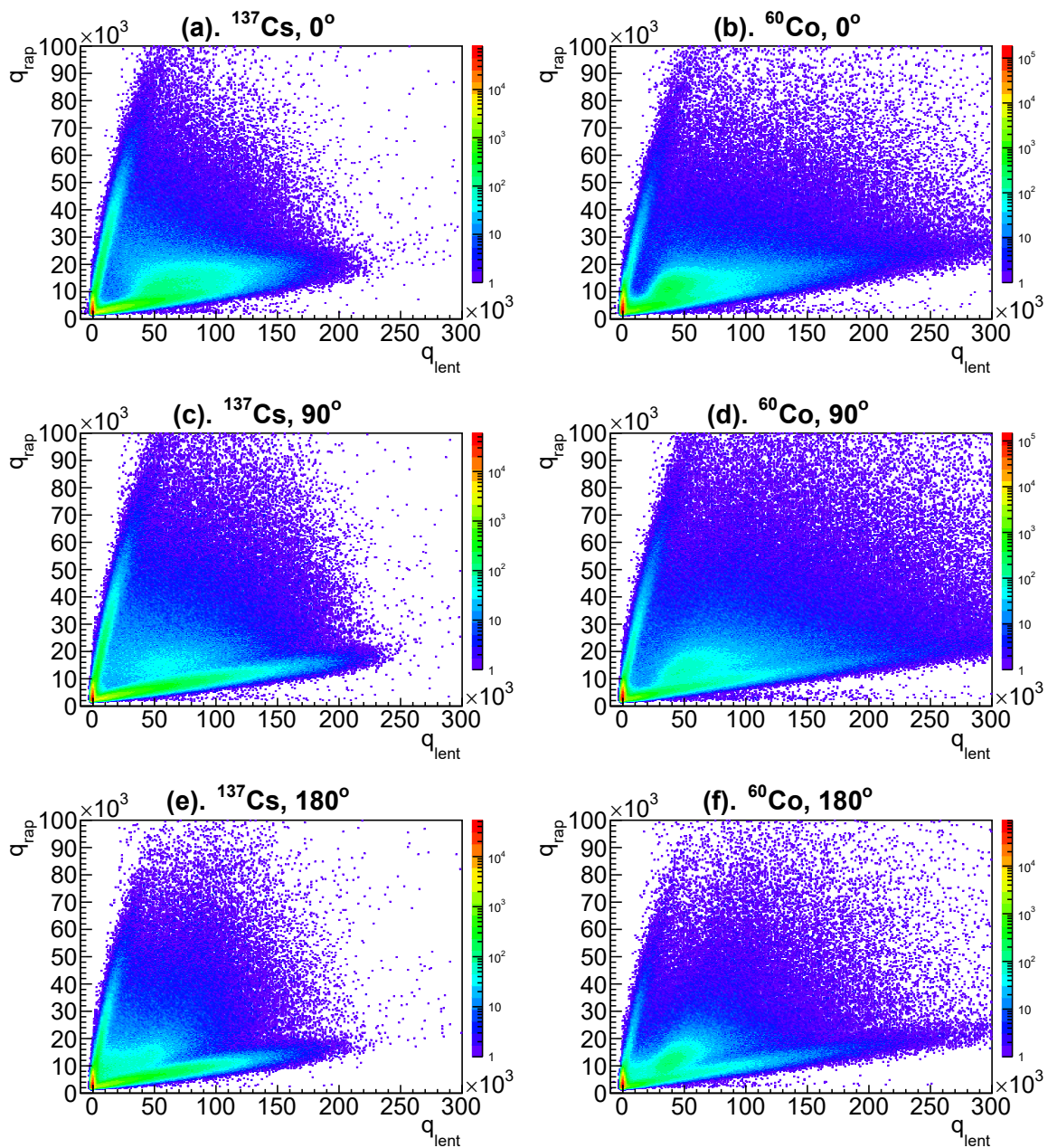
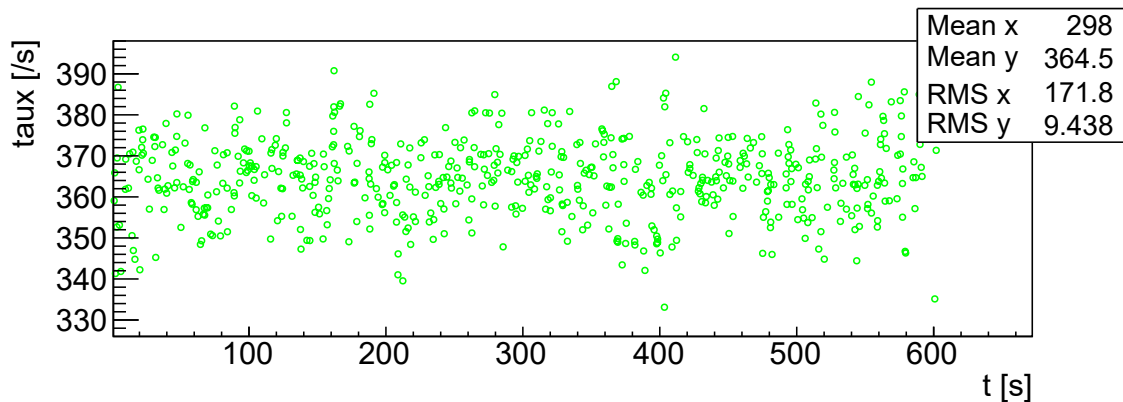
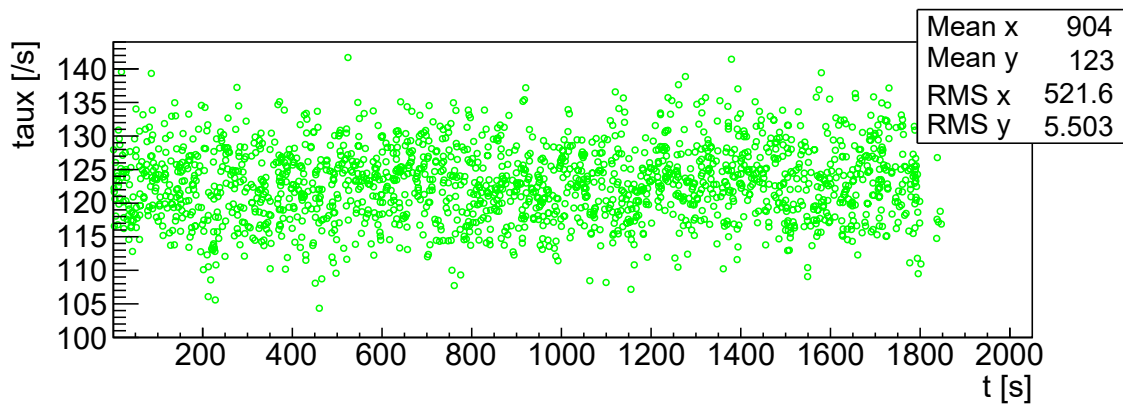


Figure 9.7 Distributions des charges (q_{rap} vs q_{lent}) pour le Phoswich V1 en fonction de la source gamma (^{137}Cs et ^{60}Co), pour différentes orientations du Phoswich V1 : 0° , 90° et 180° . La source gamma de ^{60}Co est placée à 2 m du Phoswich V1 et celle de ^{137}Cs à 1,5 m.

de comptage pour le frottis (cf. Figure 9.4), le taux de comptage par seconde en moyennant 4 mesures d'1 seconde est présenté en fonction du temps de mesure. Elle permet également de donner l'écart-type dû aux fluctuations statistiques. Un exemple est donné pour le Phoswich V1 soumis au rayonnement issu du ^{137}Cs placée à 90° devant le prototype. Les taux de détection, avec la source placée à ~ 1 m (a) correspondant à un DeD = $18,5 \mu\text{Sv/h}$ et à ~ 2 m (b) donnant un DeD de $6,7 \mu\text{Sv/h}$, sont présentés en Figure 9.8. Il y a un facteur de ~ 3 sur le taux de détection ϕ_γ ainsi que sur le débit de dose mesuré. On s'attendrait à un facteur de 4 sur le débit de dose (fluctuation en $1/R^2$). Cet écart est probablement lié à l'imprécision de la distance estimée (± 20 cm).



(a) ^{137}Cs à ~ 1 m, 90° , DeD = $18,5 \mu\text{Sv/h}$, $t = 298$ s



(b) ^{137}Cs à ~ 2 m, 90° , DeD = $6,7 \mu\text{Sv/h}$, $t = 904$ s

Figure 9.8 Taux de comptage total [s] avec le prototype Phoswich VI pour une mesure de source gamma du ^{137}Cs placée à 90° devant le prototype. Le taux, obtenu en moyennant le comptage sur 4 s : "Mean y" pour ϕ_γ et "RMS y" pour son incertitude.

Les paramètres d'intérêt, "Mean y" qui présente ϕ_γ et "RMS y" qui présente l'écart-type σ_{ϕ_γ} , sont listés dans le Tableau 9.6. En observant les valeurs de ϕ_γ , leurs écart-types égaux à $\sqrt{\phi_\gamma/4}$ sont purement statistiques. L'allongement du temps de mesure du signal permet donc d'améliorer les performances des contaminamètres.

9.3.1.2 Taux de comptage extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$

Le Tableau 9.6 présente le taux de détection extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$: comptage B. L'incertitude due à la dispersion statistique du taux de comptage : ϕ_γ et $\phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}$ a été prise en compte.

Tableau 9.6 Calcul du taux de détection gamma (B) [1/s] extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$ pour la source gamma de ^{137}Cs placée à 90° devant le Phoswich V1. Les incertitudes sur le résultat ont pris en compte la fluctuation statistique du taux de comptage moyennant sur 4 secondes : obtenues de la Figure 9.8 : "Mean y" pour ϕ_γ et "RMS y" pour son incertitude

Distance [m]	ϕ_γ [1/s]	$\phi_{\text{bruit}_{\text{envir}}}$ [1/s]	ϕ_{net} [1/s]	DeD mesuré [$\mu\text{Sv/h}$]	B [1/s]
(a) $1,1 \pm 0,2$	$364,5 \pm 9,4$	$3,7 \pm 1,0$	$360,8 \pm 9,4$	19,7	1831 ± 48
(b) $2,1 \pm 0,2$	$123,0 \pm 5,5$	$3,7 \pm 1,0$	$119,3 \pm 5,6$	6,1	1956 ± 92

L'erreur statistique du taux de comptage du contaminamètre B est de $\pm 3\%$ pour le cas (a) et $\pm 5\%$ pour le cas (b), ce qui n'est pas dominant par rapport à l'erreur issue du dispositif expérimental : la précision du radiamètre ($\pm 10\%$) ainsi que son positionnement lors des mesures. Cette erreur due au dispositif expérimental est estimée par des mesures répétitives dans la même condition expérimentale (orientation du prototype, distance source-détecteur et source gamma). Le Tableau 9.7 montre le taux de détection gamma (B) extrapolé à un débit de dose de 100 $\mu\text{Sv/h}$ pour différentes mesures effectuées avec le Phoswich V1. Prenons le cas du ^{60}Co à 2 m du contaminamètre comme exemple, une variabilité de $\pm 15\%$ est retrouvée pour des mesures avec la même orientation du prototype. Cette variabilité, due au dispositif expérimental, permet donc d'estimer l'erreur expérimentale à $\pm 15\%$.

Tableau 9.7 Taux de détection gamma (B) extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$ pour les deux sources gamma (^{137}Cs et ^{60}Co) avec le Phoswich V1 en fonction de la position et de la distance de source par rapport au contaminamètre. Les résultats obtenus pendant la première campagne d'essais.

Taux de détection gamma (B) extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$					
Source	Distance source-contaminamètre [m]	Orientation de contaminamètre			
		0°	45°	90°	180°
^{137}Cs	0,64		2000		
	1		2900	2000	
	1,5	2400	2100	1900	1200
	2	2300	2400	1800	1100
^{60}Co	1	1400			
	2	1300		1200	1100
	2	1100		1500	800

Pour la même orientation, en variant la distance source-détecteur, le taux de comptage gamma varie également de $\pm 15\%$, ce qui confirme la linéarité de réponse aux gamma en

fonction du débit de dose. Le taux de gamma B mesuré est comparable à $\pm 15\%$ près pour les orientations de 0° , 45° et 90° , ce qui montre qu'ils ont la même sensibilité aux gamma.

Le Tableau 9.8 présente les taux obtenus avec les deux sources pour des orientations du prototype différentes en regroupant les résultats comparables. Pour la source de ^{137}Cs , ce

Tableau 9.8 Taux de détection gamma (B) extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$ pour le Phoswich V1. Il est obtenu en moyennant le taux de comptage donnant du taux de comptage comparable : mesures avec la même orientation ; mesures avec trois orientations de source gamma (0° , 45° , 90°) du Tableau 9.7. La variabilité du taux affiché est de $\pm 15\%$

Taux de détection gamma (B) extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$		
Source	Orientation du contaminamètre	
	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	180°
^{137}Cs	2200	1150
^{60}Co	1300	950

prototype détecte $\sim 2200 \gamma/\text{s}$ lorsque la source est devant et $\sim 1150 \gamma/\text{s}$ quand la source est derrière. Encore une fois, cette évolution peut s'expliquer par l'interaction des gamma avec la matière (air, béton du sol, blindage des sources ...) quand la source est devant (cf. 8.3.2.3). La source gamma de ^{60}Co donne des taux de comptage 40% plus faibles, $\sim 1300/\text{s}$, si l'orientation de source est à 0° , 45° et 90° . Et cette amélioration du rejet du bruit de fond avec le ^{60}Co est de 20% ($1150/\text{s}$ à $950/\text{s}$) si la source est derrière le détecteur. Cette évolution est comparable à celle obtenue en simulations (Figure 5.24), dans lesquelles le taux de détection pour une source gamma isotrope est $\sim 30\%$ plus faible pour des gamma issus du ^{60}Co ($1200 \gamma/\text{s}$ pour $\bar{E} = 1,25 \text{ MeV}$) que pour ceux issus du ^{137}Cs ($1800 \gamma/\text{s}$ pour $E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$). Le taux B simulé avec la source isotrope se situe entre les taux B expérimentaux avec une source devant et une source derrière. Par conséquent, la sensibilité du Phoswich V1 aux gamma obtenue en simulation est donc validée par l'expérience, il est plus efficace pour rejeter les gamma du ^{60}Co que de ^{137}Cs .

9.3.2 Phoswich V2

La Figure 9.9 présente les distributions brutes des charges avec les deux sources lorsque les sources sont positionnées devant le Phoswich V2 (0°).

En observant les charges lentes, les valeurs maximales doublent avec la source de ^{60}Co par rapport à celles obtenues avec la source de ^{137}Cs . Encore une fois, ces caractéristiques pourraient être utilisés afin de déduire l'énergie des gamma du bruit de fond lors des mesures dans le BAN et permettre de remonter à un débit de dose, ce qui pourrait être intéressant pour le contaminamètre.

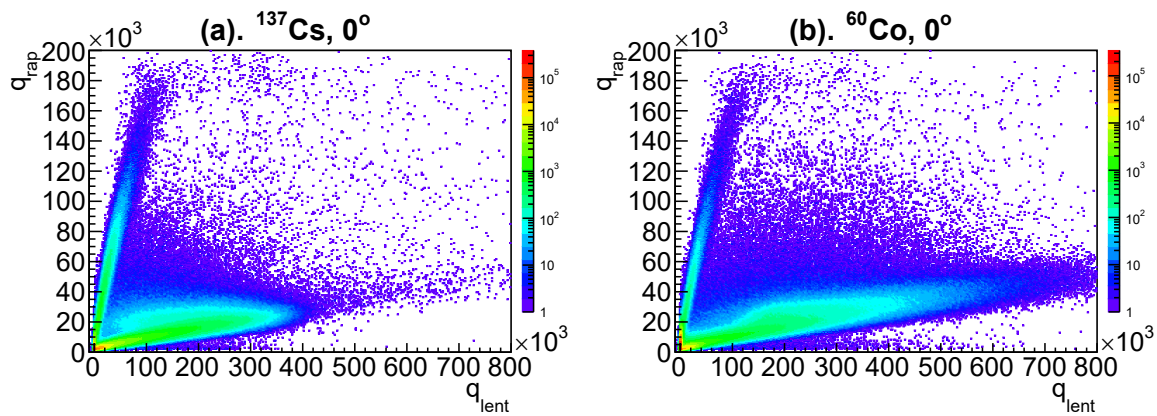


Figure 9.9 Distributions des charges (q_{rap} vs q_{lent}) pour le Phoswich V2 en fonction de la source gamma (^{137}Cs et ^{60}Co). Les sources sont placées à 2 m devant le Phoswich V2.

9.3.2.1 Taux de comptage extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$

L'analyse adaptée (TS3 comme présenté en Figure 9.3 (b) pour le Phoswich V2) est appliquée aux distributions du ratio des charges. Le taux extrapolé B est calculé. Comme pour le Phoswich V1, les trois positions de sources gamma : 0° , 45° , 90° donnent un taux de comptage B comparable, avec une fluctuation de $\pm 15\%$. Ils sont donc combinés et le Tableau 9.9 donne le taux de gamma détecté (B) extrapolé à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ après la fusion des mesures de répétabilité réalisées lors des deux campagnes d'essais. Les résultats de la deuxième campagne sont présentés entre parenthèse en bleu.

Les taux obtenus pendant la première campagne d'essais sont de 10% à 35% plus faibles par rapport à ceux obtenue pendant la deuxième campagne. Cet écart est principalement dû aux méthodes de mesure du débit de dose entre les deux essais : la première campagne d'essais a utilisé le débit de dose maximal, ce qui surestime le débit de dose de 10% à 20% et la deuxième campagne d'essais a utilisé le débit de dose moyen. Après l'extrapolation à $100 \mu\text{Sv/h}$, le taux est donc plus important pour la deuxième campagne d'essais. Les résultats de la deuxième campagne sont probablement plus fiables.

Tableau 9.9 Taux de détection gamma (B) extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$ pour le Phoswich V2 obtenu pour les deux campagnes d'essais. Les valeurs en noir sont des résultats de la première campagne d'essais et en bleu ceux de deuxième essai. La variabilité du taux affiché est de $\pm 15\%$

Taux de détection gamma (B) [1/s] extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$		
Source	Orientation du contaminamètre	
	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$	180°
^{137}Cs	1800	900
	(2800)	(1300)
^{60}Co	800	500
	(1100)	(700)

Comme pour le Phoswich V1, le Phoswich V2 détecte environ 2 fois plus de gamma quand la source vient de l'avant que de l'arrière du prototype, à cause de la problématique

de l'interaction des gamma avec la matière environnante. Ce Phoswich est environ deux fois plus efficace pour rejeter le bruit de fond du ^{60}Co que celui du ^{137}Cs . Cette différence est plus importante que celle obtenue avec le Phoswich V1. La sensibilité à l'énergie des gamma de ce détecteur a été étudiée lors des simulations (cf. Figure 5.27) qui montrent que le taux de détection gamma diminue d'un facteur 3 (1300 c/s à 400 c/s) pour les deux sources.

Il est intéressant de comparer le taux de détection gamma B de ces deux prototypes avec les Tableaux 9.8 et 9.9 des Phoswich de la première campagne d'essais. Avec la source de ^{137}Cs , le taux du Phoswich V1 est 1,2 fois plus élevé que celui du Phoswich V2. Avec une variabilité de $\pm 15\%$ sur le taux de détection expérimental, cette différence n'est pas significative. Par contre, avec la source de ^{60}Co , 1,5 à 2 fois plus de gamma sont détectés avec le Phoswich V1 qu'avec le V2. Par conséquent, il a été confirmé que le Phoswich V2 est plus performant pour rejeter le bruit de fond gamma dû à des gamma à haute énergie.

9.3.2.2 Comparaison aux contaminamètres existant

La réponse du détecteur aux gamma de ^{137}Cs est donc de 11 à 22 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$ pour une surface de $12 \times 12 \text{ cm}^2$. En supposant que le taux de comptage est proportionnel à la surface de contaminamètre, ce qui est vrai pour notre détecteur, on pourrait comparer cette sensibilité aux contaminamètres existant et normaliser leurs sensibilités aux gamma à une surface égale (144 cm^2) (cf. Tableau 3.1). La comparaison des sensibilités des contaminamètres est dans le Tableau 9.10. Les contaminamètres actuels ont une sensibilité entre 30 à 90 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$ pour les gamma de ^{137}Cs .

Tableau 9.10 Sensibilité aux gamma du ^{137}Cs extrapolée à une surface sensible de contaminamètre de 144 cm^2

Contaminamètre	Fournisseur	Sensibilité extrapolée
LB124 Scint [43]	Berthold Technologies	< 85 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$
RadEye AB100 [7]	Thermo Fisher	$\sim 58 \text{ c/s}/\mu\text{Sv/h}$
SB100/A [46]	Mirion	< 35 c/s/ $\mu\text{Gy/h}$
CABV31 [9]	Mirion	30 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$
SBM-2D [47]	Mirion	58 c/s/ $\mu\text{Gy/h}$ (^{60}Co)
Phoswich V2	LPC & EDF	11 à 22 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$

Lorsque le prototype Phoswich V2 est face arrière vers le ^{137}Cs , il est donc environ 3 (CABV31) à 8 fois (LB124 Scint) moins sensible aux gamma du ^{137}Cs que les contaminamètres actuels. Si la source est devant, il est 1,5 à 4 fois moins sensible que les contaminamètres existant.

Pour la source de ^{60}Co , le SBM-2D [47] a une sensibilité de 58 c/s/ $\mu\text{Gy/h}$ alors qu'elle est de 5 à 11 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$ avec notre prototype V2 (cf. Tableau 9.9). Il est donc 5 à 10 fois plus efficace pour éliminer les gamma du ^{60}Co que le SBM-2D.

9.3.3 Conclusion

En résumé, les deux prototypes sont plus sensibles au bruit de fond gamma venant de l'avant (0° , 45° , 90°). Pour les deux énergies de gamma, les électrons secondaires créés dans la matière environnante et dans l'air sont problématiques pour la détection dans ces cas. Les deux prototypes rejettent mieux le bruit de gamma de haute énergie (^{60}Co) que ceux d'énergie plus basse (^{137}Cs). Cela a confirmé l'évolution observée en simulation.

En prenant en compte les résultats de la première campagne d'essais, le Phoswich V2 testé est plus efficace pour rejeter les gamma que le Phoswich V1 surtout à haute énergie (facteur de 1,5 à 2 pour le ^{60}Co et 1,2 pour le ^{137}Cs). En tenant compte des incertitudes de mesures $\pm 15\%$, l'amélioration avec la source de ^{137}Cs avec Phoswich V2 est assez faible.

La simulation prédit que le Phoswich V1 pourrait être plus efficace pour rejeter les gamma de haute énergie (eg : 1,5 MeV) si le deuxième scintillateur était plus épais (cf. Figure 5.25) mais resterait cependant moins efficace que le Phoswich V2 (facteur de mérite 1 pour le Phoswich V1 à comparer à 1,5 pour le Phoswich V2 cf. Figure 5.29). Le Phoswich V2 reste donc meilleur candidat que le Phoswich V1 grâce à son meilleur rejet des gamma, notamment à haute énergie.

Le Phoswich V2 a également été testé pendant la deuxième campagne d'essai au CNPE avec les mêmes sources. Un taux de détection 10% à 35% supérieur à celui de la première campagne d'essai a été obtenu, probablement dû à une meilleure mesure du débit de dose.

D'après les données constructeurs disponibles, le Phoswich V2 testé, en termes d'amélioration du rejet du bruit de fond gamma du ^{137}Cs , est plus efficace que les contaminamètres existant.

Les deux prototypes testés grâce aux sources gamma ont ensuite été testés dans un des BAN du CNPE pour connaître la réponse au spectre gamma continu qui y est présent et vérifier si le Phoswich V2 est bien le plus performant dans une situation réaliste.

9.4 Mesures dans le BAN

Les tests de réponse des prototypes soumis à un bruit de fond réaliste ont été effectués dans trois locaux de cellules à vannes des BAN (+ 7,3 m) du CNPE de Chinon. Leurs caractéristiques sont présentés sur le Tableau 9.11. Le premier local (A) et le troisième local (C), sans point chaud, ont un débit de dose moyen de $\sim 5 \mu\text{Sv/h}$. Les directions des photons ne sont pas bien définies. Le deuxième local, avec un point chaud, crée un débit de dose de 50 à 80 $\mu\text{Sv/h}$ suivant l'endroit où les prototypes étaient placés. Les mesures réalisées lors de la première campagne d'essais ont été réalisées à un débit de dose de $\sim 50 \mu\text{Sv/h}$ et celles réalisées lors de la deuxième campagne à un débit de dose de $\sim 80 \mu\text{Sv/h}$. Les locaux A et B ont des tailles et des configurations similaires comme présentées sur la Figure 9.10, avec des tuyaux sur deux cotés, la différence est que le local B a un point chaud.

Tableau 9.11 Descriptifs des locaux de cellules de vannes du BAN (+ 7,3 m) du CNPE de Chinon. PTR : Réfrigération de la piscine de stockage du combustible [29] ; TEP : Traitement Effluents Primaires ; P.C. : point chaud ; DeD : débit de dose mesuré

Local	Tranche	Fonction	Contamination	P. C.	DeD [$\mu\text{Sv/h}$]	Prototypes	Essai
A : ND464	2		$< 0,4 \text{ Bq/cm}^2$	non	~ 5	V1, V2	1 ^{er} , 2 ^{ème}
B : ND469	9	TEP	$< 0,4 \text{ Bq/cm}^2$	oui	50 à 80	V1, V2	1 ^{er} , 2 ^{ème}
C : NC470	1	9PTR	$< 0,4 \text{ Bq/cm}^2$	non	~ 5	V2	2 ^{ème}

Pour la première campagne d'essais, les deux prototypes ont été placés côte à côte pour pouvoir réaliser des mesures en même temps. Le radiamètre Radiagem 2000 a été placé au milieu des deux Phoswich comme présenté dans la Figure 9.10.

