



**HAL**  
open science

# Mesure et discrimination de rayonnements bêta et gamma dans une ambiance gamma élevée et fluctuante : conception, développement et caractérisation d'un contaminamètre haute sensibilité

Maxime Karst

► **To cite this version:**

Maxime Karst. Mesure et discrimination de rayonnements bêta et gamma dans une ambiance gamma élevée et fluctuante : conception, développement et caractérisation d'un contaminamètre haute sensibilité. Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0358 . tel-04416365

**HAL Id: tel-04416365**

**<https://theses.hal.science/tel-04416365>**

Submitted on 25 Jan 2024

**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.

# THÈSE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par

**Maxime KARST**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**

spécialité

**ASTROPHYSIQUE, PLASMA ET NUCLÉAIRE**

---

**Mesure et discrimination de rayonnements bêta  
et gamma dans une ambiance gamma élevée et  
fluctuante**

**Conception, développement et caractérisation  
d'un contaminamètre haute sensibilité**

---

Soutenue le **13 décembre 2016** devant la commission d'examen formée de :

M. J. BOCH	Professeur, Université Montpellier 2	Rapporteur
M. J. BUSTO	Professeur, Université Aix-Marseille	Rapporteur
M. C. CERNA	Ingénieur de Recherche, CNRS	Co-directeur de thèse
M. J. FAZILEABASSE	Ingénieur Expert Métrologie, EDF	Invité
M. I. GIOMATARIS	Directeur de recherche, CEA/IRFU	Examineur
M. P. MORETTO	Professeur, Université de Bordeaux	Président du jury
M. F. PIQUEMAL	Directeur de Recherche, CNRS	Directeur de thèse
M. J. TUR	Responsable produits, CARMELEC	Invité



# Remerciements

Avant toute chose, et afin de n’oublier personne, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont été impliquées et qui m’ont aidé à accomplir ce travail de thèse. En premier lieu, je tiens à remercier M. Philippe Moretto, directeur du CENBG, de m’avoir accueilli au sein de son laboratoire et d’avoir accepté de soutenir ce projet de thèse CIFRE qui est une première pour le CENBG. Je remercie Monsieur Jérôme Boch et Monsieur José Busto d’avoir accepté d’être mes rapporteurs de thèse et d’avoir minutieusement décortiqué ce manuscrit. Un grand merci également à Monsieur Ioannis Giomataris, Monsieur Javaraly Fazileabasse et Monsieur Jacques Tur pour leur participation à mon jury de thèse.

Évidemment, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à tous mes collègues de la société Carmelec. Certains sont partis, d’autres sont arrivés ... je vous remercie tous pour votre soutien tout au long de ce chemin : Hamid, Nicolas, Quentyn, Isabelle, Vincent, Marie, Paule, Didier, Estelle, Céline, Ludovic, Jean-Noël, Guillem, Alexandre, David, Pierrick, Benoit, Jacques et Sylvain. Mentions spéciales à Jacques qui a suivi de près les avancées du projet, à Pierrick qui a relu entièrement ce manuscrit pour traquer les dernières coquilles, à Alexandre et Jean Noël qui ont répondu en urgence à mes demandes “électroniques” et Vincent pour son soutien dans les derniers mois qui ont été chargés !

Sans eux, je n’aurais pas pu mener à bien ce travail, je remercie mes deux directeurs de thèse Cédric Cerna et Fabrice Piquemal. Nos brainstormings réguliers ont été (et sont toujours) une source intarissable d’idées et de tests à effectuer qui me permettent d’apprendre encore et encore. Je vous remercie également pour l’incroyable travail d’accompagnement que vous avez mis en place lors de la rédaction de ce manuscrit (énorme respect Cédric pour ton travail et ton soutien) et la préparation de ma soutenance.

Bien entendu, j’adresse un grand merci au groupe Neutrino/Faibles radioactivités (Fred, Christine et Michael) pour m’avoir accueilli au sein de leur équipe. Votre accueil et votre capacité d’adaptation à mon sujet, qui est éloigné des travaux que vous menez au quotidien, m’a permis de ne pas me sentir à l’écart. Je remercie également tous les copains de bureaux et thésards dont j’ai eu la chance de croiser la route : Benjamin, Amar, Medhi, Antoine, Cécile, Nicolas, Thomas, Jean et Arnaud (désolé je dois en oublier). Nos cafés, nos discussions, nos apéros et tous les moments passés avec vous ont été autant de sources de motivation pour terminer ce travail !

Je n’oublie pas non plus notre partenaire EDF. Un immense merci à Patrice Romane d’avoir accepté de m’accueillir au CNPE de Chinon afin de tester mes prototypes. Je remercie toutes les personnes de GPRE qui se sont intéressées à ce projet : Serge Blond, Fabrice Saintamon, Javaraly Fazileabasse, Alexandre Arnette et Jouhar Aberkane. Autre partenaire important, Didier Bourouina, merci d’avoir exaucé tous mes souhaits mécaniques, merci d’avoir repris tous mes plans farfelus et de t’être toujours plié en quatre pour usiner mes innombrables guides de lumière et autres boîtiers.

## *REMERCIEMENTS*

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien sans faille durant ces 3 années. Mes parents, à qui je dois un grand merci, si j'ai pu réaliser ce travail c'est car vous avez toujours été là quand j'en ai eu besoin (et je ne parle pas uniquement du nombre d'heures astronomiques passées à corriger ce manuscrit). Je garde le meilleur pour la fin, Elodie, ma fiancée, je te remercie de m'avoir soutenu et supporté pendant ces longues années d'alternances et cette fin d'année 2016 qui a été une vraie épreuve.

# Table des matières

Table des matières	iv
Introduction	2
<b>1 La radioprotection et son contexte d'application dans les Centres Nucléaires de Production d'Électricité</b>	<b>6</b>
1.1 Les Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE) en France . . . . .	7
1.1.1 Le parc nucléaire français en fonctionnement . . . . .	7
1.1.2 Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire . . . . .	9
1.1.3 Des équipements nécessitant une maintenance accrue . . . . .	14
1.2 La Radioprotection, réglementation et bases théoriques . . . . .	15
1.2.1 Quelques principes de base en radioprotection . . . . .	16
1.2.2 Rappel de la réglementation en vigueur . . . . .	27
1.2.3 Radioprotection et risques radiologiques en CNPE . . . . .	27
1.2.3.1 Les risques d'exposition externe . . . . .	27
1.2.3.2 Les risques de contamination . . . . .	29
1.2.3.3 Les risques d'exposition interne . . . . .	30
1.2.3.4 L'accès dans le bâtiment réacteur, tranche en puissance . . . . .	32
1.2.4 Statistiques d'exposition des intervenants en CNPE . . . . .	34
1.3 Le confinement de la contamination . . . . .	36
1.3.1 Origine de la contamination présente sur les chantiers . . . . .	37
1.3.2 Les enjeux de la mesure au plus près du chantier . . . . .	39
1.3.3 Les besoins futurs en mesure de contamination $\beta$ . . . . .	41
<b>2 Etat de l'art des solutions de mesure existantes</b>	<b>44</b>
2.1 Etude des solutions présentes sur le marché . . . . .	45
2.1.1 Les appareils existants . . . . .	46
2.1.2 Etudes utilisant des scintillateurs de type Phoswich . . . . .	48
2.1.3 Avantages et inconvénients des solutions existantes . . . . .	52
2.2 Les techniques de mesure utilisées . . . . .	53
2.2.1 Les compteurs gazeux . . . . .	53
2.2.2 Les détecteurs à scintillation . . . . .	59
2.2.3 Les détecteurs à semi-conducteur . . . . .	66
2.3 Comparaison des différentes technologies disponibles en fonction de leur sensibilité . . . . .	69
2.3.1 Notions de Seuil de Décision, de Limite de Détection et d'Activité Minimale Détectée . . . . .	70

2.3.2	Résumé des sensibilités atteintes par les différentes solutions proposées . . . . .	79
2.4	Spécifications nécessaires à atteindre dans la présente étude . . . . .	82
2.4.1	Rappel des contraintes supplémentaires d'une utilisation sur chantier . . . . .	82
2.4.2	Les limites de contamination surfacique à 4 Bq/cm <sup>2</sup> et 0,4 Bq/cm <sup>2</sup> . . . . .	83
2.4.2.1	Origine de ces limites . . . . .	84
2.4.2.2	Exemples d'application en France et dans le monde . . . . .	85
2.4.3	Caractéristiques techniques à atteindre . . . . .	86
<b>3</b>	<b>Élaboration et présentation du principe de détection retenu</b>	<b>88</b>
3.1	Rayonnements ionisants impliqués et leurs interactions avec la matière . . . . .	89
3.1.1	Rayonnements $\beta^-$ et les interactions $e^-$ /matière . . . . .	89
3.1.2	Rayonnements $\gamma$ et ses interactions avec la matière . . . . .	92
3.2	Présentation des premières estimations et du concept retenu . . . . .	93
3.2.1	La solution retenue dans le cadre de notre étude . . . . .	93
3.2.2	Les premières estimations obtenues avec ce concept . . . . .	95
3.3	Description de la chaîne de mesure . . . . .	100
3.3.1	Le scintillateur utilisé et son fonctionnement . . . . .	100
3.3.2	Le guidage de la lumière et les interfaces optiques . . . . .	102
3.3.3	Collection de lumière et photomultiplicateur utilisé . . . . .	105
<b>4</b>	<b>Outils de simulations et validation du principe de détection</b>	<b>110</b>
4.1	Simulation GEANT4 – Description des outils utilisés . . . . .	111
4.2	Définition des sources utilisées pour les simulations . . . . .	113
4.2.1	Emetteurs $\beta^-$ , source d'électrons et spectres $\gamma$ utilisés dans les simulations GEANT4 . . . . .	113
4.2.2	Activités et débits de dose mis en jeu . . . . .	114
4.2.3	Directions du flux de photons $\gamma$ étudiées . . . . .	117
4.3	Description du module optique v0 . . . . .	118
4.4	Simulation des interactions dans un scintillateur plastique . . . . .	119
4.4.1	Interactions $\beta$ et $e^-$ mono-énergétiques avec le module optique . . . . .	119
4.4.2	Interactions $\gamma$ - Evaluation du bruit de fond généré . . . . .	124
4.5	Validation du concept avec le design préliminaire v0 . . . . .	125
4.5.1	Description de la source scellée et du spectromètre à électrons utilisés lors de nos essais . . . . .	126
4.5.2	Méthodologie des essais et résultats obtenus . . . . .	128
4.5.2.1	Résultats obtenus pour la première série d'essais sur les scintillateurs seuls . . . . .	129
4.5.2.2	Résultats obtenus pour la deuxième série d'essais sur le module op- tique v0 complet . . . . .	133
4.6	Conclusions des simulations et essais sur les scintillateurs fins et le module optique v0	138
<b>5</b>	<b>Prototypes pré-industriels : qualification, validation et performances</b>	<b>140</b>
5.1	Le prototype v1 : présentation et retour d'expérience . . . . .	141
5.1.1	Présentation du prototype v1 . . . . .	141
5.1.2	Résultats obtenus et retour d'expérience . . . . .	143
5.2	Présentation des prototypes v2.1 et v2.2 . . . . .	146

## TABLE DES MATIÈRES

5.2.1	Origines des options choisies . . . . .	146
5.2.2	Particularités des prototypes v2.1 et v2.2 . . . . .	151
5.2.2.1	Le prototype v2.1 . . . . .	152
5.2.2.2	Le prototype v2.2 . . . . .	153
5.3	Essais de pré-qualification des prototypes v2.1 et v2.2 . . . . .	154
5.3.1	Rendements $^{60}\text{Co}$ . . . . .	155
5.3.2	Homogénéité du rendement sur toute la surface active de mesure . . . . .	155
5.3.3	Essais préliminaires des prototypes en irradiateur . . . . .	158
5.3.3.1	Présentation des installations . . . . .	158
5.3.3.2	Mesures d'homogénéité angulaire obtenues avec les prototypes v2.1 et v2.2 . . . . .	160
5.4	Contexte des essais en centrale nucléaire . . . . .	163
5.5	Essais en CNPE de nos deux prototypes . . . . .	166
5.5.1	Dépendance angulaire au bruit de fond $\gamma$ . . . . .	166
5.5.2	Dépendance temporelle au bruit de fond $\gamma$ . . . . .	172
5.5.3	Adaptation des calculs de SD, LD et AMD à notre étude et détermination expérimentale . . . . .	174
5.5.3.1	Calcul de SD, de LD et d'AMD - application à nos prototypes . . . . .	175
5.5.3.2	Détermination de l'AMD des prototypes lors de nos essais en BR . . . . .	178
5.5.4	Validation des AMD définis avec des mesures de frottis dans différentes am- biances $\gamma$ . . . . .	186
5.6	Conclusions des essais menés sur les prototypes v2.1 et v2.2 . . . . .	192
<b>6</b>	<b>Discussion et Perspectives</b>	<b>194</b>
6.1	Les prochaines étapes vers un prototype industriel . . . . .	194
6.1.1	Dimensionnement de l'électronique nécessaire . . . . .	195
6.1.2	Réalisation d'un algorithme de mesure dédié . . . . .	197
6.1.3	Réalisation de simulations optiques sous GEANT4 . . . . .	199
6.2	Evolution et adaptations possibles aux différents besoins . . . . .	200
	<b>Conclusion</b>	<b>204</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>206</b>



# Table des figures

1.1	Cartographie des réacteurs nucléaires en France, la technologie et le palier des réacteurs sont donnés en légende [3]. Leurs différences sont exposées dans le texte ci-après.	7
1.2	Calendrier de construction des centrales nucléaires françaises [7]. . . . .	9
1.3	Exemple de fission nucléaire se produisant dans un réacteur [10]. . . . .	10
1.4	Schéma de répartition des produits de fission et exemple de réaction de fission de l'uranium 235 [14]. . . . .	11
1.5	Description schématique du phénomène de diffusion élastique d'un neutron [16]. . . . .	12
1.6	Principe de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée. . . . .	13
1.7	Composition du combustible, proportion de remplacement du combustible lors d'ASR et fréquence de remplacement en fonction du type de palier de la tranche concernée [10]. . . . .	14
1.8	Diagrammes de Feynman des désintégrations radioactives $\beta^-$ (a) et $\beta^+$ (b) [22]. . . . .	17
1.9	Différents modes d'exposition aux rayonnements ionisants : (a) l'exposition externe ou irradiation, (b) la contamination externe de surface et (c) la contamination interne.	18
1.10	Parcours des différents rayonnements ionisants dans le corps humain [21]. . . . .	20
1.11	Schéma récapitulatif des différents scénarios engendrés par les rayonnements ionisants sur les tissus biologiques [26, 27] . . . . .	24
1.12	Limites réglementaires pour les travailleurs exposés [24]. . . . .	25
1.13	Récapitulatif des différents critères à respecter lors de la réalisation d'un zonage [29].	26
1.14	Exemple de signalisation de points chauds (à droite). Types de signalisation utilisés pour le marquage des points chauds orange et rouge (à gauche). . . . .	28
1.15	Exemple de radiamètre utilisé par les chargés de travaux lors d'intervention en zone surveillée ou contrôlée. Dimensions réelles : 120 x 65 x 22 mm. . . . .	29
1.16	Classement des interventions selon les risques de contamination $\beta$ par EDF. Démarche « Optimisation de la Radioprotection » [29]. . . . .	30
1.17	Exemple de tenues étanches ventilées (à droite) et de heaumes ventilés (à gauche) [29].	31
1.18	Schéma de désintégration de l'Azote 16 [30]. . . . .	32
1.19	Evolution de l'indice horaire de dose (en $\mu\text{Sv}$ par heure travaillée en zone contrôlée) sur les 15 dernières années [31]. . . . .	34
1.20	Evolution de la dose individuelle moyenne chez les agents EDF et chez les prestataires sur les 15 dernières années [31]. . . . .	35
1.21	Evolution du nombre d'intervenants ayant absorbé une dose annuelle supérieure à 20, 16 et 14 mSv sur les 15 dernières années [31]. . . . .	35
1.22	Evolution du niveau de propreté radiologique des locaux par centrale nucléaire sur les 10 dernières années [31] . . . . .	36

1.23	Liste des produits d'activation issus du fluide primaire ou de l'air [10, 32]. . . . .	38
1.24	Liste des principaux radionucléides générés dans un réacteur de type REP par l'activation des structures et/ou des produits de corrosion [10]. . . . .	40
1.25	Schéma de décroissance du cobalt 60 [34]. . . . .	42
2.1	Exemple de deux détecteurs utilisés sur site pour la mesure de contamination surfacique. (a) Le Dolphy $\beta$ un détecteur basé sur une technologie Geiger-Müller Pancake fabriqué par la société Carmelec. (b) Le COMO 170 un détecteur basé sur une sonde à scintillation (scintillateur plastique) fabriqué par la société SEA GmbH. . . . .	45
2.2	Représentation schématique de la forme et du fonctionnement d'un scintillateur de type Phoswich ainsi que des caractéristiques temporelles des signaux générés [43]. . . . .	48
2.3	Exemples de situations où l'intervenant réalise un contrôle de non-contamination. En haut à gauche l'intervenant contrôle ses chaussures, puis en haut à droite il contrôle un objet. En bas à gauche un intervenant contrôle les gants d'un collègue. Enfin en bas à droite, exemple d'un poste de travail dédié à la mesure de contamination [40]. . . . .	49
2.4	Récapitulatif des interactions $\beta$ et $\gamma$ possibles dans un scintillateur Phoswich tel que celui développé par le CEA List et EDF R&D [41]. . . . .	50
2.5	Illustration de distribution d'évènements dans le repère (S1,S2) [41]. . . . .	51
2.6	Mouvements des paires "électron-ion" dans un détecteur gazeux. . . . .	54
2.7	Variation de l'amplitude d'impulsion (nombre de charges collectées) en fonction de la tension appliquée aux bornes d'un détecteur gazeux [49]. . . . .	55
2.8	Mécanismes de propagation des avalanches électroniques primaires (régime GM) [15]. . . . .	57
2.9	Plusieurs types de GM Pancake distribués par LND Inc. [51] (a). Exemple de forme d'anode utilisée dans les GM Pancake (b). . . . .	58
2.10	Variation du pourcentage d'absorption $\beta$ (pour plusieurs radionucléides) en fonction de l'épaisseur de la fenêtre de mica (en $\text{g}/\text{cm}^2$ ) [52]. . . . .	58
2.11	Principe de fonctionnement d'un détecteur à scintillation avec un photomultiplicateur. . . . .	59
2.12	Schéma du processus de luminescence dans un scintillateur cristallin inorganique. . . . .	60
2.13	Diagramme de Jablonski représentant les transitions entre états moléculaires excités correspondant aux absorptions et émissions de lumière par une molécule organique [48]. . . . .	61
2.14	Variation du coefficient d'absorption total $\mu$ en fonction de l'énergie des $\gamma$ incidents pour deux types de scintillateurs [55]. . . . .	63
2.15	Schéma de principe d'un photomultiplicateur [50]. . . . .	64
2.16	Exemple de variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs types de photocathodes. Données Hamamatsu [56]. . . . .	65
2.17	Exemple de pont diviseur de tension utilisé pour appliquer un potentiel entre chaque dynode d'un PM . . . . .	66
2.18	Différents dopages d'un semi-conducteur (cristal Si) : Dopages de type N (à gauche) et de type P (à droite). . . . .	67
2.19	Exemple de jonction PN et de sa zone de déplétion. . . . .	68
2.20	Etapes de fabrication d'un détecteur silicium de type "Passivated Planar Detector" [61]. . . . .	69
2.21	Exemple de source étalon recommandée et utilisée pour déterminer le rendement des contaminamètres $\beta$ . . . . .	71
2.22	Exemple de distribution obtenue pour la mesure de bruit de fond et sa représentation sous forme d'histogramme [15]. . . . .	72

TABLE DES FIGURES

2.23	Représentation des distributions obtenues lors de mesures de bruit de fond et sur échantillon. Ces distributions sont accompagnées des variables statistiques réutilisées dans nos calculs de SD. . . . .	73
2.24	Représentation de la distribution du taux de comptage net d'échantillons non contaminés, du seuil de décision et de l'intervalle de confiance. . . . .	74
2.25	Représentation de la distribution des taux de comptage nets d'échantillons contaminés (en noir) et non contaminés (en bleu), du seuil de décision et de la limite de détection. . . . .	76
2.26	Evolution de l'Activité Minimale Détectable (en Bq) pour un appareil de mesure muni d'un détecteur GM Pancake de 15 cm <sup>2</sup> de diamètre en fonction du bruit de fond ambiant (en µSv/h) [68]. . . . .	78
2.27	Exemple de logigramme reprenant les étapes du dépistage direct et de la mesure directe de contamination surfacique. . . . .	80
2.28	Exemples de logigrammes reprenant les étapes du dépistage indirect (a) et de la mesure indirecte (b) de contamination surfacique [68]. . . . .	80
2.29	Photographie et vue en coupe de la sonde SABG-30B développée par Canberra [70] . . . . .	81
2.30	Exemple de situation sur chantier en zone contrôlée et de contrôle réalisé à chaque sortie de chantier. . . . .	83
2.31	Copie du Tableau X du Safety Series n°6 de l'AIEA datant de 1961 et reprenant les niveaux de contamination non fixée permis [71]. . . . .	84
3.1	Exemple de spectre d'émission $\beta^-$ du carbone 14 issu de nos simulations GEANT4. . . . .	89
3.2	Représentation des trois principaux processus d'interaction entre un électron et la matière [79, 80]. . . . .	90
3.3	Perte linéique d'énergie des électrons dans le cuivre en fonction de leur énergie initiale. Les deux principales composantes d'interaction sont notées sur le graphique . . . . .	91
3.4	Exemples de trajectoires d'électron dans la matière. Mise en évidence des différentes interactions élastiques, inélastiques ainsi que le backscattering [80]. . . . .	91
3.5	Représentation des trois principaux processus d'interaction entre un photon et la matière [79]. . . . .	92
3.6	Domaines de prédominance des différents processus d'interaction photon/matière en fonction de l'énergie du photon incident (en MeV) et du numéro atomique Z du matériau [15]. . . . .	93
3.7	Schéma de principe du concept retenu. Le détecteur réalisé sera composé de deux modules optiques. . . . .	94
3.8	Calcul de l'angle solide de détection. . . . .	96
3.9	Evolution des coefficients d'atténuation massique ( $\mu/\rho$ ) en fonction de l'énergie des photons incidents dans du scintillateur plastique [81]. . . . .	97
3.10	Evolution du pouvoir d'arrêt pour des électrons dans un scintillateur plastique en fonction de leur énergie d'incidence. La partie orange représente la zone d'intérêt pour le cobalt 60 [82]. . . . .	98
3.11	Vues du prototype de contaminamètre v1. A droite la vue de dessus et à gauche la vue de 3/4 arrière. . . . .	100
3.12	Les différentes étapes du mécanisme de scintillation dans un scintillateur contenant plusieurs solutés. L'ordre de grandeur de concentration est donné sur la droite de la figure [86] . . . . .	101
3.13	Spectre en émission du scintillateur ELJEN EJ-212 [85]. . . . .	102

3.14	Différents types de guides de lumière habituellement utilisés en mesure de rayonnements ionisants : (a) GdL de type “fish tail”, (b) GdL de type adiabatique et (c) GdL utilisant une fibre optique shifteuse. [56, 55] . . . . .	103
3.15	Evolution de la transmission de lumière en fonction de la longueur du guide de lumière et de différents types de montage. (a) Réflexions totales internes sans réflecteur, (b) Réflexions totales internes avec réflecteur, (c) guide de lumière peint avec une peinture réfléchive, (d) et (e) sont des essais sans guide de lumière [92]. . . . .	104
3.16	Evolution de l’efficacité quantique du photomultiplicateur 9102B ET Enterprises utilisé dans notre étude [94] . . . . .	106
3.17	Schéma de principe du pont diviseur actif utilisé dans notre prototype. Attention, la seule différence réside dans la polarité choisie. Pour des questions de compatibilité électromagnétique nous avons choisi de mettre la cathode à la masse [93, 97]. . . . .	107
3.18	Schéma de principe de notre module haute tension. Ce dernier inclut le pont diviseur actif et l’alimentation haute tension [96]. . . . .	108
4.1	Schématisation des 17 grandes classes composant GEANT4. Les liens représentent des dépendances uni-directionnelles. Les classes situées en bas du diagramme sont utilisées par celles placées au dessus [98]. . . . .	112
4.2	Vues en coupe latérale et de dessus du BR, avec en rouge l’emplacement du détecteur. . . . .	115
4.3	Spectre $\gamma$ mesuré à l’intérieur d’un BR à l’aide d’un spectromètre germanium de type HPGe 45 % de Canberra. . . . .	116
4.4	Facteurs de conversion d’équivalent de dose ambiant par unité de fluence à des profondeurs de 0,07 et 10 mm dans les tissus d’après la CIPR74 pour les photons [102]. . . . .	117
4.5	Simulation du bruit de fond $\gamma$ dans $2\pi$ (à gauche) ou $4\pi$ (à droite). La sphère se situe à 75 cm du détecteur irradié. . . . .	118
4.6	Schéma éclaté des composantes du module optique v0. Le scintillateur est représenté en bleu ciel, le guide de lumière en rouge et l’ensemble PM/pont diviseur est en gris/bleu. . . . .	119
4.7	Illustration de la géométrie utilisée pour la simulation des interactions dans le scintillateur du prototype v0. A gauche, une visualisation de la géométrie GEANT4 et à droite un schéma simplifié. . . . .	120
4.8	Énergie déposée par des électrons mono-énergétiques incidents dans un scintillateur Eljen EJ-212 de 100 $\mu\text{m}$ d’épaisseur. . . . .	121
4.9	Energie déposée par les rayonnements $\beta$ du strontium 89 ( $Q_\beta = 1500,4$ keV) dans un scintillateur Eljen EJ-212 de 100 $\mu\text{m}$ d’épaisseur en fonction de leur énergie incidente. . . . .	122
4.10	Exemples de dépôts d’énergie pour des radionucléides d’énergie de transition différentes ( $Q_\beta$ ). En haut à gauche le carbone 14, en bas à gauche l’étain 121 et à droite le béryllium 10. . . . .	123
4.11	Exemple de spectre $\gamma$ utilisé dans nos simulations de bruit de fond. . . . .	124
4.12	Energie déposée dans le scintillateur par le bruit de fond pour 5 millions de $\gamma$ incidents simulés. . . . .	125
4.13	Simulation d’un bruit de fond $\gamma$ simple à l’aide d’une source de césium 137 ( $E_\gamma = 661,7$ keV) pour des scintillateurs plastiques de 100 $\mu\text{m}$ et 200 $\mu\text{m}$ d’épaisseur. . . . .	126
4.14	Vue en coupe et principe de fonctionnement du spectromètre à électrons utilisé au CENBG [105]. . . . .	127

TABLE DES FIGURES

4.15	Spectre en énergie de plusieurs électrons mono-énergétiques émis par le spectromètre et mesurés à l'aide d'une diode silicium [105]. . . . .	127
4.16	Source scellée de césium 137 utilisée pour nos essais de réponse au bruit de fond $\gamma$ sur le prototype v0 [106]. . . . .	128
4.17	Photographie du banc de test des scintillateurs, le PM Photonis XP5312 est couplé à un scintillateur et le tout est recouvert de Mylar <sup>®</sup> aluminisé. Le montage est maintenu par une potence devant l'entrée du spectromètre à électrons (a). Photographie du module optique v0 entièrement monté (b). . . . .	129
4.18	Spectromètre à électrons motorisé et sa boîte noire utilisés dans le cadre de nos essais [105]. . . . .	129
4.19	Distributions des amplitudes et des ADC obtenues avec le scintillateur Eljen EJ-212 de 100 $\mu\text{m}$ (a) et Envinet PS de 300 $\mu\text{m}$ (b) pour des électrons de 400 keV. . . . .	130
4.20	Distributions simulées (en keV) et mesurées (en mV) pour le scintillateur Envinet PS de 300 $\mu\text{m}$ avec des électrons de 800 keV. . . . .	131
4.21	Résumé des résultats obtenus pour les deux scintillateurs testés et comparaison entre les simulations GEANT4 et les amplitudes moyennes des pulses mesurées. . . . .	132
4.22	Photographie de la boîte noire du spectromètre à électrons (a) et positionnement du module v0 à l'intérieur de cette dernière (b). . . . .	133
4.23	Distributions des amplitudes de signaux obtenues avec le module optique v0 sur le spectromètre à électrons à différentes énergies comprises entre 0,2 et 1,3 MeV. . . . .	134
4.24	Evolutions du seuil de discrimination (en bleu) et du dépôt d'énergie dans le scintillateur (en rouge) en fonction du taux de comptage dans le module v0. . . . .	136
4.25	Evolution du $\chi^2$ en fonction du coefficient multiplicateur $\zeta$ choisi pour adapter les données simulées à nos résultats expérimentaux. . . . .	136
4.26	Evolution du taux de comptage en fonction de l'énergie déposée dans le scintillateur et du seuil de discrimination corrigé. . . . .	137
5.1	Schéma de principe du module HV38K20CP commercialisé par ET Enterprises incluant le pont diviseur actif et l'alimentation haute tension [96]. . . . .	141
5.2	Plan mécanique du prototype v1 comprenant le boîtier en aluminium (en 2 parties), les PM, les ponts diviseurs de tension et les guides de lumières (GdL). . . . .	142
5.3	Vue de face de la carte d'acquisition WaveCatcher développée par le LAL d'Orsay [109].	143
5.4	Vue de dessous du guide de lumière "GdL mesure" utilisé dans le prototype v1. Evolution de la section du guide de lumière en fonction de la position. . . . .	144
5.5	Résultat d'homogénéité surfacique du prototype v1 (a) et évolution du rendement cobalt 60 du prototype v1 en fonction du seuil de discrimination (b). Le seuil choisi pour ce prototype était de 50 mV, ce qui correspond à 13,1 % de rendement au cobalt 60. . . . .	145
5.6	Exemple de géométries simulées avec la nature des matériaux utilisés (a) et présentation de deux types d'irradiation : $2\pi$ arrière (b) et $4\pi$ (c). . . . .	147
5.7	Vues des deux types de guide de lumière : plein (a) et évidé (b). . . . .	147
5.8	Schéma de la géométrie choisie comprenant les flux d'électrons pour chaque interface (a). Les flèches rouges montrent que l'irradiation est dans $4\pi$ . Distributions totales des énergies déposées dans le scintillateur avant (b) et arrière (c). Exemples de distributions des énergies des électrons observées à l'interface boîtier/GdL ar. (d) et World/Scinti. av. (e) [112]. . . . .	148

5.9	Distribution des énergies déposées dans chaque scintillateur par des évènements causés par le bruit de fond $\gamma$ . Un visuel du guide de lumière (5 mm PMMA) utilisé pour cette simulation est également présenté. . . . .	149
5.10	Vues de face et arrière d'une simulation GEANT4. Le prototype est muni de deux grilles en acier (à l'avant et à l'arrière) . . . . .	149
5.11	Vue de profil d'un guide de lumière en PMMA évidé. . . . .	151
5.12	Vue des deux modules optiques utilisés dans le prototype v2.1. Ils sont composés de guides de lumière évidés. . . . .	152
5.13	Vue éclatée des prototypes v2.1 (a) et v2.2 (b) complets. Le prototype v2.1 bénéficie de guides lumière et d'un boîtier évidés. . . . .	153
5.14	Vue des deux modules optiques utilisés dans le prototype v2.2. Ils sont composés de guides de lumière pleins en PMMA. . . . .	153
5.15	Rendements au cobalt 60 des deux prototypes v2.1 et v2.2 en fonction du seuil de discrimination des voies de mesure. . . . .	154
5.16	Taux de comptage en fonction du seuil de discrimination du MO avant du prototype v2.1 (a) et du prototype v2.2 (b) pour les 5 positions de référence. Chaque graphique est accompagné dans sa partie inférieure des écarts mesurés par rapport à la moyenne des taux de comptage. . . . .	156
5.17	Design du socle permettant de placer la source de cobalt 60 face au détecteur pour les tests d'homogénéité de rendement. . . . .	157
5.18	Représentation de l'homogénéité de détection à la surface du prototype v2.1 à gauche et v2.2 à droite. . . . .	158
5.19	Photographie du banc d'irradiation (à gauche) et plan du château de plomb contenant la source de césium 137 (à droite). . . . .	159
5.20	Irradiation du prototype v2.1 pour déterminer sa réponse angulaire dans un bruit de fond $\gamma$ de 30 $\mu\text{Sv/h}$ . . . . .	159
5.21	Représentation des deux principaux plans d'irradiations testés en irradiateur et en centrale nucléaire. . . . .	160
5.22	Ecarts par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de discrimination dans le plan horizontal (a) et vertical (b) pour le prototype v2.1. Essais effectués dans l'irradiateur de la société Carmelec à 30 $\mu\text{Sv/h}$ . . . . .	161
5.23	Ecarts par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de discrimination dans le plan horizontal (a) et vertical (b) pour le prototype v2.2. Essais effectués dans l'irradiateur de la société Carmelec à 30 $\mu\text{Sv/h}$ . . . . .	162
5.24	Vue du ciel de la centrale nucléaire de Chinon [108]. . . . .	164
5.25	Photographies des principaux lieux d'essais : à gauche dans le BR au niveau 0.00m à proximité de l'espace annulaire (boucle 3) et à droite dans un local du BK. . . . .	165
5.26	Photographies et mesures de spectre $\gamma$ (spectromètre CZT) effectuées dans le BK (a) et le BR (b) . . . . .	165
5.27	Photographies descriptives des lieux de test des prototype v2.1 (a) et v2.2 (b) lors des essais de réponse angulaire au BdF $\gamma$ . Sur le plan en coupe du BR au niveau 0,00m (a) le point turquoise représente le lieu des essais du prototype v2.1 et le point rouge celui pour le prototype v2.2. . . . .	167

TABLE DES FIGURES

5.28	Ecarts par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de détection dans le plan vertical (a) et horizontal (b) pour le prototype v2.1. . . . .	168
5.29	Ecarts par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de détection dans le plan vertical (a) et horizontal (b) pour le prototype v2.2. . . . .	170
5.30	Réponses angulaires des prototypes v2.1 (a et b) et v2.2 (c et d) avec un seuil à 90 mV dans les plans vertical et horizontal. . . . .	171
5.31	Evolution des taux de comptage bruts des deux modules optiques du prototype v2.2 et du DED lors des essais effectués (BR) dans une ambiance d'environ 37 $\mu$ Sv/h. . .	173
5.32	Variations instantanées du DED mesurées sur chaque module optique du prototype v2.2. . . . .	173
5.33	Evolution de la différence des taux de comptage bruts mesurés sur les deux modules optiques du prototype v2.2. . . . .	173
5.34	Rappel de la composition et du principe de fonctionnement du prototype v2.2. . . .	174
5.35	Représentation des distributions obtenues lors de mesures effectuées avec l'un de nos prototypes. Ces distributions sont accompagnées des variables statistiques réutilisées dans nos calculs de SD. . . . .	175
5.36	Représentation de la distribution du taux de comptage net d'échantillons non contaminés mesurés à l'aide d'un de nos prototypes, du seuil de décision et de l'intervalle de confiance. . . . .	176
5.37	Représentation de la distribution des taux de comptage net d'échantillons contaminés mesurés à l'aide d'un de nos prototypes, du seuil de décision et de la limite de détection. . . . .	177
5.38	Essais du prototype v2.1 dans une ambiance $\gamma$ comprise entre 1 et 3 $\mu$ Sv/h. Chronogrammes des taux de comptage bruts des 2 voies du prototype (a) et du taux de comptage final en fonction de la profondeur de la moyenne glissante (c). Distributions de ces taux de comptages et évolution en fonction de la profondeur de la moyenne glissante respectivement (b) et (d). . . . .	180
5.39	Essais du prototype v2.2 dans une ambiance $\gamma$ comprise entre 1 et 3 $\mu$ Sv/h. Distributions des différences de taux de comptage entre les voies "Signal + BdF" et "BdF" pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes. . . . .	181
5.40	Essais du prototype v2.1 dans une ambiance $\gamma$ comprise entre 12 et 18 $\mu$ Sv/h. Distributions des différences de taux de comptage entre les voies "Signal + BdF" et "BdF" pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes. . . . .	181
5.41	Essais du prototype v2.2 dans une ambiance $\gamma$ comprise entre 10 et 15 $\mu$ Sv/h. Distributions des différences de taux de comptage entre les voies "Signal + BdF" et "BdF" pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes . . . . .	182
5.42	Essais du prototype v2.1 dans une ambiance $\gamma$ comprise entre 25 et 35 $\mu$ Sv/h. Distributions des différences de taux de comptage entre les voies "Signal + BdF" et "BdF" pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes. . . . .	183
5.43	Essais du prototype v2.2 dans une ambiance $\gamma$ comprise entre 25 et 35 $\mu$ Sv/h. Distributions des différences de taux de comptage entre les voies "Signal + BdF" et "BdF" pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes. . . . .	183
5.44	Evolution des RMS ( $C_{Net}$ ) obtenus lors de nos essais en laboratoire et en CNPE en fonction de la durée d'intégration avec le prototype v2.1 (a) et v2.2 (b). . . . .	184

5.45	Tableaux récapitulatifs des sensibilités atteintes par les prototypes v2.1 (a) et v2.2 (b). L'évolution de l'AMD est présentée en fonction du temps de comptage et du DED ambiant. . . . .	185
5.46	Résultats des mesures effectuées avec le prototype v2.1 sur des frottis de 200 Bq et 450 Bq dans des ambiances de 1-3 $\mu\text{Sv/h}$ , 12-18 $\mu\text{Sv/h}$ et 25-35 $\mu\text{Sv/h}$ . . . . .	187
5.47	Résultats des mesures effectuées avec le prototype v2.2 sur des frottis de 200 Bq et 450 Bq dans des ambiances de 1-3 $\mu\text{Sv/h}$ , 10-15 $\mu\text{Sv/h}$ et 25-35 $\mu\text{Sv/h}$ . . . . .	188
6.1	Exemple de signal mesuré en sortie de PM (a). Distributions des temps de montée des signaux (b), des temps de descente (c) et le temps FWHM (d). . . . .	196
6.2	Exemples de différents algorithmes de traitement. Le premier (a) est plus réactif et le deuxième (b) est plus stable. La valeur affichée ainsi que différentes moyennes glissantes sont également représentées. . . . .	198
6.3	Présentation d'un guide de lumière défini en GDML et issu des plans mécaniques (STEP) à gauche. Visualisation d'une simulation optique intégrant le parcours des photons lumineux (à droite). . . . .	199
6.4	Illustrations d'un appareil en deux-blocs : MIP 10 et de sa sonde SBM2D (a) et d'un appareil monobloc : le MiniTrace $\beta$ (dim. 84 mm x 29 mm x 139 mm) (b). . . . .	200
6.5	Prototype de mesureur de frottis BT-45 (en noir). . . . .	201

# Liste des tableaux

1.1	Bilan énergétique en MeV de la fission induite par des neutrons thermiques sur de l'uranium 235 [13]	11
1.2	Bilan synthétique des interactions rayonnements/matière et de leur dangerosité pour les tissus biologiques.	19
1.3	Energie de première ionisation des principaux éléments composant la matière biologique.	20
1.4	Extrait des valeurs du facteur de pondération radiologique $w_R$ en fonction du type de rayonnement [23].	21
1.5	Extrait des valeurs du facteur de pondération tissulaire $w_T$ en fonction du type de rayonnement [23].	22
1.6	Résumé des liens entre grandeurs de protection et grandeurs opérationnelles [25].	23
1.7	Exemples d'effets déterministes observés pour différents seuils de dose absorbée - Cas d'une exposition aiguë globale [27].	25
1.8	Exemples d'effets déterministes observés pour différents seuils de dose absorbée - Cas d'une exposition unique et brève d'un tissu ou organe.	25
1.9	Définition des zones propreté/déchets suivant les recommandations de la DI104.	39
2.1	Tableau comparatif entre plusieurs contaminamètres utilisés sur le marché. Ils représentent les principales familles de technologies disponibles. Les données du tableau sont issues de deux études réalisées par le service SPR du CEA Marcoule [37, 38].	47
2.2	Résumé des avantages et inconvénients de chaque famille de détecteurs dans le cadre de mesure de contamination surfacique $\beta$ dans une ambiance $\gamma$ importante.	52
2.3	Energie moyenne $W$ de création d'une paire "électron-ion" dans différents gaz (en eV/paire) [48].	54
2.4	Principales caractéristiques des scintillateurs organiques et inorganiques les plus utilisés [50, 56].	62
2.5	Principales propriétés du silicium et du germanium intrinsèques [48].	66
3.1	Principales caractéristiques du scintillateur plastique EJ-212 fabriqué par ELJEN [85].	101
3.2	Densité et indice de réfraction de colles, ciments et graisses optiques utilisés lors de notre étude. Les données pour les différents milieux à interfacer sont également indiquées [88, 87, 89].	102
3.3	Evaluation des différentes structures de dynodes disponibles par rapport à plusieurs critères importants tels que le gain, la linéarité ou encore le taux d'after pulse [93].	106
3.4	Aperçu des différences entre 2 types de matériaux utilisés à la surface des dynodes [93].	106

4.1	Exemples de radioéléments mesurés lors d'un arrêt de tranche (prélevés en fond de piscine)[101]. . . . .	114
5.1	Tableau récapitulatif des configurations simulées sous GEANT4. Évènements ayant interagi dans chaque scintillateur et différence entre ces deux taux donnant un aperçu de l'homogénéité entre les deux modules optiques pour 25 millions d'évènements tirés [112]. . . . .	150
5.2	Tableau récapitulatif des essais effectués en CNPE et comparaison avec les estimations de notre modèle statistique. . . . .	191

# Introduction

La société Carmelec est une PME française située à Perpignan. Son activité principale est la conception et la fabrication d'appareils de mesure de rayonnements ionisants, de champ magnétique, de lumière visible et d'UV. Ces appareils sont notamment utilisés dans le domaine de la radioprotection et dans les solutions d'essais et contrôles non destructifs à destination des industries nucléaires, aéronautiques, ferroviaires et automobiles.

En 2012, EDF a contacté la société Carmelec pour travailler sur l'étude du besoin et sur l'ergonomie d'un futur détecteur de contamination surfacique. Cette étude s'inscrivait dans le cadre d'un nouvel appel d'offres destiné au renouvellement de son parc d'appareils de mesure. A cette époque, Carmelec n'avait pas de cellule R&D dans le domaine nucléaire et ne pouvait répondre que partiellement à cette étude. Consciente du challenge et de l'enjeu que représentait pour elle un tel projet, Carmelec a décidé de mettre en place un partenariat avec un laboratoire de recherche et de concrétiser son engagement en me recrutant dans le cadre d'un doctorat CIFRE (financement ANRT).

Le laboratoire concerné est le Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG). Le CENBG est une Unité Mixte de Recherche (UMR 5797) du CNRS/IN2P3 et de l'Université de Bordeaux « Département Sciences et Technologies ». Le programme scientifique du CENBG couvre un vaste domaine comprenant la physique nucléaire, la physique des particules et la physique des astroparticules. C'est le groupe Neutrino et Faibles Radioactivités qui, au sein du laboratoire, a encadré scientifiquement le projet de contaminamètre.

Le groupe Neutrino et Faibles Radioactivités est impliqué dans les expériences NEMO3 et SuperNEMO qui portent sur la recherche de désintégration double-bêta sans émission de neutrino  $\beta\beta(0\nu)$ . Un des objectifs de l'expérience SuperNEMO est de déterminer la masse et la nature du neutrino. Le groupe est également spécialisé dans la mesure basse radioactivité, notamment, via son implication dans la plateforme PRISNA (Plateforme Régionale Interdisciplinaire de Spectrométrie Nucléaire en Aquitaine) ainsi qu'au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM).

L'étude réalisée au cours de ce travail de thèse avait pour but de concevoir un appareil de mesure adapté à la détection de contamination surfacique  $\beta$  de quelques Bq/cm<sup>2</sup> (typiquement  $\leq 4$  Bq/cm<sup>2</sup>), dans une ambiance  $\gamma$  de quelques dizaines de  $\mu$ Sv/h (typiquement  $\leq 100$   $\mu$ Sv/h) et fluctuante (typiquement de l'ordre de 30% en 1 seconde). Le temps de mesure nécessaire à la détection est de l'ordre de quelques secondes (typiquement  $\leq 4$  secondes).

Suite aux résultats obtenus lors de ma première année de thèse, EDF GPRE (Groupe de Prévention des Risques Environnementaux) s'est rapproché du CENBG et de Carmelec pour se joindre à ce partenariat. EDF GPRE nous a permis d'accéder à un site nucléaire (CNPE de Chinon) et

de tester nos prototypes à plusieurs reprises. Par la suite, EDF GPRE a suivi régulièrement nos avancées notamment du point de vue de la métrologie et de la radioprotection.

Ce sujet est très important pour EDF car, à ce jour, les appareils utilisés sur site pour mesurer la contamination surfacique ne permettent pas de réaliser des mesures fiables au plus proche des chantiers, dans les ambiances décrites plus haut. Le travail présenté dans ce manuscrit est donc le fruit de cette collaboration tripartite.

Cette étude passe, tout d'abord, par un état de l'art complet des solutions existantes susceptibles de répondre au problème. Il était nécessaire, par la suite, de sélectionner un concept répondant aux contraintes de terrain (niveaux de contamination et bruits de fond  $\gamma$  ambiants) en réalisant des simulations Monte Carlo. Ensuite, nous avons réalisé un premier prototype dont le but était de déterminer la faisabilité de notre concept. Celle-ci ayant été démontrée, plusieurs versions de prototypes furent expérimentées dans la centrale nucléaire de Chinon, c'est à dire en conditions réelles. Plusieurs chapitres étayent cette étude.

Le premier est consacré à la radioprotection et à son application dans les Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE). Il reprend également la carte de France des CNPE, leur fonctionnement et leur besoin de maintenance. Celui-ci est le principal facteur induisant la présence de contamination surfacique et donc l'utilisation de contaminamètres. Enfin, nous présenterons l'origine de cette contamination et pourquoi il est nécessaire de la mesurer au plus près des chantiers.

Le deuxième chapitre exposera l'état de l'art des solutions de mesures existantes. Les principaux appareils utilisés sur les chantiers seront détaillés. Leurs points forts et leurs points faibles y seront analysés. Les différentes techniques de mesure utilisées dans le domaine de la radioprotection ainsi que leurs niveaux de sensibilité seront également comparés. La fin de ce chapitre stipulera les spécifications techniques proposées lors de la présente étude.

Le troisième chapitre décrira le concept retenu. Il mettra en évidence les différentes interactions rayonnement-matière mises en jeu. Ensuite, nous présenterons les premières estimations issues de nos calculs. Pour finir, chaque élément constituant la chaîne de mesure de notre prototype sera détaillé.

Le quatrième chapitre développera les premières simulations Monte Carlo et l'étude de faisabilité de notre concept. Il intègrera les données d'entrée des simulations GEANT4 réalisées ainsi que les résultats obtenus. Il décrira, également, les premiers essais permettant de valider nos calculs et donc le principe retenu.

Le cinquième chapitre concernera les prototypes pré-industriels réalisés et testés au CNPE de Chinon. En effet, trois prototypes ont été fabriqués et testés. Leur présentation intégrera également celle des conditions d'essais comparables à celles rencontrées sur un chantier. Ces essais et l'analyse des résultats obtenus nous permettront de dresser un bilan des sensibilités atteintes dans des ambiances  $\gamma$  importantes et fluctuantes. Ce chapitre inclura les exigences d'EDF comme par exemple l'homogénéité de la réponse surfacique ou la dépendance angulaire au bruit de fond.

Le dernier chapitre, quant à lui, développera les perspectives du projet. Les améliorations possibles des prototypes pré-industriels seront listées. Enfin, un point sur les différentes adaptations possibles sera effectué afin de répondre à plusieurs problématiques présentes dans les CNPE.

INTRODUCTION





# Chapitre 1

## La radioprotection et son contexte d'application dans les Centres Nucléaires de Production d'Électricité

### Sommaire

---

<b>1.1 Les Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE) en France</b>	<b>7</b>
1.1.1 Le parc nucléaire français en fonctionnement . . . . .	7
1.1.2 Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire . . . . .	9
1.1.3 Des équipements nécessitant une maintenance accrue . . . . .	14
<b>1.2 La Radioprotection, réglementation et bases théoriques</b> . . . . .	<b>15</b>
1.2.1 Quelques principes de base en radioprotection . . . . .	16
1.2.2 Rappel de la réglementation en vigueur . . . . .	27
1.2.3 Radioprotection et risques radiologiques en CNPE . . . . .	27
1.2.4 Statistiques d'exposition des intervenants en CNPE . . . . .	34
<b>1.3 Le confinement de la contamination</b> . . . . .	<b>36</b>
1.3.1 Origine de la contamination présente sur les chantiers . . . . .	37
1.3.2 Les enjeux de la mesure au plus près du chantier . . . . .	39
1.3.3 Les besoins futurs en mesure de contamination $\beta$ . . . . .	41

---

*L'objectif de cette thèse est la conception et la réalisation d'un appareil de mesure de contamination  $\beta$  dans des ambiances  $\gamma$  élevées et fluctuantes. Ces conditions de mesure sont notamment présentes dans certains locaux des Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE). La mesure de contamination surfacique permet de vérifier la propreté radiologique d'un local ainsi que la présence ou non de contamination sur les intervenants et leur matériel. Les seuils de contamination à ne pas dépasser sont déterminés par Électricité de France (EDF) dans ses référentiels Radioprotection.*

*Dans ce chapitre, je décrirai dans une première partie ce qu'est un CNPE ainsi que son fonctionnement. J'aborderai dans une seconde partie les bases de la radioprotection et son application dans les CNPE. Enfin, je mettrai en avant les enjeux liés à la mesure de contamination au plus proche des chantiers qui permettent de limiter la dissémination de la radioactivité.*

## 1.1 Les Centres Nucléaires de Production d'Électricité (CNPE) en France

Un Centre Nucléaire de Production d'Électricité, plus communément appelé centrale nucléaire ou CNPE, est un site industriel dont l'objectif est de produire de l'électricité. La particularité de ces centrales est de transformer l'énergie thermique issue de réactions nucléaires et plus précisément la fission de noyaux d'uranium en énergie mécanique puis en énergie électrique. Tout au long de nos travaux portant sur la mesure de contamination surfacique, EDF nous a ouvert les portes du Centre Nucléaire de Production d'Électricité de Chinon afin de réaliser plusieurs sessions d'essais avec nos différents prototypes.

### 1.1.1 Le parc nucléaire français en fonctionnement

Il existe en France 19 centrales nucléaires en fonctionnement. Elles ont toutes été construites sur le même modèle à quelques détails près. Les 58 réacteurs qui composent ces centrales utilisent la même technologie, de l'eau sous pression sert à transporter la chaleur produite par les réactions nucléaires. Ce type de réacteur est appelé REP pour Réacteur à Eau Pressurisée, il s'agit de la filière de réacteurs la plus répandue dans le monde [1], je présenterai plus en détail leur fonctionnement dans le chapitre 1.1.2. Ces centrales sont réparties sur tout le territoire le long du littoral ou de fleuves (voir Figure 1.1) et fournissaient en 2014 près de 82% de l'électricité produite en France [2].

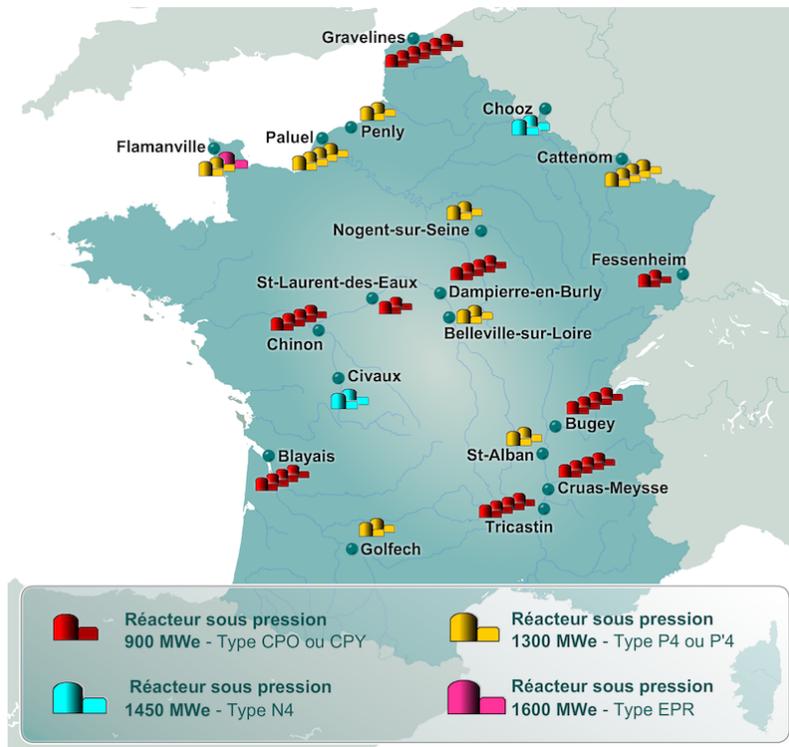


FIGURE 1.1: Cartographie des réacteurs nucléaires en France, la technologie et le palier des réacteurs sont donnés en légende [3]. Leurs différences sont exposées dans le texte ci-après.

Il existe cinq familles de réacteurs REP. Leurs différences sont consécutives au fait que plus de 20 années se sont écoulées entre la construction de la première et de la dernière centrale nucléaire. Certaines nouveautés technologiques ont donc été introduites au fur et à mesure. Les familles de réacteurs sont aussi appelées "paliers", les paliers diffèrent les uns des autres par certains aspects techniques :

- CP0 : six réacteurs de 900 MWe, ce sont les premiers réacteurs mis en service et encore en activité ;
- CPY : vingt huit réacteurs de 900 MWe ;
- P4 : huit réacteurs de 1300 MWe ;
- P'4 : douze réacteurs de 1300 MWe ;
- N4 : quatre réacteurs de 1450 MWe ;

Les différences techniques entre paliers sont plus ou moins importantes mais les principales évolutions sont décrites ci-dessous. Les réacteurs du palier CPY se différencient des réacteurs du palier CP0 par la conception des bâtiments. En effet, le palier CPY comporte un circuit de refroidissement intermédiaire entre celui permettant l'aspersion dans l'enceinte en cas d'accident et celui contenant l'eau de la rivière. Aussi, un pilotage plus souple y a été associé.

Les réacteurs des paliers P4 et P'4 se différencient de ceux du palier CPY, par le renforcement de leur enceinte de confinement. Cette enceinte est une enveloppe de béton destinée à empêcher les dégagements de matière radioactive dans l'environnement en cas d'accident grave. Elle est constituée d'une double paroi en béton sur les réacteurs des paliers P4 et P'4 au lieu d'une seule paroi doublée d'une peau d'étanchéité en acier pour les réacteurs précédents du palier CPY.

Les réacteurs du palier P'4 présentent quelques différences avec ceux du palier P4, notamment en ce qui concerne le bâtiment combustible et la conception de certains circuits.

Enfin, plus récemment, lors du passage du palier P'4 à N4, les réacteurs du palier N4 font davantage appel à l'informatique pour leur pilotage. De plus, la conception des générateurs de vapeur du palier N4 permet de les rendre plus compacts [4].

Parmi les 58 réacteurs en fonction, 34 délivrent une puissance de 900 MWe, 20 réacteurs délivrent une puissance de 1300 MWe, et 4 délivrent une puissance de 1450 MWe. Un 59ème réacteur est actuellement en construction sur le site de Flamanville. Il s'agit d'un réacteur de nouvelle génération de type EPR (Evolutionary Pressurised water Reactor), il développera une puissance de l'ordre de 1600 MWe. Le parc nucléaire français a commencé à être construit (voir Figure 1.2) à partir du début des années 1970 (Bugey et Fessenheim) et s'est terminé à la fin des années 1990 (Civaux, Chooz B).

Sur un plan technique, les centrales nucléaires françaises ont été conçues et construites à l'origine pour fonctionner au moins 30 ou 40 ans. De plus, avec la progression des techniques et des connaissances, les centrales actuellement en fonctionnement ont été améliorées au fil des années afin de pouvoir continuer à fonctionner en garantissant un haut niveau de sûreté. Aussi, elles pourraient donc éventuellement dépasser ces durées [5] bien que le sujet soit sensible et souvent discuté [6].

Aux Etats-Unis, la durée prévue d'exploitation de chaque centrale nucléaire a été fixée dès l'origine à 40 ans. Cependant, ces dernières années, plusieurs centrales ont vu leur autorisation de fonctionnement prolongée à 60 ans.

L'approche française est différente puisque chaque centrale reçoit une autorisation de fonctionnement pour 10 ans de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). A l'issue de ces 10 années, une visite

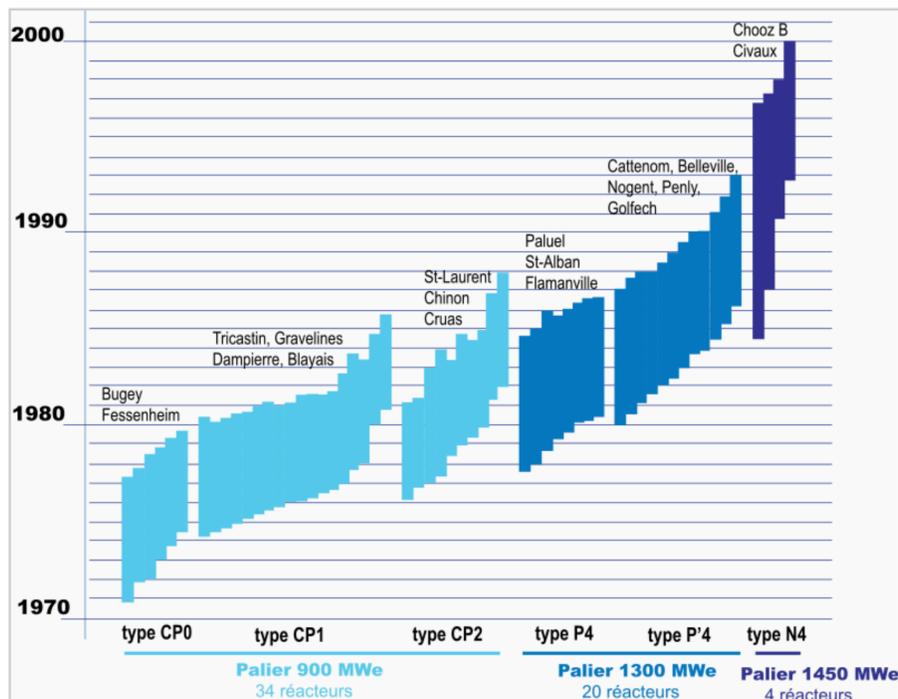


FIGURE 1.2: Calendrier de construction des centrales nucléaires françaises [7].

décennale est organisée pour effectuer des contrôles et confirmer le niveau de sûreté de l'installation [8]. Si tous les contrôles sont satisfaisants, une nouvelle autorisation de fonctionnement est donnée pour une période de 10 ans. D'ici quelques années, les centrales nucléaires françaises réaliseront leur quatrième visite décennale.

### 1.1.2 Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire

Qu'elles soient thermiques ou nucléaires, les centrales de production d'électricité utilisent le même principe de fonctionnement, à savoir la transformation de chaleur en électricité. Dans une centrale thermique la chaleur est produite par la combustion de fuel ou de pétrole. Dans une centrale nucléaire, c'est la fission des noyaux atomiques qui permet de produire cette chaleur. Dans les deux cas, l'objectif est de faire chauffer de l'eau pour obtenir de la vapeur. La pression de la vapeur permettra ensuite de faire tourner une turbine couplée à un alternateur qui produira de l'électricité (voir Figure 1.6). A titre de comparaison, la fission d'un gramme d'uranium produit plus de chaleur que la combustion d'une tonne de pétrole [9].

#### Le coeur du réacteur et le circuit primaire

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles. Ces atomes sont composés d'un noyau qui a la capacité de fissionner après avoir interagi avec un neutron et de libérer une quantité considérable d'énergie (voir Figures 1.3 et 1.4). Le nom de combustible est donné par analogie avec le fuel ou le pétrole qui est brûlé dans une centrale thermique. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. L'uranium 235 et le

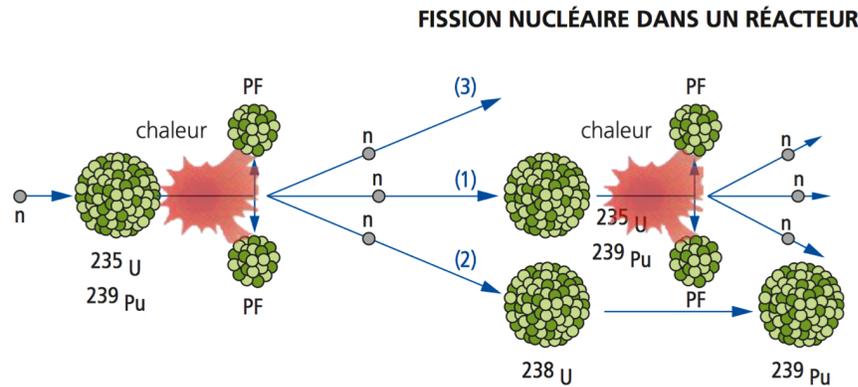


FIGURE 1.3: Exemple de fission nucléaire se produisant dans un réacteur [10].

plutonium 239 ont également comme particularité de pouvoir fissionner de façon spontanée (FS) et émettent donc naturellement des neutrons. L'uranium 235 est le seul isotope de la liste précédente à exister à l'état naturel, c'est ainsi qu'il est le plus souvent utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires (lorsque seul l'uranium est utilisé dans le combustible, ce dernier est dit UOX car il contient du dioxyde d'uranium). Dans une centrale nucléaire, le combustible est placé dans la cuve du réacteur.

En plus du dégagement de chaleur, chaque fission produit à son tour des neutrons d'énergie élevée, qui vont être ralentis et capturés par des noyaux d'uranium 235 (ou de plutonium 239). Ces neutrons vont provoquer la fission de ces noyaux d'uranium 235 (ou de plutonium 239) et générer ainsi des réactions en chaîne (cascade de fissions). Pour illustrer le phénomène de fission de l'uranium 235 la figure 1.4 reprend un exemple de réaction de fission possible :



Dans cet exemple de réaction le noyau d'uranium 235 fissionne en deux noyaux plus légers : le baryum 144 et le krypton 89. Cette fission est accompagnée de l'émission de 3 neutrons et d'énergie. Cette énergie d'environ 173 MeV est aussi appelée chaleur de réaction (notée  $Q$ ). L'énergie libérée peut être calculée de plusieurs façons, par exemple en calculant la différence entre la somme des noyaux et particules initiaux et la somme des noyaux et particules finaux. Ici l'énergie libérée au cours de la réaction peut être calculée facilement à l'aide des masses atomiques (notées  $M(\frac{A}{Z}X)$ ) des différents éléments composant l'équation de réaction :

$$\begin{aligned} Q &= \left( \sum \text{masses des noyaux et particules initiaux} - \sum \text{masses des noyaux et particules finaux} \right).c^2 \\ &= \left( M({}_{92}^{235}\text{U}) + M({}_0^1n) - \left( M({}_{56}^{144}\text{Ba}) + M({}_{36}^{89}\text{Kr}) + 3M({}_0^1n) \right) \right).c^2 \\ &= \left( 92m_p + 143m_n - B({}_{92}^{235}\text{U})/c^2 + m_n \right) - \left( 56m_p + 88m_n - B({}_{56}^{144}\text{Ba})/c^2 + 36m_p + 53m_n - B({}_{36}^{89}\text{Kr})/c^2 + 3m_n \right).c^2 \\ &= -1783,7 + 1190,2 + 766,8\text{ MeV} \\ &\approx 173\text{ MeV} \end{aligned}$$

Dans ce calcul, les valeurs des énergies de liaisons ( $B(\frac{A}{Z}X)$ ) utilisées sont celles disponibles sur le site internet du National Nuclear Data Center [11]. L'exemple traité n'est qu'une réaction parmi plusieurs dizaines possibles. En effet, lorsque de l'uranium 235 fissionne dans un réacteur les deux produits de fission créés peuvent être très différents de ceux de notre exemple, nous pouvons voir

Types d'énergie	Energie en MeV	Commentaires
Énergie cinétique des produits de fission (PF)	166,2	Instantanée
Énergie cinétique des neutrons de fission	4,8	Instantanée
Énergie des $\gamma$ prompts	8,0	Instantanée
Énergie $\nu/\bar{\nu}$	9,6	Instantanée, énergie perdue
Énergie de radioactivité $\beta$ des PF	7,0	Différée
Énergie de radioactivité $\gamma$ des PF	7,2	Différée
<b>Énergie totale libérée lors de la fission</b>	<b>202,8</b>	<b>dont 9,6 MeV perdus</b>

Tableau 1.1: Bilan énergétique en MeV de la fission induite par des neutrons thermiques sur de l'uranium 235 [13]

sur la figure 1.4 un schéma représentatif de la distribution du nombre de masse des produits de fission. Nous pouvons voir qu'il existe deux pics à  $A \approx 95$  et  $A \approx 144$  qui correspondent aux produits de fission les plus couramment créés. Comme nous avons pu le voir, en plus des produits de fission, plusieurs neutrons sont émis lors d'une réaction de fission. Pour l'uranium 235, si cette dernière a été provoquée par un neutron thermique, elle entraînera la création de 2,47 neutrons en moyenne [12]. De plus, il est possible de dresser le bilan énergétique moyen complet pour la fission de l'uranium 235. Notamment, nous pouvons voir que l'énergie moyenne totale libérée par cette réaction est de 202,8 MeV environ, les résultats complets sont compilés dans le tableau 1.1.

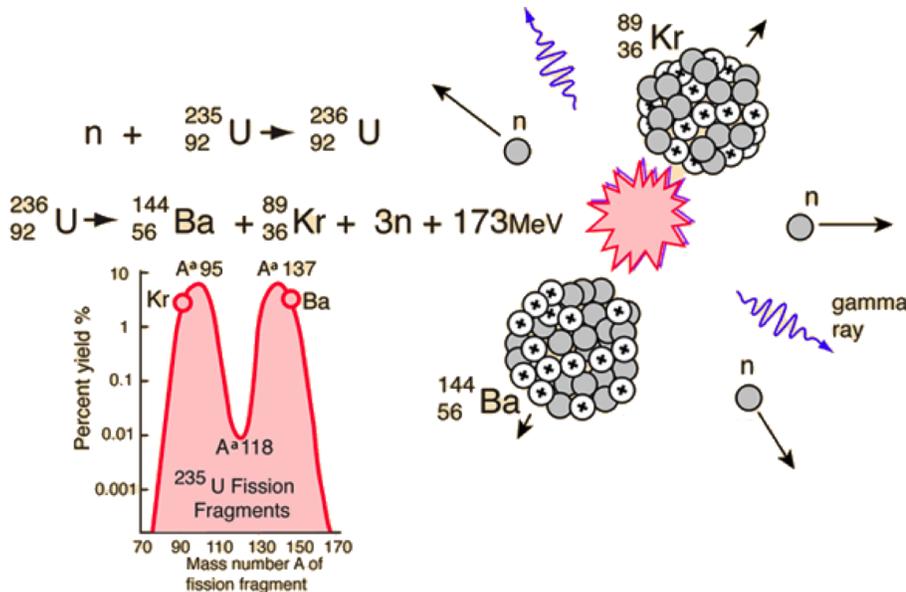


FIGURE 1.4: Schéma de répartition des produits de fission et exemple de réaction de fission de l'uranium 235 [14].

Dans un réacteur nucléaire, la réaction en chaîne est maîtrisée et elle est maintenue par l'intermédiaire des barres de contrôle qui régulent le nombre de neutrons (voir la partie gauche de la

figure 1.6) et d'un modérateur qui régule leur vitesse (ralentissement des neutrons afin d'augmenter les chances qu'ils provoquent une fission). Dans les REP, le modérateur n'est autre que de l'eau. Cette dernière est composée d'hydrogène qui a quasiment la même masse qu'un neutron, lorsqu'un neutron entre en collision avec un noyau d'hydrogène il va lui communiquer une partie de son énergie cinétique. Cette interaction appelée diffusion élastique est décrite dans la figure 1.5, l'énergie transmise par le neutron au noyau cible s'écrit :

$$E_{tr} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_n \cos^2 \theta$$

où  $E_n$  est l'énergie du neutron incident,  $A$  le numéro atomique du noyau cible et  $\theta$  l'angle de recul du noyau cible [15]. Suivant la nature de matériau modérateur utilisé, le neutron sera ralenti plus ou moins vite. Par exemple, si le matériau cible est de l'hydrogène, il faudra en moyenne 18 chocs pour qu'un neutron de quelques MeV soit thermalisé (il en faudra 25 si la cible est du deuteron et 115 si c'est du carbone [16]). Le ralentissement des neutrons qui en découle est aussi appelé thermalisation.

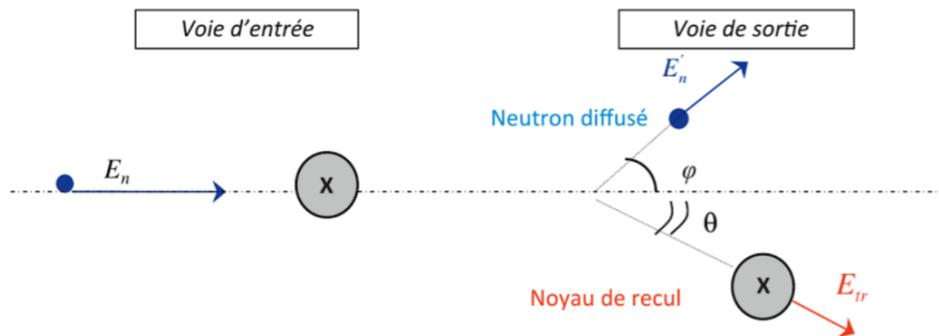


FIGURE 1.5: Description schématique du phénomène de diffusion élastique d'un neutron [16].

Le modérateur doit avoir une section efficace de collision élastique importante vis à vis des neutrons mais il doit également avoir une section efficace d'absorption la plus faible possible afin de ne pas rompre la réaction en chaîne. Contrairement au modérateur, les barres de contrôle sont conçues dans des matériaux ayant une section efficace d'absorption de neutrons importante (argent, indium, cadmium ou bore par exemple). L'absorption de neutrons par les barres de contrôle entraîne un ralentissement de la réaction en chaîne et peut aller jusqu'à son arrêt total.

L'énergie libérée sous forme de chaleur doit être récupérée afin de pouvoir produire de l'électricité. C'est le fluide caloporteur, qui peut être un gaz ou un liquide, qui joue ce rôle. Le fluide caloporteur s'échauffe au contact du combustible et atteint la température de 320°C environ. Après avoir circulé autour des barreaux d'uranium et récupéré la chaleur du combustible, le caloporteur poursuit sa course hors du cœur du réacteur. Dans le même temps, le caloporteur permet de maintenir la température du réacteur à une valeur compatible avec la capacité de résistance des matériaux qui composent sa structure. Pour les REP, ce fluide caloporteur est de l'eau qui est maintenue sous pression afin de ne pas bouillir. Elle circule en circuit fermé appelé aussi circuit primaire.

### Le circuit secondaire et l'îlot conventionnel

Le fluide caloporteur du circuit primaire transmet à son tour la chaleur à l'eau circulant dans un autre circuit fermé : le circuit secondaire. L'échange de chaleur a lieu à l'intérieur des générateurs de vapeur (voir la partie au centre de la Figure 1.6). Les générateurs de vapeur sont composés d'une quantité importante de tubes dans lesquels circule l'eau du circuit primaire qui a été chauffée en traversant le cœur du réacteur. Dans le générateur de vapeur (mais cette fois-ci à l'extérieur des tubes parcourus par l'eau du circuit primaire) circule également l'eau du circuit secondaire qui s'échauffe et se transforme en vapeur. Cette vapeur fait ensuite tourner une turbine entraînant un alternateur qui produit un courant électrique alternatif. Enfin, un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur afin qu'il soit plus facilement transporté par les lignes très haute tension. Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie par un troisième circuit d'eau froide afin d'être transformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

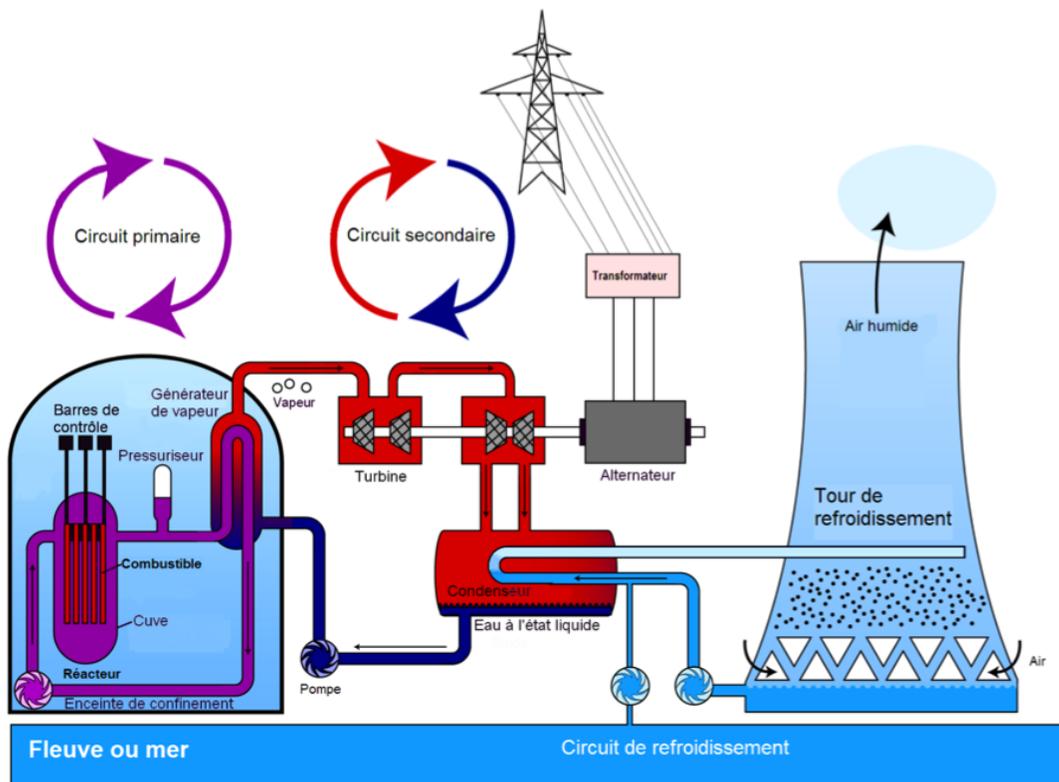


FIGURE 1.6: Principe de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée.

### Le circuit de refroidissement : pour condenser la vapeur

Pour que le système fonctionne en continu, il faut assurer son refroidissement. C'est le but du troisième circuit que nous venons d'évoquer. Il est complètement indépendant des deux autres circuits. Sa fonction est de condenser la vapeur sortant de la turbine via un appareil formé de milliers de tubes (le condenseur) dans lesquels circule de l'eau froide prélevée dans une source extérieure :

rivière ou mer. Au contact de ces tubes, la vapeur se transforme en eau. L'eau du condenseur, qui n'a pas été au contact d'éléments radioactifs, est ensuite rejetée, à la source d'origine.

Si le débit de la source d'origine est trop faible, le recours à des tours de refroidissement ou des aéroréfrigérants est nécessaire. L'eau chaude provenant du condenseur, est refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. L'essentiel de cette eau retourne vers le condenseur et une petite partie s'évapore dans l'atmosphère. Les trois circuits d'eau sont étanches les uns par rapport aux autres.

### 1.1.3 Des équipements nécessitant une maintenance accrue

L'Autorité de Sûreté Nucléaire réalise plusieurs contrôles lors des différents arrêts de tranche (une tranche équivaut à un réacteur) prévus par EDF. Il existe plusieurs types d'arrêt de tranche, les trois plus importants sont :

- Les arrêts pour simple rechargement du combustible (ASR) ;
- Visite partielle (VP) ;
- Visite décennale (VD).

Lors des ASR environ un tiers du combustible est renouvelé (voir Figure 1.7). Les VP consistent non seulement à renouveler un tiers du combustible mais aussi à effectuer des opérations de maintenance plus avancées. Pour les VD, dont nous avons déjà parlé, aux tâches de maintenance et de rechargement du combustible s'ajoute un examen périodique de sûreté réalisé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

Palier	Nombre de tranches	Composition du combustible	Renouvellement du combustible par	Durée du cycle
900MW – CP0	6	UOX – 4,2% <sup>235</sup> U	1/3 cœur	17 mois
900 MW – CPY	6	UOX – 3,7% <sup>235</sup> U	1/4 cœur	12 mois
900 MW - CPY-MOX	22	MOX – 8,6% Pu + UOX – 3,7% <sup>235</sup> U	1/4 cœur	12 mois
1300 MW Gemmes	19	UOX – 4% <sup>235</sup> U	1/3 cœur	17 mois
1300 MW – GALICE	1	UOX – 4,5% <sup>235</sup> U	29% cœur	18 mois
N4	4	UOX – 4% <sup>235</sup> U	1/3 cœur	17 mois

\*MOX : Le MOX (pour Mélange d'OXYde de plutonium et d'OXYde d'uranium) est un combustible nucléaire composé de dioxyde de plutonium (PuO<sub>2</sub>) et de dioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>).

FIGURE 1.7: Composition du combustible, proportion de remplacement du combustible lors d'ASR et fréquence de remplacement en fonction du type de palier de la tranche concernée [10].

Toutes les centrales nucléaires françaises ont déjà fait l'objet d'une visite décennale. Les travaux de maintenance ont donc déjà commencé mais avec la catastrophe de Fukushima en 2011, et la volonté de la part d'EDF de porter la durée de vie des centrales nucléaires de 30 ans à plus de 40

ans, une maintenance plus poussée est nécessaire. Cet important programme de maintenance lourde des centrales nucléaires porte le nom de “Grand Carénage”.

### **Le “Grand Carénage” et la mise en conformité des centrales nucléaires suite à la catastrophe de Fukushima**

Le “Grand Carénage” du parc nucléaire d'EDF vise à maintenir les performances de ce parc en matière de sûreté et de compétitivité. Il vise également à préparer une demande de prolongation de la durée de vie des réacteurs à l'ASN. Si la prolongation à 40 ans semble bien engagée, une prolongation au-delà (50 voir 60 ans) n'est pas acquise et ne pourra l'être qu'après les demandes complémentaires éventuelles de l'ASN qui prendra en compte le vieillissement des installations ainsi que les modifications possibles (et probables) de la réglementation qui est en constante évolution.

Bien que robustes, les composants d'une centrale nucléaire vieillissent et requièrent soit des travaux de maintenance, soit un remplacement pur et simple. Cette dégradation est par exemple révélée en observant la régularité de fonctionnement des réacteurs, leur taux de disponibilité, et le nombre d'évènements significatifs pour la sûreté (ESS). Le parc ayant environ 28 ans d'âge en moyenne, il a été constaté une légère baisse de la disponibilité et une augmentation légère du nombre d'ESS (par exemple sur deux ans, les ESS de niveau 1 ont crû de 576 à 632 sur l'ensemble du parc). EDF et AREVA, constructeurs des chaudières, bénéficient en la matière de l'expérience accumulée sur les PWR (acronyme anglophone de REP) dans le monde. Sur la base du retour d'expérience des années précédentes et des comparaisons internationales, les grandes options retenues sont les suivantes [17] :

- Rénovation d'une large partie des gros composants autour de 30 à 35 ans,
- Modifications permettant de rapprocher autant que possible le niveau de sûreté des réacteurs existants de celui des réacteurs de génération 3 (EPR).

La prise en compte de l'accident de Fukushima a conduit à accélérer le programme imaginé par EDF et à le renforcer sur certains points : par exemple sur la définition des agressions auxquelles doivent résister les Diesels d'Ultime Secours du « Noyau dur » et sur le programme de déploiement de ces derniers. Ce programme a bien évidemment été analysé par l'ASN et l'IRSN et n'a été engagé qu'après leur autorisation.

Le “Grand Carénage” est un programme industriel ambitieux qui représente des défis techniques et managériaux importants. La programmation des opérations devra s'insérer dans les arrêts de tranche déjà prévus en impactant le moins possible leurs durées, ce qui nécessitera une organisation particulière du travail. Il impliquera aussi un plus grand nombre d'interventions et d'intervenants. La multiplication des chantiers et leurs exécutions en parallèle entraînera un risque accru d'un point de vue radiologique pour les intervenants.

## **1.2 La Radioprotection, réglementation et bases théoriques**

La radioprotection désigne l'ensemble des mesures prises pour assurer la protection de l'homme et de son environnement contre les effets des rayonnements ionisants. Ces mesures viennent s'ajouter aux règles de sécurité classiques en vigueur sur les sites industriels (risques de chute, nuisances sonores,...). Afin de garantir aux travailleurs du nucléaire des conditions de travail les plus sûres possible, un certain nombre de textes réglementaires viennent encadrer leurs conditions de travail.

### 1.2.1 Quelques principes de base en radioprotection

Afin de se familiariser avec les unités et les termes qui seront utilisés dans notre étude, il est nécessaire de faire un rappel sur les principes de base de la radioactivité et de la radioprotection.

La radioprotection répond au concept ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Ce concept a pour but de maintenir les personnes à un niveau d'exposition aux rayonnements ionisants « aussi bas que raisonnablement possible compte tenu des contraintes économiques et sociales » [18]. Afin de respecter ce concept, il faut suivre 3 principes :

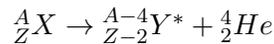
- Justifier les pratiques : utilisation des rayonnements ionisants si justifiée par des avantages économiques, sociaux ou par rapport au détriment sanitaire associé,
- Optimiser la protection : expositions maintenues au niveau le plus bas compte tenu des contraintes économiques et sociales,
- Limiter les expositions individuelles : les doses reçues doivent rester inférieures aux limites de doses pour les travailleurs et le public.

### Les différents types de rayonnements ionisants

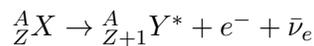
La radioactivité se manifeste par la désintégration d'un élément père instable en un élément fils en émettant une certaine quantité d'énergie sous forme de rayonnement. L'activité d'un échantillon radioactif ou d'une source radioactive est donnée par le nombre de désintégrations par seconde. L'activité a pour unité le Becquerel (Bq), du nom du premier physicien ayant mis en évidence la radioactivité en 1896 Henri Becquerel [19, 20].

Il existe plusieurs types de désintégration radioactive mais les plus courantes sont au nombre de trois. Dans les équations ci-dessous, le noyau père est noté  $X$  et le noyau fils  $Y$  :

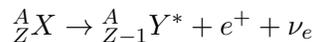
- La désintégration  $\alpha$  - ou l'émission d'un noyau d'hélium (2 protons et 2 neutrons) :



- La désintégration  $\beta^-$  - ou l'émission d'un électron et d'un anti-neutrino électronique :



- La désintégration  $\beta^+$  - ou l'émission d'un positron et d'un neutrino électronique :



Les désintégrations  $\beta^+$  ou  $\beta^-$  modifient la composition du noyau père  ${}^A_ZX$  en faisant varier le nombre de protons et de neutrons. Dans le cadre d'une réaction  $\beta^-$  c'est un neutron qui se transforme en proton et inversement pour une réaction  $\beta^+$ . Ce changement va induire une modification de la charge électrique du noyau qui va être compensée par l'émission d'une particule chargée (un  $e^-$  ou un  $e^+$ ). L'émission de la particule chargée est accompagnée de l'émission d'un anti-neutrino électronique ou d'un neutrino électronique. L'interaction, capable de changer des neutrons en protons et de produire des particules chargées est appelée l'interaction faible. Depuis une quarantaine d'années, nous savons que lorsque qu'un neutron ou un proton change de nature c'est que l'un de ses constituants élémentaires a changé d'espèce. Les nucléons (protons et neutrons) sont constitués de quarks qui peuvent être "up" ou "down" (voir figure 1.8). Un neutron est composé de deux quarks

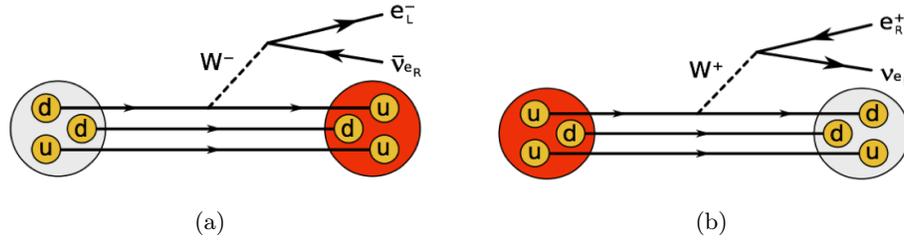


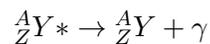
FIGURE 1.8: Diagrammes de Feynman des désintégrations radioactives  $\beta^-$  (a) et  $\beta^+$  (b) [22].

“down” et d’un quark “up” et pour un proton c’est l’inverse, il est composé d’un quark “down” et de deux quarks “up”. Les quarks possèdent des charges, le quark “down” a une charge de  $-e/3$  et le quark “up” a une charge de  $+2e/3$ .

Prenons l’exemple d’un noyau père émetteur  $\beta^-$ . A priori un de ses neutrons va se transformer en proton ou plutôt un des quarks “down” du neutron va se transformer en quark “up”, on dit que le quark change de saveur. En réalité cette transformation n’est pas exceptionnelle, un quark “down” émet de manière régulière une charge égale à  $-e$ . Le quark “down” devient donc quark “up”, toutefois en règle générale la charge émise est immédiatement réabsorbée et le quark redevient “down”. Cette émission/absorption très courte est portée par une particule instable appelée boson  $W^-$ . Si ce boson se désintègre pendant une émission/absorption il y aura une désintégration  $\beta^-$  et donc l’émission d’un électron et d’un anti-neutrino électronique. L’émission de l’anti-neutrino permet de ne pas violer le principe de conservation du nombre leptonique. Pour la réaction  $\beta^+$  le principe est le même mais les acteurs sont inversés.

Lors d’une désintégration radioactive, l’élément fils  $Y$  est dans la plupart des cas produit dans un état excité. C’est pourquoi il est noté avec une petite étoile en exposant :  $Y^*$ . La désexcitation de l’élément fils vers son état fondamental peut se faire de façon radiative via l’émission de rayonnement  $\gamma$ .

— La désexcitation  $\gamma$  - ou l’évacuation de l’énergie excédentaire :



En résumé, les rayonnements émis lors d’une désintégration radioactive sont donc des particules chargées ( $e^-$ ,  $e^+$  et  $He^{2+}$ ) et des rayonnements électromagnétiques ( $X$  et  $\gamma$ ). Un dernier cas, non traité ici est l’émission de neutrons (émis lors de réaction de fission par exemple), les neutrons n’ont pas de charge, ils font donc parti de la famille des rayonnements indirectement ionisants. Cette caractéristique a un impact sur la portée des différents rayonnements dans la matière.

Pour les êtres vivants, il existe trois modes d’exposition différents aux rayonnements ionisants (voir Figure 1.9) qui ont chacun des conséquences plus ou moins graves. L’exposition peut être externe ou interne. Lorsqu’elle est externe, l’exposition peut être sans contact direct, c’est une irradiation, ou elle peut être en contact direct avec les tissus biologiques, c’est une contamination surfacique. Enfin, l’exposition peut être interne, dans ce cas le radioélément a pu être : inhalé (voies respiratoires), ingéré (voies digestives) ou incorporé par transfert (plaies ouvertes, transfert transcutané à travers les pores de la peau).

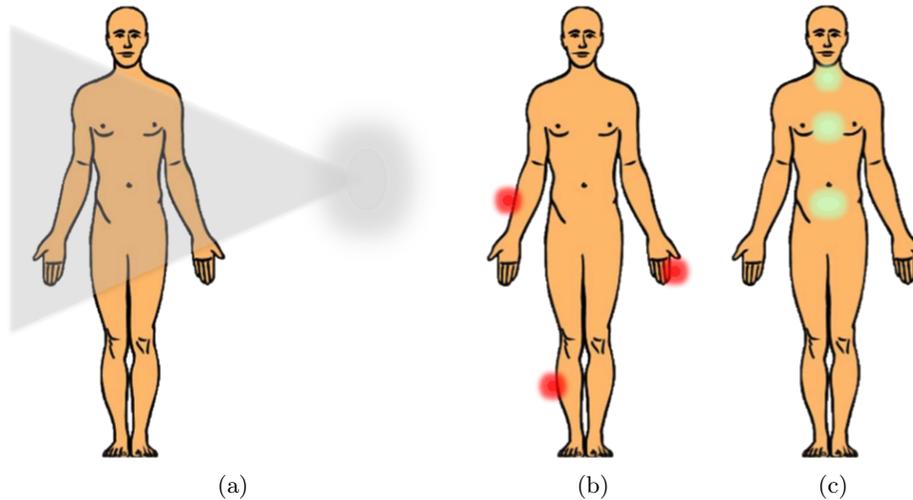


FIGURE 1.9: Différents modes d'exposition aux rayonnements ionisants : (a) l'exposition externe ou irradiation, (b) la contamination externe de surface et (c) la contamination interne.

Il est possible de prévenir ces différentes expositions. Pour l'exposition externe, elle peut être diminuée en utilisant des écrans, en augmentant la distance entre la source et l'intervenant ou en limitant la durée d'exposition. Pour l'exposition externe de contact, il faut au préalable que l'intervenant diminue au maximum la surface de peau susceptible d'être contaminée en utilisant des EPI<sup>1</sup> (gants, combinaisons, charlottes de protection). Enfin, pour la contamination interne la solution est de protéger les différentes voies d'incorporation.

### Interaction des rayonnements avec les tissus biologiques

En radioprotection, l'objectif est de protéger l'humain. Les différents rayonnements énoncés dans le paragraphe précédent ont des caractéristiques différentes et donc les moyens à mettre en place pour les atténuer ou les éliminer sont différents. Afin d'avoir une vue d'ensemble, les différentes caractéristiques et les écrans à mettre en place pour chaque rayonnement sont résumés dans le tableau 1.2.

Au delà des caractéristiques physiques des rayonnements tel que le transfert linéique d'énergie, qui est l'énergie moyenne (en keV) transférée par  $\mu\text{m}$  de trajectoire (ionisations + excitations), ou les différents ordres de grandeur des portées dans plusieurs milieux, il est intéressant de noter la dangerosité des différents rayonnements. La figure 1.10 donne une représentation de l'impact et la portée des différents rayonnements ionisants sur le corps humain.

Les différents mécanismes d'interaction entre les particules et la matière seront abordés plus en détail dans le chapitre 3.1.

La figure 1.10 permet également de comprendre pourquoi il existe plusieurs grandeurs opérationnelles en radioprotection. Une exposition externe à des rayonnements de type  $\beta^-$  aura plus d'impact à la surface du corps humain et donc sur les différentes couches de peau que sur les organes tels que les poumons ou la moelle osseuse.

1. EPI : Équipements de protection individuelle.

*CHAPITRE 1. LA RADIOPROTECTION ET SON CONTEXTE D'APPLICATION DANS LES  
CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ*

Rayonnement	$\alpha$	$\beta^-$	$\beta^+$	X et $\gamma$	Neutron
Transfert linéique d'énergie	Très élevé	Moyen	cf. $\gamma$	Faible	Très variable mais $>$ aux X/ $\gamma$
Portée	Très faible	Moyenne	Très faible, annihil. $e^-/e^+$	Très élevée	Très variable (milieu et $E_n$ )
Portée dans l'air	De l'ordre du centimètre	De l'ordre de 10 mètres	-	De l'ordre de 100 mètres	De l'ordre de $10^{\text{aine}}$ - 100 mètres
Portée dans les tissus biologiques	De l'ordre de 50 micromètres	De l'ordre du centimètre	-	Plusieurs $10^{\text{aine}}$ de centimètres	De l'ordre de 10 centimètres (neutrons rapides)
Blindage	Air, papier	Matériau de faible Z (Plexiglas, aluminium,...)	cf. $\gamma$ ( $E_\gamma = 511$ keV)	Plomb, tungstène, uranium appauvri	Eau, paraffine, (Fer si neutrons rapides)
Danger si exposition externe	Nul	Important (si $E_\beta$ élevée)	-	Important	Important
Danger si exposition interne	Très important	Important	-	Faible	Exposition interne très peu probable

Tableau 1.2: Bilan synthétique des interactions rayonnements/matière et de leur dangerosité pour les tissus biologiques.

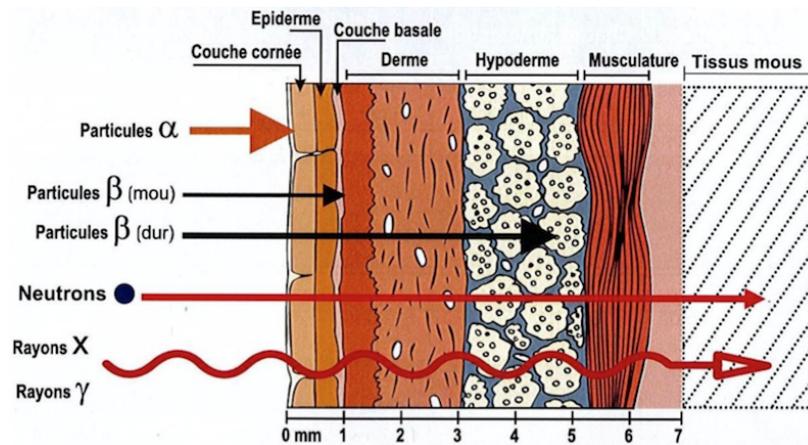


FIGURE 1.10: Parcours des différents rayonnements ionisants dans le corps humain [21].

### Grandeurs opérationnelles et de protection en radioprotection

Les rayonnements ionisants interagissent avec la matière, il est nécessaire de s'en protéger car ces derniers peuvent arracher des électrons à la matière, ioniser les molécules et les liquides biologiques et casser des liaisons moléculaires. La matière biologique dont nous sommes constitués est principalement faite de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, de phosphore et de soufre. Ces éléments entrent dans la composition des briques primaires qui nous composent : les glucides, les lipides, les acides nucléiques, les protides, les chaînes carbonées et l'eau entre autres.

Or, tous les éléments cités plus haut sont susceptibles d'être ionisés par les rayonnements  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et X. Dans le tableau 1.3 nous pouvons voir les énergies de première ionisation des principaux constituants de la matière biologique. L'énergie de première ionisation est l'énergie qu'il faut fournir à un atome neutre pour arracher un électron et former un ion positif.

Eléments	Carbone	Hydrogène	Oxygène	Azote	Phosphore	Soufre
Energie de première ionisation (en eV)	11,2	13,6	13,4	14,2	10,5	10,4

TABLEAU 1.3: Energie de première ionisation des principaux éléments composant la matière biologique.

Cette modification des molécules et liquides biologiques entraîne des cascades d'événements dans les cellules qui se traduisent par des lésions et des dommages (réparables ou non). Ces modifications peuvent entraîner des effets pathologiques immédiats ou à long terme. Il est donc nécessaire de mesurer les effets biologiques des rayonnements ionisants et de quantifier la dose absorbée par un organisme. Cette spécialité est la dosimétrie.

Il existe deux familles de grandeurs en dosimétrie : les grandeurs de protection et les grandeurs opérationnelles. Ces grandeurs sont définies par la Commission internationale de protection radiologique (ICRP) dans les publications 60 (ICRP, 1992) et 103 (ICRP, 2007) ainsi que par la Commission internationale des unités et mesures de rayonnements (ICRU) dans son rapport 57 (ICRU, 1996).

Les grandeurs de protection sont au nombre de trois : la dose absorbée dans l'organe  $D_T$ , la dose équivalente dans l'organe  $H_T$  et la dose efficace E. Elles sont associées aux doses absorbées dans l'organisme résultant d'une exposition externe ou interne. Ces grandeurs ne sont pas directement

mesurables, mais c'est à elles que s'appliquent les limites réglementaires, que ce soit pour les doses limites annuelles des travailleurs ou pour la délimitation des zones de travail.

La dose absorbée  $D_T$  est égale à la quantité d'énergie absorbée par unité de masse exposée. Son unité est le Gray (Gy) et  $1Gy = 1J/kg$ .

La dose équivalente à l'organe  $H_T$  tient compte du type de rayonnement ionisant ayant déposé de l'énergie dans l'organe T. En effet, suivant le type de rayonnement ionisant et pour une même dose absorbée ( $D_T$ ), les effets biologiques sont différents. La dose équivalente  $H_T$  est donc égale à la dose absorbée  $D_T$  corrigée par un facteur de pondération radiologique ( $w_R$ ). Ce facteur de pondération est propre à la nature du rayonnement et à son énergie, il rend compte de sa radiotoxicité. Les coefficients  $w_R$  sont définis dans la CIPR 103 et présentés dans le tableau 1.4.

La dose équivalente à un organe  $H_T$  a pour unité le Sievert (Sv). Pour un organe exposé à des rayonnements ionisants de différents types, elle s'écrit :

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} ,$$

où  $w_R$  est le facteur de pondération radiologique pour le rayonnement R et  $D_{T,R}$  la dose absorbée dans l'organe T exposé au rayonnement R.

Nature du rayonnement	Gamme d'énergie	Coefficients $w_R$ (CIPR 103)
Photons X et $\gamma$	Toutes les énergies	1
Électrons	Toutes les énergies	1
Neutrons	$E < 1\text{MeV}$	$2,5 + 18,2e^{-\frac{(\ln(E))^2}{6}}$
	$1 \text{ MeV} < E < 50\text{MeV}$	$5 + 17e^{-\frac{(\ln(2E))^2}{6}}$
	$E > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25e^{-\frac{(\ln(0,04E))^2}{6}}$
Particules $\alpha$	Toutes les énergies	20

TABLEAU 1.4: Extrait des valeurs du facteur de pondération radiologique  $w_R$  en fonction du type de rayonnement [23].

Dernière grandeur de protection, la dose efficace E est égale à la somme des doses équivalentes  $H_T$  délivrées aux différents organes et tissus du corps multipliées par des facteurs de pondération tissulaires ( $w_T$ ) qui rendent compte de la radiosensibilité des organes et tissus considérés. Les coefficients  $w_T$  sont définis dans la CIPR 103 et présentés dans le tableau 1.5.

La dose efficace E s'exprime également en Sievert (Sv) et elle s'écrit :

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \left( \sum_R w_R \times D_{T,R} \right) ,$$

où  $w_T$  est le facteur de pondération pour l'organe T et  $H_T$  est la dose équivalente à l'organe T.

Organes et tissus concernés	Coefficients $w_T^*$ (CIPR 103)
Gonades	0,08
Moelle osseuse rouge	0,12
Colon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,04
Foie	0,04
Sein	0,12
Œsophage	0,04
Thyroïde	0,04
Peau	0,01
Surface osseuse	0,01
Cerveau	0,01
Glandes salivaires	0,01
Autres**	0,12

\* Note : La somme de tous les coefficients de pondération tissulaire est égale à 1 :  $\sum_T w_T = 1$ .

\*\*Les tissus et organes classés «autres» sont : surrénales, région extra-thoracique, vésicule biliaire, cœur, rein, ganglions lymphatiques, muscles, muqueuse orale, pancréas, prostate, intestin grêle, rate, thymus et col de l'utérus.

TABLEAU 1.5: Extrait des valeurs du facteur de pondération tissulaire  $w_T$  en fonction du type de rayonnement [23].

Enfin, la dose efficace totale (qui est la dose efficace prise en compte dans les limites imposées réglementairement) est la somme de la dose efficace reçue par exposition externe et de la dose efficace reçue par exposition interne :  $E = E_{\text{ext}} + E_{\text{int}}$ . La dose efficace interne (résultat d'absorption de radioéléments) ne peut pas être mesurée. Elle est calculée en tenant compte de l'activité incorporée, de la durée de la contamination et de la radiotoxicité de l'élément radioactif ingéré.

Deuxième famille de grandeur en dosimétrie, les grandeurs opérationnelles sont utilisées pour la surveillance des individus et des zones soumis à des rayonnements ionisants (exposition externe). Ces grandeurs ont été définies de manière à être mesurables. Elles sont des estimateurs des grandeurs de protection que nous avons vues précédemment. Elles peuvent être mesurées à l'aide de détecteurs étalonnés (dosimètres, radiamètres, balises,...) et peuvent être comparées aux limites réglementaires. Les grandeurs opérationnelles ont été définies de sorte à ce qu'elles surestiment toujours les grandeurs de protection [24].

Il existe plusieurs grandeurs opérationnelles qui peuvent être classées en deux catégories : les grandeurs utilisées pour la surveillance de zone et les grandeurs utilisées pour la surveillance individuelle. La grandeur opérationnelle appropriée pour le contrôle d'ambiance est l'équivalent de dose ambiant  $H^*(d)$ , où  $d$  est la profondeur en mm dans le corps à laquelle la dose absorbée est évaluée. Pour la surveillance individuelle, on utilise l'équivalent de dose individuel  $H_p(d)$ . On utilise en pratique  $H^*(10)$  et  $H_p(10)$  respectivement pour la surveillance de zone et la surveillance individuelle en tant qu'estimateurs de la dose efficace  $E$ . De même,  $H^*(0,07)$  et  $H_p(0,07)$  sont utilisés en tant qu'estimateurs des doses équivalentes à la peau respectivement pour la surveillance de zone et pour la surveillance individuelle. Par extension, la dose équivalente à la peau est la grandeur qu'il convient

d'utiliser, par exemple, dans le cadre d'une étude de poste où l'intervenant sera soumis à des débits de doses aux extrémités (mains, avant-bras, pieds et chevilles).

Le tableau 1.6 résume les liens existants entre grandeurs opérationnelles et grandeurs de protection.

	Pouvoir de pénétration du rayonnement	Grandeurs opérationnelles	Grandeurs de protection
Dosimétrie de zone ou d'ambiance	Fort	Equivalent de dose ambiant $H^*(10)$ (Isotrope)	Dose efficace E
	Faible	Equivalent de dose directionnel $H'(0,07)$ (Isodirectionnelle)	Dose équivalente $H_T$
Dosimétrie individuelle	Fort	Equivalent de dose individuelle $H_p(10)$ (Isodirectionnelle)	Dose efficace E
	Faible	Equivalent de dose individuelle $H_p(0,07)$ (Isodirectionnelle)	Dose équivalente $H_T$

TABLEAU 1.6: Résumé des liens entre grandeurs de protection et grandeurs opérationnelles [25].

### Impact sur les tissus biologiques

Les rayonnements ionisants sur les tissus biologiques entraînent des lésions moléculaires, notamment sur l'ADN, l'ARN, les protéines ou encore les lipides. Le premier impact est direct, comme nous avons pu le voir au début du chapitre précédent, les rayonnements vont directement interagir via une interaction physique (ionisations/excitations) avec les molécules et entraîner la rupture de liaisons chimiques. Le deuxième impact est indirect, les rayonnements vont cette fois-ci interagir avec l'eau qui est un des principaux composants des tissus biologiques (70 % du poids du corps [26]). Cette interaction va entraîner des phénomènes de radiolyse de l'eau et la formation de radicaux libres<sup>2</sup> tels que l'hydroxyle et l'hydroperoxyde qui vont à leur tour perturber l'équilibre du milieu biologique.

Les différents scénarios sont résumés dans la figure 1.11. Il est important de voir que les rayonnements ionisants entraînent deux types d'effets : des effets déterministes et des effets stochastiques.

Les effets déterministes ont pour conséquence la mort ou le dysfonctionnement d'un grand nombre de cellules. Ces effets apparaissent rapidement après l'irradiation (compris entre quelques heures et quelques semaines suivant les cas). Ces effets peuvent être réversibles s'ils ne sont pas trop importants mais ils apparaissent obligatoirement chez tous les individus à partir d'une dose seuil. Pour les

---

2. Radical libre : atome ou molécule qui présente un  $e^-$  non apparié. Les radicaux-libres ont une très forte réactivité chimique, et sont instables.

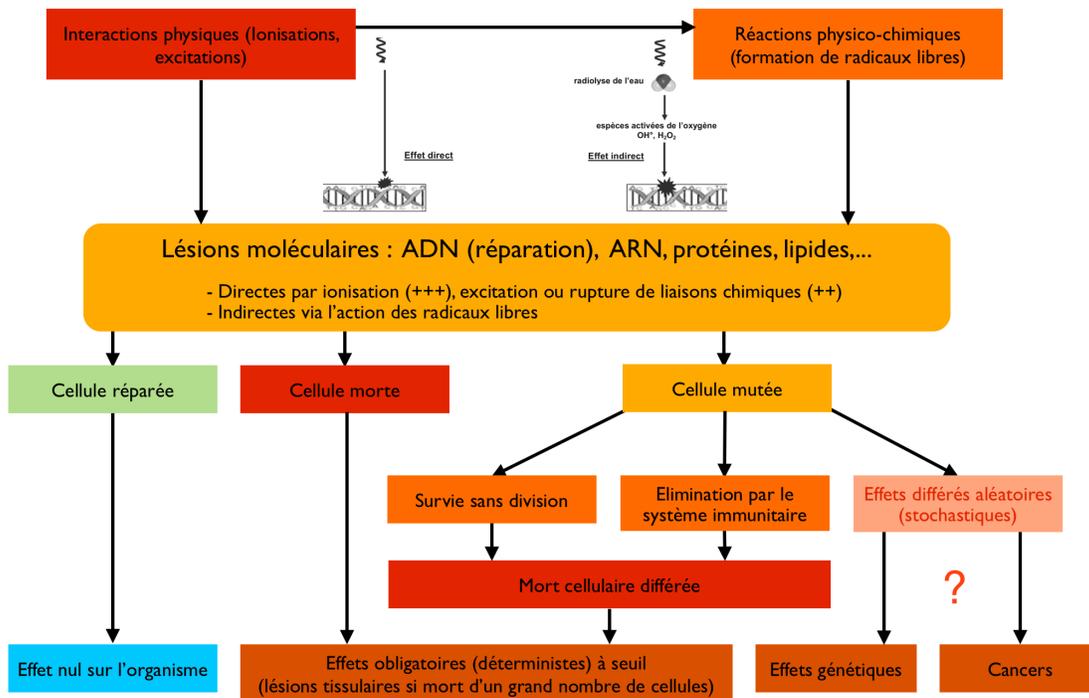


FIGURE 1.11: Schéma récapitulatif des différents scénarios engendrés par les rayonnements ionisants sur les tissus biologiques [26, 27] .

effets déterministes, plus la dose absorbée a été importante plus les conséquences seront graves. Les tableaux 1.7 et 1.8 reprennent des exemples d'effets déterministes et les seuils qui y sont associés.

Les effets stochastiques (aléatoires) apparaissent très tardivement, plusieurs années voir des dizaines d'années après la mutation cellulaire. Ces effets apparaissent seulement chez certains individus et il n'a pas été mis en évidence de seuil de dose. A l'heure actuelle, le principe de précaution est appliqué puisque toute dose comporte un risque. Enfin, et contrairement aux effets déterministes, la gravité des effets n'augmente pas avec la dose. Les principaux effets stochastiques sont les risques d'apparition de cancers et de maladies héréditaires.

### Catégorie des travailleurs et limite d'exposition

Afin de prévenir les risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants, des limites réglementaires de doses reçues par les travailleurs exposés sont spécifiées dans le code du travail. Ces limites sont rappelées figure 1.12. Ces limites sont des limites infractionnelles qui ne constituent pas une autorisation à délivrer ou à recevoir des doses jusqu'à ces valeurs. Notamment, le fait d'être en dessous de ces limites ne dispense pas la mise en place du principe d'optimisation ALARA.

Lorsqu'une personne n'est pas reconnue comme étant un travailleur exposé, elle est classée dans la catégorie "Public". La dose efficace annuelle (corps entier) pour cette catégorie est de 1 mSv, la dose équivalente à la peau est de 50 mSv et la dose équivalente au cristallin est de 15 mSv (à comparer aux valeurs limites pour les travailleurs dans la figure 1.12).

CHAPITRE 1. LA RADIOPROTECTION ET SON CONTEXTE D'APPLICATION DANS LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Dose absorbée (en Gy)	Symptômes
< 0,5	aucun signe clinique
De 0,5 à 2	asthénie, nausées, vomissements 3 à 6 h après l'exposition
De 2 à 4	leucopénie, thrombopénie, anémie maximale 3 semaines après l'exposition, retour à la normale en 4 à 6 mois
De 4 à 6	hémorragies, aplasie – DL 50* : 4 à 4,5 Gy
De 6 à 7	diarrhée, vomissements, hémorragies
De 8 à 10	insuffisance respiratoire aiguë
> 10	coma, mort en 14 à 36h

\*DL 50 : Dose létale 50 signifie qu'une personne sur deux ayant reçu entre 4 et 4,5 Gy perdra la vie.

TABLEAU 1.7: Exemples d'effets déterministes observés pour différents seuils de dose absorbée - Cas d'une exposition aiguë globale [27].

Dose équivalente (en Sv)	Tissu	Effets
0,15	Testicules	stérilité transitoire
3,5 - 6	Testicules	stérilité permanente
2,5 - 6	Ovaires	stérilité
5	Cristallin	cataracte (1-10 ans)

TABLEAU 1.8: Exemples d'effets déterministes observés pour différents seuils de dose absorbée - Cas d'une exposition unique et brève d'un tissu ou organe.

Grandeur de protection	Travailleur de catégorie A	Travailleur de catégorie B et jeune travailleur de 16 à 18 ans	Femme enceinte (grossesse déclarée)	Femme allaitant
	(mSv sur 12 mois)	(mSv sur 12 mois)		
Dose efficace §	20	6		
Dose équivalente *	mains, avant-bras, pieds et chevilles	500	150	l'exposition de l'enfant à naître doit rester inférieure à 1 mSv ne doit pas être soumise à un risque d'exposition interne
	peau #	500	150	
	cristallin	150	45	

§ Exposition externe et interne

\* Exposition externe

# Applicable sur toute surface de 1 cm<sup>2</sup>

FIGURE 1.12: Limites réglementaires pour les travailleurs exposés [24].

## Le zonage en radioprotection

Tout comme pour les limites d'exposition, les modalités de délimitation de zones sont fixées par des textes réglementaires [28]. Le zonage a pour objectif de découper l'installation en zones réglementées selon des niveaux de risques d'exposition croissants des personnes susceptibles d'y travailler. La figure 1.13 reprend les différentes limites de dose efficace, dose équivalente aux extrémités et de débit de dose à respecter lors du classement des locaux.

Par exemple, si un local est classé Zone Contrôlée Verte, l'intervenant réalisant une intervention ne pourra pas intégrer plus de 25  $\mu\text{Sv}$  en 1 heure (Dose Efficace Totale). Mais ce n'est pas la seule contrainte car l'intervenant ne pourra pas non plus intégrer plus de 650  $\mu\text{Sv}$  de dose équivalente aux extrémités en 1 heure.

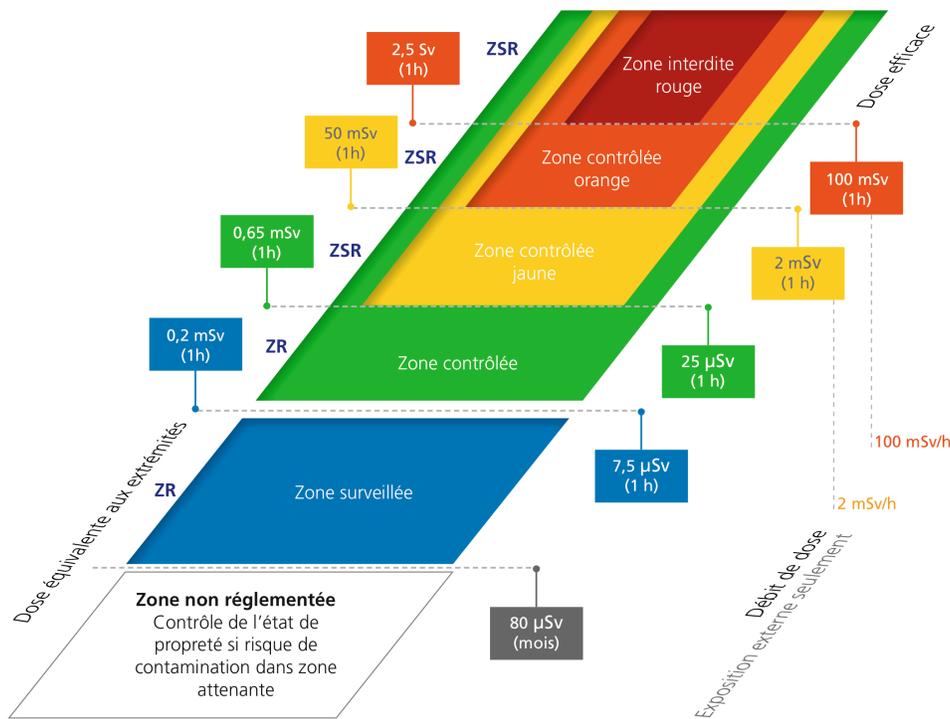


FIGURE 1.13: Récapitulatif des différents critères à respecter lors de la réalisation d'un zonage [29].

En pratique, si l'exposition interne peut être négligée (absence de source non scellée et faible niveau de contamination surfacique) et que les points chauds (zones restreintes où le débit d'équivalent de dose est plus élevé que la moyenne de la pièce) sont repérés et signalés, le zonage est effectué essentiellement en se basant sur le débit d'équivalent de dose au niveau du corps entier  $H^*(10)$ . Dans le cadre de notre exemple, le local classé Zone Contrôlée Verte, le débit d'équivalent de dose ambiant est susceptible d'être supérieur à 7,5  $\mu\text{Sv}/\text{h}$  sans jamais dépasser 25  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ .

Cette simplification est basée sur la formule de la dose efficace  $E = E_{\text{int}} + E_{\text{ext}}$ . Si  $E_{\text{int}}$  est négligeable alors seule l'exposition externe compte et un des estimateurs de dose utilisable et mesurable est le débit d'équivalent de dose corps entier  $H^*(10)$  puisque c'est une zone qui est surveillée (cf.

tableau 1.6). L'intervenant devra veiller à bien respecter la signalisation des points chauds afin de ne pas dépasser la limite de dose équivalente aux extrémités.

### 1.2.2 Rappel de la réglementation en vigueur

La radioprotection repose sur des principes généraux et des règles de protection pour l'utilisation de la radioactivité et des rayonnements ionisants. Ils sont définis par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) sous la forme de recommandations. Il existe un consensus entre les grandes organisations internationales (Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Organisation Mondiale de la Santé, Commission Européenne, ...) pour prendre en compte les recommandations de la CIPR. Ces recommandations sont régulièrement actualisées pour tenir compte des nouvelles données scientifiques disponibles.

Leurs publications entraînent au niveau de la communauté européenne l'écriture de nouvelles directives EURATOM. La dernière en date a été publiée en janvier 2014 (Directive 2013/59/EURATOM). Ces directives seront à leur tour transposées dans le droit de chacun des états membres. Ces derniers auront jusqu'au 6 février 2018 pour le faire. La nouvelle directive remplace les directives antérieures, elle prend en compte les recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique publiées en 2007 (CIPR 103 [23]).

Par le passé, la publication 60 de la CIPR en 1990 a entraîné l'écriture des directives EURATOM 96/29 et 97/43 ayant pour objet la protection de la population, des travailleurs et des patients. La directive 96/29 a notamment conduit à l'abaissement de la limite annuelle corps entier des travailleurs de 50 à 20 mSv. La transposition de ces directives dans le droit français a été l'occasion d'une mise à jour complète des dispositions législatives et réglementaires concernant la radioprotection figurant dans le Code de la santé publique et dans le Code du travail avec un souci de simplification et de clarification.

### 1.2.3 Radioprotection et risques radiologiques en CNPE

Dans les CNPE, les intervenants sont particulièrement exposés aux rayonnements ionisants. Nous retrouvons entre autres les risques imputables aux trois différents modes d'exposition aux rayonnements ionisants : l'exposition externe, la contamination externe de surface ainsi que la contamination interne vues dans les paragraphes précédents. A ces risques s'ajoute un dernier cas spécifique aux exploitants de centrale nucléaire : l'accès au bâtiment réacteur (BR) alors que la tranche est en puissance.

Le travail de radioprotection va s'articuler autour de deux thèmes qui vont être présents pour tous les risques rencontrés : la mise en place de moyen de détection et d'actions de prévention.

#### 1.2.3.1 Les risques d'exposition externe

Pour les risques d'exposition externe, la prévention repose sur trois facteurs qui sont : la préparation des interventions, la signalisation dans les locaux et les moyens de détection fournis à l'intervenant.



FIGURE 1.14: Exemple de signalisation de points chauds (à droite). Types de signalisation utilisés pour le marquage des points chauds orange et rouge (à gauche).

### La signalisation dans les locaux

Le classement d'un local est réalisé en fonction de la mesure de débit d'équivalent de dose ambiant (DED) réalisée in-situ. À la mesure, il faut ajouter la prise en compte du risque d'évolution de ce DED car chaque local ou zone de travail réglementé est classé en zone surveillée ou en zone contrôlée (voir figure 1.13). Ce classement est affiché à l'entrée du local. Il est également saisi dans une application informatique disponible pour la préparation du travail. Si l'intervention le nécessite, une cartographie plus détaillée d'un local peut être établie et fournie à l'équipe intervenante.

Dans le souci de respecter la réglementation concernant les débits d'équivalent de dose aux extrémités, tous les points chauds sont signalés via l'utilisation de signalétique spécifique (voir figure 1.14) comportant un trisecteur et dont la couleur dépend du DED mesuré (jaune, orange ou rouge).

Pour entrer en zone contrôlée, chaque intervenant est doté d'un dosimètre électronique équipé d'une alarme lumineuse et sonore du débit d'équivalent de dose et donne en temps réel la dose cumulée depuis l'entrée en zone contrôlée.

De plus, chaque chargé de travaux effectue des contrôles de DED à l'aide d'un radiamètre (voir figure 1.15). Ces mesures permettent de s'assurer de la conformité des DED avec la signalisation et/ou la cartographie. Ces vérifications permettent également d'éviter les dépassements des prévisions dosimétriques qui s'appuient sur les DED mesurés lors des cartographies et relevés précédents.

- Pour une source externe donnée, il existe trois moyens qui permettent de limiter une exposition :
- le temps : il faut limiter au maximum le temps d'intervention. Les clés pour limiter le temps d'intervention sont la préparation de l'intervention (qui comprend l'étude du trajet pour accéder aux locaux de travail), l'entraînement sur maquette et si possible la réalisation d'un maximum de tâches dans une zone à faible DED.

- l'écran : il faut adapter ses protections aux rayonnements présents. Pour des rayonnements  $\gamma$  et X : utilisation de matériaux denses (plomb, béton). Pour les particules  $\beta$  : quelques millimètres de plastique peuvent suffire à arrêter complètement ce rayonnement.
- la distance : il faut garder un maximum de distance entre soi-même et la source de rayonnement. Pour les rayonnements  $\gamma$ , la loi en  $1/d^2$  s'applique aux sources. L'utilisation d'outillage télécommandé permet également une diminution de l'exposition.



FIGURE 1.15: Exemple de radiamètre utilisé par les chargés de travaux lors d'intervention en zone surveillée ou contrôlée. Dimensions réelles : 120 x 65 x 22 mm.

### 1.2.3.2 Les risques de contamination

Dans les centrales nucléaires, la contamination se trouve le plus souvent sous forme de dépôts sur les surfaces internes et parois externes des matériels/objets. Les sols et les parois des locaux peuvent également avoir été souillés. Lorsqu'il y a la présence de contamination, le risque immédiat est la mise en suspension de la contamination et son inhalation par les intervenants. Par contact avec les surfaces contaminées, des particules peuvent également être transférées sur la peau, sur les vêtements ou sur les outils de l'intervenant. La présence de contamination non fixée dans un local nécessite de prendre des précautions afin d'éviter la dispersion de la contamination dans les locaux voisins, la contamination corporelle externe et l'exposition interne.

Lorsque le risque de contamination est identifié (voir figure 1.16), les zones de travail sont contrôlées par dépistage (frottis,...). Ces mesures sont effectuées à l'ouverture du chantier et périodiquement pendant toute la durée de l'intervention. Si le risque de mise en suspension de la contamination est trop important, une balise peut être mise en place à poste fixe sur le chantier afin de monitorer la mesure en temps réel. Afin de garantir la non dissémination de la contamination, un moyen de contrôle des personnes et des matériels sera mis en place au niveau du saut de zone.

Concernant les actions de prévention, la première règle à respecter est le confinement de la contamination au plus proche de sa source en évitant au maximum la dispersion de la radioactivité. La deuxième règle est de respecter strictement les interdictions de fumer, de boire et de manger en zone contrôlée. En effet, ces comportements favorisent le risque de contamination interne. De plus :

- si un intervenant doit travailler dans un local contaminé, il doit obligatoirement porter des moyens de protection individuelle adaptés : surbottes et gants imperméables, surtenue et, si nécessaire, protection respiratoire,

Niveau de contamination (NC)	NC0	NC1	NC2	NC3
<b>Critères de classement des interventions</b>				
<b>Ouverture des circuits contaminés</b>	Pas d'ouverture de circuits contaminés.	Diamètre de l'ouverture < DN80 Pas de projection de particules actives (meulage, brossage...)	Diamètre de l'ouverture > DN80 Ou projection de particules actives (meulage, brossage...)	Conditions de contamination surfacique et/ou volumique atypiques, quantitativement ou qualitativement (risque iode ou alpha). Ou aucun REX disponible.
<b>Contamination surfacique de la zone de chantier</b>	< 4 Bq/cm <sup>2</sup>	< 400 Bq/cm <sup>2</sup>	> 400 Bq/cm <sup>2</sup>	
<b>Nature des risques liés à l'intervention</b>				
<b>Dispersion de la contamination</b>	Risque éventuel de dispersion entre des zones de niveaux différents au titre de la DI 104.	Risque éventuel de dispersion de contamination au-delà du chantier par les personnes et les matériels.	Risque de dissémination de la contamination par les intervenants et les matériels.	Risque de dissémination de la contamination par les intervenants et les matériels.
<b>Exposition externe et contamination des matériels utilisés</b>	Absence de risque de contamination corporelle des intervenants et des matériels par le local.	Risque de contamination corporelle des intervenants et des matériels utilisés.	Risque de contamination corporelle des intervenants et des matériels utilisés.	Risque de contamination corporelle des intervenants et des matériels utilisés.
<b>Exposition interne</b>	Absence de risque d'exposition interne.	Absence de risque d'exposition interne.	Risque d'exposition interne des intervenants.	Risque d'exposition interne des intervenants.

DN 80 : diamètre nominal de 80 mm, DI 104 : directive « zonage propreté-déchets »

FIGURE 1.16: Classement des interventions selon les risques de contamination  $\beta$  par EDF. Démarche « Optimisation de la Radioprotection » [29].

- la frontière de la zone contaminée doit être identifiée et matérialisée. Des mesures sont prises pour éviter la dispersion de particules hors de cette frontière (retrait des protections individuelles au passage du saut de zone, décontamination des matériels et contrôle de non contamination des personnes et des matériels).

### 1.2.3.3 Les risques d'exposition interne

#### Le risque d'exposition Alpha

Les particules  $\alpha$  sont très peu pénétrantes et ne parcourent pas plus de quelques centimètres dans l'air. Elles sont arrêtées par la couche superficielle de la peau ou par n'importe quel écran de faible épaisseur. En revanche, ces particules sont fortement énergétiques et donc beaucoup plus pénalisantes que le rayonnement  $\gamma$  lorsqu'il s'agit d'une exposition interne (voir tableau 1.2).

Une tranche est dite «à risque  $\alpha$ » si des émetteurs  $\alpha$  sont présents dans le combustible irradié. En l'absence de rupture de gaine importante, les émetteurs  $\alpha$  restent confinés. Lors de l'arrêt de tranche,



FIGURE 1.17: Exemple de tenues étanches ventilées (à droite) et de heaumes ventilés (à gauche) [29].

le risque  $\alpha$  est confirmé en mesurant l'activité d'un frottis réalisé sur une paroi interne du circuit primaire à son ouverture. Un chantier est dit "à risque  $\alpha$ " si la tranche est à risque  $\alpha$  et si l'activité nécessite l'ouverture du circuit primaire ou de l'un de ses auxiliaires.

La détection des particules  $\alpha$  est délicate du fait de leur faible parcours dans l'air et de l'existence de particules  $\alpha$  émises par des radioéléments naturels (par exemple les descendants solides du radon). Toutefois, la contamination  $\alpha$  est, en pratique, toujours associée à une contamination  $\beta$  et/ou  $\gamma$ . Aussi, la surveillance de l'évolution de la contamination atmosphérique et/ou surfacique peut se faire grâce à une balise à poste fixe en sortie du chantier. La présence d'émetteurs  $\beta$  alertera donc d'une éventuelle contamination atmosphérique  $\alpha$ .

Les chantiers à risque de contamination  $\alpha$  sont identifiés, signalés et font l'objet d'une analyse de risques spécifiques. Les modalités de prévention spécifiques au risque  $\alpha$  consistent à éviter l'exposition interne par l'utilisation des protections collectives (confinement dynamique ou statique) et/ou par des protections individuelles (port de tenues étanches ventilées ou de heaumes, voir figure 1.17). Les modalités d'utilisation sont les mêmes que pour se prémunir de la contamination  $\beta$  ou  $\gamma$  mais elles peuvent être renforcées en cas de risque très élevé.

Les déchets en provenance de chantiers à risque  $\alpha$  doivent être gérés spécifiquement en évitant le mélange avec les déchets non contaminés  $\alpha$ . Les outillages sont décontaminés pour éviter de transférer la contamination vers un autre chantier ou une autre tranche.

### Le risque d'exposition à l'iode

L'iode est créée par la fission à l'intérieur des crayons combustibles. Pour être présent sous forme gazeuse ou d'aérosol dans l'atmosphère de la zone contrôlée il doit d'abord passer deux barrières : la gaine du combustible et le circuit primaire. De fait, le risque iode est présent : soit en cas de rupture de gaine (même de faible dimension) avec le circuit primaire ouvert ou en présence d'une fuite, soit lors d'un accident de manutention du combustible utilisé sous eau.

Il existe trois moyens de détection de l'iode dans l'atmosphère du bâtiment réacteur :

- l'utilisation des balises fixes du système de surveillance en continu de la radioprotection des travailleurs (système KRT). Ces balises ne sont efficaces que si la ventilation est en fonctionnement car la prise d'échantillon est unique et il faut donc que l'atmosphère soit homogène pour que la mesure soit représentative,
- l'utilisation des balises mobiles qui doivent être placées au plus près des chantiers,
- la réalisation de prélèvements sur filtre à charbon actif, puis le comptage de la radioactivité piégée dans le filtre.

Il existe plusieurs actions de prévention dont les principales sont les suivantes :

- le suivi d'activité du fluide primaire en fonctionnement et au début de l'arrêt permet de détecter les ruptures de gaine du combustible,
- le moyen de prévention le plus sûr est la ventilation du bâtiment réacteur car tant que le renouvellement de l'air est assuré, l'atmosphère est homogène et le niveau d'activité est maintenu à un niveau assez bas pour permettre de séjourner dans le BR,
- l'évacuation du bâtiment doit être initiée par les opérateurs depuis la salle de commande en cas de perte de la ventilation lors des phases à risque ou en cas de déclenchement d'une alarme.

#### 1.2.3.4 L'accès dans le bâtiment réacteur, tranche en puissance

Quand le réacteur est en fonction, les risques existants dans le bâtiment réacteur (BR) sont différents de ceux à prendre en compte à l'arrêt. En matière de sécurité classique, les risques spécifiques sont ceux liés à la présence de circuits sous pression et de capacités contenant de l'azote. Les risques radiologiques spécifiques sont dus aux neutrons et à l'azote 16 :

- Les neutrons : une partie infime des neutrons produits lors de la fission du combustible traverse la cuve et induit un risque radiologique dans le BR, principalement dans les zones proches de la cuve. Des cartographies, réalisées lors du démarrage des tranches, sont disponibles. Ce risque n'est pas présent lorsque le réacteur est à l'arrêt.

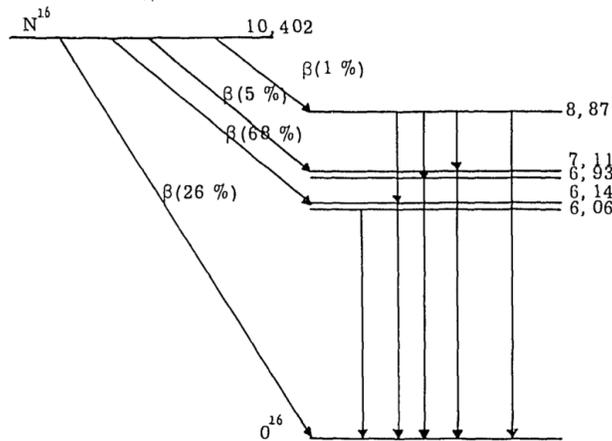


FIGURE 1.18: Schéma de désintégration de l'Azote 16 [30].

- Le rayonnement  $\gamma$  de très haute énergie provenant de l'activation de l'oxygène présent dans le fluide primaire. Plus précisément, la réaction responsable de la présence de l'azote 16 est la suivante :  $^{16}O(n, p)^{16}N$ . Cette activation produit de l'azote 16 qui émet des  $\gamma$  de 6,12 MeV (voir figure 1.18). Les DED induits par ce rayonnement sont de l'ordre de plusieurs dizaines de mSv/h à proximité des boucles, ce qui conduit à classer en « zone rouge » les locaux des tuyauteries primaires. Ce risque disparaît presque instantanément après la convergence<sup>3</sup> du réacteur car l'azote 16 a une période très courte (de l'ordre de 7 secondes).

Pour les rayonnements  $\gamma$ , les dosimètres passifs et opérationnels habituellement utilisés ainsi que les radiamètres permettent d'évaluer le risque radiologique et les débits d'équivalent de dose. Pour les neutrons, des dosimètres passifs et opérationnels spécifiques sont attribués aux intervenants.

L'accès en fonctionnement est restreint (procédure d'autorisation spéciale) et le nombre d'intervenants est strictement limité. Ces interventions dans le bâtiment réacteur en puissance doivent être justifiées. Elles sont motivées par un impératif de sûreté ou par une mission technique parfaitement définie. Les actions de prévention liées à ces interventions sont les suivantes :

- Préparation de l'intervention : Toute intervention doit faire l'objet d'une analyse des risques s'appuyant sur les « Règles d'accès dans le BR - Tranche en puissance ». Cette analyse prévoit notamment de choisir le sas d'accès le plus proche de l'intervention (limitation de l'exposition) et de faire une évaluation prévisionnelle de la dose (en prenant en compte la composante neutron).
- Avant l'intervention : la puissance du réacteur est stabilisée, les essais périodiques ou autres manœuvres d'exploitation sont reportés, un essai global de manœuvrabilité des sas est réalisé et ces derniers sont positionnés correctement, les liaisons phoniques et les alarmes sont testées.
- Réalisation de l'intervention : un contrôle de l'atmosphère du bâtiment réacteur permet de déterminer si l'on doit porter les protections respiratoires ou simplement les avoir à disposition, l'intervention est suivie par un technicien radioprotection.

---

3. Convergence : Phase de mise à l'arrêt du réacteur.

### 1.2.4 Statistiques d'exposition des intervenants en CNPE

La réalisation de maintenance et de rechargement de combustible sur tout le parc de centrale nucléaire induit un nombre important d'intervenants exposés aux rayonnements ionisants. Afin de rendre compte de l'efficacité des mesures mises en place dans le cadre de l'amélioration des conditions de travail et de la recherche de diminution de dose absorbée inhérente au concept ALARA, EDF communique les statistiques d'exposition des intervenants présents sur ses sites (agents EDF et prestataires).

## Indice horaire de dose

Dose moyenne horaire ( $\mu\text{Sv}/\text{heure}$  travaillée en ZC)

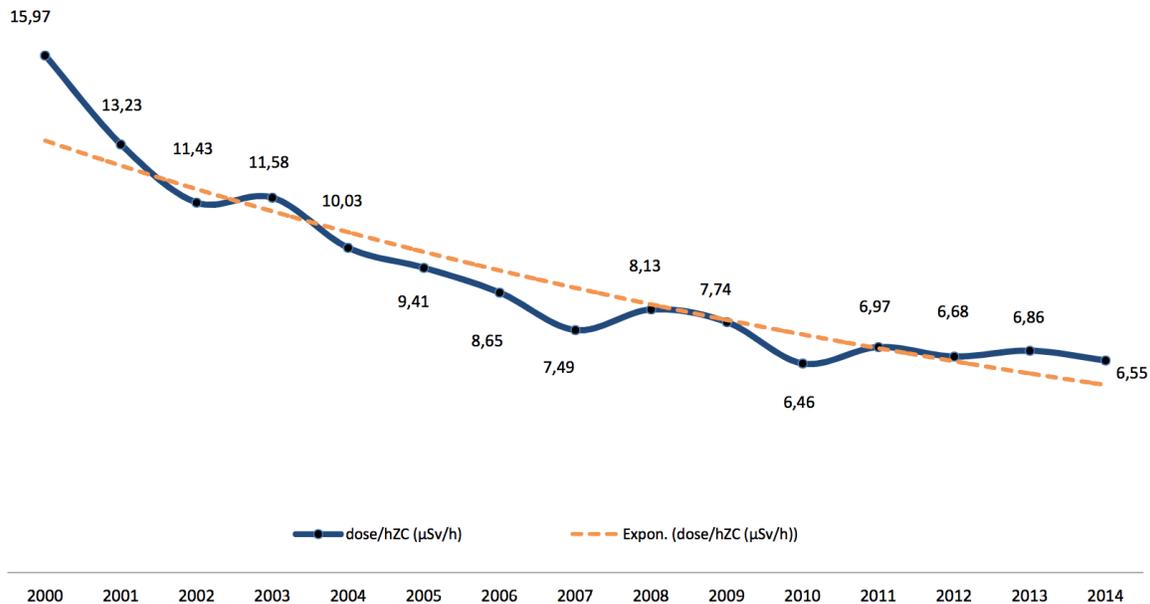


FIGURE 1.19: Evolution de l'indice horaire de dose (en  $\mu\text{Sv}$  par heure travaillée en zone contrôlée) sur les 15 dernières années [31].

Que ce soit pour la dose absorbée ou pour la propreté radiologique de ses locaux, EDF n'a cessé de progresser et d'améliorer ses résultats. Par exemple, l'indice horaire de dose (voir figure 1.19) montre qu'entre le début des années 2000 et 2014 la dose moyenne absorbée par un intervenant en zone contrôlée a presque diminué d'un facteur 3. La dose moyenne absorbée en une heure par un intervenant en zone contrôlée est passée sur cette période de 15,97  $\mu\text{Sv}$  à 6,55  $\mu\text{Sv}$ .

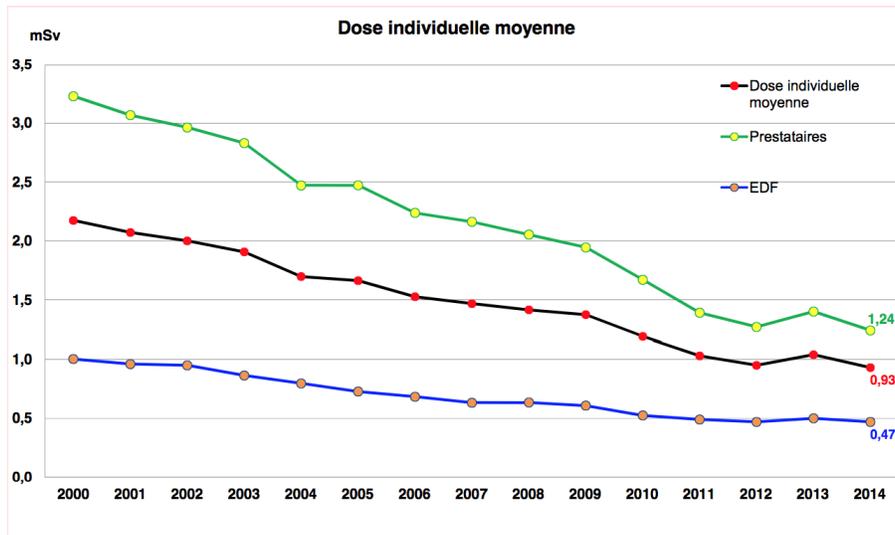


FIGURE 1.20: Evolution de la dose individuelle moyenne chez les agents EDF et chez les prestataires sur les 15 dernières années [31].

L'étude sur l'évolution de l'indice horaire de dose entre 2000 et 2014 est confortée par une seconde étude qui porte sur l'évolution de la dose individuelle moyenne absorbée sur la même période (voir figure 1.20). L'évolution observée entre le début des années 2000 et 2014 est du même ordre de grandeur entre les deux études.

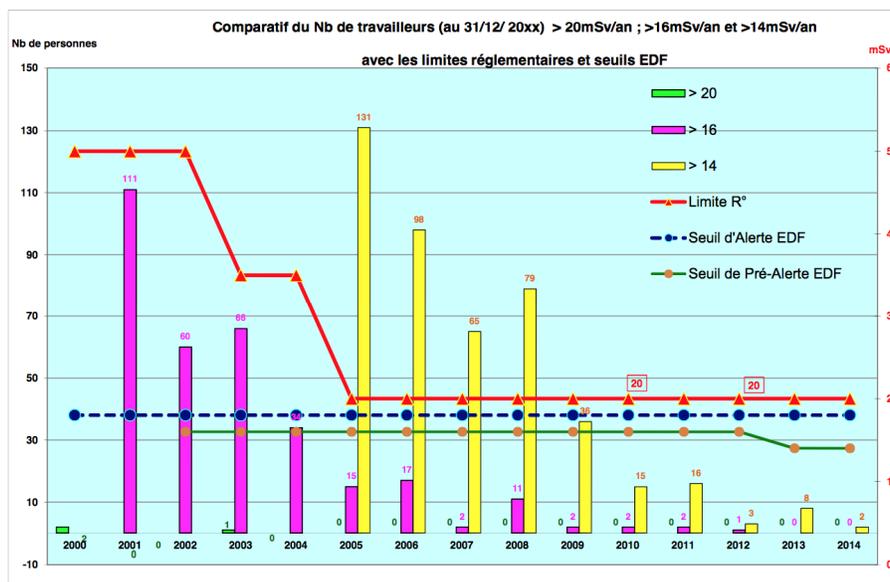


FIGURE 1.21: Evolution du nombre d'intervenants ayant absorbé une dose annuelle supérieure à 20, 16 et 14 mSv sur les 15 dernières années [31].

Attention toutefois car ces deux études portaient sur des moyennes en prenant en compte tous

les agents et prestataires entrant en zone. En pratique, il existe de grandes disparités entre les différents corps de métier. Par exemple, les calorifugeurs et les robinetiers font partie des métiers les plus exposés. En 2014, la dose moyenne individuelle intégrée était d'environ 2,7 mSv pour les calorifugeurs, elle était d'environ 1,6 mSv pour les soudeurs et d'environ 0,7 mSv pour un intervenant du service sécurité radioprotection (SRP). Il est donc intéressant de pouvoir étudier des statistiques faisant apparaître chaque intervenant quel que soit son poste. C'est le cas de l'étude présentée figure 1.21.

Dans cette étude nous pouvons observer l'évolution du nombre d'intervenants se situant au dessus des seuils annuels fixés à 20 mSv, 16 mSv et 14 mSv. Nous pouvons constater une nette diminution des cas extrêmes. Par exemple en 2005, il y a eu 146 intervenants au dessus de 14 mSv alors qu'en 2014 il ne restait plus que 2 intervenants dans cette situation.

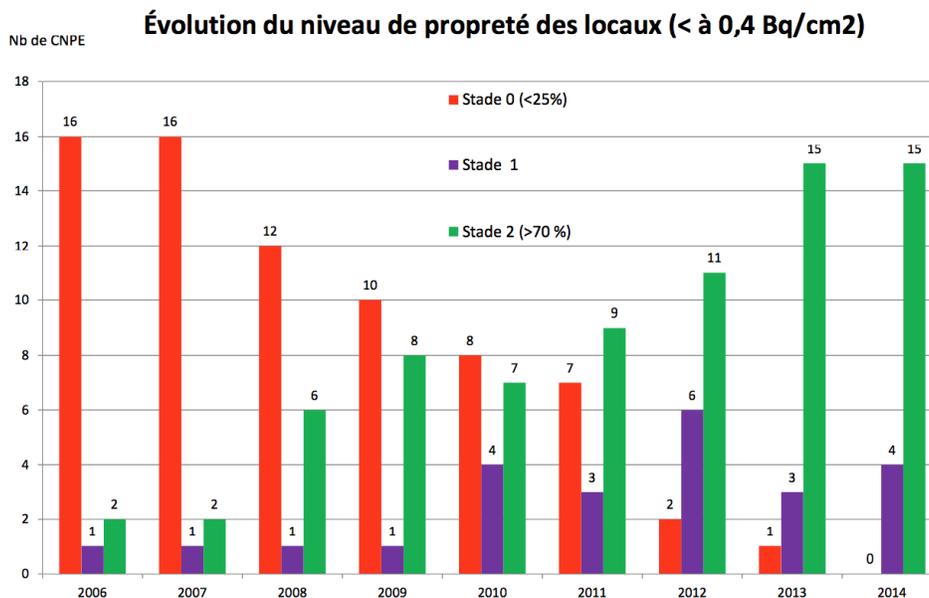


FIGURE 1.22: Evolution du niveau de propreté radiologique des locaux par centrale nucléaire sur les 10 dernières années [31]

Un des leviers permettant la diminution de la dose absorbée est de lutter contre la dissémination de la contamination. L'accent a donc été mis par EDF sur la propreté radiologique de ses locaux. Une étude statistique a montré que depuis 2007, les CNPE ont travaillé sur ce point et la figure 1.22 montre que la majorité des sites ont plus de 70 % de leurs locaux avec des niveaux de contamination inférieurs à 0,4 Bq/cm<sup>2</sup>.

### 1.3 Le confinement de la contamination

Nous avons vu précédemment que l'un des facteurs déterminant pour diminuer l'impact des rayonnements ionisants est de diminuer la dissémination de la contamination. Cette problématique est d'autant plus importante qu'avec l'arrivée du Grand Carénage, les chantiers vont avoir tendance à se multiplier et à être réalisés en co-activité.

### 1.3.1 Origine de la contamination présente sur les chantiers

La contamination présente sur les chantiers est en grande partie due à la maintenance des installations (ouverture des circuits) et aux fuites qui peuvent intervenir sur la tuyauterie. Cette contamination est composée de radionucléides qui se sont formés dans le cœur du réacteur où il règne un intense flux de neutrons qui provoque de nombreuses réactions nucléaires. On distingue trois grands types de réactions provoquées par le flux de neutrons :

- Environ 40 % des neutrons générés (voir ① sur la figure 1.3) dans le cœur du réacteur provoquent des réactions de fission sur les noyaux fissiles présents dans le combustible. Ces fissions libèrent de l'énergie, émettent des photons  $\gamma$  (appelés gamma instantanés de fission) et en moyenne 2,5 neutrons. Les réactions de fission créent également des nucléides radioactifs, les produits de fission.
- Environ 25 % des neutrons générés (voir ② sur la figure 1.3) dans le cœur du réacteur sont capturés par des noyaux lourds dits « fertiles » qui peuvent se transformer en noyaux fissiles : ainsi l'uranium 238, présent en grande quantité dans le combustible, pourra se trouver partiellement transformé en plutonium 239. Ce plutonium 239 participe à la réaction en chaîne en subissant la réaction de fission, mais ce dernier pourra également capturer des neutrons pour devenir du plutonium 240, puis du plutonium 241. Ce phénomène est le point de départ d'une série de réactions qui créera des noyaux radioactifs plus lourds. Les radionucléides qui se forment ainsi, sont notamment des isotopes du neptunium, du plutonium, de l'américium et du curium. Ils constituent la chaîne des actinides.
- Les neutrons restants (environ 35 % - voir ③ sur la figure 1.3) disparaissent en étant capturés par d'autres types de noyaux présents dans le réacteur (matériaux de structure, eau primaire ou corps dissous dans l'eau). Ce phénomène conduit à l'émission de photons  $\gamma$  et à la création de produits d'activation.

Les produits de fission, les produits d'activation et les actinides sont les trois grandes composantes du terme source qu'il faut prendre en compte sur le plan de la radioprotection en CNPE.

#### Les produits de fission (PF)

Lors d'une réaction de fission, un noyau lourd se fragmente généralement en deux noyaux de masse inégale. Ces noyaux sont appelés fragments de fission et ils sont radioactifs. On appelle produits de fission l'ensemble des fragments de fission et de leurs descendants, car il faut plusieurs désintégrations avant de finalement aboutir sur un noyau stable qui marque la fin de la chaîne de filiation radioactive. Les produits de fission sont des émetteurs  $\beta$  dont les désintégrations s'accompagnent souvent d'une émission gamma. Les principaux produits de fission ayant une période supérieure à un jour sont : le  $^{85}\text{Kr}$ , le  $^{133}\text{Xe}$ , le  $^{133\text{m}}\text{Xe}$ , l'  $^{131}\text{I}$ , le  $^{134}\text{Cs}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ .

La plupart des produits de fission se retrouvent sous forme d'oxydes solides ou sous forme métallique et se fixent dans le combustible. Toutefois, ils peuvent également se retrouver sous diverses formes chimiques qui conditionnent leur migration hors du combustible. Par exemple, certains sont présents sous forme gazeuse, tels les iodures et les gaz rares (Xe, Kr) et peuvent être plus facilement dispersés dans le fluide primaire en cas de présence de défauts sur la gaine du combustible.

### Les produits d'activation (PA)

Lorsqu'un élément non radioactif est soumis à un flux neutronique, cet élément est activé, dans ce cas, un ou plusieurs radionucléides sont créés. On appelle ces radionucléides "produits d'activation". Les produits d'activation présents dans un REP résultent de plusieurs phénomènes :

- de l'activation des impuretés contenues dans le fluide du circuit primaire- les radionucléides créés sont appelés "produits de corrosion",
- de l'activation des structures composant le coeur du réacteur - les radionucléides créés sont appelés "produits d'activation issus des structures".
- de l'activation du fluide lui-même (liste des principaux PA dus à ce phénomène présentée figure 1.23),

La quantité et la nature des radionucléides créés par ce phénomène d'activation dépendent de l'intensité du flux neutronique, de la nature et de la composition des éléments exposés au flux neutronique ainsi que de la durée pendant laquelle ils sont soumis à ce flux. Les principaux radionucléides générés dans un réacteur REP par l'activation des structures sont présentés dans le tableau 1.24 résumant l'origine et les caractéristiques des radionucléides ainsi formés.

Radio-nucléide	Période T	Provenance
Azote 16 : $^{16}\text{N}$	7,1 s	L'azote 16 est produit par réaction sur l'oxygène 16 contenu dans le fluide primaire. Il émet des rayonnements très énergétiques.
Tritium : $^3\text{H}$	12,3 ans	Le tritium est produit par réaction sur le bore (principalement $^{10}\text{B}$ ) et sur le lithium (principalement $^6\text{Li}$ ) ajoutés au fluide primaire pour contrôler respectivement la réactivité (bilan neutronique) et le pH (acidité).
Argon 41 : $^{41}\text{Ar}$	110 minutes	La ventilation du puits de cuve fait passer un débit d'air sous flux neutronique. Cet air contient 0,93 % d'argon naturel dont 99,6 % d'argon 40 activable.
Carbone 14 : $^{14}\text{C}$	5 700 ans	Produit principalement par réaction sur l'oxygène 17 de l'eau du fluide primaire (mais aussi par réaction sur l'oxygène contenu dans le combustible : en effet, les pastilles combustibles sont constituées d'oxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) et contiennent de ce fait de l'oxygène). Il est également produit par réaction des neutrons sur l'azote 14.
Sodium 24 : $^{24}\text{Na}$	15 heures	Activation du $^{23}\text{Na}$ , présent dans l'eau à titre d'impureté.
Chlore 38 : $^{38}\text{Cl}$	37 minutes	Activation du $^{37}\text{Cl}$ , présent dans l'eau à titre d'impureté.
Potassium 42 : $^{42}\text{K}$	12,4 heures	Activation du $^{41}\text{K}$ , présent dans l'eau à titre d'impureté.

FIGURE 1.23: Liste des produits d'activation issus du fluide primaire ou de l'air [10, 32]

La gestion préventive du risque d'activation issu des structures consiste à réduire le terme source, donc à limiter dans la mesure du possible la formation des produits d'activation dans les structures.

Au contact du fluide primaire, les structures du circuit se recouvrent d'une couche d'oxyde protectrice. Ce phénomène s'accompagne du relâchement d'une partie des diverses espèces métalliques oxydées dans le fluide du circuit primaire que l'on appelle « produits de corrosion ». Les constituants extraits du métal de base par ce phénomène de corrosion/relâchement sont transportés dans le circuit primaire et soumis au flux neutronique lors du passage dans le cœur, c'est ainsi qu'ils peuvent donc s'activer. Après avoir été activés ils continuent leur course dans le fluide du circuit primaire et peuvent se redéposer en divers endroits de ce circuit.

La formation des produits de corrosion est due aux conditions de pression et de température du circuit primaire en fonctionnement. Ces dernières sont très contraignantes pour les matériaux constituant le circuit primaire. Les produits de corrosion issus des principaux alliages rencontrés dans le circuit primaire d'un REP susceptibles de s'activer sont les suivants :  $^{50}\text{Cr}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{59}\text{Co}$ . Les produits d'activation résultants de ces activations sont détaillés dans le tableau 1.24.

Au final, 90 % des doses intégrées sont imputables aux produits d'activation (et plus particulièrement le  $^{60}\text{Co}$ , le  $^{58}\text{Co}$ , l'  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  et l'  $^{124}\text{Sb}$ ) et 10 % sont imputables aux produits de fission. C'est pour cela, qu'il est nécessaire de choisir avec soin les éléments présents dans les structures. Par exemple, des aciers spéciaux au zirconium ont été mis au point. Ces derniers contiennent une très faible teneur en cobalt et permettent donc de réduire la formation de  $^{60}\text{Co}$ . En effet, le  $^{60}\text{Co}$  émet des rayonnements  $\gamma$  énergétiques qui sont pénalisants pour la radioprotection.

### 1.3.2 Les enjeux de la mesure au plus près du chantier

La mesure de contamination a pour but de confiner cette dernière en prévenant toute dissémination par l'intervenant. La principale problématique concernant la mesure de contamination est la présence d'un DED gamma fluctuant et parfois important (compris entre quelques  $\mu\text{Sv/h}$  et plusieurs dizaines de  $\mu\text{Sv/h}$ ). Ce DED perturbe la mesure de contamination surfacique car les appareils de radioprotection existants sont aussi bien sensibles aux rayonnements  $\beta$  qu'aux rayonnements  $\gamma$ .

Or, lors d'un repli de chantier, le chargé de travaux et son équipe doivent évaluer le niveau de contamination du matériel en sortie de chantier en réalisant un dépistage suivant les règles de propreté radiologique en vigueur sur le site. Conformément à la DI 104 (voir tableau 1.9) , la valeur de la contamination maximale attendue sur le matériel quittant un chantier situé en zone N1 ou N2 est fixée à  $4 \text{ Bq/cm}^2$ . Si le chantier est situé en zone NP, la valeur limite applicable est de  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ .

Zones	K	NP	N1	N2
Descriptions	Zone à déchets conventionnels	Zones à déchets nucléaires		
Types de locaux	locaux conventionnels	locaux nucléaires propres	locaux nucléaires faiblement contaminés	locaux nucléaires contaminés
Niveaux de contamination	contamination non fixée inférieure à $0,4 \text{ Bq/cm}^2$		contamination non fixée inférieure à $4 \text{ Bq/cm}^2$	contamination non fixée supérieure à $4 \text{ Bq/cm}^2$

TABLEAU 1.9: Définition des zones propreté/déchets suivant les recommandations de la DI104.

CHAPITRE 1. LA RADIOPROTECTION ET SON CONTEXTE D'APPLICATION DANS LES CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Radio-nucléide	Période T *	Produit par l'activation de	Provenance
Cobalt 60 : $^{60}\text{Co}$	5,3 ans	$^{59}\text{Co}$	Activation du cobalt 59 stable (100 % du cobalt). Le cobalt est le constituant principal des stellites** (60 %), il est présent à titre d'impureté dans les alliages.
Cobalt 58 : $^{58}\text{Co}$	70,8 jours	$^{58}\text{Ni}$	Activation du nickel 58 stable (68 % du nickel). Le nickel est le principal constituant des tubes d'inconel des générateurs de vapeur (72 % pour l'alliage 600, 58 % pour le 690). Il est utilisé en proportions variables dans les alliages inoxydables.
Antimoine 124 : $^{124}\text{Sb}$	60,2 jours	$^{123}\text{Sb}$	Activation de l'antimoine 123 stable (43 % de l'antimoine). Grappes sources secondaires en antimoine/béryllium, butées et paliers de certaines pompes, impuretés du gainage en zircaloy.
Argent 110 métastable : $^{110\text{m}}\text{Ag}$	249,8 jours	$^{109}\text{Ag}$	Activation de l'argent 109 stable (48 % de l'argent). Grappes de contrôle constituées d'AIC (Argent, Indium, Cadmium), joints beurrés argent (type hélicoflex).
Manganèse 54 : $^{54}\text{Mn}$	312,1 jours	$^{54}\text{Fe}$	Activation du fer 54 stable (6 %) provenant des structures.
Fer 59 : $^{59}\text{Fe}$	44,5 jours	$^{58}\text{Fe}$	Activation du fer 58 stable (0,3 %) provenant des structures.
Chrome 51 : $^{51}\text{Cr}$	27,7 jours	$^{50}\text{Cr}$	Activation du chrome 50 stable provenant des structures.
Nickel 63 : $^{63}\text{Ni}$	99 ans	$^{62}\text{Ni}$	Activation du nickel 62 stable (3,6 % du nickel).
Nickel 59 : $^{59}\text{Ni}$	76 000 ans	$^{58}\text{Ni}$	Activation du nickel 58 stable (68 % du nickel).
Fer 55 : $^{55}\text{Fe}$	2,7 ans	$^{54}\text{Fe}$	Activation du fer 54 stable (6 % du fer).
Zirconium 93 : $^{93}\text{Zr}$	$1,5 \times 10^6$ ans	$^{92}\text{Zr}$	Activation du zirconium 92 stable (17 % du zirconium).
Molybdène 93 : $^{93}\text{Mo}$	4 000 ans	$^{92}\text{Mo}$	Activation du molybdène 92 stable (15 % du molybdène).
Niobium 94 : $^{94}\text{Nb}$	20 000 ans	$^{93}\text{Nb}$	Activation du niobium 93 stable (100 % du niobium).
Zinc 65 : $^{65}\text{Zn}$	244 jours	$^{64}\text{Zn}$	Activation du Zinc 64, présent dans l'eau à titre d'impureté et éventuellement d'une partie du zinc ajouté intentionnellement pour maîtriser le terme source ou lutter contre la corrosion sous tension des alliages base nickel.

\* Valeurs indicatives, les valeurs de référence peuvent être trouvées sur le site [www.nucleide.org](http://www.nucleide.org)

\*\* stellite : alliage utilisé pour ses qualités de résistance à l'usure

FIGURE 1.24: Liste des principaux radionucléides générés dans un réacteur de type REP par l'activation des structures et/ou des produits de corrosion [10]

En cas d'impossibilité de contrôle de très bas niveau de contamination surfacique, notamment à cause du bruit de fond, des procédures adaptées de contrôle de la contamination sont mises en œuvre. Elles consistent entre autres à emballer le matériel et à réaliser les mesures à l'écart du chantier où le bruit de fond est moins important. Ces procédures permettent de limiter la dispersion de la contamination mais elles ne garantissent pas un confinement optimal. Un autre point faible de ces mesures est leur temps de mise en place. Ce dernier point implique aussi de passer plus de temps en zone et donc, il est plus impactant pour la radioprotection.

Les mesures de contamination effectuées à la sortie du chantier ou lors de son repli sont importantes. Comme nous l'avons dit plus haut, un des objectifs est de limiter au maximum la dissémination de contamination. Mais ces mesures ont également pour but de détecter le plus tôt possible la présence de contamination sur un intervenant. En effet, plus une contamination corporelle (au niveau du cou, de la tête, des mains et sur la peau en général) est détectée tôt, plus l'intervenant pourra être pris en charge rapidement et traité par les équipes médicales. L'impact radiologique de la contamination d'un intervenant dépendra principalement de deux facteurs : l'activité de la contamination et la durée pendant laquelle cette contamination sera présente sur lui. Par exemple, pour le Cobalt 60 une contamination ponctuelle de 1 kBq délivre un débit de dose équivalente à la peau de 0,78 mSv.h<sup>-1</sup> [33].

Lorsqu'une contamination est détectée sur un intervenant, l'équipe médicale calcule la dose approximative qu'il a absorbée. Le moment précis où l'intervenant a été contaminé n'étant pas connu précisément, l'heure d'entrée en zone (ou l'heure de début du chantier) sera prise en compte afin de ne pas minorer les risques encourus par l'intervenant. Ainsi, pour une contamination de 40 kBq de Cobalt 60 (exemple de présence d'un graton<sup>4</sup> au niveau du cou), si l'intervenant est entré en zone à 8h, que le chantier a commencé à 9h et que l'intervenant ressort de zone à 13h en faisant sonner le portique C1, la dose équivalente à la peau qu'il aura absorbée sera évaluée entre 130 et 160 mSv et ce même si l'intervenant a été contaminé à 12h. Cette situation arrive malheureusement plusieurs fois par an par exemple en mars 2015 à Gravelines ou encore, plus récemment, en avril 2016 à Chinon.