Lors de la deuxième campagne d'essai, seuls des Phoswich V2 ont été testés et un seul prototype était branché à la fois comme présenté sur la Figure 9.11. Le débit de dose a été mesuré toutes les 5 secondes avec le FH40 placé sur le prototype, ce qui améliore la précision de la mesure du débit de dose.

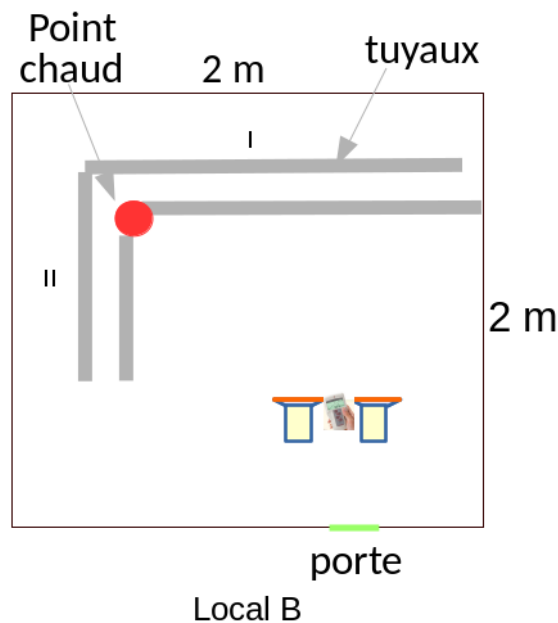
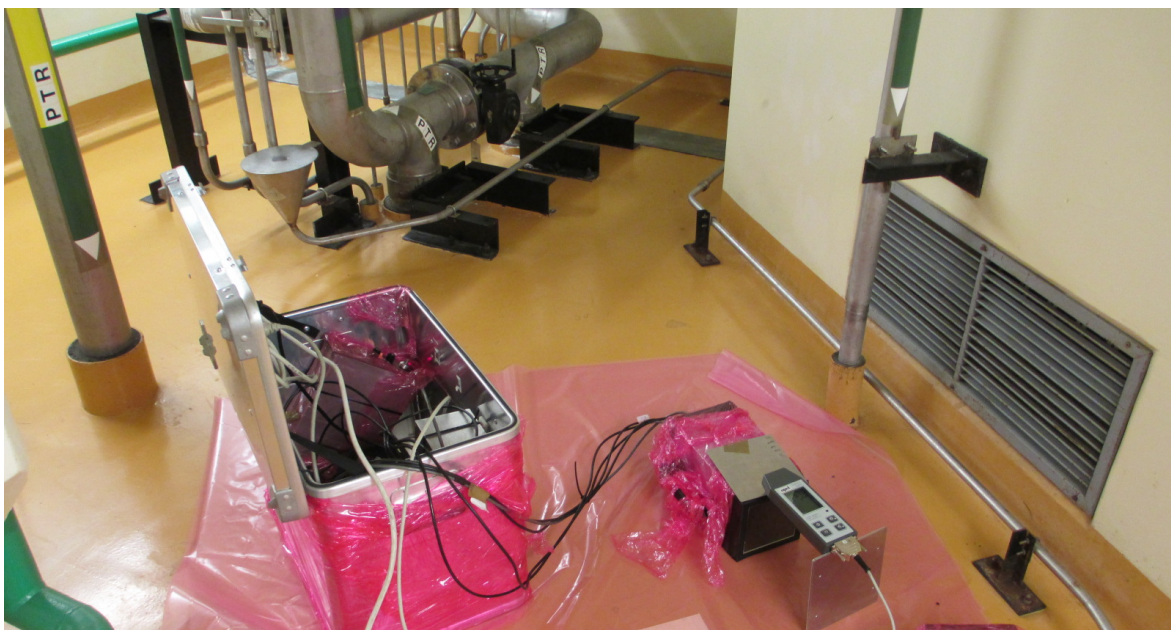


Figure 9.10 Schéma simplifié du local B avec un point chaud. Le local A est de la même configuration mais sans point chaud. Les mesures du Phoswich V1 et V2 ont été effectuées au même temps pour la première campagne d'essais.

Un spectromètre NaI a été utilisé pour réaliser une spectrométrie gamma dans le but d'identifier les émetteurs gamma. Une analyse rapide du spectre a montré qu'il est dominé par le ^{60}Co avec ses deux pics caractéristiques. Un troisième pic était également présent à 500 - 600 keV ainsi qu'une contribution importante à basse énergie due aux diffusés.



(a) local B, prototype face aux tuyaux, 0°



(b) local C, prototype face derrière les tuyaux

Figure 9.11 Photos de mesures dans les locaux B et C pour la deuxième campagne d'essais. Le contaminamètre est face devant le point chaud (0°) dans le local B et derrière les tuyaux dans le local C.

9.4.1 Mesures du bruit de fond dans les trois locaux

Pour étudier l'influence de l'orientation du détecteur par rapport aux tuyaux, les prototypes ont été positionnés dans le local A suivant différentes directions (cf. Figure 9.10) :

- (a) face aux tuyaux I (devant) ;
- (b) face aux tuyaux à II (à gauche) ;
- (c) face au sol du local ;
- (d) face à la porte (l'arrière des prototypes face aux tuyaux I).

Dans le local B avec le point chaud, les orientations sont identiques à celles du local source. En prenant comme référence l'orientation face avant vers le point chaud comme étant celle à 0° (cf. Figure 9.11 (a)), des mesures avec différentes orientations ont donc été effectuées : à 0° , 45° , 90° , 135° , 180° en plus de l'orientation face au sol. Comme le point chaud est en hauteur (~ 50 cm) et les prototypes par terre, il y a toujours des gamma qui arrivent par les cotés des prototypes.

Dans le local C, les mesures avec le prototype face avant et arrière vers les tuyaux ont été effectuées comme présenté sur la Figure 9.11 (b).

9.4.1.1 Distributions de charges mesurées

Afin de comparer les distributions de charges obtenues avec les sources gamma avec celles obtenues dans le BAN, les distributions de charges pour le Phoswich V1 sont présentés sur la Figure 9.12. En comparant qualitativement les distributions présentées sur la Figure 9.7, la forme des distributions de (a) et (c) sont comparables à la distribution avec une source ^{60}Co derrière le détecteur (180°) et celles de (b) et (d) ressemblent aux distributions avec une source ^{60}Co devant ou à coté du Phoswich V1 (0° , 90°). Cela confirme la prédominance des gamma du ^{60}Co dans le bruit de fond en zone.

Les distributions de Phoswich V2 sont présentés sur la Figure 9.13. L'orientation face aux tuyaux I et II sont présentées. Qualitativement, ces distributions ressemblent plus aux distributions du ^{60}Co que celles du ^{137}Cs (cf. Figure 9.9) car les charges dans le scintillateur lent s'étendent jusqu'à 8×10^5 canaux.

En résumé, en comparant les formes des distributions de charges du spectre gamma "réaliste" dans le local A avec celles des sources gamma ^{137}Cs et ^{60}Co , la présence de gamma de haute énergie (^{60}Co) a été confirmée. Ceci a été observé par les deux prototypes.

9.4.1.2 Taux de comptage gamma des Phoswich V1 et V2

Le Tableau 9.12 présente le taux de détection gamma B extrapolé à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ pour les deux prototypes en fonction de l'orientation des prototypes dans les trois locaux.

Dans le local A, les taux de comptage (a) : face devant les tuyaux I et (c) : face au sol sont comparables. De même, ceux de (b) : face devant les tuyaux II et de (d) : face derrière les tuyaux II sont également comparables. Ceci correspond à des orientations venant plutôt de

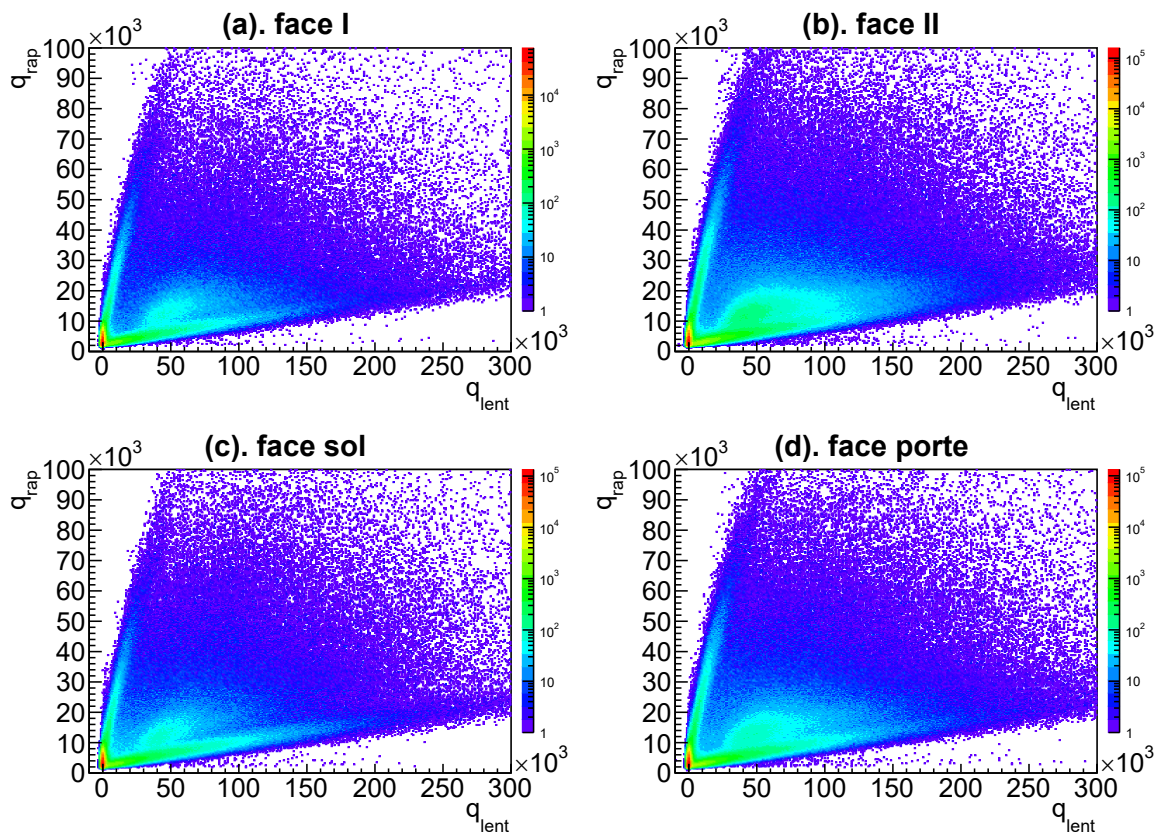


Figure 9.12 Distributions brutes des charges (q_{rap} vs q_{lent}) pour le Phoswich VI en fonction de l'orientation du Phoswich VI (face aux tuyaux I (a), II (b), au sol (c), à la porte (d) dans le local A.

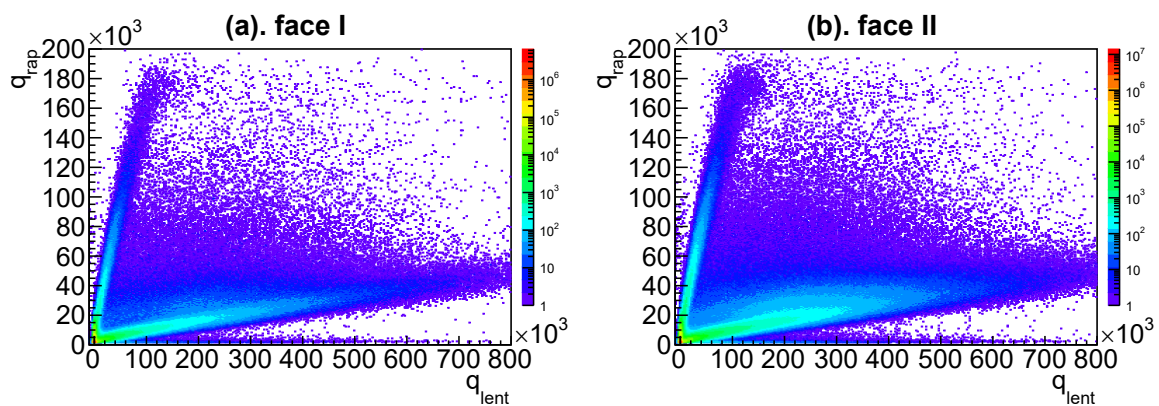


Figure 9.13 Distributions des charges (q_{rap} vs q_{lent}) pour le Phoswich V2 en fonction de l'orientation du Phoswich V2 (face aux tuyaux I, II) dans le local A.

la face avant du détecteur ou de l'arrière de détecteur comme expliqué dans le paragraphe précédent 9.4.1.1.

Les taux de comptage obtenus dans le local A sont plus proches (à $\pm 20\%$) de ceux obtenus avec la source de ^{137}Cs dans le local sources surtout quand celle-ci est devant le détecteur (cf. Tableau 9.8 pour V1 et Tableau 9.9 pour V2) que ceux obtenus avec le ^{60}Co .

Le Phoswich V2 a un taux de comptage 20% inférieur à celui du Phoswich V1 dans le local A. Ce facteur est comparable à celui obtenu avec la source gamma de ^{137}Cs et à ce qui était attendu d'après les simulations. Par contre, cette relation n'est plus retrouvée dans le

Tableau 9.12 Taux de détection gamma par seconde (B) extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$ pour les Phoswich V1 et V2 dans les trois locaux du BAN 9. Les valeurs en noir sont des résultats de la première campagne d'essais et en bleu ceux du deuxième essai. La variabilité du taux affiché est de $\pm 15\%$

Taux de détection gamma (B) [1/s] extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$				
Mesure	Orientation	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai
		V1	V2	V2
Local A				
(a)	Face devant les tuyaux I	1600	1300	
(b)	Face devant les tuyaux II	2200	1700	
(c)	Face au sol	1400	1200	
(d)	Face derrière les tuyaux II	2100	1700	
Local B				
(e)	0°, 45°, 90°	1800	2100	2200
(f)	135°			1800
(g)	180°	800	900	1500
(h)	Face au sol	1100	1100	1100
Local C				
(i)	Face devant les tuyaux			2100
(j)	Face derrière les tuyaux			1200

local B qui a un point chaud, à ~ 1 m du prototype. Une cause probable est l'imprécision de la mesure du débit de dose (probablement à 20% cf. 9.1.2). L'incertitude sur la mesure du débit de dose dans ce local est donc importante à cause du débit de dose non uniforme sur toute la surface de détecteur dans ces conditions.

Pour le Phoswich V2, la deuxième campagne d'essais dans les locaux B et C donne un taux de détection comparable 1200 à 2100 c/s en fonction de l'orientation du prototype. Encore une fois, cela correspond aux taux de détection avec la sources de ^{137}Cs (cf. Tableau 9.9). Le deuxième essai reproduit les résultats du premier sauf à 180°, ce qui est probablement dû à une différence de positionnement du radiamètre entre les deux essais.

Le fait que le taux de gamma détecté se rapproche de celui obtenu avec la source de ^{137}Cs justifie le fait qu'elle soit utilisée comme source de référence gamma par la norme ISO 60325.

Les conditions expérimentales en zone ont posé des difficultés pour effectuer des mesures du bruit de fond avec une bonne précision, notamment dans le local B en présence d'un point chaud. Cela est la source principale d'erreur systématique de nos mesures, qui empêche de comparer les performances des deux prototypes de Phoswich avec une bonne confiance.

9.4.2 Mesure avec la source bêta dans un bruit de fond gamma réaliste

Comme le local B permet de produire un débit de dose élevé $\sim 80 \mu\text{Sv/h}$ (proche du cahiers des charges), des mesures avec une source bêta ont été effectuées afin de contrôler si la présence d'une contamination bêta est visible par le Phoswich V2 dans un bruit de fond gamma élevé. Pour rappel, la source bêta utilisée en zone a une activité surfacique normalisée à la surface du contaminamètre, de 13 Bq/cm^2 .

L'objectif de ces mesures est de

- vérifier si la contamination de 13 Bq/cm^2 sort du bruit de fond gamma réaliste ;
- étudier le temps de réponse du détecteur ;
- comparer l'efficacité bêta avec celle mesurée au local source ;
- comparer l'efficacité bêta pour deux types de mesure : statique et dynamique.

9.4.2.1 Protocole de mesure

Comme présenté sur la Figure 9.14, la source bêta a été placée devant le contaminamètre à $\sim 1 - 1,5 \text{ cm}$ dans un débit de dose correspondant au bruit de fond des différents locaux du BAN. Cette distance source-détecteur va diminuer l'efficacité de détection par rapport aux recommandations de la norme ISO 60325 : entre 3 et 4 mm.



Figure 9.14 Mesure dynamique avec la source bêta dans le local B dans le BAN.

Deux types de mesures avec la sources bêta ont été effectuées avec 4 passages de la source bêta devant le prototype :

- Mode statique : la source bêta est placée devant le centre du prototype pendant 30 s et puis enlevée.
- Mode dépistage : la source bêta est placée devant le prototype avec une vitesse de ~ 1 cm/s, soit une mesure de ~ 10 s chaque fois sur la surface du prototype.

9.4.2.2 Intégration du seuil de déclenchement

Selon la norme ISO 60325 (cf. 3.2.2.1), le détecteur de contamination est un moniteur de contamination s'il contient un pré-réglage du seuil d'alarme afin d'annoncer la présence de contamination. Cela permet d'avoir une information perceptible une fois la contamination détectée.

Pour cela, le seuil de déclenchement (seuil de décision) a dû être implémenté dans l'acquisition en plus du taux de comptage total. Quand le taux détecté dépasse ce seuil, un signal se déclenche en annonçant la présence d'une contamination avec une erreur $\alpha = 2,5\%$.

Pour calculer le seuil de décision (SD), la formule suivante est utilisée comme présenté au chapitre 3 :

$$SD = 1,96 \times \sqrt{\frac{B \times (1 + \frac{t_s}{t_0})}{t_s}}, \quad (9.1)$$

avec t_0 le temps de mesure du bruit de fond et t_s le temps de mesure du signal. Cette formule correspond à une erreur α (probabilité de fausse alarme) de 2,5%. Il faut donc mesurer le débit de dose en temps réel et connaître le taux de comptage B du détecteur soumis à ce débit de dose. Pour déduire cette information en temps réel avec le prototype, une solution serait d'utiliser le deuxième étage de détection, qui contient de l'information sur l'énergie et le taux de comptage dû aux gamma. L'utilisation de cette information dans le scintillateur épais demande plus d'études et ne sera pas développée dans ma thèse. Une autre méthode s'enrichit de la mesure unique : une mesure du bruit de fond suivie par une mesure du bruit de fond plus signal. L'algorithme de cette méthode est présentée sur la Figure 9.15. Il consiste à prendre la moyenne des taux de comptage des 8 mesures, ($i - 11$) s à ($i - 4$) s, comme taux de comptage du bruit de l'instant i s. Il faut que les mesures utilisées pour déduire le bruit de fond soient indépendantes des mesures pour calculer le taux intégré (x_{i-3} à x_i). C'est pourquoi les 3 valeurs qui précèdent t ne sont pas utilisées pour la déduction du bruit de fond. Cet algorithme est applicable à condition qu'au début de mesure il n'y ait que le bruit de fond.

La condition de déclenchement est donc :

$$taux_{net} = taux[i] - \Phi_\gamma[i] > 1,96 \sqrt{\frac{\Phi_\gamma[i](1 + \frac{t_s}{t_0})}{t_s}} = SD, \quad (9.2)$$

avec $\Phi_\gamma[i]$ le taux de comptage du bruit de fond et $taux[i]$ le taux de comptage moyenné sur 4 secondes à l'instant i , $t_s = 4$ s et $t_0 = 8$ s.

Cet algorithme permet d'avoir un temps de mesure du bruit de fond $t_0 = 8$ s au lieu de 4 s, ce qui diminue le seuil de décision (cf. Formule 9.2) de 13% et permet d'augmenter la

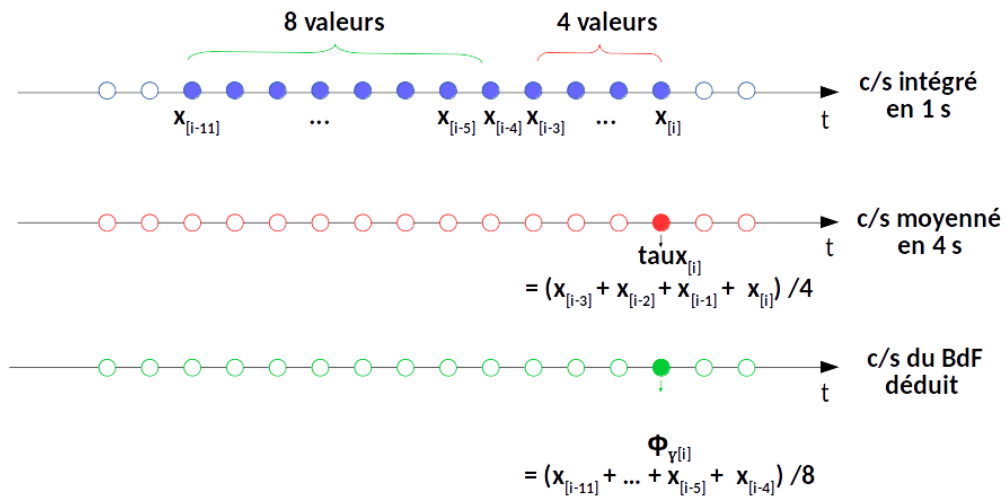


Figure 9.15 Algorithme pour déduire le taux de comptage du bruit de fond gamma $\Phi_{\gamma}[i]$. x_i le taux de comptage pour une mesure d'une seconde à l'instant i ; $\text{taux}[i]$ le taux de comptage total moyenné sur 4 secondes à l'instant i .

valeur du débit de dose dans lequel le détecteur peut être utilisé d'un facteur 1,3. Grâce à la mesure continue, la même configuration du détecteur devient donc plus efficace en utilisant les mesures du bruit de fond durant un temps plus long.

9.4.2.3 Résultats

La Figure 9.16 présente le taux de comptage moyenné sur 4 s ($\text{taux}[i]$) pour les mesures dans le local B dans un débit de dose mesuré de $59 \mu\text{Sv/h}$. (a) correspond à une mesure statique avec la source devant le détecteur pendant 30 s, (b) correspond à une mesure "dépistage" avec la source passant avec une vitesse d'environ 1 cm/s devant le détecteur soit une durée d'environ 10 s. Les points avec un croix représentent les mesures qui dépassent le seuil de décision. La décision de présence de contamination est donc prise.

Les augmentations du taux de comptage sont évidentes chaque fois que la source bêta passe devant le détecteur pour deux types de mesures, ce qui était attendu compte tenu de l'activité de la source correspondant à $\sim 13 \text{ Bq/cm}^2$. En prenant la première augmentation de mesure statique comme exemple, le taux de comptage est de $897 \pm 11 \text{ c/s}$ sans source bêta dans un débit de dose de $59 \mu\text{Sv/h}$ et augmente de $440 \pm 25 \text{ c/s}$ en présence de source. Cette augmentation correspond à une efficacité bêta de $23 \pm 1\%$, ce qui est moindre que celle obtenue dans le local source (25 à 29% en fonction de position de source bêta cf. Tableau 9.4). Cette diminution d'efficacité est due à l'éloignement de source bêta qui était entre 1 et 1,5 cm du contaminamètre. Par simulation, en passant d'une distance de 4 mm à 16 mm du contaminamètre, l'efficacité diminue de 35% à 24% (cf. Figure 9.5). Il est donc confirmé que l'efficacité bêta se dégrade rapidement quand le contaminamètre s'éloigne de la surface contrôlée.

La condition de déclenchement en temps réel est efficace pour annoncer la présence de la contamination en cas d'augmentation d'activité. Pour les deux cas, le temps de réponse est

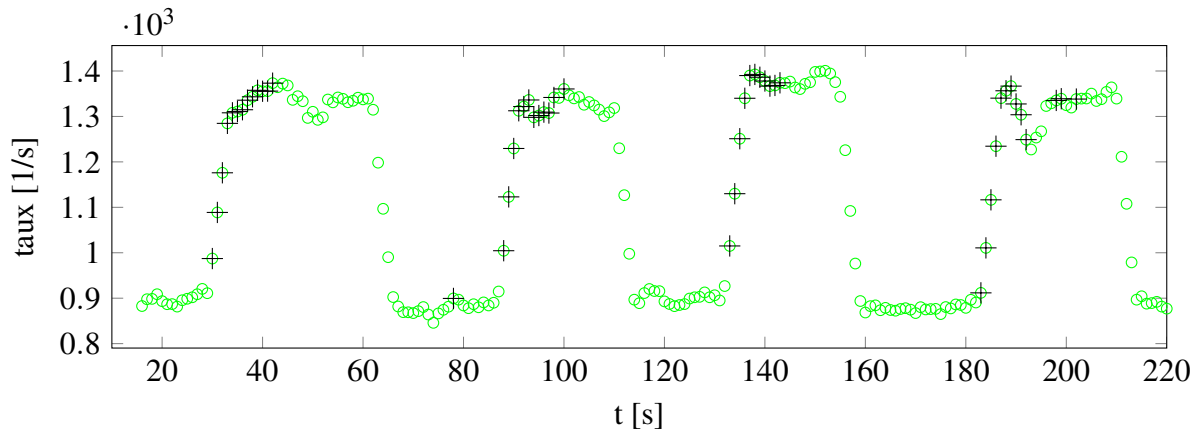
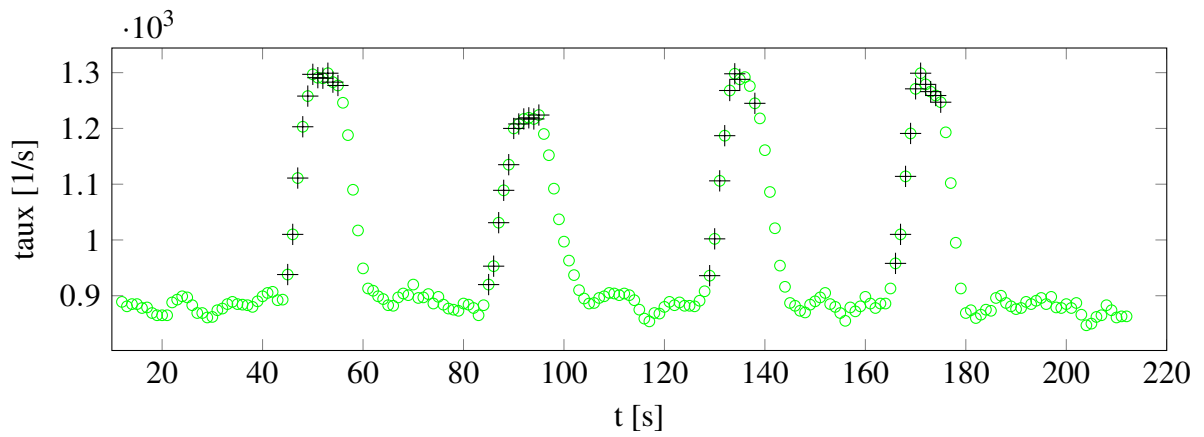
(a) statique, $\Delta t \approx 30$ s par passage, sans filtrage(b) dèpistage, $\Delta t \approx 10$ s par passage, sans filtrage

Figure 9.16 Évolution du taux de comptage dans le local B, moyenné sur 4 s, en fonction du temps avec 4 passages de source bêta de ^{60}Co . Le Phoswich V2 est face arrière vers le point chaud. La source bêta est mise soit devant le centre de détecteur (a) soit de façon statique, soit (b) dèpistage (~ 10 s). Les points avec des croix sont ceux correspondant à un taux de comptage net supérieur au seuil de déclenchement.