### 1.3.3 Les besoins futurs en mesure de contamination $\beta$

L'objectif d'EDF est d'obtenir un niveau de propreté maximal en zones contrôlées. Pour cela, il existe deux approches selon les CNPE. Certaines centrales ont l'ambition de maîtriser la propreté radiologique et de reconquérir la propreté de certains locaux. D'autres vont encore plus loin et ont engagé des actions permettant d'entrer en bleu de travail en zone contrôlée. Cette dernière approche est appelée EVEREST pour « Evoluer VERs une Entrée Sans Tenue universelle ». Elle consiste à accéder dans des zones propres (contamination non fixée inférieure à 0,4 Bq/cm<sup>2</sup>) en bleu de travail puis en tenue adaptée dans les zones contaminées. EVEREST s'inscrit dans la continuité de la DI 104 relative au « zonage propreté et déchet ».

A l'avenir, le besoin d'EDF sera donc de pouvoir mesurer la présence de contamination (surtout due au cobalt 60 dont le schéma de décroissance est présenté dans la figure 1.25) à des niveaux très faibles de l'ordre de 0,4 Bq/cm<sup>2</sup>. Cette mesure devra être réalisée dans des bruits de fond importants et fluctuants pouvant atteindre plusieurs dizaines de  $\mu$ Sv/h.

---

4. Graton radioactif : fine particule ayant été activée par un flux intense de neutron.

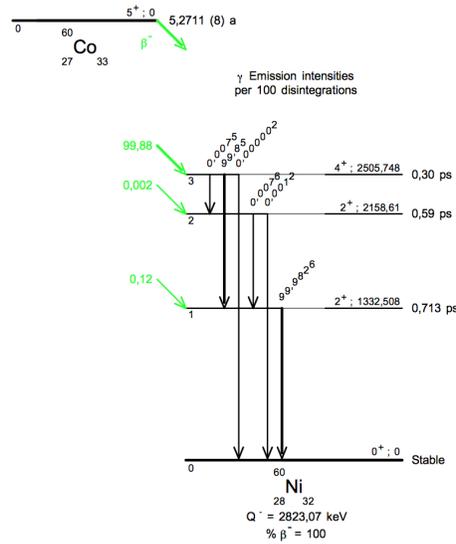


FIGURE 1.25: Schéma de décroissance du cobalt 60 [34].

Les mesures de contamination sont réalisées dans des conditions radiologiques défavorables (DED important et fluctuant). Il sera donc nécessaire de réaliser les mesures le plus rapidement possible. Une mesure rapide favorisera également l'utilisation d'appareils mis à disposition des intervenants. Ces dernières années, les incidents rencontrés sur site et qui concernaient les contaminations externes ont montré que les intervenants réalisaient mal les contrôles ou bien qu'ils ne les réalisaient pas du tout. Un appareil facile d'utilisation et rapide devra en tout état de cause faire diminuer ce genre d'incident.

Enfin, l'appareil utilisé devra être résistant et compatible avec une utilisation de terrain sur les divers chantiers. Cette contrainte devra être prise en compte notamment lors du choix des technologies qui intégreront le futur appareil.



## Chapitre 2

# Etat de l'art des solutions de mesure existantes

### Sommaire

---

<b>2.1 Etude des solutions présentes sur le marché</b> . . . . .	<b>45</b>
2.1.1 Les appareils existants . . . . .	46
2.1.2 Etudes utilisant des scintillateurs de type Phoswich . . . . .	48
2.1.3 Avantages et inconvénients des solutions existantes . . . . .	52
<b>2.2 Les techniques de mesure utilisées</b> . . . . .	<b>53</b>
2.2.1 Les compteurs gazeux . . . . .	53
2.2.2 Les détecteurs à scintillation . . . . .	59
2.2.3 Les détecteurs à semi-conducteur . . . . .	66
<b>2.3 Comparaison des différentes technologies disponibles en fonction de leur sensibilité</b> . . . . .	<b>69</b>
2.3.1 Notions de Seuil de Décision, de Limite de Détection et d'Activité Minimale Détectée . . . . .	70
2.3.2 Résumé des sensibilités atteintes par les différentes solutions proposées . . . . .	79
<b>2.4 Spécifications nécessaires à atteindre dans la présente étude</b> . . . . .	<b>82</b>
2.4.1 Rappel des contraintes supplémentaires d'une utilisation sur chantier . . . . .	82
2.4.2 Les limites de contamination surfacique à 4 Bq/cm <sup>2</sup> et 0,4 Bq/cm <sup>2</sup> . . . . .	83
2.4.3 Caractéristiques techniques à atteindre . . . . .	86

---

*La mesure de contamination surfacique est un outil essentiel pour les acteurs de la radioprotection. De très nombreux appareils de mesure ont été mis au point depuis plus d'un demi siècle afin de détecter tous les types de rayonnements ionisants. Ces appareils sont répartis en trois familles de détecteurs : les détecteurs gazeux, les détecteurs à scintillation et les détecteurs à base de semi-conducteurs.*

*Dans ce chapitre, je ferai tout d'abord une revue des solutions de mesure de contamination  $\beta$  disponibles ainsi que des études en cours sur le sujet. Je présenterai ensuite les 3 grandes familles de détecteurs utilisées dans le domaine de la mesure nucléaire et j'expliquerai en détail les notions de seuil de détection et de limite de détection. Ensuite, je ferai un comparatif des sensibilités atteintes par les appareils disponibles et je les confronterai aux spécifications nécessaires pour réaliser une mesure de contamination  $\beta$  dans une ambiance gamma importante et fluctuante. Enfin, je présenterai les*

spécifications que devra atteindre notre concept en matière de mesure mais aussi sur les plans de l'ergonomie et de l'utilisabilité<sup>1</sup> puisque cet appareil sera utilisé sur chantier dans des conditions difficiles.

## 2.1 Etude des solutions présentes sur le marché

La nécessité de mesurer la contamination surfacique est un besoin important dans le domaine de la radioprotection. Plusieurs industriels commercialisent depuis plus de quarante ans des solutions de mesure. Les solutions proposées pour la détection des rayonnements  $\beta$  et  $\gamma$  peuvent être décomposées en deux catégories :

- les appareils d'ancienne génération qui reposent sur des technologies de type : chambres à ionisation en mode Geiger-Müller (GM) scellées ou à flux gazeux.
- les appareils plus récents utilisent quant à eux trois types de technologie : les scintillateurs organiques, les détecteurs silicium (PIPS<sup>®</sup><sup>2</sup>) ou une combinaison de scintillateurs organiques et de GM.



FIGURE 2.1: Exemple de deux détecteurs utilisés sur site pour la mesure de contamination surfacique. (a) Le Dolphy  $\beta$  un détecteur basé sur une technologie Geiger-Müller Pancake fabriqué par la société Carmelec. (b) Le COMO 170 un détecteur basé sur une sonde à scintillation (scintillateur plastique) fabriqué par la société SEA GmbH.

Ces appareils de mesure sont adaptés à la détection de contamination  $\beta$  surfacique faible. Toutefois, pour atteindre des activités minimales détectables de l'ordre de  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ , le bruit de fond  $\gamma$  doit être très faible. Pour des mesures dites “de dépistage”, qui sont réalisées en 1 seconde, EDF a fait plusieurs essais avec les appareils énoncés précédemment. Ces essais sont consultables dans le Référentiel RP thème Métrologie [35], pour une limite de  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  les résultats indiquent que les

1. L'utilisabilité est définie par la norme ISO 9241-11 comme étant : « le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ».

2. PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) est une marque déposée par Canberra Industries, Inc.

bruits de fond  $\gamma$  doivent être inférieurs à 40 nSv/h pour le Dolphy  $\beta$  et inférieurs à 80 nSv/h pour le COMO 170.

Cette limitation est un point clé car c'est le problème auquel se heurtent les appareils actuels. Au delà des débits d'équivalent de dose cités plus haut, la sensibilité au bruit de fond  $\gamma$  des appareils entraîne des taux de comptage trop importants et le signal (très faible) dû à la mesure de contamination surfacique est noyé dans les fluctuations statistiques du bruit de fond  $\gamma$ . Pour situer un peu mieux cette limite induite par un bruit de fond élevé, en France, les débits de dose régionaux moyens varient de 40 à 150 nSv/h [36]. Les débits de dose ambiants mesurés en zone contrôlée, dans le bâtiment réacteur par exemple, sont autrement plus importants.

Si la limite de contamination choisie est de 4 Bq/cm<sup>2</sup> pour la réalisation d'un dépistage, les contraintes sont moins importantes concernant le niveau de bruit de fond  $\gamma$  ambiant. Mais bien que moins élevées, celles-ci n'en restent pas moins problématiques. Pour le Dolphy  $\beta$ , le bruit de fond gamma devra être inférieur à 350 nSv/h et inférieur à 8  $\mu$ Sv/h pour le COMO 170. Attention toutefois, ces appareils étant des mono-détecteurs, ces derniers ne sont pas utilisables dans des bruits de fond fluctuants. Ils nécessitent également la réalisation de deux mesures : une de bruit de fond et une sur la surface à contrôler.

Les débits d'équivalent de dose dans lesquels notre appareil devra être utilisable seront plus contraignants que ceux exposés plus haut. En effet, nous avons comme objectif minimum de mesurer une contamination surfacique  $\beta$  de l'ordre de quelques Bq/cm<sup>2</sup> (typiquement 4 Bq/cm<sup>2</sup>) dans une ambiance  $\gamma$  de plusieurs dizaines de  $\mu$ Sv/h (typiquement 30-40  $\mu$ Sv/h). A ces objectifs ambitieux s'ajoutent deux contraintes de taille puisque le temps nécessaire pour effectuer une mesure ne doit pas dépasser quelques secondes (typiquement inférieur à 3 secondes) et la surface active du détecteur ne doit pas être inférieure à 100 cm<sup>2</sup>.

### 2.1.1 Les appareils existants

Parmi les appareils existants, plusieurs formats sont utilisés. Il existe des appareils mono-détecteurs (ou multi-détecteurs) qui se déclinent soit en un seul boîtier compact généralement petit et léger, soit en un lecteur sur lequel se connecte une sonde externe elle aussi mono-détecteur (ou multi-détecteurs).

L'état de l'art nous a permis de recenser plus d'une trentaine d'appareils ou ensemble d'appareils qui répondent à la dénomination de « contaminamètre ». Ces appareils sont distribués par une quinzaine de fabricants plus ou moins importants et connus dans le domaine de la radioprotection. Nous pouvons citer par exemple : Berthold, Canberra, Carmelec, Fluke, Ludlums, Mirion, Radcomm, Saphymo ou encore Step. J'ai sélectionné 4 détecteurs permettant d'avoir une vue générale à la fois sur les différents types d'appareils (mono ou multi détecteurs), sur les différentes familles de détecteurs (gazeux, à scintillation et silicium) et les appareils les plus répandus sur le parc actuel d'EDF. Les caractéristiques de ces appareils sont exposées dans le tableau 2.1.

Après avoir recensé les contaminamètres de toute sorte, nous avons affiné nos résultats pour ne retenir que les appareils de mesure répondant aux objectifs fixés, c'est à dire ayant une surface active strictement supérieure à 100 cm<sup>2</sup> et une limite de détection (LD) équivalente <sup>60</sup>Co de 4 Bq/cm<sup>2</sup> dans une ambiance élevée et fluctuante de 30-40  $\mu$ Sv/h avec un temps d'acquisition inférieur à 3 secondes pour atteindre la LD.

Fabricant	Canberra	SEA GmbH / Nuvia	Canberra	Carmelec
Illustration				
Modèle	SBM2D + MIP10	CoMo 170	SPAB15 + Radiagem	Dolphy $\beta$
Technologie	2x GM Pancake	Scintillateur plastique	Détecteur Silicium	1x GM Pancake
Surface de détection	30 cm <sup>2</sup>	170 cm <sup>2</sup>	15 cm <sup>2</sup>	15 cm <sup>2</sup>
Sensibilité $\gamma$ typique ( <sup>137</sup> Cs)	15 c/s/ $\mu$ Sv/h	130 c/s/ $\mu$ Sv/h	8 c/s/ $\mu$ Sv/h	6,2 c/s/ $\mu$ Sv/h
Rendement typique ( <sup>60</sup> Co)	23 % dans $2\pi$	27 % dans $2\pi$	13 % dans $2\pi$	28 % dans $2\pi$
Discrimination directe $\beta/\gamma$	Non	Non	Non	Non
Ergonomie	Polyradiamètre + sonde	Monobloc	Radiamètre + sonde	Monobloc
Poids	850 g + 2300 g	750 g	400 g + 300 g	270 g

TABLE 2.1: Tableau comparatif entre plusieurs contaminamètres utilisés sur le marché. Ils représentent les principales familles de technologies disponibles. Les données du tableau sont issues de deux études réalisées par le service SPR du CEA Marcoule [37, 38].

Le premier critère portant sur la surface de l'appareil élimine beaucoup de contaminamètres, notamment tous ceux équipés d'un ou plusieurs GM Pancake<sup>3</sup> dont la surface de détection unitaire est généralement de 15 cm<sup>2</sup> [39].

Le deuxième critère concernant la mesure de contamination dans un bruit de fond gamma élevé et fluctuant suppose que l'appareil mesure indépendamment le bruit gamma et la contamination. Trois solutions sont imaginables :

- soit un détecteur extrêmement transparent aux rayonnements  $\gamma$  tout en conservant une sensibilité  $\beta$  suffisante,
- soit un détecteur avec une discrimination  $\beta/\gamma$  quasi-parfaite,
- soit deux (ou plusieurs) détecteurs parfaitement spécialisés dans chacun des rayonnements.

En règle générale, la solution choisie par les constructeurs est l'utilisation d'un seul détecteur et la réalisation de deux mesures consécutives : une d'ambiance  $\gamma$  puis une d'ambiance gamma et de contamination  $\beta$  suivie d'une soustraction automatique ou non.

3. Les GM Pancake sont un type de chambre à ionisation utilisée en mode Geiger-Müller. Ses particularités sont qu'il se présente sous la forme de cloche en acier et que la face d'entrée du détecteur est composé d'une fine couche de mica.

### 2.1.2 Etudes utilisant des scintillateurs de type Phoswich

La problématique de la mesure de contamination dans une ambiance élevée étant un sujet particulièrement intéressant pour les différents acteurs du nucléaire, il existe plusieurs études en cours à ce sujet. Notamment, je développerai dans ce chapitre une étude menée, entre 2011 et 2013, conjointement par le CEA List et EDF R&D [40, 41] qui explore l'utilisation d'un scintillateur de type Phoswich. Un scintillateur de type Phoswich - pour "Phosphor sandwich" - est une combinaison de deux ou plusieurs scintillateurs couplés optiquement ensemble et qui disposent de caractéristiques différentes. La lumière créée dans les différents scintillateurs est lue par le même photodétecteur (ici un photomultiplicateur). Ces différences vont venir influencer sur la forme des signaux (pulse shape) comme représenté sur la figure 2.2 [42]. Typiquement, un des scintillateurs aura des constantes de temps très courtes et le deuxième aura des constantes de temps longues. Suivant le but recherché, les scintillateurs seront également d'épaisseurs différentes.

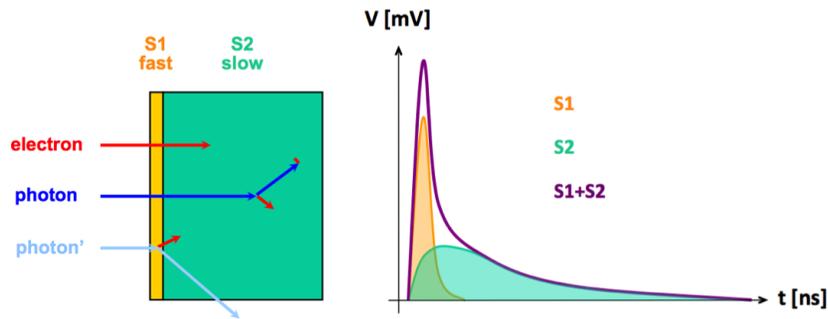


FIGURE 2.2: Représentation schématique de la forme et du fonctionnement d'un scintillateur de type Phoswich ainsi que des caractéristiques temporelles des signaux générés [43].

L'objectif du CEA List et d'EDF R&D était de mettre au point un nouvel appareil de mesure. Ce dernier devait être utilisé dans le cadre des contrôles de non-contamination corporelle et en général sur toutes les surfaces nécessitant d'être contrôlées (objets, outils, gants, ...). L'appareil devait permettre aux intervenants de réaliser les mesures de contaminations surfaciques telles qu'indiquées dans le référentiel EDF. Il devait également permettre de réaliser les mesures de contaminations jusqu'au seuil d'activité surfacique de  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  (Bq équivalent Cobalt 60). Cette mesure devait être réalisée dans une ambiance  $\gamma$  importante et fluctuante de l'ordre de  $30 \mu\text{Sv/h}$ . La surface active du détecteur devait être comprise en  $100$  et  $200 \text{ cm}^2$ . Enfin, l'appareil devait garantir une mesure avec un niveau de confiance supérieur à  $60 \%$  en moins de  $3$  secondes. Les objectifs fixés par le CEA List et EDF R&D sont très proches de ceux que nous souhaitons obtenir avec notre concept.

La mise au point de ce scintillateur a fait l'objet d'un dépôt de brevet [44] réalisé par l'équipe de recherche qui a travaillé sur la partie chimie de cette étude. Cette équipe a travaillé sur le design du scintillateur [43] à savoir : les compositions (matrices<sup>4</sup> et fluorophores<sup>5</sup>) de chaque scintillateur, leurs dimensions (différentes épaisseurs de scintillateurs dans le Phoswich) et l'habillage (enveloppe externe isolant le scintillateur de la lumière extérieure) final du scintillateur Phoswich. L'innovation principale de cette étude a été la réalisation d'un couplage de deux scintillateurs sans utiliser de

4. Une matrice (ou solvant) est un matériau qui va permettre la polymérisation du scintillateur et son utilisation sous forme solide.

5. Un fluorophore est une substance chimique capable d'émettre de la lumière de fluorescence après excitation.

couche de liaison. Cette couche de liaison est particulièrement problématique pour les scintillateurs de type Phoswich car elle représente une zone morte qui induit des incertitudes lors du traitement du signal.



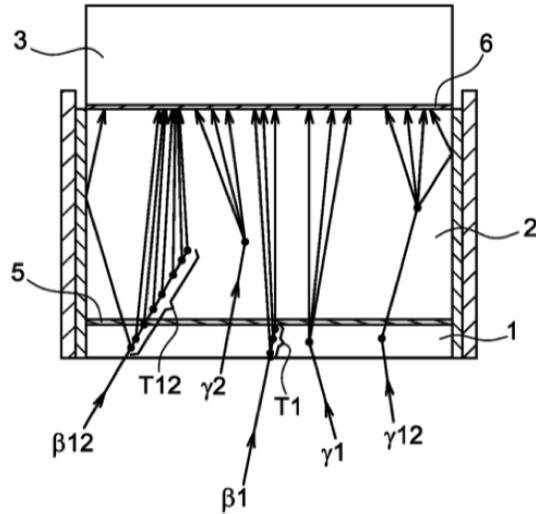
FIGURE 2.3: Exemples de situations où l'intervenant réalise un contrôle de non-contamination. En haut à gauche l'intervenant contrôle ses chaussures, puis en haut à droite il contrôle un objet. En bas à gauche un intervenant contrôle les gants d'un collègue. Enfin en bas à droite, exemple d'un poste de travail dédié à la mesure de contamination [40].

Lorsqu'une mesure de contamination  $\beta$  surfacique dans une ambiance  $\gamma$  importante est réalisée via l'utilisation d'un scintillateur de type Phoswich couplé à un photomultiplicateur, plusieurs cas de figure sont envisageables. Les rayonnements ionisants peuvent interagir :

- dans le premier scintillateur uniquement, c'est le cas pour les événements  $\beta_1$  (dont la trajectoire est notée  $T_1$  sur la figure 2.4) et les événements  $\gamma_1$ ,
- dans le premier et le deuxième scintillateur, c'est le cas pour les événements  $\beta_{12}$  (trajectoire  $T_{12}$ ) et les événements  $\gamma_{12}$ ,
- dans le deuxième scintillateur uniquement, c'est le cas pour les événements  $\gamma_2$ ,

Ces 5 types d'évènements vont engendrer 3 types de signaux qui auront des propriétés temporelles dépendantes des propriétés intrinsèques des scintillateurs où le rayonnement a déposé de l'énergie.

Ces trois types de signaux sont notés  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_1 + S_2$ , ils sont représentés sur la figure 2.2. Le signal  $S_1$  est court, il est produit par les événements  $\gamma_1$  et  $\beta_1$ . Le signal  $S_2$  est long, il est produit par les événements  $\gamma_2$ . Enfin le signal  $S_1 + S_2$  est une combinaison des deux types de signaux, il est produit par les événements  $\gamma_{12}$  et  $\beta_{12}$ .



1 : Scintillateur "rapide", 2 : Scintillateur "lent", 3 : Photomultiplicateur, 5 : Zone morte inter-scintillateur, 6 : Couplage Scintillateur/Photomultiplicateur.

FIGURE 2.4: Récapitulatif des interactions  $\beta$  et  $\gamma$  possibles dans un scintillateur Phoswich tel que celui développé par le CEA List et EDF R&D [41].

La discrimination des différents évènements est réalisée via l'utilisation d'un procédé de traitement du signal qui, tout comme le scintillateur lui même, a fait l'objet d'un dépôt de brevet [41]. Ce procédé comporte 5 étapes.

La première étape consiste à la numérisation complète du signal. Cette étape vise à prendre connaissance de deux paramètres qui sont l'amplitude du signal  $A$  et la surface intégrale du signal noté  $S$  telle que déterminée par l'équation 2.1.1.

$$S = \frac{1}{\tau_0} \int_0^t S_N(\tau) d\tau \quad (2.1.1)$$

où,  $\tau_0$  est une constante d'intégration déterminée lors d'une étape d'étalonnage. Pour simplifier la compréhension nous pouvons prendre  $\tau_0 = 1$  pour cet exemple.

La deuxième étape est la réalisation de calculs pour chaque évènement en utilisant les paramètres  $A$  et  $S$  déterminés dans la première étape. Ces calculs permettent d'obtenir deux valeurs  $S_1$  et  $S_2$  qui sont respectivement déterminés par les formules 2.1.2 et 2.1.3.

$$S_1 = \left[ \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \right] \left[ A \left( \frac{\tau_2}{\tau_0} \right) - S \right] \quad (2.1.2)$$

$$S_2 = \left[ \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \right] \left[ S - A \left( \frac{\tau_1}{\tau_0} \right) \right] \quad (2.1.3)$$

où :

—  $\tau_0$  est la constante d'intégration présentée dans l'équation 2.1.1,

- $\tau_1$  est la contante de décroissance d'un signal issu du scintillateur "rapide" (noté 1 dans la figure 2.4),
- $\tau_2$  est la constante de décroissance d'un signal issu du scintillateur "lent" (noté 2 dans la figure 2.4).

La troisième étape du procédé est le placement dans le repère  $(S_1, S_2)$  du résultat obtenu pour chaque évènement. Un exemple de repère est donné figure 2.5. Nous pouvons voir apparaître 4 zones d'intérêt notées  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ , et  $Z_4$ .

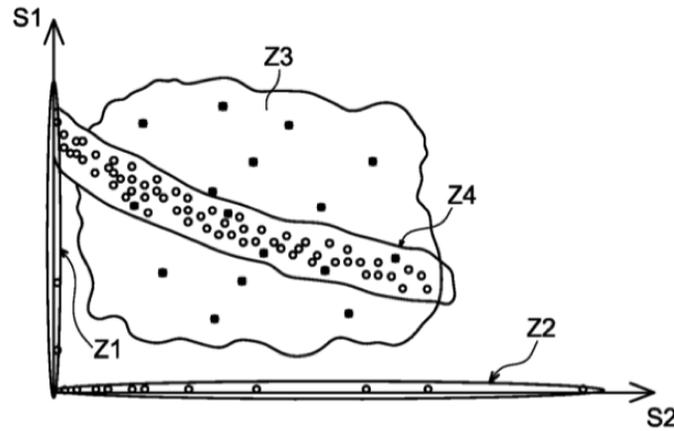


FIGURE 2.5: Illustration de distribution d'évènements dans le repère  $(S_1, S_2)$  [41].

La zone  $Z_1$  positionnée le long de l'axe  $S_1$  représente les évènements  $\gamma_1$  et  $\beta_1$ . La zone  $Z_2$  positionnée le long de l'axe  $S_2$  représente les évènements  $\gamma_2$ . La zone  $Z_3$  présente dans l'ensemble du repère  $(S_1, S_2)$  représente les évènements  $\gamma_{12}$ . Enfin, la zone  $Z_4$  distribuée dans l'ensemble du repère  $(S_1, S_2)$  sous la forme d'une bande dont l'extrémité touche l'axe  $S_1$  représente les évènements  $\beta_{12}$ .

La zone d'intérêt dans l'étude du CEA List et EDF R&D est la zone  $Z_4$ . La quatrième étape du procédé est une étape de délimitation de la zone  $Z_4$ . Cette étape doit être réalisée en amont lors d'un étalonnage préliminaire avec plusieurs sources connues de natures différentes. Cet étalonnage consiste à effectuer une acquisition avec une source  $\beta$  pure (Chlore 36 par exemple). Lorsque le repère  $(S_1, S_2)$  sera tracé, les évènements seront principalement de type  $\beta_{12}$  et il sera donc possible de délimiter la zone  $Z_4$ . La délimitation se fera en mettant des bornes supérieures et inférieures sur les valeurs de  $S_1$  et  $S_2$ .

Une fois la zone  $Z_4$  délimitée l'étape 5 consistera à compter les évènements issus de cette zone d'intérêt. Une dernière étape pourra être la soustraction d'une partie de bruit de fond (BdF) qui aura pu être déterminée également lors d'un étalonnage préliminaire.

A l'heure actuelle les résultats communiqués par EDF R&D et le CEA List [40] indiquent que la solution du Phoswich choisie dans leur étude ne satisfait pas les objectifs fixés. Pour rappel, les objectifs étaient de mesurer une contamination surfacique  $\beta$  de l'ordre de quelques  $Bq/cm^2$  (typiquement  $4 Bq/cm^2$ ) dans une ambiance  $\gamma$  de plusieurs dizaines de  $\mu Sv/h$  (typiquement  $30-40 \mu Sv/h$ ) avec un temps de mesure ne dépassant pas quelques secondes.

### 2.1.3 Avantages et inconvénients des solutions existantes

Les mesures de contamination surfacique  $\beta$  peuvent être réalisées à l'aide d'une multitude d'appareils. Comme nous avons pu le constater dans les chapitres précédents, les solutions existantes sont nombreuses et sont issues de toutes les familles de détecteurs disponibles dans le domaine de la mesure nucléaire. Les solutions techniques les plus utilisées sont les compteurs gazeux (en mode Geiger Müller), les sondes à scintillation et parfois un couplage de plusieurs de ces technologies. Les différentes techniques de mesure énumérées dans ce paragraphe seront développées plus en détail dans la partie suivante.

Technologies	Compteurs Gazeux - GM	Sonde à scintillation classique	Sonde à scintillation Phoswich (PMT)
Les atouts	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité aux rayonnements <math>\gamma</math> inférieure aux énergies détectées par les autres familles de détecteurs.</li> <li>- Faible coût de mise en oeuvre</li> <li>- Détection de rayonnements <math>\beta</math> de faible énergie (<math>&gt; 30</math> keV)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps mort faible (inférieur à la <math>\mu</math>s)</li> <li>- Surface de détection libre                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- La fenêtre d'entrée en Mylar<sup>®</sup> peut être changée facilement (coût de maintenance réduit)</li> <li>- La sensibilité aux rayonnements <math>\gamma</math> peut être diminuée en modifiant le volume du scintillateur (épaisseur et surface)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- idem Sonde à scintillation classique</li> <li>- La sensibilité aux rayonnements <math>\gamma</math> inférieure à celle des sondes à scintillation classique</li> </ul>
Les points faibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'avoir une fenêtre d'entrée très fine et fragile en mica</li> <li>- Les GM Pancake sont limités en taille et les détecteurs vendus dans le commerce font environ <math>15</math> cm<sup>2</sup></li> <li>- Temps mort élevé (quelques dizaines de <math>\mu</math>s)</li> <li>- Nécessite l'utilisation d'une haute tension (HT)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût de la mise en oeuvre élevée</li> <li>- Détection de rayonnement <math>\beta</math> de faible énergie moins performante que les GM</li> <li>- Nécessité d'alimenter avec une haute tension (HT) élevée                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragilité des photomultiplicateurs (PMT) en cas de chute</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Idem Sonde à scintillation classique</li> <li>- Nécessité d'utiliser un système d'acquisition complexe de numérisation du signal</li> <li>- La présence d'une zone morte à la jonction entre les deux scintillateurs du Phoswich dégrade la précision de la mesure</li> </ul>

TABLE 2.2: Résumé des avantages et inconvénients de chaque famille de détecteurs dans le cadre de mesure de contamination surfacique  $\beta$  dans une ambiance  $\gamma$  importante.

Dans le tableau 2.2, il est entendu par "sonde à scintillation classique" un détecteur mettant en oeuvre un couplage entre un scintillateur organique de quelques millimètres d'épaisseur (typiquement 3 mm) et un photomultiplicateur (PMT).

Afin de résumer les différents atouts et points faibles de chaque technologie nous proposons de les lister dans le tableau 2.2. Au-delà des caractéristiques physiques, il faut également prendre en compte des considérations pratiques. Ces appareils sont utilisés sur des chantiers, par des intervenants n'étant pas spécialistes du domaine. Les appareils doivent donc prendre en compte des problématiques d'ergonomie (taille et poids), d'utilisabilité (appareils simples et fonctionnels en toutes conditions) et de robustesse (utilisation sur chantier).

En conclusion, les GM Pancake disponibles dans le commerce sont la solution économique la plus intéressante. Toutefois, ces derniers sont trop sensibles au BdF  $\gamma$  pour être utilisés dans des ambiances importantes et fluctuantes. De plus les GM Pancake étant composés d'une cloche épaisse en acier, leur sensibilité  $\gamma$  n'est plus aussi compétitive en comparaison avec les autres familles de détecteurs. Leur faible zone de détection est également un point faible important car dans l'hypothèse où nous sélectionnerions cette solution, nous devrions utiliser sept GM Pancake afin d'obtenir la surface minimale que nous nous sommes fixée, pour rappel 100 cm<sup>2</sup>minimum.

Les sondes à scintillation (PMT + scintillateur organique) classiques telles qu'elles sont proposées sur le marché sont trop sensibles au BdF  $\gamma$  élevé et fluctuant. Toutefois, la zone de détection importante et la possibilité d'être libre de modifier le volume et la forme générale du scintillateur en font pour l'instant un candidat intéressant.

Enfin, l'utilisation d'un scintillateur de type Phoswich semble être également intéressante car elle permet de diminuer la sensibilité  $\gamma$  qui est un point faible des sondes à scintillation classiques mais elle nécessite l'utilisation d'un scintillateur épais (épaisseurs typiques respectives supérieures au millimètre et de l'ordre du centimètre) [41]. L'utilisation d'un scintillateur de cette épaisseur entraînera un taux de comptage important lorsqu'il sera utilisé dans une ambiance  $\gamma$  importante. Il faudra déterminer si l'augmentation de la sensibilité  $\gamma$  est compensée par l'utilisation du Phoswich.

## 2.2 Les techniques de mesure utilisées

La détection de la radioactivité par le biais de la scintillation a été la première à voir le jour. Très tôt, dès 1903, la scintillation a été mise en évidence par Friederich Oskar Giesel [45] qui a observé la fluorescence du sulfure de zinc (ZnS) en exposant de la sphalérite à la radioactivité  $\alpha$ . A l'époque, la détection du phénomène reposait sur l'oeil du chimiste qui remarqua une émission lumineuse discontinue [46]. Rapidement Sir William Crookes proposa d'associer une lentille à un écran de ZnS afin d'observer le phénomène. Le premier "compteur" à scintillation était né, il s'agit du spinthariscopescope [47]. Les premiers photomultiplicateurs seront inventés plus tard au milieu des années 1930. Quant au compteur Geiger-Müller, son principe fut imaginé vers 1913 par Hans Geiger mais ne fut mis au point qu'en 1928 avec le concours de Walther Müller.

Ce point historique nous montre que les solutions découvertes et imaginées au début du XX<sup>ème</sup> siècle sont toujours d'actualité cent ans plus tard. Les avancées technologiques, notamment en électronique, nous ont permis de perfectionner ces solutions qui restent toutefois basées sur les mêmes principes.

### 2.2.1 Les compteurs gazeux

Ces détecteurs sont constitués d'une enceinte remplie de gaz et de deux électrodes portées à des potentiels électriques différents. Les rayonnements ionisants qui interagissent avec ce détecteur y laissent toute ou partie de leur énergie. En déposant son énergie le rayonnement ionisant va créer des paires "électron-ion" qui vont ensuite migrer vers les électrodes sous l'effet du champ électrique induit par les électrodes (voir figure 2.6). Le mouvement et la collection de ces charges vont induire un signal électrique qui pourra ensuite être interprété.

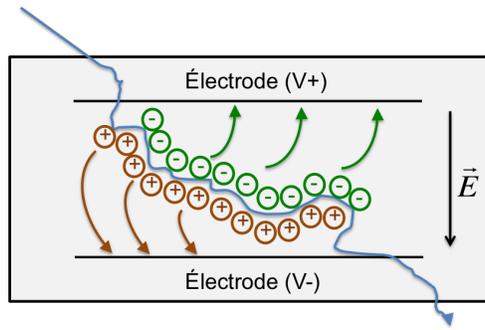


FIGURE 2.6: Mouvements des paires “électron-ion” dans un détecteur gazeux.

L'énergie nécessaire pour créer une paire “électron-ion” diffère suivant la composition du gaz présent dans l'enceinte du détecteur. Cette énergie est de l'ordre de 30 eV pour les principaux gaz utilisés (voir tableau 2.3). Elle dépend très peu de la nature et de l'énergie des rayonnements ionisants.

Gaz	Electrons	Particules $\alpha$
Ar	27,0	25,9
He	32,5	31,7
H <sub>2</sub>	38,0	37,0
N <sub>2</sub>	35,8	36,0
Air	35,0	35,2
O <sub>2</sub>	32,2	32,2
CH <sub>4</sub>	30,2	29,0

TABLE 2.3: Energie moyenne  $W$  de création d'une paire “électron-ion” dans différents gaz (en eV/paire) [48].

Le nombre moyen de paires “électron-ion” créées lorsque qu'une particule chargée dépose de l'énergie dans le détecteur est égal au quotient de l'énergie déposée sur l'énergie moyenne de création  $W$ .

### Les différents régimes de fonctionnement

La famille des détecteurs gazeux peut être décomposée en plusieurs catégories qui traduisent plusieurs régimes d'utilisation. Les différents régimes de fonctionnement dépendent notamment de la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes du détecteur. Nous pouvons citer trois régimes de fonctionnement utilisés dans le domaine de la détection de rayonnement ionisant : **les chambres à ionisation**, **les compteurs proportionnels** et **les compteurs Geiger-Müller**.

Nous pouvons voir sur la figure 2.7 l'évolution de l'amplitude du signal en fonction de la tension appliquée aux bornes du détecteur gazeux. Au delà des trois principaux régimes de fonctionnement nous pouvons observer la présence de 6 zones distinctes.

La zone ① est appelée régime de recombinaison ( $V < V_0$ ), c'est une région qui n'est pas utilisable pour la détection. La tension appliquée aux bornes du détecteur est faible, le champ électrique induit

est également trop faible pour mettre en mouvement les paires "électron-ion" produites. La quasi-totalité des charges générées se recombine avant d'atteindre les électrodes.

La zone ② est appelée régime chambre d'ionisation ( $V_0 < V < V_P$ ), elle est atteinte à partir d'une certaine tension notée  $V_0$  qui dépend des caractéristiques du détecteur (géométrie et nature du gaz notamment). A partir de cette tension, le champ électrique est suffisant pour permettre à toutes les charges générées d'être collectées. Dans cette zone, les amplitudes des signaux lues (en mode impulsion) sont donc indépendantes de la tension appliquée. Les amplitudes de signaux sont proportionnelles à l'énergie déposée par le rayonnement incident. Ce régime a comme avantage d'être très stable et d'être adapté à la spectrométrie. Son inconvénient majeur est qu'il génère des signaux très faibles de l'ordre de quelques  $\mu V$ . Ces signaux nécessitent la présence de modules d'amplification et de filtrage performants.

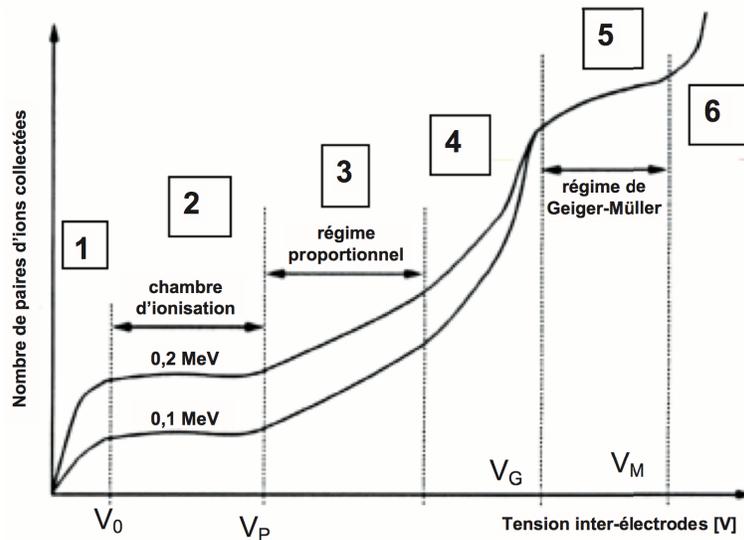


FIGURE 2.7: Variation de l'amplitude d'impulsion (nombre de charges collectées) en fonction de la tension appliquée aux bornes d'un détecteur gazeux [49]

La zone ③ est appelée régime proportionnel ( $V > V_P$ ), dans cette zone le champ électrique  $\vec{E}$  est plus élevé que dans la zone ②. Ce champ va davantage accélérer les charges créées par le rayonnement incident. Ces charges vont acquérir des énergies cinétiques suffisantes pour devenir à leur tour des particules ionisantes. Cette multiplication des charges (ou avalanches de Townsend) par un facteur d'amplification dépend de la tension appliquée aux bornes du détecteur. Le signal reste proportionnel au nombre de paires "électron-ion" générées par les rayonnements ionisants initiaux. Ce régime de fonctionnement a comme avantage de générer des signaux d'une amplitude suffisamment grande pour être mesurable directement. Son inconvénient majeur est qu'il nécessite l'utilisation d'une alimentation haute tension très stable afin de préserver la proportionnalité entre la quantité de charges générées et le nombre de paires "électron-ion" créées.

La zone ④ est appelée régime semi-proportionnel. Ce régime est peu utilisé dans le domaine de la détection de rayonnements ionisants. Lorsqu'on augmente la tension d'alimentation du détec-

teur au dessus d'un certain seuil on sort de la zone ③ de proportionnalité. En effet, l'augmentation du champ électrique  $\vec{E}$  va générer comme dans le cas du régime proportionnel une importante quantité d'ionisations secondaires. Ces dernières vont entraîner la présence importante d'ions, assez pour qu'apparaisse une charge d'espace. Cette charge d'espace va induire une diminution du champ électrique  $\vec{E}$  et donc diminuer les amplitudes des signaux mesurées. Il se produit également d'autres phénomènes secondaires qui vont avoir pour conséquence l'augmentation de l'amplitude des impulsions mesurées.

La zone ⑤ est appelée régime Geiger-Müller ( $V_G < V < V_M$ ). À partir d'une tension seuil  $V_G$  les effets de charges d'espaces limitent les avalanches électroniques. L'amplitude des signaux générés ne dépend plus du nombre de paires "électron-ion" formées lorsque les rayonnements ionisants initiaux ont déposé de l'énergie dans le détecteur. L'amplitude des signaux sera la même quelle que soit l'énergie déposée et la nature du rayonnement incident, c'est pour cela que ce régime de fonctionnement est seulement utilisé pour réaliser du comptage de particules.

Enfin, la zone ⑥ est appelée régime de décharge ( $V > V_M$ ). Après la zone relativement plane du régime GM (Geiger-Müller), le détecteur entre dans une zone d'instabilité et il se produit des décharges électriques permanentes.

### Le régime de fonctionnement Geiger-Müller

Dans le domaine de la mesure de contamination surfacique, les détecteurs gazeux sont généralement utilisés en mode Geiger-Müller. Ce choix est effectué en grande partie car la haute tension utilisée n'a pas besoin d'être extrêmement stable puisque nous sommes sur un plateau (zone ⑤ de la figure 2.7) de plusieurs dizaines de volts. Ce comportement permet donc l'utilisation d'une électronique plus simple, plus facilement industrialisée et réglée. Ce mode de fonctionnement mérite donc d'être approfondi.

Comme nous l'avons vu précédemment, lorsqu'un détecteur gazeux est utilisé en mode Geiger-Müller, la quantité de charges collectées aux bornes du détecteur n'est plus proportionnelle au nombre de paires "électron-ion" créées. La quantité de charges collectées est quasiment la même, quelle que soit la quantité d'énergie déposée par le rayonnement ionisant incident.

Les rayonnements ionisants incidents peuvent être de différentes natures. Cela peut être, par exemple, une particule  $\alpha$ , un électron issu d'une décroissance  $\beta$  ou un électron issu de l'interaction d'un rayonnement X ou  $\gamma$  avec les parois du détecteur gazeux. Lorsqu'une des particules citées précédemment pénètre et ionise le gaz présent dans le détecteur elle crée un certain nombre de paires "électron-ion". Les électrons issus de ces paires "électron-ion" vont à leur tour pouvoir ioniser le gaz du détecteur (avalanches de Townsend). Ces phénomènes sont les mêmes que ceux observés dans le régime proportionnel, à la différence qu'ici ils sont d'une intensité bien plus importante. Ces avalanches produisent également des photons de désexcitation qui vont propager la décharge de proche en proche sur toute la longueur de l'anode. La propagation se fait par photo-ionisation dans le gaz et par effet photoélectrique sur la cathode (voir figure 2.8).

Pendant que les électrons des paires "électron-ion" se mettent en mouvement et créent des avalanches de Townsend, les ions beaucoup plus lourds se déplacent plus difficilement sous l'effet du champ électrique. La présence d'ion devient de plus en plus importante à mesure que les avalanches se propagent. La décharge finit par s'arrêter car l'accumulation des ions induit la présence d'une importante charge d'espace qui fait baisser le champ  $\vec{E}$  et donc le coefficient de multiplication.

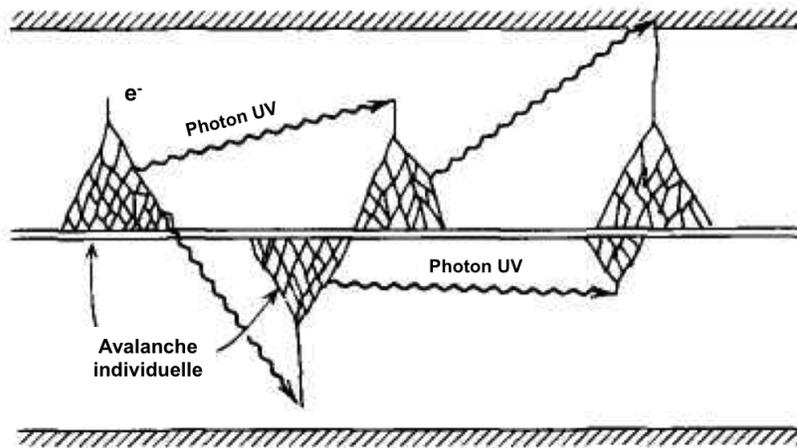


FIGURE 2.8: Mécanismes de propagation des avalanches électroniques primaires (régime GM) [15].

Afin de limiter ces phénomènes de multiplication d’avalanche, les constructeurs de détecteurs gazeux ajoutent au gaz initial un deuxième composant dit gaz de “quenching”. Actuellement ces gaz sont souvent des halogènes (chlore ou brome). Lors des différentes avalanches, les charges peuvent également interagir avec ce gaz en dissociant les molécules qu’elles forment (le chlore et le brome gazeux sont en réalité di-atomiques tout comme l’oxygène et ils sont notés  $\text{Cl}_2$  et  $\text{Br}_2$ ). L’utilisation d’halogène permet d’allonger la durée de vie des GM car les atomes composant les molécules du gaz de quenching vont être dissociés, mais ils se reformeront spontanément.

Finalement, les avantages des compteurs gazeux en mode GM sont qu’ils sont robustes, facilement réalisables et peu coûteux. Leurs inconvénients sont qu’ils sont lents (temps mort de plusieurs dizaines de  $\mu\text{s}$ ), n’ont pas de résolution en énergie et nécessitent l’utilisation d’une entrée fine et fragile pour la détection  $\alpha$  et  $\beta$  [50].

### Le design de type Pancake

La mesure de contamination surfacique reposant sur la mesure de rayonnement  $\beta$ , il est nécessaire d’utiliser une fenêtre d’entrée mince sur les détecteurs gazeux. Les corps des GM classiques étant en acier, les électrons issus des rayonnements  $\beta$  sont immédiatement stoppés.

La solution la plus souvent retenue est l’utilisation d’une géométrie appelée “Pancake” (voir figure 2.9). Ce design permet de mesurer des échantillons au contact dans un angle solide proche de  $2\pi$  [15]. Il est composé d’un corps en acier qui a la forme d’une cloche et d’une fenêtre d’entrée fine et plane généralement composée de mica. L’épaisseur de cette fenêtre conditionne la bonne détection des rayonnements  $\beta$  et nous pouvons voir dans la figure 2.10 l’impact de l’épaisseur de la fenêtre d’entrée sur l’absorption des particules  $\beta$ .

Ces GM Pancake sont les détecteurs utilisés dans le Dolphy  $\beta$  de la société Carmelec présentés plus tôt dans ce chapitre ainsi que dans plusieurs appareils équivalents (MiniTrace  $\beta$  de Saphymo,...). C’est aussi ce type de détecteur qui équipe les sondes SBM2D de Canberra qui sont employées, à l’heure actuelle, sur le parc EDF en sortie de chantier et en sortie de zone contrôlée.

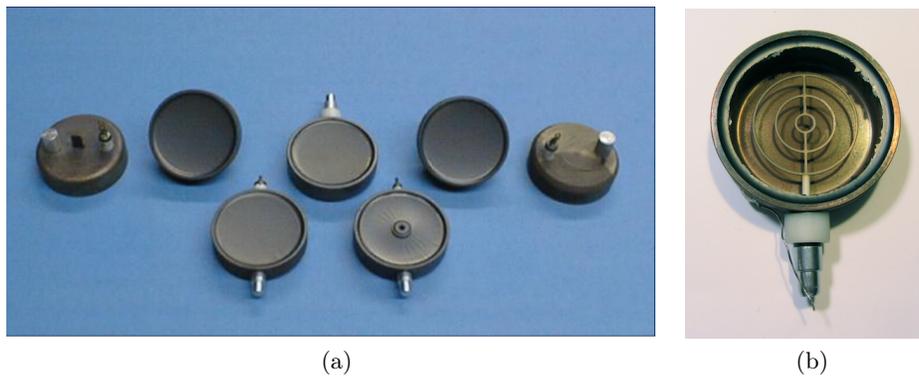


FIGURE 2.9: Plusieurs types de GM Pancake distribués par LND Inc. [51] (a). Exemple de forme d'anode utilisée dans les GM Pancake (b).

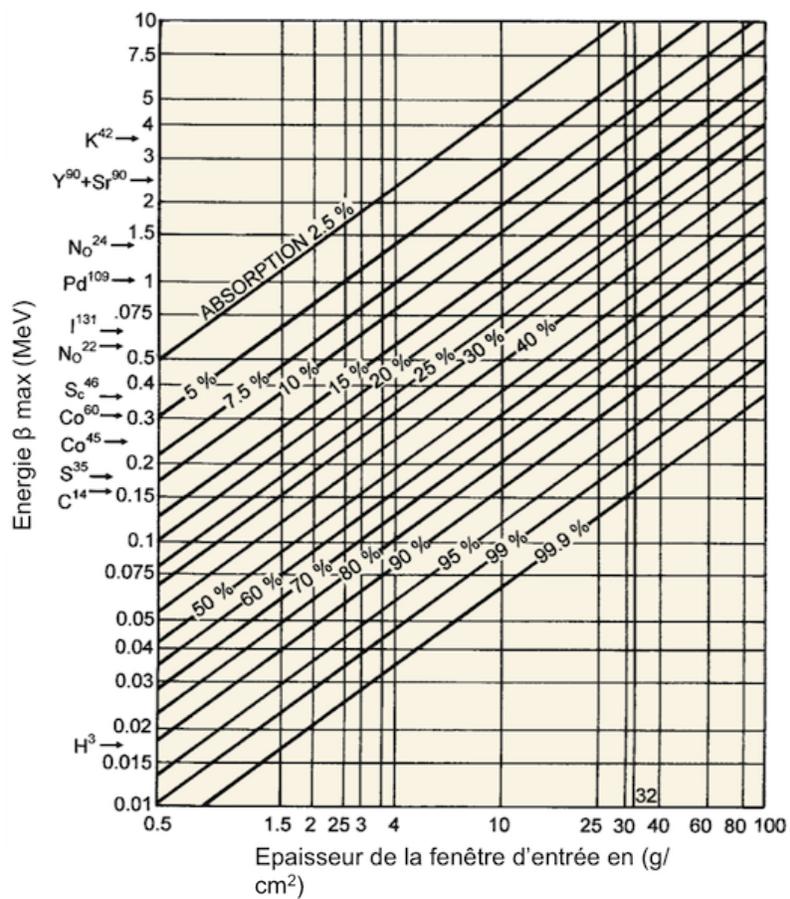


FIGURE 2.10: Variation du pourcentage d'absorption  $\beta$  (pour plusieurs radionucléides) en fonction de l'épaisseur de la fenêtre de mica (en g/cm<sup>2</sup>) [52].

### 2.2.2 Les détecteurs à scintillation

Le principe de fonctionnement des détecteurs à scintillation repose sur une propriété qu'ont certains matériaux d'émettre de la lumière lorsque des rayonnements ionisants interagissent avec eux. Ces matériaux sont appelés scintillateurs. Lorsque des rayonnements ionisants interagissent dans un scintillateur, ils communiquent leur énergie en excitant les atomes et molécules composant le matériau scintillant. Une petite partie de cette énergie sera ré-émise sous forme de photons via des processus de fluorescence et de phosphorescence. Ces derniers sont consécutifs de la désexcitation des atomes et molécules du scintillateur.

Les détecteurs à scintillation sont généralement composés de deux modules. Un premier module appelé "milieu détecteur" convertit l'énergie déposée par les rayonnements incidents en rayonnements lumineux de faible intensité. Ce dernier est couplé à un deuxième module appelé "Photomultiplicateur". Le couplage est réalisé avec de la graisse ou du ciment optique. Le photomultiplicateur a deux objectifs importants : transformer le signal lumineux en électrons puis d'amplifier ce signal afin de le rendre mesurable. Le principe de fonctionnement de ces deux blocs constituant un détecteur à scintillation est présenté dans la figure 2.11.

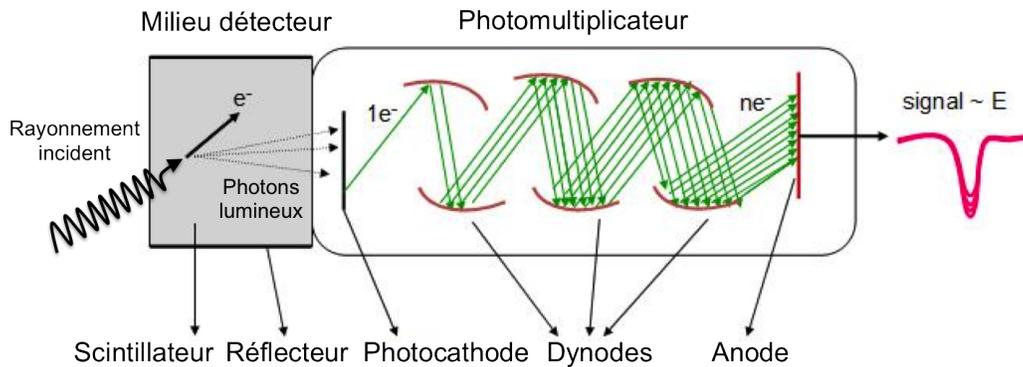


FIGURE 2.11: Principe de fonctionnement d'un détecteur à scintillation avec un photomultiplicateur.

#### Milieu détecteur : scintillateurs organiques et inorganiques

Le milieu détecteur a deux buts : générer des photons et les propager jusqu'au détecteur de lumière (photomultiplicateur ou autres). Comme précisé dans la partie précédente, la génération de lumière est assurée par le scintillateur. Il existe deux grandes familles de scintillateurs : les scintillateurs organiques et les scintillateurs inorganiques. La différence entre ces deux types de scintillateurs réside dans les mécanismes de radioluminescence qu'ils mettent en jeu. La présence de ces mécanismes distincts émane des compositions atomiques ou moléculaires des scintillateurs.

Un scintillateur, organique ou inorganique, doit répondre à un certain nombre de caractéristiques afin d'assurer la génération et la propagation de la lumière qu'il produit. Les quatre principales caractéristiques sont :

- le matériau utilisé doit avoir une bonne efficacité de scintillation  $\eta$ , il s'agit du nombre de photons lumineux générés par unité d'énergie absorbée. Pour le CsI(Tl) qui est un scintillateur

organique  $\eta_{\text{CsI(Tl)}} = 52\ 000$  photons/MeV, pour un scintillateur plastique comme le EJ-212 l'efficacité de scintillation  $\eta_{\text{EJ-212}} = 10\ 000$  photons/MeV.

- le matériau doit être transparent à sa propre longueur d'onde de fluorescence afin de ne pas atténuer le signal lumineux de manière trop importante.
- afin d'assurer un bon couplage avec le détecteur de lumière (qui pourra être un photomultiplicateur) l'indice optique du matériau devra être proche de celui du verre (à savoir 1,5 environ).
- le matériau scintillant doit avoir la durée d'émission (de sa lumière de scintillation) la plus faible possible. Ceci garantit la bonne résolution temporelle du signal.

### Les scintillateurs inorganiques

Parmi les scintillateurs inorganiques nous pouvons citer les cristaux alcalins halidés dopés comme le NaI(Tl) et le CsI(Tl). Nous pouvons également trouver des cristaux non alcalins comme le BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ), le ZnS ou le BaF<sub>2</sub>. Ces scintillateurs ont la particularité d'avoir des densités élevées (typiquement comprises entre 3,6 et 7,9  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) et des rendements de scintillation importants de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de photons/MeV.

Le fonctionnement d'un scintillateur inorganique peut être assimilé à celui d'un semi-conducteur, de part sa structure cristalline. Cette structure confère aux électrons des niveaux d'énergie en bandes séparées par des intervalles de niveaux interdits. Dans les scintillateurs inorganiques la bande interdite qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est de quelques eV. L'interaction de rayonnements ionisants dans le cristal va provoquer des transitions entre les deux bandes, conduisant à la formation de paires "électron-trou".

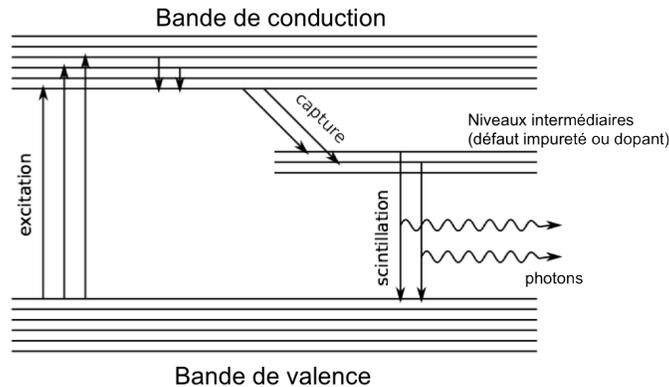


FIGURE 2.12: Schéma du processus de luminescence dans un scintillateur cristallin inorganique.

Les impuretés, les défauts ponctuels du cristal (déformation, lacune, ...) ainsi que la présence de dopant (comme le thalium) ajoutent des niveaux d'énergie intermédiaire dans la bande interdite. Lorsque les paires "électron-trou" sont créées, les électrons se propagent dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence jusqu'à ce qu'ils soient piégés sur ces niveaux intermédiaires. La transition d'un électron du niveau excité au niveau fondamental se traduit par l'émission d'un photon (voir figure 2.12). L'énergie des photons émis étant nécessairement inférieure à celle de la bande interdite, il pourra donc se propager facilement dans le scintillateur avec une probabilité d'auto-absorption faible [53].

## Les scintillateurs organiques

Les scintillateurs organiques peuvent être classés en trois sous-familles : les cristaux organiques (comme l'anthracène ou la naphthaline), les liquides organiques constitués d'un solvant (comme le toluène ou le benzène) et d'un soluté (comme le p-Terphénil, le PBD, le PPO ou le POPOP) et les plastiques également composés d'un solvant (comme le polyvinyletoluène (PVT) ou le polystyrène (PS)) et d'un ou plusieurs solutés (comme le p-Terphénil, le PBO ou le POPOP) [54].

Les mécanismes de radioluminescence mis en jeu dans les scintillateurs organiques sont différents de ceux mis en jeu pour leurs homologues inorganiques. L'émission radiative n'est plus provoquée par l'excitation puis désexcitation d'atomes mais par celles de molécules. Plus précisément, il s'agit de composés aromatiques formés à partir du cycle benzénique. L'émission radiative est consécutive à l'excitation des électrons délocalisés (électrons  $\pi$ ) suivie de leur désexcitation très rapide (de l'ordre de la nanoseconde) qui est accompagnée d'un phénomène de fluorescence (voir figure 2.13).

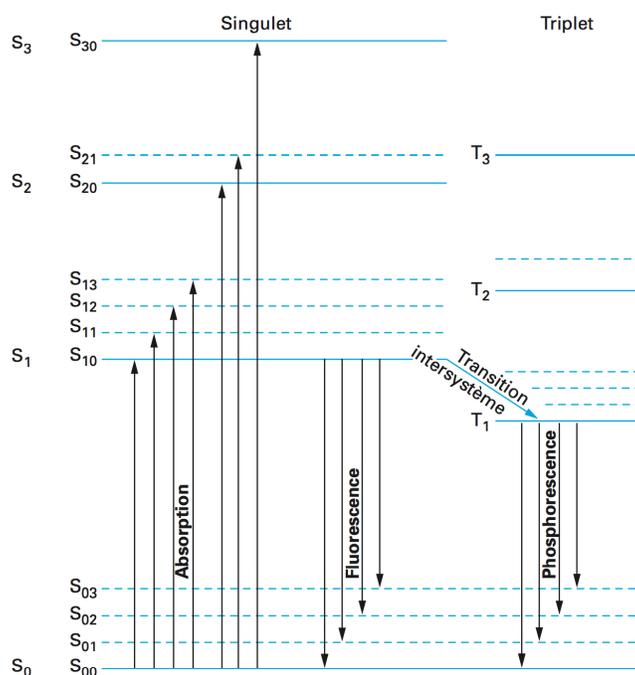


FIGURE 2.13: Diagramme de Jablonski représentant les transitions entre états moléculaires excités correspondant aux absorptions et émissions de lumière par une molécule organique [48].

Ces transitions ont lieu entre les états singulets  $S_{ij}$  où  $i$  représente l'excitation électronique ( $\Delta E \sim 1eV$ ) et  $j$  l'excitation vibrationnelle ( $\Delta E \sim 0,1eV$ ). L'excitation rotationnelle est négligée car elle intervient à des niveaux d'énergie bien inférieurs à ceux des excitations électroniques et vibrationnelles ( $\Delta E \sim 0,01eV$ ).

Lors d'une transition depuis son état fondamental  $S_{00}$  vers des niveaux d'excitation électronique supérieurs, par exemple  $S_{1j}$ , la désexcitation s'établit ensuite en plusieurs étapes :

- le niveau vibrationnel peuplé est majoritairement un niveau excité ( $j \neq 0$ ), il se produit donc tout d'abord une relaxation vibrationnelle très rapide de l'ordre de la picoseconde vers l'état vibrationnel fondamental  $S_{10}$ ,

- cette relaxation est suivie par la désexcitation électronique par fluorescence, phénomène rapide de l'ordre de la nanoseconde,
- ce retour à l'état fondamental  $S_{0j}$  se fait généralement vers un état vibrationnel excité ( $j \neq 0$ ), il est donc accompagné d'une deuxième relaxation vibrationnelle.

Notons que si le niveau d'excitation électronique avait été supérieur à 1, par exemple  $S_{2j}$ , une étape supplémentaire de conversion interne non radiative aurait eu lieu vers le niveau d'excitation électronique  $S_{1j}$ . Le processus aurait ensuite suivi les étapes énumérées précédemment.

Les pertes d'énergie (non radiatives), lors des relaxations vibrationnelles, induisent une différence entre l'énergie rayonnée et l'énergie absorbée. En effet, l'énergie rayonnée est plus faible que l'énergie absorbée, ce phénomène, appelé aussi décalage de Stokes, est à l'origine de la transparence du scintillateur à la lumière émise par luminescence [55].

Autre phénomène possible, un état singulet excité peut passer vers un état triplet. Ce processus est appelé transition intersystème. Il implique un changement de spin et il est favorisé en présence d'atomes lourds par couplage spin-orbite. Les transitions  $T_{10} \rightarrow S_{00}$  étant interdites par les règles de sélection de spin, la désexcitation des états triplets se fait par collision moléculaire. Cette étape induit un retard de quelques microsecondes sur la transition, on parle dans ce cas de fluorescence retardée. Ce retard peut aussi être plus long et durer quelques secondes, on parle alors de phosphorescence.

Enfin, l'énergie d'excitation d'un état singulet peut également être transférée par collision vers une autre molécule, puis se dissiper sous forme non radiative (phonons). Ce cas peut arriver si, par exemple, des impuretés sont présentes dans le scintillateur organique. Ces dernières vont constituer une source de dégradation du rendement lumineux du scintillateur.

Dans le tableau 2.4 sont exposées les principales caractéristiques de scintillateurs organiques et inorganiques.

Type	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Longueur d'onde d'émission (nm)	Décroissance (µs)	Rendement (photons/MeV)	Hygroscopie
scintillateurs inorganiques					
NaI(Tl)	3,67	415	0,23	38000	Oui
CsI(Tl)	4,51	540	1,0	52000	Faible
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (ou BGO)	7,13	505	0,3	8200	Non
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	5,3	360	0,035	60000	Forte
scintillateurs organiques					
Plastique EJ-212	1,03	423	2,4 ns	10000	Non
Anthracène	1,25	445	30 ns	20000	Non
Stilbène	1,22	390	3,5 ns	14000	Non
p-therphényl	1,23	420	3,7 ns	27000	Non

TABLE 2.4: Principales caractéristiques des scintillateurs organiques et inorganiques les plus utilisés [50, 56].

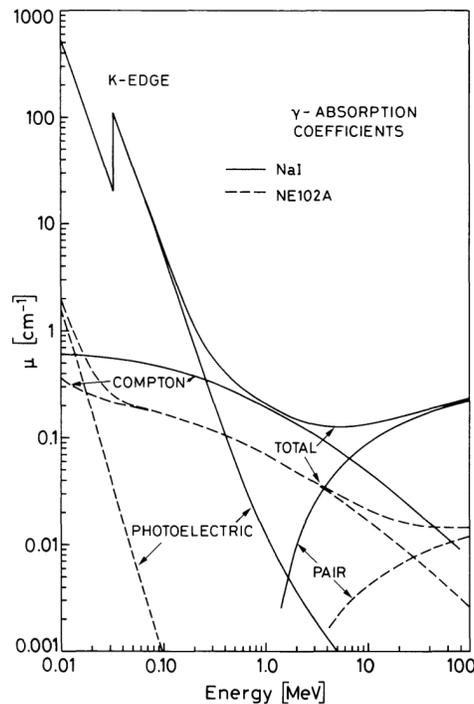


FIGURE 2.14: Variation du coefficient d'absorption total  $\mu$  en fonction de l'énergie des  $\gamma$  incidents pour deux types de scintillateurs [55].

Dans notre contexte d'étude, les scintillateurs utilisés sont des scintillateurs plastiques. Tout comme pour le GM Pancake, les scintillateurs plastiques ont comme avantage d'avoir un coût plus faible que les scintillateurs inorganiques. Autre point positif, les scintillateurs plastiques peuvent être fabriqués facilement en s'adaptant à toutes les demandes relatives à l'encombrement. Il existe des scintillateurs plastiques très volumineux de plus de  $10000 \text{ cm}^3$  mais ces derniers sont aussi disponibles sous forme de film fin de 100 ou 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

L'étude réalisée concerne la mesure de rayonnement  $\beta$  dans une ambiance  $\gamma$  importante. Comme nous l'avons vu précédemment et afin d'effectuer ces mesures, nous avons besoin d'un détecteur le plus insensible possible aux rayonnements  $\gamma$ . Or, les scintillateurs organiques plastiques ont la particularité d'avoir une densité faible, très proche de 1 (par exemple 1,03 pour le scintillateur Eljen EJ-212). Pour les scintillateurs inorganiques, les densités des matériaux utilisés sont souvent beaucoup plus élevées (comprises entre 3,6 et 8 pour les scintillateurs les plus couramment utilisés). Cette différence est importante car, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.14, lorsque nous comparons les scintillateurs NE102A et NaI, leurs coefficients d'absorption  $\gamma$  total varie d'un facteur compris entre 10 et 300 suivant l'énergie du rayonnement  $\gamma$  incident.

Les appareils utilisés pour la mesure de contamination surfacique et, basés sur la technologie de sonde à scintillation sont généralement équipés de scintillateurs plastiques. Ce choix est en grande partie justifié par la possibilité de fabriquer facilement et à faible coût des scintillateurs de grande surface. C'est notamment le cas dans l'appareil COMO 170 vu dans le chapitre précédent. Le phénomène de scintillation et les scintillateurs organiques seront traités plus en détail dans la partie 3.3.1.

## Les photomultiplicateurs

Les photomultiplicateurs font parties des photodétecteurs utilisés dans le domaine du nucléaire au même titre que les SIPMs<sup>6</sup> et les photodiodes (classiques ou à avalanches). Le photomultiplicateur est très souvent utilisé car il est très rapide, son gain est stable, il est peu sensible aux conditions extérieures (avec un blindage en  $\mu$ -métal) et sa photocathode est extrêmement sensible aux photons de scintillation. La lumière créée par le scintillateur doit être transformée en signal électrique et pour cela le photomultiplicateur (appelé aussi PM ou PMT) est couramment utilisé. Les concepteurs et fabricants de photomultiplicateurs (ET Enterprises, Hamamatsu et ADIT sont les plus importants) proposent des modèles de toutes tailles allant de 1/2" (environ 13 mm de diamètre) à 8" (environ 203 mm). Il existe même des PMT beaucoup plus gros, utilisés dans les expériences de physique des particules, comme les expériences Super-Kamiokande [57] ou JUNO [58] qui utilisent des PMT mesurant 20" de diamètre, soit environ 508 mm. Le PM peut être décomposé en 4 parties (voir sur la figure 2.15).

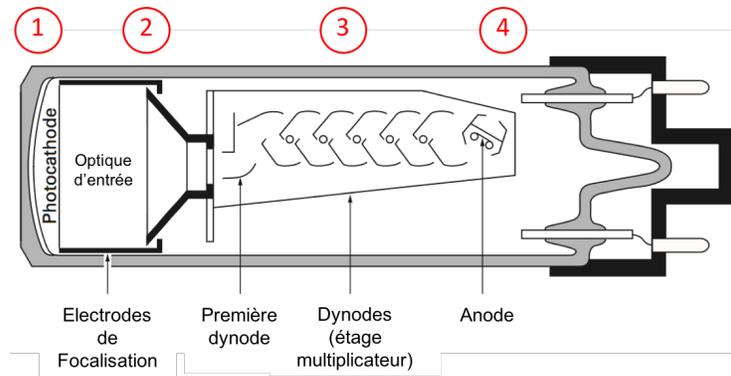


FIGURE 2.15: Schéma de principe d'un photomultiplicateur [50].

Tout d'abord, le photomultiplicateur doit convertir les photons émis par le scintillateur. Cette conversion est assurée par la photocathode ①. La photocathode absorbe les photons en provenance du scintillateur. La photocathode va alors émettre des électrons arrachés par effet photoélectrique. Ce phénomène est facilité par la nature de la photocathode. En effet, cette dernière est composée d'un alliage de métaux alcalins (Na, Rb ou Cs par exemple) et de semi-conducteurs (Sb, Te,...). Les matériaux composés d'un seul alcalin (CsI, CsSb,...) sont sensibles à la lumière dans la gamme des ultraviolets, tandis que les semi-conducteurs à base d'arséniure de gallium (GaInAs par exemple) permettent de détecter des photons dans la gamme des infrarouges. Les alliages bi-alcalins (SbKCs) ou tri-alcalins (SbNaKCs) sont adaptés à la lumière visible (de 300 à 650 nm). Généralement l'efficacité des photocathodes (voir figure 2.16) est de l'ordre de 25 %-30 % pour des photons lumineux de longueur d'onde comprise entre 300 et 450 nm. Cette efficacité représente le ratio entre le nombre d'électrons générés et le nombre de photons lumineux absorbés.

Une fois que les électrons ont été générés il reste à les collecter et pour cela il faut tout d'abord les focaliser et les accélérer. La focalisation et l'accélération des électrons issus de la photocathode sont assurées par des électrodes dédiées ②. Leur rôle est de s'assurer que tous les électrons générés atteignent la première dynode de l'étage de multiplication.

6. SIPM (Silicon PhotoMultiplier) : Dispositif de détection de photon issu de la technologie des APD (Photodiode à avalanche) qui peut remplacer dans certains cas les photomultiplicateurs.

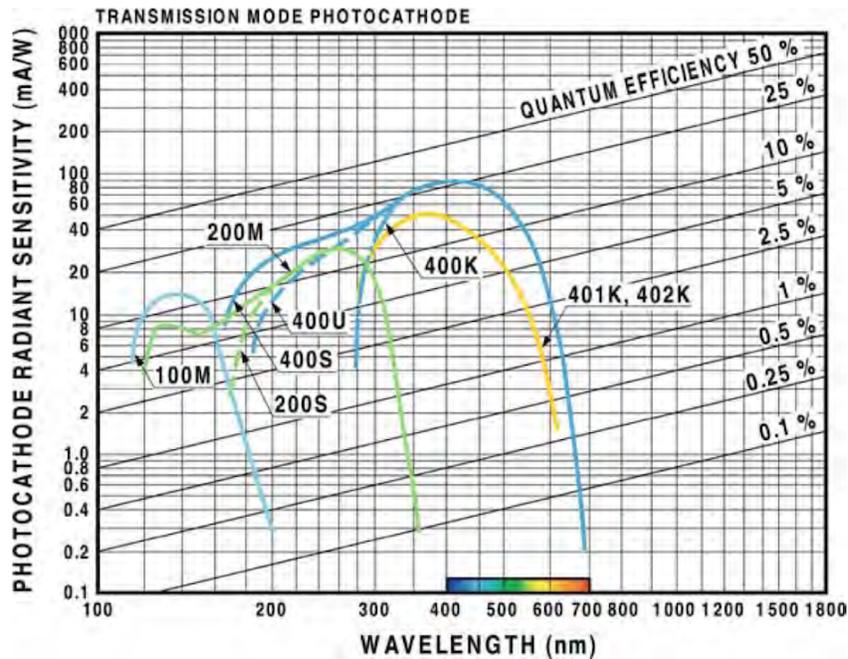


FIGURE 2.16: Exemple de variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs types de photocathodes. Données Hamamatsu [56].

Les électrons atteignant cette première dynode vont ensuite être multipliés par le réseau de dynodes qui compose l'étage de multiplication ③. Les dynodes sont des électrodes composées d'un revêtement qui a pour particularité d'émettre plusieurs électrons secondaires lorsqu'un électron incident rentre en contact avec lui. Généralement pour un électron incident, 2 ou 3 électrons sont émis [15]. Le nombre d'électrons est donc multiplié d'un facteur  $M$ . Le réseau de dynodes est composé de plusieurs étages (typiquement entre 8 et 12). Un potentiel (de l'ordre de la centaine de Volts) est appliqué entre chaque dynode, cela permet de guider et d'accélérer les électrons d'une dynode à l'autre jusqu'à l'anode du PM. Pour un nombre de dynode  $e$ , le gain d'amplification  $G_{amp}$  d'un photomultiplicateur peut être noté  $G_{amp} = (\xi \cdot M)^e$ , où  $\xi$  est l'efficacité de transfert des électrons entre deux dynodes.

Le potentiel entre chaque dynode est appliqué en utilisant un pont diviseur. Le pont diviseur de tension (voir figure 2.17) permet de gérer les tensions appliquées entre chaque dynode. Le pont peut être résistif ou utiliser des diodes Zener. La principale différence entre ces deux composants est la faible consommation induite par l'utilisation des diodes Zener. Les derniers étages du pont diviseur sont également composés de condensateurs qui permettent de maintenir le potentiel appliqué car les derniers étages sont ceux qui drainent le plus d'électrons.

Une fois que les électrons sont passés par l'étage de multiplication du PM, ils se dirigent vers l'anode ④. Si le pont diviseur, le PM et le scintillateur ont été correctement choisis, un signal suffisamment important doit être exploitable en sortie de la chaîne de mesure. Les PMT sont très souvent utilisés dans les appareils de radioprotection couplés à des scintillateurs organiques et/ou inorganiques. Dans le cadre de la mesure de contamination les scintillateurs plastiques sont utilisés en les couplant à des photomultiplicateurs (cas du COMO 170 entre autres). Le fonctionnement du

photomultiplicateur sera approfondi plus tard dans la partie 3.3.3.

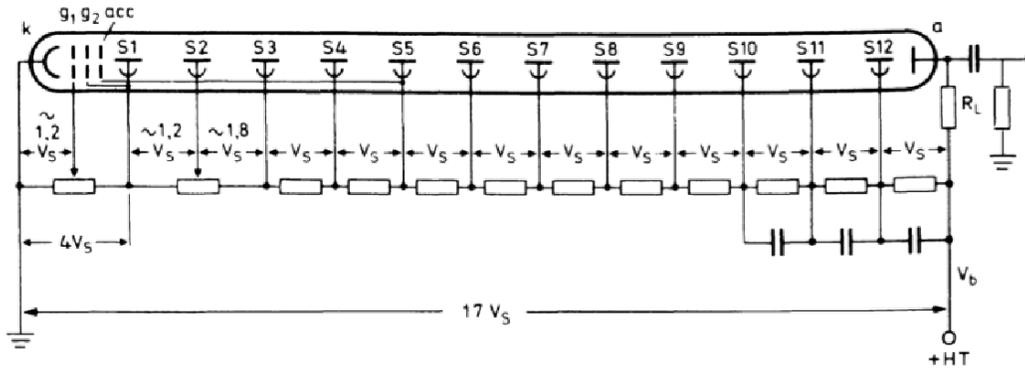


FIGURE 2.17: Exemple de pont diviseur de tension utilisé pour appliquer un potentiel entre chaque dynode d'un PM .

### 2.2.3 Les détecteurs à semi-conducteur

Dernière grande famille de détecteurs utilisés dans le domaine de la mesure de rayonnement ionisant : les détecteurs à semi-conducteurs. Les plus couramment utilisés sont le silicium (Si) et le germanium (Ge) dont les principales caractéristiques sont énumérées dans le tableau 2.5.

Propriétés	Si	Ge
Numéro atomique (Z)	14	32
Nombre de masse (A)	28,09	72,6
Isotopes stables	28-29-30	70-72-73-74-76
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) à 300°K	2,33	5,32
Atomes/cm <sup>3</sup>	4,96.10 <sup>22</sup>	4,4.10 <sup>22</sup>
Constante diélectrique	12	16
Gap en énergie à 300°K (eV)	1,115	0,665
Densité intrinsèque de porteurs à 300°K (cm <sup>-3</sup> )	1,5.10 <sup>10</sup>	2,4.10 <sup>13</sup>
Résistivité intrinsèque à 300°K (Ω.cm)	2,3.10 <sup>5</sup>	47
Mobilité des électrons à 300°K (cm <sup>2</sup> /V.s)	1350	3900
Mobilité des trous à 300°K (cm <sup>2</sup> /V.s)	480	1900
Mobilité des électrons à 77°K (cm <sup>2</sup> /V.s)	2,1.10 <sup>4</sup>	3,6.10 <sup>4</sup>
Mobilité des trous à 77°K (cm <sup>2</sup> /V.s)	1,1.10 <sup>4</sup>	4,2.10 <sup>4</sup>
Énergie de création d'une paire électron-trou à 300°K (eV)	3,62	-
Énergie de création d'une paire électron-trou à 77°K (eV)	3,76	2,96

TABLE 2.5: Principales propriétés du silicium et du germanium intrinsèques [48].

Le fonctionnement des détecteurs à semi-conducteur (SC) ressemble beaucoup à ce que nous avons pu voir dans le chapitre consacré aux détecteurs gazeux. Dans un détecteur SC, l'interaction d'un rayonnement ionisant incident avec le cristal semi-conducteur va entraîner la création de paires

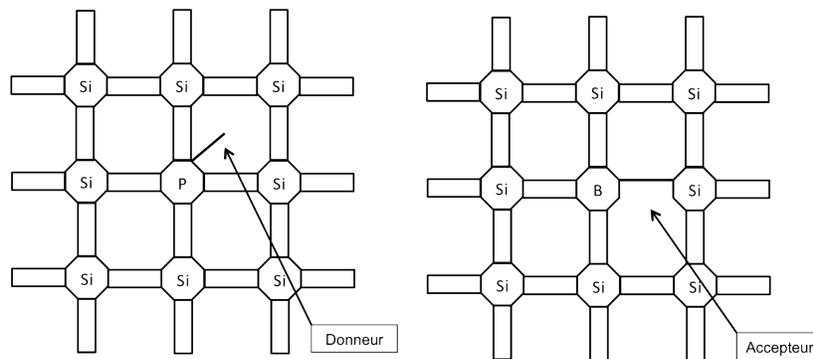


FIGURE 2.18: Différents dopages d'un semi-conducteur (cristal Si) : Dopages de type N (à gauche) et de type P (à droite).

“électron-trou”. Des électrons sont arrachés aux atomes composant le détecteur et passent de la bande de valence à la bande de conduction. Les places laissées libres par les électrons arrachés sont aussi appelées trous. En physique du solide, ces derniers sont aussi appelés pièges ou trappes car ils peuvent capter les électrons qui passeraient à leur proximité.

Dans un semi-conducteur les porteurs de charges sont donc les électrons et les trous. Ces derniers sont séparés et se déplacent sous l'effet d'un potentiel appliqué aux bornes du détecteur dans des directions opposées. Ce phénomène induit un signal électrique qui devra être filtré et amplifié car il a été produit uniquement par les charges primaires créées dans le semi-conducteur. Ici, le fonctionnement est assimilable à celui d'une chambre à ionisation. La différence majeure réside dans les porteurs de charges, pour les SC, les électrons et les trous (qui ont des mobilités équivalentes, voir tableau 2.5) participent tous à la création du signal. Pour les détecteurs gazeux, seuls les électrons contribuent au signal car ils sont plus mobiles que les ions d'un facteur environ égal à  $10^3$ .

Les porteurs de charges dans un SC sont les trous dans la bande de valence et les électrons dans la bande de conduction. Dans les SC intrinsèques, les concentrations en électrons et en trous sont égales. Or, la présence d'impuretés dans le cristal SC peut favoriser la création d'un certain type de porteurs. Le silicium et le germanium sont tétravalents, quatre de leurs électrons sont disponibles pour former des liaisons chimiques. Par exemple, si dans un cristal de silicium, une impureté trivalente (bore) est incorporée, elle acceptera un électron et donc créera un trou. A l'inverse, si cette impureté est pentavalente (phosphore), elle liera quatre de ses électrons dans le cristal mais son dernier électron restera “libre”. Ces deux combinaisons sont représentées sur la figure 2.18.

L'ajout volontaire d'impuretés dans un cristal SC est aussi appelé dopage. Si ces impuretés favorisent les porteurs de type “électron”, c'est un dopage N, et si les impuretés favorisent les porteurs de type “trou”, c'est un dopage P.

Pour réaliser des détecteurs à semi-conducteurs intrinsèques il faut absolument utiliser des matériaux extrêmement purs. Les impuretés induisent un bruit de fond important car à température ambiante l'agitation thermique peut à elle seule créer des paires “électron-trou”. Pour éviter ce problème d'autres types de détecteurs à semi-conducteurs sont couramment utilisés. Ils se présentent sous forme de jonctions PN (ou NP). Le but est d'utiliser deux types de semi-conducteurs (un dopé N et un dopé P) et de les mettre en contact comme expliqué figure 2.19. Sans avoir besoin d'appliquer un potentiel aux bornes du détecteur les électrons du SC de type N vont migrer vers le SC de type P.

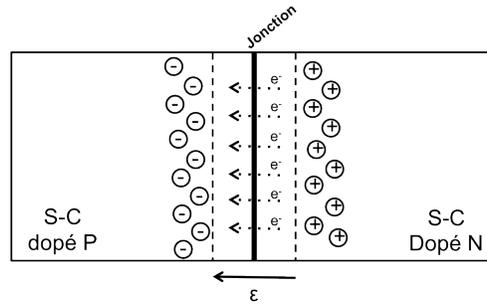


FIGURE 2.19: Exemple de jonction PN et de sa zone de déplétion.

Et inversement, les trous vont diffuser dans le sens contraire. Au niveau de la jonction des deux SC, il se crée une région désertée par les porteurs de charges et dans laquelle règne un champ électrique interne  $\varepsilon$ . Cette zone aussi appelée zone de déplétion est propice à la détection de rayonnement ionisant. Il est possible d'augmenter la zone de déplétion en appliquant une polarisation inverse à la jonction.

### Les détecteurs de type “Passivated Planar Detectors”

Une des applications utilisant des semi-conducteurs (et plus particulièrement des jonctions) sont les détecteurs de type Passivated Implanted Planar Silicon (ou PIPS<sup>®</sup>). J'ai choisi de présenter cette application car c'est la technique de mesure utilisée dans les sondes SPAB15 de Canberra présentées dans le tableau 2.1.

Cette méthode de fabrication de jonction semi-conductrice est relativement récente puisqu'elle date du milieu des années 80. Elle combine l'utilisation de deux techniques : l'implantation d'ions et la photolithographie. Les jonctions résultantes ont des courants de fuite très faibles et de très bonnes caractéristiques de détection [59, 60]. Les étapes de fabrication décrites dans la figure 2.20 permettent de fabriquer plusieurs détecteurs en même temps afin de diminuer le coût de fabrication. La première étape de fabrication commence par le nettoyage et le polissage d'un grand wafer de silicium très pur. Ce silicium est toutefois légèrement dopé N car quelques impuretés résiduelles sont toujours présentes.

La deuxième étape consiste à la passivation du wafer via la création d'une couche d'oxydation ( $\text{SiO}_2$ ) réalisée à haute température.

L'étape suivante fait appel à la photolithographie pour enlever à certains endroits la couche d'oxyde précédemment déposée. Les zones sensibles du futur détecteur sont repérées et la couche d'oxyde est enlevée. La quatrième étape consiste à bombarder d'ions tétravalents dits “accepteurs” (par exemple du bore) la zone repérée comme future zone sensible du détecteur. Cette étape va former une jonction entre le wafer initial de type N et la fine couche de wafer bombardée et transformée en semi-conducteur de type P.

Dans le même temps, la partie inférieure du wafer qui servira de contact électrique est bombardée d'ions dit “donneurs” ou pentavalents (par exemple de l'arsenic). Le dopage sera plus important (création d'une couche tampon) afin d'obtenir une barrière métal/semi-conducteur la plus fine possible et permettre aux porteurs de la traverser grâce à l'effet tunnel. La zone dopée de manière

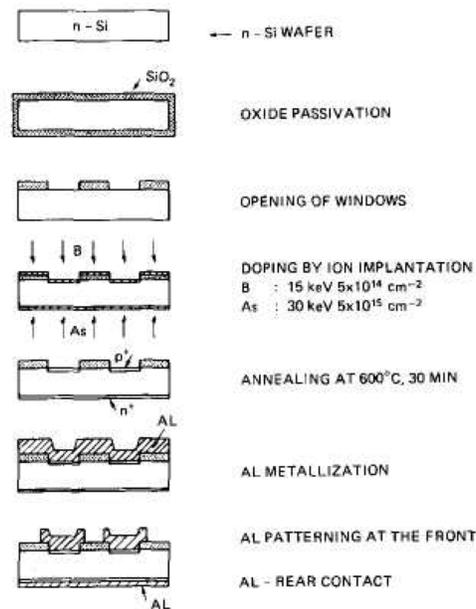


FIGURE 2.20: Etapes de fabrication d'un détecteur silicium de type "Passivated Planar Detector" [61].

plus importante est de type  $N^+$ . Les bombardements d'ions créaient des dommages dans les couches dopées mais ces derniers sont réparés après une étape de recuit à haute température (environ 600°C pendant 30 minutes). Enfin, la dernière étape consiste à évaporer et déposer par un procédé photolithographique une couche mince d'aluminium sur les surfaces avant et arrière de la jonction. Ces couches électriques ohmiques permettront de coupler le détecteur à son circuit électronique.

Un des avantages de ce type de détecteur est la formation d'une fenêtre d'entrée très mince et uniforme (couche morte très faible). Cette couche  $P^+$  formée par implantation d'ions fournit donc des détecteurs planaires pouvant être utilisés pour détecter des particules de faible énergie tels que des particules  $\beta$  par exemple. Enfin, la surface aluminisée est plus robuste et moins susceptible d'être endommagée par rapport à la surface en or utilisée dans la fabrication des diodes à barrière de surface [15].

Ce type de détecteur a été choisi par Canberra dans ses sondes SPAB15, les diodes PIPS<sup>®</sup> utilisées ont une surface active de 17 cm. Ici, la détection des particules  $\beta$  reste satisfaisante mais la sensibilité de ces détecteurs au bruit de fond  $\gamma$  n'est pas adaptée aux mesures que nous souhaitons réaliser. En effet, les détecteurs silicium ont une densité plus élevée que les scintillateurs plastiques et leur volume est plus important ce qui les rend trop sensibles au bruit de fond ambiant. Enfin, ces détecteurs ne sont pas disponibles pour de très grandes surfaces (maximum 50 cm<sup>2</sup>).

### 2.3 Comparaison des différentes technologies disponibles en fonction de leur sensibilité

Pour peaufiner nos comparaisons entre les diverses technologies et déterminer plus précisément les caractéristiques nécessaires à atteindre par notre prototype, il est crucial de définir les termes

utilisés dans les référentiels de radioprotection. Les principaux termes clés utilisés sont entre autres : l'activité équivalente ( $A_{\text{eq}}$  en Bq), l'activité surfacique ( $A_S$  en Bq/cm<sup>2</sup>), le seuil de décision (SD), la limite de détection (LD) et l'activité minimale détectée (AMD).

### 2.3.1 Notions de Seuil de Décision, de Limite de Détection et d'Activité Minimale Détectée

Avant de présenter les notions de Seuil de Décision (SD), de Limite de Détection (LD) et d'Activité Minimale Détectée (AMD), nous devons tout d'abord revenir sur les unités utilisées pour la mesure de contamination surfacique et notamment son application en CNPE. Les mesures de contamination réalisées à l'aide d'appareils dédiés peuvent afficher des résultats exprimés en diverses unités. Les principales unités utilisées pour quantifier une contamination surfacique sont les coups par seconde (c/s), le Becquerel (Bq) ou encore le Becquerel par cm<sup>2</sup> (Bq/cm<sup>2</sup>).

#### L'activité et l'activité équivalente Cobalt 60

En général, les appareils de mesure de contamination surfacique ne permettent pas de déterminer à la fois l'activité et le radionucléide mis en cause. Comme nous avons pu l'observer dans les chapitres précédents les principaux détecteurs utilisés sont des compteurs Geiger-Müller et des sondes à scintillation en mode comptage simple. En toute rigueur, les mesures effectuées doivent donc être exprimées en coups par seconde.

D'après la définition de l'activité et de son unité le Becquerel, l'affichage d'une activité ou d'une activité surfacique (en Bq ou Bq/cm<sup>2</sup>) n'est possible que si le radionucléide mesuré est connu. Or, sur le terrain, ce n'est pas toujours le cas. Afin d'éviter ce problème, la norme CEI 60325 de juin 2002 [62], qui définit les règles applicables à l'instrumentation pour la radioprotection et notamment les contaminamètres et moniteurs de contamination alpha, bêta et alpha/bêta (énergie des bêta supérieure à 60 keV), indique dans un chapitre dédié (§7.2.3 Radionucléides de référence) que :

- pour les émetteurs  $\alpha$ , le radionucléide de référence est soit l' <sup>241</sup>Am, soit le <sup>239</sup>Pu,
- pour les émetteurs  $\beta$ , si l'énergie maximale des particules  $\beta$  est inférieure à 200 keV le radionucléide de référence sera le <sup>36</sup>Cl ou <sup>204</sup>Tl, sinon le radionucléide de référence doit être le <sup>14</sup>C.

Le fabricant de matériels de mesure doit donc étalonner son appareil sur une source référencée dans la norme CEI 60532. Cet étalonnage permet de convertir les coups par seconde mesurés par l'appareil en activité (Becquerel). Afin de compléter les informations nécessaires aux utilisateurs, la norme CEI 60532 impose également que plusieurs rendements soient communiqués (§9.5.2.1). Le constructeur doit fournir le rendement pour trois radionucléides : un ayant un  $Q_\beta$  (énergie de transition) inférieur à 200 keV, un autre ayant un  $Q_\beta$  compris entre 200 et 500 keV et enfin un dernier ayant un  $Q_\beta$  supérieur à 500 keV. Les radionucléides proposés par la norme sont :

- <sup>14</sup>C ( $Q_\beta = 0,155$  MeV, période 5 730 ans),
- <sup>147</sup>Pm ( $Q_\beta = 0,22$  MeV, période 2,6 ans),
- <sup>60</sup>Co ( $Q_\beta = 0,31$  MeV, période 5,271 ans),
- <sup>36</sup>Cl ( $Q_\beta = 0,714$  MeV, période 301 000 ans),
- <sup>204</sup>Tl ( $Q_\beta = 0,77$  MeV, période 3,8 ans),
- <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y ( $Q_\beta = 0,51$  MeV, période 29 ans) avec <sup>90</sup>Y ( $Q_\beta = 2,26$  MeV).

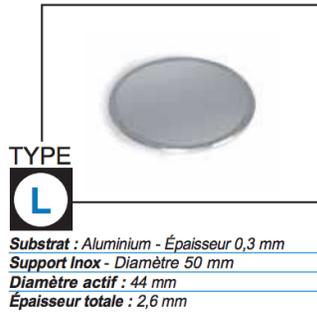


FIGURE 2.21: Exemple de source étalon recommandée et utilisée pour déterminer le rendement des contaminamètres  $\beta$  .

Le rendement d'un appareil est déterminé de la manière suivante : tout d'abord, une mesure de bruit de fond ( $N_{BdF}$ ) est réalisée. Ensuite, une mesure sur une source étalon ( $N_{Source}$ ) est effectuée (voir figure 2.21). L'activité  $A_{Source}$  de cette source est connue et doit être donnée par un certificat d'étalonnage émanant d'un laboratoire accrédité COFRAC (ou équivalent). Le rendement du détecteur  $\varepsilon_i$  dans  $4\pi$  sr est déterminé de la manière suivante :

$$\varepsilon_i = \frac{N_{Source} - N_{BdF}}{A_{Source}} = \frac{N_{Net}}{A_{Source}}$$

En pratique, pour les sources étalons émettrices  $\beta$  utilisées pour la détermination de rendement, il est admis que l'activité dans  $2\pi$  sr est environ égale à la moitié de l'activité dans  $4\pi$  sr [63, 64].

Pour les mesures effectuées dans les CNPE, les recommandations de la norme ne sont pas exactement suivies par EDF puisque le radionucléide de référence pour les rayonnements  $\beta$  est le  $^{60}\text{Co}$  . La démarche d'EDF est simple : dans les centrales nucléaires françaises le radionucléide responsable de la majorité des contaminations rencontrées est le  $^{60}\text{Co}$ . Il est donc logique de prendre ce dernier comme radionucléide de référence pour les rayonnements  $\beta$ . Par contre, pour le rayonnement  $\alpha$ , EDF suit les recommandations de la norme CEI 60532 et utilise l' $^{241}\text{Am}$ .

Sur la majorité du parc d'appareils détenus par EDF, les activités mesurées à l'aide de contaminamètre sont donc affichées en Becquerel en sous-entendant que ces activités sont des activités équivalentes  $^{60}\text{Co}$ . En toute rigueur ces dernières devraient être écrites  $\text{Bq}_{\text{éq}}$  ou  $\text{Bq}_{\text{éq } ^{60}\text{Co}}$ .

Les mesures et dépistages de contamination surfacique peuvent être réalisées de deux façons. Soit de manière directe, dans ce cas l'intervenant balaye directement la zone à contrôler avec son contaminamètre. Soit de manière indirecte, via l'utilisation d'un frottis ou d'une chiffonnette. L'intervenant frotte la surface à contrôler et mesure dans un deuxième temps la chiffonnette ou le frottis avec son contaminamètre. Les grandeurs mesurées sont des activités surfaciques et ces dernières sont généralement affichées en  $\text{Bq}/\text{cm}^2$ . Pour EDF, cette activité surfacique peut aussi être appelée activité surfacique équivalent cobalt 60.

Suivant le type de mesure (directe ou indirecte), l'activité surfacique équivalente  $^{60}\text{Co}$ ,  $A_{\text{Surf}}$ , est définie de manière différente. Pour une mesure directe :

$$A_{Surf}(Bq/cm^2) = \frac{A_{Net}}{S_{Référence}}$$

où  $A_{Net}$  est l'activité nette en Bq mesurée sous la surface de référence (après déduction du bruit de fond) et  $S_{Référence}$  est la surface de référence en  $cm^2$  (qui peut aussi être la surface active du détecteur).

Pour une mesure indirecte :

$$A_{Surf}(Bq/cm^2) = \frac{A_{Net}}{S_{Frottée} \times F}$$

où  $A_{Net}$  est l'activité nette mesurée en Bq sous la surface de référence (après déduction du bruit de fond),  $S_{Frottée}$  est la surface frottée à l'aide d'une chiffonnette ou d'un frottis en  $cm^2$  (réglementairement  $300\text{ cm}^2$ ) et  $F$  est le facteur de prélèvement.

Le facteur de prélèvement  $F$  est en règle générale fixé à 0,1. Il traduit la possibilité de ne pas arracher la totalité de la contamination lors du passage d'un frottis ou d'une chiffonnette.

### Le seuil de décision (SD)

La réalisation d'une mesure doit absolument s'accompagner d'un questionnement sur sa validité. Pour cela, il faut s'intéresser au seuil de décision aussi appelé SD. Le but du seuil de décision (SD) est de répondre à la question suivante : "A partir de quel moment puis-je affirmer qu'une mesure est positive?". Cette question nous interroge sur le moment opportun à partir duquel la mesure effectuée peut être considérée comme distincte du bruit de fond.

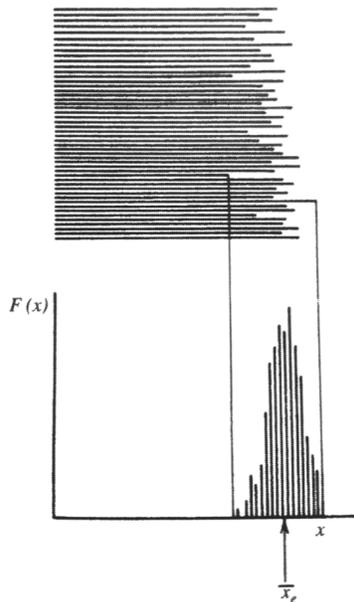


FIGURE 2.22: Exemple de distribution obtenue pour la mesure de bruit de fond et sa représentation sous forme d'histogramme [15].

Les désintégrations radioactives sont des phénomènes aléatoires. Toutefois, elles suivent des lois

statistiques (loi normale ou loi de Poisson par exemple). Les mesures sont donc soumises à des fluctuations statistiques inhérentes au phénomène physique qui doit être mesuré (voir figure 2.22).

Afin de bien comprendre le concept de seuil de décision (SD) et les calculs qui vont suivre, voici une description des notations que nous allons utiliser ainsi qu'une illustration de ces dernières. Nous considérons deux situations possibles : soit l'opérateur réalise une mesure de bruit de fond (BdF), soit il fait une mesure sur un échantillon. La figure 2.23 représente les différentes variables que nous allons utiliser plus tard dans nos calculs.

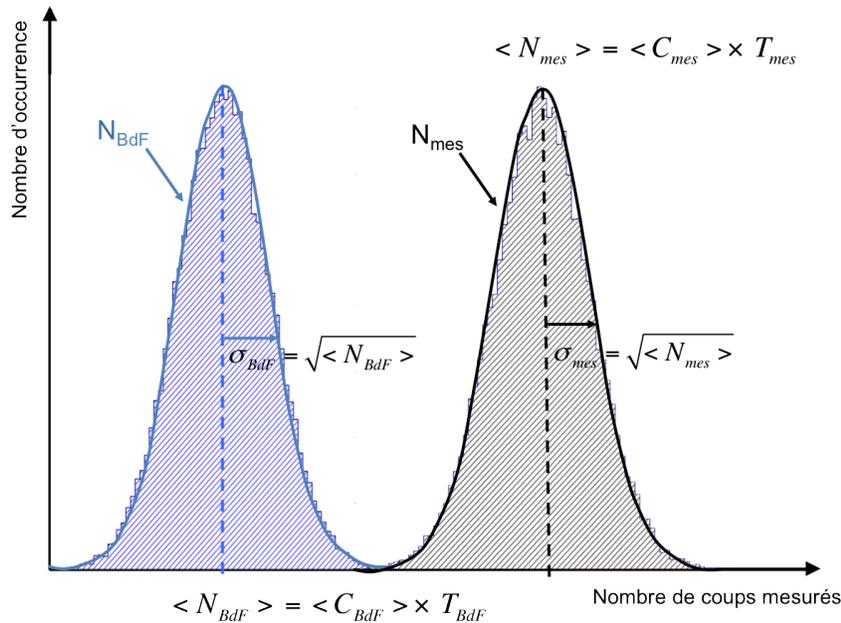


FIGURE 2.23: Représentation des distributions obtenues lors de mesures de bruit de fond et sur échantillon. Ces distributions sont accompagnées des variables statistiques réutilisées dans nos calculs de SD.

La distribution  $N_{BdF}$  correspond aux mesures de bruit de fond réalisées avec un appareil de mesure. Cette distribution est centrée sur  $\langle N_{BdF} \rangle$  qui est la valeur moyenne du nombre de coups mesuré  $N_{BdF}$  pendant le temps d'acquisition  $T_{BdF}$ . Cette valeur est aussi égale au taux de comptage moyen  $\langle C_{BdF} \rangle$  multiplié par le temps d'acquisition  $T_{BdF}$ . Nous considérons cette distribution comme Gaussienne et son écart type  $\sigma_{N_{BdF}}$  est donc égal à  $\sqrt{\langle N_{BdF} \rangle}$ . Cette affirmation implique que l'appareil ne soit pas affecté par des fluctuations systématiques, que les mesures soient indépendantes et que le BdF mesuré soit considéré comme Poissonien.

De la même manière, la distribution  $N_{mes}$  correspond aux mesures réalisées sur échantillon avec un appareil de mesure. Cette distribution est centrée sur  $\langle N_{mes} \rangle$  qui est la valeur moyenne du nombre de coups mesuré  $N_{mes}$  pendant le temps d'acquisition  $T_{mes}$ . Cette valeur peut également être écrite :  $\langle N_{mes} \rangle = \langle C_{mes} \rangle \times T_{mes}$  où  $\langle C_{mes} \rangle$  est le taux de comptage moyen. Cette distribution est également une Gaussienne et son écart type  $\sigma_{N_{mes}}$  est donc égal à  $\sqrt{\langle N_{mes} \rangle}$ .

Le seuil de décision correspond à une limite en dessous de laquelle, compte tenu des fluctuations

statistiques, nous pouvons obtenir une mesure positive pour un échantillon alors qu'il n'est pas contaminé. Cette hypothèse d'avoir un faux positif a une probabilité d'occurrence égale à  $\alpha$  %. Le risque  $\alpha$  est d'autant plus petit que SD est grand. En pratique, si nous mesurons un grand nombre d'échantillons non radioactifs avec notre contaminamètre,  $\alpha$  % des échantillons donneront un taux de comptage supérieur à SD (voir figure 2.24).

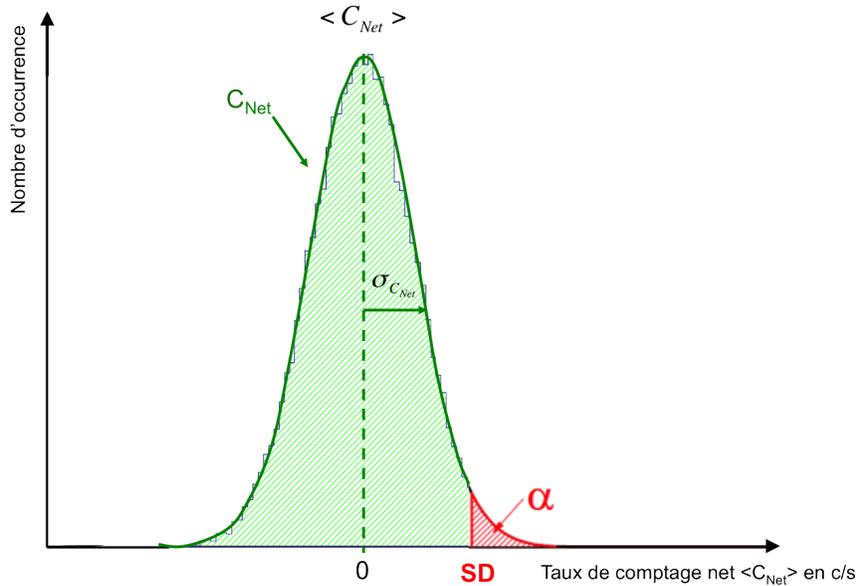


FIGURE 2.24: Représentation de la distribution du taux de comptage net d'échantillons non contaminés, du seuil de décision et de l'intervalle de confiance.

La distribution  $C_{Net}$  d'écart type  $\sigma_{C_{Net}}$  est centrée sur  $\langle C_{Net} \rangle$ . Pour rappel, nous utiliserons les variables suivantes dans nos calculs :

- $T_{BdF}$  le temps de mesure du bruit de fond,
- $T_{mes}$  le temps de mesure d'un échantillon,
- $N_{BdF}$  le nombre de coups mesuré pendant  $T_{BdF}$ ,
- $N_{mes}$  le nombre de coups enregistré pendant  $T_{mes}$  sur l'échantillon,

Le taux de comptage moyen  $\langle C_{Net} \rangle$  (en c/s) correspond au taux de comptage sur l'échantillon auquel nous soustrayons le taux de comptage du bruit de fond, il peut s'écrire :

$$\langle C_{Net} \rangle = \langle C_{mes} \rangle - \langle C_{BdF} \rangle = \frac{\langle N_{mes} \rangle}{T_{mes}} - \frac{\langle N_{BdF} \rangle}{T_{BdF}}$$

où  $N_{mes}$  et  $N_{BdF}$  sont des variables de Poisson [66]. L'estimation de la variance de ce taux de comptage peut donc s'écrire :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{C_{Net}}^2 &= \left( \frac{\sigma_{N_{mes}}}{T_{mes}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{N_{BdF}}}{T_{BdF}} \right)^2 \\
 &= \frac{\langle N_{mes} \rangle}{T_{mes}^2} + \frac{\langle N_{BdF} \rangle}{T_{BdF}^2} \\
 &= \frac{\langle C_{mes} \rangle \times T_{mes}}{T_{mes}^2} + \frac{\langle C_{BdF} \rangle \times T_{BdF}}{T_{BdF}^2}
 \end{aligned} \tag{2.3.1}$$

Pour présenter la notion de seuil de décision, nous nous plaçons dans le cas où nous mesurons des échantillons non contaminés. Le taux de comptage net peut être exprimé comme :  $C_{Net} = C_{mes} - C_{BdF}$ . Les échantillons mesurés étant réputés non contaminés nous aurons :

$$\langle C_{mes} \rangle = \langle C_{BdF} \rangle \text{ et } \langle C_{Net} \rangle \approx 0$$

Cela implique également que  $\sigma_{C_{BdF}} \approx \sigma_{C_{mes}}$ . L'estimation de l'écart type de  $C_{Net}$  peut donc s'écrire :

$$\sigma_{C_{BdF}} = \sigma_{C_{Net}} = \sqrt{\frac{\langle C_{mes} \rangle \times T_{mes}}{T_{mes}^2} + \frac{\langle C_{BdF} \rangle \times T_{BdF}}{T_{BdF}^2}} = \sqrt{\langle C_{BdF} \rangle \left( \frac{1}{T_{mes}} + \frac{1}{T_{BdF}} \right)} \tag{2.3.2}$$

D'après le résultat précédent et la définition du seuil de décision (SD) donnée par la norme ISO 11929 [65], nous pouvons donc en déduire l'expression de SD qui est égale à :

$$SD = k_{1-\alpha} \times \sigma_{C_{BdF}} = k_{1-\alpha} \sqrt{\langle C_{BdF} \rangle \left( \frac{1}{T_{mes}} + \frac{1}{T_{BdF}} \right)}$$

où le coefficient  $k_{1-\alpha}$  est égal au fractile de risque  $\alpha$  de la loi normale centrée réduite. Pour un risque  $\alpha$  de 5 % nous aurons  $k_{1-\alpha} = 1,645$  ou encore pour  $\alpha = 2,5$  % nous prendrons  $k_{1-\alpha} = 1,96$  [67].

Il est important de noter que le seuil de décision n'est fonction que de la mesure de bruit de fond et non de la mesure de l'échantillon.

### La limite de détection (LD)

Pour la limite de détection, nous nous plaçons maintenant dans le cas inverse de celui pris pour le seuil de décision. Au lieu de mesurer des échantillons exclusivement non contaminés, nous sommes cette fois-ci en présence d'échantillons contaminés.

La question que l'on se pose est : "Au dessus de quel taux de comptage est-on sûr (avec un risque de  $\beta$  % d'erreur) d'être au dessus de notre seuil de décision ?" La limite de détection (LD) est donnée avec un risque  $\beta$  d'observer un taux de comptage inférieur à SD. En pratique, si l'on mesure une grande quantité d'échantillons, tous contaminés avec une valeur moyenne égale à LD (c/s) alors  $\beta$  % d'entre eux généreront une mesure nette inférieure à SD. Ces derniers ne seront donc pas détectés et seront des faux négatifs (voir figure 2.25).

La distribution  $C_{Net \text{ non cont.}}$  correspond aux mesures réalisées sur des échantillons réputés non contaminés avec un appareil de mesure. Cette distribution est centrée sur  $\langle C_{Net \text{ non cont.}} \rangle$  qui est

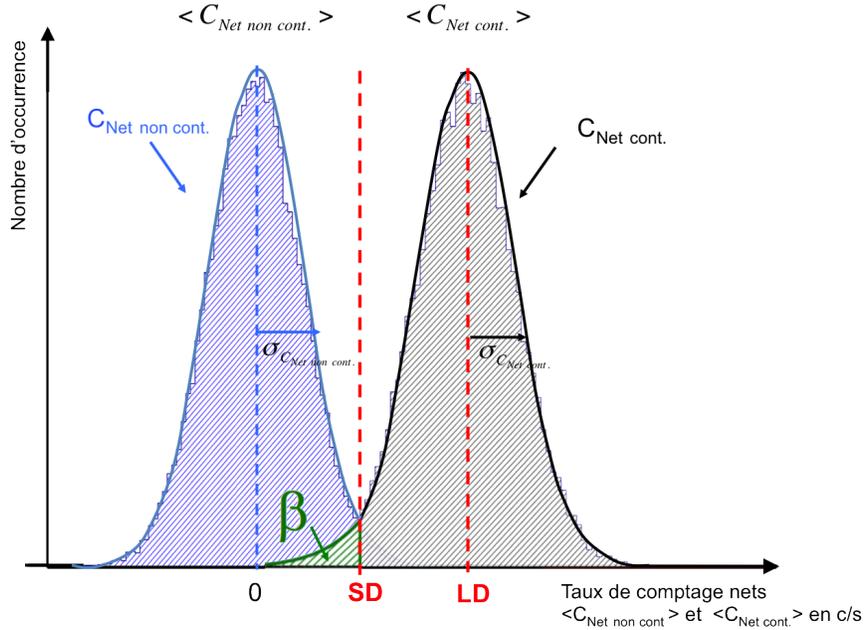


FIGURE 2.25: Représentation de la distribution des taux de comptage nets d'échantillons contaminés (en noir) et non contaminés (en bleu), du seuil de décision et de la limite de détection.

la valeur moyenne des taux de comptage nets obtenus. Cette distribution représente le même cas de figure que celui traité dans la figure 2.24, nous pouvons donc prendre  $T_{mes\ non\ cont.} = T_{BdF}$ .

La distribution  $C_{Net\ cont.}$  correspond aux mesures réalisées sur des échantillons contaminés avec un appareil de mesure. Cette distribution est centrée sur  $\langle C_{Net\ cont.} \rangle$  qui est la valeur moyenne des taux de comptage nets obtenus. Le taux de comptage  $C_{Net\ cont.}$  est égal au taux de comptage  $C_{mes\ cont.}$  corrigé du bruit de fond  $C_{BdF}$ . La valeur moyenne des taux de comptage nets peut également s'écrire  $\langle C_{Net\ cont.} \rangle = \langle C_{mes\ cont.} \rangle - \langle C_{BdF} \rangle$ . Les mesures de bruit de fond sont réalisées pendant un temps  $T_{BdF}$  et les mesures sur échantillon contaminé sont réalisées pendant un temps  $T_{mes}$ .

La détermination de la limite de détection (LD) repose sur le principe vu précédemment pour le calcul de SD. En considérant un taux de comptage net  $C_{Net\ cont.}$  dont la valeur moyenne est égale à LD. Alors, l'estimation de l'écart type de ce taux de comptage peut s'écrire (voir 2.3.1) :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{C_{Net\ cont.}}^2 &= \left( \frac{\langle C_{Net\ cont.} \rangle + \langle C_{BdF} \rangle}{T_{mes}} \right)^2 + \left( \frac{\langle C_{BdF} \rangle}{T_{BdF}} \right)^2 \\
 &= \left( \frac{\langle C_{Net\ cont.} \rangle}{T_{mes}} \right)^2 + \left( \frac{\langle C_{BdF} \rangle}{T_{mes}} \right)^2 + \left( \frac{\langle C_{BdF} \rangle}{T_{BdF}} \right)^2 \\
 &= \langle C_{BdF} \rangle^2 \left( \frac{1}{T_{mes}^2} + \frac{1}{T_{BdF}^2} \right) + \frac{\langle C_{Net\ cont.} \rangle^2}{T_{mes}^2} \\
 &= \sigma_{C_{BdF}}^2 + \frac{\langle C_{Net\ cont.} \rangle^2}{T_{mes}^2} \\
 &= \sigma_{C_{BdF}}^2 + \frac{LD^2}{T_{mes}^2}
 \end{aligned}$$

De plus, nous pouvons également voir sur la figure 2.25 que  $\langle C_{Net\ cont.} \rangle$  peut s'écrire :

$$\langle C_{Net\ cont.} \rangle = LD = SD + k_{1-\beta} \times \sigma_{C_{Net\ cont.}}$$

En combinant les deux équations nous obtenons :

$$LD = k_{1-\alpha} \times \sigma_{C_{BdF}} + k_{1-\beta} \sqrt{\sigma_{C_{BdF}}^2 + \frac{LD}{T_{mes}}} \quad (2.3.3)$$

En développant cette équation on obtient finalement :

$$LD^2 - LD \left( 2k_{1-\alpha} \times \sigma_{C_{BdF}} + \frac{k_{1-\beta}^2}{T_{mes}} \right) + (k_{1-\alpha}^2 - k_{1-\beta}^2) \sigma_{C_{BdF}}^2 = 0$$

Cette équation admet deux solutions mais une seule a une signification physique réelle :

$$LD = k_{1-\alpha} \times \sigma_{C_{BdF}} + \frac{k_{1-\beta}^2}{2T_{mes}} + \frac{k_{1-\beta}}{2} \sqrt{\frac{k_{1-\beta}^2}{T_{mes}^2} + \frac{4k_{1-\alpha} \sigma_{C_{BdF}}}{T_{mes}} + 4\sigma_{C_{BdF}}^2}$$

$$\text{où } \sigma_{C_{BdF}} = \sqrt{\langle C_{BdF} \rangle \left( \frac{1}{T_{mes}} + \frac{1}{T_{BdF}} \right)} \quad (\text{voir équation 2.3.2}).$$

Le référentiel métrologie en CNPE [68] indique que pour déterminer LD, il est recommandé de prendre  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = 1,96$  ( $\approx 2$ ) afin d'avoir des risques  $\alpha$  et  $\beta$  égaux à 2,5 %. L'équation 2.3.3 peut donc se simplifier et donner :

$$LD - 2\sigma_{C_{BdF}} = 2\sqrt{\sigma_{C_{BdF}}^2 + \frac{LD}{T_{mes}}} \Rightarrow LD^2 - 4LD \left( \sigma_{C_{BdF}} + \frac{1}{T_{mes}} \right) = 0$$

Cette équation admet également deux solutions mais une seule a une signification physique réelle :

$$LD \approx 4\sqrt{\langle C_{BdF} \rangle \left( \frac{1}{T_{mes}} + \frac{1}{T_{BdF}} \right)} + \frac{1}{T_{mes}}$$

Dans le référentiel métrologie en CNPE [68], cette solution est simplifiée en :

$$LD \approx 4\sqrt{\langle C_{BdF} \rangle \left( \frac{1}{T_{mes}} + \frac{1}{T_{BdF}} \right)}$$

en admettant que  $\frac{1}{T_{mes}}$  est négligeable puisque toujours inférieur ou égal à 1.

### L'activité minimale détectable (AMD)

La limite de détection comme le seuil de décision sont tous les deux dépendants de trois facteurs : le niveau de bruit de fond ambiant mesuré  $C_{BdF}$ , et les temps de mesure  $T_{mes}$  et  $T_{BdF}$  (respectivement pour la mesure d'un échantillon et la mesure de bruit de fond). La LD et l'AMD ont pour unité des coups par seconde. Or, comme nous avons pu le constater dans le chapitre consacré à l'activité et l'activité équivalente, les appareils de mesure de contamination surfacique donnent des indications en Bq ou Bq<sub>éq</sub>.

La limite de détection correspond à un taux de comptage à partir duquel nous sommes sûrs à  $(1-\beta)$  %, souvent 97,5 %, que notre échantillon est contaminé si ce dernier a généré une mesure supérieure à LD. Autrement dit, nous sommes sûrs qu'un échantillon contaminé sera systématiquement détecté avec une probabilité de 97,5 %. Le passage en Bq (ou Bq<sub>éq</sub>) nous donne accès à un nouvel indicateur : l'AMD ou Activité Minimale Détectable. L'AMD s'écrit :

$$AMD(Bq) = \frac{LD(c/s) \times r}{\rho_{4\pi(c/s/Bq)}}$$

où  $\rho_{4\pi(c/s/Bq)}$  est le rendement du détecteur dans  $4\pi$  sr au radionucléide concerné et  $r$  est le coefficient de correction d'échantillon qui correspond à la nature du support (ce coefficient est égal à 1 pour les mesures  $\beta/\gamma$  et à 2 pour les mesures  $\alpha$ ).

L'AMD peut également être donnée en Bq/cm<sup>2</sup> et son calcul dépendra du mode de mesure (directe ou indirecte) et/ou de la surface de détection de l'appareil de mesure.

Voici un cas concret qui permet de mieux comprendre le principe de fonctionnement de l'AMD. Celui-ci a été réalisé avec un appareil de type MiniTrace  $\beta$  (cet exemple est issu du référentiel EDF [68]). Cet appareil est composé d'un détecteur gazeux de type Geiger-Müller Pancake. Sur la figure 2.26 vous pouvez observer l'évolution de l'AMD pour le MiniTrace  $\beta$  en fonction du bruit de fond ambiant.

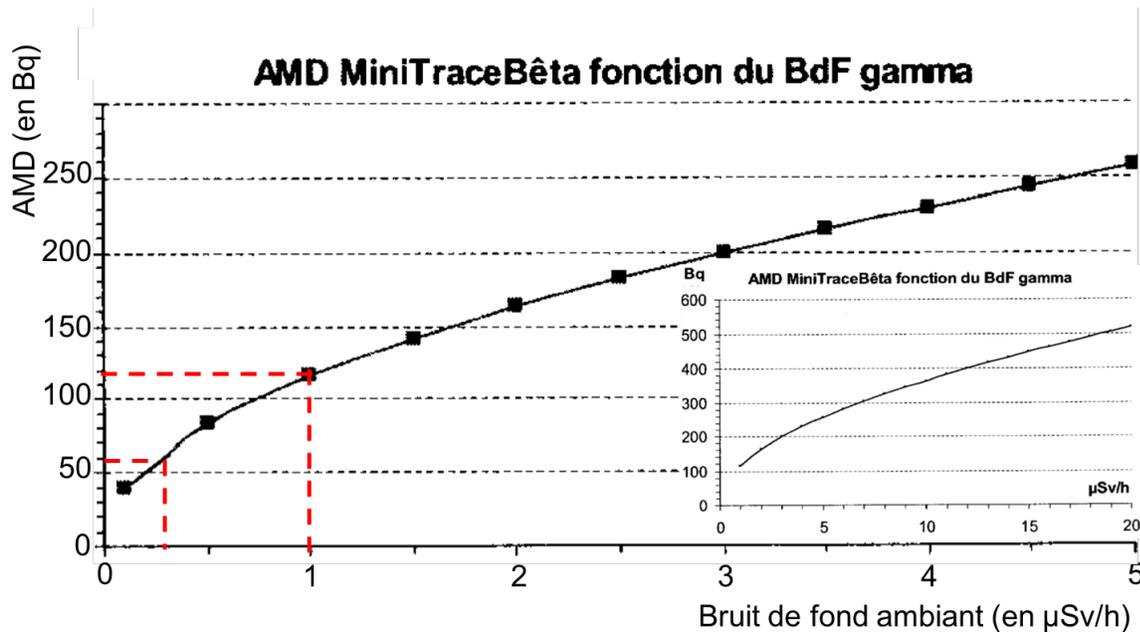


FIGURE 2.26: Evolution de l'Activité Minimale Détectable (en Bq) pour un appareil de mesure muni d'un détecteur GM Pancake de 15 cm<sup>2</sup> de diamètre en fonction du bruit de fond ambiant (en µSv/h) [68].

Pour réaliser une mesure directe de contamination avec un seuil de 4 Bq/cm<sup>2</sup> si l'appareil utilisé est un MiniTrace  $\beta$  ( $S = 15$  cm<sup>2</sup>), l'activité équivalente à mesurer sous le détecteur sera de 60 Bq<sub>éq</sub>. Or, nous pouvons voir sur la figure 2.26 que, par exemple, pour un BdF de 1 µSv/h, l'AMD est déjà

de 120 Bq<sub>éq</sub>. Nous pouvons constater que pour faire un dépistage direct d'une activité équivalente de 60 Bq<sub>éq</sub>, il faut que le BdF ambiant (DED) soit inférieur à 350 nSv/h.

### Les dépistages et mesures directs de contamination surfacique $\beta$

Le dépistage et la mesure directs sont deux actions différentes. Le dépistage direct est le plus utilisé car il donne une information immédiate du niveau de contamination, permet de localiser rapidement la contamination et facilite, de ce fait, la décontamination. La mesure directe est peu utilisée car elle nécessite un bruit de fond très bas et donne une information sur la contamination fixée et non-fixée. Elle permet, contrairement au dépistage, de faire une comparaison avec les limites de contamination surfacique prescrites ou fixées réglementairement. Par exemple, la législation sur les transports de classe 7<sup>7</sup> donne des limites de contamination surfacique à ne pas dépasser sur les objets transportés.

Les différences entre ces deux méthodes dites "directes" sont rendues plus facilement compréhensibles grâce au double logigramme représenté sur la figure 2.27.

### Les dépistages et mesures indirectes

Les dépistages et mesures indirectes sont des techniques qui font appel à une chiffonnette ou à un frottis pour déterminer la présence de contamination surfacique. Le dépistage indirect est utilisé généralement dans deux cas de figure : soit lorsque le bruit de fond est trop important, soit lorsque la forme de l'objet ou de la surface à dépister n'est pas adaptée à la mesure directe. Pour les dépistages indirects, le matériau recommandé pour le prélèvement est une chiffonnette pliée dont la surface est d'environ 100 à 200 cm<sup>2</sup>. La surface de chiffonnette pliée doit être impérativement inférieure à la surface de détection de la sonde.

Les mesures indirectes sont réalisées afin de comparer les niveaux de contamination surfacique avec des critères réglementaires de contamination non-fixée. Des mesures indirectes doivent, par exemple, être effectuées dans le cas de transport de classe 7 : transport de matière radioactive [69]. Les matériaux recommandés pour les prélèvements sont des frottis en toile de coton d'un diamètre de 44 mm (soit environ 16 cm<sup>2</sup>). La surface frottée avec ce frottis doit être de 300 cm<sup>2</sup> afin de respecter les conditions imposées par la réglementation. Cette surface représente 70 cm linéaire frottés avec un frottis de 44 mm de diamètre ou encore une feuille au format A5.

Les différences entre ces deux méthodes dites "indirectes" sont rendues plus facilement compréhensibles à l'aide des deux logigrammes représentés sur la figure 2.28.

### 2.3.2 Résumé des sensibilités atteintes par les différentes solutions proposées

Afin de clôturer notre étude sur les diverses utilisations des appareils dans le domaine de la contamination surfacique et l'état de l'art des techniques et technologies utilisées par les industriels proposant des solutions de mesure, je vais maintenant faire un petit résumé de toutes ces informations. Notamment, je reviendrai sur les LD et AMD atteintes par les appareils disponibles sur le marché et j'analyserai ces résultats en me replaçant dans le contexte d'une utilisation dans un environnement dégradé (bruit de fond  $\gamma$  ambiant important et fluctuant). Toutes ces informations

---

7. transport de classe 7 : sous-classement du transport de matières dangereuses, la classe 7 est dédiée aux marchandises dangereuses radioactives.

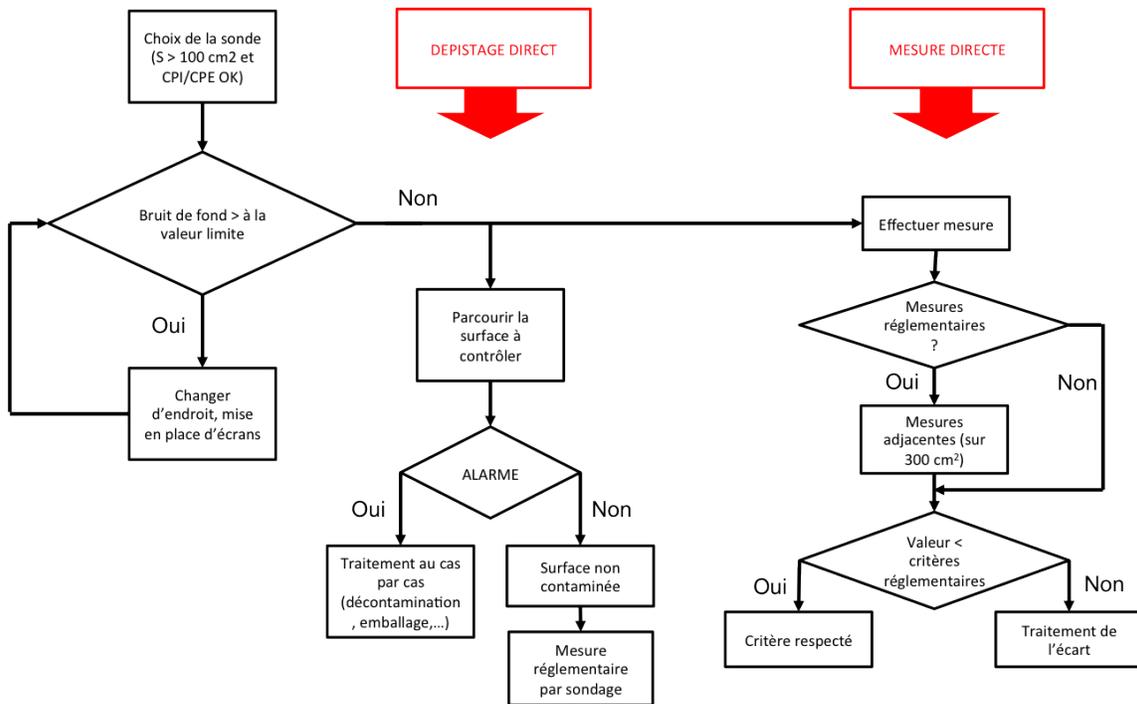


FIGURE 2.27: Exemple de logigramme reprenant les étapes du dépistage direct et de la mesure directe de contamination surfacique.

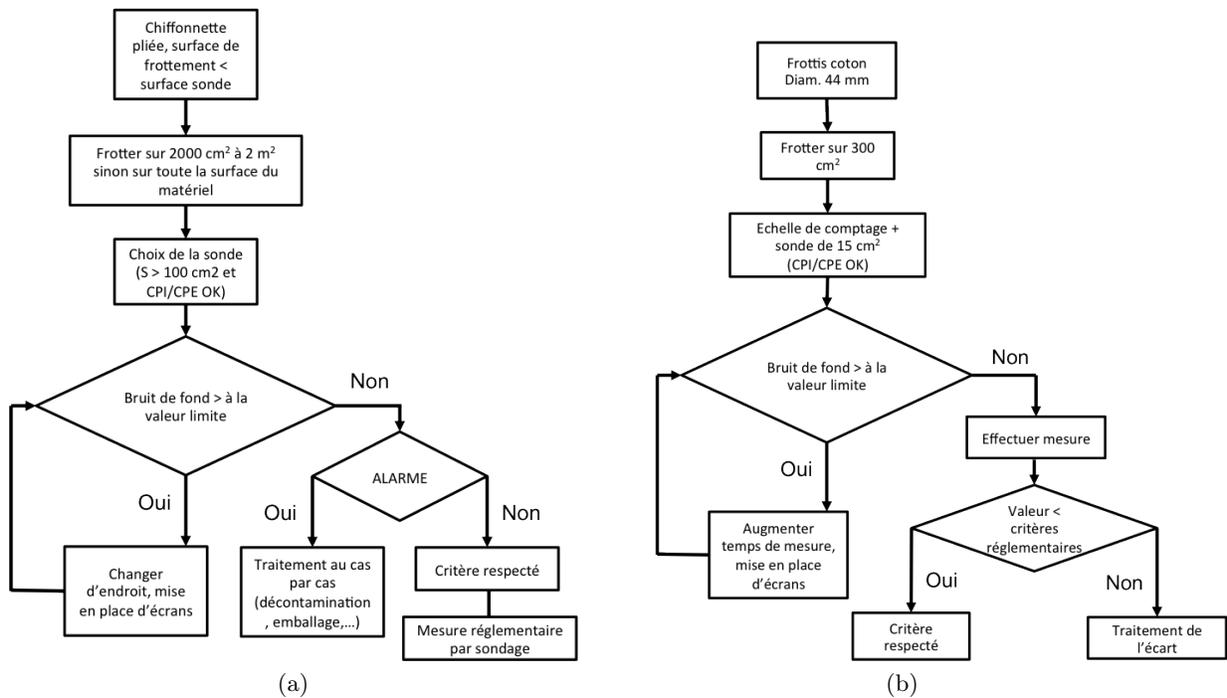


FIGURE 2.28: Exemples de logigrammes reprenant les étapes du dépistage indirect (a) et de la mesure indirecte (b) de contamination surfacique [68].



FIGURE 2.29: Photographie et vue en coupe de la sonde SABG-30B développée par Canberra [70]

ont été regroupées ci-dessous par technologie. Deux catégories se détachent particulièrement : les GM Pancake et les scintillateurs plastiques.

### Les GM Pancake simples

Les appareils contenant un seul GM (Dolphy  $\beta$ , MiniTrace  $\beta$ , SABG-15 + Radiagem,...) ont une petite surface de détection de  $15 \text{ cm}^2$ . En mesure directe, en 1 seconde, pour atteindre une LD de  $4 \text{ Bq/cm}^2$  (ou une AMD de  $60 \text{ Bq}$  sous le détecteur), le bruit de fond gamma ambiant doit être inférieur ou égal à environ  $350 \text{ nSv/h}$ . En mesure indirecte, en 1 seconde, pour atteindre une LD de  $4 \text{ Bq/cm}^2$  (ou une AMD  $120 \text{ Bq}$  sous le détecteur qui correspond à  $4 \text{ Bq/cm}^2$  sur  $300 \text{ cm}^2$  avec un coefficient  $F = 0,1$ ) le bruit de fond  $\gamma$  ambiant doit être inférieur à  $1 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ .

### Les doubles GM Pancake

Pour les appareils d'ancienne génération, qui utilisent deux GM Pancake côte à côte (c'est le cas du MIP 10 D + SBM2D), la surface de détection est doublée pour atteindre  $30 \text{ cm}^2$ . Pour un bruit de fond  $\gamma$  d'environ  $5 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ , la LD de l'appareil se situait à environ  $16 \text{ Bq/cm}^2$  [70]. La détection de contamination dans une ambiance  $\gamma$  de l'ordre de  $30 \text{ }\mu\text{Sv/h}$  est annoncée comme impossible par le fabricant.

Depuis 2015, une nouvelle sonde basée sur le même principe a été développée par Canberra, il s'agit de la sonde SABG-30B. Cet appareil contient quatre GM Pancake (voir figure 2.29) et repose sur le principe de compteur de garde. Les signaux issus des quatre GM Pancake sont analysés par un algorithme afin de diminuer au maximum l'impact du bruit de fond  $\gamma$  ambiant. Les résultats obtenus avec cette sonde sont meilleurs que ceux obtenus avec la sonde SBM2D.

Les résultats obtenus par la sonde SABG-30-B sont les suivants : dans un bruit de fond  $\gamma$  de  $5 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ , la LD atteinte est de  $4 \text{ Bq/cm}^2$  et dans  $30 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ , la limite de détection obtenue est d'environ  $10 \text{ Bq/cm}^2$ . Canberra n'a pas communiqué les temps de mesure utilisés pour la réalisation de ces tests.

### Les sondes à scintillations

La principale sonde à mettre en avant est la sonde distribuée par Nuvia et fabriquée par la société SEA GmbH. Il s'agit du COMO 170. Cet appareil dispose d'une surface de détection de  $170 \text{ cm}^2$ . La technologie utilisée est de type scintillateur plastique couplé à un photomultiplicateur.

Pour des dépistages directs en 1 seconde, le COMO 170 atteint une LD de 4 Bq/cm<sup>2</sup> (ou une AMD de 680 Bq sous le détecteur) dans un bruit de fond  $\gamma$  de l'ordre de 8  $\mu$ Sv/h. Pour atteindre une LD de 0,4 Bq/cm<sup>2</sup> (ou une AMD de 68 Bq sous le détecteur) le bruit de fond  $\gamma$  ambiant ne doit pas dépasser 80 nSv/h.

Le COMO 170 est le contaminamètre qui semble atteindre les meilleurs LD dans un bruit de fond  $\gamma$  ambiant élevé. Toutefois, cet appareil n'étant muni que d'un seul détecteur, il ne peut pas être efficace dans un bruit de fond  $\gamma$  fluctuant.

Nous pouvons clairement constater que les solutions existantes, qu'elles soient anciennes comme les compteurs GM Pancake, plus récentes comme les détecteurs à scintillation ou bien tout juste sorties d'un bureau d'étude, ne sont pas suffisantes pour atteindre le niveau de sensibilité nécessaire pour être utilisable au plus proche des chantiers dans les conditions décrites au chapitre 1.3.2.

Ce constat met en avant le besoin d'impulser une nouvelle dynamique en visant autant que faire se peut les ruptures technologiques qui nous permettront de marquer de réelles avancées dans le domaine des appareils de radioprotection.

## 2.4 Spécifications nécessaires à atteindre dans la présente étude

Les mesures de contamination surfacique  $\beta$  dans une ambiance  $\gamma$  importante représentent un challenge complexe. Afin de pouvoir définir les spécifications que nous devons atteindre dans notre étude, nous allons revenir sur le contexte de réalisation de ces mesures, qu'elles soient réalisées en sortie de chantier ou en sortie de zone. Nous reviendrons également sur l'origine des niveaux de contamination surfacique appliqués en France ainsi que dans le reste du monde. Enfin, nous terminerons par les spécifications que nous retiendrons dans le cadre de notre étude.

### 2.4.1 Rappel des contraintes supplémentaires d'une utilisation sur chantier

Maintenant que l'état de l'art technologique a été abordé, nous allons revenir sur un aspect très important qui est le contexte d'utilisation de l'appareil de mesure. Ce point ne doit absolument pas être négligé car les contraintes imposées par le terrain seront à intégrer à notre réflexion. Ces dernières impliqueront des restrictions qui limiteront nécessairement nos recherches de solution. En d'autres termes, tous les degrés de liberté ne sont pas permis. Notre étude a pris en compte dès le début du projet les conditions d'utilisation et les contraintes liées à la future mise en production de l'appareil.

Les conditions d'utilisation sont assez simples. L'appareil de mesure sera utilisé sur les chantiers, en zone contrôlée, au plus près des zones d'actions générant de la contamination (opération de changement de vanne ou de tuyauterie,...). Les conditions environnementales sont difficiles car il peut par exemple y avoir de brusques variations de température.

Les contraintes liées à l'utilisation d'appareils de radioprotection sur les chantiers sont également mécaniques. Cette utilisation soumet le matériel à rude épreuve et l'une des contraintes majeures sera la solidité du matériel produit. Les appareils sont rangés dans les boîtes à outils, ils peuvent être en contact avec des objets pointus, ce qui peut endommager la fenêtre d'entrée des détecteurs (mica, Mylar<sup>®</sup>,...). Enfin, les intervenants devant réaliser plusieurs fois par jour des contrôles (main, pied et tête notamment), les détecteurs seront manipulés très souvent et par un nombre important d'intervenants. Les chutes d'appareils sont assez courantes et EDF durcit très souvent les exigences



FIGURE 2.30: Exemple de situation sur chantier en zone contrôlée et de contrôle réalisé à chaque sortie de chantier.

des normes lorsque les cahiers des charges sont rédigés par ses services prescripteurs. Par exemple, lors d'un précédent appel d'offres concernant un radiamètre de chantier, EDF a exigé dans son CCTP que l'appareil puisse chuter de 1 mètre de hauteur sur un sol en béton. Une chute devait être réalisée sur chacune des faces de l'appareil et trois chutes devaient être réalisées sur chaque angle de l'appareil. La solidité et la robustesse des appareils ne devront donc pas être négligées lors de notre étude.

Enfin, l'appareil devra être facilement utilisable par n'importe quelle personne et notamment par des intervenants non spécialisés dans le domaine de la radioprotection (voir figure 2.30). Un des problèmes rencontrés par EDF est la négligence ou l'oubli de l'auto-contrôle à la sortie des chantiers. Ces oublis sont dus principalement à deux facteurs : soit l'appareil de mesure n'est pas adapté au bruit de fond ambiant, soit l'utilisation de l'appareil est trop complexe ou peu pratique. L'accent doit donc être également mis sur l'ergonomie de l'appareil et son utilisabilité. Un appareil facile d'utilisation sera automatiquement plus utilisé par les intervenants.

En résumé, au delà des contraintes physiques liées à la mesure d'une faible contamination surfacique dans un bruit de fond élevé et fluctuant, nous devons également ne pas perdre de vue l'utilisation sur chantier de cet appareil. Cette dernière implique une prise en compte des problématiques d'ergonomie (taille et poids), d'utilisabilité (appareil simple et fonctionnel en toutes conditions) et de robustesse (utilisation sur chantier) au même titre que la problématique de mesure physique.

#### 2.4.2 Les limites de contamination surfacique à $4 \text{ Bq/cm}^2$ et $0,4 \text{ Bq/cm}^2$

Après avoir mis en avant les limites de détection et les exigences d'EDF en matière de mesure de contamination surfacique, je vais retracer l'historique de ces dernières. En repartant d'une publication de l'AIEA datant de 1961 [71] qui s'appuie sur une étude de A. Fairbairn [72]. Cette dernière propose les limites de détection que nous avons abordées dans ce manuscrit et qui sont toujours en vigueur aujourd'hui, notamment dans le transport de matières radioactives.

TABLE X

Emitter	Maximum permissible level of non-fixed radioactive surface contamination
Beta or gamma emitters	$10^{-4} \mu\text{c}/\text{cm}^2$
Alpha emitters	$10^{-5} \mu\text{c}/\text{cm}^2$

**Note:** The above levels are permissible when averaged over any area of  $300 \text{ cm}^2$ .

FIGURE 2.31: Copie du Tableau X du Safety Series n°6 de l'AIEA datant de 1961 et reprenant les niveaux de contamination non fixée permis [71].

#### 2.4.2.1 Origine de ces limites

L'origine des limites de contamination surfacique à  $4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  et  $0,4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  est souvent attribuée à l'ADR. L'ADR est l'accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route. Ce document reprend toutes les exigences concernant le transport de diverses marchandises. Les exigences qui nous intéressent particulièrement sont celles du transport de matières radioactives. Pour le transport de matières radioactives de classe 7, les colis transportés doivent satisfaire à plusieurs mesures [73] dont :

- La contamination non fixée est réalisée à l'aide d'un frottis sur une surface de  $300 \text{ cm}^2$ . Les mesures sont faites sur toutes les faces du colis et elles doivent être inférieures à  $4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  et les émetteurs  $\alpha$  de faible toxicité et inférieures à  $0,4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  pour les autres émetteurs  $\alpha$ ,
- Suivant le type de colis, un niveau de débit d'équivalent de dose (DED en  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) ne devra pas être dépassé. Ces mesures de débit devront être réalisées au contact et à 1 mètre de distance.

Certains transports de matières radioactives ne sont pas de classe 7. Il s'agit du transport de matières exemptées<sup>8</sup>. Pour ces colis, les niveaux de contamination surfacique évoqués plus haut sont divisés par 10. Nous avons donc une limite de  $0,4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  et les émetteurs  $\alpha$  de faible toxicité et une limite à  $0,04 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  pour les autres émetteurs  $\alpha$ .

J'ai pu approfondir les précédentes versions de l'ADR et des Safety Series de l'AIEA jusqu'en 1961. Le Safety Series n°6 de 1961 [71] traite des règles à suivre dans le domaine du transport de matière radioactive, notamment, une de ses rubriques est dédiée aux limites de contamination surfacique non-fixée acceptables à la surface des colis. Ces limites étaient respectivement égales à  $10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  et à  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  pour les émetteurs  $\alpha$  (voir figure 2.31). Ces limites converties en  $\text{Bq}/\text{cm}^2$  sont égales à  $3,7 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  et à  $0,37 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  pour les émetteurs  $\alpha$ .

Pour affiner la compréhension de ces limites, il est possible de consulter la publication réalisée par A. Fairbairn et intitulée : " The derivation of maximum permissible levels of radioactive surface contamination of transport containers and vehicles" incluse dans le Safety Series n°7 de l'AIEA [72].

8. matières exemptées : matière radioactive dont l'activité totale transportée ou l'activité massique est inférieure aux seuils d'exemption du Basic Safety Standards de l'AIEA.

Cette étude s'apparente à une étude de poste dans le domaine de la radioprotection. Les risques pris en compte sont : le risque d'irradiation, le risque de dispersion dans l'air, le risque de transfert sur les mains et d'ingestion, entre autres. Les radionucléides de référence utilisés dans l'étude sont le strontium 90 pour l'étude  $\beta$  ainsi que le plutonium et le radium pour l'étude  $\alpha$ . Ces radionucléides sont considérés par A. Fairbairn comme les plus dangereux parmi ceux couramment utilisés.

Un rapport publié par l'AIEA [74] datant de 2005 contenait un chapitre (§4.4) dédié à l'étude et à la critique du modèle utilisé par A. Fairbairn. Il est évoqué notamment l'évolution des modes de transport, des temps d'exposition, des coefficients dosimétriques et des limites de dose. Il est également noté que l'étude des aérosols nous a permis depuis quelques temps de faire de grands progrès sur la compréhension des mécanismes de remise en suspension de la contamination. En conclusion, il est noté que le modèle de A. Fairbairn méritait d'être repris, approfondi et remis à jour. En effet, ce rapport laisse penser que les niveaux de contamination surfacique devraient être abaissés sans toutefois préciser l'ordre de grandeur de cette évolution.

#### 2.4.2.2 Exemples d'application en France et dans le monde

Les exemples proposés dans ce chapitre ne sont relatifs qu'à la radioprotection et qu'aux niveaux de contamination surfacique tout particulièrement.

##### En France

Dans les CNPE EDF, les limites de contamination surfacique de  $4 \text{ Bq/cm}^2$  et de  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  sont reprises afin de définir le zonage propreté/déchets. Ce zonage est défini dans la directive DI104 et le tableau 1.9 résume les différentes zones. Pour les déchets, la réglementation impose de délimiter les zones où les déchets produits sont évaluables dans des filières classiques (zones conventionnelles) et les zones où les déchets produits sont nucléaires (évaluables dans des filières spécialisées). Les enjeux sont multiples [75] :

- Minimiser la quantité de déchets nucléaires en orientant plus de déchets vers la filière classique,
- Faciliter l'accès en zone contrôlée des intervenants,
- Faciliter les futures opérations de démantèlement.

##### Dans le reste du monde

Un rapport édité par le CEPN (Centre d'Etude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire) [76] reprend les critères de classement en zone contrôlée utilisés dans plusieurs pays (avec notamment le Royaume-Uni, la Belgique et les Etats-Unis).

Au Royaume-Uni (centrale nucléaire de Sizewell B), le classement en zone contrôlée C2 pour la contamination surfacique intervient si cette dernière est supérieure à  $4 \text{ Bq/cm}^2$  pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  ou si elle est supérieure à  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  pour les émetteurs  $\alpha$ .

En Belgique (centrale nucléaire de Doel), le classement en zone contaminée est la suivante :

- zone verte : la contamination surfacique (CS) pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  est inférieure à  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ ,
- zone jaune : la CS pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  doit être comprise entre  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  et  $400 \text{ Bq/cm}^2$  .  
Il existe également trois sous-zones dans la zone jaune :

- CS comprise entre 0,4 et 4 Bq/cm<sup>2</sup> pour les émetteurs  $\beta/\gamma$ ,
  - CS comprise entre 4 et 40 Bq/cm<sup>2</sup> pour les émetteurs  $\beta/\gamma$ ,
  - CS comprise entre 40 et 400 Bq/cm<sup>2</sup> pour les émetteurs  $\beta/\gamma$ .
- zone rouge : la CS est supérieure ou égale à 400 Bq/cm<sup>2</sup> pour les émetteurs  $\beta/\gamma$ .

Dernier exemple, aux Etats-Unis (Centrale nucléaire de Cook), les limites utilisées ne sont pas du tout les mêmes que celles observées dans les précédents exemples. Il n'existe que deux types de zone contaminée :

- les zones de contamination : la contamination surfacique (CS) pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  est comprise entre 16,7 Bq/100 cm<sup>2</sup> et 1,6 kBq/100 cm<sup>2</sup> ou pour des émetteurs  $\alpha$  si elle est supérieure à 0,3 Bq/100 cm<sup>2</sup>.
- les zones de contamination élevée : la contamination surfacique (CS) pour les émetteurs  $\beta/\gamma$  est supérieure à 1,6 kBq/100 cm<sup>2</sup>.

Ce tour d'horizon nous permet de voir que chaque pays applique ses propres règles. Nous pouvons quand même constater que les limites issues de l'ADR et qui concernent les contaminations surfaciques de 0,4 et 4 Bq/cm<sup>2</sup> reviennent avec insistance et semblent être souvent prises comme référence.

### 2.4.3 Caractéristiques techniques à atteindre

Pour répondre aux exigences relatives à la mesure, exprimées dans les paragraphes précédents, notre partenaire EDF nous a aidé à fixer quelques caractéristiques à atteindre. La présente étude devra répondre au mieux à plusieurs critères de mesures listés et classés dans la suite de ce chapitre.

#### Limite de détection

Bien entendu, le critère principal reste d'atteindre une limite de détection au minimum égale à 4 Bq/cm<sup>2</sup> (et le plus proche possible de la limite de 0,4 Bq/cm<sup>2</sup>). Cette limite de détection devra être atteinte dans un bruit de fond  $\gamma$  ambiant et fluctuant de 30  $\mu$ Sv/h minimum et pour un temps de mesure faible, de l'ordre de 2-3 secondes.

#### Rendement du détecteur

Le radionucléide de référence sera le <sup>60</sup>Co. Le rendement typique attendu pour ce genre de détecteur est compris entre 15 % et 30 % dans 4 $\pi$  sr.

#### Efficacité surfacique du détecteur

Le contaminamètre devra avoir une surface de détection au minimum égale à 100 cm<sup>2</sup>. La forme carrée est à privilégier car elle permet d'avoir une meilleure répétabilité des mesures.

Afin de garantir une mesure sur 100 cm<sup>2</sup>, nous devons nous assurer que la surface sensible de la sonde a une réponse homogène en tout point. La non-homogénéité tolérée est de +/- 15 % sur toute la surface sensible du détecteur.

### Réponse du détecteur au bruit de fond $\gamma$

Le concept retenu suite à notre étude, bien qu'il vise à être le plus insensible possible au bruit de fond  $\gamma$ , sera quand même influencé par celui-ci. Cette sensibilité a pour unité le  $c/s/\mu Sv/h$  ou le  $Bq/\mu Sv/h$ .

Suivant l'énergie du rayonnement  $\gamma$  incident, la réponse du détecteur est susceptible de changer. Pour cela plusieurs types de sources doivent être testés :

- $^{133}\text{Ba}$  avec  $E_\gamma$  de 356 keV,
- $^{137}\text{Cs}$  avec  $E_\gamma$  de 660 keV,
- $^{60}\text{Co}$  avec  $E_\gamma$  de 1170 keV et 1330 keV.

Pour toutes les énergies, la sensibilité au bruit de fond gamma ambient du contaminamètre devra être inférieure à  $10 Bq/\mu Sv/h$ .

### Réponse angulaire du détecteur au bruit de fond $\gamma$

Le bruit de fond  $\gamma$  a la particularité d'être important et fluctuant temporellement. Mais, ce dernier est aussi fluctuant spatialement (flux non isotrope). Ces fluctuations peuvent, par exemple, être issues d'un mouvement de fluide dans les canalisations d'un local ou du passage d'un sac de déchets fortement irradiant. Afin de se prémunir d'une dépendance spatiale, l'impact de l'angle d'incidence du bruit de fond  $\gamma$  ambient devra être déterminé dans les  $4\pi$  sr par pas de  $5^\circ$ .

Les objectifs fixés dans les paragraphes précédents sont des valeurs cibles à atteindre. Ils nécessitent un effort d'innovation et de R&D important car l'état de l'art effectué montre qu'aucun appareil ne respecte la totalité de ces objectifs.

Evidement, ces caractéristiques de mesure s'accompagnent également d'exigences rappelées dans la partie 2.4.1. C'est à dire que notre appareil devra être conçu de manière à être le plus robuste et fiable possible. Il devra également avoir un design et une ergonomie permettant une utilisation pratique, simple et de ce fait accessible à tous.

## Chapitre 3

# Élaboration et présentation du principe de détection retenu

### Sommaire

---

<b>3.1 Rayonnements ionisants impliqués et leurs interactions avec la matière</b>	<b>89</b>
3.1.1 Rayonnements $\beta^-$ et les interactions $e^-$ /matière . . . . .	89
3.1.2 Rayonnements $\gamma$ et ses interactions avec la matière . . . . .	92
<b>3.2 Présentation des premières estimations et du concept retenu</b>	<b>93</b>
3.2.1 La solution retenue dans le cadre de notre étude . . . . .	93
3.2.2 Les premières estimations obtenues avec ce concept . . . . .	95
<b>3.3 Description de la chaîne de mesure</b>	<b>100</b>
3.3.1 Le scintillateur utilisé et son fonctionnement . . . . .	100
3.3.2 Le guidage de la lumière et les interfaces optiques . . . . .	102
3.3.3 Collection de lumière et photomultiplicateur utilisé . . . . .	105

---

*Après avoir présenté le contexte d'utilisation du contaminamètre, l'état de l'art des techniques utilisées dans le domaine de la radioprotection et énoncé les spécifications techniques visées, nous allons présenter maintenant le concept que nous avons choisi de développer : un détecteur à scintillation. Celui-ci utilise une technologie à base de scintillateurs organiques fins couplés à des photomultiplicateurs via l'utilisation de guides de lumière. Le premier objectif est de minimiser la sensibilité de notre détecteur aux rayonnements  $\gamma$  ambiants tout en conservant un rendement  $\beta$  garantissant une bonne détection de la contamination surfacique. Le second objectif est de concevoir deux détecteurs identiques afin de pouvoir réaliser des opérations de soustraction instantanées du bruit de fond.*

*Nous allons tout d'abord revenir sur les caractéristiques physiques des deux types de rayonnements ionisants auxquels nous sommes soumis. Nous présenterons ensuite plus précisément le principe de détection retenu ainsi que les premières estimations issues de nos calculs de sensibilité. Enfin, nous décrirons en détail les éléments constituant la solution proposée en insistant sur les phénomènes physiques mis en jeu.*

### 3.1 Rayonnements ionisants impliqués et leurs interactions avec la matière

Dans cette étude, le prototype sera soumis à deux types de rayonnements ionisants : les rayonnements  $\gamma$  et les rayonnements  $\beta^-$ . Ils représentent respectivement le bruit de fond et le signal de notre expérience. Les caractéristiques de ces rayonnements ainsi que leurs interactions avec la matière seront développées ci-dessous.

#### 3.1.1 Rayonnements $\beta^-$ et les interactions $e^-$ /matière

Les phénomènes physiques mis en jeu dans les réactions de type  $\beta^-$  et  $\beta^+$  ont été abordés dans le chapitre 1.2.1. Pour compléter la description de ces réactions et plus particulièrement celle de type  $\beta^-$ , nous pouvons préciser que ces dernières se produisent pour des noyaux ayant un excès de neutrons par rapport aux noyaux stables. Les désintégrations  $\beta^-$  étant des réactions à trois corps (noyau fils, électron et anti-neutrino électronique), le spectre observé est continu. La figure 3.1 montre un exemple de spectre  $\beta^-$  issu de nos simulations Monte Carlo, dans cet exemple du carbone 14, qui est un émetteur  $\beta^-$  pur ( $Q_{\beta^- \text{max}} = 156,5$  keV et  $Q_{\beta^- \text{moy}} = 49,16$  keV [77]). Les émetteurs  $\beta^-$  sont souvent des noyaux ayant subi une capture neutronique :  ${}_0^1n + {}_Z^A X \rightarrow {}_Z^{A+1} Y$ , où Y est un émetteur  $\beta^-$ . Il est donc normal de rencontrer fréquemment des radionucléides de ce type dans les centrales nucléaires (un des plus connus est le  ${}^{60}\text{Co}$ ).

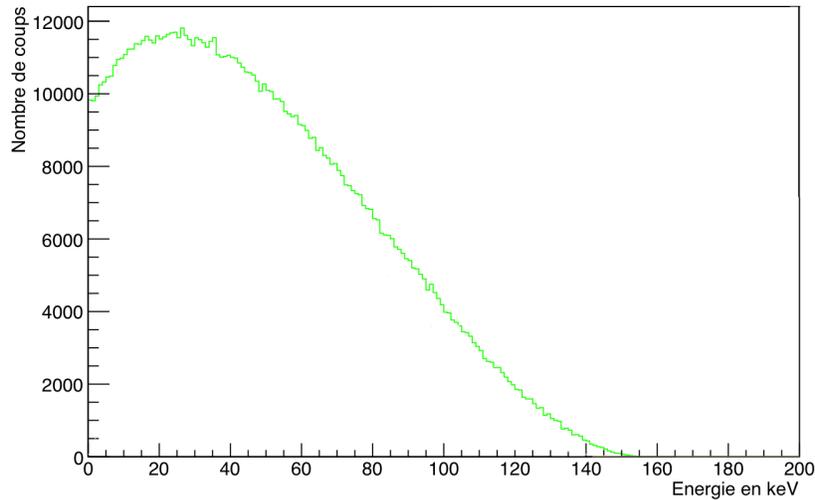


FIGURE 3.1: Exemple de spectre d'émission  $\beta^-$  du carbone 14 issu de nos simulations GEANT4.

Le spectre d'émission  $\beta^-$  de la figure 3.1 représente l'énergie emportée par les électrons lors de désintégrations  $\beta^-$ . Le reste de l'énergie est emporté par l'anti-neutrino électronique, dernier composant de la réaction à trois corps. L'interaction des neutrinos avec la matière étant extrêmement faible<sup>1</sup>, seuls les électrons pourront être détectés. L'interaction électron/matière reste donc à définir.

1. Les neutrinos n'interagissent avec la matière qu'à travers l'interaction faible, leur probabilité d'interaction (ou section efficace) pour une énergie en dessous du MeV est de l'ordre de  $\sigma_{\text{faible}} \lesssim 10^{-44} \text{ cm}^2$  [78]

Plusieurs processus entrent en jeu dans l'interaction entre des électrons et la matière, les principaux sont les suivants :

- L'interaction de l'électron incident avec le nuage électronique de l'atome cible. Ces interactions sont notées ① sur la figure 3.2. Ces dernières entraînent l'ionisation et/ou l'excitation de l'atome rencontré. La déviation de trajectoire de l'électron incident peut être importante (car il n'y a pas de disparité de masse entre l'électron incident et l'électron du nuage électronique).
- La diffusion inélastique sur les noyaux des atomes. Ces interactions sont notées ② sur la figure 3.2. La diffusion inélastique sur le noyau entraîne l'apparition d'un rayonnement X de freinage (rayonnement Bremsstrahlung) continu émis par l'électron dévié. Ce phénomène est important aux hautes énergies (à prendre en compte au delà de quelques MeV) et il augmente avec le Z du matériau.
- La diffusion élastique par le champ Coulombien de l'atome. Ces interactions sont notées ③ sur la figure 3.2. Ces interactions entraînent une perte d'énergie et une déviation beaucoup plus faibles qu'avec les interactions avec le cortège électronique.

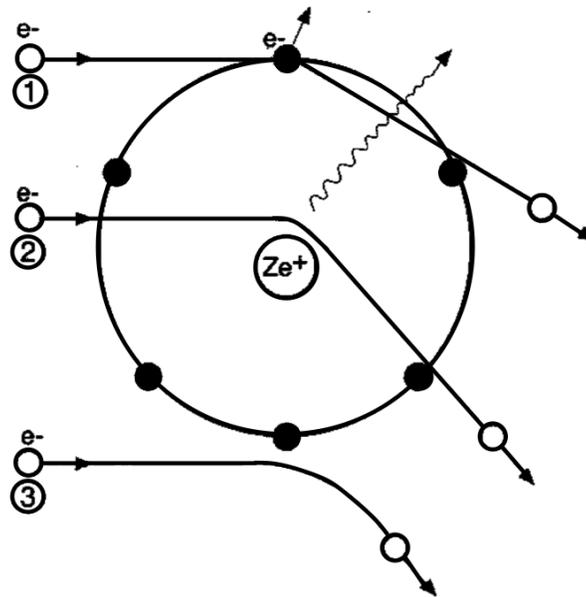


FIGURE 3.2: Représentation des trois principaux processus d'interaction entre un électron et la matière [79, 80].

La perte d'énergie d'un électron lors de son parcours dans la matière est donc principalement due à deux contributions : les diffusions inélastiques sur les atomes composants la matière traversée et le rayonnement de freinage. On peut noter ces composantes :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{diff} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ray}$$

Le comportement et la prépondérance de chaque contribution en fonction de l'énergie des électrons incidents sont représentés sur la figure 3.3 pour la traversée d'une cible en cuivre.

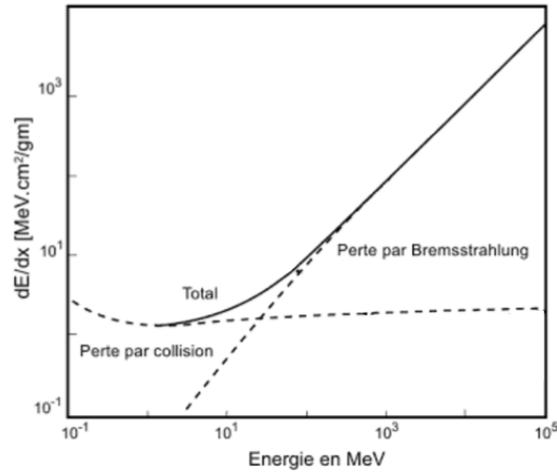


FIGURE 3.3: Perte linéique d'énergie des électrons dans le cuivre en fonction de leur énergie initiale. Les deux principales composantes d'interaction sont notées sur le graphique .