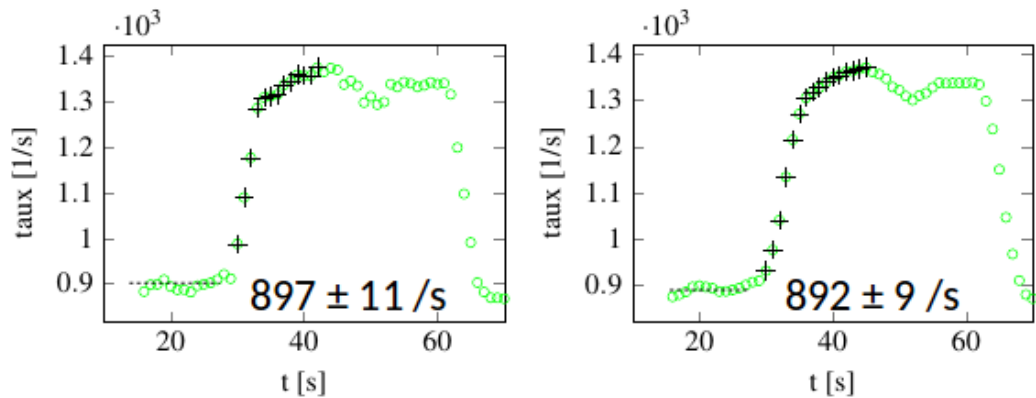
(a) statique, $\Delta t \approx 30$ s par passage, sans filtrage(b) statique, $\Delta t \approx 30$ s par passage, avec un filtrage

Figure 9.17 Comparaison du taux de comptage moyenné sur 4 secondes sans filtre (a) et avec un filtre de 4 s (b).

de 4 à 5 secondes pour l'augmentation ainsi que la diminution d'activité, ce qui correspond aux exigences de la norme ISO 60325 : 7 s pour l'augmentation et 10 s pour la diminution de l'activité.

Lorsque le temps de réponse est plus rapide que celui exigé, il est encore possible d'appliquer un filtrage au signal comme une porte de rectangulaire de 4 s. Par exemple, la Figure 9.17 compare l'effet de ce filtre de 4 secondes appliqué sur le résultat des mesures statiques. Cela lisse le signal en éliminant des micro-structures. Il diminue l'écart-type du taux affiché de $\sim 20\%$. Lorsque le seuil de décision est proportionnel à l'écart-type du taux de comptage du bruit (cf. Formule 3.2), il diminue également de 20%. Au même temps, l'ajout du filtre conduit à un temps de réponse de 5 à 7 s pour l'augmentation et diminution de l'activité, ce qui est toujours conforme à l'exigence de ISO 60325. Il est donc avantageux d'appliquer un filtre de 4 secondes pour améliorer la performance. Une diminution du seuil de décision d'un facteur de 1,2 avec un taux de comptage du bruit de fond B donné permet d'avoir le même seuil de décision mais dans un bruit de fond de 1,4 plus élevé (1,4B). Ce filtrage est donc efficace d'améliorer la performance de discrimination.

Ces mesures permettent donc de confirmer les taux de détection bêta et gamma pour une activité bêta de 13 Bq/cm^2 dans un bruit de fond de débit de dose de $59 \mu\text{Sv/h}$.

9.5 Performance de discrimination bêta/gamma

Le facteur de mérite du $\frac{S}{\sqrt{B}}$ peut être calculé en extrapolant les taux de détection à $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ (S) et à $100 \mu\text{Sv/h}$ (B). Il est présenté dans le Tableau 9.13 pour les différentes mesures réalisées dans le local source et les locaux du BAN. Les résultats du Phoswich V2 obtenus lors de la deuxième campagne d'essais sont présentés en bleu. Les facteurs de mérite ont une variabilité de 10%.

Ces facteurs varient largement, de 0,34 à 0,72, en fonction de la configuration, de l'orientation du prototype ainsi que de la source du bruit de fond gamma.

Le Phoswich V1 testé a un facteur inférieur à celui du Phoswich V2, surtout pour les gamma du ^{60}Co (eg : 0,44 à comparer à 0,57 pour (1), source de ^{60}Co devant). Le Phoswich V2 a également un facteur 10% plus élevé que V1 pour la source du ^{137}Cs et dans le local A. Cette relation n'est pas retrouvée dans le local B probablement à cause de l'erreur de mesure du débit de dose avec le radiamètre près du point chaud du local B. Le Phoswich V2 est donc choisi comme le prototype final.

Pour le Phoswich V2, les valeurs du facteur de mérite des deux campagnes d'essais dans les locaux B et C sont comparables, comme le cas du (7) : face au sol et (8) : 0° , 45° , 90° . Par contre, les résultats de mesures avec les sources de la deuxième campagne donnent des valeurs de facteur de mérite 15 à 20% plus faible. Ceci est dû à la méthode de mesure du débit de dose différente entre les deux essais.

Les facteurs de mérite obtenus avec le Phoswich V2 en première campagne d'essai sont utilisés pour montrer l'effet de l'orientation et du bruit de fond gamma. Les facteurs supérieurs

Tableau 9.13 Facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenus pour les Phoswich V1 et V2 avec des sources radioactives et dans les trois locaux du BAN. La moyenne de S (pour les positions au centre et dans le coin) 16 e-/s est prise pour le calcul. L'incertitude liée à ce facteur est de $\pm 10\%$ principalement issue de l'incertitude du taux de comptage du bruit de fond $\pm 15\%$. Les résultats obtenus dans la première campagne d'essais est en noir et dans le deuxième en bleu dans la parenthèse

		Facteurs de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$		
Mesure	Local	Source/Orientation	V1	V2
(1)	Local Sources	^{60}Co : 0° , 45° , 90°	0,44	0,57 (0,48)
(2)	Local Sources	^{60}Co : 180°	0,52	0,72 (0,60)
(3)	Local Sources	^{137}Cs : 180°	0,47	0,53 (0,44)
(4)	Local Sources	^{137}Cs : 0° , 45° , 90°	0,34	0,38 (0,30)
(5)	Local A	Face devant/derrière les tuyaux II		
(6)	Local A	Face devant les tuyaux I, au sol	0,41	0,45
(7)	Local B	Face au sol	0,48	0,48 (0,47)
(8)	Local B	0° , 45° , 90°	0,38	0,35 (0,35)
(9)	Local B	135°		(0,38)
(10)	Local B	180°	0,57	0,53 (0,41)
(11)	Local C	Face derrière les tuyaux		(0,46)
(12)	Local C	Face devant les tuyaux		(0,35)

à 0,5 sont obtenus avec les gamma venant de l'arrière (180°) du prototype, quelque soit les sources de gamma (^{60}Co (2), ^{137}Cs (3)) ou dans le local B du BAN (10). Les facteurs intermédiaires, entre 0,4 et 0,5, sont obtenus avec les prototypes face au sol dans les locaux A(6) et B(7). Les facteurs de mérite faibles, inférieurs à 0,4, sont obtenus lorsque la source du ^{137}Cs (4) ou les tuyaux du local B (8) devant le Phoswich V2.

Par conséquent, lorsqu'il y un point chaud identifié, il est conseillé d'effectuer la mesure de contamination face derrière le point chaud ou face au sol afin d'avoir un meilleur facteur de mérite. Les interactions des photons dans l'air avant la fenêtre d'entrée du détecteur dégrade ses performances.

Les performances de discrimination bêta/gamma sont déduites à partir de ces facteurs de mérite (cf. Formule 3.18) sachant qu'un facteur $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 1,39 correspond à un seuil de décision pour une contamination surfacique bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$ avec un temps de mesure du signal $t_s = t_0 = 4 \text{ s}$ et $\alpha = 2,5\%$.

En prenant les mesures avec la source ^{137}Cs ou le point chaud derrière le prototype (Mesures (3) et (10)), un facteur de mérite de 0,41 à 0,53 correspondent à un seuil de décision pour une contamination surfacique de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de 10 à 15 $\mu\text{Sv/h}$ est obtenu. Si c'est la source du ^{60}Co (Mesure (2)), le facteur mérite de 0,6 à 0,72 correspond à un débit de dose de 20 à 27 $\mu\text{Sv/h}$.

Les valeurs sont données pour une mesure unique du bruit de fond $t_0 = 4 \text{ s}$ identique à la durée de mesure du signal. Elle sera améliorée si t_0 double lors de la mesure continue, comme présenté au paragraphe 9.4.2.2, qui donne une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond 1,3 fois plus élevé. En plus, le fait d'appliquer un filtrage

sur le taux moyenné de 4 s permet de diminuer encore le seuil de décision d'un facteur 1,2 (comme présenté au 9.4.2.3), soit un facteur 1,4 sur le bruit de fond. Avec les deux algorithmes appliqués, le prototype discrimine la même quantité de bêta dans un bruit de fond gamma $1,3 \times 1,4 = 1,8$ fois plus élevé grâce à ces traitements. Les mesures précédentes correspondent donc à un seuil de décision pour une contamination de 0,4 Bq/cm² de 18 à 27 μ Sv/h pour le ¹³⁷Cs et 36 à 49 μ Sv/h pour le ⁶⁰Co.

9.6 Conclusion

Deux campagnes d'essais ont été réalisées au CNPE de Chinon. Elles ont permis d'étudier la réponse de deux prototypes de Phoswich (V1 et V2) avec des sources de référence et dans un cas réaliste : bruit de fond dans un BAN et frottis.

Réponse aux bêta L'utilisation d'une source de référence bêta de ⁶⁰Co a permis de valider expérimentalement l'uniformité de réponse et l'efficacité bêta des prototypes testés. Les mesures montrent une uniformité de $\pm 5\%$ à $\pm 8\%$, qui confirme les résultats obtenus au laboratoire. L'efficacité bêta a été mesurées à 25% dans un coin et à 29% au centre du détecteur. Ces efficacités correspondent à un taux de détection de 15 à 17 e-/s pour une contamination, due au ⁶⁰Co, de 0,4 Bq/cm² sur une surface de 144 cm². Cette efficacité a été également validée en contrôlant un frottis d'activité surfacique 0,28 Bq/cm². L'efficacité étant obtenue avec une source étalon, qui a un rendement source de $\epsilon_s = 48\%$, elle correspond à un rendement de l'instrument de ϵ_i de 52% (coin) à 60% (centre). Ces valeurs sont supérieures à celle du contaminamètre industriel, LB124 Scint de Berthold, qui a la meilleure efficacité bêta sur 2π : 58%.

Le meilleur résultat expérimental obtenu est donc de 17 e-/s avec la source bêta au centre. Il est à comparer avec la simulation qui prédit 22 e-/s (en prenant en compte les feuilles de Mylar sans dépôt d'aluminium). Le fait que le résultat expérimental est 30% plus faible provient de la fenêtre d'entrée du détecteur qui a un dépôt d'aluminium et de la distance source-détecteur, qui était de 8 à 10 mm contre 4 mm en simulation (valeur recommandée par la norme ISO 60325). En effet, des simulations montrent que 600 nm d'aluminium sur la fenêtre d'entrée induisent une diminution d'environ 2 e-/s et qu'une augmentation de 5 mm de la distance entre la source et le détecteur fait diminuer le taux d'environ 3 e-/s. Dans cette conclusion, les résultats seront donc données dans les conditions expérimentales et en extrapolant une augmentation de 3 e-/s pour correspondre aux conditions recommandées par la norme et pouvoir se comparer aux autres dispositifs. En prenant en compte une distance réduite à 4 mm, le rendement de l'instrument est alors de 68%, permettant d'obtenir une efficacité bêta de 34%.

Réponse aux gamma La réponse des prototypes aux gamma a été étudiée avec deux sources gamma de ¹³⁷Cs et de ⁶⁰Co et dans un bruit de fond réaliste dans des locaux d'un BAN.

Comme prévu par les simulations, les prototypes sont plus performants pour rejeter les gamma de plus haute énergie du ^{60}Co que ceux du ^{137}Cs .

La première campagne d'essais au CNPE de Chinon, a permis de comparer les réponses de deux Phoswich différents. Le Phoswich V2 est 1,2 fois plus performant que le V1 pour rejeter les gamma du ^{137}Cs et du bruit de fond gamma dans le local A du BAN. Ce facteur est encore plus important à plus haute énergie, il est de 1,5 à 2 en présence de photons du ^{60}Co . Ces résultats expérimentaux correspondent aux prédictions des simulations. Selon la simulation, la performance de rejet des gamma du ^{60}Co par le Phoswich V1 pourraient cependant être améliorée avec un scintillateur lent plus épais (2 - 5 mm) mais sans atteindre la performance du Phoswich V2.

Les tests dans les locaux du BAN ont été réalisés pour des débits de dose de 5 à 50 $\mu\text{Sv/h}$ sans montrer de saturation ou de dégradation des performances des prototypes. Les distributions en énergie obtenues dans ces locaux montrent l'existence de photons de haute énergie issus du ^{60}Co . Les deux Phoswich ont des performances comparables dans les trois locaux du BAN, avec des taux de comptage gamma (B) de 1100 à 2200/s, en fonction de l'orientation du prototype, pour un débit de dose extrapolé à 100 $\mu\text{Sv/h}$. Ces performances sont comparables à celles obtenues avec la source gamma de ^{137}Cs .

L'orientation du prototype a un effet important sur la sensibilité des détecteurs aux gamma. Ils sont plus sensibles si les gamma viennent de la face avant ou si la face avant du prototype n'est pas contre une surface. Les simulations ont montré que ceci était dû aux interactions des photons dans l'air et dans les structures environnantes (air, béton, mécanique...) qui créent des électrons et vont contribuer au bruit de fond.

Comme le Phoswich V2 est légèrement plus performant que le V1, deux prototypes de Phoswich V2 ont été testés durant la deuxième campagne de mesures au CNPE de Chinon. Deux versions ont été réalisées, avec des épaisseurs de scintillateur lent (deuxième étage de détections) différentes : 1 mm et 5 mm. D'après les simulations, la version V2 avec 5 mm de scintillateur lent permettrait d'éliminer 15% de gamma de basse énergie ($E < 0,5 \text{ MeV}$) en plus que celle avec 1 mm. Lors de ces tests, aucune différence notable n'a été obtenue entre les deux prototypes. Ceci était attendu pour les photons d'énergie supérieure à 500 keV issus des sources gamma de ^{137}Cs et ^{60}Co . Le fait que ca soit également le cas dans les locaux du BAN semble montrer que le bruit de fond y est dominé par les photons de haute énergie. Bien que n'apportant pas d'amélioration notable sur la discrimination bêta/gamma, une épaisseur de scintillateur lent de 5 mm pourrait être avantageuse si le scintillateur lent était également utilisé pour mesurer le débit de dose en temps réel. En plus de l'intérêt intrinsèque d'avoir une mesure de débit de dose, cette utilisation du deuxième étage permettrait d'éviter de déclencher l'alarme de l'appareil sur dépassement du seuil de décision en cas d'augmentation brusque du débit de dose ambiant.

La source principale de l'incertitude sur ces mesures est liée au dispositif expérimental, surtout à la mesure du débit de dose du bruit de fond avec le radiamètre. Une variabilité de $\pm 15\%$ a été estimée sur les résultats affichés.

Nos prototypes de Phoswich, avec une sensibilité aux gamma du ^{137}Cs de 11 à 22 $\text{c/s}/\mu\text{Sv/h}$ en fonction de l'orientation du prototype, ont des performances de rejet du bruit de fond supérieures à celles affichées dans les documentations des appareils existant.

Performance de discrimination bêta/gamma Les résultats précédent conduisent, si la face avant des prototypes n'est pas dirigée vers les sources, à un seuil de décision pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma du ^{137}Cs ou réaliste de 10 à 15 $\mu\text{Sv/h}$. Cette performance est obtenue avec une source bêta placée à 8 - 10 mm de la face avant des détecteurs, si cette distance était de 4 mm, comme recommandé par les normes, ce seuil de décision correspondrait à un bruit de fond de 14 à 21 $\mu\text{Sv/h}$. Cette performance est donnée pour une mesure unique avec un temps de mesure du bruit de fond et du signal de 4 s et un risque α de 2,5%. Par rapport à la simulation qui prédit une performance de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans 25 $\mu\text{Sv/h}$, la diminution est principalement due à la dégradation de l'efficacité bêta en mesures à cause de l'épaisseur du dépôt d'aluminium nécessaire pour rendre la fenêtre d'entrée opaque à la lumière.

Perspectives Deux solutions ont été envisagées et étudiées pour améliorer ces performances. La performance précédente est donnée pour une mesure unique de 4 secondes. Cette valeur de 4 s pour la mesure du signal est celle requise par le cahier des charges, mais s'il est possible de prolonger le temps de mesure du bruit de fond gamma, par exemple en prenant une mesure de 8 secondes pour déduire le bruit de fond gamma, le prototype deviendrait plus efficace pour rejeter les gamma, et donnerait un seuil de décision dans un bruit de fond 1,3 fois élevé. L'autre solution consiste à filtrer le signal par une porte de 4 s (filtre idéal dans ce cas). Ce filtrage réduit la variance de la mesure sur le bruit de fond et permet au détecteur d'obtenir le même seuil de décision dans un bruit de fond gamma ayant un débit de dose 1,4 fois plus élevé. Ce filtrage ralentit le temps de réponse du détecteur, qui est de 4 à 5 s pour une mesure intégrée sur 4 s, mais les valeurs obtenues, de 5 à 7 s, sont toujours conformes aux exigences de la norme ISO 60325. Si les deux améliorations sont appliquées, la performance des prototypes donnerait un seuil de décision pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de 18 à 27 $\mu\text{Sv/h}$, issu du ^{137}Cs et de 36 à 49 $\mu\text{Sv/h}$ pour le ^{60}Co . (Si on les extrapole pour une source bêta placée à 4 mm du détecteur, ces valeurs seraient de 51 à 69 $\mu\text{Sv/h}$). Dans tous les cas, les performances finales ne pourraient être mesurées que suivant un protocole de mesure précis qui reste à définir.

Comme évoqué, le signal du deuxième scintillateur lent contient une information dépendante de l'énergie des gamma et un taux de comptage proportionnel au débit de dose. Cette information pourrait donc être utilisée pour réaliser un suivi du débit de dose en temps réel. Ce suivi pourrait permettre d'éviter de déclencher une alarme lorsque le bruit de fond augmente de façon brusque. Une autre piste d'amélioration possible serait d'utiliser cette information pour estimer le taux de comptage dû aux gamma dans les sélections en charges réalisées pour mesurer la contamination bêta. Cette piste nécessite d'être étudiée plus en détails.

Une remarque peut être faite pour améliorer les tests à venir. Pour des questions de difficulté d'organisation, les mesures effectuées pendant les deux campagnes de mesures en CNPE ont une incertitude principalement issue du dispositif expérimental : positionnement des détecteurs et mesure du débit de dose ambiant. Un banc de tests avec un protocole de mesures précis et reproductif ainsi qu'une mesure ou un calcul précis des débits de doses seront nécessaires afin de déterminer avec une meilleure précision la capacité de discrimination bêta/gamma des prototypes.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Dans le contexte de l'amélioration de l'efficacité du contrôle de la contamination surfacique bêta en zone et de la diminution des risques de dissémination, EDF/DPN a demandé le développement d'un contaminamètre innovant permettant d'effectuer une mesure directe de la contamination surfacique en zone contrôlée. Cette thèse a porté sur l'étude de la faisabilité d'un contaminamètre dont l'objectif était la détection d'une contamination bêta issue du ^{60}Co de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond gamma de $100 \mu\text{Sv/h}$. Cet objectif est extrêmement ambitieux car il consiste à détecter quelques dizaines de bêta par seconde alors que le détecteur est exposé à plusieurs millions de gamma par seconde.

Pour répondre à cet objectif, des simulations d'une dizaine de configurations de détecteurs différentes ont été réalisées afin de comparer leurs performances de discrimination bêta/gamma (Signal/Bruit). L'évaluation des performances des différentes configurations est réalisée à l'aide du seuil de décision défini par la norme ISO 11929.

Une première série de simulations a envisagé une solution simple à un étage de détection (gaz ou scintillateur). Ces simulations ont montré qu'il fallait que cet étage ait une masse surfacique ρx la plus faible possible. Ces détecteurs à un étage de détection, restent sensibles aux gamma, notamment de haute énergie, lorsque de la matière (PMT, mécanique ...) est présente autour de la zone de détection. Ils ne permettent pas de répondre aux exigences du cahier des charges.

Des détecteurs à deux étages de détection ont ensuite été étudiés. L'analyse classique, réalisant une coïncidence entre les deux étages, a été rejetée à cause de la faible efficacité bêta obtenue. Cette efficacité basse est due à la faible énergie des bêta du ^{60}Co ($T_{\beta, \text{max}} = 0,316 \text{ MeV}$). Une proportion importante de ces bêta s'arrêtent avant le deuxième étage, et ne sont pas retenus par l'analyse en coïncidence. Il a été montré qu'il fallait également prendre comme signal utile les particules qui s'arrêtent dans le premier étage. Deux analyses ont été proposées, la première prend en compte les particules ayant interagit au moins dans le premier étage (TS2) et la deuxième, celles qui n'interagissent que dans le premier étage (TS3), le deuxième étage servant de véto. Les solutions de détecteurs à deux étages de scintillateurs envisagées améliorent le rejet des gamma surtout de haute énergie par rapport aux solutions à un seul étage de détection.

Bien qu'ils n'atteignent pas les performances requises par le cahier des charges, deux Phoswich en scintillateurs plastiques optimisés avec deux analyses différentes ont été retenus et leurs prototypes ont été développés. Ils ont été testés avec des sources bêta et gamma et en zone, au CNPE de Chinon. Afin de pouvoir effectuer les essais sur site, en zone contrôlée, les prototypes ont dû être adaptés contre les risques de contamination.

Des mesures avec une source bêta étalon et un frottis, réalisé en zone, ont permis de mesurer l'efficacité bêta des prototypes étudiés. Cette efficacité est de 15% inférieure à celle obtenue en simulation. Cet écart est probablement dû à la distance source-détecteur en mesures, 8 à 10 mm au lieu de 4 mm en simulation comme préconisé par la norme ISO 60325. Des mesures avec des sources gamma ont permis d'étudier la sensibilité des détecteurs aux gamma en fonction de l'orientation des prototypes et de l'énergie des gamma. Comme attendu, la sensibilité des prototypes diminue quand l'énergie des gamma augmente. Ils ont une sensibilité deux fois plus importante au bruit de fond gamma s'ils sont exposés par l'avant ou par le côté à cause des interactions des gamma avec la matière environnante (air, béton, mécanique du détecteur). Leur performance de discrimination bêta/gamma est donc meilleure quand ils sont exposés par l'arrière ou quand leur face avant est en position de mesure contre une surface.

Des mesures en zone contrôlée dans des locaux d'un BAN du CNPE de Chinon avec des débits de dose de 5 à 80 $\mu\text{Sv/h}$ ont été effectuées afin d'étudier la réponse des prototypes dans un bruit de fond réel. La sensibilité aux gamma dans le BAN est comparable à celle obtenue avec la source gamma de ^{137}Cs . Ces résultats ont donc permis de conforter l'utilisation du ^{137}Cs comme source de référence pour représenter les gamma rencontrés sur site, comme recommandée par la norme ISO 60325. Pour tester la réponse bêta dans un bruit de fond gamma réaliste, une source bêta a été placée devant les prototypes d'une façon statique et dynamique dans ces locaux démontrant la capacité des prototypes à détecter une contamination bêta dans des débits de dose élevés (jusqu'à 80 $\mu\text{Sv/h}$).

Des méthodes d'analyses préliminaires appliquées à une mesure continue ont été abordées afin d'améliorer la performance du contaminamètre tout en restant conforme au cahier des charges, à savoir une mesure du signal de 4 secondes et un temps de réponse inférieur à 7 secondes. En appliquant un filtrage de 4 secondes et en prolongeant le temps de mesure du bruit de fond à 8 s, le Phoswich V2 permet d'avoir un seuil de décision de 0,4 Bq/cm^2 dans un bruit de fond gamma de 20 à 30 $\mu\text{Sv/h}$ dans le BAN ou en présence d'une source de ^{137}Cs . Les mesures ont été réalisées avec une distance source-scintillateurs de 8 à 10 mm. **En se plaçant dans la condition de la norme ISO 60325, qui recommande une distance source-détecteur de 4 mm, et en diminuant la distance entre la fenêtre d'entrée et les scintillateurs (diminution de 1 à 2 mm), les simulations montrent qu'il serait possible d'obtenir un seuil de décision de 0,4 Bq/cm^2 dans un bruit de fond gamma du ^{137}Cs ou réaliste de 30 à 40 $\mu\text{Sv/h}$. Bien qu'inférieure aux exigences du cahier des charges, sa performance est largement supérieure aux contaminamètres actuels, qui ne**

discriminerait que dans un bruit de fond gamma inférieur à 0,3 $\mu\text{Sv/h}$ (valeur extrapolée, en tenant compte du cahier des charges, à partir des données fournisseur).