Le parcours des électrons dans la matière est très chaotique. Nous pouvons voir dans la figure 3.4 une illustration de plusieurs trajectoires d'électrons dans la matière. Il est à noter que lorsque la matière à traverser est trop dense ou si l'énergie de l'électron est trop faible, ce dernier peut être rétrodiffusé, on appelle également ce phénomène le backscattering [15].

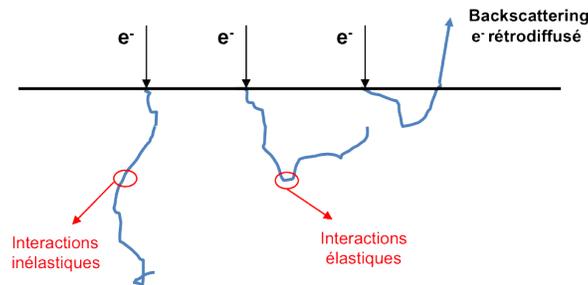


FIGURE 3.4: Exemples de trajectoires d'électron dans la matière. Mise en évidence des différentes interactions élastiques, inélastiques ainsi que le backscattering [80].

Une formule empirique simple peut être utilisée pour estimer la portée maximale  $R$  d'un électron dans la matière. Il s'agit de la relation de Katz et Penfold qui est valable pour des électrons dont l'énergie est comprise entre 50 keV et 2,5 MeV. La relation s'écrit :

$$R (g.cm^{-2}) = 0,412 \times E^n$$

où  $E$  est l'énergie de l'électron incident en MeV et  $n = 1,265 - 0,0954 \times \ln(E)$ .

Pour obtenir un parcours en centimètre, il faut diviser  $R$  en  $g/cm^2$  par la masse volumique du matériau traversé (en  $g/cm^3$ ).

### 3.1.2 Rayonnements $\gamma$ et ses interactions avec la matière

La nature des rayonnements  $\gamma$  a déjà été brièvement abordée au chapitre 1.2.1. Ces derniers, tout comme les rayonnements X, ne sont pas des particules mais des ondes électromagnétiques. Elles sont donc dépourvues de charges et leurs processus d'interactions avec la matière sont donc différents. Les photons  $\gamma$  sont d'origine nucléaire, ils sont par exemple émis lors de la désexcitation d'un noyau ayant lieu après une réaction nucléaire. Les photons X ont, quant à eux, pour origine une désexcitation du cortège électronique ou le freinage dans la matière de particules chargées.

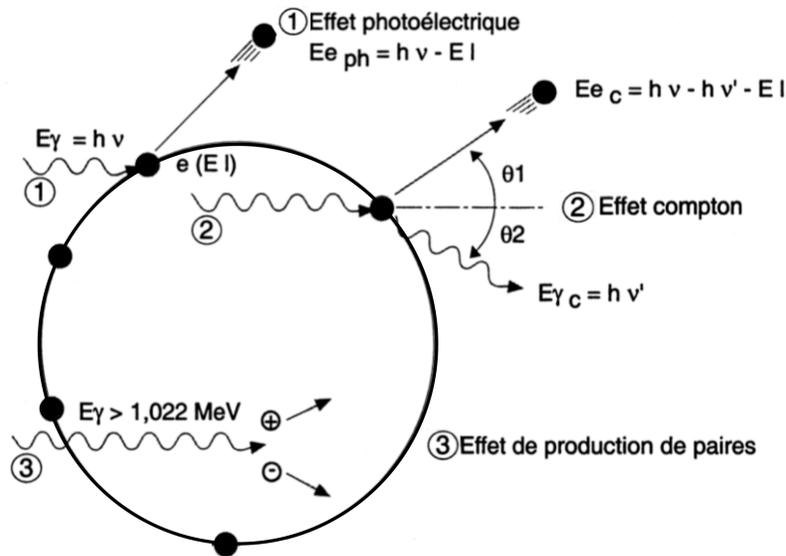


FIGURE 3.5: Représentation des trois principaux processus d'interaction entre un photon et la matière [79].

Les photons  $\gamma$  ont une énergie discrète qui est propre au noyau émetteur. Les photons  $\gamma$  peuvent interagir de plusieurs façons avec la matière mais les trois principaux processus sont les suivants :

- L'effet photoélectrique : le photon disparaît et cède à l'électron du milieu toute son énergie (diminuée de l'énergie de liaison de la couche électronique concernée). Ce phénomène est noté ① sur la figure 3.5.
- L'effet Compton : le photon communique une partie de son énergie à un électron libre du milieu qui est éjecté (électron Compton). Le photon incident est diffusé selon un angle  $\Theta_2$  et l'électron Compton recule selon un angle  $\Theta_1$ . Ce phénomène est noté ② sur la figure 3.5.
- L'effet de matérialisation ou de production de paires : ce phénomène a lieu uniquement pour des photons d'énergie supérieure à 1,022 MeV (soit  $2 \times 511$  keV qui est la  $m_{e^-}$  au repos). Le photon incident va créer une paire ( $e^+ - e^-$ ). Le positron s'annihilera par la suite avec un électron du milieu et créera deux photons de 511 keV émis à  $180^\circ$ . Ce phénomène est noté ③ dans la figure 3.5.

Les trois processus cités ci-dessus sont les principaux phénomènes qui caractérisent l'interaction photon/matière. Cependant, il en existe d'autres telles que les réactions photonucléaires et les diffusions Rayleigh et Thomson.

La prépondérance de chaque processus dépend majoritairement de deux caractéristiques : la densité du milieu traversé et l'énergie du rayonnement incident. Ces deux variables sont représentées dans la figure 3.6. Nous pouvons y observer les domaines de prédominance des effets photoélectriques, Compton et de création de paires.

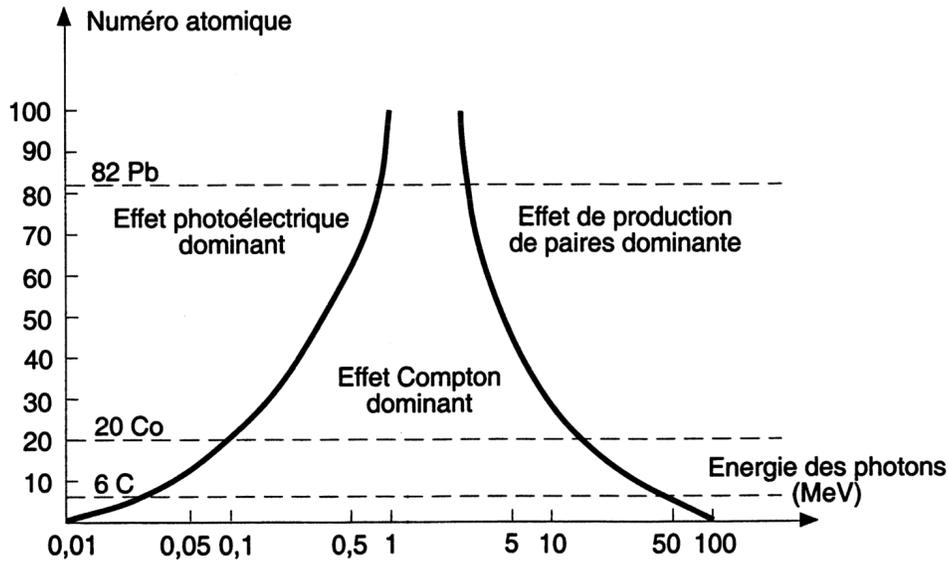


FIGURE 3.6: Domaines de prédominance des différents processus d'interaction photon/matière en fonction de l'énergie du photon incident (en MeV) et du numéro atomique  $Z$  du matériau [15].

L'effet photoélectrique est prépondérant lorsque l'énergie des photons incidents est comprise entre 10 keV et 100 keV ou lorsque le matériau du détecteur a un numéro atomique ( $Z$ ) élevé. L'effet Compton, lui, est prépondérant pour des énergies de photons incidents comprises entre 100 keV et 5 MeV. Il est dominant dans le plomb pour des énergies comprises entre 1 et 3 MeV. C'est encore lui qui est l'effet dominant dans les tissus biologiques principalement composés d'atomes de faible  $Z$  (C,H,O,N, P et S).

## 3.2 Présentation des premières estimations et du concept retenu

Notre étude et le concept élaboré, puis retenu, qui en découle, doit prendre en compte les deux types de rayonnements présentés dans les deux chapitres précédents. Les rayonnements  $\beta$  sont les événements à détecter et à mesurer afin de déterminer la présence de contamination surfacique alors que les rayonnements  $\gamma$  sont nos sources de bruits de fond.

### 3.2.1 La solution retenue dans le cadre de notre étude

Notre premier objectif est d'avoir un appareil aussi insensible que possible aux rayonnements  $\gamma$  ambiants tout en conservant une bonne sensibilité surfacique  $\beta$ . La logique aurait dû nous pousser à prendre un détecteur gazeux. Nous ne l'avons pas fait pour plusieurs raisons :

- les détecteurs gazeux ont très souvent une enveloppe en acier qui les rendent sensibles aux rayonnements  $\gamma$ . Les rayonnements incidents interagissent par effet photoélectrique ou Compton dans l'enveloppe du compteur gazeux.
- notre besoin de mesure de contamination surfacique nous imposera l'utilisation d'un détecteur gazeux avec une fenêtre d'entrée fine, en mica par exemple. Or, cette fenêtre est très fine et très fragile.
- les surfaces de détection disponibles avec des GM de type Pancake ne vont pas au-delà de 15 cm<sup>2</sup>. Alors que notre détecteur doit avoir au minimum une surface de 100 cm<sup>2</sup>.

Notre choix a été d'opter pour l'utilisation de scintillateurs plastiques fins. En effet, cette solution présente plusieurs avantages dont les plus importants sont : sa densité proche de 1, son faible Z et la possibilité de pouvoir adapter l'épaisseur (i.e. le volume) de ce dernier à notre besoin. L'utilisation de scintillateurs organiques de faible épaisseur est un bon candidat qui permet d'obtenir une faible efficacité au flux de  $\gamma$  ambiant (par unité de surface).

La géométrie plane du scintillateur, sa densité et son faible Z laisse également penser que nous conserverons une bonne efficacité de détection des rayonnements  $\beta$  et que nous ne serons pas soumis à une perte d'efficacité résultant du backscattering des électrons de faible énergie à l'interface entre l'air et notre détecteur. Le faible nombre de photons qui seront générés devront impérativement être guidés avec le moins de perte de signal possible vers un photomultiplicateur afin d'être détecté par l'acquisition et maintenir une bonne efficacité  $\beta$ .

Le deuxième objectif de cet appareil est d'être quasiment insensible à des fluctuations importantes et rapides du fond  $\gamma$ . Ces fluctuations ne doivent en aucun cas être confondues avec l'apparition d'un signal  $\beta$ . Nous avons donc pris le parti d'avoir deux scintillateurs plastique identiques dans le contaminamètre avec une voie de lecture indépendante pour chacun : l'un en face avant qui mesure la contamination surfacique  $\beta$  et l'autre légèrement en retrait à l'arrière qui mesure en temps réel le bruit de fond  $\gamma$  dans un angle solide aussi proche que possible.

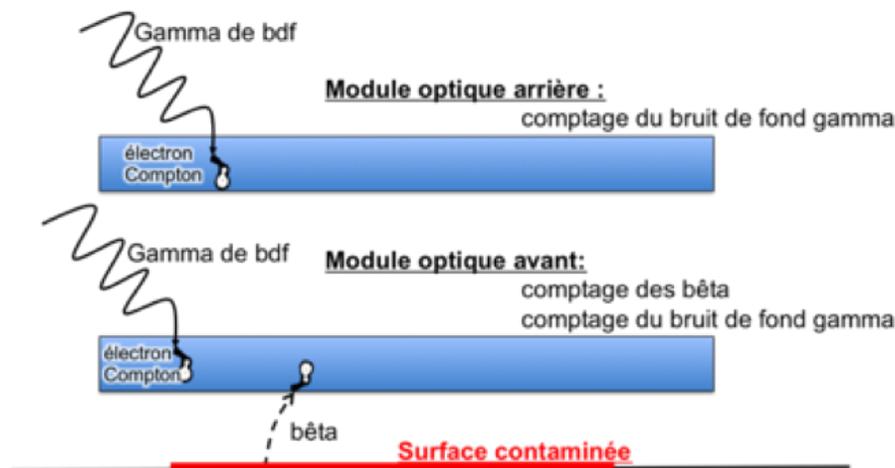


FIGURE 3.7: Schéma de principe du concept retenu. Le détecteur réalisé sera composé de deux modules optiques.

Dans cette solution, le premier détecteur (module optique avant sur la figure 3.7) réalise la mesure de contamination surfacique tout en étant soumis au bruit de fond  $\gamma$ . Le deuxième détecteur (module

optique arrière sur la figure 3.7) mesure seulement le bruit de fond  $\gamma$ . Nous réalisons ensuite une soustraction en temps réel des deux voies de mesure. Ce choix technique devrait nous permettre de nous affranchir des faux positifs qui pourraient se produire lors d'une variation du bruit de fond ambiant. L'avantage est de valider également les limites de détection (LD) qui sont calculées en temps réel grâce à la mesure indépendante et instantanée du bruit de fond  $\gamma$ .

Il faut toutefois dimensionner toutes les épaisseurs et choisir les matériaux les plus adaptés. L'épaisseur primordiale à définir est celle des scintillateurs plastiques. Il faudra également s'attacher à définir la nature et l'épaisseur du boîtier du détecteur. Enfin, la qualité de la collection et de la mesure des photons générés est aussi essentielle.

La solution retenue pour notre étude est l'utilisation de deux détecteurs à scintillation. Chaque module optique est composé d'un photomultiplicateur, d'un guide de lumière en PMMA<sup>2</sup> et d'un scintillateur plastique fin d'épaisseur comprise entre 100 et 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

### 3.2.2 Les premières estimations obtenues avec ce concept

Les premières estimations ont été obtenues en utilisant les coefficients d'interaction/atténuation  $\gamma$  dans les matériaux disponibles sur le site du NIST [81]. Nous avons également utilisé les données d'entrée fournies par EDF sur les flux, l'énergie moyenne des  $\gamma$  ambiants et les radionucléides responsables de ce bruit de fond. Pour la sensibilité  $\beta$ , nous avons également utilisé l'évolution du pouvoir d'arrêt des électrons en fonction de leur énergie. Ces informations sont disponibles sur le site du NIST [82] et sont obtenues à l'aide du programme de calcul ESTAR.

#### Transparence aux rayonnements $\gamma$

Notre prototype doit être le moins sensible possible aux rayonnements  $\gamma$ . Pour ce faire, nous avons donc déterminé l'épaisseur de scintillateur présentant le meilleur compromis entre transparence aux  $\gamma$  et mesure des signaux. En effet, la diminution de l'épaisseur du scintillateur entraîne une production de lumière moins importante et donc des amplitudes de signaux plus faibles.

Nous nous sommes basés sur les informations fournies par EDF. A savoir que :

- le bruit de fond est, le plus souvent, dû au cobalt 60,
- les relevés spectrométriques ont montré que les rayonnements  $\gamma$  pouvaient être diffusés. Les énergies des raies  $\gamma$  du  $^{60}\text{Co}$  sont élevées : 1,173 et 1,332 MeV. Or, le spectre diffus montre que l'énergie moyenne observée est souvent de l'ordre de 300 keV,
- le débit de dose moyen absorbé dans les zones concernées est d'environ 35  $\mu\text{Gy/h}$ .

Nous avons utilisé ces informations pour estimer le taux de comptage attendu sur chaque module optique de notre prototype. Nous avons commencé par utiliser le débit de dose attendu afin de définir une source fictive équivalente. Pour cela nous avons appliqué la formule empirique suivante [83] :

$$\dot{D} = 1,3 \times 10^{-10} \times A_{4\pi} \times E \times I/100 \Rightarrow A_{4\pi} = \frac{\dot{D}}{1,3 \times 10^{-10} \times E \times I/100} \quad (3.2.1)$$

où  $\dot{D}$  est le débit de dose absorbé dans les tissus humains à 1 mètre (en mGy/h),  $A_{4\pi}$  est l'activité (en Bq) de la source fictive dans  $4\pi$  sr, E est l'énergie (en MeV) du rayonnement  $\gamma$  considéré et I est

---

2. PMMA : Polyméthacrylate de méthyle qui est plus connu sous son premier nom commercial Plexiglass (nom déposé).

le rapport d'embranchement (en %) de la raie  $\gamma$  considérée. Attention, cette formule est une formule d'estimation, l'erreur relative sur le débit de dose obtenu est de l'ordre de 10 %.

Pour une énergie  $E$  de 300 keV (en prenant  $I = 100$  %) nous trouvons  $A_{4\pi} = 897,4 \cdot 10^6$  Bq ou  $897,4 \cdot 10^6$   $\gamma/s$  dans  $4\pi$  sr. Maintenant, nous devons calculer l'angle solide correspondant à l'irradiation de notre détecteur. Le débit de dose absorbée considéré dans la précédente formule était à 1 mètre, nous considérerons donc que notre prototype est placé à cette distance.

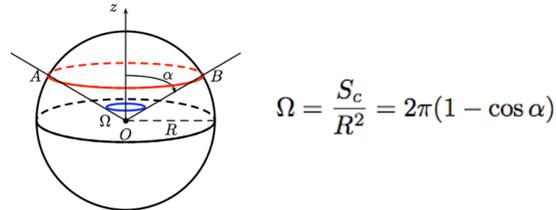


FIGURE 3.8: Calcul de l'angle solide de détection.

Pour cela, nous utilisons la formule décrite sur la figure 3.8. Dans notre cas, en considérant un détecteur d'environ  $100 \text{ cm}^2$  de forme circulaire (soit  $5,6 \text{ cm}$  de rayon) situé à  $1$  mètre de notre source fictive ponctuelle nous avons donc  $\alpha = 3,2^\circ$  et  $\Omega = 9,82 \cdot 10^{-3}$  sr. Le flux déterminé dans  $4\pi$  doit donc être corrigé de ce facteur et donc  $A_\Omega = \frac{\Omega}{4\pi} \times A_{4\pi}$ . Nous obtenons  $A_{\Omega, 0,3 \text{ MeV}} = 701 \cdot 10^3$   $\gamma/s$  à travers notre détecteur.

Ce calcul peut également être réalisé pour le cobalt 60 pur, c'est à dire que nous considérons le spectre du radioélément sans diffusion. Nous avons simplifié le calcul en prenant  $E = 1,25 \text{ MeV}$  et  $I = 200$  % car il y a deux émissions  $\gamma$  en cascade lors de la désintégration du cobalt 60 (voir figure 1.25). Nous obtenons donc  $A_{4\pi} = 1,08 \cdot 10^8$  Bq ou  $2,16 \cdot 10^8$   $\gamma/s$  dans  $4\pi$  sr. L'angle solide est le même que pour le précédent calcul  $\Omega = 9,82 \cdot 10^{-3}$  sr et nous obtenons donc  $A_{\Omega, 1,25 \text{ MeV}} = 170 \cdot 10^3$   $\gamma/s$  à travers notre détecteur.

L'estimation du flux  $\gamma$ , pour un débit de dose absorbé de  $35 \mu\text{Gy/h}$ , traversant chaque scintillateur est donc de l'ordre de  $[2-10] \cdot 10^3 \gamma/s/\text{cm}^2$ . Ces estimations sont issues de la formule empirique 3.2.1 qui donne des résultats avec une erreur relative de l'ordre de 10 % pour des énergies  $\gamma$  comprises entre  $0,3$  et  $1,5 \text{ MeV}$ .

Après avoir trouvé le flux traversant la surface sensible de notre détecteur, il faut maintenant déterminer le nombre de photons  $\gamma$  interagissant avec cette dernière. Pour cela, nous avons utilisé les coefficients d'atténuation massiques déterminés pour le matériau composant notre scintillateur. Les scintillateurs utilisés sont fabriqués sur une matrice de PVT (Polyvinyle Toluène) et la variation de leurs coefficients d'atténuation massique en fonction de l'énergie incidente des rayonnements  $\gamma$  incidents est donnée par la figure 3.9.

À  $300 \text{ keV}$  nous avons un coefficient d'atténuation massique d'environ  $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{g}$  et à  $1,25 \text{ MeV}$  ce dernier est d'environ  $6 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ . Pour obtenir les coefficients d'atténuation linéique  $\mu$ , il faut multiplier le coefficient d'atténuation massique par la masse volumique du matériau traversé qui, dans notre cas, est un scintillateur plastique (PVT ou PS). La masse volumique  $\rho$  correspondante est égale à environ  $1,032 \text{ g/cm}^3$ .

Pour estimer le nombre de photons qui vont interagir dans notre détecteur, nous utilisons la Loi de Beer-Lambert :  $I(x) = I_0 \times e^{-\mu x}$  avec  $\mu$  le coefficient d'atténuation linéique (en  $\text{cm}^{-1}$ ),  $x$

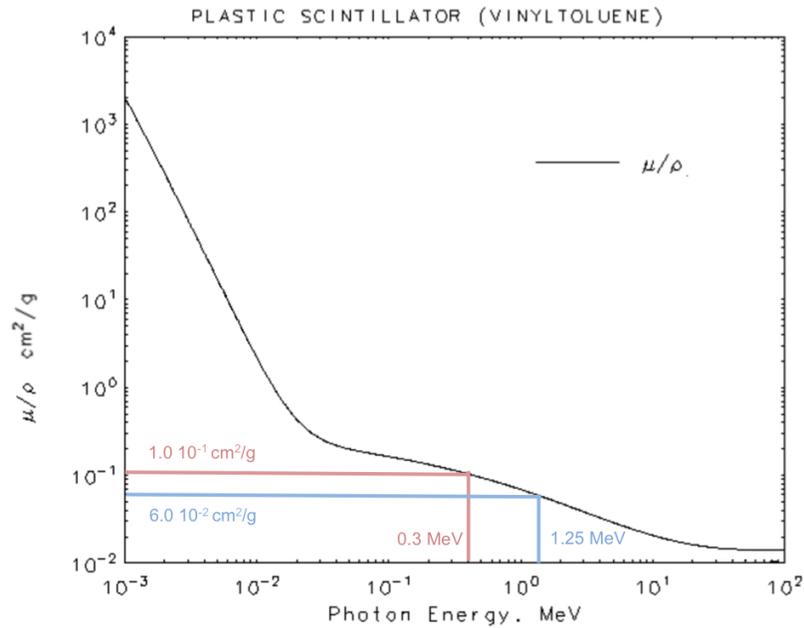


FIGURE 3.9: Evolution des coefficients d'atténuation massique ( $\mu/\rho$ ) en fonction de l'énergie des photons incidents dans du scintillateur plastique [81].

l'épaisseur du matériau (en cm),  $I_0$  l'intensité du flux de photon incident et  $I(x)$  l'intensité du flux de photon à la profondeur  $x$  du matériau considéré. Pour le calcul d'absorption, j'ai pris une épaisseur de scintillateur de  $100 \mu\text{m}$  (il s'agit du minimum disponible pour de grande surface).

Nous avons donc à  $300 \text{ keV}$ , un nombre de  $\gamma$  interagissant dans notre détecteur égal à  $A_\Omega$ ,  $0.3 \text{ MeV}$  multiplié par le coefficient d'absorption  $C_{\text{abs}} = (1 - \frac{I(x)}{I_0}) = (1 - e^{-\mu x})$  correspondant à l'énergie des photons incidents, soit un flux  $\gamma$  interagissant dans notre détecteur égal à environ  $723 \gamma/\text{s}$ . A  $1,25 \text{ MeV}$  le flux  $\gamma$  interagissant dans notre détecteur est environ égal à  $105 \gamma/\text{s}$ .

L'estimation du flux  $\gamma$ , pour un débit de dose absorbé de  $35 \mu\text{Gy}/\text{h}$ , interagissant dans chaque scintillateur de  $100 \mu\text{m}$  d'épaisseur est donc de l'ordre de  $[1-8] \gamma/\text{s}/\text{cm}^2$ . Ces estimations sont toujours issues de la formule empirique 3.2.1 qui donne des résultats avec une erreur relative de l'ordre de  $10 \%$  pour des énergies  $\gamma$  comprises entre  $0,3$  et  $1,5 \text{ MeV}$ .

Cette estimation nous permet d'avoir un ordre de grandeur du nombre d'évènements attendus dans chaque module optique de notre détecteur. Cette composante constitue le bruit de fond et elle sera a priori de plusieurs centaines d'évènements par seconde.

### Sensibilité aux rayonnements $\beta$

Pour réaliser nos estimations de sensibilité et de rendement  $\beta$ , nous nous sommes basés sur le radioélément de référence pour EDF, c'est à dire le cobalt 60. Son  $Q_\beta$  est de  $317,3 \text{ keV}$  et l'énergie moyenne des  $\beta$  émis est de  $95,6 \text{ keV}$  [34]. Nous négligerons l'énergie perdue par ces électrons dans l'air situé entre la surface à contrôler et le détecteur car les calculs effectués à l'aide du pouvoir d'arrêt donné par le programme ESTAR [82] nous indique qu'à l'énergie moyenne de  $95,6 \text{ keV}$  la

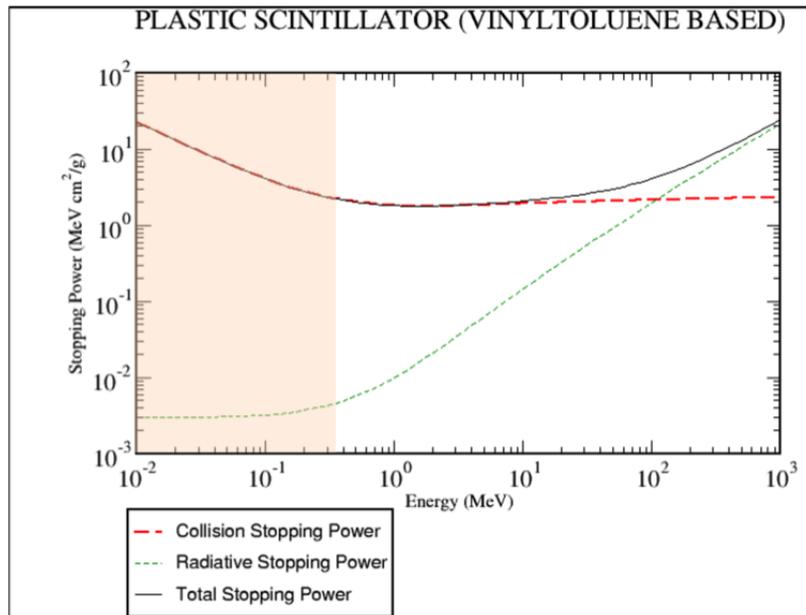


FIGURE 3.10: Evolution du pouvoir d’arrêt pour des électrons dans un scintillateur plastique en fonction de leur énergie d’incidence. La partie orange représente la zone d’intérêt pour le cobalt 60 [82].

perte d’énergie dans 1 cm d’air est d’environ 6 keV. Par contre les particules  $\beta$  émises avec une énergie inférieure ou égale à 15 keV environ seront totalement arrêtées par le centimètre d’air.

A l’aide du programme ESTAR nous avons évalué la quantité d’énergie que déposeront les rayonnements  $\beta$  du cobalt 60 dans notre détecteur. La figure 3.10 reprend l’évolution du pouvoir d’arrêt des électrons dans un scintillateur plastique en fonction de l’énergie des rayonnements  $\beta$  incidents. La zone d’intérêt correspondant à l’énergie des particules  $\beta$  émises par le cobalt 60 est surlignée en orange.

Pour des rayonnements  $\beta$  de 60 keV, la totalité de leur énergie sera déposée dans le scintillateur de 100  $\mu\text{m}$ . Pour des rayonnements  $\beta$  de 90 keV seulement 45 keV seront déposés. Enfin, pour des rayonnements  $\beta$  de 350 keV, l’énergie déposée dans le scintillateur sera d’environ 23 keV. Ce comportement a fait l’objet de simulations Monte Carlo qui seront développées dans la partie 4.4.1.

Ces énergies déposées seront transformées en lumière par le scintillateur. Par exemple, le scintillateur Eljen EJ-212 a un rendement lumineux de 10000 photons/MeV. Cette information nous permet de déduire le nombre de photons créé : il sera compris entre 230 et 600 photons environ.

Cette approximation ne prend pas en compte un phénomène de non linéarité du rendement lumineux en dessous d’une centaine de keV déposée [84] et qui est observé sur les scintillateurs plastiques. Toutefois, notre chaîne de mesure sera utilisée en mode “comptage” et cette non linéarité n’est pas déterminante dans notre cas. Il faudra de toute évidence s’attendre à la perte d’une quantité d’évènements correspondant aux faibles dépôts d’énergie. De plus, ce niveau ne pourra être déterminé qu’expérimentalement car il dépendra aussi du bruit intrinsèque du PM et de sa sensibilité.

Pour la suite du calcul, nous allons nous baser sur les rendements cobalt 60 observés dans la littérature compris entre 24 et 27 % pour des sondes à scintillation munies de scintillateurs plastiques.

Nous choisirons un rendement pessimiste d'environ 20 % dans  $4\pi$  sr. Comme la limite de détection recherchée est de  $4 \text{ Bq/cm}^2$  et que notre sonde a une surface de  $100 \text{ cm}^2$ , notre objectif sera de détecter un terme source de  $400 \text{ Bq}_{\text{eq } ^{60}\text{Co}}$ . Le rendement  $\beta$  ( $^{60}\text{Co}$ ) de 20 % dans  $4\pi$  sr nous donne un taux de comptage attendu d'environ 80 c/s.

En conclusion, nous pouvons déduire de nos calculs de flux  $\gamma$  et du rendement  $\beta$  attendu le rapport signal/bruit (noté S/N) supposé pour notre prototype. Pour rappel, le flux  $\gamma$  interagissant dans notre scintillateur est de l'ordre de  $[1-8] \text{ } \gamma/\text{s/cm}^2$  et le rendement  $\beta$  pour une source de 400 Bq est d'environ 80 c/s. Pour un scintillateur de  $100 \text{ cm}^2$  nous obtenons un rapport signal sur bruit (S/N) de l'ordre de  $[0,1-0,8]$ .

### Ergonomie et solidité

La sonde devra être très peu blindée car le principe de détection de notre prototype réside dans la symétrie entre les deux modules optiques. Nous utiliserons donc des matériaux de faibles Z, à savoir, plastique ABS et/ou aluminium pour le boîtier. L'épaisseur de ce dernier ne dépassera pas 3 millimètres. Le but est d'impacter, le moins possible, l'homogénéité entre les deux modules optiques du détecteur.

La sonde devra être facilement manipulable d'une seule main et son poids ne devra pas dépasser 1 kg.

La surface de détection devra impérativement être comprise entre 100 et  $200 \text{ cm}^2$ . L'appareil devra intégrer un système permettant de maîtriser la distance entre la surface de détection et la surface à mesurer. La sonde sera également équipée d'un dispositif permettant de mesurer la vitesse de passage sur la surface à contrôler. Ces deux derniers points ont pour but de garantir la bonne réalisation des mesures. En effet, si le passage sur la surface à mesurer est trop rapide, l'algorithme n'aura pas le temps de traiter l'information. De même, si la mesure est faite à quelques centimètres de la surface, la mesure  $\beta$  devient inopérante puisque le parcours des électrons dans l'air varie de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres en fonction de l'énergie des électrons considérés.

La solidité de l'appareil à concevoir sera également déterminante car c'est un critère important pour EDF. Nous devons, à cet effet, indiquer la hauteur maximale de chute tolérable sur une dalle en béton afin :

- qu'aucune alarme ne s'active,
- qu'aucune dégradation mécanique ne soit observée,
- que l'intégralité des fonctionnalités soient assurées,
- que la valeur affichée après la chute ne varie pas de plus de +/- 10 % de la valeur affichée avant la chute.

La figure 3.11 montre le premier prototype testé en centrale nucléaire. Il s'agit du prototype v1. Le module optique (MO), en bleu sur la figure, réalise la mesure de contamination et est soumis au BdF ambiant. Le module optique (MO), en rouge sur la figure, réalise uniquement la mesure du BdF. La mesure résultante sera la soustraction de ces deux voies. La logique qui s'ensuit est :  $\text{MO}_{\text{Signal}} - \text{MO}_{\text{BdF}} = (\text{Signal} + \text{BdF}) - (\text{BdF}) = \text{Signal}$ . Ce raisonnement n'est valable que si les deux modules optiques sont identiques et que leurs réponses au BdF sont semblables.

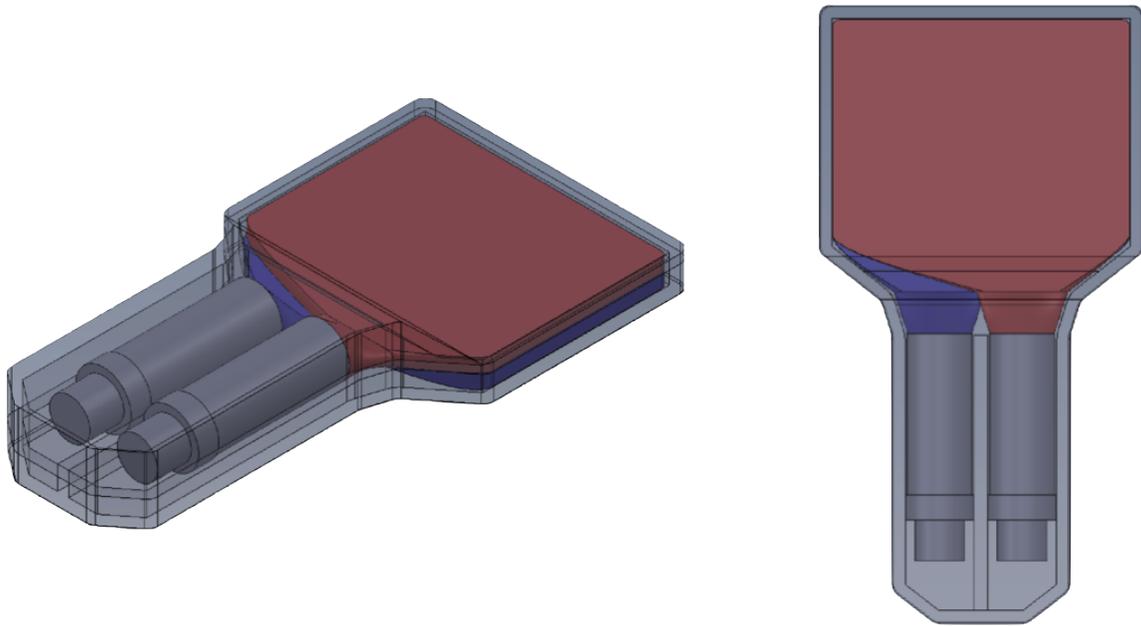


FIGURE 3.11: Vues du prototype de contaminamètre v1. A droite la vue de dessus et à gauche la vue de 3/4 arrière.

### 3.3 Description de la chaîne de mesure

Dans notre étude, le prototype sera composé de deux chaînes de mesure identiques. Ces dernières seront composées : d'un scintillateur plastique fin, d'un guide de lumière et d'un photomultiplicateur. Pour le montage de ces éléments, nous avons testé plusieurs colles et ciments optiques telles que la Stycast 1264 et la BC 630. Les modules optiques sont également isolés de la lumière via l'utilisation d'un film en PET (Mylar<sup>®</sup>) de 12  $\mu\text{m}$  d'épaisseur aluminisé sur ses deux faces. L'épaisseur d'aluminium est de 500 Angström.

#### 3.3.1 Le scintillateur utilisé et son fonctionnement

Les calculs réalisés précédemment ont montré que les scintillateurs choisis devraient être aussi fins que possible afin d'être transparent aux flux  $\gamma$  importants. Nous avons trouvé trois fabricants capables de fabriquer des scintillateurs fins : Saint Gobain, Eljen et Envinet (Nuvia). Les scintillateurs proposés par Eljen étaient des scintillateurs à base de polyvinyltoluène (PVT) de 100  $\mu\text{m}$  ou 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La société Envinet (Nuvia) nous a quant à elle proposé un scintillateur prototype à base de polystyrène (PS) de 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

En plus de l'épaisseur moindre du scintillateur 100  $\mu\text{m}$  d'Eljen, le PVT a un rendement lumineux plus important que le PS (10000 photons/MeV pour le PVT et 7000 photons/MeV pour le PS). Notre choix s'est donc naturellement porté sur le scintillateur plastique de 100  $\mu\text{m}$  fabriqué par la société Eljen. Sa référence est : EJ-212. Il est équivalent aux scintillateurs NE102-A de Nuclear Enterprises Ltd et BC-400 de Saint-Gobain. Le EJ-212 a été spécialement conçu pour être utilisé sous forme de film fin ( $< 5$  mm) et ses principales caractéristiques sont précisées dans le tableaux 3.1.

Propriétés	EJ-212
Efficacité de scintillation (photons/MeV)	10000
Longueur d'onde max. (nm)	423
Longueur d'atténuation de la lumière (cm)	250
Temps de montée (ns)	0,9
Temps de descente (ns)	2,4
Largeur du pulse, FWHM (ns)	2,7
No. d'atomes d'H par cm <sup>3</sup> (x10 <sup>22</sup> )	5,17
No. d'atomes de C par cm <sup>3</sup> (x10 <sup>22</sup> )	4,69
No. d'électrons par cm <sup>3</sup> (x10 <sup>23</sup> )	3,33
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	1,023
Polymère de base	Polyvinyltoluène (PVT)
Indice de réfraction	1,58
Point de ramollissement	75°C
Gamme de température	-20°C to 60°C

TABLE 3.1: Principales caractéristiques du scintillateur plastique EJ-212 fabriqué par ELJEN [85].

Lorsque les rayonnements ionisants ( $\gamma$ ,  $\beta$ ) déposent de l'énergie dans un scintillateur organique comme le PVT (ou le Polystyrène noté PS), les mécanismes mis en jeu (décrits dans la partie 2.2.2) vont générer, surtout, des photons dans le domaine de l'ultraviolet. Seule une petite partie (environ 3 %) de l'énergie est émise sous forme de photons [86]. Or, ces derniers ont un rendement limité. Pour augmenter ce rendement, l'ajout d'un ou plusieurs solutés comme le PPO (2,5-biphenyloxazole) ou le pTP (paraterphenyl) est nécessaire. Ces solutés vont décaler (ou shifter) la longueur d'onde des photons émis. En physique nucléaire, les scintillateurs utilisés sont généralement à minima composés d'un second soluté, comme par exemple le POPOP (1,4-di-(2-(5-phenyloxazolyl))-benzene), dont le but est de décaler encore plus la longueur d'onde d'émission des photons vers la gamme du visible. Ces derniers sont donc mieux adaptés aux photodétecteurs utilisés comme les PM par exemple. La figure 3.12 schématise le mécanisme.

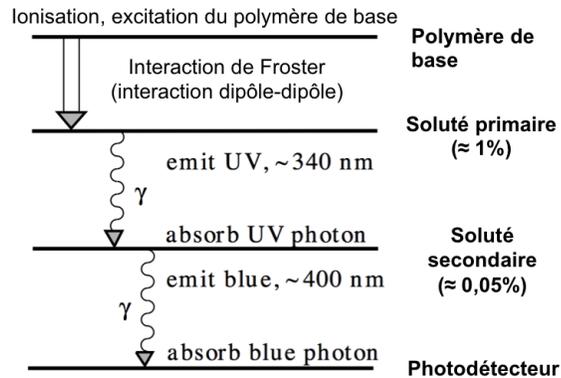


FIGURE 3.12: Les différentes étapes du mécanisme de scintillation dans un scintillateur contenant plusieurs solutés. L'ordre de grandeur de concentration est donné sur la droite de la figure [86]

Au final le spectre d'émission du scintillateur ELJEN EJ-212 est représenté par la figure 3.13 où nous pouvons voir que la valeur la plus élevée du spectre correspond à 423 nm, comme précisé dans le tableau 3.1.

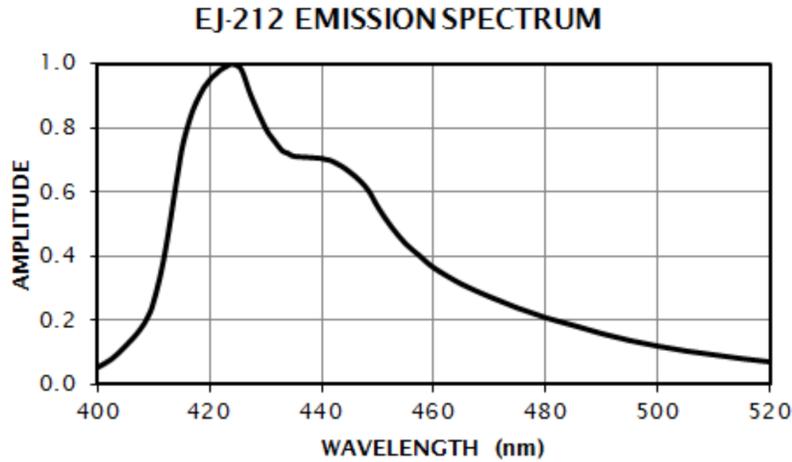


FIGURE 3.13: Spectre en émission du scintillateur ELJEN EJ-212 [85].

### 3.3.2 Le guidage de la lumière et les interfaces optiques

La réalisation d'un guide de lumière ainsi que le choix des colles et ciments optiques font partie des points les plus importants de notre étude. Si nous ne respectons pas certaines règles, le risque sera de perdre en grande partie, voire complètement le signal lumineux et donc le signal en sortie de chaîne de mesure.

#### Colles, ciments et graisses optiques

Le choix des colles et ciments optiques utilisés est primordial pour garantir un minimum de perte de lumière lors des changements de milieu. C'est ainsi qu'il faut être vigilant et adapter les matériaux utilisés en fonction de leurs indices optiques. Les caractéristiques de quelques colles, ciments et graisses optiques utilisés lors de notre étude sont disponibles dans le tableau 3.2. Ce tableau contient également les informations des milieux nécessitant d'être interfacés (verre du PM, guide de lumière et scintillateur).

	BC600	BC630	Stycast 1264	RTV 615	PMMA	Verre borosilicate	EJ-212
Type	ciment	graisse	ciment	colle	Guide de lumière	PM	Scintillateur
Densité	1,18	1,06	1,19	1,02	1,18	2,23	1,023
Indice de réfraction	1,56	1.465	1,54	1,406	1,49	1,49	1,58

TABLE 3.2: Densité et indice de réfraction de colles, ciments et graisses optiques utilisés lors de notre étude. Les données pour les différents milieux à interfacés sont également indiquées [88, 87, 89].

Les choix effectués tiennent également compte des contraintes mécaniques s'exerçant sur les différentes interfaces de nos modules optiques. L'interface scintillateur/guide de lumière n'est que faiblement soumise aux contraintes mécaniques car, d'une part la liaison plan/plan se fait sur une grande surface et d'autre part les contraintes sont normales aux faces impliquées dans la liaison. Par contre, l'interface photomultiplicateur/guide de lumière subit de fortes contraintes mécaniques. Cette liaison est également une liaison plan/plan mais elle est assujettie à une forte contrainte de cisaillement tangentielle aux faces impliquées dans la liaison. Cette contrainte mécanique nous oblige, par exemple, à utiliser un ciment optique plutôt qu'une graisse ou une colle.

### Le guide de lumière

L'optimisation de la transmission de lumière ne s'arrête pas au choix des indices optiques. Comme nous pouvons le constater sur la figure 3.11, il existe une différence de surface entre le scintillateur utilisé (surface d'environ  $100 \text{ cm}^2$ ) et notre PM de 1,5 pouce de diamètre (surface d'environ  $11 \text{ cm}^2$ ). De plus, ces deux surfaces sont également dans des plans perpendiculaires. L'utilisation d'un guide de lumière a donc été nécessaire pour guider la lumière du scintillateur vers notre photomultiplicateur.

Il existe plusieurs façon de guider la lumière au travers d'un guide mais trois familles se détachent (voir figure 3.14), ces dernières diffèrent de par leur forme mais aussi de par leur efficacité de transmission de la lumière. L'efficacité de transmission sera maximale si deux exigences sont respectées : les réflexions totales à l'intérieur du guide de lumière doivent être favorisées au maximum et si le théorème de Liouville sur la conservation des espaces de phase est respecté [90]. Les guides de lumières sont utilisés en général pour transmettre la lumière émise par un scintillateur de grande surface vers un photodétecteur dont la surface de détection est plus faible. Le théorème de Liouville dit que la quantité de lumière qui arrivera sur le photodétecteur (de surface  $S_{\text{Arrivée}}$ ) sera systématiquement inférieur à la quantité de lumière émise (par un scintillateur de surface  $S_{\text{Départ}}$ ) pondérée par le ratio  $\frac{S_{\text{Arrivée}}}{S_{\text{Départ}}}$ .

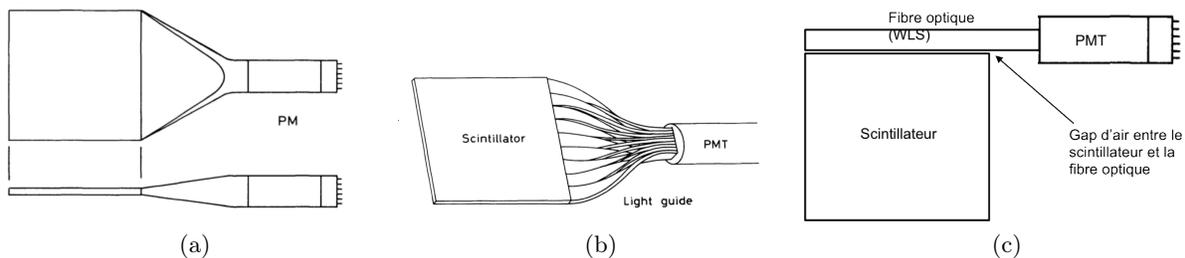


FIGURE 3.14: Différents types de guides de lumière habituellement utilisés en mesure de rayonnements ionisants : (a) GdL de type “fish tail”, (b) GdL de type adiabatique et (c) GdL utilisant une fibre optique shiftreuse. [56, 55]

C'est ce problème qui est rencontré avec les guides de lumière de type “fish tail” représentés sur le schéma (a) de la figure 3.14. Ces derniers sont plus simples à fabriquer, à manipuler et plus résistants mais leur efficacité de transmission des photons lumineux n'est pas optimale. Suivant la qualité de conception et de réalisation du guide de lumière, la transmission sera toujours inférieure

d'un facteur  $\frac{S_{Arrivée}}{S_{Départ}}$ . La transmission de lumière peut être améliorée avec un guide de lumière de type adiabatique représenté sur le schéma (b) de la figure 3.14. Toutefois ce dernier n'est pas non plus optimal puisqu'il permet d'avoir exactement le ratio  $\frac{S_{Arrivée}}{S_{Départ}}$  entre la quantité de lumière au départ (scintillateur) et la quantité de lumière à l'arrivée (PM).

Enfin, dernier type de guide de lumière, l'utilisation de fibre optique shiftreuse (WLS) représenté sur le schéma (c) de la figure 3.14. Cette méthode permet de nous affranchir du problème de conservation des espaces de phases. Elle permet d'obtenir une meilleure transmission optique que celles obtenues avec les guides de lumière présentés précédemment [15]. Le principal point faible de ce dispositif est qu'il collecte moins de lumière que les guides de lumière "fish tail" ou adiabatique et l'interface entre les fibres et le scintillateur doit être particulièrement soignée.

L'utilisation de Mylar<sup>®</sup> aluminisé ou de peinture réfléchive peut être envisagé afin d'améliorer les performances des guides de lumière de type "fish tail". Ces guides de lumière sont appelés hybrides [91]. Le Mylar<sup>®</sup> aluminisé ou la peinture permettent de favoriser les réflexions internes et de minimiser les pertes dues à ce phénomène. Toutefois, le problème de conservation des espaces de phase reste le même que pour le guide de lumière "fish tail" classique. La figure 3.15 reprend des résultats obtenus dans différentes configurations et notamment avec des guides de lumière hybrides.

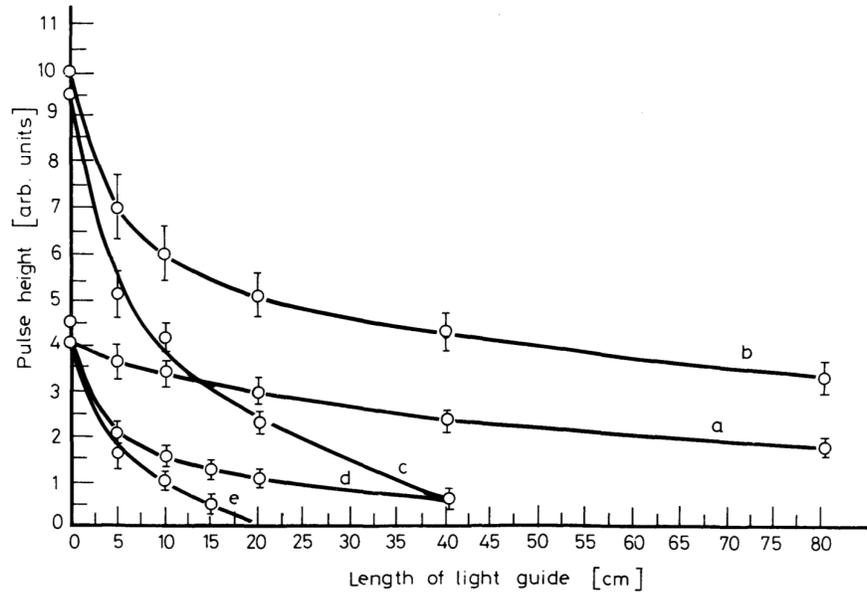


FIGURE 3.15: Evolution de la transmission de lumière en fonction de la longueur du guide de lumière et de différents types de montage. (a) Réflexions totales internes sans réflecteur, (b) Réflexions totales internes avec réflecteur, (c) guide de lumière peint avec une peinture réfléchive, (d) et (e) sont des essais sans guide de lumière [92].

Dans le cadre de la présente étude, nous avons choisi d'utiliser un guide de lumière hybride de type "fish tail" en PMMA recouvert d'un Mylar<sup>®</sup> aluminisé double face de 12  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Ce choix a été motivé par le fait que les guides de lumières adiabatiques sont trop coûteux et ne sont pas pratiques d'utilisation. L'objectif de cette étude étant la réalisation d'un appareil commercialisable, cette solution a été rejetée. L'utilisation de fibre optique reste envisageable mais un premier essai

non-concluant a écarté momentanément cette solution. En effet, les signaux de faibles amplitudes obtenus lors de ces essais indiquent que la quantité de lumière collectée était insuffisante. Par contre, le guide de lumière de type “fish tail” hybride s’est révélé efficace lors de nos essais.

### 3.3.3 Collection de lumière et photomultiplicateur utilisé

Après avoir été créés dans le scintillateur, les photons ont réalisé quatre changements de milieu (d’indices optique différents) : scintillateur/Stycast 1264, Stycast 1264/guide de lumière, guide de lumière/Stycast 1264 et enfin Stycast 1264/verre borosilicate (PM). Les photons vont maintenant interagir avec la photocathode de notre photomultiplicateur, ce dernier transformera le signal lumineux en signal électrique.

#### Le photomultiplicateur

Le choix d’un scintillateur fin a pour incidence de produire peu de lumière, sa combinaison avec un guide de lumière implique que nous ayons peu de lumière collectée. C’est pourquoi, il sera nécessaire d’y associer un photodétecteur très sensible. Ce photodétecteur devra également être rapide car les taux de comptage attendus seront importants (de l’ordre de plusieurs centaines d’évènements par seconde). Le temps mort de notre chaîne de mesure devra donc être minimal. Enfin, les conditions d’utilisation difficiles, notamment les fluctuations de température, nous ont conduits à sélectionner le photomultiplicateur comme photodétecteur.

Suite au choix que nous avons fait pour le guide de lumière de type “fish tail” hybride, nous avons utilisé des PM ET Enterprises de 1 pouce (exemple référence 9111B) et 1,5 pouce (exemple référence 9102B) de diamètre. Notre choix s’est porté sur un PM d’1,5 pouce qui nous permet de conserver une bonne transmission de lumière. L’utilisation d’un PM trop petit (1 pouce) aurait induit un facteur  $\frac{S_{Arrivée}}{S_{Départ}}$  encore plus pénalisant. Ce choix a été confirmé plus tard par des essais qui seront présentés dans le chapitre suivant et nous avons finalement opté pour le PM 9102B de 1,5 pouce de diamètre.

Le premier composant du PM traversé par les photons est son enveloppe de verre. Dans notre cas, le spectre d’émission du scintillateur EJ-212 n’induit pas de problématique particulière, nous avons donc choisi un verre borosilicate classique.

Pour le choix de la photocathode, nous avons encore une fois utilisé le spectre en émission de notre scintillateur. Nous avons choisi une composition de photocathode sensible à cette gamme d’émission. Nous avons opté pour une photocathode bialkali (SbKCs) qui nous offre une bonne réponse sur une gamme allant de 280 à 630 nm [93]. L’évolution de l’efficacité quantique (QE) de cette photocathode en fonction de la longueur d’onde est visible figure 3.16. Cette photocathode est également le meilleur compromis entre réponse et dark current. Le dark current, ou courant d’obscurité, est le courant de faible intensité qui peut être observé à l’anode du PMT en l’absence de rayonnement éclairant ce dernier. Le courant d’obscurité est dû à plusieurs paramètres dont le type, la surface de la photocathode et le gain du PMT [95]. Ce paramètre est important à prendre en compte car un courant d’obscurité trop élevé pourrait entraîner l’impossibilité de réaliser nos mesures. Pour s’en affranchir, nous serions obligé d’augmenter nos seuils de discrimination et perdre la partie du signal qui serait confondue avec nos signaux de faibles amplitudes. Ce phénomène dégraderait notre rapport signal sur bruit.

La photocathode transforme des photons de scintillation en photo-électrons. Ces derniers doivent ensuite être multipliés afin de générer un signal électrique mesurable : c’est le rôle de l’étage de

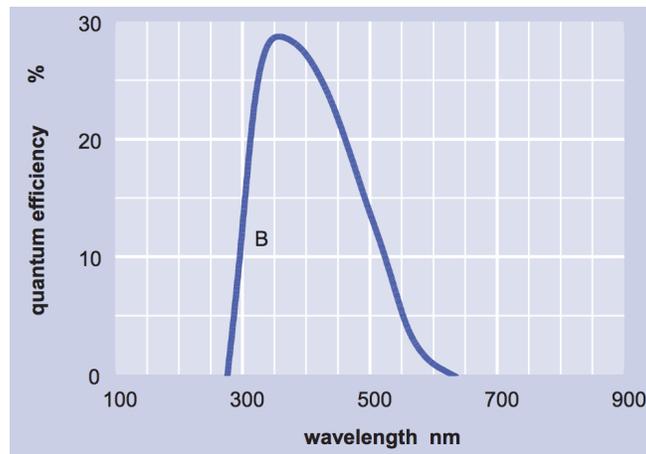


FIGURE 3.16: Evolution de l'efficacité quantique du photomultiplicateur 9102B ET Enterprises utilisé dans notre étude [94]

multiplication. Ce dernier est notamment composé de dynodes. Le choix des dynodes ainsi que la structure de ces dernières entraîne des différences de comportement du PM. Les différentes structures disponibles sont les suivantes : Venitian blind (VB), Circular focused (CF), Box and grid (BG) ou Linear focused (LF). Les points faibles et points forts sont résumés dans le tableau 3.3. Le choix de la matière composant les dynodes est également important et un exemple illustrant ces différences est donné dans le tableau 3.4. Nous avons choisi d'utiliser une structure de type LF et des dynodes de type SbCs car nous privilégions le gain et la stabilité des pulses en fonction du taux de comptage par rapport à la linéarité.

Type de structure	Encombrement	Gain	Timing rapide	Linéarité	Immunité au champ magnétique	After pulse
LF	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓✓	✓✓✓
CF	✓✓✓✓	✓	✓✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓	✓
BG	✓✓	✓✓	✓	✓	✓	✓✓✓
VB	✓	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓✓

TABLE 3.3: Evaluation des différentes structures de dynodes disponibles par rapport à plusieurs critères importants tels que le gain, la linéarité ou encore le taux d'after pulse [93].

Matériaux dynodes	Gain	Linéarité	Stabilité	Variations dues au taux de comptage
SbCs	✓✓✓✓	✓✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓
BeCu	✓	✓✓✓✓	✓✓	✓

TABLE 3.4: Aperçu des différences entre 2 types de matériaux utilisés à la surface des dynodes [93].

Dernier point, le nombre de dynodes est également important car il détermine le gain général

du photomultiplicateur. Nos scintillateurs produisant peu de lumière, le photocourant attendu sera donc relativement faible. ET Enterprises conseille pour le PM 9102B de ne pas dépasser un gain de l'ordre de  $10^6$ . Pour cela, il nous a été conseillé de choisir un nombre d'étages compris entre 8 et 10. Pour assurer un gain suffisant et tenir compte de notre photocourant, nous avons opté pour un PM de 10 étages. Finalement, notre photomultiplicateur a un gain annoncé de  $5,6 \cdot 10^6$  qui correspond aux recommandations d'ET Enterprises. Il est primordial de ne pas utiliser un gain trop important car les autres spécifications du PM seront affectées : dégradation de la linéarité, temps de réponse plus lent, gamme de mesure restreinte, augmentation du courant d'obscurité et diminution de la durée de vie du PM.

### Le pont diviseur et l'alimentation

Les dynodes de l'étage de multiplication ainsi que les dynodes de focalisation doivent être polarisés par une haute tension. Nous avons recours à un pont diviseur de tension fabriqué par la société ET Enterprises dont la référence est HV38K20CP [96]. Le pont diviseur de tension doit assurer une tension de polarisation de l'ordre de la centaine de Volts entre chaque dynode. Les différences de potentiels appliquées entre deux dynodes vont créer un champ électrique qui va permettre de guider les électrons de dynode en dynode. Lorsqu'un électron entre en contact avec une dynode, il va arracher plusieurs autres électrons et ainsi créer l'effet de multiplication des charges. De ce fait, le signal en sortie d'étage de multiplication sera d'un niveau suffisant pour être exploité.

Les ponts diviseurs résistifs comme celui visible sur la figure 2.17 sont habituellement utilisés. Nous n'avons pas choisi cette option mais préféré un pont dit actif pour des raisons techniques définies dans le prochain paragraphe. Ce pont diviseur actif consiste à utiliser un transistor FET associé à une diode Zener et une résistance de haute impédance entre chaque dynode (voir figure 3.17). Ce type de montage permet de garantir un gain constant pour des courants d'anode allant jusqu'à  $100 \mu\text{A}$ .

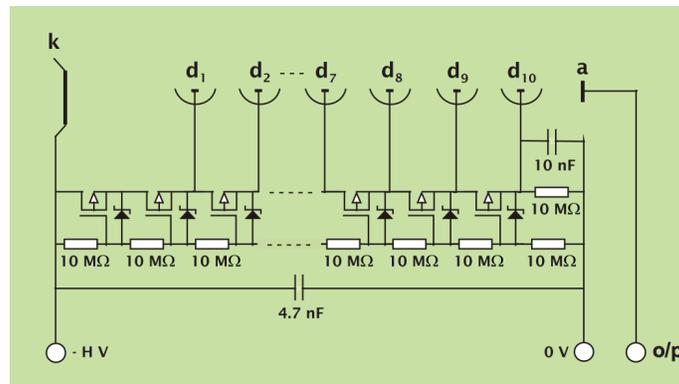


FIGURE 3.17: Schéma de principe du pont diviseur actif utilisé dans notre prototype. Attention, la seule différence réside dans la polarité choisie. Pour des questions de compatibilité électromagnétique nous avons choisi de mettre la cathode à la masse [93, 97].

Un autre avantage non négligeable de ce pont est sa consommation qui est de l'ordre de  $100 \text{ mW}$ . Cette dernière est divisée d'un facteur compris entre 30 et 70 en fonction du courant d'anode considéré par rapport à un pont diviseur purement résistif. La consommation est une problématique

majeure car notre appareil est voué à une utilisation autonome. Nous avons donc choisi d'anticiper cette problématique en choisissant ce type de diviseur de tension. Enfin, ce module dont le schéma général est visible sur la figure 3.18, montre que les problématiques liées à la haute tension sont résolues et il ne nous reste plus qu'à alimenter le module avec une tension comprise entre 5 et 12V.

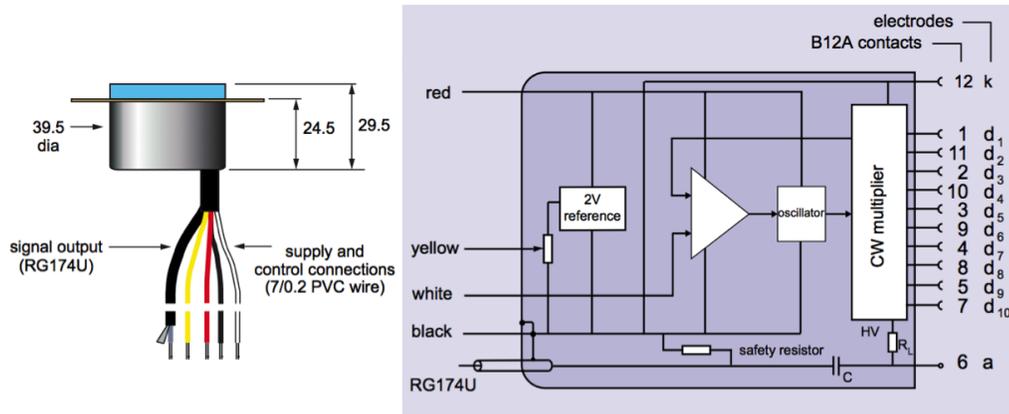


FIGURE 3.18: Schéma de principe de notre module haute tension. Ce dernier inclut le pont diviseur actif et l'alimentation haute tension [96].

En conclusion, la solution recherchée devait être transparente aux flux  $\gamma$  dont l'ordre de grandeur est de  $[2-10] \cdot 10^3 \gamma/s/cm^2$  tout en ayant un rendement  $\beta$  supérieur ou égal à 20 % (au cobalt 60). De plus, ce détecteur doit être adapté à la mesure surfacique et donc posséder une surface active importante, de l'ordre de  $100 \text{ cm}^2$ . Nous avons donc opté pour des scintillateurs plastiques fins disponibles sur le marché. En plus d'être important, le bruit de fond  $\gamma$  est également fluctuant et ce dernier peut connaître des variations rapides. Ce constat nous a conduit à choisir l'utilisation de 2 modules optiques identiques et proches dont l'un ne servira qu'à monitorer le BdF. Après avoir évalué les solutions disponibles sur le marché nous avons donc sélectionné les éléments suivants pour constituer notre prototype :

- Le boîtier de l'appareil sera fin ( $< 3 \text{ mm}$ ) et dans une matière de faible Z (aluminium ou ABS),
- L'appareil sera constitué de 2 modules optiques identiques composés chacun :
  - d'un scintillateur plastique fin Eljen EJ-212 (PVT) de  $100 \mu\text{m}$  d'épaisseur,
  - d'un guide de lumière en PMMA de type "fish tail" hybride,
  - de réflecteur et face avant en Mylar<sup>®</sup> de  $12 \mu\text{m}$  aluminisé double face ( $500 \text{ \AA}$ ),
  - d'un petit PMT ET Enterprises (1,5 pouces) comprenant 10 étages afin d'optimiser le gain et le signal,
  - d'un pont diviseur et d'une HT (positive) garantissant une faible consommation.



## Chapitre 4

# Outils de simulations et validation du principe de détection

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Simulation GEANT4 – Description des outils utilisés . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>4.2</b>	<b>Définition des sources utilisées pour les simulations . . . . .</b>	<b>113</b>
4.2.1	Emetteurs $\beta^-$ , source d'électrons et spectres $\gamma$ utilisés dans les simulations GEANT4 . . . . .	113
4.2.2	Activités et débits de dose mis en jeu . . . . .	114
4.2.3	Directions du flux de photons $\gamma$ étudiées . . . . .	117
<b>4.3</b>	<b>Description du module optique v0 . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>4.4</b>	<b>Simulation des interactions dans un scintillateur plastique . . . . .</b>	<b>119</b>
4.4.1	Interactions $\beta$ et $e^-$ mono-énergétiques avec le module optique . . . . .	119
4.4.2	Interactions $\gamma$ - Evaluation du bruit de fond généré . . . . .	124
<b>4.5</b>	<b>Validation du concept avec le design préliminaire v0 . . . . .</b>	<b>125</b>
4.5.1	Description de la source scellée et du spectromètre à électrons utilisés lors de nos essais . . . . .	126
4.5.2	Méthodologie des essais et résultats obtenus . . . . .	128
<b>4.6</b>	<b>Conclusions des simulations et essais sur les scintillateurs fins et le module optique v0 . . . . .</b>	<b>138</b>

---

*Après avoir présenté le principe de détection que nous avons retenu dans le chapitre précédent et exposé les premiers calculs ayant guidé notre choix, nous allons maintenant approfondir l'étude de ce concept. A ces fins, nous avons travaillé sur la réalisation de simulations par méthode Monte Carlo des performances attendues pour les différents prototypes à l'aide du programme GEANT4 et sur la réalisation d'un premier prototype de module optique.*

*Ces étapes nous ont permis d'affiner les premiers calculs effectués en utilisant des données d'entrée plus complexes et détaillées. Nous avons pu intégrer à notre simulation des spectres  $\gamma$  mesurés in-situ dans un bâtiment réacteur (BR) d'une centrale nucléaire. Elles ont été réalisées au plus près des chantiers et donc proches des conditions réelles d'utilisation de notre futur appareil. Ce travail nous a également permis de parfaire nos choix sur les matériaux utilisés et les dimensions à choisir pour la réalisation de prototypes.*

*Les premiers essais effectués nous ont également permis de valider la technologie de scintillateurs fins, couplés à un guide de lumière en PMMA et à un photomultiplicateur.*

*Dans ce chapitre, nous présenterons donc tout d’abord les outils de simulation utilisés. Nous détaillerons les différentes entrées fournies par notre partenaire EDF et les premiers résultats de simulation obtenus. Nous aborderons ensuite la méthodologie mise en place lors des premiers essais effectués sur les scintillateurs pré-sélectionnés ainsi que les résultats obtenus avec notre prototype de module optique  $v0$ . Enfin, nous conclurons avec le bilan de ces simulations et essais préliminaires qui constituent une preuve de faisabilité.*

## 4.1 Simulation GEANT4 – Description des outils utilisés

GEANT4<sup>1</sup> est une boîte à outils de logiciels écrits en C++ qui permet de construire et utiliser des simulations Monte Carlo afin de simuler le transport et l’interaction de rayonnements dans la matière [98]. Il est en libre accès sur le site internet de la collaboration GEANT4 qui se charge du développement et de la mise à jour de cet outil [99]. GEANT4 a été initialement développé par le Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) afin de simuler les collisions à hautes énergies se produisant dans les grands détecteurs installés sur le LHC (Large Hadron Collider) tels que ATLAS ou CMS. La gamme de validité en énergie a ensuite été étendue aux basses énergies (environ 100 eV) et GEANT4 est maintenant également utilisé dans d’autres domaines comme la radioprotection, la physique médicale (radiothérapie) ou encore le spatial.

La base de données du code de calcul rassemble la majorité des connaissances acquises dans le domaine de l’interaction rayonnement matière et en physique nucléaire comme, par exemple, les sections efficaces des différentes interactions, les énergies d’émission des rayonnements  $\gamma$  et désintégrations  $\beta$  ainsi que leurs rapports d’embranchements.

Le noyau de GEANT4 compte 17 classes (voir figure 4.1). Celles figurant au bas du diagramme sont utilisées par toutes celles placées au dessus. Chacune de ces classes contient des sous-classes que l’utilisateur peut modifier afin d’adapter le code à son application. Parmi les classes présentées dans le diagramme nous pouvons citer :

- “Global” qui comporte le système d’unités, les différentes constantes numériques et physiques, ainsi que les classes permettant le tirage de nombres aléatoires.
- “Geometry” et “Material” qui contiennent les classes permettant de décrire la géométrie des détecteurs (description de certaines formes géométriques, caractéristiques physiques et composition des matériaux utilisés,...)
- “Track”, “Processes” et “Tracking” qui regroupent les processus physiques appliqués à chaque type de particule et permettent de décrire sa trajectoire.
- “Event” qui est composé des classes décrivant l’ensemble d’un événement (historique complet d’une particule primaire et de ses particules secondaires depuis leur génération jusqu’à leur disparition).
- “Run” qui fait référence aux classes qui gèrent l’ensemble des événements d’un run.

Une simulation GEANT4 rend compte de l’interaction des rayonnements dans la matière. A partir des données et des théories implémentées dans les différentes sous-classes, le logiciel calcule les sections

---

1. GEANT4 est l’acronyme de GEometry ANd Traking 4 [99].

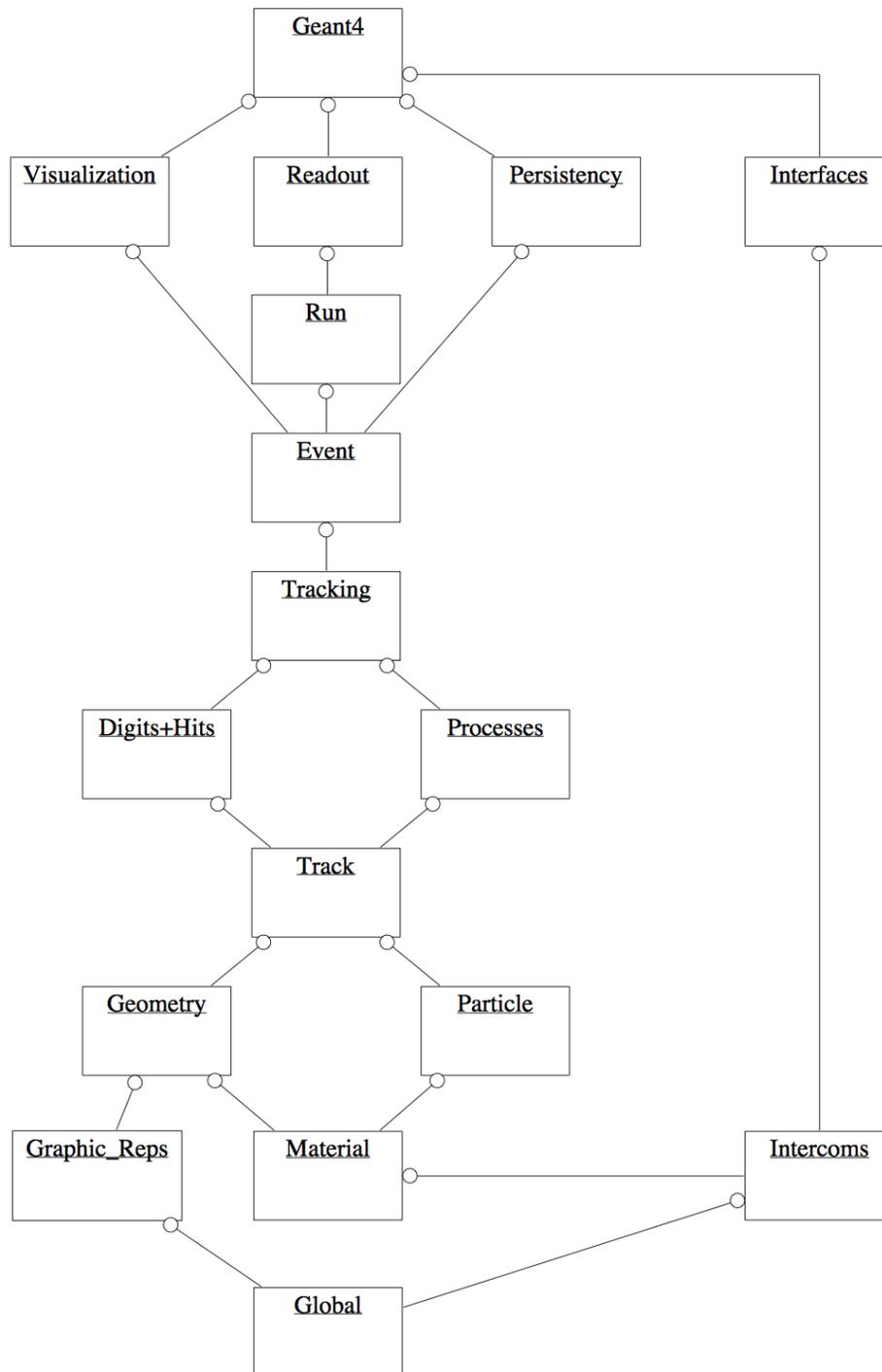


FIGURE 4.1: Schématisation des 17 grandes classes composant GEANT4. Les liens représentent des dépendances uni-directionnelles. Les classes situées en bas du diagramme sont utilisées par celles placées au dessus [98].

efficaces associées aux différents processus et les applique aux particules durant leur propagation via des tirages aléatoires. Par exemple, un rayonnement  $\gamma$  issu d'une désintégration d'un noyau de cobalt 60 pourra interagir avec son milieu (air, détecteur,...) suivant plusieurs phénomènes possibles (photoélectrique, Compton,...). Si ce rayonnement  $\gamma$  interagit et conduit à la production d'un ou plusieurs électrons, ces derniers seront à leur tour soumis à l'algorithme Monte Carlo.

Une simulation est structurée, au minimum, à l'aide de trois classes :

- “*DetectorConstruction*” permet de décrire la géométrie, les matériaux, et les volumes que l'on souhaite intégrer à une simulation (détecteurs, environnement,...).
- “*PhysicsList*” dans laquelle l'utilisateur décrit les différents types de particules utilisés et active les processus physiques qu'il souhaite simuler.
- “*PrimaryGeneratorAction*” définit le générateur de particules (type de particules, énergie, position initiale,...).

Dans notre étude, nous avons utilisé la version GEANT4 9.6 patch 2 pour toutes les simulations d'interactions rayonnement-matière. Ces simulations ont pour but de valider les premières estimations réalisées au chapitre 3.2 et font le lien avec les essais qui seront présentés en fin de chapitre.

## 4.2 Définition des sources utilisées pour les simulations

Les simulations GEANT4 que nous avons réalisées ont été améliorées et ajustées au fil du temps en tenant compte des remarques de notre partenaire EDF. Nos échanges nous ont permis d'obtenir une définition plus précise en matière de flux et d'énergie des photons  $\gamma$ . Nous avons notamment pu travailler avec des spectres  $\gamma$  réels issus d'acquisitions réalisées dans le BR (bâtiment réacteur) d'un CNPE. Les différentes sources présentées ici ont servi au développement de tous nos prototypes : le prototype de module optique v0, le premier prototype complet v1 ainsi que les deux derniers prototypes fonctionnels v2.1 et v2.2.

### 4.2.1 Emetteurs $\beta^-$ , source d'électrons et spectres $\gamma$ utilisés dans les simulations GEANT4

#### Emetteurs $\beta^-$ et source d'électrons concernés par notre étude

Pour la mesure de contamination surfacique  $\beta$ , le radioélément de référence pour EDF est le cobalt 60. Bien que ce dernier soit au centre de notre étude, nous avons souhaité comprendre tous les comportements et phénomènes mis en jeu dans notre prototype. A cet effet, nous avons travaillé sur plusieurs radioéléments susceptibles d'être détectés en conditions réelles. Ces informations sont issues de plusieurs campagnes de mesures réalisées par EDF et l'IRSN [100] sur plusieurs CNPE. L'étude de ces documents nous a permis de constater que la nature des radioéléments ainsi que leur répartition variaient fortement en fonction de la phase d'arrêt de tranche (AT). Le tableau 4.1 donne un aperçu des contaminants présents et s'ils sont ou non émetteurs  $\beta^-$ .

Pour affiner la compréhension de notre système, nous avons également simulé des électrons mono-énergétiques. Ces derniers nous permettent de comprendre certains phénomènes qui sont lissés lors de la simulation d'un spectre  $\beta$  entier continu. De plus, ces simulations d'électrons mono-énergétiques sont intéressantes car le groupe Neutrino Faibles radioactivités dispose de 2 spectromètres à électrons capables de délivrer des faisceaux d'électrons mono-énergétiques dans une gamme d'énergie comprise

Radioéléments	Émetteur $\beta^-$ / $Q_\beta$ (max)
cobalt 60	oui / 317,3 keV (99,9 %)
cobalt 58	non
manganèse 54	non
argent 110 m	oui / 84,1 keV (67,5 %)
chrome 51	non
niobium 95	oui / 925,6 keV (99,9 %)
zirconium 95	oui / 1124,8 keV (54,5 %)
mercure 197 m	non
autres	-

TABLE 4.1: Exemples de radioéléments mesurés lors d'un arrêt de tranche (prélevés en fond de piscine)[101].

entre 0,4 et 1,8 MeV. Il sera donc possible de faire des simulations avec des spectres continus ou des émissions discrètes et de les comparer avec des essais pour les deux situations.

### Spectre des rayonnements $\gamma$ du bruit de fond ambiant

Les rayonnements  $\gamma$  du bruit de fond dans lequel le prototype sera utilisé sont majoritairement dû au cobalt 60. Or, le flux de photons  $\gamma$  généré n'est pas identique à celui d'une source utilisée lors des étalonnages. Nous sommes ici en présence de rayonnements  $\gamma$  diffus. Ce comportement est lié à la présence de matériaux très denses (béton des murs, canalisations épaisses en alliage très résistant,...). Les photons  $\gamma$  émis par les radioéléments interagissent par effet Compton dans ces matériaux et perdent une partie de leur énergie.

Notre partenaire, EDF GPRE, nous a fourni des fichiers d'acquisitions de spectrométrie  $\gamma$  effectuées sur site, dans un BR, à l'aide d'un détecteur germanium. Le lieu exact des acquisitions réalisées est représenté sur la figure 4.2. Les spectres obtenus montrent la présence de plusieurs radionucléides ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{97}\text{Zr}$ , ...). Un des spectres est visible sur la figure 4.3, où nous voyons que l'énergie moyenne des rayonnements se situe plutôt aux alentours de 300 keV.

Le spectre des photons  $\gamma$  ambiants peut être très différent suivant les zones de travail. Par exemple, pour des points chauds générés par des gratons<sup>2</sup> de cobalt 60, le spectre peut être : soit très pur et présenter des énergies photoniques proches de leurs énergies d'émissions (à 1,17 MeV et 1,32 MeV), soit être très diffus avec une énergie moyenne d'environ 300-400 keV. L'origine des différences observées entre les spectres est expliquée dans le paragraphe précédent. Le spectre utilisé est corrigé de l'efficacité du spectromètre  $\gamma$  utilisé pour cette mesure (le spectromètre est un germanium HPGe 45 % fabriqué par Canberra).