Le développement de prototypes, avec des validations de performance à la fois dans le laboratoire et dans un environnement significatif sur site, atteint un niveau de maturité technologique TRL (Technology Readiness Level) [85] de 5 à 6.

Perspectives

Le protocole d'essais actuel, notamment en zone n'est pas rigoureux et a conduit à une variabilité de $\pm 15\%$ sur le taux de détection gamma. L'écart entre des mesures provient essentiellement de la méthode de mesure du débit de dose et des incertitudes sur les distances avec les sources. Afin de bien caractériser le prototype, il faudra définir un protocole d'essais plus rigoureux qui permet de mesurer le débit de dose avec une meilleure précision et fixe les conditions expérimentales.

D'autres pistes ont été envisagées lors de mon étude. La première associerait un étage de détecteur gazeux à un étage de scintillateur ("GazPlastScnt"), l'autre ajouterait un troisième étage de scintillateur inorganique faisant office de veto derrière un Phoswich en scintillateurs plastiques ("PhosYAP"). Ces solutions pourraient permettre d'améliorer les performances. Cependant, d'après l'exploitation à EDF, une solution incluant un détecteur gazeux aurait une robustesse limitée sur le terrain. L'ajout d'un troisième étage de scintillateur inorganique engendre, quant à lui, des difficultés de mise en œuvre : prix, séparation des signaux des trois scintillateurs etc notamment pour le détecteur à grande taille. Ces points ont fait que nous ne les avons pas retenues pour la thèse. Ils constituaient cependant des pistes d'amélioration si les contraintes de mise en œuvre étaient acceptables.

Une autre piste consiste en l'étude de méthodes d'analyse plus avancées, comme un système de déclenchement plus sophistiqué qui pourraient permettre de diminuer la probabilité de fausse alarme du prototype.

Bibliographie

- [1] R. Guers, F. Bidard, and P. Colson et al. *Mémento de la radioprotection en exploitation*. EDF, 2014.
- [2] P. Blanc, M. Hamel, C. Dehé-Pittance, L. Rocha, R.B. Pansu, and Stéphane Normand. Neutron/gamma pulse shape discrimination in plastic scintillators : Preparation and characterization of various compositions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 750 :1 – 11, 2014.
- [3] C.M. Whitney, L. Soundara-Pandian, E.B. Johnson, S.Vogel, B. Vinci, M. Squillante, J. Glodo, and J.F. Christian. Gamma–neutron imaging system utilizing pulse shape discrimination with clyc. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 784 :346 – 351, 2015. Symposium on Radiation Measurements and Applications 2014 (SORMA XV).
- [4] Portable contamination monitor como 170 / como 170f with thin-layer plastic scintillation detector for highly sensitive measurement of α , β and γ contaminations. Technical report.
- [5] A.T. Farsoni, B. Alemayehu, A. Alhawsawi, and E.M. Becker. Real-time pulse-shape discrimination and beta–gamma coincidence detection in field-programmable gate array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 712 :75 – 82, 2013.
- [6] Site web de bcp100, bertin instruments, consulté le 24 septembre 2018. www.bertin-instruments.com/product/alphabeta-contamination-control/saphyrad-innovative-probes/.
- [7] Site web de radeye ab100, thermo fisher scientific, consulté le 24 septembre 2018. www.thermofisher.com/order/catalog/product/4250683.
- [8] Site web de lb123, berthold, consulté le 24 septembre 2018. www.gammadata.se/products/radiation-detection/obsolete/lb-123-umo/.
- [9] Cabv 31 alpha and beta contamination monitors for clothes and floors, consulté le 24 septembre 2018. canberra.com/products/hp_radioprotection/pdf/CABV31-SS-C36430.pdf.
- [10] Site web de radeye fht111m, thermo fisher scientific, consulté le 24 septembre 2018. www.interphysix.com/index.php?id_product=919&controller=product&id_lang=1.
- [11] W.R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments : A How to Approach*. Springer-Verlag, 1987.
- [12] Site web du nist pour la définition du parcours csda, consulté le 24 septembre 2018. physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html.
- [13] R. Antoni and L. Bourgois. *Physique appliquée à l'exposition externe - Dosimétrie et radioprotection*. Springer, 2013.

- [14] Site web du estar pour le pouvoir d'arrêt d'électrons dans le plastique, consulté le 24 septembre 2018. physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html.
- [15] Site web du nist pour le coefficient d'atténuation de photons dans le plastique et dans le zns, consulté le 24 septembre 2018. physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html.
- [16] T. Baltakments. A simple method for determining the maximum energy of beta emitters by absorption measurements. *Nuclear Instruments and Methods*, 82 :264 – 268, 1970.
- [17] G.F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. Wiley, 2000.
- [18] J. Foos, E. Bonfand, and J.N. Rimbart. *Manuel de radioactivité, Atome, noyau, désintégrations, énergie nucléaire, interactions, applications*. Hermann, 2012.
- [19] F. Sauli. The gas electron multiplier (gem) : Operating principles and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 805 :2 – 24, 2016.
- [20] M. Moszyński, M. Kapusta, D. Wolski, W. Klamra, and B. Cederwall. Properties of the yap : Ce scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 404(1) :157 – 165, 1998.
- [21] Propriété du scintillateur csi, juillet 2018. www.crystals.saint-gobain.com/.
- [22] R. Casanovas, J.J. Morant, and M. Salvadó. Energy and resolution calibration of nai(tl) and labr3(ce) scintillators and validation of an egs5 monte carlo user code for efficiency calculations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 675 :78 – 83, 2012.
- [23] Saint Gobain. Scintillation products note - saint-gobain crystals. Technical report, International Organization for Standardization, 2009. www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/brilliance_performance_summary.pdf.
- [24] V.D. Kovaltchouk, G.J. Lolos, Z. Papandreou, and K. Wolbaum. Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 538(1) :408 – 415, 2005.
- [25] CsI(Na) sodium activated cesium iodide. Technical report.
- [26] M. Nakhostin and P.M. Walker. Application of digital zero-crossing technique for neutron–gamma discrimination in liquid organic scintillation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 621(1) :498 – 501, 2010.
- [27] Y. Tamagawa, Y. Inukai, I. Ogawa, and M. Kobayashi. Alpha–gamma pulse-shape discrimination in gd3al2ga3o12 (gagg) :ce3+ crystal scintillator using shape indicator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 795 :192 – 195, 2015.
- [28] Propriété du scintillateur plastique, consulté le 24 septembre 2018. eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/.
- [29] Site web de l'asn, consulté le 24 septembre 2018. www.asn.fr/Lexique/.
- [30] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRP*, 26(3-4), 1996.

- [31] N. Petoussi-Hens, W.E. Bolch, K.F. Eckerman, A. Endo, N. Hertel, J. Hunt, M. Pelliccioni, H. Schlattl, and M. Zankl. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. *ICRP*, 40(2-5), 2010.
- [32] ICRP60. Recommendations of the icrp, ann icrp. *ICRP*, 21(1-3), 1992.
- [33] L. Millet, B. Lindivat, and P. Rambault. Directive di 104 : zonage propreté/déchets. *EDF-DPN*, 2014.
- [34] ISO. Détermination de la limite de détection et du seuil de décision des mesurages des rayonnements ionisants - principes fondamentaux et application aux mesurages par comptage, sans l'influence du traitement d'échantillon. ISO 11929, International Organization for Standardization, 2016.
- [35] Site web du dosimex, consulté le 24 septembre 2018. dosimex.com/.
- [36] A. VIVIER. Analyse probabiliste des mesures nucléaires à bas niveau. *SPECTRA ANALYSE*, 302, 2015.
- [37] J.L. Pico et al. Guide de bonnes pratiques des laboratoires de mesure de radioactivité en situation post-accidentelle. Technical report, IRSN DEI/STEME, 2011.
- [38] ISO. Évaluation de la contamination de surface : Émetteur beta (énergie beta maximale supérieure à 0,15 mev) et émetteur alpha. ISO 7503, International Organization for Standardization, 1988.
- [39] ISO. Instrumentation pour la radioprotection – contaminamètres et moniteurs de contamination alpha, bêta et alpha/bêta (énergie des bêta > 60 kev). ISO 60325, International Organization for Standardization, 2002.
- [40] Zns(ag) zinc sulfide scintillation material. Technical report.
- [41] Site web de mini trace bêta, bertin instruments, consulté le 24 septembre 2018. www.bertin-instruments.fr/produits/debit-dose-radiametres/minitrace-csdf/.
- [42] Fiche produit 6150 ad17 - saphymo, bertin instruments, consulté le 24 septembre 2018. www.saphymo.de/.
- [43] Site web de lb124, berthold, consulté le 24 septembre 2018. www.berthold.com/en/rp/lb-124-scint-contamination-monitor.
- [44] Site web de lb124, berthold, consulté le 24 septembre 2018. www.berthold.com/en/rp/lb-124-b-xenon-contamination-monitor.
- [45] Site web de radeye b20er, thermo fisher scientific, consulté le 24 septembre 2018. www.thermofisher.com/order/catalog/product/4250685.
- [46] Sb-100 sonde bêta data sheet, consulté le 24 septembre 2018. canberra.com/products/hp_radioprotection/pdf/SB-100-SS-C36943.pdf.
- [47] Sbm-2d soft beta dual detector probe data sheet. Technical report, Canberra Mirion.
- [48] Site web de sonde ss600 southern scientific, consulté le 24 septembre 2018. www.southernscientific.co.uk/products-by-manufacturer/southern-scientific/radhound-probes-accessories/ss600-probe.
- [49] Site web de sonde ss440b southern scientific, consulté le 24 septembre 2018. www.southernscientific.co.uk/products-by-type/contamination-instruments/radhound-probes-accessories/ss440-b-probe.

- [50] Site web de sonde dolphy beta, carmelec, consulté le 24 septembre 2018. www.carmelec.fr/dolphy-beta.
- [51] Site web de passeur d'échantillons g5030 itech instruments, consulté le 24 septembre 2018. www.itech-instruments.com/G5030_F.html.
- [52] Site web de geant4, consulté le 24 septembre 2018. geant4.web.cern.ch/.
- [53] Site web de root, consulté le 24 septembre 2018. root.cern.ch/.
- [54] Site web de cern, consulté le 24 septembre 2018. home.cern/.
- [55] CERN. *Book For Application Developers, Release 10.4*. CERN, 2017.
- [56] Y. Luo. Rapport de stage : Étude de faisabilité d'un détecteur dédié à la discrimination β/γ . 2015.
- [57] H. Nakamura, K. Hisashi, and R. Hazama. Radiation measurements with heat-proof polyethylene terephthalate bottles. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2122) :2847–2856, 2010.
- [58] M.Kapustaab, M.Balcerzyka, M.Moszyńska, and J.Pawelkec. A high-energy resolution observed from a yap : Ce scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999.
- [59] Site web du eljen ej550, consulté le 24 septembre 2018. eljentechnology.com/products/accessories/ej-550-ej-552.
- [60] Site web de eljen ej212, consulté le 24 septembre 2018. eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212.
- [61] Site web du eljen ej240, consulté le 24 septembre 2018. eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-240.
- [62] Photomultiplier tubes catalogue, consulté le 24 septembre 2018. hallc-web.jlab.org/DocDB/0008/000809/001/PhotonisCatalog.pdf.
- [63] Y. Shan. Rapport de stage : Optimisation d'un guide de lumière. 2016.
- [64] Photomultiplier tubes for gamma camera. Technical report.
- [65] R.P. Daubeny, C.W. Bunn, and C.J. Brown. The crystal structure of polyethylene terephthalate. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 226(1167) :531–542, 1954.
- [66] Site web du eljen ej500, consulté le 24 septembre 2018. eljentechnology.com/products/accessories/ej-500.
- [67] Site web du nupil ls6943, consulté le 24 septembre 2018. nupil.com/product/ls-6943_optical-thermoset.
- [68] Site web du phillips 776, consulté le 24 septembre 2018. www.phillipsscientific.com/preview/776pre.htm.
- [69] Site web du texas instruments, consulté le 24 septembre 2018. www.ti.com/lit/ds/symlink/th4303.pdf.
- [70] Site web du faster : Fast acquisition system for nuclear research, consulté le 24 septembre 2018. faster.in2p3.fr.

- [71] Clovis Divay. *Study of ^{12}C fragmentation for hadrontherapy*. Theses, Normandie Université, October 2017.
- [72] Site web de hamamatsu ej1198-27, consulté le 24 septembre 2018. www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/E1198-27/index.html.
- [73] Eckert & Ziegler. Calibration standards and instruments. product information. Technical report, 2009. www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/.
- [74] D. Delacroix, J.P. Guerre, and P. Leblanc. *Guide pratique radionucléides et radioprotection (Nelle édition) : Manuel pour la manipulation de substances radioactives dans les laboratoires de faible et moyenne activité*. EDP Sciences, 2012.
- [75] Mirion. RadiagemTM2000 radiamètre individuel portable :débit de dose et contamination.
- [76] R.P. Kelley, A. Enqvist, and K.A. Jordan. Pulse shape discrimination in helium-4 scintillation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 830 :44 – 52, 2016.
- [77] C. Liao and H. Yang. Pulse shape discrimination using ej-299-33 plastic scintillator coupled with a silicon photomultiplier array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 789 :150 – 157, 2015.
- [78] A.M. Maghraby. Applying the conventional moving average filter for estimation of low radiation doses using epr spectroscopy : Benefits and drawbacks. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 737 :71 – 75, 2014.
- [79] S.W. Smith. *The Scientist and Engineering's Guide to Digital Signal Processing*, volume Chapter 15. Newnes, 1997.
- [80] D.D. DiJulio, C.P. Cooper-Jensen, H. Perrey, K. Fissum, E. Rofors, J. Scherzinger, and P.M. Bentley. A polyethylene-b4c based concrete for enhanced neutron shielding at neutron research facilities. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 859 :41 – 46, 2017.
- [81] APVL. Manuel d'utilisation radiamètre fh 40 g.
- [82] LEA-CERCA. Catalogue version juillet 2017 - g-doc-854 rev 00 - sources ponctuelles et étendues. Technical report, 2017. www.lea-sources.com/fr/areva-lea-cerca.html.
- [83] ISO. Sources de référence — Étalonnage des contrôleurs de contamination de surface — Émetteurs alpha, bêta et photoniques. ISO 8769, International Organization for Standardization, 2016.
- [84] Site web de mirion nt200, consulté le 24 septembre 2018. www.modes-d-emploi.com/manuals/338267/mirion-technologies-nt-200.html.
- [85] Site web de nasa, consulté le 24 septembre 2018. www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html.
- [86] Alpha/beta probe sab-100, consulté le 24 septembre 2018. www.canberra.com/products/hp_radioprotection/csp-probes.asp.

-
- [87] Martin Janecek and William Moses. Simulating scintillator light collection using measured optical reflectance. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(3), 2010.
- [88] Site web du shalom electro-optics technology, consulté le 24 septembre 2018. www.shalomeo.com/.
- [89] E. Abboud. On viviani's theorem and its extensions. *College Mathematics Journal*, 41, 2010.
- [90] Site web du eljen ej444, consulté le 24 septembre 2018. eljentechnology.com/products/zinc-sulfide-coated/ej-444.

Annexe A

Définition des sources gamma

En radioprotection pratique, la contamination bêta est donnée en activité surfacique, $0,4 \text{ Bq/cm}^2$, dans notre cas. Le bruit de fond lui est donné en débit de dose, $100 \mu\text{Sv/h}$ dans notre cas. Ces grandeurs sont difficilement utilisables comme données d'entrée de simulation. La première étape a donc été de traduire ces données "pratiques" en données d'entrée (nombre de particules à envoyer). Avant de simuler le détecteur, il a donc fallu commencer par définir les sources bêta et gamma à partir des données de radioprotection.

Le spectre en énergie des gamma dans le bâtiment réacteur n'est pas défini précisément et varie d'une centrale à l'autre. Des gamma mono-énergétique ont donc été simulés, allant de $0,1$ à $1,5 \text{ MeV}$ de façon à prendre en compte la gamme complète d'énergies susceptible d'être rencontrée sur site. Ces gamma sont représentatifs de la gamme en énergie du ^{60}Co ($1,17$ et $1,33 \text{ MeV}$) qui représente la contribution principale du bruit de fond en CNPE. En plus, les gamma peuvent provenir de toutes les directions de façon isotrope ou d'une direction précise en cas d'existence d'un point chaud. La première étape du travail a donc consisté à transformer le bruit de fond de $100 \mu\text{Sv/h}$ en flux de gamma pour différentes configurations de source.

A.1 Coefficients de conversion fluence-dose de CIPR

Comme présenté dans la section 2.1.3, les données comme les facteurs de conversion fluence-équivalent de dose et fluence-dose efficace disponibles dans les CIPR74 et CIPR116 sont utiles afin de transformer un débit de dose en flux de gamma. Ces publications fournissent les coefficients de conversion permettant d'obtenir la dose opérationnelle en profondeur $H^*(10)$ en fonction de la fluence et de l'énergie des gamma. $H^*(10)$ est la grandeur opérationnelle qui représente l'équivalent de dose ambiant à une profondeur de 10 mm dans les tissus. C'est une grandeur mesurable et majorante de la dose équivalent en profondeur. Cependant, les coefficients de conversion disponibles dans les recommandations de la CIPR sont définis à partir de modèles spécifiques, ce qui rend leur application directe difficile.

La CIPR74 donne le coefficient $H^*(10)/\Phi$ en pSv.cm^2 (Φ étant la fluence des photons émis, en $1/\text{cm}^2$) obtenu grâce à la sphère ICRU (cf. 2.1.3), comme présenté dans le Tableau

A.1. La grandeur $H^*(10)$ représente la dose à une profondeur de 10 mm de la face avant de la sphère. La recommandation ne donne donc les coefficients $H^*(10)/\Phi$ que pour une source monodirectionnelle ce qui n'est pas applicable pour des gamma venant de toutes les directions comme rencontré sur site. Il faut donc chercher une documentation qui permet d'obtenir $H^*(10)$ avec des sources venant de directions variées.

Figure A.1 Tableau des facteurs de conversion fluence-équivalent de dose (en couleur) pour des photons incidents mono-énergétiques. Tableau extrait de la CIPR74 [30]

Table A.21. Conversion coefficients^a for the ambient dose equivalent, $H^*(10)$, and directional dose equivalent, $H'(0.07,0^\circ)$, from photon fluence and air kerma free-in-air

Photon energy (MeV)	$H^*(10)/K_a$ (Sv/Gy)	$H'(0.07,0^\circ)/K_a$ (Sv/Gy)	K_a/Φ (pGy cm ²)	$H^*(10)/\Phi$ (pSv cm ²)	$H'(0.07,0^\circ)/\Phi$ (pSv cm ²)
0.010	0.008	0.95	7.60	0.061	7.20
0.015	0.26	0.99	3.21	0.83	3.19
0.020	0.61	1.05	1.73	1.05	1.81
0.030	1.10	1.22	0.739	0.81	0.90
0.040	1.47	1.41	0.438	0.64	0.62
0.050	1.67	1.53	0.328	0.55	0.50
0.060	1.74	1.59	0.292	0.51	0.47
0.080	1.72	1.61	0.308	0.53	0.49
0.100	1.65	1.55	0.372	0.61	0.58
0.150	1.49	1.42	0.600	0.89	0.85
0.200	1.40	1.34	0.856	1.20	1.15
0.300	1.31	1.31	1.38	1.80	1.80
0.400	1.26	1.26	1.89	2.38	2.38
0.500	1.23	1.23	2.38	2.93	2.93
0.600	1.21	1.21	2.84	3.44	3.44
0.800	1.19	1.19	3.69	4.38	4.38
1	1.17	1.17	4.47	5.20	5.20
1.5	1.15	1.15	6.12	6.90	6.90
2	1.14	1.14	7.51	8.60	8.60
3	1.13	1.13	9.89	11.1	11.1
4	1.12	1.12	12.0	13.4	13.4
5	1.11	1.11	13.9	15.5	15.5
6	1.11	1.11	15.8	17.6	17.6
8	1.11	1.11	19.5	21.6	21.6
10	1.10	1.10	23.2	25.6	25.6

^aData compiled from *ICRU Report 47* (1992a) using Hubbell and Seltzer (1995). The K_a/Φ data are slightly different from those used for the protection quantities (see Table A.1) which used earlier data from Hubbell (1982).

La CIPR116, le document le plus récent, fournit des coefficients de conversion fluence-dose efficace pour un rayonnement défini (type de rayonnement, énergie de particule, direction d'émission). Un extrait de ces coefficients est présentés dans le Tableau A.2. Néanmoins, ces coefficients sont obtenus par des conditions qui ne correspondent pas aux conditions directionnelles que le détecteur rencontre, surtout pour le cas de la source isotrope. En condition réelle, le détecteur reçoit des gamma de toutes les directions alors que dans la recommandation de la CIPR, le fantôme est irradié par une source gamma parallèle et avec une rotation du fantôme (ISO).

Étant donné que les coefficients de conversion ne s'appliquent pas directement pour la définition d'un flux de gamma isotrope, il a fallu trouver un modèle de référence qui permette de prendre en compte les conditions d'exposition rencontrées sur le terrain et qui donne des résultats similaires à ceux de la CIPR116. Une fois ce modèle défini, le flux de gamma

Figure A.2 Tableau des facteurs de conversion fluence-dose efficace pour des photons incidents mono-énergétiques en fonction de la géométrie : antéropostérieure (AP), postéro-antérieure (PA), latérale (LAT), rotationnelle (ROT), isotrope (ISO). Tableau extrait de la CIPR116 [31]

Table A.1. Photons: effective dose per fluence, in units of pSv cm², for mono-energetic particles incident in various geometries.

Energy (MeV)	AP	PA	LLAT	RLAT	ROT	ISO
0.01	0.0685	0.0184	0.0189	0.0182	0.0337	0.0288
0.015	0.156	0.0155	0.0416	0.0390	0.0664	0.0560
0.02	0.225	0.0260	0.0655	0.0573	0.0986	0.0812
0.03	0.313	0.0940	0.110	0.0891	0.158	0.127
0.04	0.351	0.161	0.140	0.114	0.199	0.158
0.05	0.370	0.208	0.160	0.133	0.226	0.180
0.06	0.390	0.242	0.177	0.150	0.248	0.199
0.07	0.413	0.271	0.194	0.167	0.273	0.218
0.08	0.444	0.301	0.214	0.185	0.297	0.239
0.1	0.519	0.361	0.259	0.225	0.355	0.287
0.15	0.748	0.541	0.395	0.348	0.528	0.429
0.2	1.00	0.741	0.552	0.492	0.721	0.589
0.3	1.51	1.16	0.888	0.802	1.12	0.932
0.4	2.00	1.57	1.24	1.13	1.52	1.28
0.5	2.47	1.98	1.58	1.45	1.92	1.63
0.511	2.52	2.03	1.62	1.49	1.96	1.67
0.6	2.91	2.38	1.93	1.78	2.30	1.97
0.662	3.17	2.62	2.14	1.98	2.54	2.17
0.8	3.73	3.13	2.59	2.41	3.04	2.62
1.0	4.49	3.83	3.23	3.03	3.72	3.25
1.117	4.90	4.22	3.58	3.37	4.10	3.60
1.33	5.59	4.89	4.20	3.98	4.75	4.20
1.5	6.12	5.39	4.68	4.45	5.24	4.66
2.0	7.48	6.75	5.96	5.70	6.55	5.90

correspondant à un débit de dose donné pourra être obtenu par simulation à partir de l'énergie déposée dans le détecteur.

Une première simulation d'une sphère ICRU a été réalisée pour s'assurer que la simulation Geant4 reproduit bien le résultats de la CIPR74. Après cette validation du code, une modification de la sphère ICRU va être réalisée pour obtenir un modèle de référence.

A.2 Simulation du modèle de la CIPR74

L'objectif de la première simulation est de valider le code de simulation en comparant les résultats obtenus à ceux de la CIPR74 pour une source monodirectionnelle.

Un schéma du modèle simulé est présenté sur la Figure A.3 qui représente une sphère ICRU de rayon 15 cm (en bleu), irradiée par des photons parallèles. En calculant l'énergie déposée dans la sphère d'1 cm de rayon (en jaune), qui se trouve à 1 cm de la surface sphérique, la dose qui y est déposée peut être obtenue. En pondérant la dose absorbée par le facteur Wr (1 pour gamma) dépendant du type de particule, la dose équivalente (H) est calculée.