#### 4.2.2 Activités et débits de dose mis en jeu

L'activité surfacique que nous serons amené à mesurer sera comprise entre 0,4 et 4 Bq/cm<sup>2</sup>. Toutefois, en cas de présence d'une particule porteuse d'une grosse contamination (graton), l'acti-

2. Gratons radioactifs : fines particules ayant été activées par un flux intense de neutron.

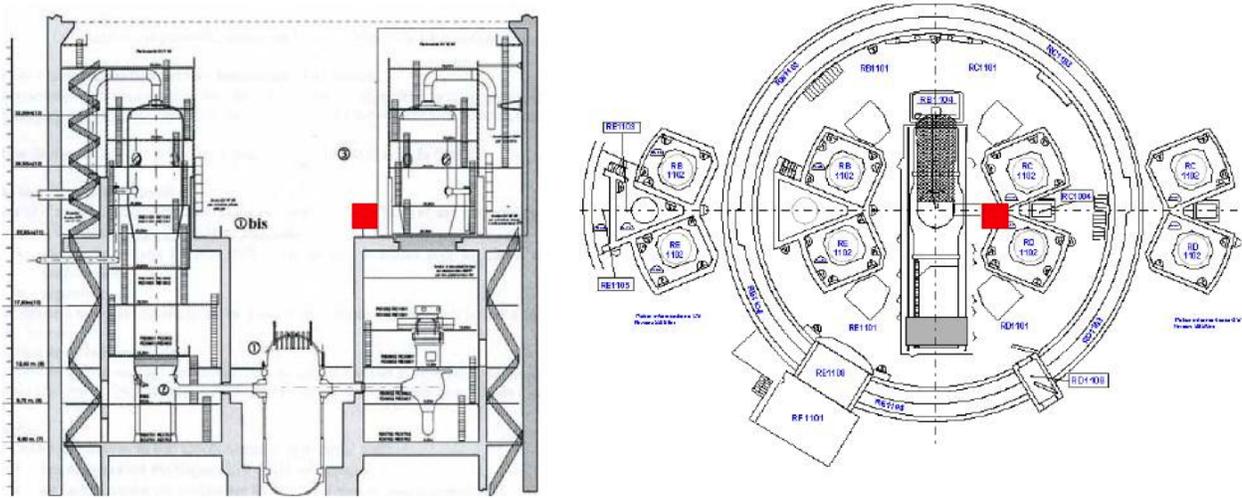


FIGURE 4.2: Vues en coupe latérale et de dessus du BR, avec en rouge l'emplacement du détecteur.

tivité mesurée pourra atteindre plusieurs dizaines de kBq équivalent cobalt 60. Le détecteur devra impérativement détecter ces gratons qui sont très impactants pour la dosimétrie des intervenants.

La source de contamination à mesurer en situation réelle pourra être étendue ou ponctuelle. Dans nos simulations, nous avons tout d'abord opté pour la modélisation d'une contamination ponctuelle. Ce choix nous permet de nous affranchir dans un premier temps du calcul d'angle solide complexe. Cela nous permet également de pouvoir reproduire les simulations en laboratoire avec des sources de cobalt 60.

Nous avons également réalisé plusieurs simulations avec des électrons mono-énergétiques. Des mesures avec un spectromètre à électrons nous ont permis de compléter ces simulations et de mieux comprendre le comportement des différents scintillateurs.

L'échantillonnage du spectre  $\gamma$  a été adapté afin de pouvoir être intégré à notre simulation GEANT4. Les simulations effectuées comprennent plusieurs dizaines de millions d'événements tirés de manière à reproduire le spectre  $\gamma$  présenté figure 4.3. Les spécifications fournies par EDF pour quantifier le bruit de fond  $\gamma$  sont des débits de dose (en  $\mu\text{Sv/h}$ ). Nous avons donc dû trouver un moyen de convertir les débits de dose en flux  $\gamma$  et inversement. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur le rapport 74 de la CIPR<sup>3</sup> [102] qui définit les différents coefficients de conversion à utiliser dans le cadre de la protection radiologique contre les rayonnements externes. Parmi ces coefficients, nous avons utilisé les facteurs de conversion fluence-équivalent de dose (voir figure 4.4). L'évolution du coefficient  $H^*(10)/\Phi$  présenté dans la figure citée précédemment nous a permis de déterminer le facteur de normalisation qui nous permettra de convertir les flux  $\gamma$  simulés en débit d'équivalent de dose. Le facteur de normalisation ( $F_{\text{norm.}}$ ) peut être représenté par la formule suivante :

$$F_{\text{norm}} = \frac{1}{S_\gamma} \times \frac{\int [N(E) \times H^*(10)/\phi(E)] dE}{Ded}$$

3. CIPR : La Commission internationale de protection radiologique est une organisation non-gouvernementale dont l'objectif est d'apprécier l'état des connaissances sur les effets des rayonnements afin d'identifier leurs implications du point de vue des règles de protection à adopter.

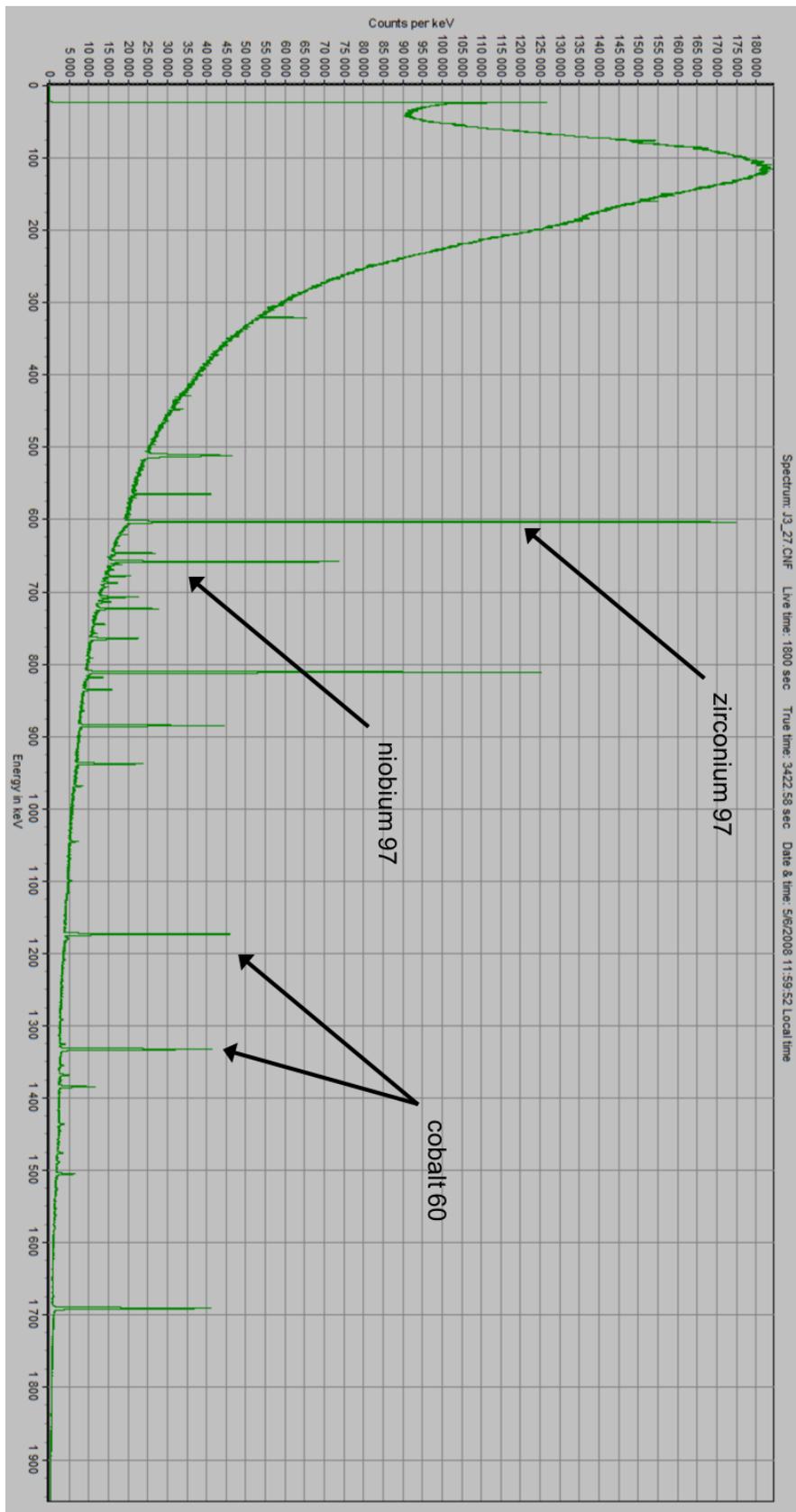


FIGURE 4.3: Spectre  $\gamma$  mesuré à l'intérieur d'un BR à l'aide d'un spectromètre germanium de type HPGe 45 % de Canberra.

où  $S_\gamma$  est la surface traversée par le flux de photons (en  $\text{cm}^2$ ),  $N(E)$  est le nombre d'évènement présent dans le canal  $E$  du spectre  $\gamma$ ,  $H^*(10)/\Phi(E)$  est le coefficient de conversion flux/DED pour des photons d'énergie  $E$  (en  $\text{pSv.cm}^2$ ) et  $D_{\text{ed}}$  est le débit d'équivalent de dose que nous souhaitons simuler en  $\mu\text{Sv/h}$ . Le spectre fourni par EDF est donc convolué à la courbe de facteur de conversion pour les débits d'équivalent de dose  $H^*(10)$ <sup>4</sup>. Le but est d'obtenir la contribution de chaque composante en énergie du spectre  $\gamma$  au débit d'équivalent de dose ambiant. La valeur de  $D_{\text{ed}}$  utilisée dans nos simulations était de  $35 \mu\text{Sv/h}$ .

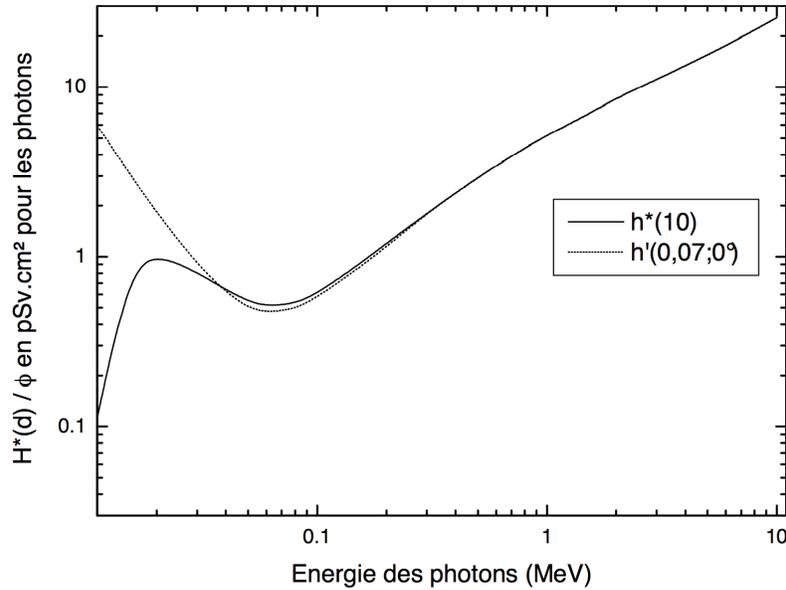


FIGURE 4.4: Facteurs de conversion d'équivalent de dose ambiant par unité de fluence à des profondeurs de 0,07 et 10 mm dans les tissus d'après la CIPR74 pour les photons [102].

### 4.2.3 Directions du flux de photons $\gamma$ étudiées

Bien que l'étude proposée vise à mettre en place des modules optiques identiques, la réalisation de ces derniers nous montre que notre concept sera soumis à des inhomogénéités. Bien sur, les deux modules seront a priori physiquement identiques mais suivant l'incidence du bruit de fond  $\gamma$ , leur réponse pourra varier légèrement. En effet, les scintillateurs plastiques seront couplés optiquement à des guides de lumière (GdL) en PMMA de plusieurs millimètres d'épaisseur. Si le flux  $\gamma$  est directionnel, et, suivant son orientation : soit il traversera en premier le scintillateur, soit il traversera d'abord le guide de lumière puis le scintillateur. Or, la présence d'un GdL en PMMA risque d'entraîner des inhomogénéités de réponse angulaire au bruit de fond  $\gamma$ . L'étude repose en grande partie sur le fait que les modules optiques utilisés devront être le plus homogènes possible. La réalisation de simulation  $\gamma$  dans plusieurs configurations d'irradiations est donc une étape cruciale pour le développement des différents prototypes.

4. Rappel : L'équivalent de dose ambiant,  $H^*(d)$ , en un point du champ de rayonnement, est l'équivalent de dose qui serait produit par le champ expansé et unidirectionnel correspondant, dans la sphère ICRU, à une profondeur "d", sur le rayon opposé à la direction du champ unidirectionnel. On utilise  $d = 10$  mm pour les rayonnements fortement pénétrants et 0,07 mm pour les rayonnements faiblement pénétrants (dose à la peau) [103].

Ce constat nous oblige donc à tester plusieurs configurations dont les principales sont :

- l’irradiation dans  $2\pi$  avant,
- l’irradiation dans  $2\pi$  arrière,
- l’irradiation dans  $4\pi$ .

Dans le contexte de l’étude réalisée, nous pouvons nous attendre à ce que les émissions  $\gamma$  soient diffuses et arrivent donc dans  $4\pi$ . Toutefois, la présence d’un point chaud ou le passage d’un sac de déchets radioactifs peut induire la présence d’une émission dans une direction préférentielle.

Pour aller plus loin dans le raisonnement, le détecteur final sera capoté et surtout les deux guides de lumière en PMMA seront superposés. L’atténuation de ces couches de PMMA pour des  $\gamma$  de 300 keV sera de l’ordre de quelques dizaines de pourcents.

Afin de recréer un flux  $\gamma$  représentatif dans les simulations, nous avons utilisé comme source la surface d’une sphère de 75 cm de rayon (ou demi-sphère, voir figure 4.5). Lors d’une émission  $\gamma$ , son énergie est déterminée en tirant aléatoirement celle-ci dans le spectre  $\gamma$  issu des mesures d’EDF. Ce dernier est ensuite émis dans un angle solide défini pour irradier l’ensemble du module optique. Cet angle devra être assez resserré pour optimiser le temps nécessaire pour chaque simulation. Dans notre cas cet angle était inférieur à  $10^\circ$  car la surface de la sphère utilisée comme origine des rayonnements  $\gamma$  avait un rayon de 75 cm.

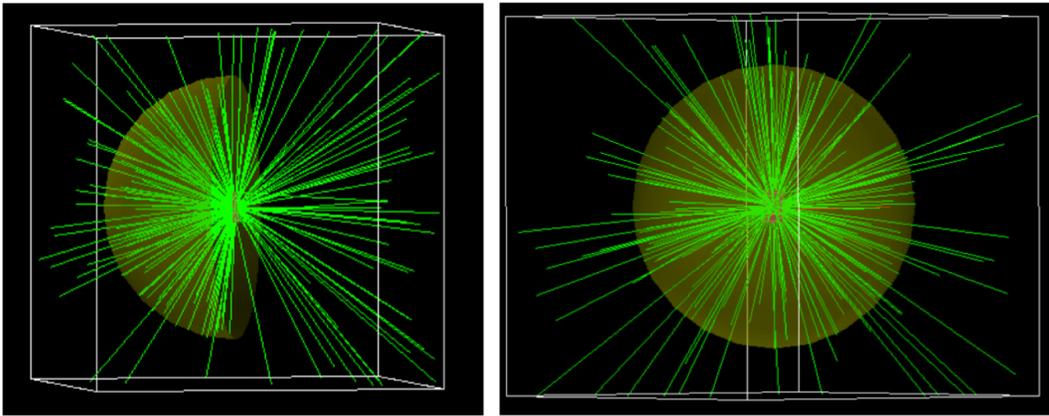


FIGURE 4.5: Simulation du bruit de fond  $\gamma$  dans  $2\pi$  (à gauche) ou  $4\pi$  (à droite). La sphère se situe à 75 cm du détecteur irradié.

L’autre point qui nous pousse à réaliser des simulations avec plusieurs incidences de flux  $\gamma$  est leur interaction dans le guide de lumière. Celui-ci, 100 fois plus épais que notre scintillateur, induira donc beaucoup plus d’interactions  $\gamma$  par effet Compton. Les électrons créés pourront éventuellement venir déposer de l’énergie dans le scintillateur. Ce phénomène est le plus pénalisant car il sera dépendant de l’incidence du flux  $\gamma$ .

### 4.3 Description du module optique v0

Nous avons conçu un premier module optique, appelé v0, pour valider plusieurs points importants : tout d’abord nous souhaitons valider les simulations GEANT4 effectuées et enfin, nous souhaitons vérifier si l’utilisation d’un scintillateur plastique fin est viable. Le module v0 est composé

d'un scintillateur plastique circulaire Eljen EJ-212. Ce scintillateur a un diamètre de 7 cm et une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ . Le guide de lumière (GdL) en PMMA assure le lien optique entre le scintillateur et le photomultiplicateur. Ce guide de lumière est de type "fish-tail" et il est recouvert de Mylar<sup>®</sup> aluminisé de 12  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Le photomultiplicateur utilisé est le 9102 KSB d'ET Enterprises. Ce PM de 1,5 pouce de diamètre est utilisé avec un pont diviseur résistif ET Enterprises C674-B12A. L'alimentation du pont diviseur est assurée par une unité haute tension CAEN N471. Les différentes liaisons optiques (PM/GdL et Scintillateur/GdL) sont assurées à l'aide de graisse optique BC630 (Saint-Gobain).

La forme du guide de lumière et les différentes géométries du module optique sont schématisées et présentées dans la figure 4.6. L'acquisition du signal est réalisée par une carte électronique MATAcq32. Cette carte a été développée conjointement par le CEA/DAPNIA et l'IN2P3/LAL. Elle réalise un codage des signaux analogiques à une fréquence d'échantillonnage de 2 GHz sur une fenêtre temporelle de 1,25  $\mu\text{s}$ . Après étalonnage, la précision de mesure atteinte est de 250  $\mu\text{V}$  [104]. Ce dispositif nous a permis d'analyser, un par un, les signaux obtenus et d'extraire les informations relatives à l'amplitude de nos impulsions et leurs propriétés temporelles.

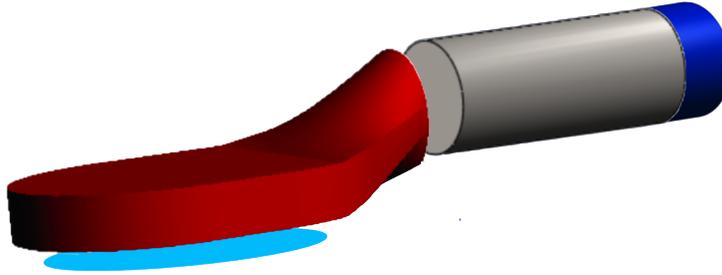


FIGURE 4.6: Schéma éclaté des composantes du module optique v0. Le scintillateur est représenté en bleu ciel, le guide de lumière en rouge et l'ensemble PM/pont diviseur est en gris/bleu.

## 4.4 Simulation des interactions dans un scintillateur plastique

Ces premières simulations sont centrées sur le scintillateur plastique fin. Le but est de comprendre les phénomènes mis en jeu : les interactions, les dépôts d'énergie et les inhomogénéités présentent dans un module optique seul. Pour cela, nous avons simplifié la géométrie du module optique afin de ne garder que l'essentiel, à savoir : le scintillateur fin, une partie du guide de lumière en PMMA, le Mylar<sup>®</sup> aluminisé et la colle optique (BC630). Une illustration de simulation ainsi qu'un schéma de principe décrivent la géométrie simulée dans la figure 4.7.

### 4.4.1 Interactions $\beta$ et $e^-$ mono-énergétiques avec le module optique

Nous avons réalisé deux types de simulations afin de bien appréhender le comportement des deux scintillateurs testés. Nous avons simulé les deux seuls scintillateurs plastiques fins disponibles commercialement : un scintillateur Eljen EJ-212 (base PVT) de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et un scintillateur Envinet (base PS) de 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. L'utilisation de scintillateurs plastiques fins étant le point critique de notre étude, nous avons simulé et testé deux types de source d'électrons : des sources  $\beta$  classiques (émettrices  $\beta$  pures afin de ne pas être parasité par des rayonnements  $\gamma$  secondaires) et

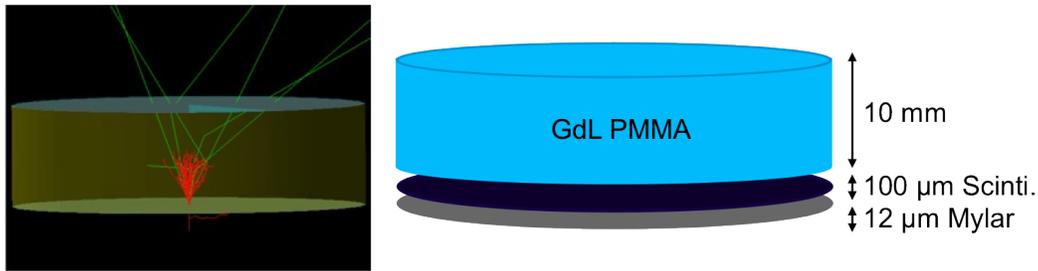


FIGURE 4.7: Illustration de la géométrie utilisée pour la simulation des interactions dans le scintillateur du prototype v0. À gauche, une visualisation de la géométrie GEANT4 et à droite un schéma simplifié.

des électrons mono-énergétiques. Les sources d'électrons simulées étaient situées à une distance de 6 mm et dirigées vers la surface sensible de notre détecteur, à savoir le scintillateur. Les simulations présentées dans ce chapitre sont celles correspondantes au scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur qui a été sélectionné à la suite de ces simulations et d'essais complémentaires.

### Simulations avec des électrons mono-énergétiques

Les simulations effectuées avec des électrons mono-énergétiques visent à comprendre les interactions électrons-matière mises en jeu dans un scintillateur de faible épaisseur. Nous souhaitons, notamment, mettre en évidence de possibles changements de comportement et la présence d'effets de seuil qui pourront être observés lors de futurs essais. Dans un premier temps, nous avons effectué ces simulations pour des énergies d'électrons incidents comprises entre 30 keV et 1,5 MeV. L'énergie des électrons simulés et l'énergie qu'ils déposent dans le scintillateur de 100  $\mu\text{m}$  Eljen sont représentées sur la figure 4.8.

Nous pouvons voir que deux comportements se distinguent :

- le premier comportement (noté ① sur la figure 4.8) est linéaire et se produit à basse énergie jusqu'à environ 130 keV. Ce cas correspond aux électrons qui laissent la totalité de leur énergie dans le scintillateur.
- le deuxième comportement (noté ② sur la figure 4.8) se distingue à partir d'un seuil égal à environ 200 keV. Cette fois-ci, l'électron ne dépose pas à chaque fois toute son énergie dans le scintillateur. Pour des électrons dont l'énergie est supérieure à 200 keV, l'énergie déposée décroît et tend vers une valeur limite d'environ 20-25 keV.

Ce changement de comportement s'explique par le parcours de l'électron dans le scintillateur : plus l'électron est énergétique, plus son parcours sera rectiligne dans le scintillateur. Ce parcours réduit entraîne une diminution du dépôt d'énergie. Ces simulations nous ont donc permis de comprendre les interactions et les dépôts d'énergie susceptibles de se produire dans le détecteur envisagé.

### Simulations de sources émettrices $\beta$ pures

Afin de valider le comportement observé avec les simulations d'électrons mono-énergétiques et estimer le rendement du module optique v0 pour plusieurs radionucléides, nous avons cette fois-ci utilisé des sources émettant des rayonnements  $\beta$ . Nous avons réalisé plusieurs simulations à l'aide

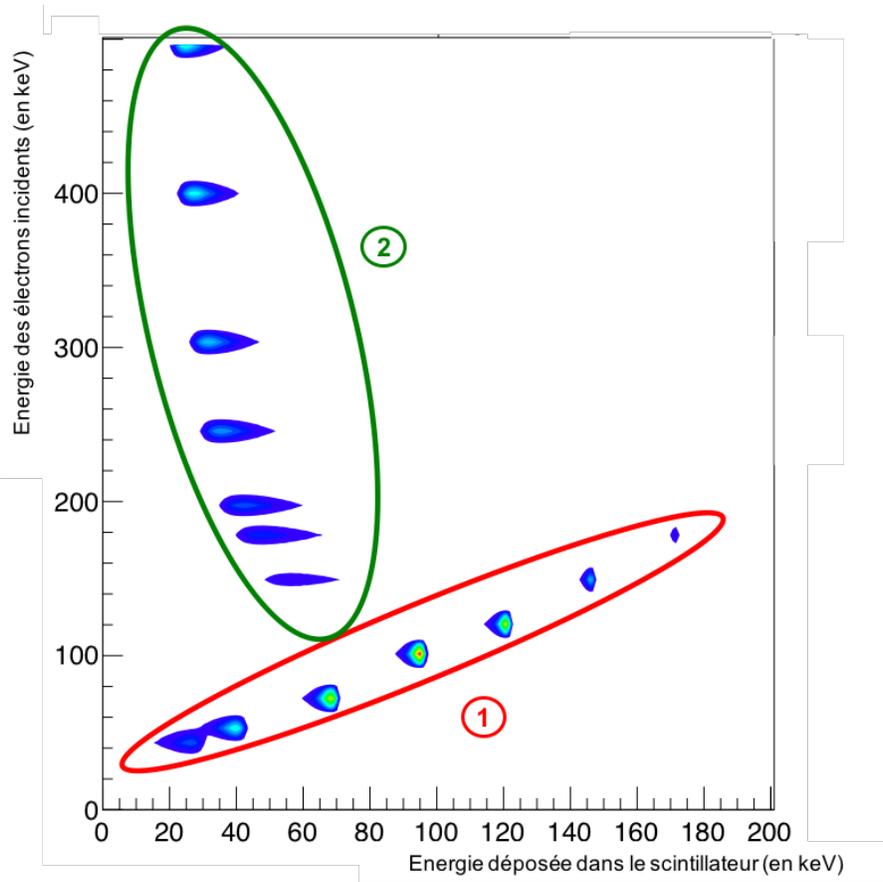


FIGURE 4.8: Énergie déposée par des électrons mono-énergétiques incidents dans un scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

de radionucléides émettant uniquement des  $\beta$  comme le carbone 14 ( $Q_\beta = 156,5$  keV), l'étain 121 ( $Q_\beta = 401$  keV), le béryllium 10 ( $Q_\beta = 556,8$  keV) et le strontium 89 ( $Q_\beta = 1500,4$  keV) afin de ne pas polluer nos résultats avec des événements  $\gamma$ . De la même manière que pour les électrons mono-énergétiques, nous avons tracé l'évolution de l'énergie déposée par les particules  $\beta$  en fonction de leur énergie initiale pour chaque radioélément. Les résultats obtenus pour le strontium 89 ont été détaillés sur la figure 4.9. L'énergie moyenne d'incidence des particules  $\beta$  est de 570,6 keV tandis que l'énergie moyenne déposée dans le scintillateur est de 36,7 keV. Les comportements observés avec des sources émettrices  $\beta$  sont comparables à ceux simulés avec des électrons mono-énergétiques.

Nous pouvons constater que pour des énergies de transition élevées, comme celle du strontium 89, l'énergie moyenne déposée est faible puisqu'elle n'est que de 35 keV. Cette information confirme le comportement que nous avons prévu, à savoir que nos scintillateurs produiront peu de lumière étant donné la faible quantité d'énergie déposée par les particules  $\beta$ . Le nombre maximum de photons créé sera alors d'environ 350 photons puisque le rendement lumineux du scintillateur Eljen EJ-212 est de 10000 photons/MeV déposé (voir tableau 2.4). Or, ce chiffre sera en réalité inférieur compte tenu de la non linéarité observée dans les scintillateurs plastiques pour des énergies déposées inférieures à une centaine de keV [84].

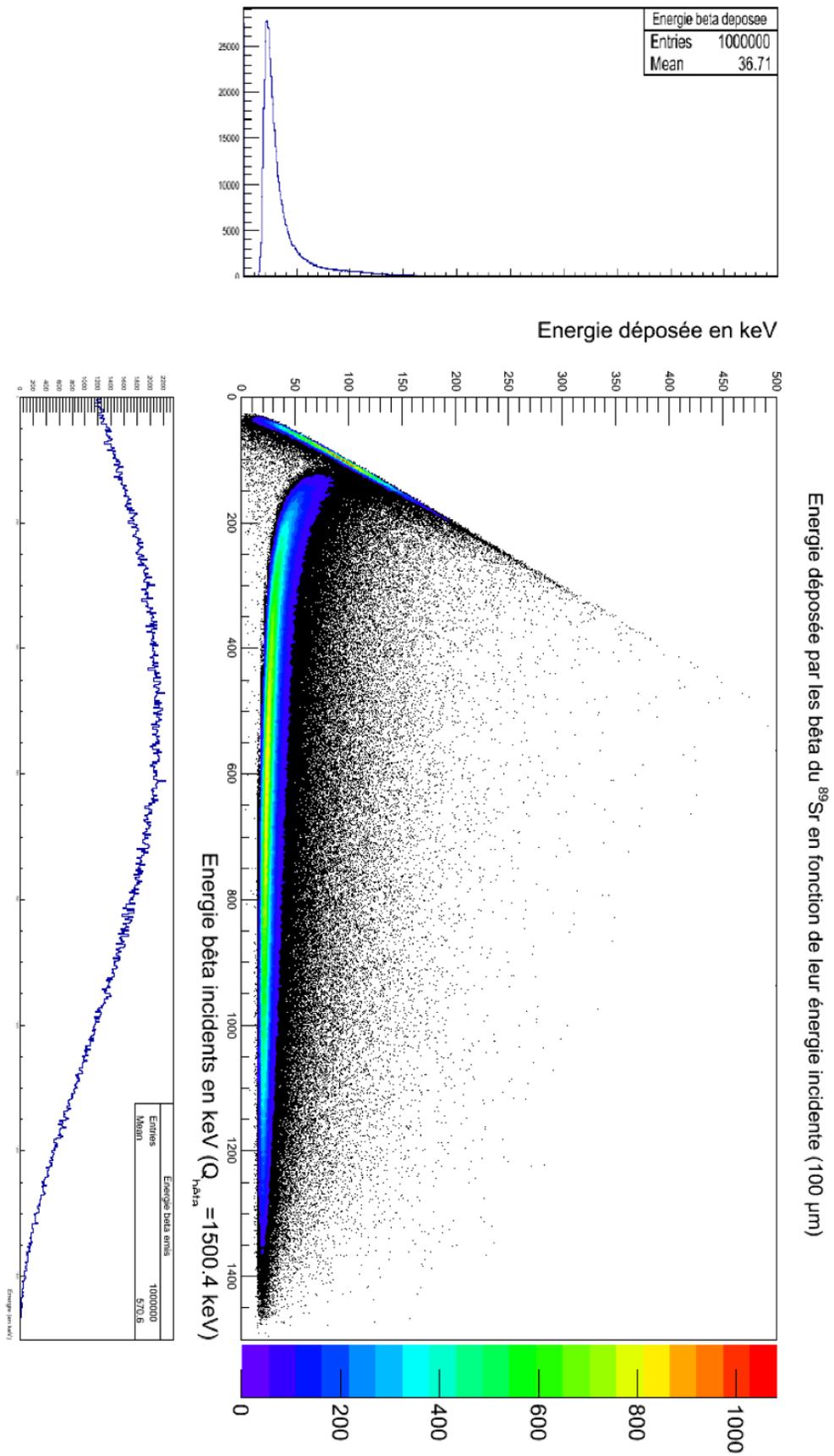


FIGURE 4.9: Energie déposée par les rayonnements  $\beta$  du strontium 89 ( $Q_{\beta} = 1500,4 \text{ keV}$ ) dans un scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en fonction de leur énergie incidente.

Ces simulations nous permettent également d’anticiper le comportement du futur appareil et notamment les rendements  $\beta$  qui sont demandés dans la norme CEI 60532. Les informations relatives à cette norme ont déjà été développées dans la partie 2.3.1. Nous pouvons, par exemple, prévoir que notre appareil sera, a priori, moins sensible pour des radioéléments possédant une énergie de transition élevée que pour des radioéléments possédant une énergie de transition faible. Ce comportement est différent des appareils de mesure de contamination surfacique classiques qui sont plus sensibles à des radioéléments possédant une énergie de transition élevée. Cette constatation s’explique par le fait que les autres appareils (GM Pancake et scintillateur plastique épais) ont des volumes de détection plus importants et que les particules  $\beta$  laissent dans tous les cas suffisamment d’énergie.

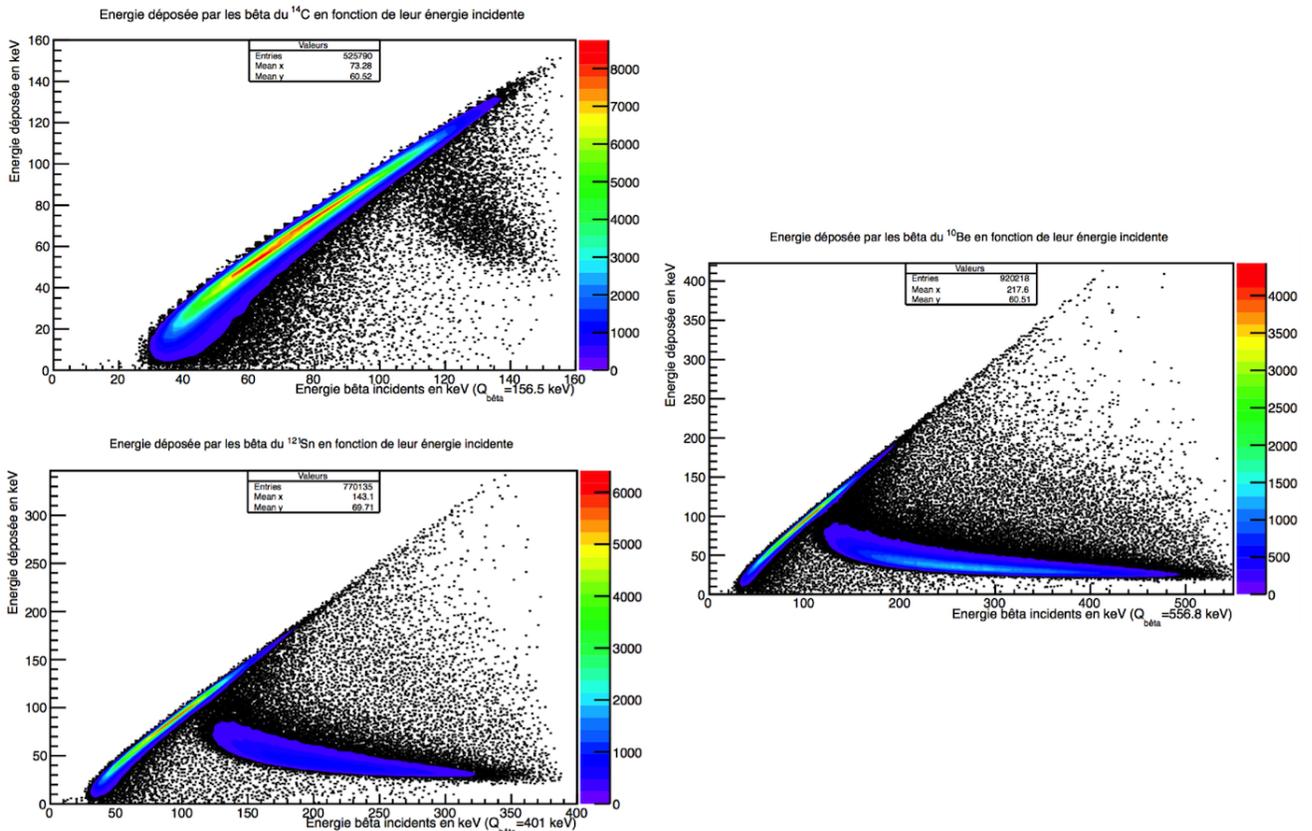


FIGURE 4.10: Exemples de dépôts d’énergie pour des radionucléides d’énergie de transition différentes ( $Q_{\beta}$ ). En haut à gauche le carbone 14, en bas à gauche l’étain 121 et à droite le béryllium 10.

Pour affiner l’évolution du rendement de notre module optique en fonction de différentes énergies de transition ( $Q_{\beta}$ ), la figure 4.10 reprend les résultats obtenus pour le carbone 14 ( $Q_{\beta} = 156,5 \text{ keV}$ ), l’étain 121 ( $Q_{\beta} = 401 \text{ keV}$ ) et le béryllium 10 ( $Q_{\beta} = 556,8 \text{ keV}$ ). Les valeurs moyennes des énergies déposées sont respectivement de 60,5 keV, 69,7 keV et 60,5 keV. L’énergie de transition du cobalt 60 est quant à elle égale à 317,3 keV. Nous pouvons donc nous attendre à un comportement compris entre celui du carbone 14 et celui de l’étain 121.

#### 4.4.2 Interactions $\gamma$ - Evaluation du bruit de fond généré

Les simulations  $\gamma$  effectuées sur le premier module optique v0 avaient pour but de déterminer le taux de comptage induit par le bruit de fond  $\gamma$  ambiant. Ces simulations ont été réalisées avec le spectre  $\gamma$  EDF mais aussi avec une source ponctuelle de césium 137 afin de pouvoir réaliser des essais comparatifs en laboratoire et dans l'irradiateur de la société Carmelec.

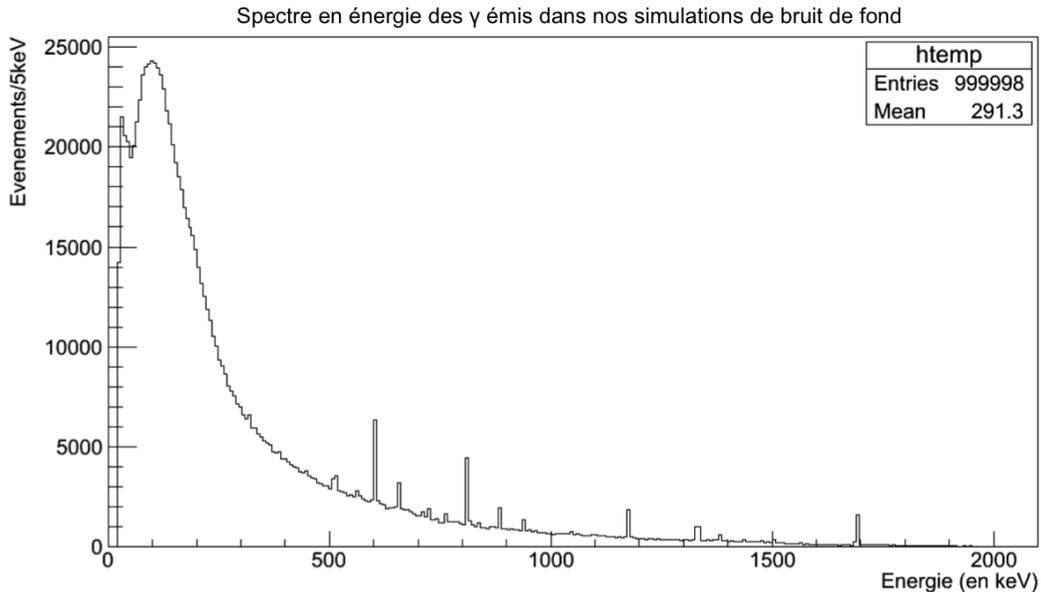


FIGURE 4.11: Exemple de spectre  $\gamma$  utilisé dans nos simulations de bruit de fond.

Le spectre photonique utilisé dans les simulations afin de définir les rapports signaux sur bruit était celui fourni par EDF (voir figure 4.3). Ce dernier a été implémenté dans la simulation et nous pouvons observer un exemple de spectre simulé sur la figure 4.11.

Le bruit de fond gamma dans lequel nous serons amenés à tester le prototype en centrale nucléaire sera de l'ordre de  $35 \mu\text{Sv/h}$ . Nous pouvons donc adapter le nombre d'évènements à générer afin d'obtenir un flux équivalent dans notre simulation. Cette étape est rendue possible grâce à l'utilisation des coefficients de passage entre débit de fluence et débit d'équivalent de dose que nous avons présentés dans la partie 4.2.2. Le spectre de la figure 4.12 représente le spectre des dépôts d'énergie généré par la simulation de 5 millions d'évènements. Le facteur de normalisation  $F_{\text{norm.}}$ , dont le calcul a été détaillé dans la partie 4.2.2, indique que si nous considérons le flux  $\gamma$  simulé comme le flux incident sur le module optique en 1 seconde, le nombre d'évènement simulé correspond à un débit d'équivalent de dose d'environ  $120 \mu\text{Sv/h}$ . Sur les 5 millions d'évènements simulés, 6550 ont interagi dans notre scintillateur. Environ la moitié de ces évènements ont déposé moins de 20 keV dans notre scintillateur et l'énergie moyenne du dépôt d'énergie est d'environ 48 keV. Ces simulations ne nous apportent des solutions que sur le spectre en énergie du dépôt car nous ne connaissons pas encore le seuil à partir duquel le scintillateur produira assez de lumière pour détecter un signal. **Toutefois, nous pouvons constater que la solution envisagée permet de diminuer d'un facteur  $10^3$  environ l'impact du flux  $\gamma$ .**

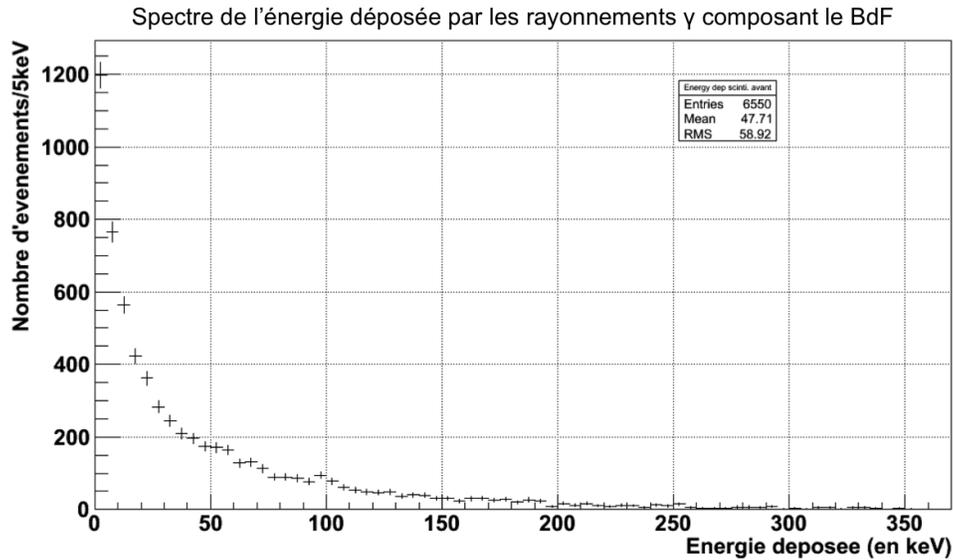


FIGURE 4.12: Energie déposée dans le scintillateur par le bruit de fond pour 5 millions de  $\gamma$  incidents simulés.

Nous pouvons constater que l'énergie moyenne déposée par les rayonnements  $\gamma$  est environ 20 % plus faible que celui des rayonnements  $\beta$  (vu sur la figure 4.10), sachant que ces dépôts sont respectivement de 48 keV et 60 keV. Le réglage du seuil de discrimination de notre module optique pourra donc certainement être ajusté pour améliorer notre rapport signal sur bruit.

Afin de poursuivre et déterminer un coefficient d'étalonnage entre l'énergie déposée dans le scintillateur et l'amplitude des signaux mesurés, nous avons également réalisé des simulations avec une source de césium 137 ponctuelle (voir figure 4.13). Cette simulation, plus simple, nous permet de faire des essais en laboratoire et de confronter nos simulations à des mesures, sans attendre d'aller sur site EDF. Ces simulations ont été réalisées pour différentes épaisseurs de scintillateurs, toujours dans le but de conforter notre choix d'utiliser un scintillateur de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Les comportements observés dans nos deux simulations de BdF sont concordants et nous pouvons constater que la plupart des dépôts d'énergie sont faibles (inférieurs à 40 keV).

## 4.5 Validation du concept avec le design préliminaire v0

Nous avons conçu et fabriqué un premier prototype de module optique, appelé v0, afin de vérifier les simulations effectuées et valider le fonctionnement de notre solution technique. Celui-ci intègre les éléments de notre chaîne de mesure mais à une échelle réduite. Il a pour but de valider l'utilisation d'un scintillateur fin en s'assurant que la quantité de lumière produite et collectée soit suffisante. Le prototype v0 a été réalisé afin d'obtenir une preuve de fonctionnement robuste avant de continuer notre étude et de réaliser un prototype complet.

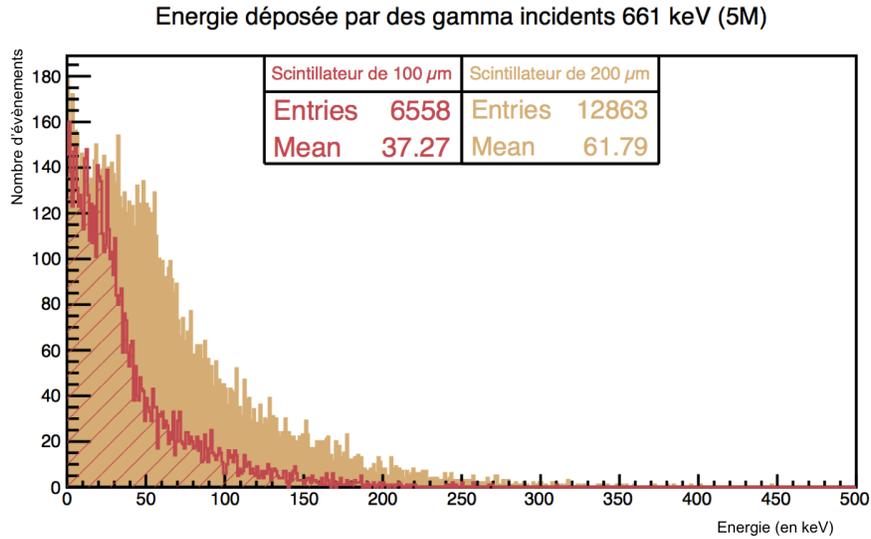


FIGURE 4.13: Simulation d'un bruit de fond  $\gamma$  simple à l'aide d'une source de césium 137 ( $E_\gamma = 661,7$  keV) pour des scintillateurs plastiques de 100  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

#### 4.5.1 Description de la source scellée et du spectromètre à électrons utilisés lors de nos essais

Le module optique v0 a été testé avec deux types de source de rayonnement :

- Le premier type est un spectromètre à électrons, fabriqué au CENBG, qui permet de délivrer des électrons mono-énergétiques sur une gamme d'énergie comprise entre 0,4 et 1,8 MeV. Nous avons utilisé ce spectromètre pour tester les capacités du module optique v0 dans le domaine de la mesure  $\beta$ .
- Le deuxième type utilisé est une source scellée de césium 137 qui émet des  $\gamma$  de 661,7 keV. Cette source a été utilisée pour générer un bruit de fond simple à intégrer dans nos simulations GEANT4.

#### Description du spectromètre à électrons

Le fonctionnement du spectromètre à électrons présent au CENBG est le suivant : une source radioactive  $\beta^-$  d' $^{90}\text{Y}/^{90}\text{Sr}$ , dont le  $Q_\beta$  est de 2282 keV, est utilisée pour produire un faisceau d'électrons mono-énergétiques (voir figure 4.14). Le spectre émis par cette source est continu et isotrope. La première étape vise donc à blinder la source pour ne laisser passer qu'un faisceau d'électrons. Après avoir réalisé cette collimation, le faisceau est envoyé dans une cavité maintenue sous vide (de l'ordre de  $10^{-2}$  mbar) où règne un champ magnétique créé par une bobine et amplifié par un entrefer.

La trajectoire des électrons est courbée en fonction de leur énergie cinétique par la force de Lorentz. Un second collimateur, perpendiculaire au premier, permet ensuite de sélectionner une énergie précise. Le faisceau d'électrons est mono-énergétique à la sortie de ce collimateur. Le champ magnétique peut être ajusté en faisant varier le courant traversant la bobine. De fait, il est donc possible de sélectionner l'énergie du faisceau d'électrons dans une gamme comprise entre 0,4 et 1,8 MeV en pilotant l'alimentation de puissance qui délivre le courant à la bobine.

La résolution en énergie (FWHM) du spectromètre est de  $1,0 \pm 0,2 \%$  à 1 MeV et sa linéarité est meilleure que 2 %. Les spectres en énergie de plusieurs émissions d'électrons mono-énergétiques ont été regroupés sur la figure 4.15.

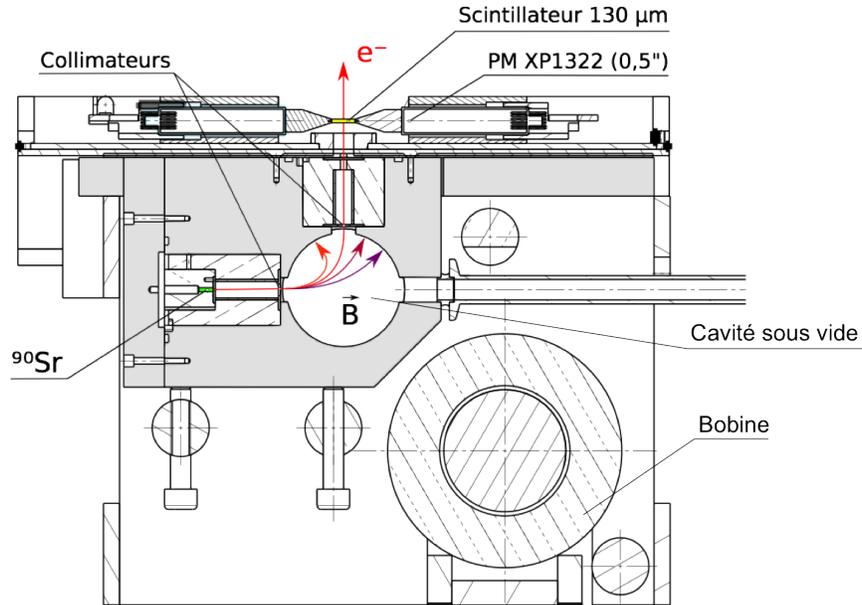


FIGURE 4.14: Vue en coupe et principe de fonctionnement du spectromètre à électrons utilisé au CENBG [105].

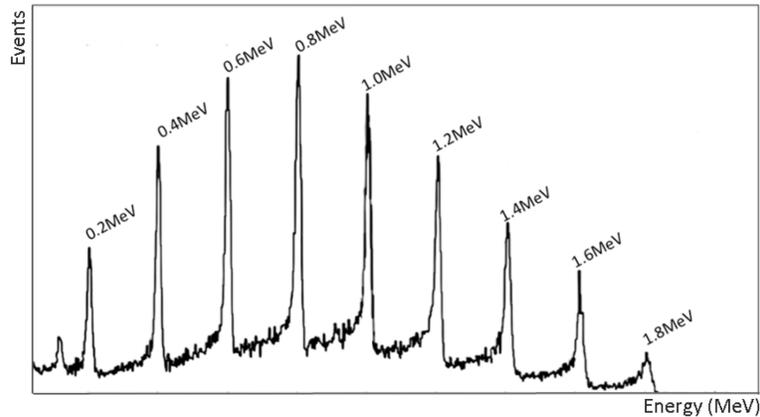


FIGURE 4.15: Spectre en énergie de plusieurs électrons mono-énergétiques émis par le spectromètre et mesurés à l'aide d'une diode silicium [105].

#### Description de la source scellée de césium 137 utilisée

La source utilisée est une source commercialisée par la société LEA-CERCA. Cette source, d'une activité de l'ordre de 40 kBq, est destinée à l'étalonnage en énergie des spectromètres germanium.

La source de césium 137 est déposée sur un film en PET de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Ce dépôt est lui même recouvert d'un deuxième film en PET identique au premier. Une bague en plastique, rose sur la figure 4.16, vient ensuite sceller le tout. La source de césium 137 ne mesurant que 3 mm de diamètre, nous pourrions la considérer comme ponctuelle.

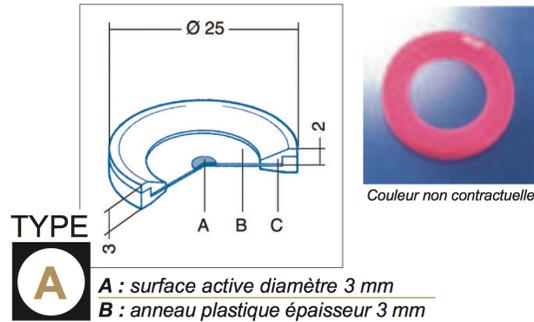


FIGURE 4.16: Source scellée de césium 137 utilisée pour nos essais de réponse au bruit de fond  $\gamma$  sur le prototype v0 [106].

La géométrie décrite ci-dessus a été intégrée dans nos simulations GEANT4. La source que nous avons utilisée avait une activité calculée, au 30/12/2014, de 34,85 kBq. Cette activité est déduite, par simple calcul de décroissance de l'activité initiale de la source mesurée par le LEA-CERCA. Cette mesure initiale a été déterminée avec une incertitude inférieure à 3,5 % ( $k=2$ ).

#### 4.5.2 Méthodologie des essais et résultats obtenus

Deux séries de mesures ont été effectuées afin de valider nos simulations. Ces dernières ont pour but de déterminer le coefficient d'étalonnage permettant de faire le lien entre l'énergie déposée dans le scintillateur et l'amplitude de nos signaux électroniques. In fine, nous souhaitons savoir à quelle valeur en énergie correspond notre seuil de discrimination en mV. La première série de mesures a été effectuée avec le spectromètre à électrons sur les scintillateurs seuls couplés directement au photomultiplicateur (voir figure 4.17). La deuxième série de mesure a été réalisée sur le module optique v0 entier en utilisant le spectromètre à électrons pour tester la réponse  $\beta$  de notre prototype, puis avec une source scellée de césium 137 afin de générer un bruit de fond simple et de valider nos simulations  $\gamma$ .

La première série d'essais a pour but de déterminer le lien entre l'énergie déposée par des électrons dans le scintillateur et l'amplitude du signal mesuré. Pour cela, nous avons dans un premier temps réalisé des mesures avec un PM Photonis XP5312 (muni d'un pont diviseur VD202K/01) directement collé sur le scintillateur à tester. Les mesures ont été faites tour à tour sur deux types de scintillateurs : un Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  et un Envinet de 300  $\mu\text{m}$ . Ces essais nous ont effectivement permis de faire correspondre l'énergie déposée par les électrons et l'amplitude des signaux obtenue.

La deuxième série d'essais est dédiée à la réalisation de mesures sur le prototype v0 entier. La réponse du prototype v0 a été mesurée à l'aide d'électrons mono-énergétiques ainsi qu'avec notre source de césium 137. Lors de ces essais, nous avons utilisé le PM ET Enterprises 9102 KSB qui équipera nos futurs prototypes.

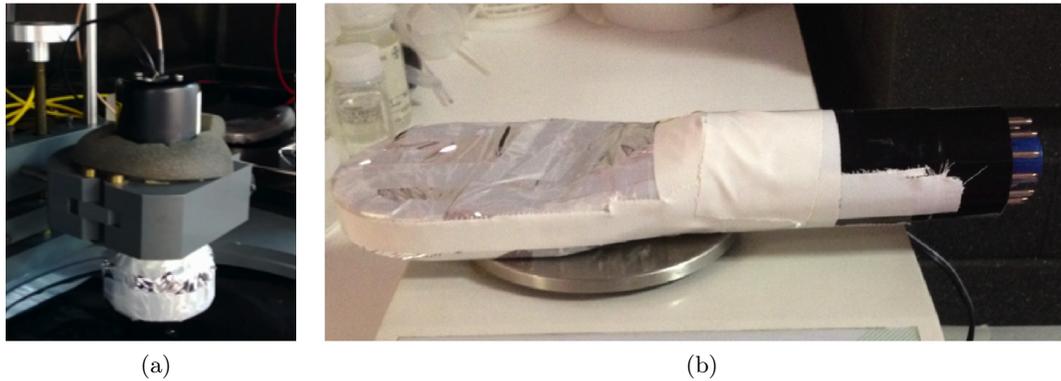


FIGURE 4.17: Photographie du banc de test des scintillateurs, le PM Photonis XP5312 est couplé à un scintillateur et le tout est recouvert de Mylar<sup>®</sup> aluminisé. Le montage est maintenu par une potence devant l'entrée du spectromètre à électrons (a). Photographie du module optique v0 entièrement monté (b).

#### 4.5.2.1 Résultats obtenus pour la première série d'essais sur les scintillateurs seuls

Les mesures sur les scintillateurs seuls couplés directement sur le PM Photonis XP5312 ont été réalisées dans le spectromètre à électrons du CENBG (voir figure 4.18). Comme expliqué dans la légende de la figure 4.17, le scintillateur à tester est couplé au PM à l'aide de graisse optique BC630 puis l'ensemble est recouvert de Mylar<sup>®</sup> aluminisé. La haute tension du PM délivrée par le module CAEN N471 est réglée à 1000 Volts pour le PM Photonis.

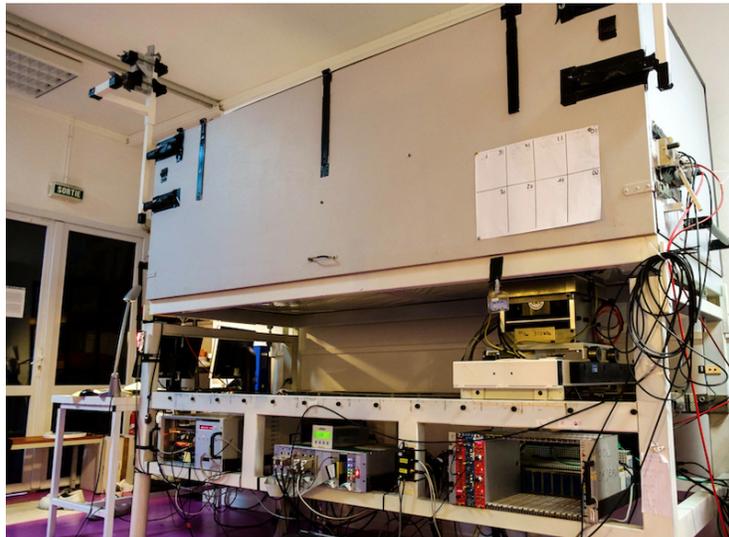


FIGURE 4.18: Spectromètre à électrons motorisé et sa boîte noire utilisés dans le cadre de nos essais [105].

La réponse des scintillateurs Eljen EJ-212 100  $\mu\text{m}$  et Envinet PS 300  $\mu\text{m}$  a été mesurée pour 5 énergies d'électrons incidents : 200 keV, 400 keV, 800 keV, 1 MeV et 1,3 MeV.

Les réponses obtenues à 400 keV pour les scintillateurs Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  et Envinet PS 300  $\mu\text{m}$  peuvent être observées sur la figure 4.19. Lors de nos essais, nous avons mesuré l'amplitude des signaux mais aussi la charge intégrée (ADC) de ces derniers afin de vérifier la linéarité de notre chaîne de mesure.

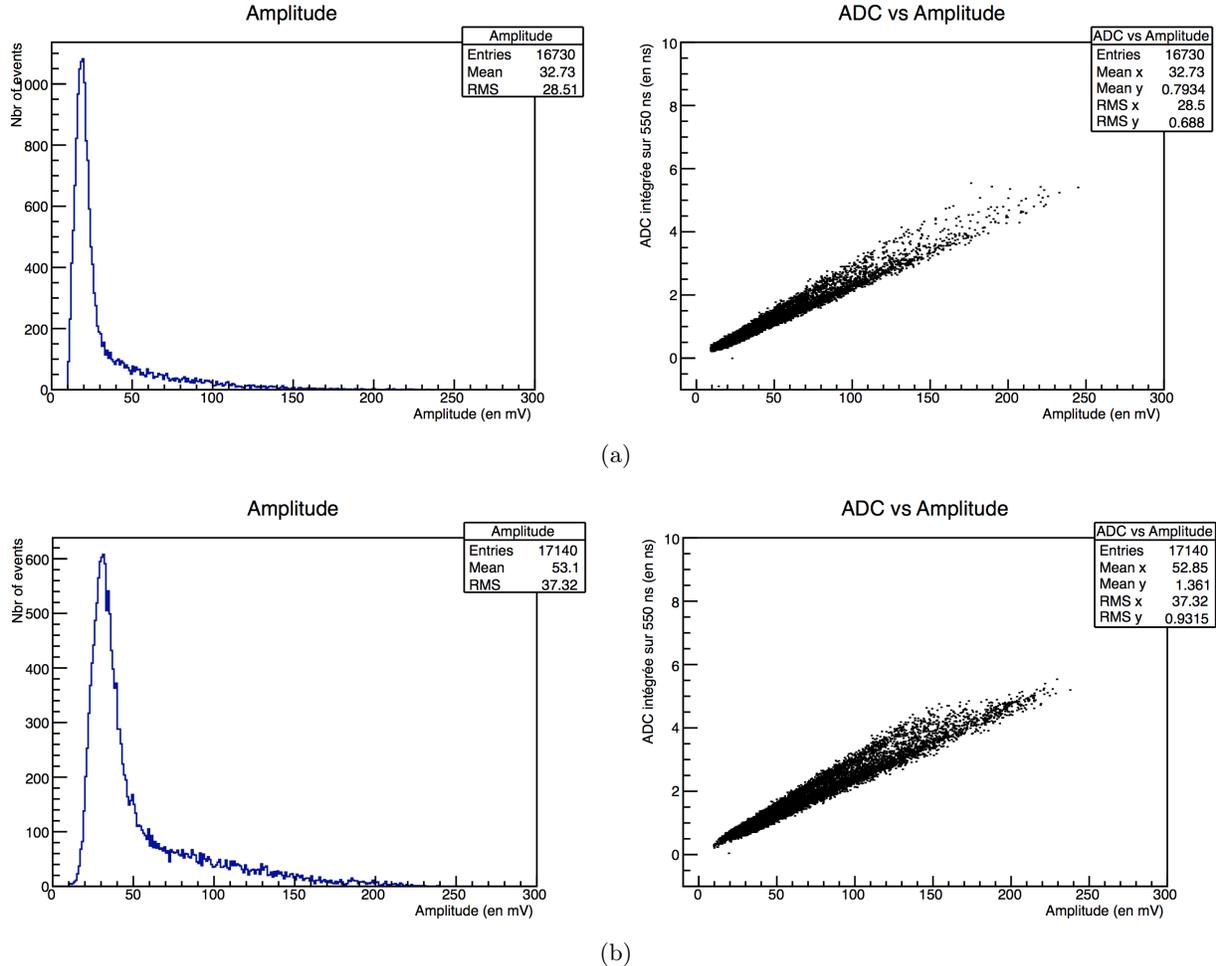


FIGURE 4.19: Distributions des amplitudes et des ADC obtenues avec le scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  (a) et Envinet PS de 300  $\mu\text{m}$  (b) pour des électrons de 400 keV.

Les résultats obtenus confirment la faiblesse des signaux que nous avons prévue, compte tenu de la faible quantité d'énergie déposée dans les scintillateurs fins. L'amplitude moyenne des signaux pour le scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  est de 32,7 mV et elle est d'environ 53,1 mV pour le scintillateur Envinet PS de 300  $\mu\text{m}$ . Point positif, les simulations effectuées semblent représenter fidèlement le comportement des scintillateurs. La figure 4.20 reprend la distribution en amplitude obtenue lors de nos essais et la distribution des dépôts d'énergie simulés pour des électrons de 800 keV avec le scintillateur Envinet PS de 300  $\mu\text{m}$ . Pour les simulations du scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$ , la figure 4.8 présentée dans la partie 4.4.1 reprend déjà les résultats obtenus.

Les résultats complets obtenus pour les deux scintillateurs ainsi que la comparaison entre nos simulations et nos mesures sont regroupés dans les deux graphiques de la figure 4.21. Nous pouvons

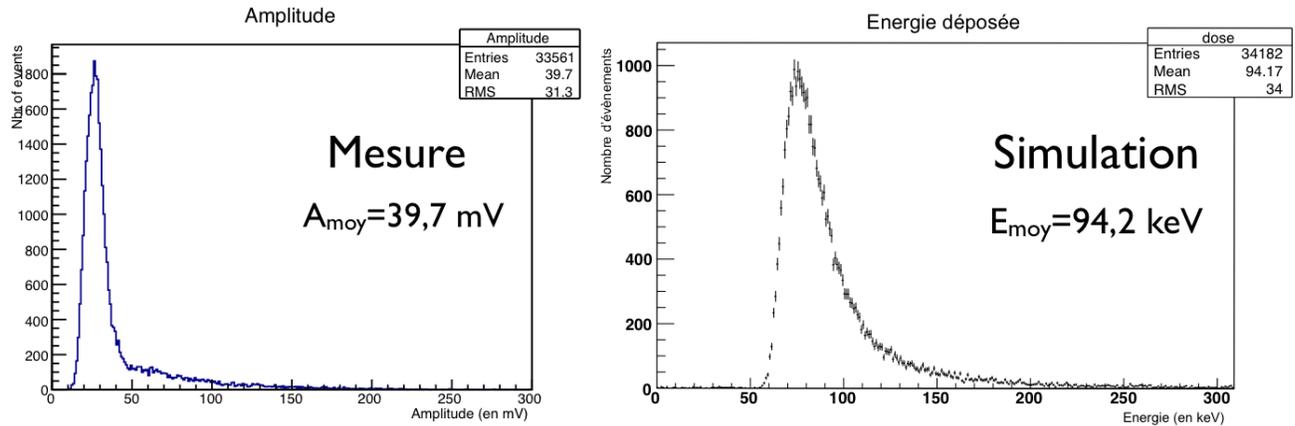


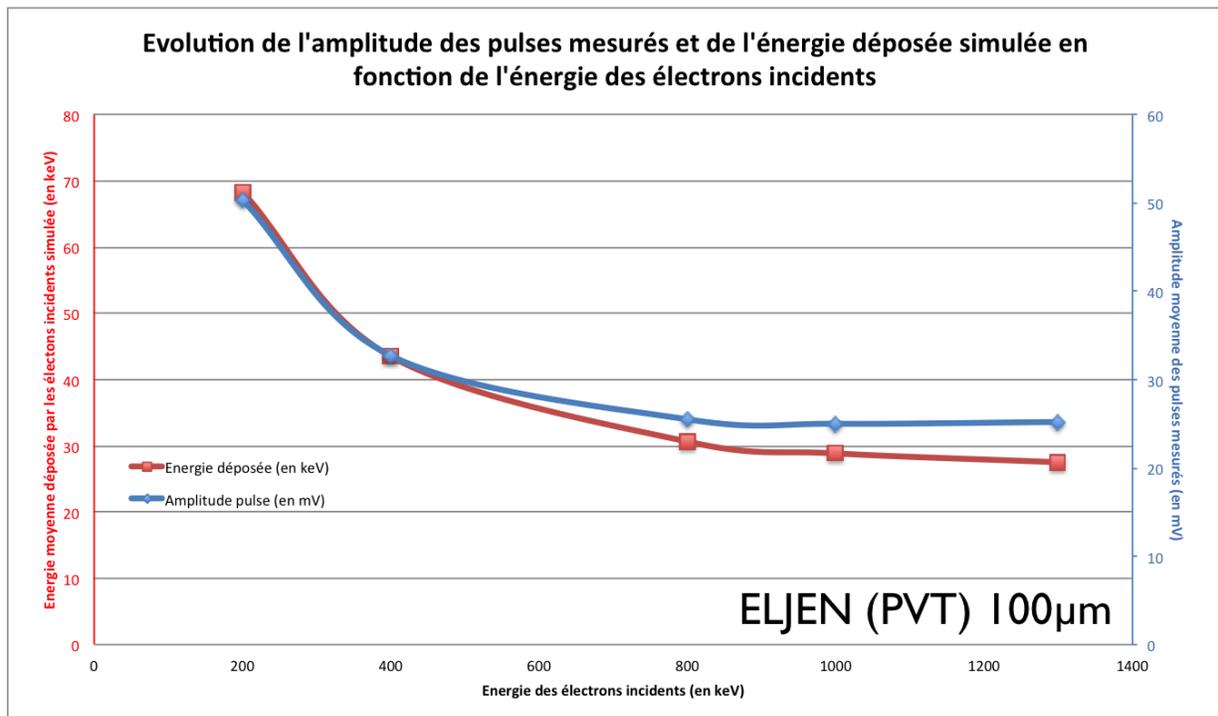
FIGURE 4.20: Distributions simulées (en keV) et mesurées (en mV) pour le scintillateur Envinet PS de 300  $\mu\text{m}$  avec des électrons de 800 keV.

constater que pour le scintillateur Envinet PS de 300  $\mu\text{m}$ , la linéarité entre le dépôt d'énergie en keV et l'amplitude des signaux en mV est clairement validée. Ce comportement est normal puisque les dépôts d'énergie dans ce scintillateur sont supérieurs ou égaux à 85 keV et qu'a priori l'effet de quenching prédit par la loi de Birks n'intervient qu'en dessous d'environ une centaine de keV. Pour le scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$ , le comportement est assez similaire. Toutefois, nous pouvons observer un écart plus important, en valeur relative, pour le scintillateur Eljen concernant les dépôts les plus faibles (de l'ordre de 25 keV). Ce phénomène n'est pas compatible avec l'effet de quenching de Birks puisque nous observons une légère augmentation de l'amplitude des signaux alors que le dépôt d'énergie simulé reste identique (aux alentours de 25 keV).

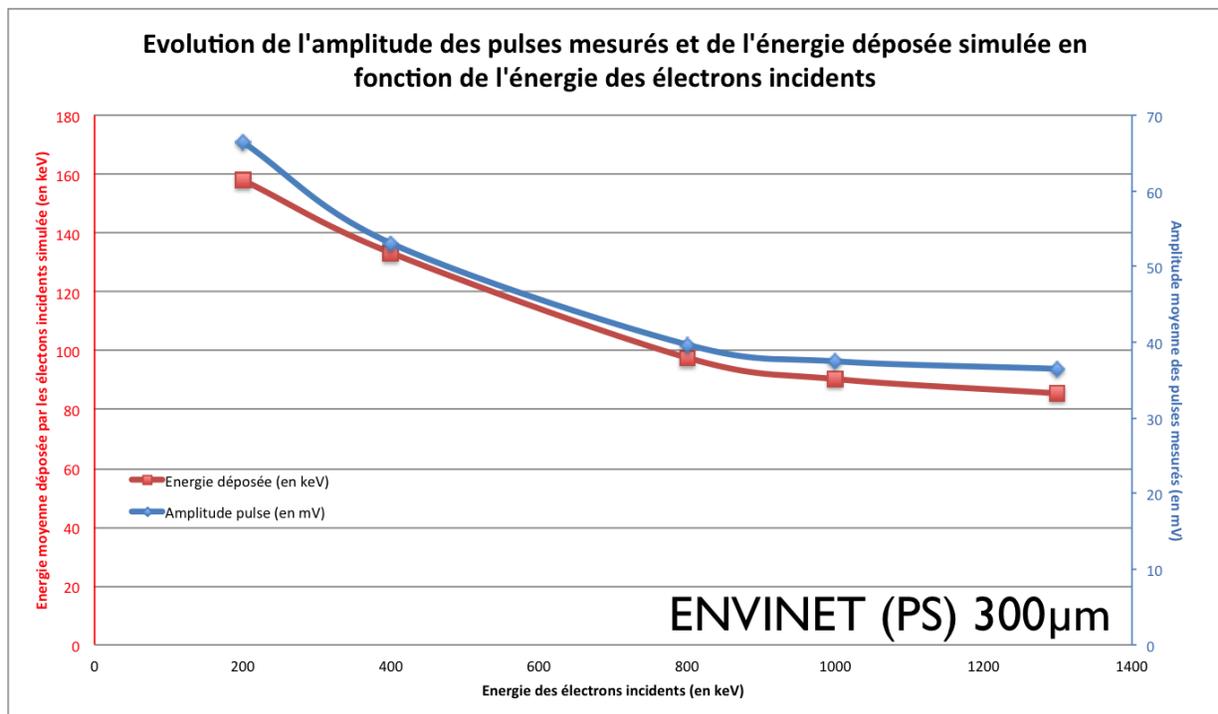
L'explication la plus plausible serait qu'il existe une approximation dans la simulation GEANT4. Elle induirait un biais dans les résultats et minorerait le dépôt d'énergie dans le scintillateur. Cette minoration est de l'ordre de quelques keV. Elle peut être due aux différences existantes entre la simulation et la réalité, à savoir : la densité et la composition du verre du PM qui ne sont pas connues exactement ou encore le collage entre le PM et le scintillateur qui n'est pas parfaitement identique.

Ces essais nous ont permis de valider notre compréhension des phénomènes mis en jeu dans les scintillateurs fins. Nous sommes également en mesure de valider nos simulations GEANT4 et conserver le modèle utilisé pour les prochaines étapes de notre projet. Pour la suite du projet, nous avons choisi de conserver le scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$ . Bien que les signaux mesurés soient faibles, ils restent détectables et peuvent être discriminés du bruit de fond. Nous savons également que le PM Photonis utilisé lors de ces essais a des performances moindres que celle du PM ET Enterprises que nous avons choisi pour le module optique v0. Nous pensons donc que les amplitudes moyennes des signaux à mesurer ne pourront être que meilleures.

Enfin, le réel avantage du scintillateur Eljen réside surtout dans son épaisseur qui est 3 fois moins importante que celle du scintillateur Envinet. Les deux scintillateurs étant tous les deux en plastique (bases PS et PVT), ils ont une densité très proche. Le scintillateur Eljen sera donc moins sensible au bruit de fond  $\gamma$  étant donné qu'à surface égale son épaisseur est inférieure.



(a)



(b)

FIGURE 4.21: Résumé des résultats obtenus pour les deux scintillateurs testés et comparaison entre les simulations GEANT4 et les amplitudes moyennes des pulses mesurées.

#### 4.5.2.2 Résultats obtenus pour la deuxième série d'essais sur le module optique v0 complet

Nous venons de voir que si un scintillateur fin est couplé directement à un PM nous obtenons suffisamment de signal pour reproduire assez fidèlement les résultats prédits par les simulations concernant les dépôts d'énergie. Maintenant, le but principal des essais que nous allons présenter est de vérifier que lorsque nous ajoutons un guide de lumière en PMMA, entre le scintillateur et le PM, la collection de lumière est toujours suffisante pour observer un signal exploitable. Le second objectif de ces essais est de confronter à nouveau nos simulations de dépôts d'énergie pour essayer de trouver un facteur de correspondance entre signaux mesurés et énergie déposée. Les essais sur le prototype v0 ont été menés avec deux types de sources : des électrons mono-énergétiques (spectromètre à électrons) et des photons  $\gamma$  (source de césium 137). Finalement, ces tests nous permettront de définir si la solution vers laquelle nous nous acheminons est viable d'un point de vue expérimental.

#### Résultats obtenus pour la réponse du module optique à des électrons mono-énergétiques

Les essais conduits dans le spectromètre à électrons ont été réalisés dans les mêmes conditions que pour les essais de scintillateurs seuls. Notre module optique v0 est composé des éléments suivants : un scintillateur Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$ , un guide de lumière en PMMA, de Mylar<sup>®</sup> de 12  $\mu\text{m}$  aluminisé double face (500  $\text{\AA}$ ), de graisse optique BC630 pour les interfaces optiques, d'un PM ET Enterprises 9102 KSB et d'un pont diviseur C674-B12A. L'alimentation du pont diviseur est assurée par l'unité haute tension CAEN N471 et fixée à 700 V.

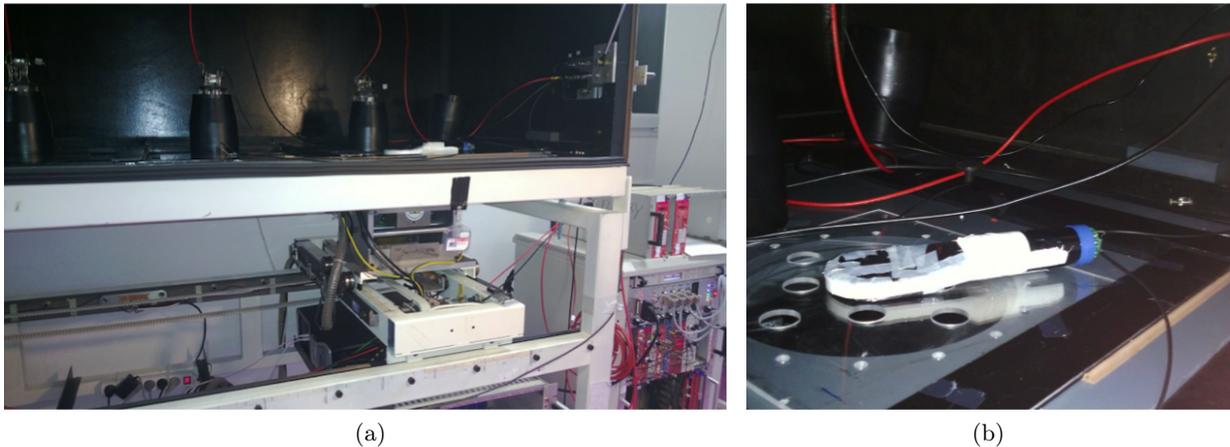


FIGURE 4.22: Photographie de la boîte noire du spectromètre à électrons (a) et positionnement du module v0 à l'intérieur de cette dernière (b).