Le flux de gamma par unité de surface équivalent à 100 $\mu\text{Sv/h}$ se calcule avec la formule A.1 :

$$\phi_{simu}[s^{-1}cm^{-2}] = \frac{100[\mu\text{Sv/h}]/2.7 \cdot 10^{-4}[h/s] \cdot 10^{-6}[\text{Sv}/\mu\text{Sv}]}{\omega_R[\text{Sv}/\text{Gy}] E[\text{MeV}]/m[\text{kg}] \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}[\text{J}/\text{MeV}] \text{ surface de source}[cm^2]} \quad (\text{A.1})$$

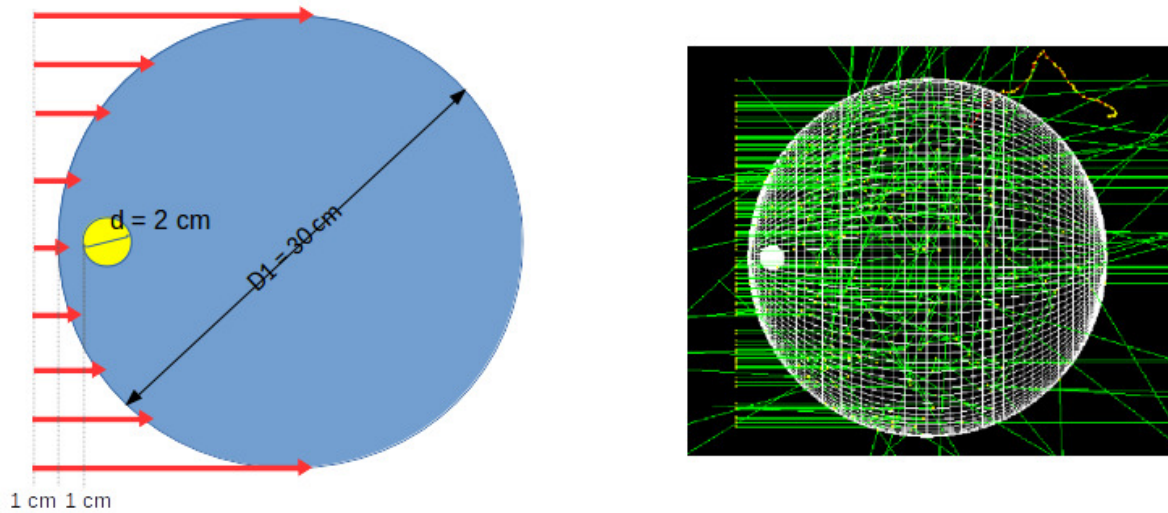


Figure A.3 Schéma explicatif (gauche) et schéma de simulation (droite) du modèle simulé qui s'approche au modèle de CIPR74.

avec E l'énergie déposée dans la sphère centrale, m la masse de la sphère de rayon de 1 cm ; ω_R le facteur de pondération de nocivité de rayonnement (défini dans la section 2.1.2). Le flux obtenu (ϕ_{CIPR}) à partir des coefficients de conversion de la CIPR est quant à lui donné par la formule (A.2) :

$$\phi_{CIPR}[s^{-1}cm^{-2}] = \frac{100[\mu Sv/h]/2.7 \cdot 10^{-4}[h/s] \cdot 10^6[pSv/\mu Sv]}{\text{coefficient de conversion}[pSv cm^2]} \quad (A.2)$$

Le coefficient de conversion est le facteur de conversion fluence-équivalent de dose pour la CIPR74, et fluence-dose efficace pour la CIPR116. Il permet de convertir les grandeurs physiques aux grandeurs opérationnelles ou de protection.

Afin de comparer le flux simulé (ϕ_{simu}) et le flux calculé à partir des coefficients CIPR (ϕ_{CIPR}), leur écart est représenté par l'expression (A.3) :

$$\text{écart} = \frac{\phi_{simu} - \phi_{CIPR}}{\phi_{simu} + \phi_{CIPR}} \cdot 2 \quad (A.3)$$

La Figure A.5 montre l'écart de flux en fonction de l'énergie gamma envoyé. L'accord entre le flux CIPR74 et le flux simulé obtenu par Geant4 est bon, avec un écart compris entre -1% à 4%.

Une même démarche a été réalisée pour la CIPR116. Concernant la différence entre le flux simulé et le flux CIPR116, l'écart est compris entre -17% et -10%. Ces valeurs plus élevées que pour la CIPR74 peuvent s'expliquer par les fantômes utilisés par CIPR116, qui ne sont plus des sphères. Cet écart reste cependant acceptable.

A.3 Modèle de référence pour les simulations

Comme le modèle de CIPR74 n'est pas symétrique, il n'est applicable que pour la source monodirectionnelle qui arrive perpendiculairement à la sphère. Un modèle général doit donc être établi pour s'adapter aux gamma issus de différentes directions. Un modèle symétrique doit être développé pour que la dose reste identique quelque soit la direction de la source. Représentée sur la Figure A.4, une sphère de diamètre Φ_1 est irradiée par des gamma monodirectionnels. Une sphère de diamètre ($\Phi_1 - 2$ cm) sert de zone sensible pour calculer la dose reçue. Le premier centimètre de profondeur n'est pas utilisé pour le calcul de dose afin d'obtenir la dose en profondeur à 10 mm. L'énergie déposée dans la sphère centrale est donc utilisée pour le calcul de la dose, permettant de déduire le flux équivalent à $100 \mu\text{Sv/h}$. Ce flux, appelé flux simulé, sera comparé au flux calculé avec le coefficient donné par la CIPR116. Le diamètre Φ_1 de la sphère sera modifiée afin de trouver un modèle donnant le résultat le plus proche du flux calculé par le coefficient CIPR116 (cf. Tableau A.2).

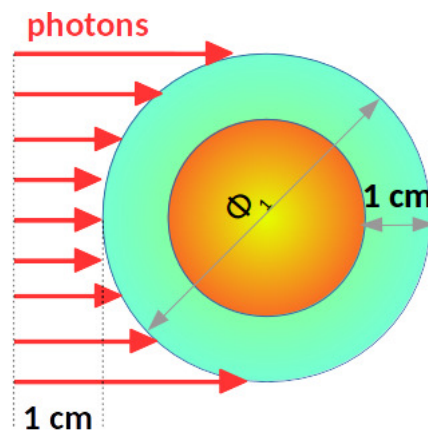


Figure A.4 Le modèle simulé pour trouver un modèle de référence en variant le diamètre Φ_1 de 5, 10, 20 cm. La source est envoyée de façon monodirectionnelle.

Différentes sphères de dimensions différentes ($R = 25, 50, 100$ mm) ont été simulées afin de trouver le meilleur modèle de référence. Une sphère plus petite ($R < 25$ mm) n'a pas été simulée car le nombre d'interactions gamma est alors faible et entraînerait des durées de simulation trop importantes. La simulation montre que quelque soit le type de source, le dépôt d'énergie dans la sphère centrale reste identique.

La Figure A.6 présente l'écart relatif entre le flux simulé et le flux CIPR116 pour la source monodirectionnelle. Plus la sphère est petite, meilleur est l'accord entre notre modèle et la CIPR116. Avec un rayon de 25 mm, l'écart avec la CIPR116 est inférieur à 30%. Cela montre que le modèle de sphère a une bonne cohésion avec le résultat de CIPR116 pour la source monodirectionnelle.

Par conséquent, la sphère avec un rayon de 25 mm est donc choisie comme le modèle de référence, avec une meilleure cohérence aux CIPR116 pour la source monodirectionnelle, sachant que dans le cas de la source monodirectionnelle, la fluence est sur-estimée par notre simulation ($< 30\%$), pourtant pour les basse énergies.

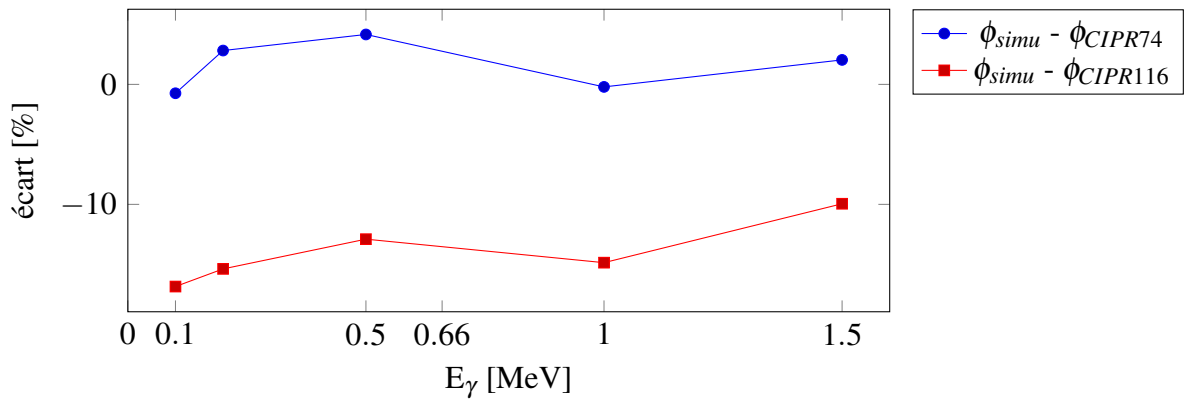


Figure A.5 L'écart entre le flux simulé et le flux calculé avec le coefficient de conversion CIPR74/CIPR116.

$$\text{écart}[\%] = \frac{\phi_{simu} - \phi_{CIPR}}{\phi_{simu} + \phi_{CIPR}} \times 2 \times 100\%$$

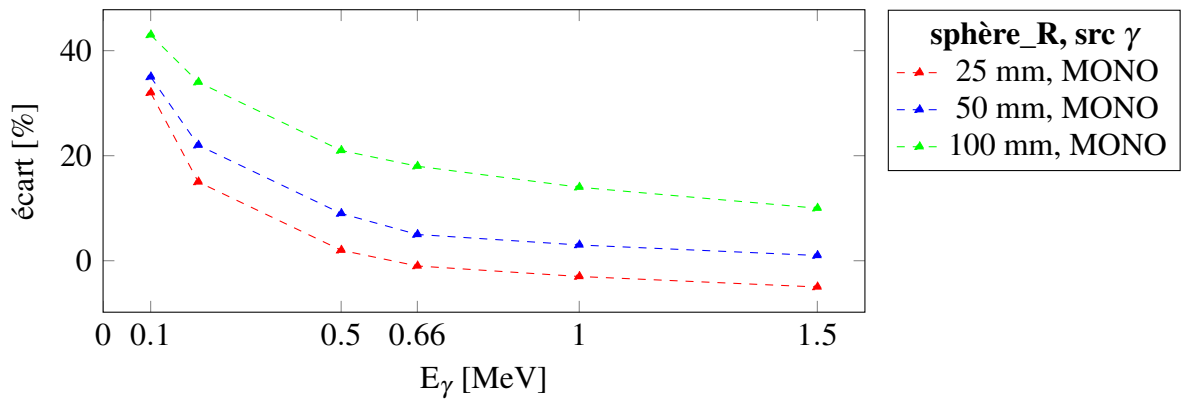


Figure A.6 L'écart (en %) entre le flux simulé avec différentes tailles de sphères et le flux calculé avec le coefficient de conversion fluence-dose efficace de la CIPR116. La source gamma est envoyée de façon monodirectionnelle (MONO) cf. Figure A.4.

A.4 Flux de gamma équivalent à 100 $\mu\text{Sv/h}$

Les sources de gamma monoénergétiques et un spectre gamma continue sur site seront définies. Pour notre étude, quatre types de sources gamma typiques sont définies : monodirectionnelle venant de l'avant, ponctuelle à 10 cm et 50 cm du détecteur et isotrope.

La définition de ces quatre sources appliquées à la sphère de rayon 25 mm défini dans le paragraphe précédent est représentée en Figure A.7. Une approximation a été faite pour la source isotrope afin de diminuer le temps de calcul. Les points de départ sont distribués de manière aléatoire sur une surface sphérique concentrique de rayon 50 cm. Les gamma sont tirés aléatoirement dans un angle solide formé par le point d'émission et la surface de la sphère. Grâce à ce modèle, un flux par stéradian est obtenu, qui est applicable à une surface différente, comme celle d'un détecteur.

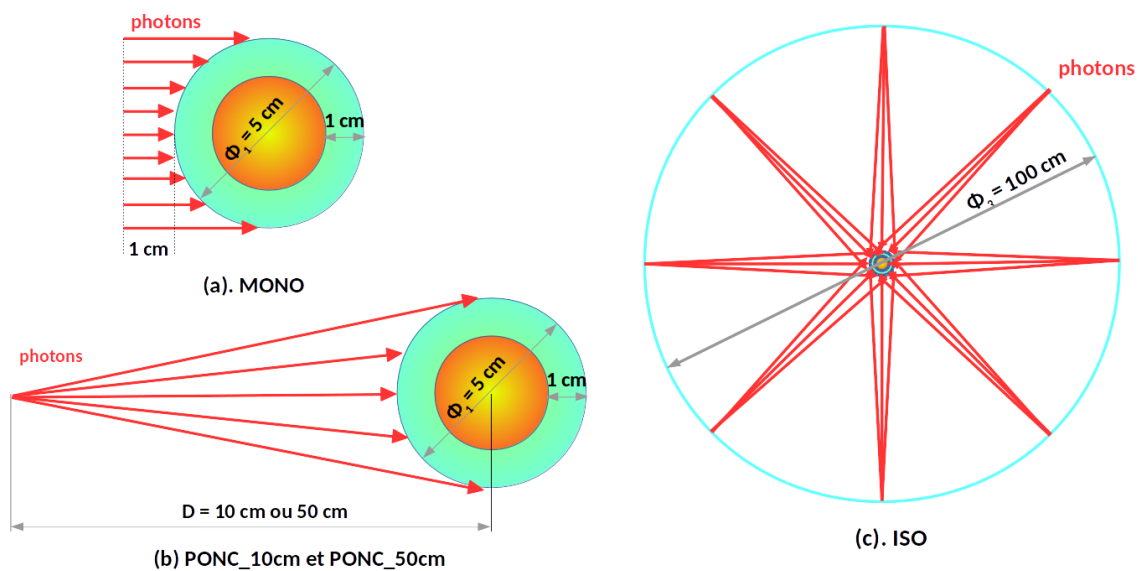


Figure A.7 Les 4 sources gamma définies en simulation à l'aide de la sphère de référence avec un diamètre de 5 cm. Les 4 sources : (a). monodirectionnelle (MONO) ; (b). ponctuelle à 10 cm (PONC_10cm), ponctuelle à 50 cm (PONC_50cm) et (c). isotrope (ISO).

Deux sources ponctuelles ont été simulées, positionnées à 10 cm et 50 cm du détecteur, un flux par steradian est obtenu. Il permet de prendre en compte l'effet de la direction d'émission des gamma comme le cas en présence d'un point chaud.

Source gamma mono-énergétique Le Tableau A.1 présente le flux de gamma correspondant à un débit de dose de 100 $\mu\text{Sv/h}$ à envoyer sur un détecteur de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ pour les quatre sources gamma définies. Avec le modèle symétrique, les flux sont comparables pour toutes les sources allant de $6 \cdot 10^5$ pour des gamma de 1,5 MeV à 10^7 pour des gamma de 0,1 MeV.

Le flux de photons à envoyer diminue avec son énergie car plus d'énergie sera déposée par gamma pour les hautes énergies. L'énergie moyenne déposée par gamma dans la sphère

Tableau A.1 Flux de gamma (en s^{-1}) simulé pour 4 sources : monodirectionnelle (MONO) ponctuelle à 10 cm (PONC_10cm), ponctuelle à 50 cm (PONC_50cm) et isotrope (ISO) correspondant à un débit de dose de 100 $\mu\text{Sv/h}$ sur un détecteur de surface $12 \times 12 \text{ cm}^2$

E [MeV]	MONO	PONC_10cm	PONC_50cm	ISO
0,1	$1,06 \times 10^7$	$1,07 \times 10^7$	$1,07 \times 10^7$	$1,07 \times 10^7$
0,2	$4,65 \times 10^6$	$4,70 \times 10^6$	$4,69 \times 10^6$	$4,68 \times 10^6$
0,5	$1,65 \times 10^6$	$1,67 \times 10^6$	$1,66 \times 10^6$	$1,66 \times 10^6$
0,66	$1,25 \times 10^6$	$1,27 \times 10^6$	$1,26 \times 10^6$	$1,26 \times 10^6$
1	$8,62 \times 10^5$	$8,70 \times 10^5$	$8,64 \times 10^5$	$8,63 \times 10^5$
1,5	$6,23 \times 10^5$	$6,32 \times 10^5$	$6,27 \times 10^5$	$6,29 \times 10^5$

change de 0,0017 MeV à 0,029 MeV (17 fois plus élevé) quand l'énergie de gamma augmente de 0,1 à 1,5 MeV pour la source isotrope. Pour obtenir le même débit de dose, il faut donc envoyer 17 fois plus de gamma de 0,1 MeV que de 1,5 MeV.

Spectre en énergie des gamma en CNPE La Figure A.8 présente des spectres de gamma mesurés par un détecteur Germanium dans 4 centrales. Il apparaît clairement des fluctuations en fonction du site et des effets de détecteurs (fronts Compton,) mais comme la géométrie des détecteurs n'est pas connue, nous sommes incapable de corriger le spectre mesuré par la réponse du détecteur pour trouver le spectre réel sur site. Pour les besoins des simulations, le spectre en énergie a donc été reproduit tel quel, car il prend quand même en compte les contributions des isotopes du Cobalt et la dégradation de ce spectre (à cause des diffusions) à basse énergie. Dans l'étude, le spectre présenté sur la Figure A.9, sera utilisé en tant que "spectre réaliste" pour les simulations.

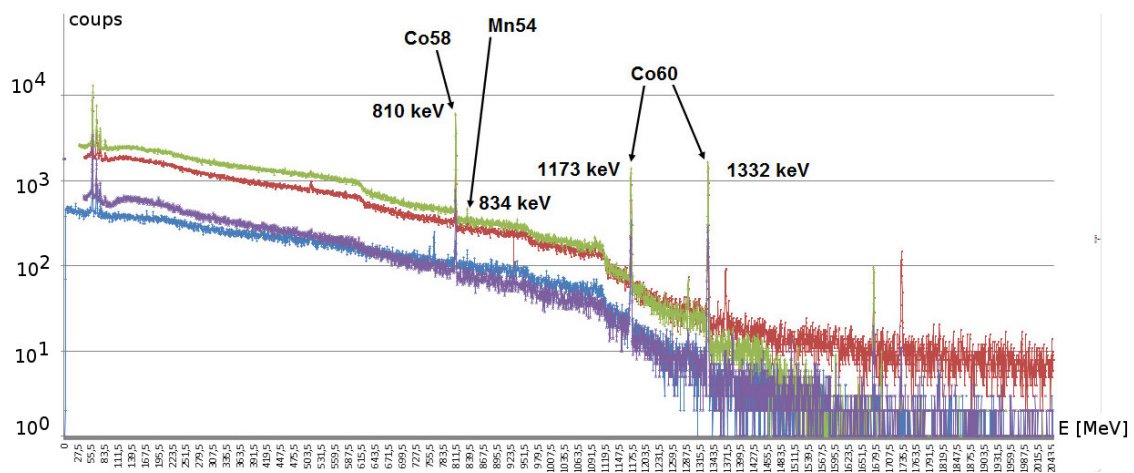


Figure A.8 Spectre gamma expérimental mesuré dans 4 centrales différentes par un détecteur Germanium

Comme précédemment, il est indispensable de définir le flux de gamma à envoyer sur le détecteur pour atteindre un bruit de fond gamma de 100 $\mu\text{Sv/h}$ pour ce spectre source gamma. En distribuant les gamma suivant ce spectre en énergie, la simulation donne un flux de 1,6 million γ/s à envoyer vers le détecteur quelle que soit la forme de la source.

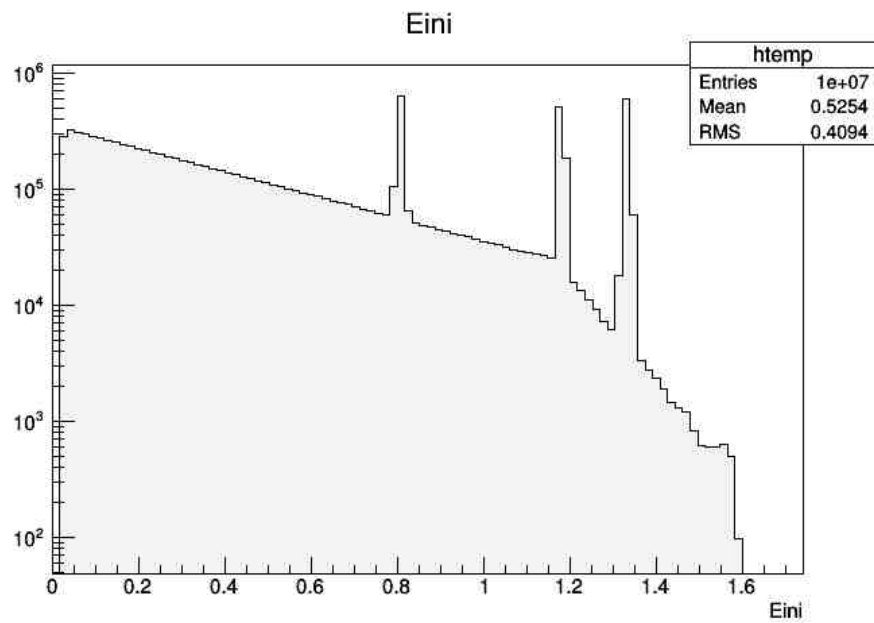


Figure A.9 Spectre de gamma simulé à partir des spectres mesurés.

A.5 Conclusion

Un modèle de référence sous forme de sphère a été défini pour évaluer le flux de gamma équivalent à un débit équivalent de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$. Pour les quatre sources définies, l'ordre de grandeur, pour le flux de gamma à envoyer sur un détecteur de 144 cm^2 , est de 10^5 à 10^7 photons par seconde en fonction de l'énergie des gamma. Pour un "spectre gamma réaliste", 1,6 million de gamma/s correspondent à un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$.

Annexe B

Optimisation de guide de lumière par simulation

Des guides de lumière doivent être utilisés pour guider les photons de scintillation vers le PMT. Une optimisation des guides de lumière a été réalisée en utilisant Geant4 [63] par Y. Shan. Un résumé de son travail est présenté dans cette annexe.

B.1 Caractéristiques essentiels d'un guide de lumière

Afin de caractériser le guide de lumière, plusieurs facteurs sont pris en compte et restent à optimiser :

- (a) Efficacité de collection de lumière : Elle est définie pour quantifier le pouvoir d'un guide de lumière de transmettre la lumière par :

$$\frac{\text{Nombre de photons envoyés au centre d'un guide}}{\text{Nombre de photons arrivés au PM}}$$

- (b) Uniformité de réponse : Elle décrit l'écart maximal des réponses prises entre deux points sur le scintillateur. Elle est calculée par la formule 3.13 dans le Chapitre 3.
- (c) Effet sur la détection : L'ajout du guide ne doit pas introduire de signaux parasites. Par exemple, l'effet Cerenkov peut intervenir dans un guide composé de PMMA, un polymère thermoplastique transparent.
- (d) Poids : Il faut que le poids du guide soit nettement inférieur au poids maximum imposé par le cahier des charges.

Afin d'optimiser le guide de lumière, l'influence des paramètres suivants a été étudiée :

- (a) Réflecteur entourant le guide :
- Peinture blanche TiO₂ ;
 - Teflon ;
 - Mylar aluminisé.

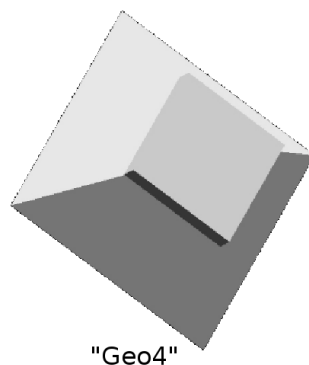
(b) Forme et géométrie du guide : La forme du guide dépend énormément de la forme et de la taille du PMT :

- PMT circulaire. Lorsque le PMT a une surface circulaire, il demande un guide qui relie la surface carrée du scintillateur à une surface circulaire. Les PMT de diamètres 50 mm et 75 mm ont été étudiés. La Figure B.1 (a) - (c) présente les guides étudiés. Les deux premières configurations ("Geo1" et "Geo2") sont symétriques pour privilégier la collection de lumière. Une autre configuration du guide ("Geo3") est inspirée de la sonde SAB-100 [86] de Mirion, qui utilise un guide sous forme de prisme pour obtenir une sonde plus facilement manipulable. Cette configuration demande une hauteur de prisme supérieure au diamètre du PMT. La hauteur de chaque guide a été optimisée.
- PMT carré : Il existe quelques PMT avec une surface carrée, comme le R6237 de Hamamatsu [64] avec le côté de 60 et 76 mm. Lorsque les deux côtés ont une section carrée, la géométrie du guide est simplifiée en pyramide tronquée. La Figure B.1(4) présente le guide correspondant dont la hauteur a été optimisée.

Figure B.1 Quatre géométries de guide de lumière étudiées adaptées à un PMT avec une surface circulaire (a) : de gauche à droite "Geo1", "Geo2", "Geo3" et un guide adapté à un PMT carré (b) : "Geo4"



(a) Guides adaptés à un PMT circulaire



(b) Guide adapté à un PMT carré

Pour la simulation, le modèle de surface *LUT* disponible dans Geant4 est utilisé car il intègre les propriétés du réflecteur réel, de type spéculaire ou diffusant. Le Tableau B.1 présente les propriétés des matériaux étudiés qui doivent être fournis pour la simulation.

Tableau B.1 Propriétés optiques des matériaux utilisés pour la simulation. Tableau extrait de [63]

Matériau	Indice de réfraction	Longueur d'absorption	Réfectivité
PMMA	1,49	330 cm	-
TiO ₂	2,2	20 μm	0,95 [87]
Teflon	1,35-1,38	20 μm	0,99 [87]

B.2 Résultats de simulation

Afin d'étudier le rapport de collection de lumière et l'uniformité du guide, des photons "lumineux" ont été créés directement à un endroit précis du scintillateur et émis de façon isotrope. Le nombre de photons qui arrivent dans le PMT après le guide a ensuite été compté en fonction de différents paramètres présentés précédemment.

Choix du réflecteur Les résultats de simulations faites avec un guide en PMMA montrent que la peinture TiO₂ est moins performante que le Mylar et le Teflon. En effet, la peinture est directement en contact avec le guide alors que pour les deux autres réflecteurs il y a une couche d'air. Étant donné que la différence entre l'indice de réfraction du PMMA et de l'air est plus importante que celle du TiO₂, l'angle limite de réfraction pour l'interface PMMA - air est plus petit que celle pour l'interface de PMMA - TiO₂. Par conséquent, il y a plus de photons avec un angle d'incidence supérieur à l'angle limite, qui sont donc réfléchis, ce qui conduit à une meilleure collection de lumière enfin. Par conséquent, le Mylar et le Teflon qui donnent des résultats comparables sont à privilégier.