Les essais ont été réalisés pour des électrons d'énergie comprise entre 200 keV et 1,3 MeV, notamment à 200 keV, 400 keV, 800 keV, 1 MeV et 1,3 MeV. Le module v0 a été placé à l'intérieur de la boîte qui assure une protection contre la lumière du jour (voir figure 4.22). Les résultats obtenus nous ont confortés dans notre choix de PM car ils montrent que le PM 9102 KSB est performant et adapté à notre besoin. En effet, l'ajout du guide de lumière en PMMA, qui est censé nous faire perdre du signal lumineux d'après le théorème de Liouville, n'a pas affecté les amplitudes moyennes mesurées. L'ajout du guide de lumière nous permet de passer d'une surface de scintillateur d'environ

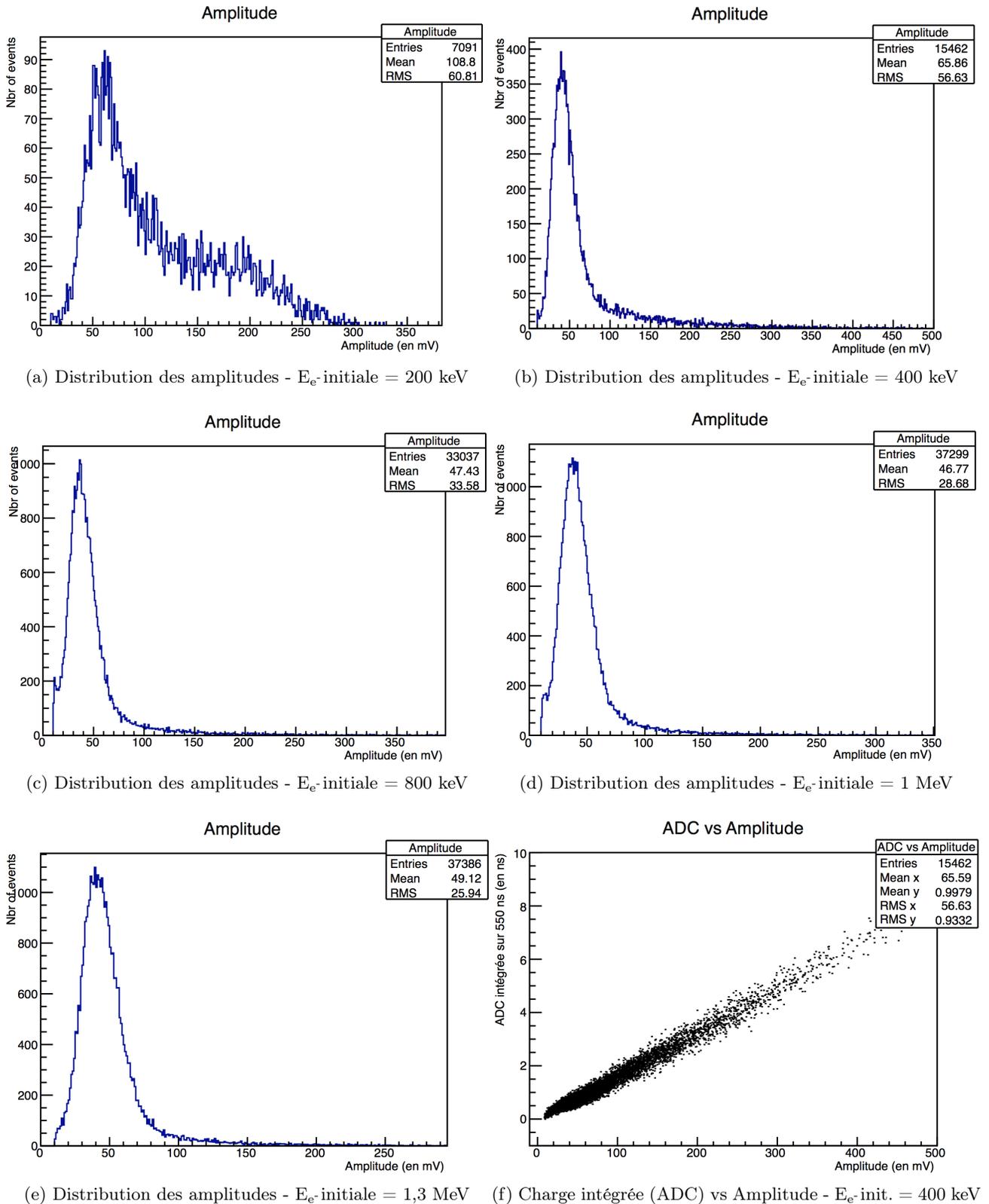


FIGURE 4.23: Distributions des amplitudes de signaux obtenues avec le module optique v0 sur le spectromètre à électrons à différentes énergies comprises entre 0,2 et 1,3 MeV.

38 cm<sup>2</sup> à une surface de PM de 11 cm<sup>2</sup> environ. Le théorème de Liouville indique que la transmission de lumière devrait être au minimum affectée d'un coefficient égal au rapport de ces surfaces. Dans notre cas, nous ne voyons pas ce phénomène car entre nos deux sessions d'essais nous avons changé de photomultiplicateur. Le nouveau PM (9102 KSB) est beaucoup plus performant que l'ancien (Photonis XP 5312) et la perte de lumière est compensée par une meilleure sensibilité.

Pour des électrons de 1,3 MeV, qui correspond au pire cas réalisé sur le plan des dépôts d'énergie dans notre scintillateur de 100 μm (le dépôt est d'environ 25 keV), l'amplitude moyenne obtenue est de 49 mV. L'ensemble des résultats obtenus sont disponibles figure 4.23. Les distributions d'amplitudes pour des électrons incidents de 200 keV, 400 keV, 800 keV, 1 MeV et 1,3 MeV y ont été reportées ainsi que l'évolution de la charge intégrée (ADC) en fonction de l'amplitude du signal mesuré pour des électrons incidents de 400 keV. Les amplitudes moyennes enregistrées sur toute la gamme en énergie testée sont comprises entre 47 mV et 109 mV environ. Nous pouvons également noter que le coefficient permettant de passer de l'énergie déposée dans le scintillateur à l'amplitude moyenne des signaux reste stable et compris entre 1,57 et 1,51 mV/keV. Ces résultats sont obtenus en divisant les amplitudes moyennes des impulsions mesurées en mV (voir figure 4.23) par les énergies déposées correspondantes simulées en keV (voir figure 4.21 (a)).

De plus, les résultats obtenus pour la charge intégrée (ADC) de nos signaux en fonction de leur amplitude nous montrent que la chaîne de photodétection (PM/pont diviseur/HT) est plus performante que celle utilisée précédemment car la linéarité est parfaitement respectée (voir figure 4.23 (f)).

Nous pouvons conclure que le module optique v0 a obtenu des résultats très intéressants, et ce, même lorsque le dépôt d'énergie était faible (de l'ordre de 25 keV). Pour ce type de dépôts les amplitudes moyennes des signaux observées étaient d'environ 50 mV, il est donc possible de discriminer les événements sans avoir besoin de faire un traitement supplémentaire. Le choix du PM ET Enterprises 9102 KSB a également été conforté par les résultats obtenus. Ils sont d'autant plus importants que c'est la première fois, au cours de notre étude, que nous avons la preuve qu'un scintillateur fin de 100 μm couplé à un PM via un guide de lumière de type "fish tail" peut être utilisé pour lire des signaux générés par des électrons ayant déposé quelques dizaines de keV dans notre scintillateur.

### Résultats obtenus pour la réponse du module v0 aux rayonnements $\gamma$

Cet essai a été réalisé afin de mettre en évidence une nouvelle fois un facteur de correspondance entre énergie déposée et amplitude des signaux mesurés. Nous souhaitons également vérifier le comportement de ce facteur qui pourrait ne pas être linéaire compte tenu de la gamme d'énergie correspondant aux dépôts dans le scintillateur. En effet, à basse énergie il existe des phénomènes non linéaires notamment dans la production de lumière [107]. Cet essai avait également pour but de valider le comportement du module complet vis à vis des rayonnements  $\gamma$  qui a été déterminé uniquement par simulation jusqu'ici.

Cet essai a été réalisé dans la boîte noire du spectromètre à électrons afin d'éviter les problèmes liés aux fuites de lumière. Attention, contrairement aux essais précédents, l'alimentation haute tension du PM ET Enterprises 9102 KSB a été fixée à 900 V. La source de césium 137 utilisée a été placée à 20 cm du module optique v0. Les résultats obtenus avec notre simulation GEANT4 sont visibles en rouge sur la figure 4.24. Ils ont été normalisés en fonction du temps afin de pouvoir être

comparés à nos résultats expérimentaux. Les résultats expérimentaux sont visibles en bleu sur la figure 4.24. Le graphique a été volontairement inversé afin de représenter l'évolution de seuil de discrimination (en mV) et l'évolution du dépôt d'énergie (en keV) dans le scintillateur en fonction du taux de comptage.

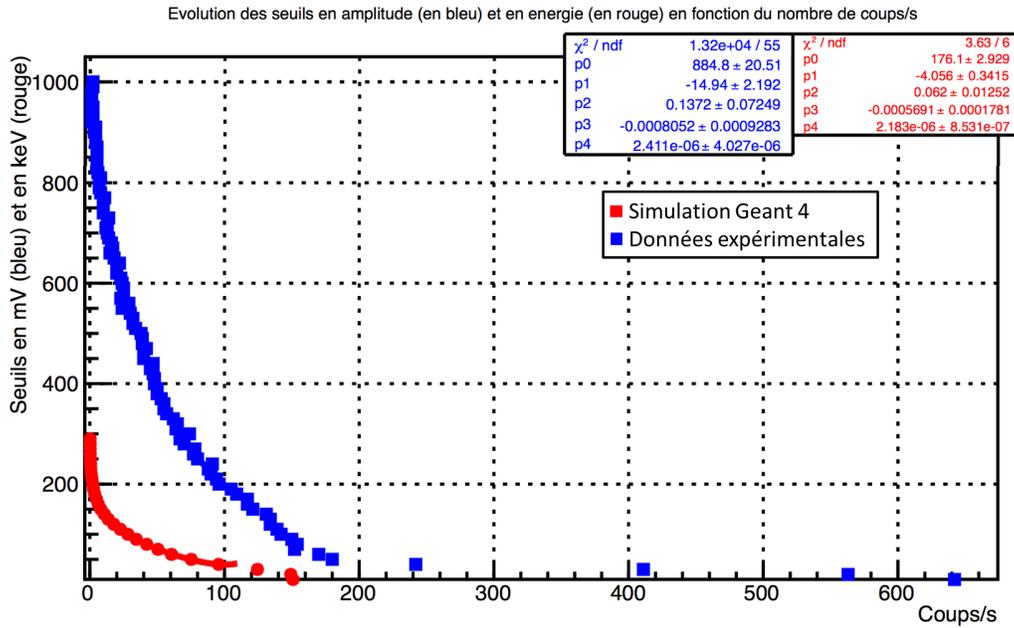


FIGURE 4.24: Evolutions du seuil de discrimination (en bleu) et du dépôt d'énergie dans le scintillateur (en rouge) en fonction du taux de comptage dans le module v0.

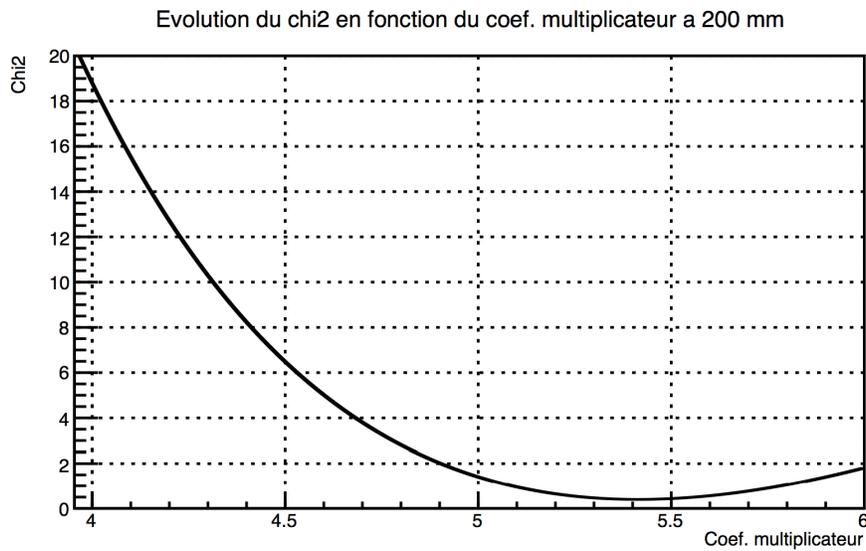


FIGURE 4.25: Evolution du  $\chi^2$  en fonction du coefficient multiplicateur  $\zeta$  choisi pour adapter les données simulées à nos résultats expérimentaux.

Tout d'abord, nous avons souhaité trouver un coefficient multiplicateur simple  $\zeta$  de type  $y=\zeta.x$  afin de constater si les comportements observés sont comparables. Nous avons pour cela programmé un algorithme qui a testé toutes les combinaisons par pas de  $10^{-3}$  et sélectionné celle pour laquelle le  $\chi^2$  est le plus petit. L'évolution du  $\chi^2$  en fonction du coefficient multiplicateur  $\zeta$  est représentée sur la figure 4.25. Nous constatons qu'il existe un optimum pour un coefficient multiplicateur de 5,4 mV/keV (pour lequel  $\chi^2$  est minimum). Finalement, en utilisant ce coefficient multiplicateur pour corriger nos seuils expérimentaux nous obtenons le graphique de la figure 4.26. Nous pouvons constater que les comportements de nos deux distributions sont semblables.

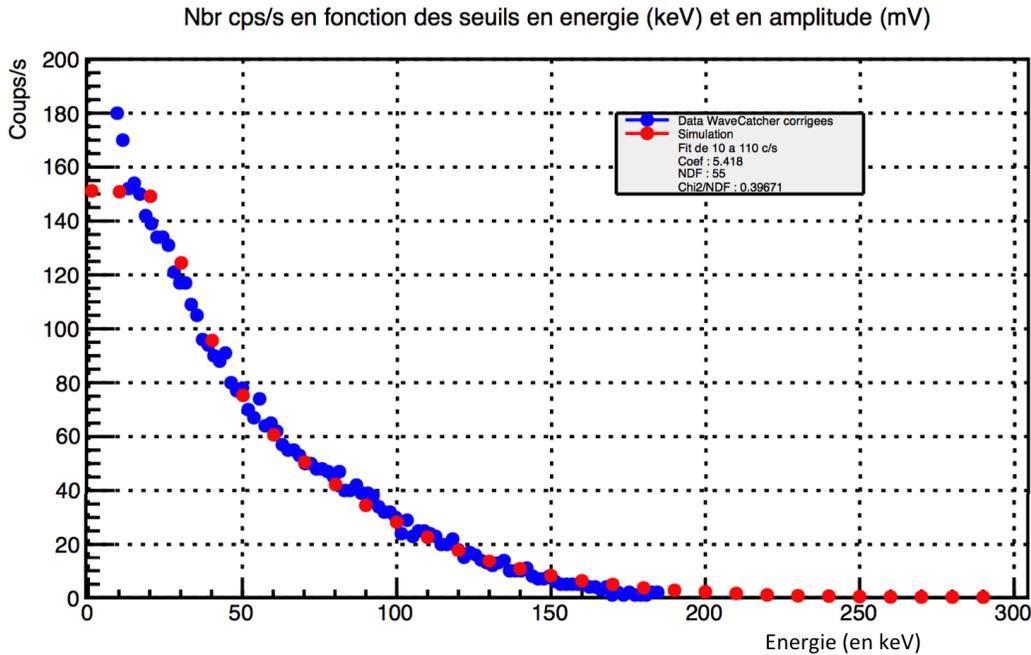


FIGURE 4.26: Evolution du taux de comptage en fonction de l'énergie déposée dans le scintillateur et du seuil de discrimination corrigé.

Ce test nous a également permis de constater que le PM 9102 KSB pouvait être utilisé sur une large gamme de haute tension. A 700 Volts le coefficient multiplicateur  $\zeta$  était d'environ 1,5 mV/keV et nous pouvons voir qu'à 900 Volts ce dernier est d'environ 5,4 mV/keV (voir figure 4.26). Ce résultat nous permet d'affirmer que nous aurons un peu plus de flexibilité lors de la réalisation des guides de lumière qui seront utilisés dans les prototypes pré-industriels. En effet, si les signaux sont plus faibles, nous pourrions adapter la haute tension et augmenter le gain de notre PM.

Enfin, ces résultats nous permettent également de valider notre simulation GEANT4 pour les rayonnements  $\gamma$ .

5. Le test du  $\chi^2$  (ou chi2) utilisé lors de nos essais est celui proposé nativement dans le programme ROOT, développé par le CERN, et dont le fonctionnement est décrit au lien suivant : <https://root.cern.ch/doc/master/classTH1.html#a11153bd9c45ceac48bbfac56cb62ea74>

## 4.6 Conclusions des simulations et essais sur les scintillateurs fins et le module optique v0

Les essais menés sur les scintillateurs fins et le module optique v0 nous ont permis de valider plusieurs points importants :

- Les simulations GEANT4 mises en place dans le cadre de notre étude pour vérifier le comportement de notre prototype ont été validées par les essais tant pour les rayonnements  $\beta$  que  $\gamma$ .
- Le spectre  $\gamma$  effectif mesuré en CNPE a été implémenté dans les simulations. Ce spectre, convolué aux facteurs de conversion fluence-équivalent de dose, nous permet de normaliser nos simulations. Le flux  $\gamma$  généré pourra donc être converti en débit d'équivalent de dose  $H^*(10)$  qui est, en pratique, l'unité utilisée par les appareils de radioprotection.
- Le premier résultat important de simulation montre que la solution retenue permet, dans le cas d'un spectre  $\gamma$  réaliste, une atténuation du BdF principal d'un facteur  $10^3$ .
- La confrontation des simulations à des essais nous a permis de vérifier que les scintillateurs fins généraient suffisamment de lumière. C'est donc le principal verrou technologique du principe de détection retenu qui a été levé et nous avons conclu que :
  - nous pouvons mesurer efficacement suffisamment de lumière dans le cas d'un scintillateur fin directement couplé à un photomultiplicateur,
  - cette conclusion se révèle toujours vraie lorsque nous ajoutons un guide de lumière simple en PMMA.
- La méthodologie mise en place, visant à comparer les résultats de simulation et d'essais, nous a permis de déterminer les facteurs de conversion entre énergie déposée et lumière mesurée pour différentes valeurs de haute tension. Nous pouvons donc en conclure que :
  - le principal verrou technologique relatif à la faisabilité de la mesure a été levé.
  - nous avons réunis tous les outils nécessaires (simulations, mesures et méthodes de contrôle) pour mener plus avant l'étude proposée,
- L'utilisation d'un PM comme photodétecteur s'est également révélé être un bon choix car il est le seul à allier : une bonne sensibilité, un timing rapide et un faible bruit intrinsèque.

Les résultats obtenus et les conclusions que nous pouvons en tirer sont positifs. Ils constituent la preuve de faisabilité du concept proposé. La réalisation et la qualification de prototypes complets sont donc validées.

De manière générale, nos calculs et simulations montrent que l'utilisation d'un compteur de garde se révélera indispensable étant donné que le scintillateur fin reste encore trop sensible pour être utilisé seul dans un bruit de fond  $\gamma$  élevé et fluctuant. Les futurs prototypes complets devront donc impérativement être munis de deux modules optiques et d'une carte électronique capable d'effectuer une soustraction des taux de comptage en temps réel.



## Chapitre 5

# Prototypes pré-industriels : qualification, validation et performances

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Le prototype v1 : présentation et retour d'expérience</b>	<b>141</b>
5.1.1	Présentation du prototype v1	141
5.1.2	Résultats obtenus et retour d'expérience	143
<b>5.2</b>	<b>Présentation des prototypes v2.1 et v2.2</b>	<b>146</b>
5.2.1	Origines des options choisies	146
5.2.2	Particularités des prototypes v2.1 et v2.2	151
<b>5.3</b>	<b>Essais de pré-qualification des prototypes v2.1 et v2.2</b>	<b>154</b>
5.3.1	Rendements $^{60}\text{Co}$	155
5.3.2	Homogénéité du rendement sur toute la surface active de mesure	155
5.3.3	Essais préliminaires des prototypes en irradiateur	158
<b>5.4</b>	<b>Contexte des essais en centrale nucléaire</b>	<b>163</b>
<b>5.5</b>	<b>Essais en CNPE de nos deux prototypes</b>	<b>166</b>
5.5.1	Dépendance angulaire au bruit de fond $\gamma$	166
5.5.2	Dépendance temporelle au bruit de fond $\gamma$	172
5.5.3	Adaptation des calculs de SD, LD et AMD à notre étude et détermination expérimentale	174
5.5.4	Validation des AMD définis avec des mesures de frottis dans différentes ambiances $\gamma$	186
<b>5.6</b>	<b>Conclusions des essais menés sur les prototypes v2.1 et v2.2</b>	<b>192</b>

---

*Après avoir obtenu notre preuve de faisabilité avec le prototype de module optique v0, nous avons lancé la fabrication de plusieurs prototypes complets. Ces derniers ont ensuite été testés en laboratoire et sur le site de Chinon, plus précisément dans le bâtiment réacteur (BR) et le bâtiment combustible (BK) des tranches 2 et 4. La réalisation des prototypes et leurs tests sur site se sont déroulés sur une année environ.*

*Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord le prototype v1, ses principaux résultats et la raison pour laquelle l'appareil n'a pas atteint les spécifications que nous nous étions fixées. Ensuite nous décrirons les prototypes v2.1 et v2.2 ainsi que les essais de pré-qualification effectués dans*

les locaux de la société Carmelec et en laboratoire. Nous poursuivrons avec une présentation du contexte des essais en centrale nucléaire et les difficultés qui en découlent. Nous continuerons avec la présentation des résultats obtenus lors des essais réalisés en CNPE sur les prototypes v2.1 et v2.2. Après cela, nous présenterons les formules de calcul de seuil de détection (SD) et d'activité minimale détectée (AMD) spécifiques à nos prototypes ainsi que les tableaux de sensibilité obtenus pour nos deux appareils. Pour finir, nous dresserons un bilan des diverses itérations réalisées sur nos prototypes accompagné d'un résumé des spécifications obtenues.

## 5.1 Le prototype v1 : présentation et retour d'expérience

Le prototype v1 a été la première version complète de contaminamètre que nous avons conçu. Nous avons choisi de doter ce détecteur d'une surface active de 200 cm<sup>2</sup>. Ce choix s'explique par la volonté d'utiliser un appareil avec la surface active la plus élevée possible pour optimiser les temps de mesure (par exemple lorsque de grandes surfaces doivent être contrôlées). Pour rappel, dans le cahier des charges initial, que nous avons présenté dans la partie 2.4.3, EDF demandait une surface comprise entre 100 et 300 cm<sup>2</sup> en précisant qu'elle devra être obligatoirement supérieure à 100 cm<sup>2</sup>.

### 5.1.1 Présentation du prototype v1

Une vue éclatée du prototype est présentée figure 5.2. Le prototype v1 marque une grande avancée, c'est le premier montage autonome conçu pour être transporté et utilisé en dehors du laboratoire.

Dans un premier temps nous avons supprimé le module haute tension et nous avons alimenté notre module HV38K20CP (voir figure 5.1) à l'aide de la tension 5 Volts continue fournie par une alimentation stabilisée de laboratoire. Enfin, nous avons rendu notre prototype autonome en réalisant des essais de régression à l'aide d'une batterie externe initialement prévue pour les ordinateurs portables. Cette batterie de 85 W délivre une tension de 12V. Les tests ont montré que les comportements des modules optiques étaient similaires. Le seul point divergeant est que pour une même haute tension, le nouveau pont diviseur induit un gain légèrement inférieur.

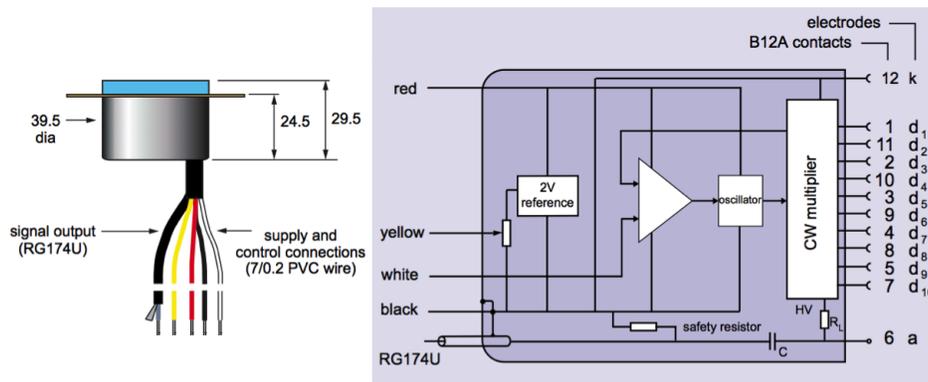


FIGURE 5.1: Schéma de principe du module HV38K20CP commercialisé par ET Enterprises incluant le pont diviseur actif et l'alimentation haute tension [96].

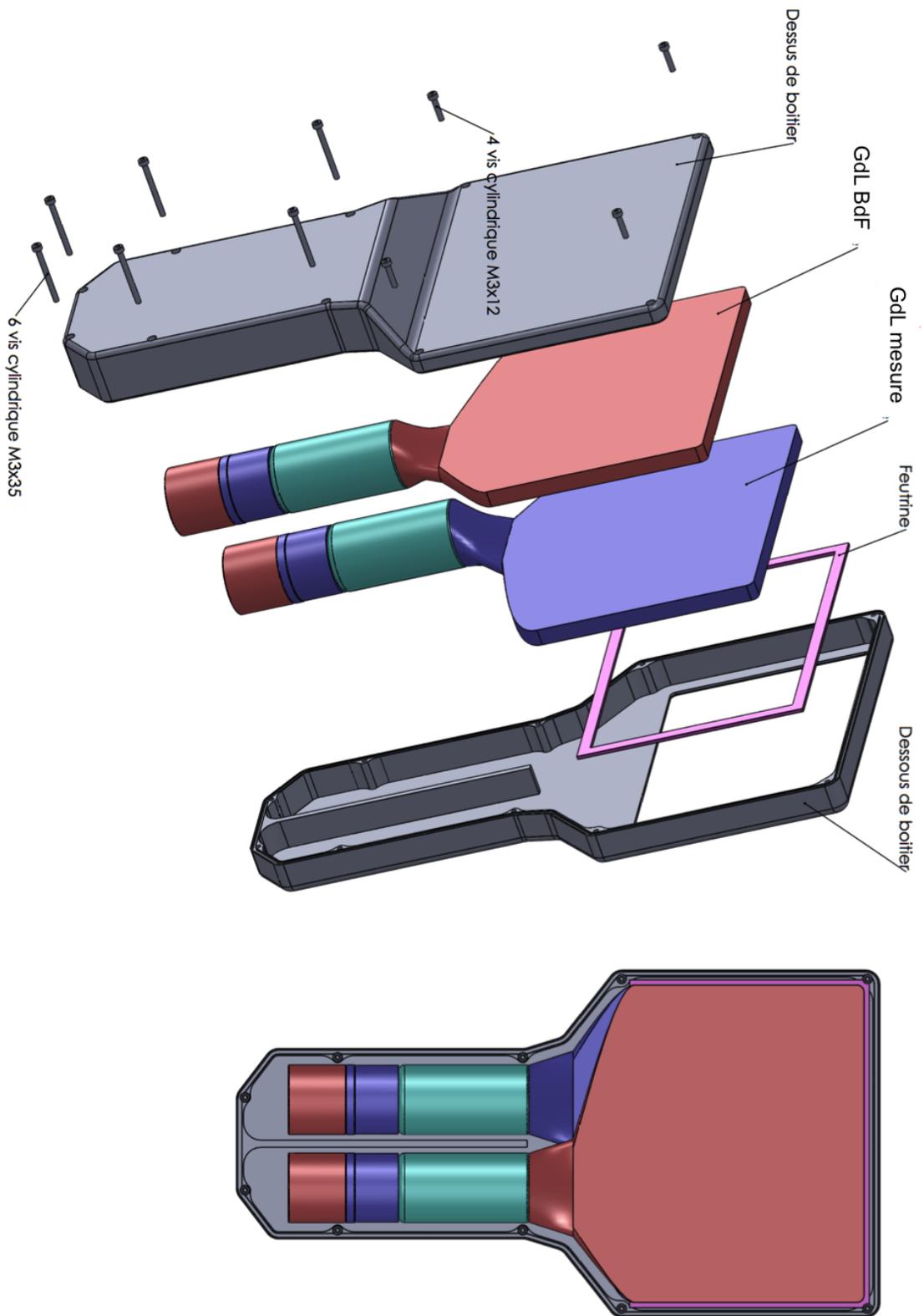


FIGURE 5.2: Plan mécanique du prototype v1 comprenant le boîtier en aluminium (en 2 parties), les PM, les ponts diviseurs de tension et les guides de lumières (GdL).

L'utilisation du module HV38K20CP nous a permis de diviser par 30 la consommation des ponts diviseurs par rapport aux anciens ponts diviseurs résistifs utilisés. C'est un point extrêmement important et positif dans un développement voué à l'industrialisation.

Dans notre démarche visant à produire un prototype autonome, nous avons également dû trouver une alternative à la carte d'acquisition MATAcq32. La solution choisie a été d'utiliser une carte d'acquisition de type WaveCatcher développée par le LAL d'Orsay (voir figure 5.3). Cette carte permet de numériser nos signaux avec une fréquence d'échantillonnage très élevée, de l'ordre de 3,2 GS/s. Elle nous permet d'utiliser simultanément jusqu'à 8 voies et de réaliser des expériences plus complexes comme des coïncidences entre les voies. Cette carte extrêmement performante est également facile à transporter de par ses dimensions : 154 mm x 50 mm x 164 mm. Elle ne pèse que 680 g et peut être alimentée en 12V. La batterie utilisée pour l'alimentation des ponts diviseurs servira également à alimenter notre carte d'acquisition. Cette carte est donc une solution intéressante qui répond à nos besoins.



FIGURE 5.3: Vue de face de la carte d'acquisition WaveCatcher développée par le LAL d'Orsay [109].

### 5.1.2 Résultats obtenus et retour d'expérience

Nous avons réalisé plusieurs tests, majoritairement effectués en laboratoire, avec le prototype v1.

#### Résultats de rendement et d'homogénéité de surface du prototype v1

Un point important à déterminer pour le prototype v1 est son rendement absolu au cobalt 60. La source scellée utilisée est une source de cobalt 60 de type ESRL20 (voir figure 2.21) commercialisée par la société LEA-CERCA. Cette source fait partie des sources références pour l'étalonnage des appareils de mesure. C'est notamment une source de référence pour EDF et elle est utilisée pour la réalisation de CPI/CPE<sup>1</sup>. Le diamètre de la source est de 50 mm et son diamètre actif est de 44 mm (c'est également le diamètre des frottis utilisés lors de mesures indirectes). L'activité est déposée sur une feuille d'aluminium d'environ 0,3 mm d'épaisseur, qui est elle-même déposée sur un support de source en inox de 2 mm [111].

Le LEA-CERCA réalise des mesures d'activité dans  $4\pi$  (en Bq) et des mesures de débit de fluence  $\beta$  dans  $2\pi$  (en  $\beta/s$ ) avant d'envoyer la source à son client. Notre source de cobalt 60 a été mesurée par le LEA-CERCA le 13/06/2001. Son activité initiale dans  $4\pi$  était de 3922 Bq avec une incertitude de 10 % ( $k = 2$ ) et son débit de fluence initial dans  $2\pi$  était de 1969  $\beta/s$  avec une incertitude de 6 % ( $k$

1. 2. CPI/CPE : Contrôle périodique intermédiaire et contrôle périodique d'étalonnage. Il s'agit des contrôles périodiques réglementaires et obligatoires sur les appareils de radioprotection [110].

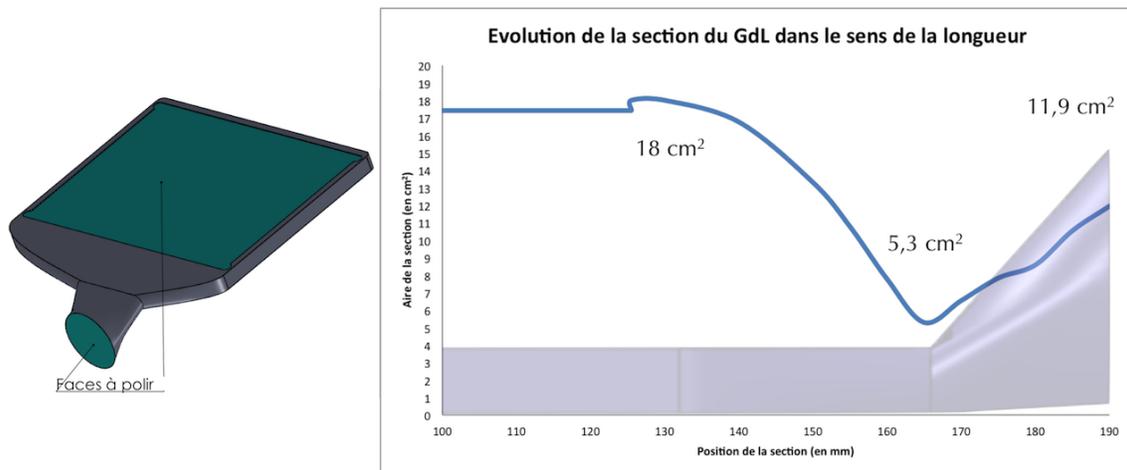


FIGURE 5.4: Vue de dessous du guide de lumière “GdL mesure” utilisé dans le prototype v1. Evolution de la section du guide de lumière en fonction de la position.

= 2). Cette source ayant atteint presque 3 demi-vie, son activité a été re-mesurée par la plateforme PRISNA du CENBG sur des détecteurs germanium. L’activité de notre source au 14/02/2016 était de 475 Bq +/- 57 Bq (k = 2).

Le rendement du prototype v1 a été déterminé pour plusieurs seuils de discrimination dont les résultats obtenus sont visibles sur la figure 5.5. Pour un seuil de discrimination de 50 mV environ, nous obtenons un rendement de 13,1 % au cobalt 60. Ce rendement est assez bas comparé à nos attentes (un rendement d’environ 20 % est attendu). L’origine de ce faible rendement vient directement du mauvais dimensionnement du guide de lumière et notamment de l’écrasement de la section le long du guidage tel que représenté sur la figure 5.4. La section du guide de lumière est de 18 cm<sup>2</sup> à l’origine, puis elle chute à 5,3 cm<sup>2</sup>, enfin elle revient à 11,9 cm<sup>2</sup> au niveau du couplage avec le photomultiplicateur.

Lors de la réalisation mécanique des guides de lumière, l’accent a été mis sur l’ergonomie de l’appareil et ce, au détriment de certaines caractéristiques comme, par exemple, le respect de la conservation des espaces de phase dicté par le théorème de Liouville. Le guide de lumière (GdL) dessiné permet d’avoir un appareil très compact mais il nous fait perdre beaucoup de lumière.

Le manque de signal lumineux généré par le mauvais dimensionnement des guides de lumière entraîne non seulement une baisse du rendement mais aussi une augmentation de l’inhomogénéité de détection de notre prototype. Les essais menés sur le prototype v1 ont été réalisés au CENBG également à l’aide d’une source de cobalt 60 de type ESRL20. Les résultats obtenus montrent que la réponse de notre prototype varie en fonction de la zone où interagissent les électrons dans le scintillateur. En prenant comme référence le point central de notre guide de lumière, nous observons une variation de l’ordre de +/- 30 %. Les interactions se produisant du côté où le PM est couplé au GdL sont plus efficacement détectées que lorsqu’elles ont lieu du côté opposé (voir figure 5.5).

Dans son cahier des charges initial, EDF nous a demandé d’avoir une homogénéité de réponse surfacique meilleure que +/- 15 %. De ce point de vue, le prototype v1 n’atteint pas encore l’objectif visé mais son comportement reste toutefois intéressant compte tenu de la grande surface de détection proposée par l’appareil.

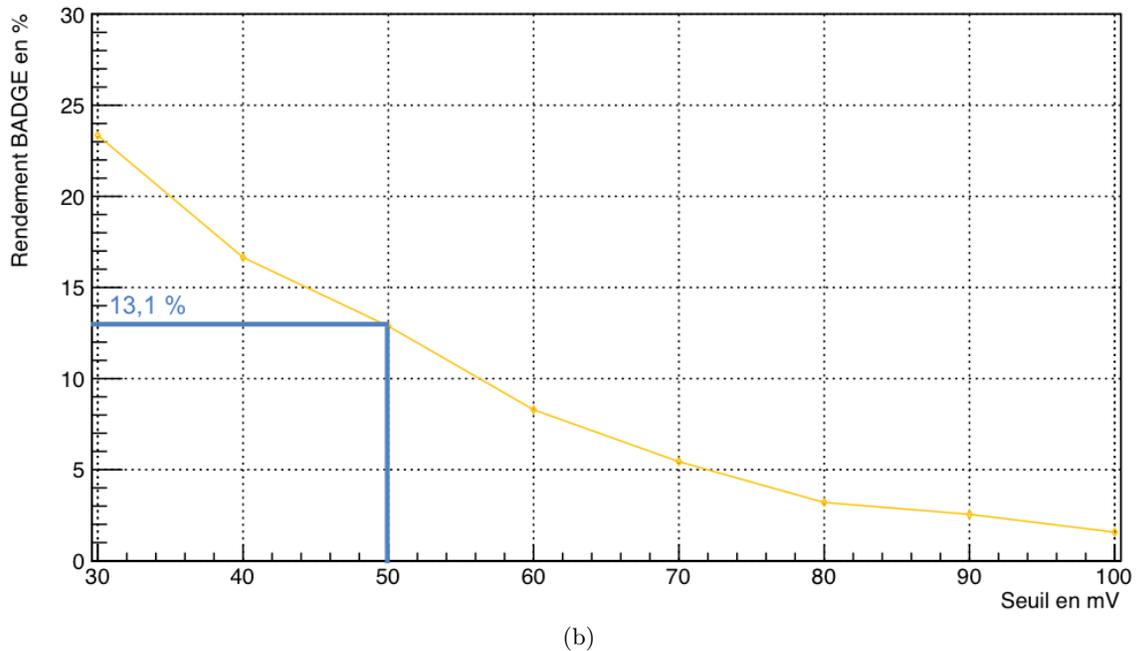
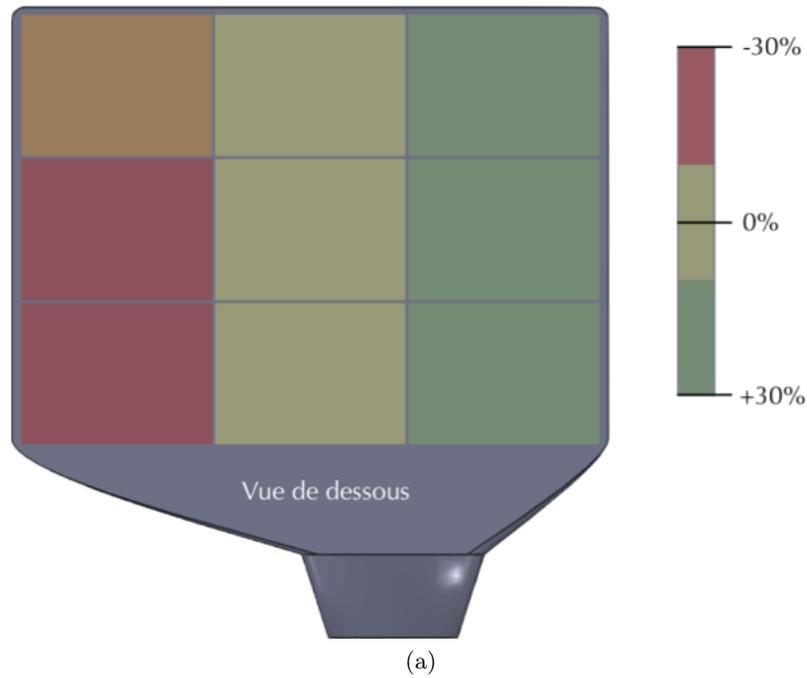


FIGURE 5.5: Résultat d'homogénéité surfacique du prototype v1 (a) et évolution du rendement cobalt 60 du prototype v1 en fonction du seuil de discrimination (b). Le seuil choisi pour ce prototype était de 50 mV, ce qui correspond à 13,1 % de rendement au cobalt 60.

Le faible rendement du contaminamètre et son inhomogénéité surfacique font qu'il n'aurait pas été retenu par EDF. Toutefois, l'étude menée a progressé grâce à cette expérience.

Les principaux retours d'expérience des essais du prototype v1 sont les suivants :

- Bien que l'ergonomie de l'appareil soit importante, le design des guides de lumière devra faire l'objet d'un compromis afin de ne pas affecter les performances de notre appareil. Ce point sera prioritaire dans la suite de notre étude,
- Les résultats obtenus nous ont permis de valider beaucoup de choix techniques comme : les photomultiplicateurs, les ponts diviseurs, les hautes tensions, les scintillateurs, l'alimentation externe de notre appareil et notre chaîne d'acquisition de mesure (composée d'un ordinateur portable et d'un module WaveCatcher).

## 5.2 Présentation des prototypes v2.1 et v2.2

Après notre première expérience obtenue avec le prototype v1, nous avons décidé d'améliorer les points faibles révélés lors de nos essais précédents, à savoir : le design des guides de lumière et la surface de détection. Nos recherches nous ont donc amené à développer deux prototypes pour tester deux théories émanant de nos simulations Monte Carlo.

### 5.2.1 Origines des options choisies

Les résultats obtenus sur site ont mis en lumière les points importants du comportement du contaminamètre. Parmi ces points, il s'avère nécessaire de travailler plus finement sur le design de nos guides de lumière. Les résultats obtenus avec le prototype v1 se sont révélés en grande partie insuffisants à cause des guides de lumière utilisés. L'inhomogénéité de la réponse au bruit de fond  $\gamma$ , bien que satisfaisante, semble pouvoir être améliorée.

### Simulations GEANT4 - interactions dans le détecteur

Partant de ce constat, nous avons réalisé de nouvelles simulations GEANT4 en travaillant particulièrement le design des guides de lumière (épaisseurs et formes). Nous avons amélioré la géométrie de notre prototype pour l'implémenter dans GEANT4 et rendre nos simulations plus fidèles (voir figure 5.6). Pour approfondir nos connaissances sur le comportement du contaminamètre, nous avons axé nos recherches sur le bruit de fond  $\gamma$ . Nos simulations ont été systématiquement réalisées pour plusieurs orientations du flux  $\gamma$  : irradiation  $2\pi$  avant et  $2\pi$  arrière pour simuler le bruit de fond du BK et  $4\pi$  pour simuler le bruit de fond du BR (voir figure 5.6).

Plusieurs matériaux ont été simulés : par exemple, l'aluminium, le plastique ABS et l'acier pour le boîtier de l'appareil. Nous avons également travaillé sur le guide de lumière (GdL) en simulant des épaisseurs comprises entre 5 et 10 mm. Enfin, le dernier point nous a amené à réaliser deux prototypes munis de deux variantes du GdL : une version pleine en PMMA et une version évidée dans laquelle seuls les bords sont en PMMA (voir figure 5.7). Dans ce dernier modèle, la lumière est collectée sur les tranches du scintillateur.

Les simulations GEANT4 décrites plus bas, montrent que l'utilisation de GdL évidés entraînent une diminution de l'inhomogénéité entre les deux modules optiques. Pour rappel, l'inhomogénéité entre nos deux modules optiques (MO) entraîne des différences de taux de comptage observées

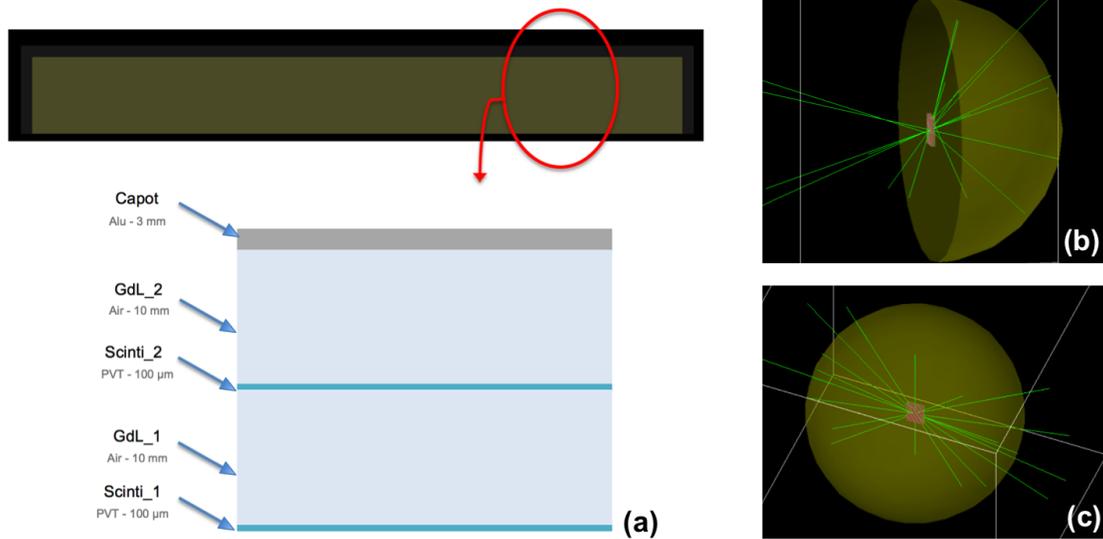


FIGURE 5.6: Exemple de géométries simulées avec la nature des matériaux utilisés (a) et présentation de deux types d'irradiation :  $2\pi$  arrière (b) et  $4\pi$  (c).



FIGURE 5.7: Vues des deux types de guide de lumière : plein (a) et évidé (b).

entre les deux MO lorsque le détecteur est irradié par un bruit de fond  $\gamma$ . Lorsque nous utilisons des GdL pleins, le PMMA crée un écran qui contribue à atténuer le flux  $\gamma$ . Cela entraîne donc une inhomogénéité qui influe sur la différence entre les taux de comptage des 2 modules optiques (exemple présenté dans la figure 5.9). Les effets contribuant à cette inhomogénéité ont été étudiés dans de multiples simulations GEANT4.

Par exemple, notre travail a consisté à comprendre les phénomènes mis en jeu à l'intérieur de notre détecteur. Nous avons pris, tout d'abord, comme origine le nombre total d'évènements ayant déposé de l'énergie dans les scintillateurs. Ensuite, nous avons approfondi nos simulations afin de trouver d'où provenaient les électrons ayant déposé de l'énergie dans les scintillateurs. Pour chaque évènement, nous avons donc retracé le parcours de l'électron et déterminé de quel volume il était originaire (GdL, boîtier,...) puis nous avons tracé les distributions en énergie pour chaque interface (GDL arrière/scintillateur arrière,...). L'exemple, présenté figure 5.8, décrit les composantes et les flux d'électrons entre chaque volume de notre simulation. Il se révèle, d'ailleurs, être la meilleure solution d'après nos simulations. Il s'agit d'un prototype muni de scintillateurs plastiques de  $100\ \mu\text{m}$  d'épaisseur, de guides de lumière évidés, d'un boîtier en aluminium sur les côtés du détecteur et de

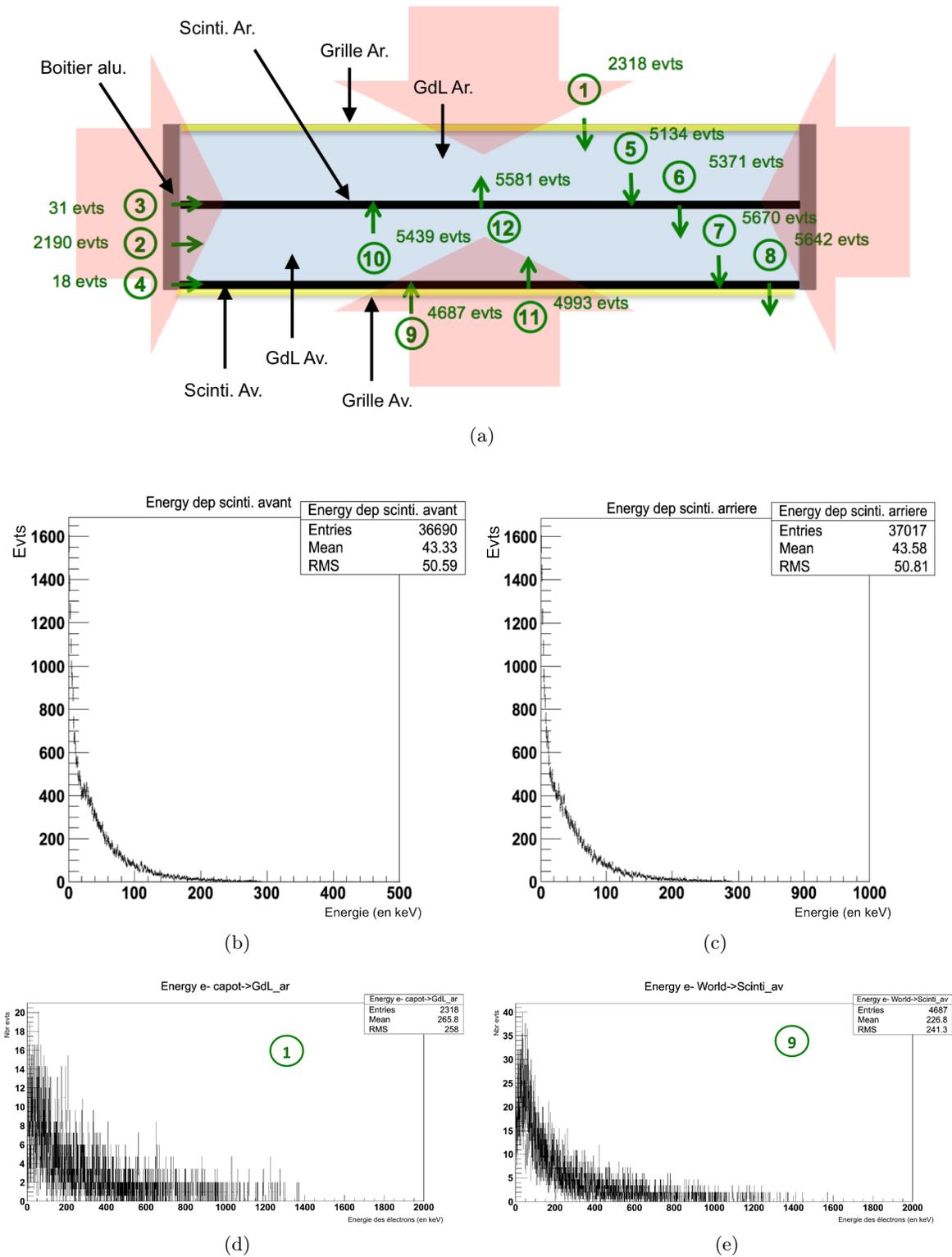


FIGURE 5.8: Schéma de la géométrie choisie comprenant les flux d'électrons pour chaque interface (a). Les flèches rouges montrent que l'irradiation est dans  $4\pi$ . Distributions totales des énergies déposées dans le scintillateur avant (b) et arrière (c). Exemples de distributions des énergies des électrons observées à l'interface boîtier/GdL ar. (d) et World/Scinti. av. (e) [112].

deux grilles de protection transparentes en acier (faces avant et arrière).

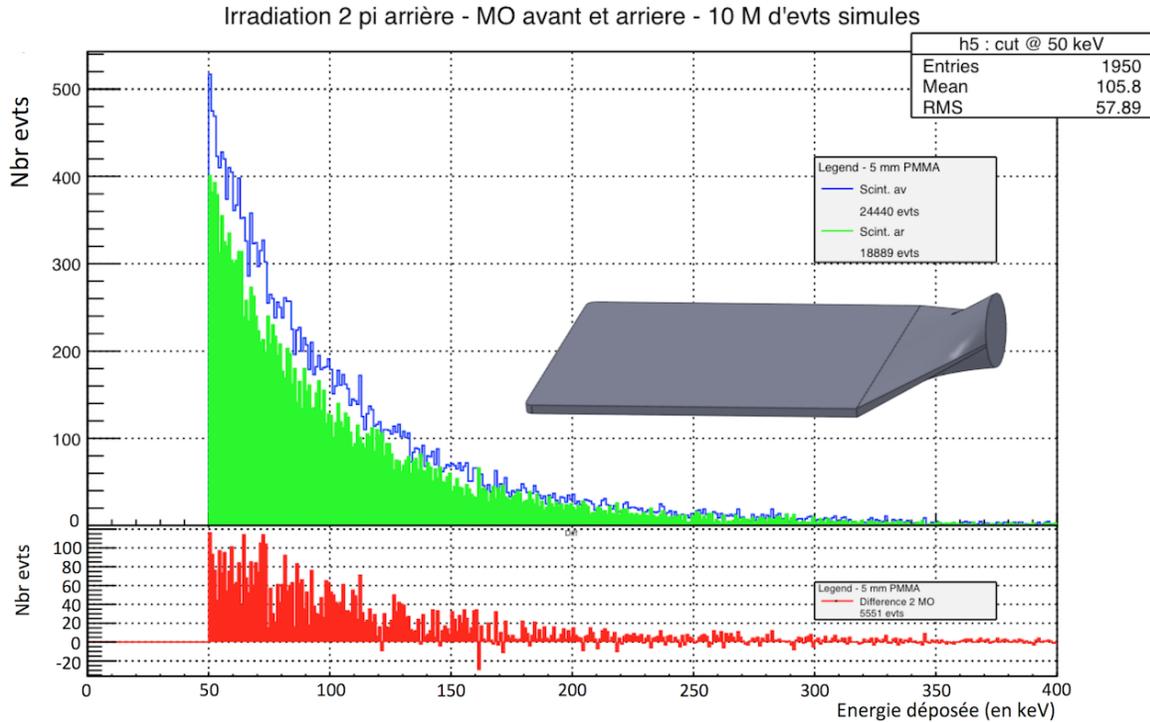


FIGURE 5.9: Distribution des énergies déposées dans chaque scintillateur par des événements causés par le bruit de fond  $\gamma$ . Un visuel du guide de lumière (5 mm PMMA) utilisé pour cette simulation est également présenté.

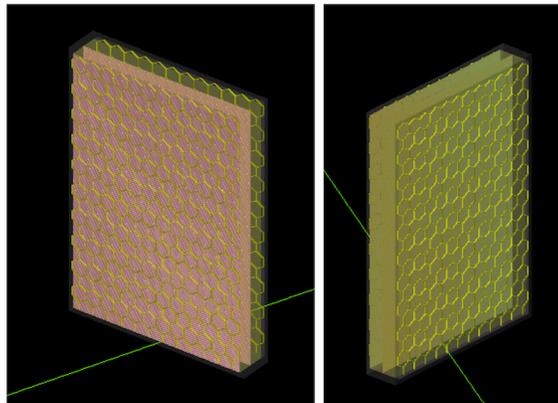


FIGURE 5.10: Vues de face et arrière d'une simulation GEANT4. Le prototype est muni de deux grilles en acier (à l'avant et à l'arrière) .

Plusieurs configurations ont été testées et le tableau 5.1 résume les principaux résultats. Il nous donne un aperçu des solutions les plus efficaces pour avoir la meilleure homogénéité possible. L'homogénéité relative (notée Delta dans le tableau) est une valeur à comparer par rapport aux autres

Boîtier	GdL	Grille(s)	Comptage scinti. avant	Comptage scinti. arrière	Delta (evts)
Alu. 3 mm intégral	Evidés 10 mm	Sans grilles	36951	38192	1241
ABS 3 mm intégral	Evidés 10 mm	Sans grilles	38262	39588	1326
ABS 1 mm intégral	Evidés 10 mm	Sans grilles	37673	39323	1650
Acier 3 mm intégral	Evidés 10 mm	Sans grilles	32371	33158	787
Acier 1 mm intégral	Evidés 10 mm	Sans grilles	34831	36927	2096
Alu. 3 mm sur les côtés	Evidés 10 mm	Sans grilles	35863	36205	342
Alu. 3 mm sur les côtés	Evidés 10 mm	Grille ar. 1 mm Acier	36060	36952	892
Alu. 3 mm intégral	PMMA 10 mm	Sans grilles	36782	39433	2651
Alu. 3 mm sur les côtés	PMMA 10 mm	Sans grilles	37240	40737	3497
Alu. 3 mm intégral	PMMA 5 mm	Sans grilles	36447	39922	3475
Alu. 3 mm sur les côtés	PMMA 5 mm	Sans grilles	37930	40691	2761
Alu. 3 mm sur les côtés	PMMA 10 mm	Grille ar. 1 mm Acier	37017	40201	3184
Alu. 3 mm sur les côtés	Evidés 10 mm	Grille ar. 1 mm Air	35907	36155	248
Alu. 3 mm sur les côtés	Evidés 10 mm	Grille av/ar. 1 mm Acier	36690	37017	327

TABLE 5.1: Tableau récapitulatif des configurations simulées sous GEANT4. Évènements ayant interagi dans chaque scintillateur et différence entre ces deux taux donnant un aperçu de l'homogénéité entre les deux modules optiques pour 25 millions d'évènements tirés [112].

homogénéités du tableau. En effet, nous avons volontairement simulé des flux  $\gamma$  très importants de l'ordre de 25 millions d'évènements tirés dans le spectre EDF présenté dans le chapitre précédent.

Les résultats dans différentes configurations nous permettent de retrouver le facteur d'environ  $10^3$  entre le nombre d'évènement généré et le nombre d'évènement interagissant dans un module optique. Ce facteur est du même ordre de grandeur que celui trouvé lors de nos précédentes simulations (présentées au chapitre précédent). Les simulations dans diverses configurations nous permettent également de constater que l'ordre de grandeur attendu entre la différence de comptage de nos deux modules optiques et le nombre d'évènements tirés est d'environ  $10^4 - 10^5$ .

Ces simulations nous ont également permis d'évaluer l'impact des grilles de protection qui seront présentes sur l'appareil final. Pour le moment, nous avons choisi de réaliser ces grilles sur le modèle que la société Carmelec utilise déjà sur un autre type de sonde (voir figure 5.10). Ces grilles en acier ont des motifs hexagonaux de 0,3 mm d'épaisseur et les côtés des hexagones mesurent 5 mm.

### Points communs entre nos prototypes v2.1 et v2.2

Les simulations présentées dans le paragraphe précédent nous ont donc amené à réaliser deux prototypes munis de différences mécaniques au niveau de leurs guides de lumière et du boîtier utilisé.

Toutefois, certaines composantes resteront les mêmes sur les deux prototypes. Ce sera le cas des photomultiplicateurs ET Enterprises 9102 KSB, des ponts diviseurs et des modules haute tension HV38K20CP associés. Les scintillateurs seront toujours de type Eljen EJ-212 mais auront une surface de  $102 \text{ cm}^2$ .

Les couplages optiques "scintillateur/guide de lumière" et "guide de lumière/PM" ont été réalisés avec de la graisse optique BC630 sur le prototype v1. Or, lors du démontage du prototype nous nous sommes aperçus que plusieurs bulles étaient apparues entre les scintillateurs et les guides de lumière. Nous avons également constaté que les bords des scintillateurs étaient légèrement décollés. Afin de garantir des résultats reproductibles, nous avons choisi d'utiliser le ciment optique Stycast 1264. Le seul bémol est que le GdL et le scintillateur ne seront plus démontables. La Stycast 1264 s'est aussi imposée car elle dispose de l'indice optique le plus adapté à notre configuration (voir tableau 3.2).

### 5.2.2 Particularités des prototypes v2.1 et v2.2

Nos simulations GEANT4 nous ont permis de déterminer une configuration intéressante pour notre prototype qui consiste à évider le guide de lumière pour ne laisser que les bords (voir figure 5.11). Comme nous avons pu l'expliquer plus haut, le retrait de matière entre nos deux scintillateurs semble favoriser leur homogénéité. Pour les mêmes raisons, le boîtier en aluminium sera également évidé.



FIGURE 5.11: Vue de profil d'un guide de lumière en PMMA évidé.

### 5.2.2.1 Le prototype v2.1

Le prototype v2.1 est le prototype apportant le plus de nouveauté. D'après les simulations effectuées, il s'agit du prototype le plus prometteur d'un point de vue de l'homogénéité de réponse au bruit de fond  $\gamma$ . Notre appareil est un assemblage de deux modules optiques (voir Figure 5.12) composés chacun d'un photomultiplicateur (bleu turquoise), d'un pont diviseur de tension (bleu roi), d'un module HT (rouge), d'un guide de lumière (gris) et d'un scintillateur plastique fin (en bleu clair).

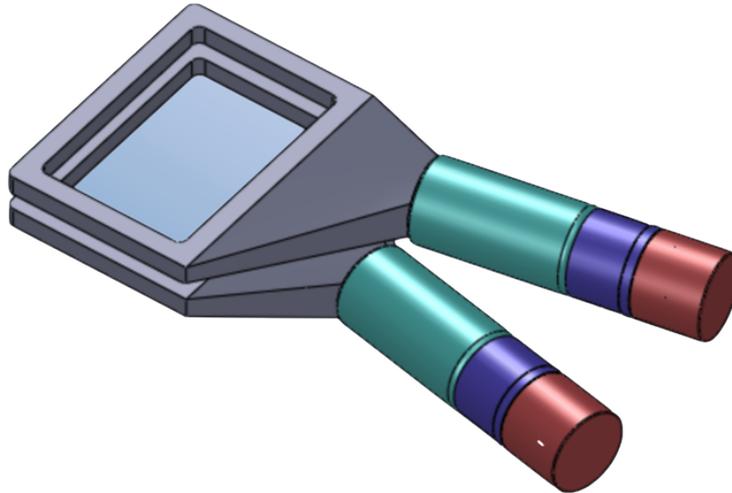


FIGURE 5.12: Vue des deux modules optiques utilisés dans le prototype v2.1. Ils sont composés de guides de lumière évidés.

La figure 5.12 représente les deux modules optiques présents dans le prototype v2.1. Le positionnement des photomultiplicateurs a été revu depuis nos précédents essais avec le prototype v1 et ces derniers sont maintenant inclinés en direction du centre du scintillateur. Ce positionnement améliore l'homogénéité de la réponse sur toute la surface de détection. La particularité de ce prototype est d'avoir des guides de lumière évidés. La lumière émise par les scintillateurs est collectée sur les bords de ces derniers.

Lors des essais d'homogénéité surfacique, que nous développerons dans le chapitre suivant, nous nous sommes aperçus que les résultats du prototype v2.1 n'étaient pas conformes aux prévisions. Nous utilisons initialement un scintillateur plastique Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La collection de la lumière se faisant par la tranche, la quantité de photons de scintillation collectée n'était pas suffisante et les variations de réponse du détecteur sur les 102  $\text{cm}^2$  de sa surface active (85 mm x 120 mm) étaient de l'ordre de  $\pm 30\%$ . Aussi, et afin de maintenir l'homogénéité en dessous de 15 % (comme demandé par EDF), nous avons opté pour un scintillateur un peu plus épais (200  $\mu\text{m}$ ) que lors de nos précédents essais (ainsi que pour le prototype v2.2).

Le prototype v2.1 est composé d'un boîtier en aluminium de 3 mm d'épaisseur. Ce boîtier est évidé au niveau des guides de lumière pour le rendre le plus homogène possible au bruit de fond ambiant. La vue éclatée du prototype v2.1 est visible sur la figure 5.13.

**En conclusion, le prototype v2.1 a comme particularité :**

- des guides de lumière évidés qui induisent une meilleure homogénéité au BdF  $\gamma$  ambiant comparé au prototype v2.2,
- des scintillateurs plus épais qui impliquent une sensibilité au BdF  $\gamma$  plus importante.

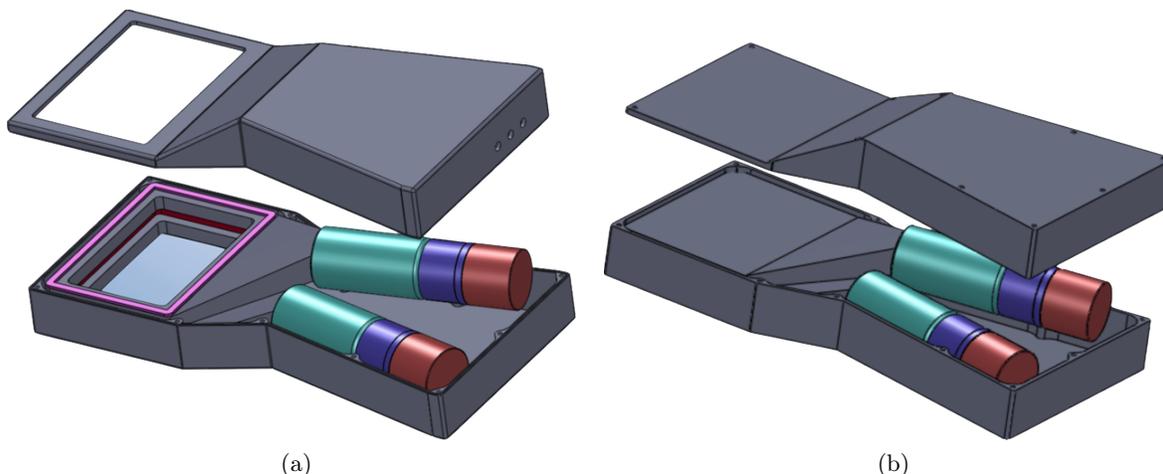


FIGURE 5.13: Vue éclatée des prototypes v2.1 (a) et v2.2 (b) complets. Le prototype v2.1 bénéficie de guides lumière et d'un boîtier évidés.

### 5.2.2.2 Le prototype v2.2

Le prototype v2.2 est une version redimensionnée du prototype v1 (passage d'une surface active de  $204 \text{ cm}^2$  à une surface de  $102 \text{ cm}^2$ ). Les guides de lumière ont été retravaillés pour améliorer la collection de lumière et pour tenir compte des contraintes de terrain. Comme pour le prototype v2.1, les PM sont orientés vers le centre de leurs guides de lumière respectifs.

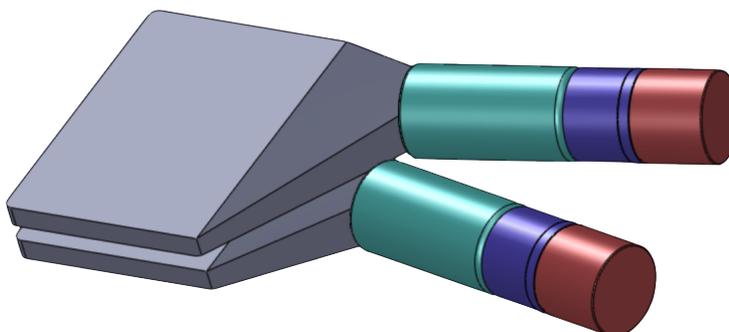


FIGURE 5.14: Vue des deux modules optiques utilisés dans le prototype v2.2. Ils sont composés de guides de lumière pleins en PMMA.

Le boîtier est le même que pour le prototype v2.1 sauf qu'il n'est plus évidé mais plein. Ici, le capot retrouve sa fonction d'écran. De la même manière, les guides de lumière sont pleins (voir figure 5.14). Le principe de fonctionnement décrit dans les paragraphes précédents est toujours appliqué. Notre

appareil est toujours composé de deux modules optiques composés chacun d'un photomultiplicateur (bleu turquoise), d'un pont diviseur de tension (bleu roi), d'un module HT (rouge), d'un guide de lumière (gris) et d'un scintillateur plastique fin (non représenté sur ce schéma).

Ici, la collection de lumière étant meilleure que dans le prototype v2.1 nous avons pu conserver les scintillateurs fins Eljen EJ-212 de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

**En conclusion, le prototype v2.2 (voir figure 5.13) a comme particularité :**

- d'avoir des guides de lumière pleins qui ont comme avantage de mieux collecter la lumière mais, en contrepartie, ils induisent une homogénéité au BdF  $\gamma$  ambient moins bonne que celle du prototype v2.1,
- la collection de lumière étant meilleure, il est possible d'utiliser des scintillateurs plus fins. Ces derniers ont une sensibilité au BdF  $\gamma$  ambient moins importante que le prototype v2.1.

### 5.3 Essais de pré-qualification des prototypes v2.1 et v2.2

L'assemblage et le réglage de chaque module optique ont été effectués au CENBG. Les essais de pré-qualification se sont ensuite déroulés dans les locaux de la société Carmelec. Celle-ci possède un irradiateur césium 137 raccordé sur une gamme de débit d'équivalent de dose comprise entre 10  $\mu\text{Sv/h}$  et 120  $\text{mSv/h}$  [113]. Ce banc d'irradiation nous a permis de tester les prototypes v2.1 et v2.2 dans une ambiance  $\gamma$  d'environ 30  $\mu\text{Sv/h}$  unidirectionnelle. La société Carmelec dispose également de plusieurs sources radioactives dont deux de cobalt 60 et une de chlore 36 que nous avons pu utiliser.

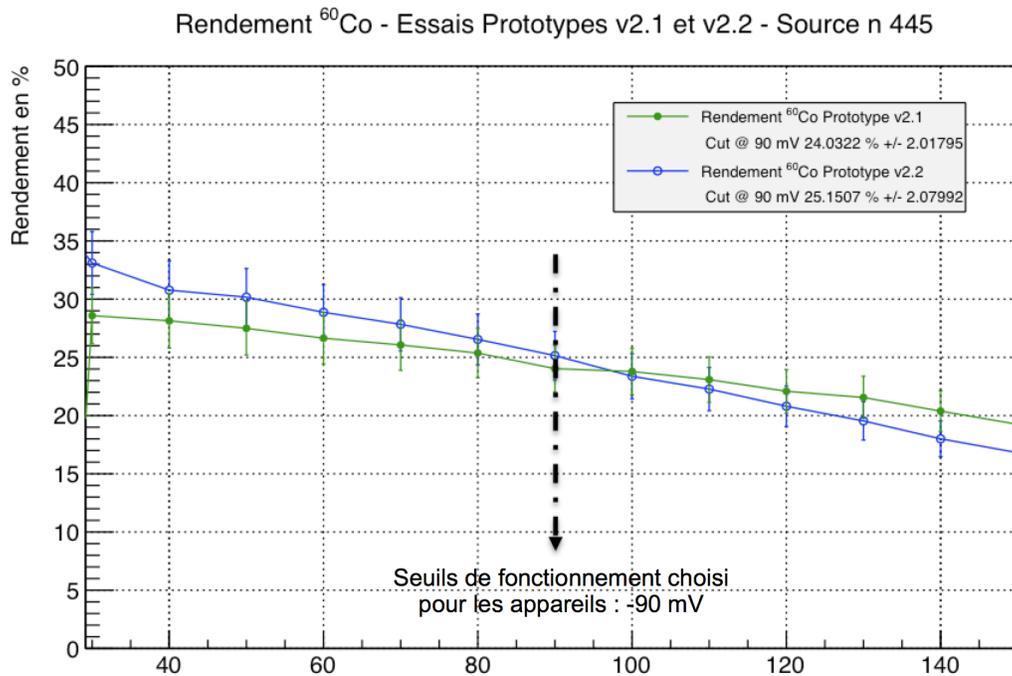


FIGURE 5.15: Rendements au cobalt 60 des deux prototypes v2.1 et v2.2 en fonction du seuil de discrimination des voies de mesure.

### 5.3.1 Rendements $^{60}\text{Co}$

Tout comme pour le prototype v1, la source scellée utilisée pour la mesure du rendement de nos contaminamètres est une source de  $^{60}\text{Co}$  de type ESAL20 commercialisée par la société LEA-CERCA. La source fournie par Carmelec porte le numéro 445. Elle est notamment utilisée pour étalonner les Dolphy  $\beta$  (contaminamètres à base de GM Pancake) commercialisés dans certains CNPE. De la même manière que pour la source ESRL20 utilisée pour le prototype v1, le diamètre de la source est de 50 mm et son diamètre actif est de 44 mm. Cette source de  $^{60}\text{Co}$  a été mesurée par le LEA-CERCA le 28/02/2014. Son activité initiale dans  $4\pi$  était de 3540 Bq avec une incertitude de 10 % ( $k = 2$ ) et son débit de fluence initial dans  $2\pi$  était de 1700  $\beta/\text{s}$  avec une incertitude de 6 % ( $k = 2$ ). L'activité calculée de la source le jour de nos essais était d'environ 2667 Bq.

Pour les mesures de rendements, la source a été placée au centre de la zone de détection à une distance d'environ 5 mm du Mylar<sup>®</sup> aluminisé recouvrant le scintillateur du module optique avant de chaque prototype. Les rendements ont été mesurés pour plusieurs seuils de discrimination et sont représentés sur la figure 5.15.

Pour le prototype v2.1, nous pouvons voir sur la figure 5.15 que le rendement varie de 18 % (avec un seuil à 150 mV) à 28 % (avec un seuil à 40 mV). Pour le prototype v2.2, nous pouvons également observer sur la même figure que le rendement varie de 17 % (avec un seuil à 150 mV) à 33 % (avec un seuil à 40 mV).

Pour des seuils de discrimination de 90 mV choisis lors de nos essais de pré-qualification et nos essais au CNPE de Chinon, le prototype v2.1 a un rendement au cobalt 60 de 24 % (+/- 2 %) et le prototype v2.2 a un rendement au cobalt 60 de 25 % (+/- 2 %).

Le prototype v1 avait un rendement de 13 % environ pour un seuil de discrimination deux fois plus bas (à 50 mV). Désormais, les rendements sont meilleurs et les résultats deviennent compatibles avec nos objectifs, puisque supérieurs à 20 %.

### 5.3.2 Homogénéité du rendement sur toute la surface active de mesure

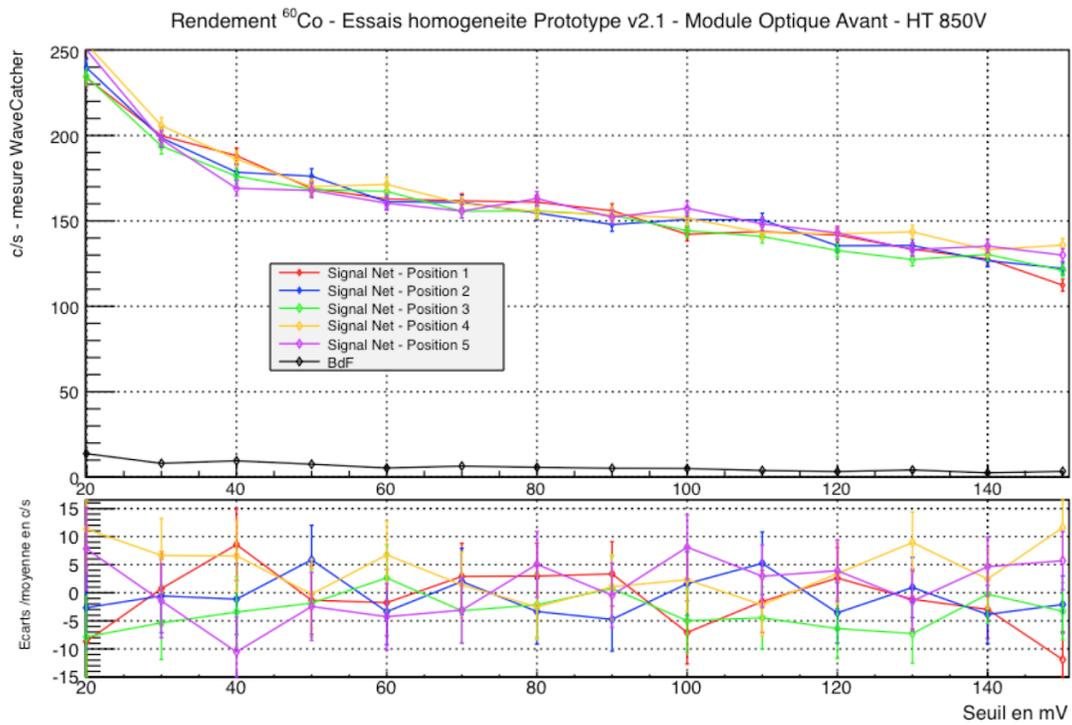
Après avoir effectué les mesures de rendement et constaté l'amélioration obtenue par rapport au prototype v1, nous avons réalisé un test de vérification d'homogénéité surfacique sur nos deux prototypes. Ces essais ont été effectués avec la même source de cobalt 60 que celle utilisée dans le chapitre précédent.

Lors des tests d'homogénéité de chaque prototype, les hautes tensions de nos PM resteront identiques à celles déterminées lors du montage et du réglage de chaque module optique. Ce test nous a également permis de mettre en place une procédure garantissant la fabrication de modules optiques très homogènes et avec une excellente répétabilité.

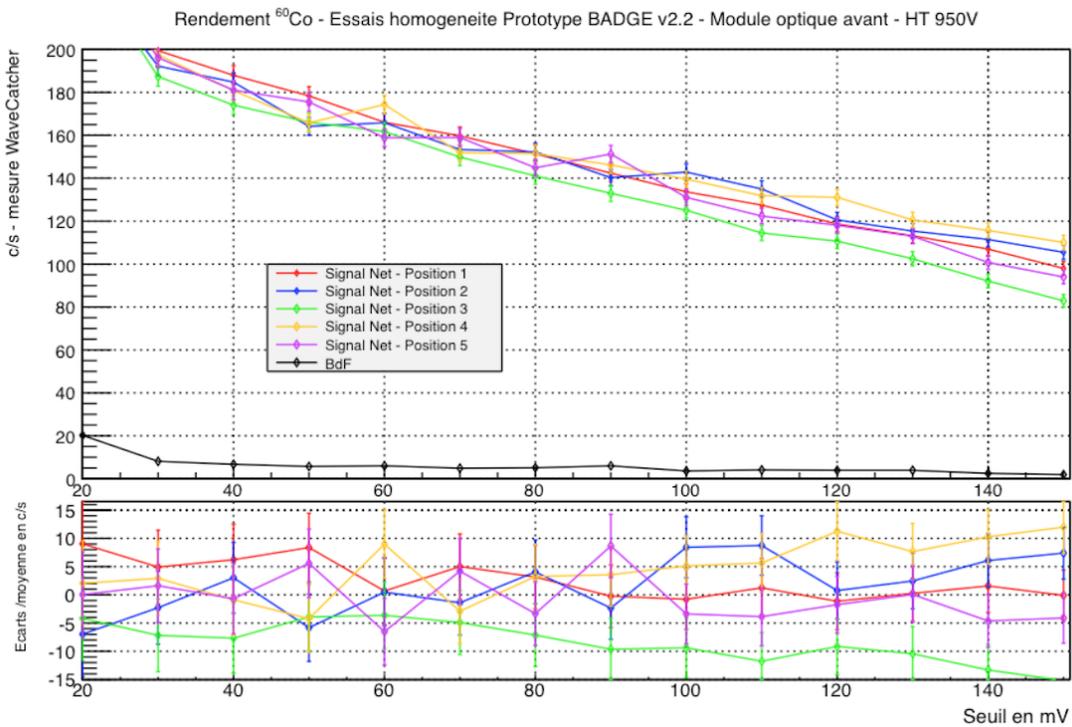
Afin de garantir la répétabilité des mesures, un socle a été spécialement conçu pour les réaliser. Il permet de replacer systématiquement la source d'étalonnage aux mêmes positions et, surtout, de s'assurer que la distance "source/surface active du détecteur" est toujours identique.

L'homogénéité de chaque prototype a été mesurée de la manière suivante :

- nous avons utilisé la source n°445 de cobalt 60 (ESRL20) fournie par Carmelec,
- six mesures de cinq secondes ont été réalisées pour chaque prototype pour plusieurs seuils de discrimination : une mesure de BdF, une mesure à chaque coin de notre détecteur et une au centre (voir figure 5.17).



(a)



(b)

FIGURE 5.16: Taux de comptage en fonction du seuil de discrimination du MO avant du prototype v2.1 (a) et du prototype v2.2 (b) pour les 5 positions de référence. Chaque graphique est accompagné dans sa partie inférieure des écarts mesurés par rapport à la moyenne des taux de comptage.