Choix du matériau Les résultats obtenus montrent que le PMMA donne une efficacité de détection 2 fois plus élevée que l'air pour des hauteurs de guide de 2 - 5 cm. En effet, une proportion de photons sont absorbés à l'interface, surtout à l'interface scintillateur/air. Le PMMA est donc à privilégier et sera étudié pour la suite des études.

Choix de la géométrie Les 4 géométries du guide de lumière présentées sur la Figure B.1 ont été étudiées.

Avec un PMT circulaire La "Geo1" a une meilleure collection que la "Geo2" pour une hauteur de guide identique (de 1 à 10 cm). Il peut être expliqué par l'angle d'inclinaison du guide. La "Geo2" comporte une partie droite qui concentre moins bien la lumière vers le PMT. Il faut donc privilégier la "Geo1" par rapport à la "Geo2" même si c'est plus compliqué à réaliser mécaniquement. La "Geo2" a donc été abandonnée.

Avec un PMT carré L'étude de la géométrie sous forme d'un prisme triangulaire ("Geo 3") montre qu'il est aussi performant que les deux autres. Néanmoins, il demande une hauteur de guide d'au moins 5 cm (supérieur au diamètre du PM), ce qui va alourdir le guide.

La forme pyramide tronquée ("Geo 4") a une meilleure collection de lumière surtout si le PMT a une section importante $76 \times 76 \text{ mm}^2$, qui arrive à collecter 10% - 20% de lumière

Tableau B.2 Comparaison des configurations optimisés du guide de lumière en PMMA ayant des géométries différentes et un réflecteur en Teflon. L'uniformité de réponse de tous les guides listée est $\pm 15\%$. Tableau extrait de [63]

Géométrie	Géométrie PMT	Hauteur optimale [cm]	Efficacité de collection [%]	Poids [g]
Geo1	D = 75 mm	4	62	353
Geo3	D = 50 mm	5	59	425
Geo 4	Coté = 60 mm	2	69	187
Geo 4	Coté = 76 mm	1	72	109

en plus qu'une surface $60 \times 60 \text{ mm}^2$. Cette géométrie permet d'obtenir des efficacités de collection de 1,2 fois supérieures à la collection de lumière de la meilleure configuration (hauteur de 4 cm) obtenue pour un PMT circulaire ("Geo1").

Une des contraintes du cahier des charges est de garder une bonne uniformité sur toute la surface de scintillateur. Le Tableau B.2 compare les guides étudiés qui sont optimisés d'un point de vue efficacité de collection en gardant une uniformité de $\pm 15\%$. Le guide en forme de pyramide tronquée, de 1 cm d'épaisseur est donc plus performant en collection de lumière (72%) et le moins lourd.

Effet Cerenkov dans le guide en PMMA Le guide de lumière en PMMA est privilégié pour une meilleure collection de lumière selon les études avant. Néanmoins, l'utilisation de ce matériau introduirait des photons de Cerenkov.

Comme expliqué dans la section 1.1.4, les photons Cerenkov sont produits lorsqu'une particule chargée se déplace plus vite que la lumière dans un milieu. C'est possible dans du PMMA ($n = 1,49$) pour des électrons plus énergétiques que 0,15 MeV. Pour étudier cet effet, des gamma monoénergétiques de 0,5 ; 1 et 1,5 MeV ont été étudiés car ils peuvent produire des électrons secondaires de haute énergie. Ils sont émis vers le guide en PMMA ("Geo4") d'une façon isotrope. Le nombre et l'énergie des photons créés par gamma émis sont alors relevés.

En fixant l'énergie des gamma à 1 MeV, la probabilité de créer un ou plusieurs photons Cerenkov est faible ($< 10\%$ par gamma).

L'importance de l'effet Cerenkov a été évaluée par une analyse quantitative. Pour les gamma d'1 MeV, le flux de photons créés par Cerenkov est de 0,36 photons/ γ . Prenant le cas du Phoswich V2 avec un scintillateur rapide de 75 μm , la probabilité d'interaction dans cet étage fin est de 0,4% avec un dépôt d'énergie de 0,04 MeV selon la simulation. Avec 10^4 photons/MeV, il y a donc $0,4\% \times 0,04 \text{ MeV}/\gamma \times 10^4 \text{ photons/MeV} = 1,6 \text{ photons}/\gamma$. La quantité de photons Cerenkov est donc 22% de celle créée par scintillation. Cette proportion n'est a priori pas négligeable. Son effet dépendraient de l'efficacité quantique du PMT utilisé également. L'influence de photons Cerenkov sur la détection reste donc à vérifier expérimentalement.

Effet du guide sur la détection gamma L'ajout du guide en PMMA peut également influencer l'efficacité de détection gamma par interaction des gamma avec le PMMA.

Pour les simulations suivantes, différents guides de "Geo4", guide en PMMA et guide creux vont être étudiés pour voir leurs influences sur la détection gamma. Pour les configurations avec guide, le PMT est approximé à un bloc de verre de 76 mm × 76 mm × 2 mm, positionné derrière le PMT. La configuration de Phoswich V2 est donnée ici comme exemple. La Figure B.2 présente l'évolution du taux de détection gamma, dans le Phoswich, pour les différents guides.

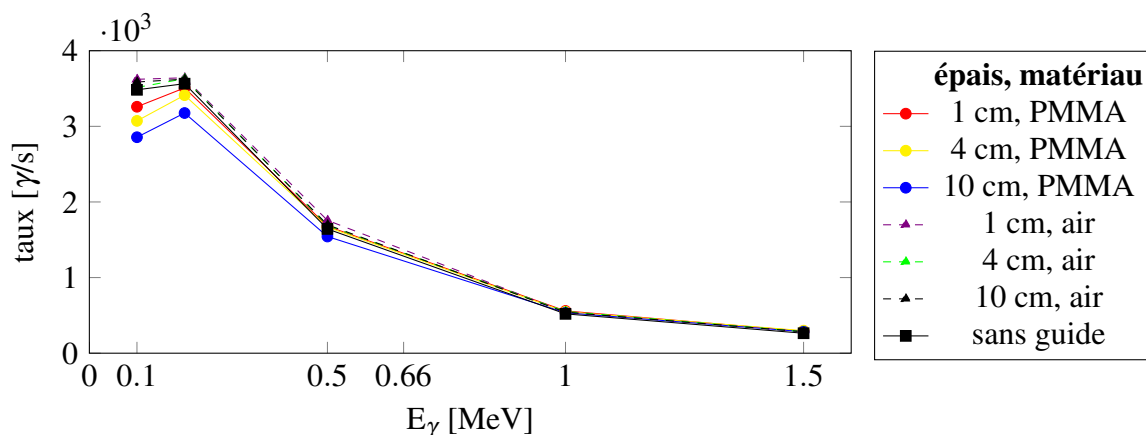


Figure B.2 Taux de gamma détecté (B) pour un bruit de fond de gamma (isotrope) de $100 \mu\text{Sv/h}$ par un Phoswich V2 ayant un premier scintillateur de $75 \mu\text{m}$ associé à un deuxième scintillateur de 2mm par une colle de $200 \mu\text{m}$ pour différents guides. Cette figure compare l'effet de guide en PMMA et en air avec des hauteurs différentes.

Le fait d'ajouter un guide creux influence peu la détection gamma par rapport à une configuration avec un PMT approximé à un bloc de verre de $12 \text{cm} \times 12 \text{cm} \times 2 \text{mm}$. Le guide en PMMA influence la détection des gamma de faible énergie (0,1 et 0,2 MeV). Plus le guide est épais, plus il "blinde" le scintillateur. Par exemple, le guide en PMMA de 2 cm d'épais élimine 10% des gamma de basse énergie détectés pour le Phoswich.

Les mêmes études ont été menées pour le Phoswich V1. Le même effet de blindage (10% - 20%) sur les gamma à basse énergie est retrouvé avec un guide en PMMA.

Par conséquent, l'ajout d'un guide en PMMA améliore légèrement l'élimination des gamma à basse énergie. Plus le guide en PMMA est épais, plus cet effet est important. Le guide creux, constitué d'air entouré par un réflecteur, influence peu la détection gamma.

B.3 Conclusion

Pour conclure, un PMT d'une surface carrée ($76 \times 76 \text{mm}^2$) permet d'avoir un guide sous forme de pyramide tronquée. Ce guide donne une uniformité de réponse $\pm 15\%$ avec un poids de matière plus faible. Le PMMA est le meilleur matériau pour le guide et le Teflon ou le Mylar aluminisé pour le réflecteur.

L'ajout du guide en PMMA derrière le scintillateur fait également office de blindage pour les gamma de basse énergie (0,1 - 0,2 MeV) et permet de diminuer la sensibilité du Phoswich à ces gamma de 10-20%.

Un guide de lumière en PMMA sous forme de pyramide tronquée de 2 cm d'épaisseur pour un PMT de surface carrée de section $76 \times 76 \text{ mm}^2$ sera utilisé. La raison pour est qu'en mesures, il est un meilleur compromis en terme d'uniformité et de séparation du bruit et du signal (cf. 8.3.1).

Annexe C

Test expérimentaux du Phoswich à deux scintillateurs plastiques associé à un YAP

Le détecteur "PhosYAP" est composé d'un Phoswich de type V1, un scintillateur rapide fin associé, sans colle, à un scintillateur lent épais auquel est associé à un scintillateur inorganique de type YAP (temps de décroissance 60 ns). D'après les simulations, la technologie "PhosYAP" est la solution permettant d'avoir la meilleure performance parmi toutes les technologies étudiées (cf. Tableau 6.1).

Un détecteur "PhosYAP" ($12 \times 12 \text{ cm}^2$) avec un étage de YAP d'épaisseur 0,25 mm a été monté pour en démontrer la faisabilité. Cette configuration a été simulée avec la source de ^{137}Cs derrière le YAP. Le résultat montre que l'ajout d'un YAP d'épaisseur 0,25 mm permet d'éliminer 15% de gamma du ^{137}Cs en plus par rapport à la configuration sans YAP.

Il a donc été testé avec les sources bêta et gamma et ses résultats seront comparés à la configuration sans YAP.

C.1 Dispositif expérimental

Les caractéristiques de détecteurs testés sont présentés dans le Tableau C.1. Les scintillateurs rapide et lent sont assemblés par chauffage et le scintillateur YAP est collé au scintillateur lent avec de la graisse optique. Le scintillateur YAP fourni par Shalom Electro-optics Techno-

Tableau C.1 Configuration des "PhosYAP" testés au laboratoire

Configuration	surface [cm ²]	scintillateur rapide [μm]	scintillateur lent [mm]	YAP [mm]	guide [cm]
1 : PhosYAP	2×2	50	1	0,5	0
2 : PhosYAP	12×12	75	0,5	0,25	1

logy [88] a une surface la plus importante disponible, de $4 \times 4 \text{ cm}^2$. Neuf pièces de YAP ont donc été utilisées pour avoir une surface de $12 \times 12 \text{ cm}^2$.

Comme le YAP a un temps de décroissance lumineuse de 60 ns, se situant entre celui du scintillateur rapide et du lent, les portes d'intégration, utilisées pour l'analyse en forme de signal, ont été choisies de manière suivante pour la configuration de surface $12 \times 12 \text{ cm}^2$:

- charges rapide : q_{rap} : -5 à 20 ns ;
- charges lentes : q_{lent} : 80 à 600 ns ;
- charges dans le YAP : q_{YAP} : 30 à 80 ns.

La source bêta du LPC, avec un rendement de source de 30%, a été utilisée (cf. 8.1.1). La source de ^{137}Cs est positionnée à 30 cm derrière le prototype, ce qui permet de créer un débit de dose de $4,4 \mu\text{Sv/h}$ d'après le calcul [74].

Le préamplificateur de Phillips 776 a été utilisé avec un gain de 10. Ces mesures ont été effectuées en obscurité sans boîtier d'aluminium du prototype.

C.2 Représentation des trois charges avec le Dalitz plot

Afin de faciliter l'identification des événements qui ont touché le YAP, une représentation des trois charges sur une distribution bidimensionnelle est proposée. L'idée s'enrichit du théorème de Viviani [89] : la somme des distances d'un point intérieur au triangle équilatéral aux trois côtés est constante et égale à la hauteur du triangle. La Figure C.1 présente le cas d'un triangle équilatéral de hauteur 1.

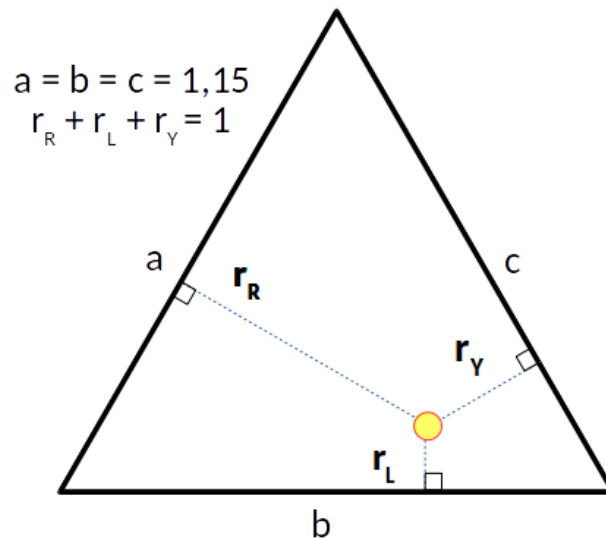


Figure C.1 Triangle équilatéral de côté 1,15. Chaque point situé à l'intérieur (eg : point en jaune) suit la relation : somme des distances du point aux trois côtés vaut 1 : $r_R + r_Y + r_L = 1$.

Pour chaque signal, trois charges sont intégrées par l'acquisition FASTER : q_R pour le scintillateur rapide, q_L pour le scintillateur lent et q_Y pour le scintillateur YAP. On définit leurs ratios par rapport aux charges totales comme les suivants :

$$r_R = q_R / (q_R + q_L + q_Y),$$

$$r_L = q_L / (q_R + q_L + q_Y),$$

$$r_Y = q_Y / (q_R + q_L + q_Y),$$

Ces trois ratios peuvent donc être présentés dans un triangle équilatéral car la somme des trois vaut toujours 1. En fonction des valeurs du ratio des charges, les événements se répartissent de manière différente. Cette représentation est appelée Dalitz plot. Si un événement a des charges rapides importantes, charges dans le YAP et charges lentes faibles, elles se positionnent donc loin du côté "a" (r_R important), et près des côtés "b" et "c" (r_Y et r_L faibles), comme le point jaune sur la Figure C.1. Les événements de cette région n'interagissent donc que dans le scintillateur rapide.

Un exemple de cette représentation des trois charges est présenté sur la Figure C.2. Elle est obtenue avec la source bêta et une configuration de PhosYAP de taille réduite (surface de $2 \times 2 \text{ cm}^2$). Il y a trois zones, A : particules qui s'arrêtent dans le scintillateur rapide ; B : celles qui interagissent dans les deux premiers scintillateurs plastiques ; C : celles qui touchent le YAP. Elle permet donc d'avoir une représentation en 2D des signaux issus des

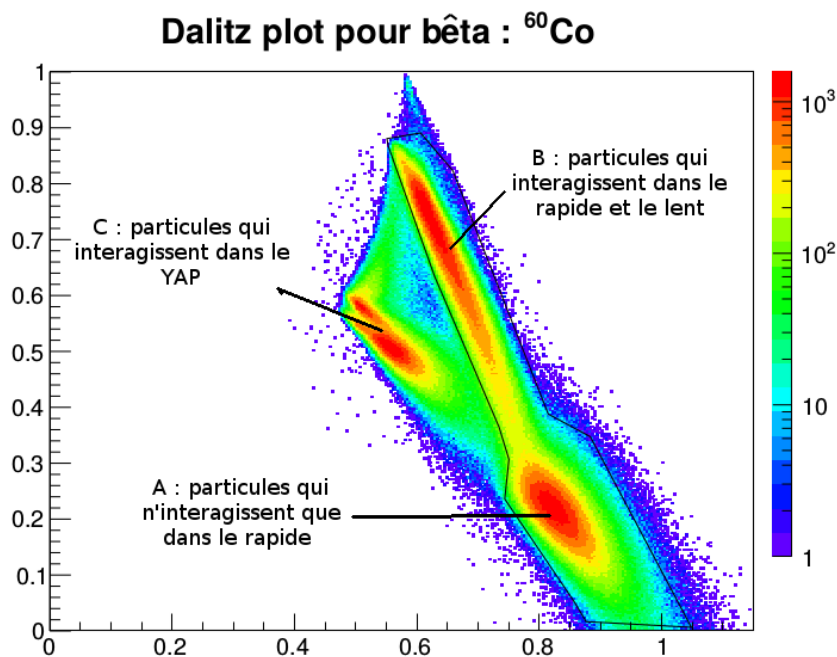


Figure C.2 Les trois charges présentées sous forme de Dalitz plot avec une source bêta de ^{60}Co pour une configuration de "PhosYAP" de surface $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Les portes d'intégration sont paramétrés : porte rapide : -5 à 20 ns ; porte lente q_{lent} : 40 à 600 ns ; porte du YAP q_{YAP} : 30 à 50 ns.

trois scintillateurs.

C.3 Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus avec le détecteur de surface $12 \times 12 \text{ cm}^2$ vont être présentés. La méthode d'analyse consiste à premièrement rejeter les événements ayant interagit dans le YAP

qui est utilisé comme véto et appliquer ensuite la sélection de l'analyse TS2 (particules ayant interagit au moins dans le premier étage rapide). Elle est appliquée de la manière suivante :

1. Sélectionner, sur le Dalitz plot obtenu avec une source gamma, la zone qui représente les particules ayant touché le YAP : " CUT_{YAP} ";
2. Sélectionner, sur la distribution bêta du ratio des charges (q_{lent}/q_{rap} en fonction de q_{rap}), la zone correspondant à l'analyse TS2 : CUT_{TS2} après avoir enlevé les événements ayant interagit dans le YAP (" CUT_{YAP} ");
3. Appliquer un seuil sur q_{rap} qui optimise le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$.

la Figure C.3 présente les résultats obtenus pour une source gamma de ^{137}Cs . La sélection de la zone correspondant au YAP touché (CUT_{YAP}) est représentée par le polygone noir. Elle est donc à éliminer pendant l'analyse.

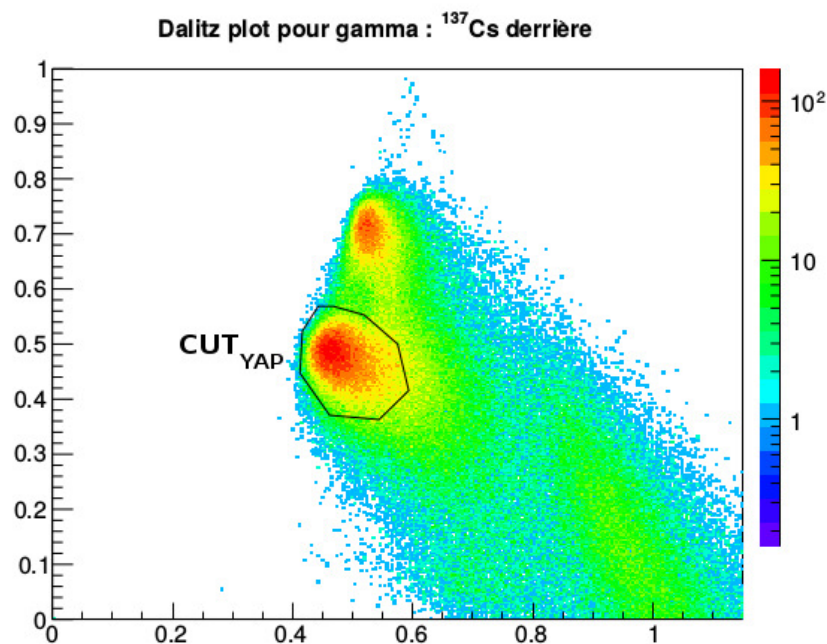
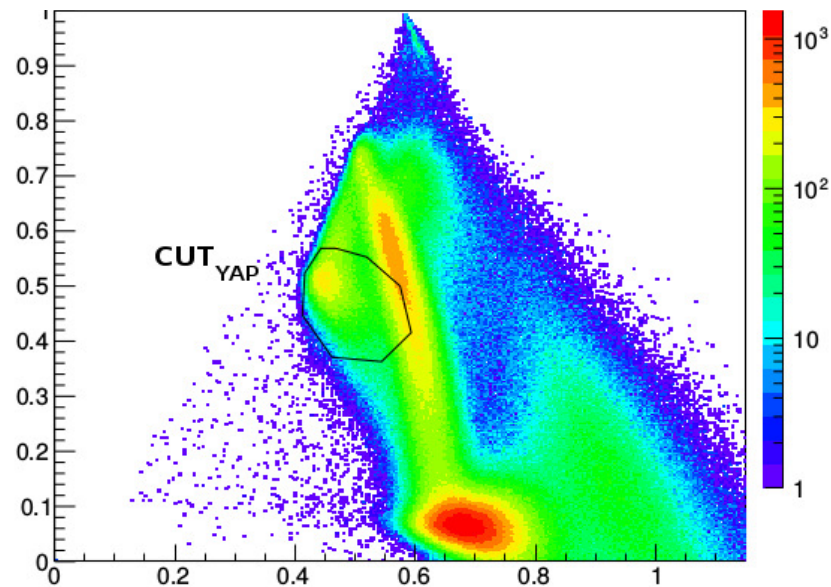


Figure C.3 Trois charges représentées pour une source gamma de ^{137}Cs positionnée derrière le détecteur "PhosYAP". Le polygone représente la sélection correspondant aux particules ayant touché le YAP.

La distribution bêta pour le même détecteur est présentée sur la Figure C.4 sous forme de Dalitz plot (a) et en distribution du ratio des charges (b). Par rapport au Dalitz plot pour un PhosYAP de surface $2 \times 2 \text{ cm}^2$ (cf. Figure C.2), la distribution bêta pour une surface de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ a une dégradation de résolution à cause de la perte de lumière due au guidage vers le PMT de surface $76 \times 76 \text{ mm}^2$.

Après avoir rejeté les événements qui ont touché le YAP (CUT_{YAP}), la distribution du ratio des charges est présentée afin de définir la sélection graphique des électrons du ^{60}Co sur (b) : " CUT_{TS2} ". Le seuil optimal obtenu en maximisant le facteur de mérite est de 9 000 canaux.

Cette analyse permet d'obtenir une efficacité bêta expérimentale de 19%, identique à celle obtenue avec le Phoswich V1 sans cet étage de YAP d'épaisseur 0,25 mm. Cette cohérence correspond à la prédiction des simulations.



(a) spectre brut présenté sous forme de Dalits plot

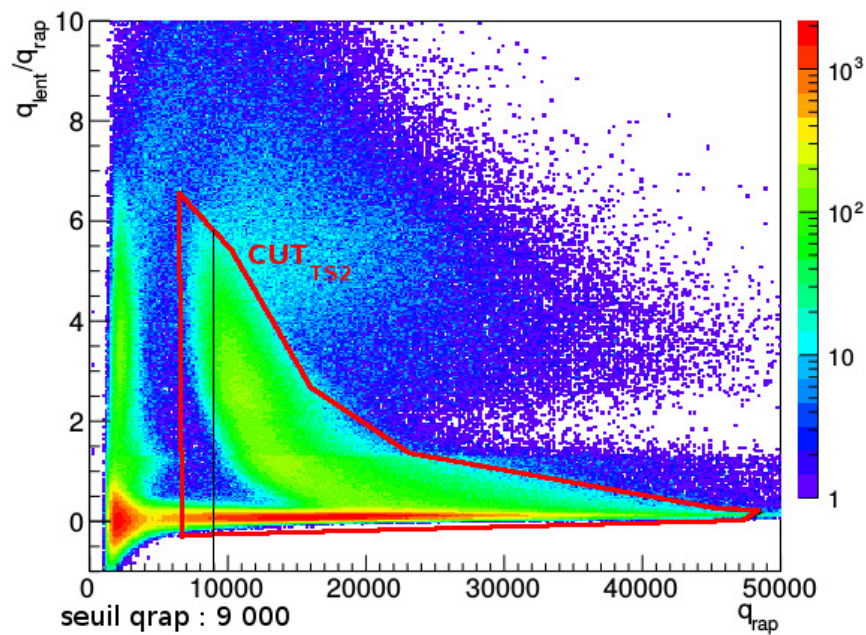
(b) distribution du ratio (q_{lent}/q_{rap} vs q_{rap}) après avoir enlevé la partie du YAP

Figure C.4 Deux représentations des charges pour une source bêta de ^{60}Co positionnée devant le "PhosYAP". (a) spectre brut présenté sous forme de Dalits plot. Le polygone (q_{rap}) représente les particules qui ont touché le YAP, obtenue à partir de la distribution gamma sur la Figure C.3. Elle est donc à rejeter. (b) distribution du ratio (q_{lent}/q_{rap} vs q_{rap}) après avoir enlevé les événements ayant touché le YAP. Le polygone représente la sélection de l'analyse TS2 : celles qui interagissent au moins dans le scintillateur rapide.

Les mêmes sélections ont été appliquées aux résultats obtenus avec des sources gamma, le taux de détection gamma, B, extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$ est de 700/s lorsque la source gamma est derrière, ce qui est comparable à celui obtenu sans YAP. Le fait que l'étage de YAP n'améliore pas le rejet des gamma, contrairement à ce qui est obtenu avec une petite surface de scintillateurs collés directement sur le PMT (20% de rejet en plus), est expliqué par la dégradation de résolution en énergie avec le guide de lumière, ce qui pose des difficultés de séparation des signaux et dégrade les performances.

C.4 Conclusion

Les mesures réalisées avec le "PhosYAP" de petite taille ($2 \times 2 \text{ cm}^2$ collé directement sur le PM) ont montré que le l'étage de YAP améliore le rejet des gamma du ^{137}Cs . Par contre, pour une plus grande taille ($12 \times 12 \text{ cm}^2$ associé au PMT pour un guide lumière), la même performance de discrimination a été obtenue avec et sans l'étage de YAP. En effet, en raison du guide de lumière, la transmission de lumière est moins bonne, ce qui pose des difficultés de séparation des signaux venant de trois scintillateurs.

Pour des études plus approfondies de cette configuration, il serait intéressant de diminuer l'épaisseur du scintillateur lent (à $200 \mu\text{m}$) et d'augmenter l'épaisseur de l'étage du YAP (à 2 mm ou 5 mm) comme la simulation le prédit. Par contre, les contraintes techniques : séparation des signaux issus des trois scintillateurs, résolution en énergie dégradée, risque de saturation du système d'acquisition ainsi que le prix onéreux du YAP, rendent cette solution difficile à mettre en oeuvre sur de grande surface. Cette piste n'a pas été étudiée plus en détails dans cette thèse.

Annexe D

Tests expérimentaux du détecteur gazeux associé à un Phoswich en scintillateurs plastiques

Des configurations de détecteur gazeux associé à un ou deux scintillateurs ont été simulés et montrent des performances meilleures que le Phoswich V2.

Un compteur proportionnel a été développé au laboratoire et assemblé au Phoswich V2 afin de vérifier si la configuration contenant un premier étage de gaz améliore la performance de discrimination bêta/gamma.

D.1 Montage expérimental du détecteur gazeux associé à un Phoswich

Le préamplificateur Phillips 776 (cf. 7.4) avec un gain de 100 a été utilisé pour les signaux issus du compteur proportionnel de surface active de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ et un gain de 10 pour le Phoswich.

D.1.1 Compteur proportionnel développé

Cette configuration demande le développement d'un détecteur gazeux de type compteur proportionnel comme évoqué dans le chapitre 1.4. Le compteur proportionnel à multifils a été choisi pour ce développement. La Figure D.1 [11] présente sa configuration, composée d'un plan de fils comme anode et deux plans de cathode en Mylar.

Le compteur proportionnel développé a une épaisseur de 7 mm entre les deux plans de cathode (gap de 3,5 mm entre anode et cathode). Cette épaisseur est minimisée car les simulations ont montré qu'une épaisseur la plus fine possible du premier étage favorise la discrimination bêta/gamma.

Le cathode est composé d'un Mylar de $1,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur évaporé d'or de 200 nm sur les deux faces, de surface $12 \times 12 \text{ cm}^2$, et collé sur un cadre de PCB (Printed Circuit Board)

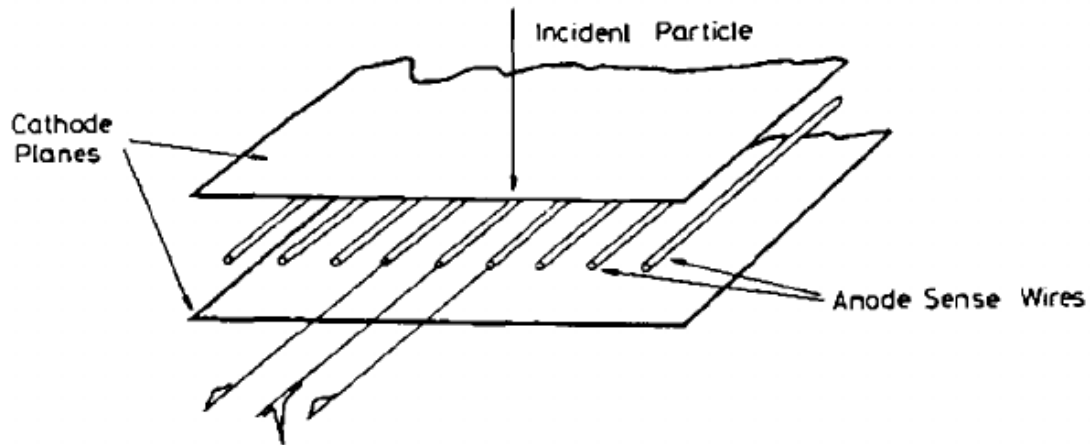


Figure D.1 Configuration d'un compteur proportionnel à fils. Figure extraite de [11] Fig. 6.7.

d'épaisseur 3,2 mm. La Figure D.2 présente des photos des cathodes dorées. En plus de la cathode, il y a un anneau d'épaisseur 10 mm autour, isolé de la cathode. Le signal créé dans cet anneau est donc lu par une électrode différente de celui du cathode. Sa fonctionnalité est d'enregistrer les particules qui ont touché cet anneau de gaz afin de rejeter les électrons secondaires ou gamma diffusés créés dans la mécanique et qui entreraient par les cotés du détecteurs.

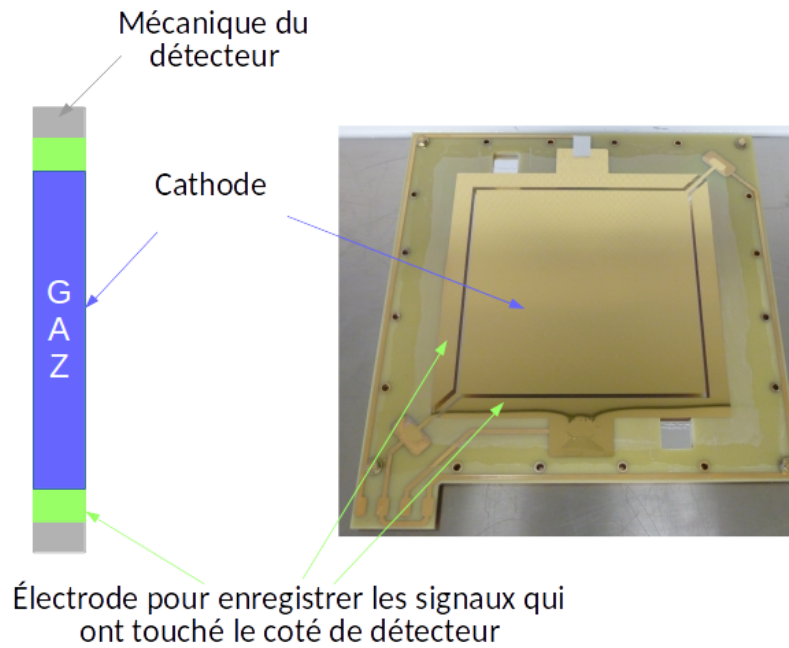
Les fils anode a une longueur de 156 mm et sont séparés de 3 mm. Afin d'assurer l'étanchéité du détecteur gazeux, une feuille de Mylar aluminisé commercial d'épaisseur 1,5 μm est collé coté externe des plaques de PCB. Ils servent également de fenêtre d'entrée. Cette conception laisse donc une distance de 3,2 mm entre la fenêtre d'entrée et la cathode, ce qui risque de diminuer la détection bêta.

L'ensemble des 3 électrodes (2 cathodes et 1 anode) sont implantées dans un boîtier en aluminium contenant des connecteurs SHV et BNC, les entrée et sortie de gaz comme présenté sur la Figure D.2 (b).

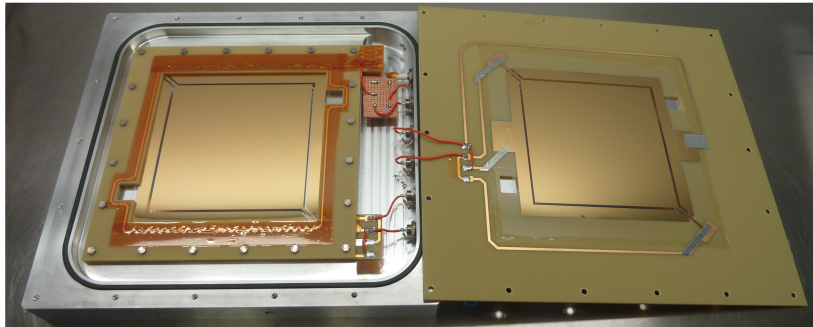
Grâce à une caractérisation du détecteur avec une source X de ^{55}Fe (5,9 keV), la tension de fonctionnement a été fixée à 1800 V avec un mélange de gaz Ar (80%) et CO_2 (20%) à pression atmosphérique. Dans ces conditions, la résolution en énergie mesurée est de 28% à 5,9 keV et 50% à 2,9 keV.

D.1.2 Scintillateurs montés sur le compteur proportionnel

Afin d'éviter de fabriquer un étage de plastique de 200 μm , le prototype du Phoswich V2 a été couplé derrière le compteur proportionnel comme présenté sur la Figure D.3. Il est composé d'un scintillateur rapide d'épaisseur 75 μm associé à un étage de scintillateur lent de 1 mm avec un polymère d'épaisseur 200 μm . Le guide de lumière en PMMA de 1 cm a été utilisé.



(a) cathode et l'anneau qui sert au veto



(b) compteur proportionnel monté

Figure D.2 Configuration du compteur proportionnel développé au LPC : (a) schéma simplifié et photo de la cathode et de l'anneau qui sert de veto ; (b) photo du compteur proportionnel avec les plans cathodes et anode monté sur leur mécanique.

Cette configuration à trois étages, qui a la même performance que la configuration "Gaz-PlastSct", permet d'étudier si le fait d'avoir le premier étage de détecteur gazeux permet d'améliorer la performance de discrimination bêta/gamma.

D.2 Résultats expérimentaux

Ce détecteur gazeux a été testé avec la source bêta devant la fenêtre d'entrée et la source gamma de ^{137}Cs positionnée à 50 cm devant et derrière la fenêtre d'entrée du détecteur gazeux. La Figure D.3 présente la photo du dispositif lorsque la source gamma est positionnée à l'arrière du détecteur.

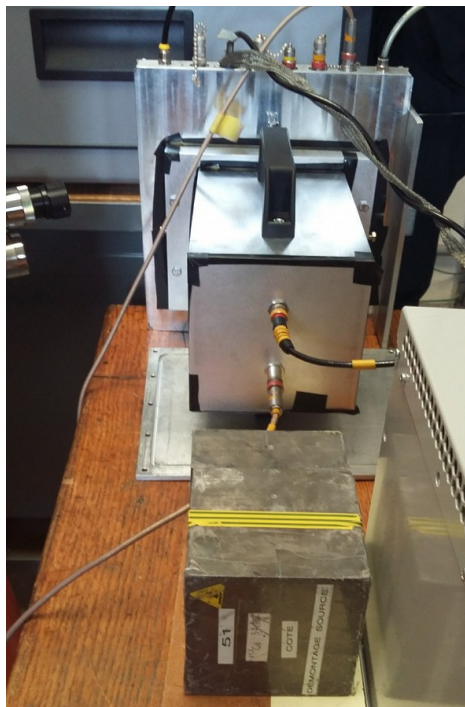


Figure D.3 Photo du dispositif avec la source de ^{137}Cs à 50 cm derrière le détecteur "GazPlastSct".

Pour les bêta, cette configuration détecte $\sim 10\%$ en moins par rapport au Phoswich V2 pour une contamination de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$. Ceci pourraient être dû à plusieurs facteurs :

- Une distance de 3 mm est ajoutée entre la fenêtre d'entrée et le cathode avant du détecteur gazeux ;
- L'épaisseur du détecteur gazeux, de 7 mm, ne permet pas d'appliquer un seuil suffisamment bas afin d'optimiser l'efficacité de détection bêta (faible énergie déposée).

Les résultats avec la source gamma montrent que l'anneau autour de cathode diminue le taux de comptage gamma d'environ 15%. Malgré cette disposition, ce détecteur est encore très sensible au bruit gamma avec un taux de comptage comparable à celui du Phoswich V2 (700 c/s pour un débit de dose extrapolé à $100 \mu\text{Sv/h}$) lorsque la source gamma est derrière, contrairement aux prédictions de simulation. Lorsque la source gamma est positionnée devant le compteur proportionnel, le taux de comptage est de l'ordre 2700 c/s, 30% plus sensible au bruit que le Phoswich V2 (cf. Tableau 8.3), contrairement aux prédictions de simulations.

Il est donc plus sensible aux interactions des gamma avec la matière environnante que le Phoswich V2.

La performance pourrait être améliorée par une augmentation de l'épaisseur du détecteur gazeux qui permettrait d'appliquer un seuil en énergie plus élevé. Comme cette solution du détecteur gazeux a une robustesse limitée pour une utilisation sur le terrain et qu'elle demandait un développement important, elle n'est pas retenue pour un développement plus avancé.

D.3 Conclusion

La configuration de détecteur constitué d'un étage de gaz couplé à un Phoswich V2 n'atteint pas une meilleure performance que le Phoswich V2 seul. Contrairement à ce qui a été obtenu en simulations, la sensibilité gamma est comparable à celle du Phoswich V2 et son efficacité bêta est diminuée de 10% par rapport celle du Phoswich V2 notamment en raison de l'éloignement entre la source et la cathode avant le détecteur gazeux. Il a donc été abandonné pour les études en suite.

Annexe E

Étude de Phoswich composé d'un étage de ZnS et d'un étage de scintillateur plastique

L'étude précédente de l'analyse TS1 a montré que l'analyse en coïncidence des deux étages d'un Phoswich plastique conduisait à perdre trop de bêta (~60%) (cf. 5.2.1). Dans l'industrie, il est couramment utilisé un Phoswich basé sur un premier étage très fin de ZnS [40] déposé directement sur un scintillateur plastique (sans couplant). Cette configuration minimisant l'épaisseur avant le deuxième étage va être étudiée.

Le ZnS est un scintillateur inorganique (lent), de temps d'émission de lumière $\tau = 200$ ns [40], fréquemment utilisé pour réaliser des contaminamètres permettant de discriminer les alpha des bêta (eg : LB124 [43], Como170[4] cf Tableau 3.1). Ce scintillateur inorganique ZnS, sous forme de poudre déposée sur un scintillateur plastique (rapide), peut être construit avec des épaisseurs très fines sans couche ajoutée entre le ZnS et le plastique. Ce Phoswich étant disponible commercialement, nous l'avons donc simulé afin de vérifier s'il est plus performant que celui composé de deux scintillateurs plastiques.

Il est composé d'un étage de ZnS de $15 \mu\text{m}$ ($e = 9,2 \mu\text{m}$, $\rho_e = 1,96 \text{ mg}/\text{cm}^2$ et $e = 5,8 \mu\text{m}$, $\rho_e = 1,35 \text{ mg}/\text{cm}^2$), et un scintillateur lent de 1 mm d'épaisseur. Ces épaisseurs correspondent aux scintillateurs proposés par les fabricants [90]. La simulation étudiera un Phoswich de surface $12 \times 12 \text{ cm}^2$, derrière lequel est ajouté un morceau de verre de 2 mm.

E.1 Détection bêta

La distribution en énergie dans le détecteur pour une source bêta de ^{60}Co est représentée sur la E.1. Les électrons déposent en moyenne 0,02 MeV d'énergie (Mean y sur la distribution) dans le premier étage de ZnS, ce qui est comparable à ce qui obtenu pour un scintillateur plastique de $25 \mu\text{m}$ (ρ_x identiques).

Le Tableau E.1 présente l'évolution du taux de détection des bêta et de l'efficacité totale pour les trois méthodes d'analyse décrites précédemment (TS1, TS2, TS3).

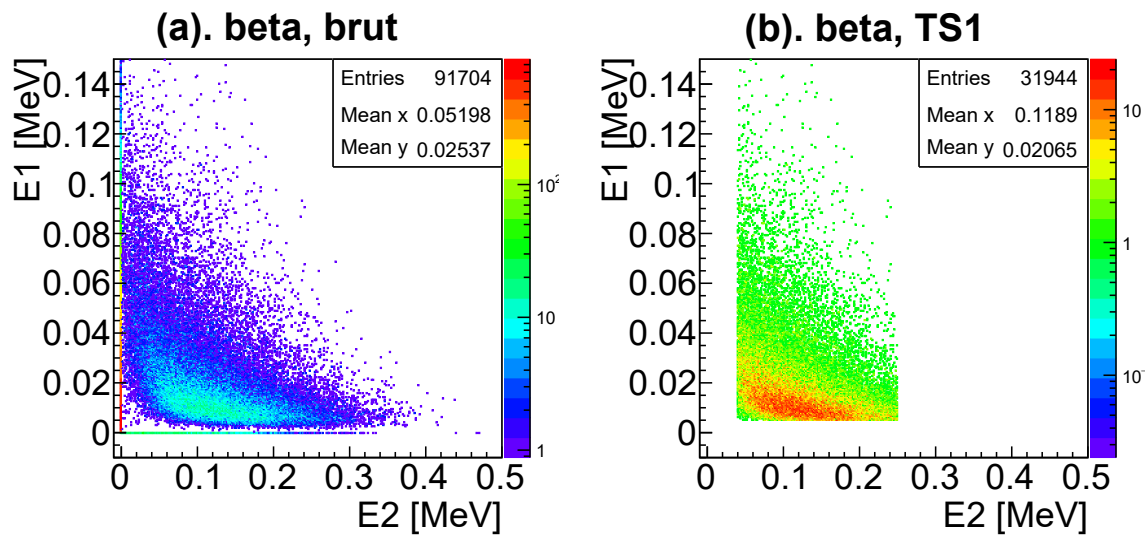


Figure E.1 Distribution en énergie ($E1$ vs $E2$) déposée dans le détecteur ($E1$ vs $E2$) pour la source bêta de ^{60}Co . Phoswich, composé de $15\ \mu\text{m}$ de ZnS sur $1\ \text{mm}$ de scintillateur plastique, auquel l'analyse TS1 est appliquée ($2\ \text{mm}$ de verre est ajoutée derrière les scintillateurs). 5×10^5 bêta sont envoyés à partir d'une surface de $20 \times 20\ \text{cm}^2$. Les coupures optimisées appliquées : $E1 > 0,005\ \text{MeV}$ et $0,02 < E2 < 0,25\ \text{MeV}$.

Tableau E.1 Taux de bêta détectés (S) pour une contamination de $0,4\ \text{Bq/cm}^2$ avec un Phoswich ZnS associé à un scintillateur plastique auquel différentes analyses sont appliquées (TS1 : coïncidence entre les deux étages, TS2 : au moins le premier étage (ZnS) touché, TS3 : deuxième étage utilisé en veto. Les sélections en énergie appliquées sont : TS1 : $E1 > 0,005\ \text{MeV}$ et $0,02 < E2 < 0,25\ \text{MeV}$; TS2 : $E1 > 0,005\ \text{MeV}$ et ($E2 = 0$ ou $0,02 < E2 < 0,25\ \text{MeV}$); TS3 : $E1 > 0,005\ \text{MeV}$ et $E2 = 0$

Configuration	Taux S [s]		
	TS1	TS2	TS3
ZnS + plastique	10,3	24,3	14,0
2 scintillateurs plastiques	8,3	24,2	24,4

Le ZnS de $15\ \mu\text{m}$ d'épaisseur ne laisse que $10,3\ \text{e-/s}$ traverser le premier et arriver dans le deuxième pour une contamination de $0,4\ \text{Bq/cm}^2$. C'est $2\ \text{e-/s}$ plus qu'avec le Phoswich V1 mais cette faible proportion de bêta qui traversent le premier étage entraîne de faibles performances pour l'analyse TS1 qui nécessite une coïncidence entre les deux étages.

Pour TS2, le taux de détection bêta est identique à celui avec le Phoswich V1.

Comme il n'y a pas de matière entre les deux scintillateurs, le taux de détection bêta n'est que $14\ \text{e-/s}$, ce qui n'est pas optimisé comme le Phoswich V2 (analyse TS3) qui a une zone morte entre les deux étages.

E.2 Détection gamma

Sur la Figure E.2 sont présentés les spectres en énergie déposée par les gamma de différentes énergies dans le ZnS ($E1$) et dans le deuxième étage de scintillateur plastique ($E2$) sans appliquer puis en appliquant l'analyse TS1 (coïncidence entre les deux étages). A $0,1\ \text{MeV}$ (a), il y a une partie des gamma qui déposent presque $0,1\ \text{MeV}$ dans le deuxième

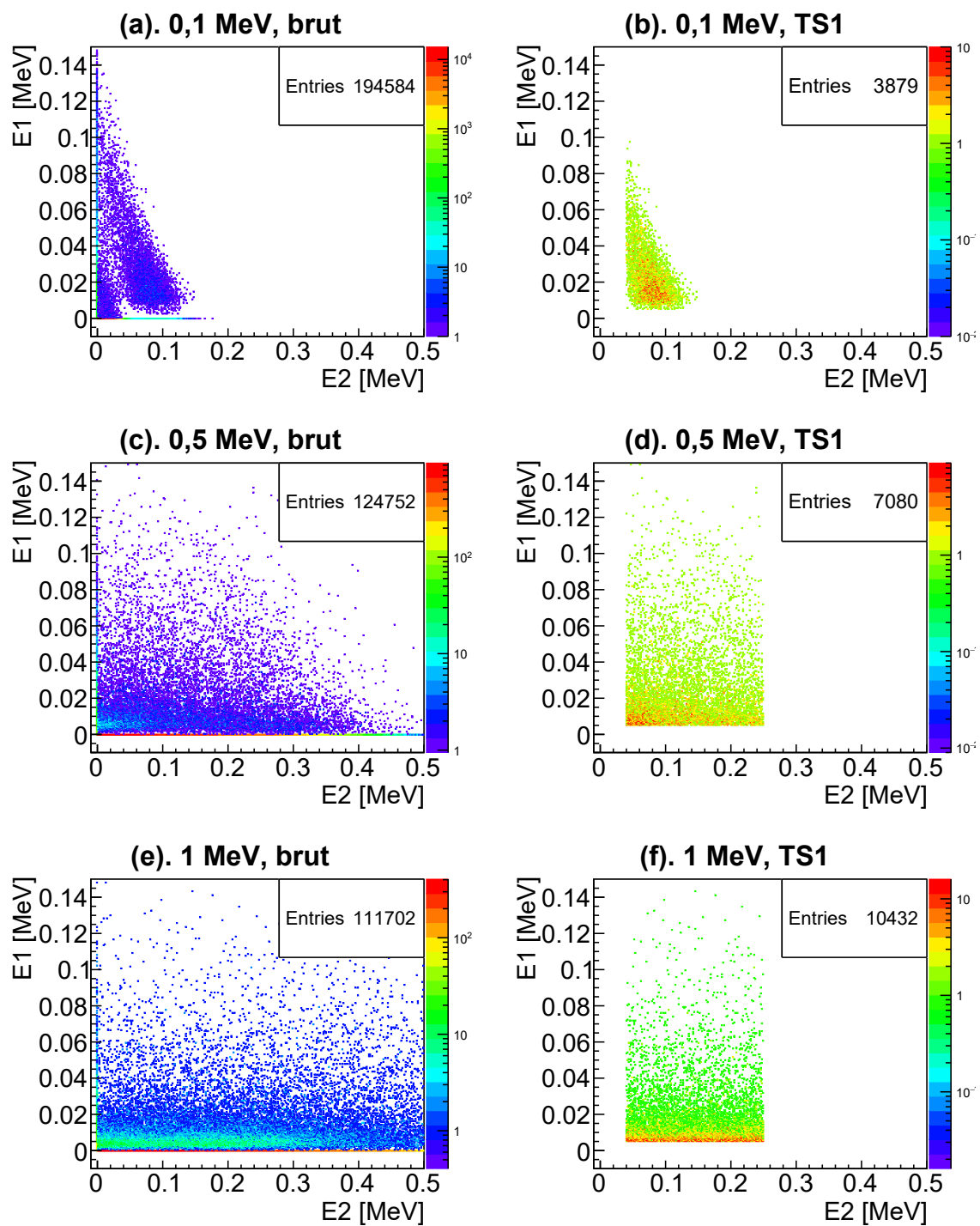


Figure E.2 Distributions en énergie ($E1$ vs $E2$) brutes et après analyse TS1 déposée dans le détecteur pour les sources gamma mono-énergétiques. Phoswich, composé de $15\ \mu\text{m}$ de ZnS et 1 mm de scintillateur plastique (2 mm de verre est ajouté derrière les scintillateurs). 10^7 gamma sont envoyés. Les coupures optimisées de TS1 appliquées sont : $E1 > 0,005\ \text{MeV}$ et $0,02 < E2 < 0,25\ \text{MeV}$.

étage de scintillateur plastique, contribution qui n'existe pas sur le spectre de Phoswich en scintillateurs plastiques avec le premier étage de $75 \mu\text{m}$ (Figure 5.13 : 0,1 MeV). Comme présenté sur le spectre à droite (0,1 MeV, TS1), cette contribution est difficile à supprimer avec les coupures de coïncidence car E_2 est trop élevée. Les gamma à basse énergie sont donc problématiques avec l'analyse TS1 pour un ZnS.

La raison pour laquelle beaucoup plus de gamma de basse énergie interagissent dans le Phoswich et donnent des signaux en coïncidence entre les deux étages est dû à une plus forte probabilité d'interaction dans le ZnS que dans le plastique ($\mu_{\text{ZnS}} = 240 \mu_{\text{plastique}}$ cf. Figure 1.3).

E.3 Performance de discrimination bêta/gamma

Comme pour les détecteurs en scintillateurs plastiques, les trois méthodes d'analyses ont été appliquées pour ce détecteur associant un étage de ZnS et un étage de scintillateur plastique. La Figure E.3 présente le rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu pour les trois traitements.

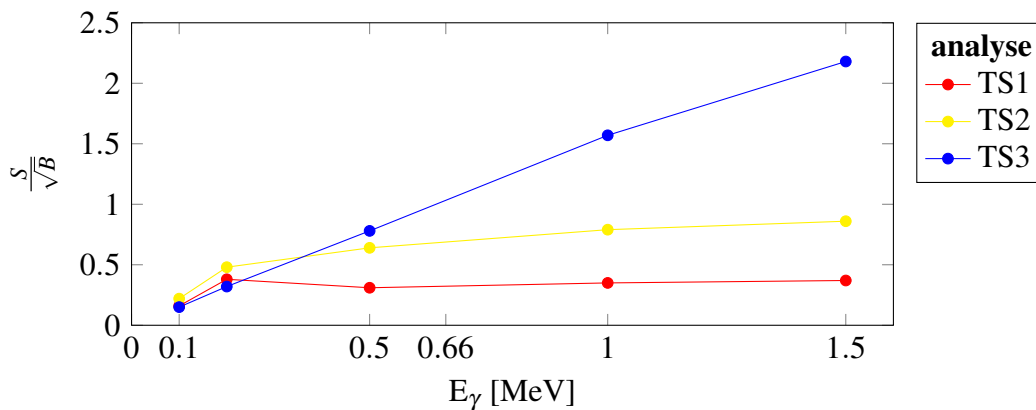


Figure E.3 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma (E_γ) obtenu pour un Phoswich composé d'un étage de ZnS et d'un étage de scintillateur plastique en appliquant les différentes méthodes d'analyse décrites dans le texte. Les coupures appliquées : TS1 : $E_1 > 0,005 \text{ MeV}$ et $0,02 < E_2 < 0,25 \text{ MeV}$; TS2 : $E_1 > 0,005 \text{ MeV}$ et ($E_2 = 0$ ou $0,02 < E_2 < 0,25 \text{ MeV}$); TS3 : $E_1 > 0,005 \text{ MeV}$ et $E_2 = 0$.

E.3.1 Analyse TS1 : coïncidence entre les deux étages

La Figure E.3 montre que l'analyse TS1 conduit à un facteur de mérite entre 0,3 - 0,4 pour tous les gamma sauf à 0,1 MeV (rapport bas de 0,15), ceci est dû à la forte probabilité d'interaction photo-électrique dans le scintillateur inorganique. Par rapport à la configuration optimisée du Phoswich V1 avec deux étages en scintillateurs plastiques sur lequel l'analyse TS1 est appliquée (Figure 5.18 : $75 \mu\text{m}$ scnt1, 2 mm scnt2), la discrimination est tout de même améliorée surtout à 0,5 MeV (de $\frac{S}{\sqrt{B}}$ de 0,2 en Figure 5.18 à 0,3 en Figure E.3) car la faible épaisseur du ZnS a permis une meilleure efficacité bêta.

Cette méthode d'analyse est la moins performante parmi les trois testées.

E.3.2 Analyse TS2 : au moins le premier étage de scintillateur (ZnS) touché

Comme pour le Phoswich en scintillateurs plastiques, l'analyse TS2 permet d'améliorer le facteur de mérite qui atteint des valeurs de 0,5 à 0,9 quand l'énergie des gamma passe de 0,2 MeV à 1,5 MeV par rapport à l'analyse TS1. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues pour un Phoswich à deux étages de scintillateur plastique auquel est appliquée la même analyse TS2 (0,4 - 1 en Figure 5.25). Et pour 0,1 MeV, le rapport diminue d'un facteur de 2 (0,4 en Figure 5.25 à 0,2 en Figure E.3) avec le ZnS.

E.3.3 Analyse TS3 : seul le premier étage touché (utilisation du deuxième étage en véto)

L'analyse TS3, avec un facteur de mérite F de 0,15 à 2,2, est très efficace pour les gamma à haute énergie. A 1 - 1,5 MeV, $F = 1,5$ à 2,2 alors qu'un Phoswich en scintillateurs plastiques avec l'analyse TS3 n'a que 1,1 - 1,5 (cf. Figure 5.29 : 200 μm couplant). Néanmoins, à basses énergies (eg : $E_\gamma = 0,1$ MeV), le fait d'avoir un scintillateur inorganique dégrade fortement les performances, le ZnS a un facteur de mérite dégradé : 0,15 par rapport à 0,43 pour Phoswich V2 optimisé (cf. Figure 5.29 : 200 μm couplant).

E.3.4 Conclusion

Pour les trois méthodes de traitement des données, les gamma de basse énergie ($E_\gamma < 0,5$ MeV) sont problématiques quand un étage de scintillateur inorganique comme le ZnS est utilisé. Globalement, la performance s'améliore avec l'énergie des gamma pour les analyses TS2 ou TS3. L'analyse TS1 est la moins performante.

Ce système commercialement disponible est donc envisageable, mais reste très problématique en cas de bruit de fond avec spectre en énergie des gamma dominé par les basses énergies ($\frac{S}{\sqrt{B}}$ 2 - 3 fois de moins important que le Phoswich).

E.4 Validation expérimentale du Phoswich en ZnS et scintillateur plastique

Les simulations précédentes ont montré que le couplage du ZnS avec un scintillateur plastique donne des performances comparables à celles obtenues avec un Phoswich composé de deux scintillateurs plastiques sauf à basse énergie ($E \leq 0,2$ MeV) car le taux de détection gamma est élevé avec le ZnS.

Un test expérimental a été réalisé pour étudier la possibilité d'utiliser cette configuration pour la discrimination bêta/gamma. Le montage expérimental est identique à celui utilisé pour un Phoswich en scintillateurs plastiques (cf. section 5.2.1.4). Le Phoswich est composé d'un

premier étage de scintillateur lent ZnS de 15 μm d'épais, un scintillateur plastique rapide (EJ-212) de 1 mm d'épaisseur (EJ444) [90].

Cette étude a montré que l'énergie déposée par les bêta dans le ZnS conduit à une production de scintillation tellement faible que seuls les signaux rapides sont utilisables. Étant donné que les trois méthodes d'analyse ont toutes besoin de l'information de l'énergie déposée dans le premier étage de scintillateur fin, cette configuration utilisant le ZnS ne permet pas de faire la discrimination bêta/gamma. Ce montage fonctionne avec les α déposant beaucoup d'énergie (quelques MeV) dans le premier étage mais pas pour les bêta (dépôt de $\sim 0,02$ MeV).

Cette version du Phoswich utilisant du ZnS comme premier étage de détection est donc abandonnée.

Annexe F

Étude de détecteur à deux étages de détecteurs gazeux par simulation

Une deuxième configuration de détecteur utilisant du gaz a été étudiée. L'idée est de remplacer le scintillateur plastique de la configuration du "GazPlastScnt" (cf. 5.3.3) par un détecteur gazeux, ce qui pourrait permettre de rendre le contaminamètre encore moins sensible aux gamma.

Cette configuration contenant deux étage de gaz ne demande pas de photo-multiplicateur, aucune matière n'est simulée derrière le deuxième étage ni entre les deux étages de gaz dans un premier temps afin de ne s'intéresser qu'à l'interaction des électrons et des photons avec les deux étages de gaz. Comme la configuration précédente, le premier étage de gaz qui doit être fin a une épaisseur fixée à 6 mm. Son seuil en énergie est fixé à 2 keV.

Concernant la méthode d'analyse, l'analyse en coïncidence TS1 donne des résultats moins bons que les autres car elle diminue l'efficacité bêta ($\sim -30\%$) comme précédemment. L'analyse TS3 est moins performante que TS2 étant plus sensible ($\sim 1,5$) au bruit de gamma de haute énergie qu'avec l'analyse TS2. Elles ne seront pas discutées ici. Seule l'analyse TS2 va être présentée.

F.1 Simulation basique

F.1.1 Détection bêta

Deux spectres en énergies pour les bêta sont présentés sur la Figure F.1. Il comparent les configurations avec le deuxième gaz d'épaisseur différente : 6 mm et 15 mm. Sur les spectres bruts, l'énergie déposée est comparable (Mean $y = 0,006$ MeV) dans le premier étage alors que l'énergie déposée dans le deuxième gaz double avec l'épaisseur de deuxième étage (Mean x passe de 0,005 MV à 0,01 MeV). En effet, les bêta peuvent traverser les deux étages de gaz car les bêta ^{60}Co ont un parcours \sim de 100 mm pour les électrons de 0,1 MeV (énergie moyenne du ^{60}Co) [12]. Elles déposent plus d'énergie si le deuxième étage est plus épais dans la limite que l'ensemble de deux étages fait moins de 100 mm. A cause de cette différence de

distribution, le seuil en énergie du deuxième étage de gaz doit être adapté. Le seuil optimisé grâce au facteur de mérite est de 2 keV pour un deuxième gaz de 6 mm et 5 keV pour celui de 15 mm.

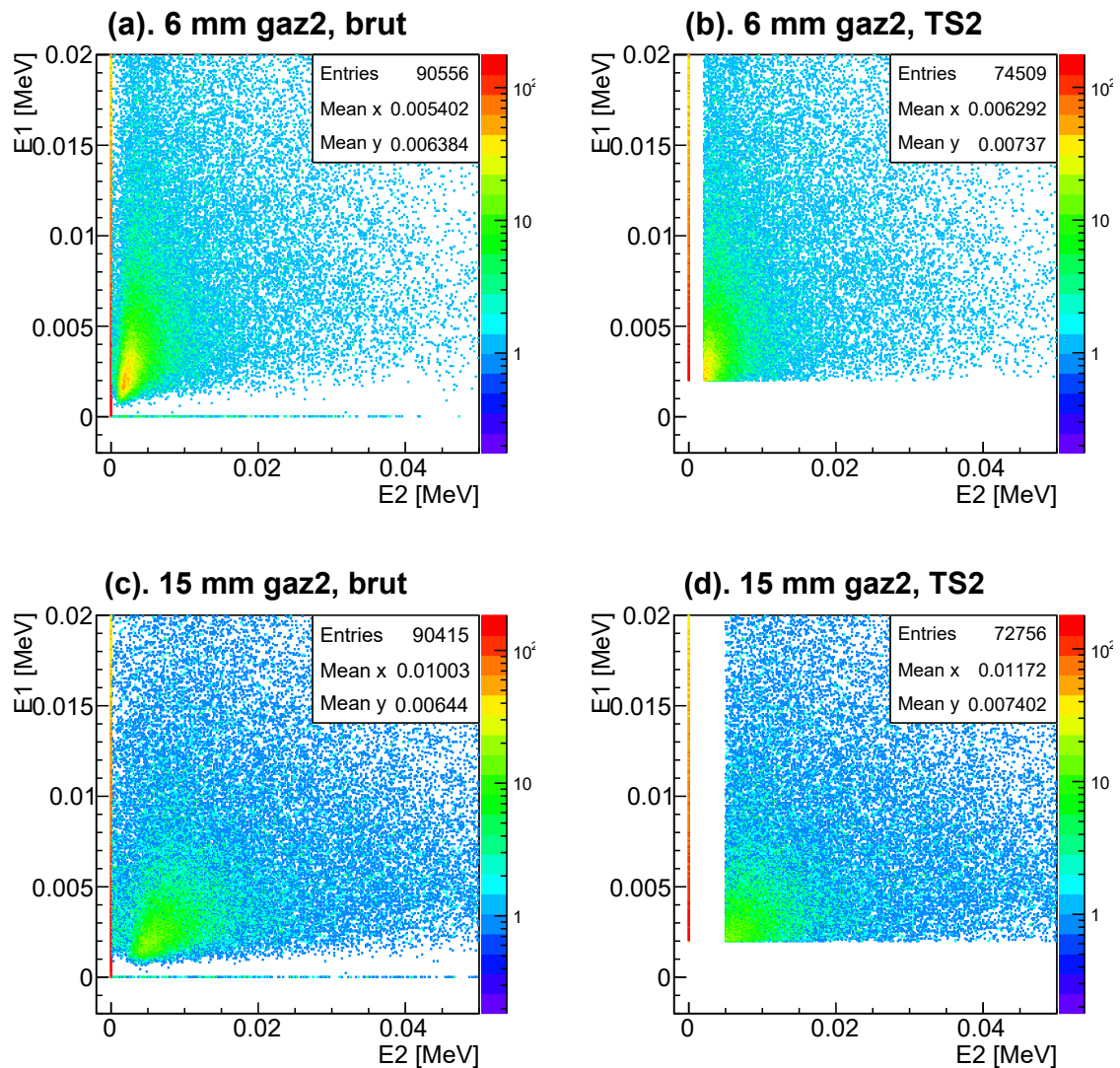


Figure F.1 Distribution en énergie ($E1$ vs $E2$) brute et avec l'analyse TS2 déposée dans les deux étages de gaz pour la source bêta de ^{60}Co . Le détecteur est composé du premier étage de 6 mm et un deuxième étage de gaz (gaz2) d'épaisseurs différentes : 6 et 15 mm. 510^5 bêta sont envoyés sur une surface de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Les sélections en énergie l'analyse TS2 : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et ($E2 = 0 \text{ MeV}$ ou $E2 > E2_{Thres}$) avec $E2_{Thres} = 0,002 \text{ MeV}$ pour 6 mm et $E2_{Thres} = 0,005 \text{ MeV}$ pour 15 mm.

Les seuils optimisés appliqués à différentes épaisseurs de deuxième gaz sont présentés sur le Tableau 5.5.

Le remplacement du deuxième étage influencera peu sur la détection bêta, qui est de 21 - 24 e-/s avec un seuil optimisé pour le deuxième étage de détecteur gazeux (cf. Tableau 5.7).

F.1.2 Détection gamma

Effet de l'épaisseur du deuxième étage de détecteur gazeux Si le même seuil en énergie est appliqué aux deux étages de gaz, un deuxième étage plus fin détecte moins de gamma car il y a moins de gamma qui interagissent.

Néanmoins, comme précédemment le seuil doit être optimisé grâce au facteur de mérite en fonction de l'épaisseur de gaz. Autrement dit, un seuil plus élevé est à favoriser s'il diminue plus de racine carré de bruit \sqrt{B} que de signal S , ce qui améliore le facteur de mérite.

La Figure F.2 présente l'évolution du taux de détection gamma pour différentes épaisseurs du deuxième étage de gaz avec l'analyse TS2. Le seuil optimisé en fonction de l'épaisseur de gaz est appliqué. Avec un taux variant de 2500 à 50/s sur la gamme en énergie gamma, il y a peu d'évolution du taux de détection gamma avec l'épaisseur du deuxième étage de gaz.

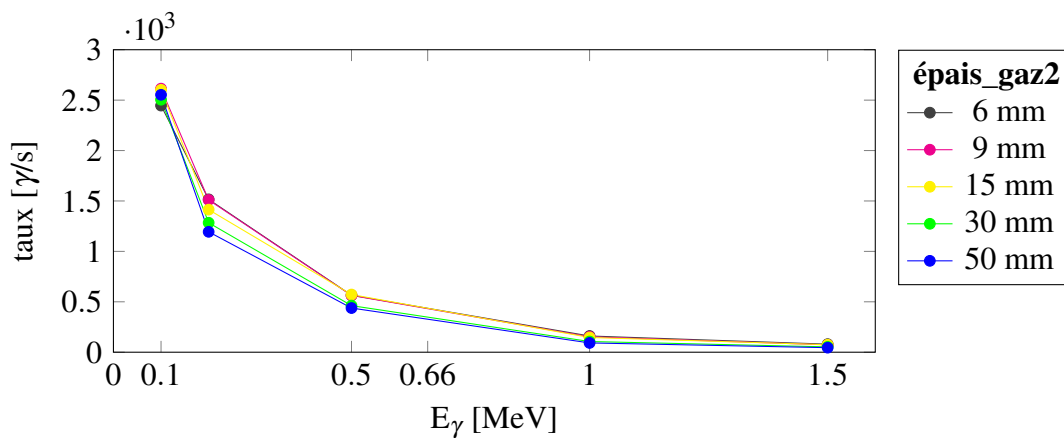


Figure F.2 Taux de détection gamma (B) en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ pour un débit de dose de $100 \mu\text{Sv/h}$ par un détecteur à deux étages de gaz ayant le premier étage de 6 mm d'épais et deuxième étage des épaisseurs variées (sans mécanique autour ou derrière). L'analyse TS2 est appliquée avec des sélections en énergie : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et $(E2 > E2_{Thres} \text{ ou } E2 = 0)$ avec $E2_{Thres}$ présenté sur le Tableau 5.5.

F.1.2.1 Discrimination bêta/gamma

La Figure F.3 présente l'évolution du facteur de mérite avec l'analyse TS2 pour différentes épaisseurs du deuxième étage du détecteur gazeux. Avec un couplage du premier étage de 6 mm et deuxième variant de 6 à 50 mm, le deuxième étage avec une épaisseur plus importante favorise le facteur de mérite pour les photons de haute énergie. Avec deuxième étage de 30 à 50 mm, le détecteur a un facteur de mérite de $\sim 1,4$, correspondant à un seuil de décision de contamination bêta de $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ dans un bruit de fond du ^{137}Cs de $100 \mu\text{Sv/h}$.

Ces simulations de détecteur gazeux avec la source gamma isotrope ont été faites avec deux étages de gaz entourés d'air. Pour étudier comment l'ajout de matière autour de la zone sensible (mécanique, électrodes) joue sur la discrimination, 2 mm de verre ont été simulés derrière le deuxième étage de gaz. Trois configurations ont été étudiées en fixant le premier étage de gaz à 6 mm, l'épaisseur du deuxième étage à 6 mm, 30 mm ou 50 mm.

La Figure F.3 compare le facteur de mérite avec et sans verre pour les trois configurations. Pour les gamma de basse énergie (0,1 et 0,2 MeV), l'ajout de verre ne change pas le facteur

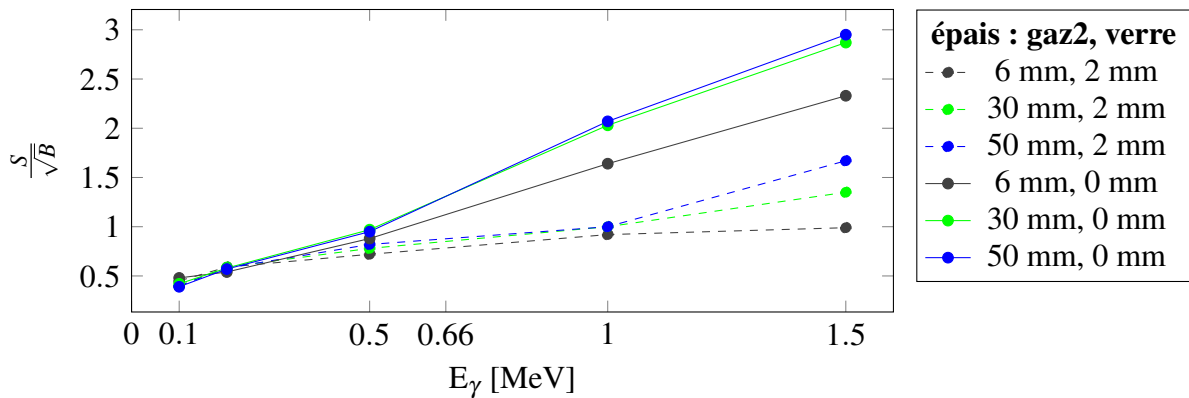


Figure F.3 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ en fonction de l'énergie des gamma incidents E_γ obtenu pour un détecteur à deux étages de gaz ayant un premier étage de 6 mm et un deuxième étage des épaisseurs différentes. La figure compare le facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ avec une configuration avec et sans mécanique (verre) derrière. L'analyse TS2 est appliquée avec des sélections en énergie : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et ($E2 > E2_{Thres}$ ou $E2 = 0$) avec $E2_{Thres}$ présenté au Tableau 5.5.

de mérite (0,4 - 0,5). En effet, à 0,1 - 0,2 MeV, les électrons créés suite à l'interaction des photons dans le verre ont des énergies faibles et n'atteignent pas le premier étage.

Pour les gamma plus énergétiques : 1 et 1,5 MeV, l'introduction de verre diminue le facteur de mérite d'un facteur de ~ 2 . Par exemple, le facteur de mérite passe de 2,3 à 1 avec le verre lorsque le deuxième étage a une épaisseur de 6 mm. Cette diminution du facteur de mérite est due aux électrons secondaires créés dans le verre et qui atteignent le premier étage.

En conséquence, si de la matière est présente derrière les zones actives du détecteur gazeux, la performance est dégradée (F diminue d'un facteur ~ 2) pour les gamma à haute énergie. Un deuxième étage plus épais (eg : 50 mm) est alors à privilégier s'il y a de la matière derrière. **A 0,662 MeV, un facteur de mérite obtenu est de 0,82, ce qui correspond à un seuil de décision de 0,4 Bq/cm² dans un bruit de fond issu du ¹³⁷Cs de 35 $\mu\text{Sv/h}$, 30% inférieur à celui obtenu avec un deuxième étage en scintillateur.**

F.2 Simulation réaliste

Les simulations basiques précédentes ont montré que la configuration à deux étages de gaz avec l'analyse TS2 était la plus performante parmi toutes les configurations étudiées s'il n'y avait pas de matière derrière le détecteur. Nous allons donc tester l'efficacité de cette configuration avec le spectre gamma d'énergie réaliste. Ces études comprennent un étage de détecteur gazeux de 6 mm associé à un deuxième étage de détecteur gazeux d'épaisseur variable (6, 15 et 50 mm). Des épaisseurs de 3 μm de Mylar sont mises autour des deux détecteurs gazeux pour représenter les électrodes. L'effet de matière derrière le détecteur gazeux est également étudié.

La configuration réaliste détecte encore une fois $\sim 10\%$ moins d'électrons que la configuration basique à cause des feuilles de Mylar ajoutés.

Le facteur de mérite est présenté sur la Figure F.4 pour différentes épaisseurs du deuxième étage de gaz. L'effet de présence de matière simulée par 2 mm de verre derrière le deuxième étage est également présenté.

Avec une variation du facteur de mérite inférieure à 10%, l'effet de l'épaisseur de deuxième étage reste mineur lorsque le spectre de gamma réaliste est appliqué. Comme le deuxième étage de gaz fin favorise l'élimination de gamma à basse énergie et celui plus épais élimine mieux ceux de haute énergie (cf. paragraphe F.1.2.1), son effet se récompense par le spectre en énergie continu.

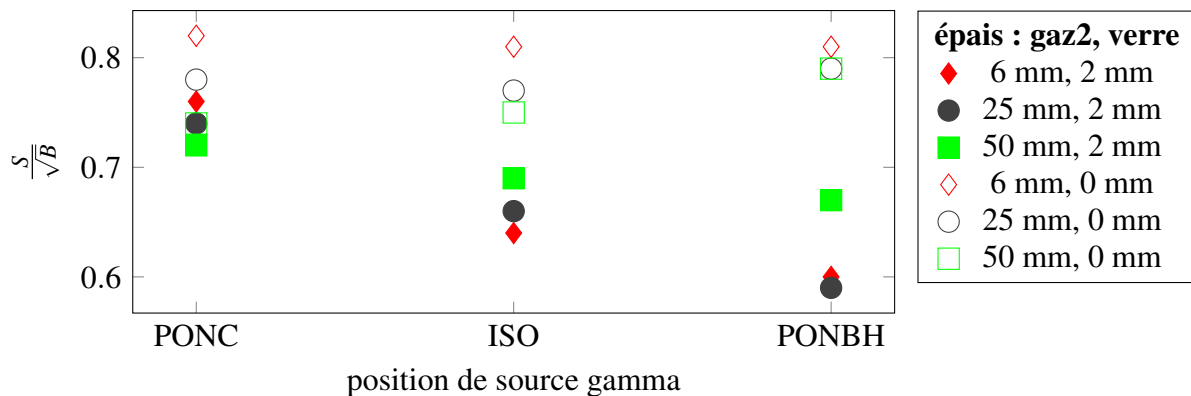


Figure F.4 Facteur de mérite $\frac{S}{\sqrt{B}}$ obtenu pour un détecteur gazeux (6 mm) associé à un deuxième étage de détecteur gazeux d'épaisseur variable en appliquant l'analyse TS2. Les rapports $\frac{S}{\sqrt{B}}$ avec et sans présence de matière (verre de 2 mm) sont présentés. Trois positions de sources gamma ont été simulées : PONC (ponctuelle devant le détecteur), ISO (isotrope), PONBH (ponctuelle derrière). Les sélections en énergie l'analyse TS2 sont : $E1 > 0,002 \text{ MeV}$ et $E2 = 0$.

L'ajout de matière derrière le deuxième étage de gaz diminue la performance de discrimination surtout si la source de gamma provient de l'arrière du détecteur.

Sans verre, le facteur de mérite atteint 0,8 avec la configuration optimisée, qui comprend un deuxième étage de gaz fin (6 mm). Par rapport aux résultats obtenus en simulation basique au paragraphe F.1.2.1 qui donne un facteur de mérite de 1,4, la performance est dégradée d'une façon significative à cause de l'ajout des feuilles de Mylar autour des détecteurs gazeux qui augmentent le taux de gamma détecté. Son taux correspond au taux de détection à $\sim 0,5 \text{ MeV}$ en simulation basique. Sans guide de lumière de 2 cm derrière, il n'y a pas d'effet d'atténuation des photons qui diminue le taux de gamma à basse énergie comme pour les autres configurations réalistes. En plus, la diminution du taux de bêta détectés (S) de 10% contribue également à cette dégradation du facteur $\frac{S}{\sqrt{B}}$. Cela confirme que ce détecteur très sensible à la matière placée près du gaz.

Comme attendu, le facteur de mérite diminue encore (à $\sim 0,7$ pour la source isotrope selon F.1.2.1) si on y ajoute un verre de 2 mm derrière. Cette fois, les meilleurs résultats sont obtenus pour un deuxième étage épais (50 mm).

F.3 Conclusion

En comparant le facteur de mérite de cette configuration avec celui de la configuration optimisée du détecteur gazeux associé à un scintillateur (avec TS3), cette configuration à deux étages de gaz semble moins performante avec un facteur de mérite inférieur de $\sim 10\%$ (ce qui a été toutefois dans les marges d'incertitudes de notre étude).

Par conséquent, le détecteur à deux étages de gaz atteint la même performance que le détecteur "GazScntPlast" seulement s'il n'y a pas de matière derrière le détecteur. Dans ce cas (sans verre), il permet d'obtenir un seuil de décision pour $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ de contamination bêta dans un bruit de fond gamma de $\sim 35 \mu\text{Sv/h}$. Avec un morceau de verre de 2 mm derrière le deuxième étage, sa performance se dégrade à $\sim 25 \mu\text{Sv/h}$ (comparables à celles des Phoswich).

L'applicabilité de ce détecteur est remise en question à cause de sa sensibilité importante à la présence de matière autour de la zone de détection. Il ne sera donc pas étudié expérimentalement.