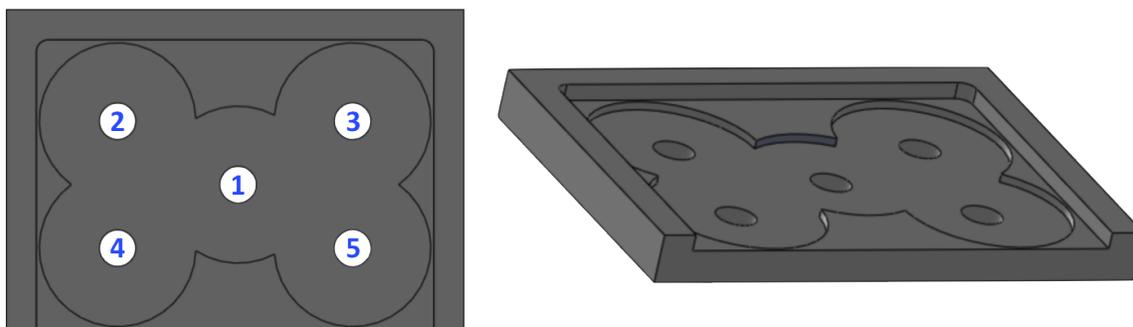


FIGURE 5.17: Design du socle permettant de placer la source de cobalt 60 face au détecteur pour les tests d'homogénéité de rendement.

### Prototype v2.1

Nous rappelons que le prototype v2.1 est équipé de modules optiques évidés et de scintillateurs fins de  $200\ \mu\text{m}$  d'épaisseur. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 5.16. Seuls les résultats du module optique avant sont présentés car c'est ce dernier qui est destiné à mesurer la contamination surfacique  $\beta$ .

Nous observons que, quel que soit le seuil de discrimination retenu, les écarts de comptage se situent aux alentours de  $\pm 10$  c/s. Pour un seuil de discrimination à 90 mV et donc un taux de comptage de 150 c/s, cela correspond à des écarts de l'ordre de  $\pm 7\%$ . En tenant compte du rendement au cobalt 60 du prototype v2.1 qui est d'environ 24 % pour un seuil de 90 mV (voir figure 5.15), cet écart représente  $\pm 40\ \text{Bq}_{\text{éq}}$ . Les écarts observés sont toujours inférieurs aux  $\pm 15\%$  quel que soit le seuil de discrimination choisi. Les résultats obtenus ci-dessus pour le prototype v2.1 confirment que l'homogénéité de détection sur toute la surface active de notre appareil est conforme aux exigences d'EDF. Les variations observées sont reportées sur la figure 5.18.

### Prototype v2.2

Le prototype v2.2 est équipé de guides de lumière pleins (en PMMA). La collection de la lumière étant plus efficace, nous utilisons des scintillateurs plus fins que pour le prototype v2.1. Ces scintillateurs ont une épaisseur de  $100\ \mu\text{m}$ . Les résultats d'homogénéité obtenus sont présentés sur la figure 5.16.

Les résultats d'homogénéité surfacique obtenus avec le prototype v2.2 sont légèrement moins bons que ceux obtenus pour le prototype v2.1. Nous pouvons voir que les écarts ont tendance à augmenter lorsque le seuil de discrimination augmente.

Nous observons que quel que soit le seuil de discrimination retenu, les écarts de comptage se situent aux alentours de  $\pm 15$  c/s. Pour un seuil de discrimination à 90 mV et donc un taux de comptage de 145 c/s, cela correspond à des écarts de l'ordre de  $\pm 11\%$ . En tenant compte du rendement au cobalt 60 du prototype v2.2 qui est d'environ 25 % pour un seuil de 90 mV (voir figure 5.15), cet écart représente  $\pm 65\ \text{Bq}_{\text{éq}}$ . Les écarts observés sont toujours inférieurs aux  $\pm 15\%$  préconisés (jusqu'à 130 mV). Malgré les différences présentes entre les guides de lumière du prototype v2.1 (évidés) et ceux du prototype v2.2 (pleins), nous constatons que nos deux appareils

répondent aux spécifications demandées par EDF. Une représentation des variations pour les deux prototypes est présentée sur la figure 5.18.

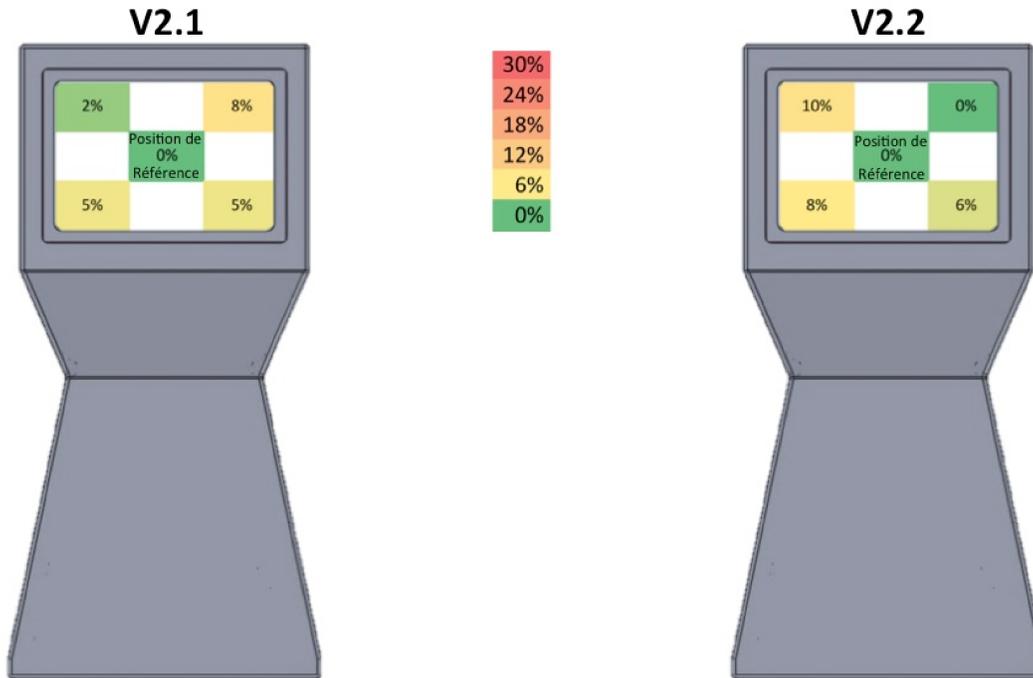


FIGURE 5.18: Représentation de l'homogénéité de détection à la surface du prototype v2.1 à gauche et v2.2 à droite.

### 5.3.3 Essais préliminaires des prototypes en irradiateur

Les essais de rendements et d'homogénéité ayant été concluants, nous avons testé nos deux prototypes dans l'irradiateur césium 137 de la société Carmelec. Nous avons soumis nos appareils à un flux  $\gamma$  unidirectionnel de 661,7 keV équivalent à un DED de 30  $\mu\text{Sv/h}$ .

#### 5.3.3.1 Présentation des installations

L'irradiateur de la société Carmelec est composé d'une source de césium 137 de haute activité. Cette source de type CDC93 avait, à l'origine, une activité de 115,03 GBq (mesurée le 06/09/2005). Elle a été commercialisée par la société AEA Technology (Cegelec). La source scellée est conservée dans un château de plomb (voir figure 5.19). Elle est extraite de son blindage par des vérins pneumatiques pilotés par l'intermédiaire d'un PC de contrôle.

Le banc de mesure est composé d'un chariot automatisé, également piloté depuis le PC de contrôle de l'irradiateur. Ce dernier est vérifié annuellement par l'IPHC de Strasbourg grâce à une chambre à ionisation et un électromètre, tous deux étant raccordés à un étalon primaire (DKD allemand). Cet irradiateur nous a permis de tester nos prototypes dans un DED de 30  $\mu\text{Sv/h}$  et nous avons,

notamment, réalisés des essais de réponse au bruit de fond  $\gamma$  pour plusieurs orientations angulaires dans les deux principaux plans d'irradiation (voir figures 5.20 et 5.21).

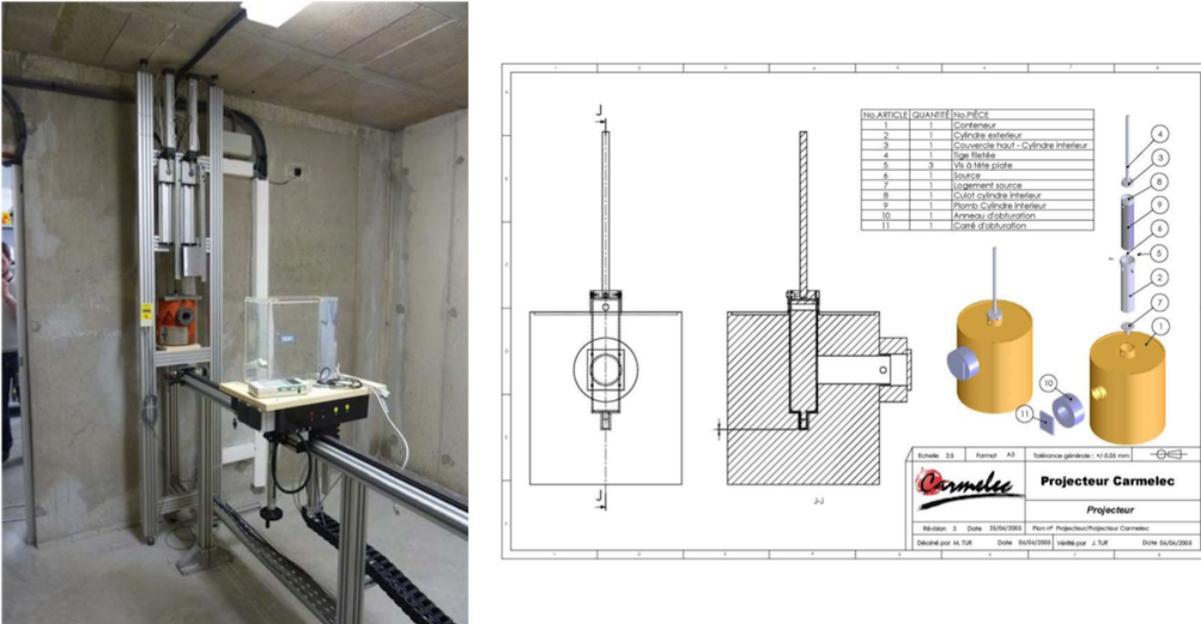


FIGURE 5.19: Photographie du banc d'irradiation (à gauche) et plan du château de plomb contenant la source de césium 137 (à droite).

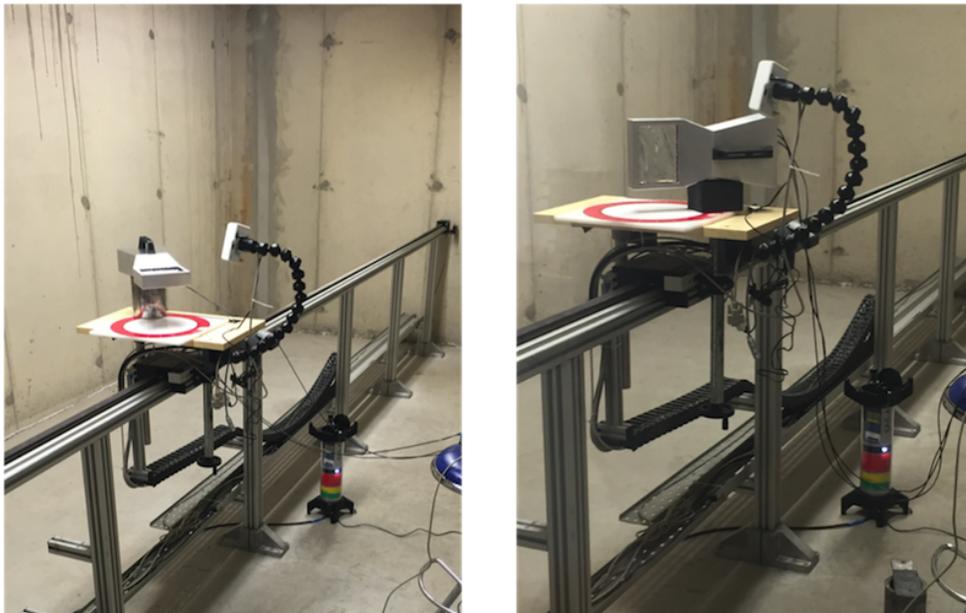


FIGURE 5.20: Irradiation du prototype v2.1 pour déterminer sa réponse angulaire dans un bruit de fond  $\gamma$  de 30  $\mu\text{Sv/h}$ .

### 5.3.3.2 Mesures d'homogénéité angulaire obtenues avec les prototypes v2.1 et v2.2

La campagne d'essais menée sur nos deux prototypes dans l'irradiateur avec un faisceau  $\gamma$  unidirectionnel a pour but de déterminer l'homogénéité de ces appareils aux rayonnements  $\gamma$ . Les mesures à chaque angle et sur chaque plan ont été effectuées sur dix secondes afin de limiter les variations induites par les fluctuations statistiques.

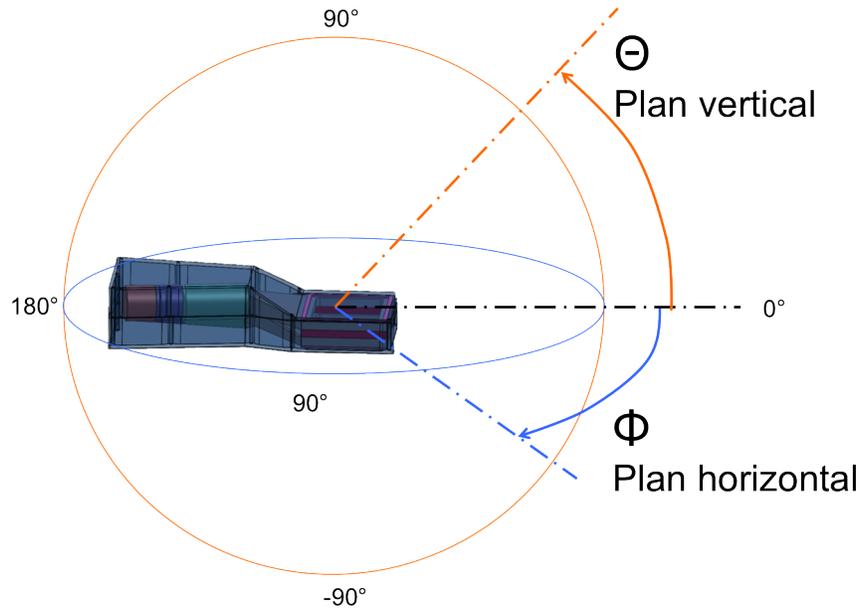


FIGURE 5.21: Représentation des deux principaux plans d'irradiations testés en irradiateur et en centrale nucléaire.

Les essais angulaires ont été effectués sur les deux prototypes v2.1 et v2.2 par pas de  $45^\circ$  dans les deux plans présentés sur la figure 5.21. Les résultats obtenus lors de ces irradiations pour le prototype v2.1 sont présentés sur la figure 5.22. Ceux du prototype v2.2 sont présentés sur la figure 5.23. Lors de ces essais, nous avons mesuré les taux de comptage sur les deux voies du prototype irradié. Les graphiques montrent l'évolution de la différence entre le taux de comptage mesuré sur le module optique avant et le taux de comptage mesuré sur le module arrière en fonction du seuil de discrimination choisi sur les deux voies. Le seuil de discrimination est le même pour les deux voies d'un même prototype car les guides de lumière ont été étalonnés lors de leur montage afin d'avoir des efficacités identiques. Le réglage des modules optiques a été réalisé en ajustant la haute tension des photomultiplicateurs.

Pour le prototype v2.1, les comportements observés à chaque angle d'incidence et dans chaque plan ne varient pas ou très peu en fonction du seuil de discrimination. Dans le plan horizontal, où la conception mécanique fait que les matériaux traversés sont de même nature et ont la même épaisseur, les essais montrent que l'homogénéité est quasi-parfaite puisque les taux de comptages varient entre -50 et 80 c/s. Le seul angle montrant un comportement différent est l'angle à  $180^\circ$ . Pour cet angle d'incidence, le faisceau  $\gamma$  traverse plus de matière que dans les autres configurations. En effet, la présence des PM et d'une épaisseur de PMMA plus grande augmentent la probabilité d'interaction des  $\gamma$ .

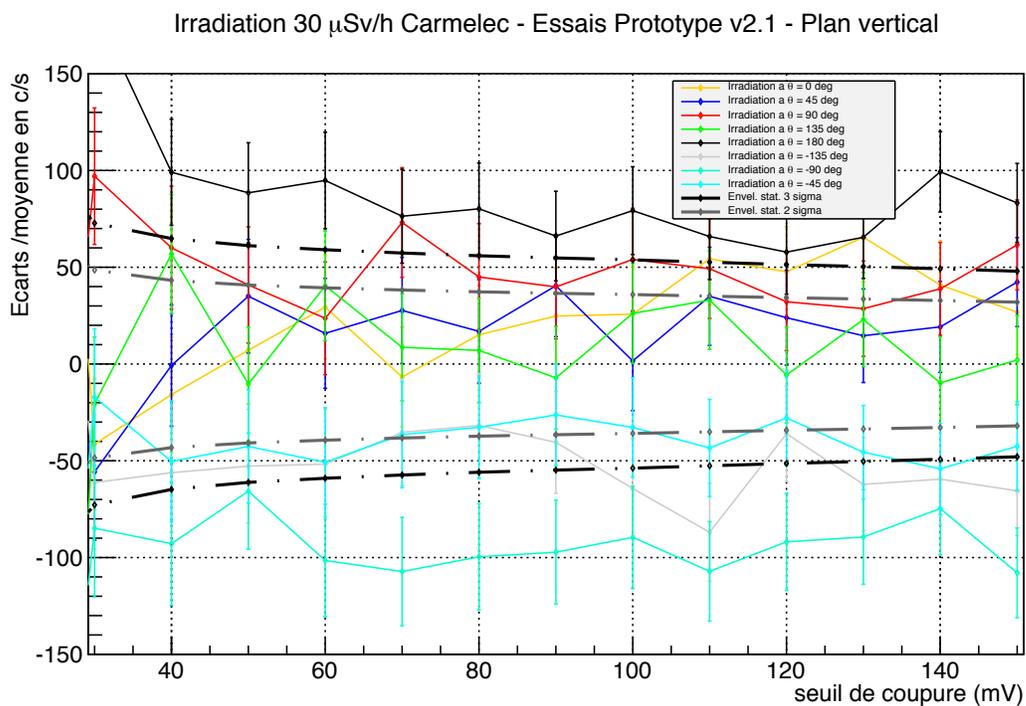
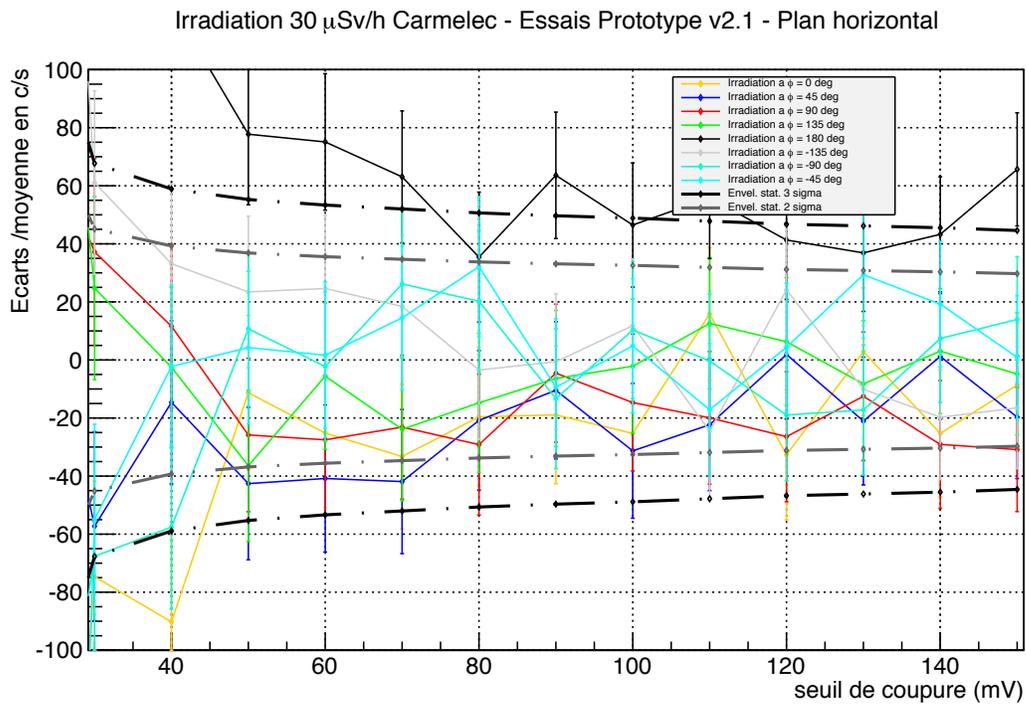


FIGURE 5.22: Ecart par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de discrimination dans le plan horizontal (a) et vertical (b) pour le prototype v2.1. Essais effectués dans l'irradiateur de la société Carmelec à 30  $\mu\text{Sv/h}$ .

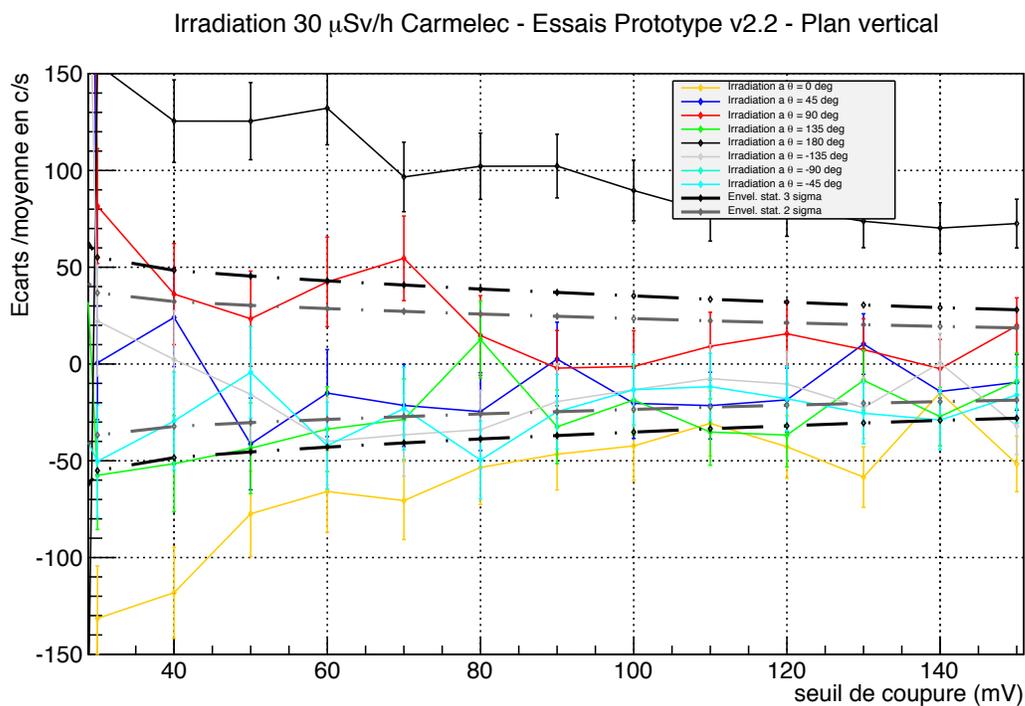
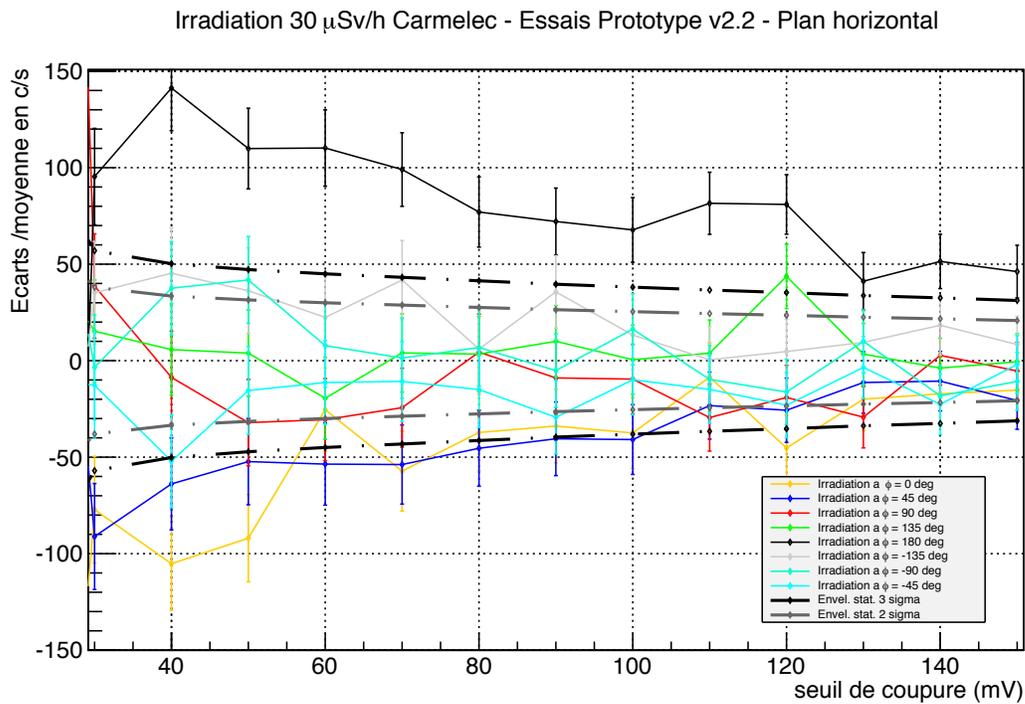


FIGURE 5.23: Ecart par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de discrimination dans le plan horizontal (a) et vertical (b) pour le prototype v2.2. Essais effectués dans l'irradiateur de la société Carmelec à 30  $\mu\text{Sv/h}$ .

Dans le plan vertical, les réponses sont moins homogènes. Nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -100 et 100 c/s. Les angles d'incidence les plus pénalisants sont ceux à  $-45^\circ$ ,  $-90^\circ$  et  $-135^\circ$  dans le plan vertical. Mis à part ces trois cas, la réponse du prototype v2.1, suivant l'angle d'incidence du faisceau  $\gamma$ , est homogène et sa fluctuation est de l'ordre de 200 c/s environ.

En conclusion, nous pouvons constater que pour le prototype v2.1, les écarts maximum de différences de comptage entre les deux modules optiques sont de l'ordre de +/- 100 c/s quelle que soit l'incidence du faisceau de photons unidirectionnel ( $E_\gamma = 661,7$  keV) correspondant à un DED de 30  $\mu\text{Sv/h}$ . Ramené au rendement cobalt 60 du prototype v2.1 (24 % environ à 90 mV) l'écart maximum observé équivaut à environ 420  $\text{Bq}_{\text{éq}}$ .

Pour le prototype v2.2, l'évolution de la différence des taux de comptage des deux modules optiques est également peu dépendante du seuil de discrimination. Dans le plan horizontal, son comportement est très ressemblant à celui du prototype v2.1. Ce comportement est dû à la conception mécanique des prototypes qui, dans ce plan, fait que les photons  $\gamma$  traversent les mêmes matériaux avant d'atteindre les deux scintillateurs. Seul le comportement à  $180^\circ$  est différent mais à cet angle d'incidence l'explication est la même que pour le prototype v2.1. Nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -120 et 100 c/s.

Dans le plan vertical, le comportement est plus homogène que pour le prototype v2.1 et, là encore, seul l'essai à  $180^\circ$  est divergent. Mis à part cet angle d'incidence, la réponse du prototype v2.2 est homogène. Nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -100 et 120 c/s.

En conclusion, nous pouvons constater que pour le prototype v2.2, les écarts maximum de différences de comptage entre les deux modules optiques sont de l'ordre de +/- 120 c/s quelle que soit l'incidence du faisceau de photons unidirectionnel ( $E_\gamma = 661,7$  keV) correspondant à un DED de 30  $\mu\text{Sv/h}$ . Ramené au rendement cobalt 60 du prototype v2.2 (25 % environ à 90 mV) l'écart maximum observé équivaut à environ 480  $\text{Bq}_{\text{éq}}$ .

Quelque soit le prototype testé, nous pouvons voir que les irradiations à  $180^\circ$  engendrent une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$ . Ce point pourra faire l'objet d'un travail sur l'ergonomie de nos futurs prototypes.

## 5.4 Contexte des essais en centrale nucléaire

Suite aux vérifications et mesures faites en laboratoire, les prototypes v2.1 et v2.2 ont été testés sur site EDF dans les conditions réelles d'utilisation. Le CNPE de Chinon (voir figure 5.24) a accepté de devenir notre site test et de nous accueillir pour évaluer les performances de nos détecteurs. Les essais ont été conduits avec l'aide de M. Patrice Romane, chef de section expertise et méthode au sein du service prévention des risques (SPR) du CNPE de Chinon.

Les locaux retenus pour les essais sont des zones où les conditions radiologiques sont proches des données d'entrées qui nous ont été communiquées. Ils sont situés dans le bâtiment réacteur (BR) et le bâtiment combustible (BK). Les derniers prototypes conçus (v2.1 et v2.2) ont été testés dans des débits d'équivalent de dose (DED) compris entre 1  $\mu\text{Sv/h}$  et 120  $\mu\text{Sv/h}$ .

Les zones dans lesquelles les essais ont été menés sont des zones réglementées (zones surveillées et contrôlées). L'accès à ces dernières fait donc l'objet d'un contrôle accru et j'ai dû, à cet effet,



FIGURE 5.24: Vue du ciel de la centrale nucléaire de Chinon [108].

passer plusieurs formations dans les domaines de la sécurité et la radioprotection. En l'occurrence, j'ai suivi les formations SCN1 (Savoir Commun du Nucléaire niveau 1) et RP1 (Radioprotection niveau 1) qui se sont déroulées sur deux semaines.

L'entrée en zone est réglementée pour les intervenants mais elle l'est aussi pour le matériel. Notre ordinateur d'acquisition ainsi que notre carte d'acquisition (module WaveCatcher) ont fait l'objet d'une demande particulière. L'ordinateur et la carte d'acquisition sont munis de ventilateurs et comportent des ouvertures, il est donc possible que la contamination non-fixée entre à l'intérieur de ces appareils. Dans ce cas, nous sommes donc obligés de faire une demande de DI 82<sup>2</sup>. Les contrôles supplémentaires effectués dans le cadre de la DI 82 permettent de s'assurer que le matériel n'a pas été contaminé. Le matériel est directement amené et sorti de zone par des navettes spécialement dédiées. Il est donc obligatoire de prévoir nos essais sur plusieurs jours même si nous ne restons en zone que quelques heures.

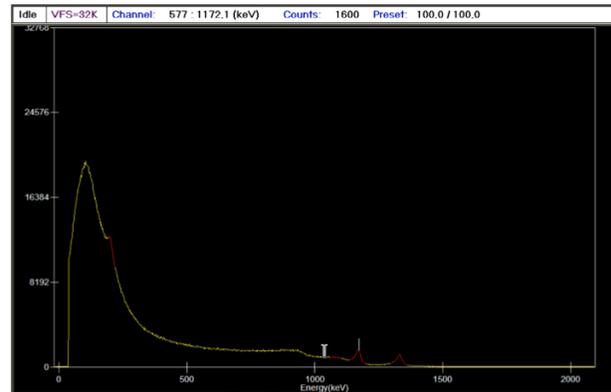
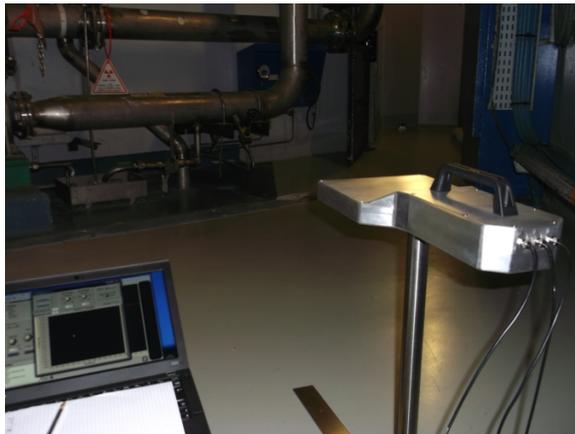
Les locaux choisis pour nos essais sont des lieux où un contaminamètre de chantier est susceptible d'être utilisé par des intervenants. La figure 5.25 montre deux exemples de locaux où nous avons réalisé des essais avec nos prototypes.

Dans le BK, nous avons testé un bruit de fond  $\gamma$  généré par un graton de cobalt 60 (présent dans une canalisation à proximité du repère 2 PTR 246 VB. Le débit d'équivalent de dose (DED) au contact de la canalisation était de 25 mSv/h et de 110  $\mu$ Sv/h à 1 mètre. Nous nous sommes donc placés à un peu plus de 2 mètres de la source afin d'avoir un DED de l'ordre de 30  $\mu$ Sv/h. Le spectre  $\gamma$  mesuré avec un spectromètre CZT (voir figure 5.26 (a)) montre que le radioélément responsable du DED mesuré est bien du cobalt 60. Nous voyons sur le spectre les deux raies caractéristiques du cobalt 60 à 1173 et 1332 keV. Notre partenaire EDF a souhaité que nous réalisions des essais à cet

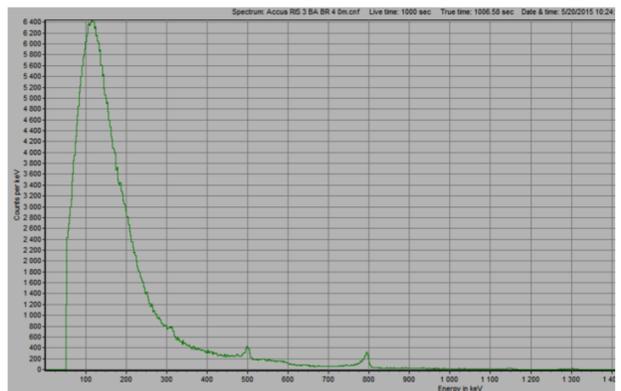
2. DI 82 : Directive interne 82 (EDF). Cette directive concerne entre autres le contrôle des matériels, des déchets en sortie de ZC et avant la sortie du site.



FIGURE 5.25: Photographies des principaux lieux d'essais : à gauche dans le BR au niveau 0.00m à proximité de l'espace annulaire (boucle 3) et à droite dans un local du BK.



(a)



(b)

FIGURE 5.26: Photographies et mesures de spectre  $\gamma$  (spectromètre CZT) effectuées dans le BK (a) et le BR (b)

endroit car le bruit de fond  $\gamma$  présent est considéré comme directionnel et peu diffus. Effectivement, cette information a été vérifiée à l'aide d'un débitmètre  $\gamma$  avec lequel nous avons réalisé des mesures dans plusieurs configurations. Il en est ressorti que le DED est quasi exclusivement issu du pan de mur où se situent les canalisations visibles sur la figure 5.26.

Après avoir testé nos prototypes dans le BK, nous avons réalisé exactement les mêmes essais mais, cette fois-ci, dans le bâtiment réacteur (BR). Le spectre  $\gamma$  y est beaucoup plus diffus et nous ne distinguons plus les raies du cobalt 60 sur la figure 5.26 (b). Des mesures à l'aide de débitmètres  $\gamma$  ont également confirmé que les rayonnements  $\gamma$  ne sont pas directionnels. Toutefois lors des sessions d'essais de réponse angulaire, nous avons toujours trouvé une direction qui semblait être préférentielle. Par exemple, lors de la première session d'essais avec les prototypes v2.1 et v2.2, le DED dans la direction préférentielle était de 41  $\mu\text{Sv/h}$  contre 34  $\mu\text{Sv/h}$  environ dans toutes les autres directions.

## 5.5 Essais en CNPE de nos deux prototypes

Les essais au CNPE de Chinon se sont déroulés sur deux sessions car le nombre de mesures à réaliser était important. Nous avons fait trois types de mesures. Les premiers essais avaient pour but de déterminer la réponse angulaire de notre prototype au bruit de fond  $\gamma$  présent sur site. Le deuxième type d'essais avait pour but de mesurer des bruits de fond typiques, à plusieurs DED (à environ 1  $\mu\text{Sv/h}$ , 10  $\mu\text{Sv/h}$ , 30  $\mu\text{Sv/h}$  et 100  $\mu\text{Sv/h}$ ), afin de pouvoir déterminer les seuils de décision (SD), les limites de détection (LD) et l'activité minimale détectable (AMD) de nos prototypes. Enfin, le troisième type de mesure visait à mesurer des frottis réalisés sur site dans les mêmes bruits de fond  $\gamma$  afin de vérifier les SD et AMD calculés avec les mesures précédentes.

### 5.5.1 Dépendance angulaire au bruit de fond $\gamma$

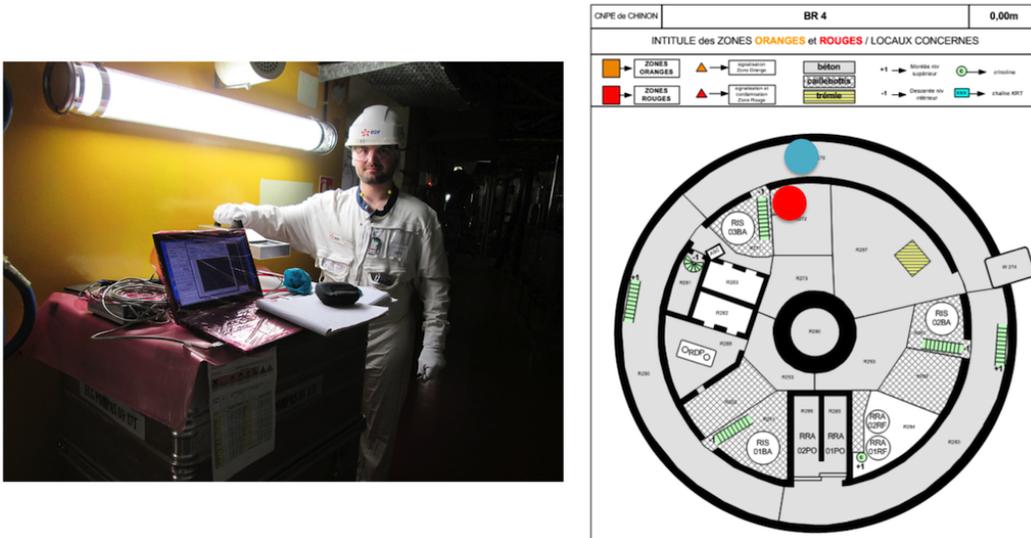
Les essais de dépendance au bruit de fond  $\gamma$  dans une ambiance typique présente dans le bâtiment réacteur ont été réalisés au CNPE de Chinon. Ces essais consistent à réaliser des mesures angulaires comme dans la partie 5.3.3. La différence est que le faisceau uni-directionnel de césium 137 est remplacé par une ambiance  $\gamma$  diffuse.

Seuls deux essais ont été réalisés durant le laps de temps imparti à ces tests :

- le prototype v2.1 a été testé dans un BdF d'environ 22  $\mu\text{Sv/h}$ ,
- le prototype v2.2 a été testé dans un BdF d'environ 37  $\mu\text{Sv/h}$ .

Les essais se sont déroulés dans deux locaux attenants et les débits de dose ont été mesurés à l'aide d'un Radiagem (Canberra) et d'un Neo (Carmelec). Les illustrations de la figure 5.27 présentent les deux lieux choisis pour la réalisation de ces essais. Le bruit de fond  $\gamma$  étant très diffus, nous avons dû trouver une direction préférentielle pour tester la réponse angulaire.

Toutes les mesures effectuées ont été réalisées sur 5 secondes. Les barres d'erreurs sur les graphiques présentés dans ce chapitre (figures 5.28, 5.29 et 5.30) tiennent compte de ce temps de mesure. De plus, afin de simplifier la lecture des graphiques, nous avons directement représenté le comptage final qui résulte de la soustraction de la voie « BdF » à la voie « Signal + BdF ».



(a)



(b)

FIGURE 5.27: Photographies descriptives des lieux de test des prototype v2.1 (a) et v2.2 (b) lors des essais de réponse angulaire au BdF  $\gamma$ . Sur le plan en coupe du BR au niveau 0,00m (a) le point turquoise représente le lieu des essais du prototype v2.1 et le point rouge celui pour le prototype v2.2.

### Prototype v2.1

Le prototype v2.1, équipé des guides de lumière évidés et des scintillateurs de 200  $\mu\text{m}$ , a été soumis à une DED de 22  $\mu\text{Sv/h}$  environ. Les résultats d'homogénéité obtenus sont présentés figure 5.28.

Dans le plan vertical, voir figure 5.28, le graphique nous montre que lorsque nous comparons la différence des taux de comptage entre le module avant et le module arrière à la moyenne des taux de comptage obtenus à chaque angle d'incidence, les écarts observés sont compris dans l'enveloppe statistique à 3 sigma de cette moyenne. On distingue deux familles de courbes :

- celles comprises entre  $-45^\circ$  et  $+135^\circ$ , vers l'avant et le haut du détecteur,

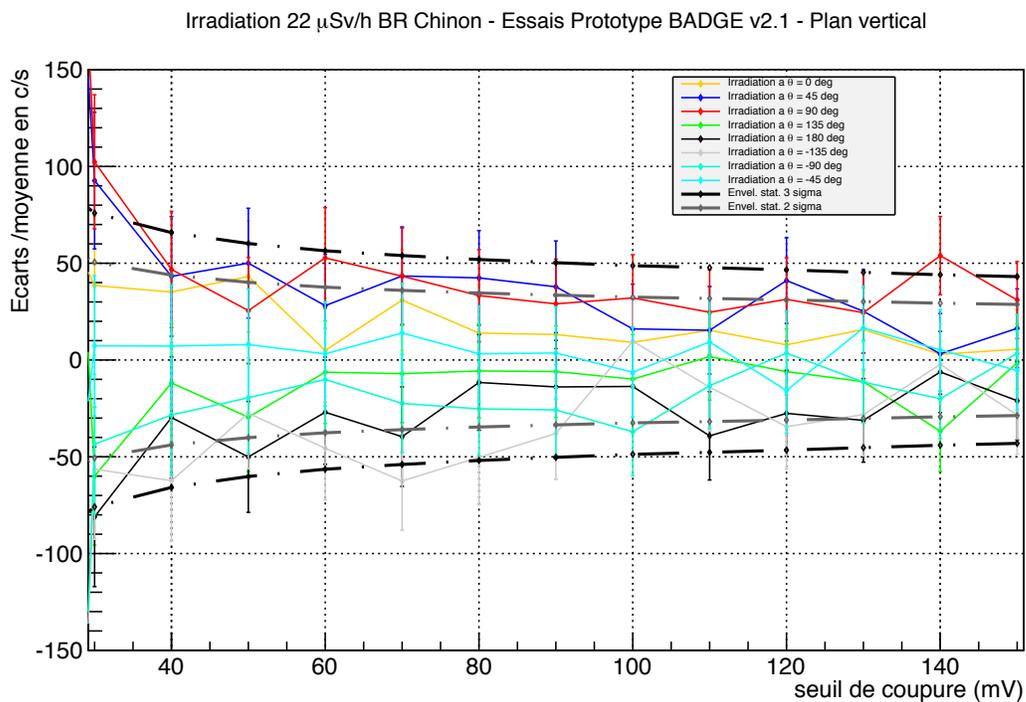
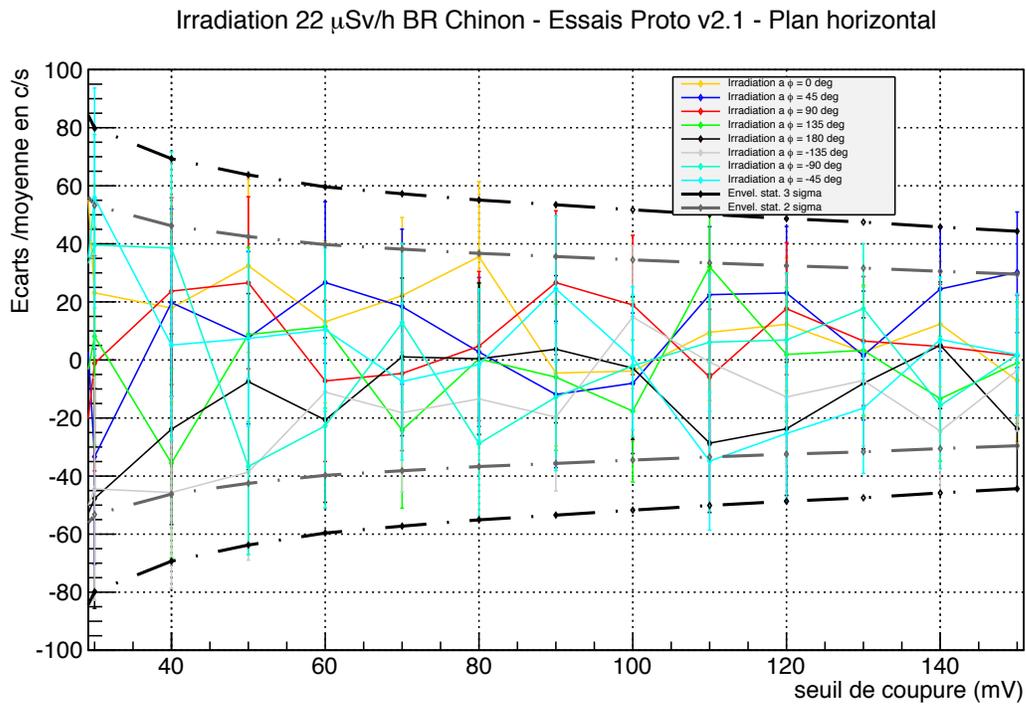


FIGURE 5.28: Ecart par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de détection dans le plan vertical (a) et horizontal (b) pour le prototype v2.1.

- celles comprises entre  $+135^\circ$  et  $-45^\circ$ , vers l'arrière et le bas de détecteur qui ont tendance à moins compter. Cet effet s'explique par l'écrantage induit par les photomultiplicateurs qui ajoute un « blindage » supplémentaire et donc une inhomogénéité.

Pour le prototype v2.1, dans le plan vertical, nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -60 et 60 c/s quel que soit le seuil de discrimination.

Dans le plan horizontal (voir figure 5.28), l'homogénéité de la réponse est meilleure que dans le plan vertical. Dans ce cas, quel que soit l'angle d'incidence, les deux modules optiques sont irradiés de la même manière.

Nous pouvons voir que tous les taux de comptage, quels que soient les seuils de discrimination (supérieurs à 60 mV) et l'angle d'incidence, sont compris dans l'enveloppe statistique à 2 sigma de la moyenne des taux de comptage. Ce résultat indique également que les inhomogénéités observées sont compatibles avec les fluctuations statistiques inhérentes aux taux de comptage mesurés. Toutefois, pour le prototype v2.1, dans le plan horizontal, nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -50 et 50 c/s quel que soit le seuil de discrimination.

En conclusion, nous pouvons constater que pour le prototype v2.1 les écarts maximum de différences de comptage entre les deux modules optiques sont de l'ordre de  $\pm 60$  c/s quelle que soit l'incidence du BdF correspondant à un DED de 22  $\mu\text{Sv/h}$  environ. Ramené au rendement cobalt 60 du prototype v2.1 (24 % environ à 90 mV), l'écart maximum observé équivaut à environ 250 Bq<sub>éq.</sub>

## Prototype v2.2

Le prototype v2.2, équipé des guides de lumière pleins et des scintillateurs de 100  $\mu\text{m}$ , a été soumis à un DED de 37  $\mu\text{Sv/h}$  environ. Les résultats obtenus sont présentés figure 5.29.

Dans le plan vertical (voir figure 5.29), les résultats obtenus à chaque angle d'incidence sont comparables en homogénéité à ceux du prototype v2.1 lorsque nous regardons les résultats individuels de chaque angle par rapport à la moyenne des résultats obtenus. Nous pouvons voir que les variations induites par les différents angles d'incidence sont presque toutes comprises dans l'enveloppe statistique à 3 sigma.

Toutefois, nous pouvons apercevoir que les deux familles de courbes déjà observées pour le prototype v2.1 sont encore présentes et de manière plus marquée. Nous pouvons voir que les angles d'incidence négatifs ont tendance à induire un sous comptage alors que les angles d'incidence positifs ont tendance à induire un sur-comptage.

A nouveau, cet effet est probablement dû en partie à des effets d'écrantage de la partie photomultiplicateur de la sonde mais aussi au fait que les guides de lumière des détecteurs, situés sur le dessus de la sonde, induisent des inhomogénéités, contrairement au prototype v2.1.

Pour le prototype v2.2, dans le plan vertical, nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -70 et 70 c/s quel que soit le seuil de discrimination.

Le comportement dans le plan horizontal (voir figure 5.29) est comparable à ce que nous avons pu observer pour le prototype v2.1. Nous constatons, également, que l'homogénéité est meilleure que dans le plan vertical. Toutefois, nous pouvons voir que les résultats sont légèrement moins bons que pour le prototype v2.1. Toutefois, pour le prototype v2.2, dans le plan horizontal, nous pouvons observer une variation de la réponse aux rayonnements  $\gamma$  comprise entre -50 et 50 c/s quel que soit le seuil de discrimination.

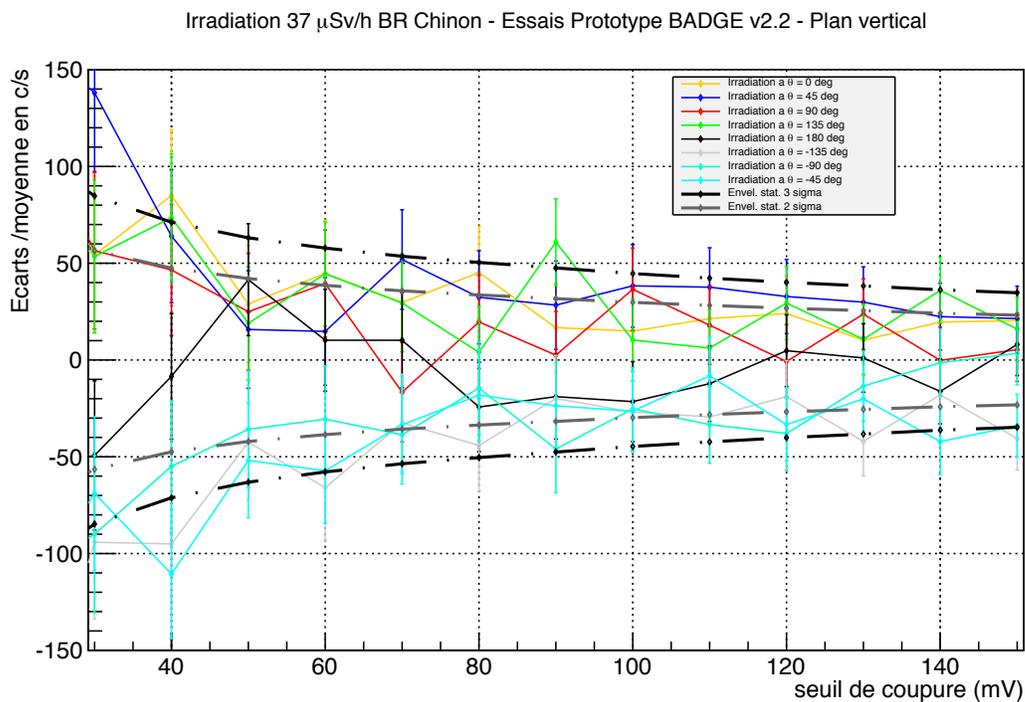
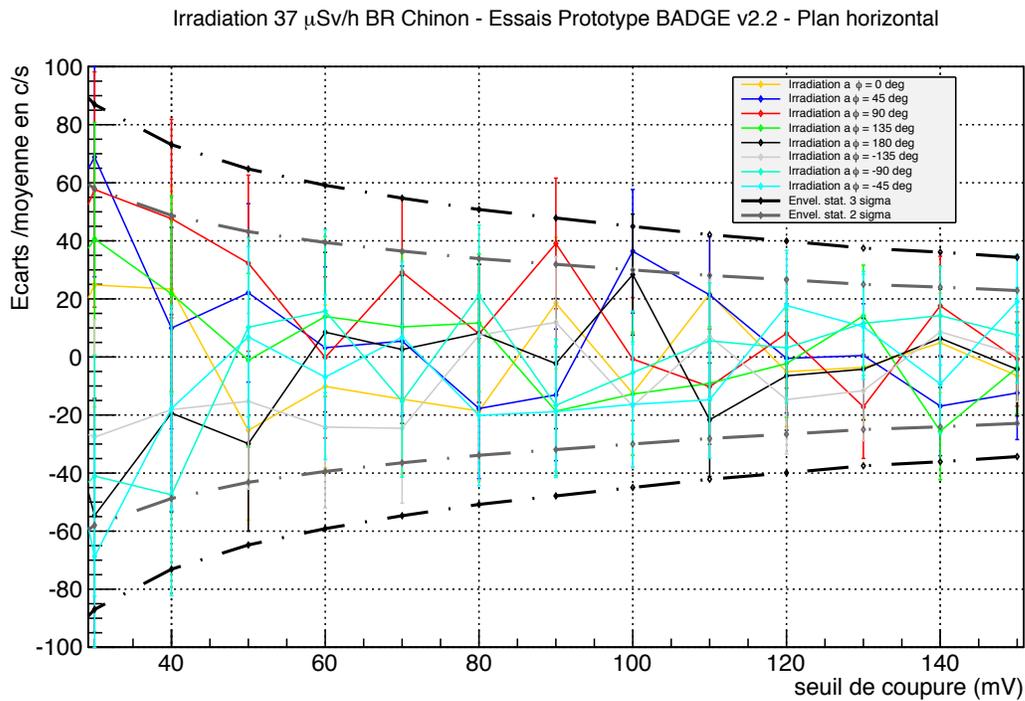


FIGURE 5.29: Ecart par rapport à la moyenne des différences de comptage entre modules optiques avant et arrière en fonction du seuil de détection dans le plan vertical (a) et horizontal (b) pour le prototype v2.2.

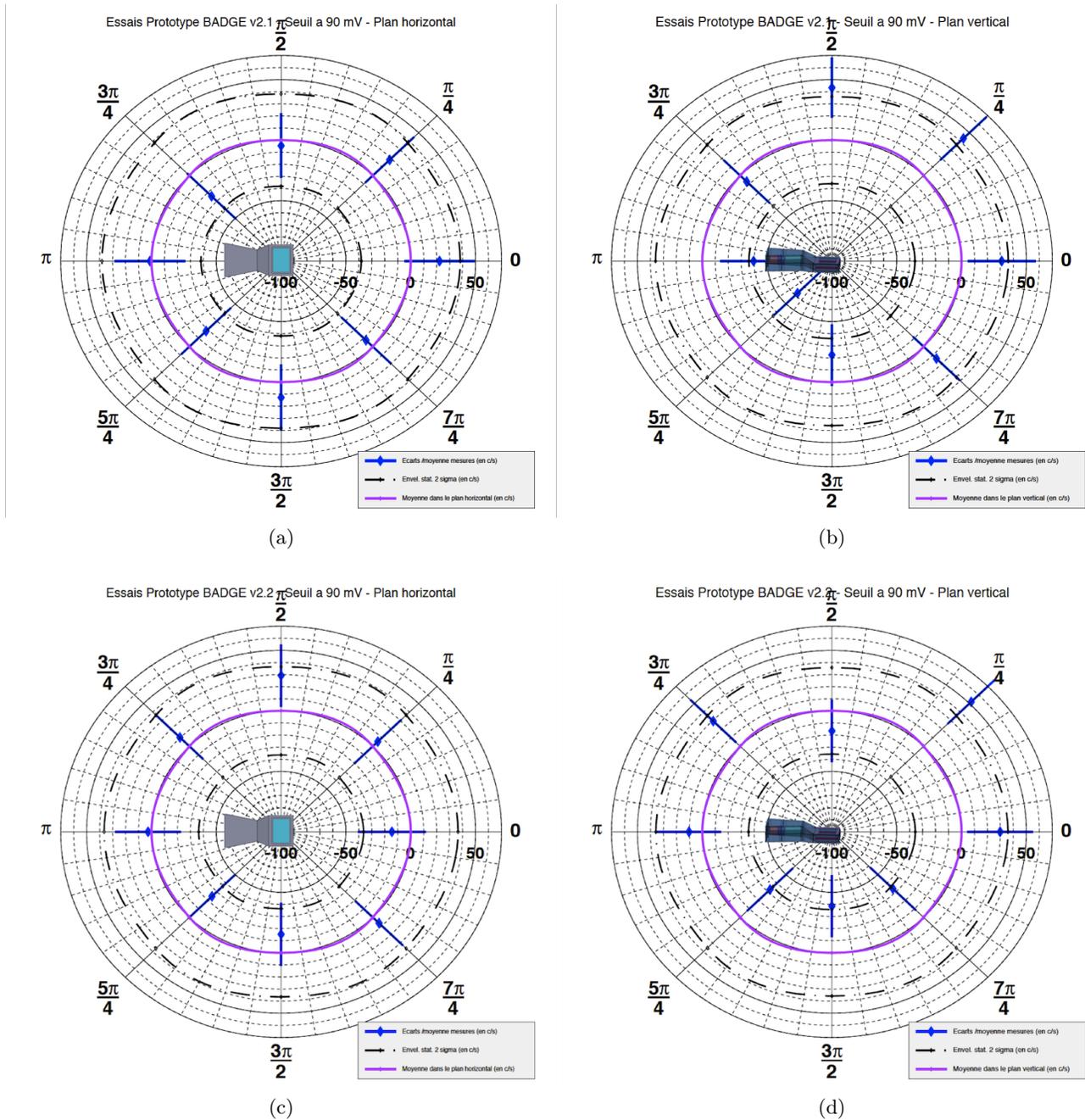


FIGURE 5.30: Réponses angulaires des prototypes v2.1 (a et b) et v2.2 (c et d) avec un seuil à 90 mV dans les plans vertical et horizontal.

En conclusion, nous pouvons constater que pour le prototype v2.2 les écarts maximum de différences de comptage entre les deux modules optiques sont de l'ordre de  $\pm 70$  c/s quelle que soit l'incidence du BdF correspondant à un DED de  $37 \mu\text{Sv/h}$  environ. Ramené au rendement cobalt 60 du prototype v2.2 (25 % environ à 90 mV) l'écart maximum observé est équivalent à  $280 \text{ Bq}_{\text{éq}}$ .

Afin de mieux visualiser l'impact de la réponse angulaire lors de nos essais, nous avons sélectionné les résultats obtenus avec un seuil à 90 mV. Ce seuil est celui que nous avons utilisé lors de nos précédentes sessions d'essai. Nous retrouvons donc sur la figure 5.30 les résultats obtenus avec les prototype v2.1 et v2.2 dans le plan vertical et le plan horizontal avec un seuil de discrimination de 90 mV.

Ces essais angulaires nous ont permis de déterminer le comportement de nos prototypes lorsqu'ils étaient soumis à un bruit de fond  $\gamma$  ambiant diffus et non directionnel. Le comportement est semblable à celui observé en irradiateur mais les fluctuations de la réponse des prototypes sont moins importantes que lors des essais en irradiateur.

### 5.5.2 Dépendance temporelle au bruit de fond $\gamma$

La principale justification de notre design comportant deux modules optiques vient du besoin d'être aussi indépendant que possible du bruit de fond et surtout de ses variations. D'après notre partenaire EDF, et l'expérience acquise lors de nos essais en CNPE, il est très probable que l'ambiance  $\gamma$  puisse varier très fortement et très rapidement dans l'environnement immédiat du contaminamètre.

Un appareil de mesure «mono-détecteur» a de fortes chances de générer des faux positifs si des variations de DED ambiant interviennent lors d'une mesure. L'ajout d'un second détecteur dit «de garde» permet de réaliser une soustraction en temps réel du BdF. Pour remplir au mieux ce rôle, le détecteur de garde doit avoir la même géométrie et les mêmes matériaux que ceux du compteur utilisé pour la mesure de contamination. Ainsi les  $\gamma$  interagiront de la même manière dans les deux compteurs, en fonction de leur angle d'incidence et de leur énergie. De plus le compteur de garde devra se situer au plus près du compteur de mesure afin d'être exposé avec le même angle solide au flux photonique. Ces deux conditions sont remplies au mieux avec les deux prototypes v2.1 et v2.2.

Un test systématique de sensibilité des contaminamètres à des variations importantes et rapides de DED est difficile à mettre en place. Par contre, lors des essais que nous avons effectués en CNPE plusieurs « incidents » de fluctuations rapides de DED ont pu être enregistrés. Leur nombre est trop faible pour pouvoir réaliser une étude statistique mais la qualité de la compensation qu'offre la soustraction en temps réel du BdF peut très bien s'illustrer sur un exemple. C'est ce que nous allons montrer dans cette partie.

Nous observons sur la figure 5.31 le taux de comptage brut des deux modules optiques du prototype v2.2 dans une ambiance réelle de  $37 \mu\text{Sv/h}$ . Comme nous pouvons le voir, le taux de comptage moyen sur le chronogramme présenté est d'environ 580 c/s sur les deux modules optiques. Les fluctuations observées semblent purement statistiques sauf à partir de la 158<sup>ème</sup> seconde, où le DED semble brusquement s'effondrer puis remonter à son niveau initial. L'échelle de droite permet d'avoir une approximation du débit de dose ambiant et nous pouvons constater que la variation atteint  $7 \mu\text{Sv/h}$  et dure une dizaine de secondes. Nous pouvons constater que les deux modules optiques sont affectés de la même manière et dans la même proportion.

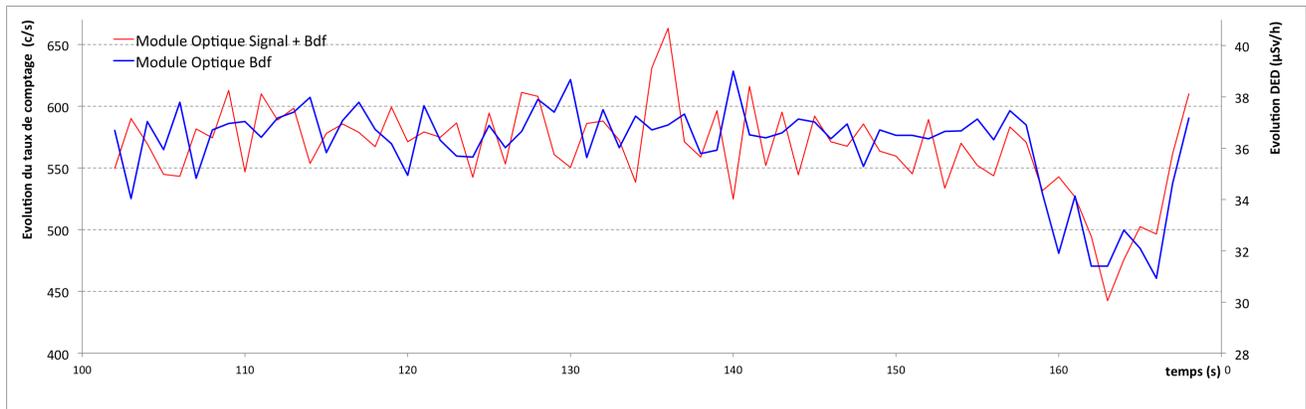


FIGURE 5.31: Evolution des taux de comptage bruts des deux modules optiques du prototype v2.2 et du DED lors des essais effectués (BR) dans une ambiance d'environ  $37 \mu\text{Sv/h}$ .

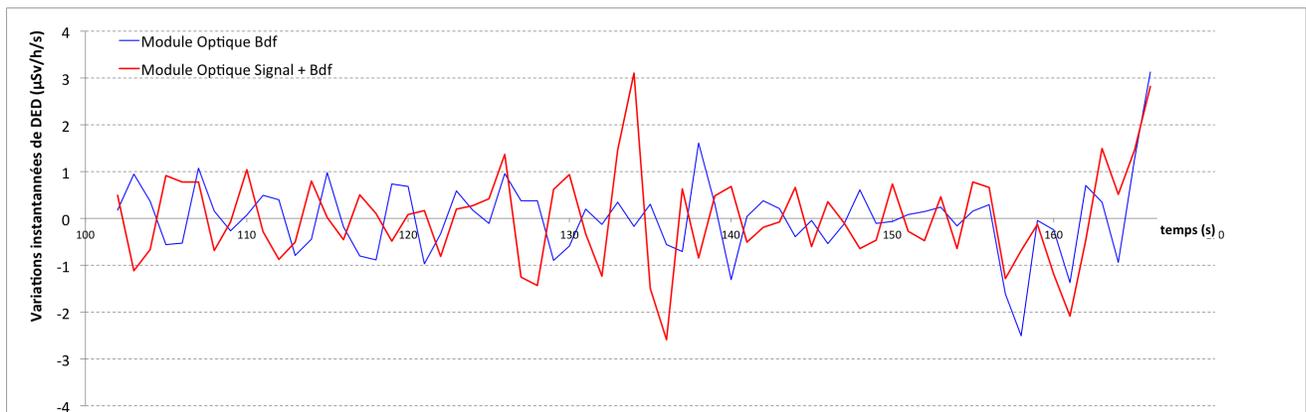


FIGURE 5.32: Variations instantanées du DED mesurées sur chaque module optique du prototype v2.2.

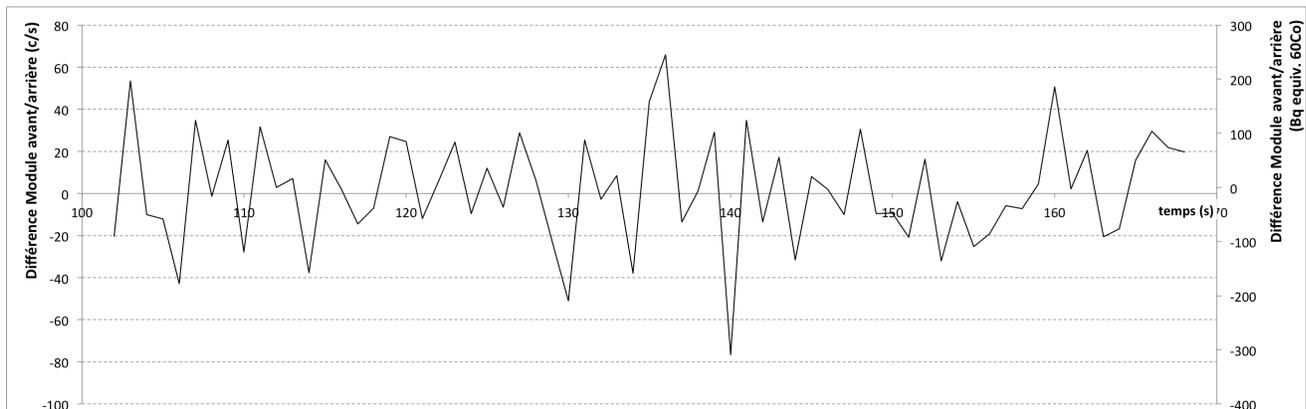


FIGURE 5.33: Evolution de la différence des taux de comptage bruts mesurés sur les deux modules optiques du prototype v2.2.

La figure 5.32 montre les variations instantanées de DED mesurées sur chaque module, il s'agit de la dérivée de la figure 5.31. Nous pouvons constater que la variation instantanée au niveau de la brusque irrégularité de comptage atteint  $2 \mu\text{Sv}/\text{h}/\text{s}$ . Malgré tout, la compensation en temps réel du module de comptage  $\beta$  par le module de garde, illustrée sur la figure 5.33 montre que les fluctuations de comptage net ne sont pas affectées par la brusque et importante variation de débit de dose.

Il est difficile de donner une sensibilité chiffrée de notre système tant cette dernière dépendra de l'angle d'incidence du flux  $\gamma$ , de son intensité et de ses fluctuations. Toutefois l'exemple précédent semble indiquer que pour des fluctuations de l'ordre de  $10 \mu\text{Sv}/\text{h}$  dans une ambiance d'environ  $37 \mu\text{Sv}/\text{h}$  (variant aussi vite que  $3 \mu\text{Sv}/\text{h}/\text{s}$ ) notre détecteur ne sera pas affecté. Les fluctuations observées seront seulement imputables aux phénomènes de fluctuations statistiques du prototype. Quoiqu'il en soit, l'exposé du paragraphe suivant montrera que sa sensibilité, ou activité minimale détectable, ne sera pas affectée.

### 5.5.3 Adaptation des calculs de SD, LD et AMD à notre étude et détermination expérimentale

Après avoir mis en évidence la réponse angulaire des prototypes v2.1 et v2.2 lorsqu'ils sont soumis à un bruit de fond  $\gamma$ , nous allons maintenant présenter les calculs et résultats qui traitent des seuils de décision (SD), des limites de détection (LD) et de l'activité minimale détectable (AMD). Les résultats mis en avant dans cette partie sont primordiaux car l'activité minimale détectable est le point capital dans notre étude. En effet, le principal objectif est de déterminer si nos prototypes sont capables de mesurer une contamination surfacique comprise entre  $0,4$  et  $4 \text{ Bq}/\text{cm}^2$  dans diverses ambiances  $\gamma$ .

Les SD, LD et AMD qui seront présentés dans cette partie sont issus de nos essais en centrale nucléaire. Mais avant de présenter les résultats obtenus, nous allons dans un premier temps revenir sur les calculs qui nous permettent d'extraire ces informations des résultats d'essais.

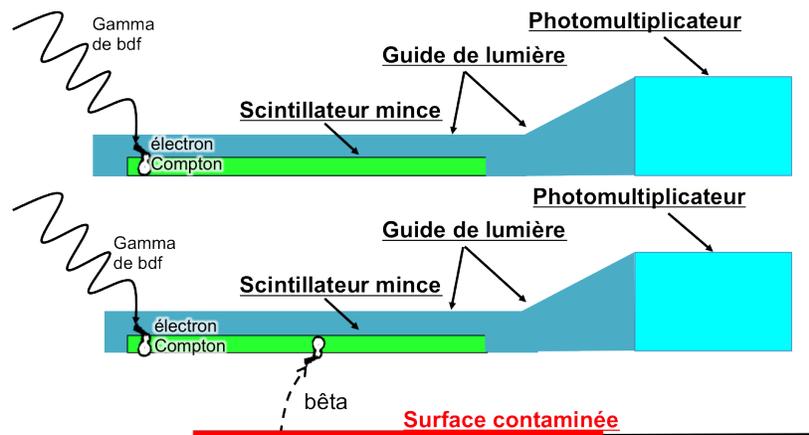


FIGURE 5.34: Rappel de la composition et du principe de fonctionnement du prototype v2.2.

### 5.5.3.1 Calcul de SD, de LD et d'AMD - application à nos prototypes

Une première approche des notions de seuil de décision, de limite de détection et d'activité minimale détectée a été présentée dans la partie 2.3.1, mais les formules générales de LD et d'AMD ne peuvent pas s'appliquer directement à nos prototypes. En effet, comme nous venons de le voir le bruit de fond peut être soumis à de fortes variations qui, bien que compensées partiellement par notre appareil, ne peuvent plus garantir un comportement Poissonien de ce dernier.

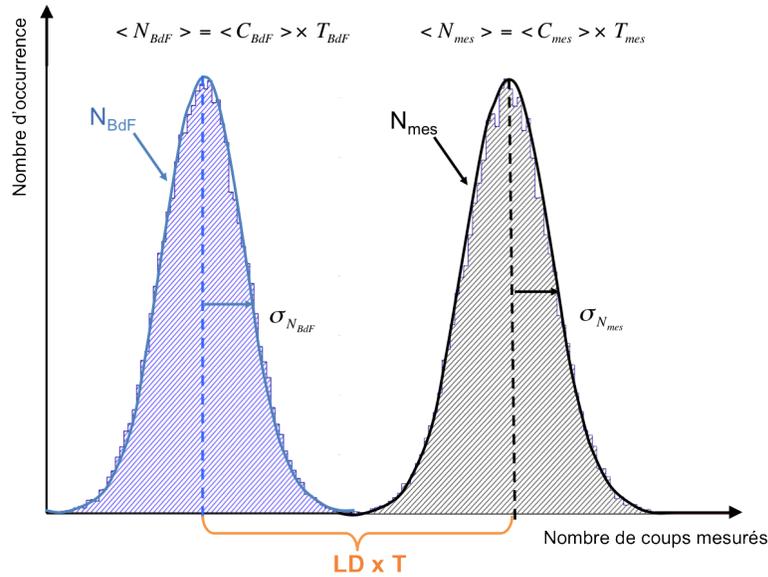


FIGURE 5.35: Représentation des distributions obtenues lors de mesures effectuées avec l'un de nos prototypes. Ces distributions sont accompagnées des variables statistiques réutilisées dans nos calculs de SD.

Sur la figure 5.35, nous pouvons observer deux distributions. La première est la distribution  $N_{BdF}$ . Elle correspond aux mesures réalisées par un de nos prototypes (voir figure 5.34) sur un échantillon non contaminé ou un blanc. Cette distribution est centrée sur  $\langle N_{BdF} \rangle$  qui est la valeur moyenne du nombre de coups mesuré  $N_{BdF}$  pendant le temps d'acquisition  $T_{BdF}$ . Cette valeur est aussi égale au taux de comptage moyen  $\langle C_{BdF} \rangle$  multiplié par le temps d'acquisition  $T_{BdF}$ . La deuxième distribution  $N_{mes}$  correspond aux mesures réalisées par le même prototype (voir figure 5.34) sur un échantillon contaminé. Cette distribution est centrée sur  $\langle N_{mes} \rangle$  qui est la valeur moyenne du nombre de coups mesuré  $N_{mes}$  pendant le temps d'acquisition  $T_{mes}$ .

Nous avons pris  $T_{BdF} = T_{mes} = T$  pour l'ensemble des mesures effectuées en CNPE. **Contrairement au cas général, nous ne pouvons pas considérer les distributions  $N_{BdF}$  et  $N_{mes}$  comme Poissonniennes car nous ne pouvons pas, a priori, savoir si notre appareil n'est pas affecté par des fluctuations systématiques. Nous ne pouvons donc pas affirmer que les écarts types des distributions  $N_{BdF}$  et  $N_{mes}$  sont respectivement égaux à  $\sqrt{\langle N_{BdF} \rangle}$  et  $\sqrt{\langle N_{mes} \rangle}$ .**

Pour le calcul du seuil de décision SD, nous nous plaçons dans le cas où nous réalisons une mesure

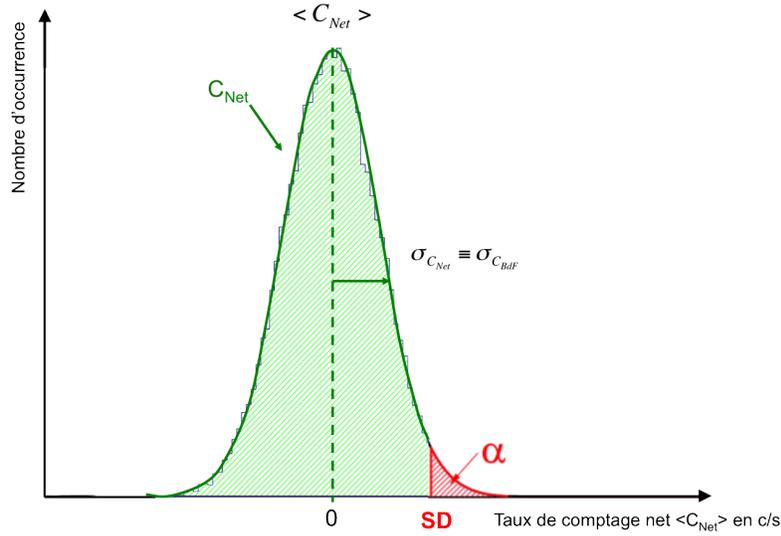


FIGURE 5.36: Représentation de la distribution du taux de comptage net d'échantillons non contaminés mesurés à l'aide d'un de nos prototypes, du seuil de décision et de l'intervalle de confiance.

sur un échantillon non contaminé. Dans ce cas, nous avons toujours :

$$\langle C_{Net} \rangle = \langle C_{mes} \rangle - \langle C_{BdF} \rangle = \frac{\langle N_{mes} \rangle}{T} - \frac{\langle N_{BdF} \rangle}{T}$$

La distribution  $C_{Net}$  est représentée sur la figure 5.36. Cette dernière n'est, a priori, toujours pas Gaussienne.

Comme nous sommes dans le cas où nous mesurons deux fois le BdF, l'écart type  $\sigma_{C_{Net}}$  de la distribution  $C_{Net}$  peut donc s'écrire :

$$\sigma_{C_{Net}}^2 = \left( \frac{\sigma_{N_{mes}}}{T} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{N_{BdF}}}{T} \right)^2 = 2 \times \left( \frac{\sigma_{N_{BdF}}}{T} \right)^2 = 2 \times \frac{\sigma_{N_{BdF}}^2}{T^2} = \sigma_{C_{BdF}}^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{C_{Net}} = \sigma_{C_{BdF}} = \sqrt{2} \times \frac{\sigma_{N_{BdF}}}{T}$$

D'après le résultat précédent et la définition du seuil de décision (SD) donnée par la norme ISO 11929 [65], nous pouvons donc en déduire l'expression de SD :

$$SD = k_{1-\alpha} \times \sigma_{C_{BdF}} = \sqrt{2} \times \frac{k_{1-\alpha} \sigma_{N_{BdF}}}{T} \quad (5.5.1)$$

Dans notre démonstration, nous avons pris également les coefficients  $k_{1-\alpha}$  et  $k_{1-\beta}$  égaux et nous notons  $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k$ .

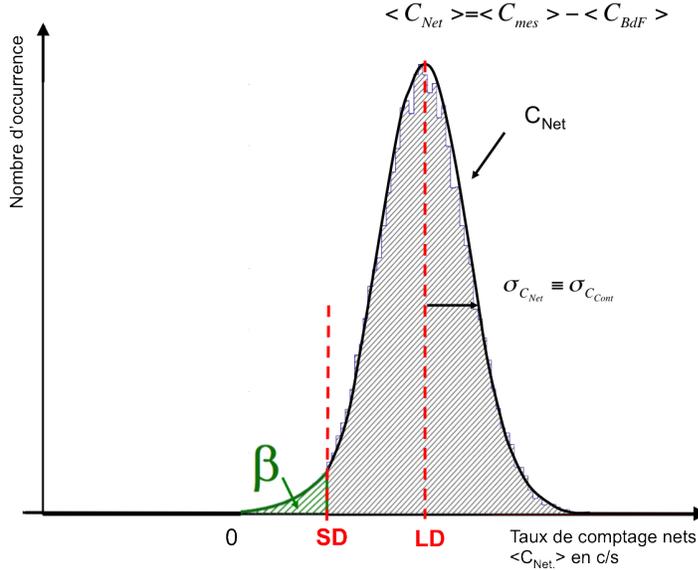


FIGURE 5.37: Représentation de la distribution des taux de comptage net d'échantillons contaminés mesurés à l'aide d'un de nos prototypes, du seuil de décision et de la limite de détection.

Passons maintenant au calcul de la limite de détection (LD). Pour calculer cette dernière, nous nous plaçons maintenant dans le cas inverse de celui pris pour le seuil de décision. Au lieu de mesurer des échantillons exclusivement non contaminés, nous sommes cette fois-ci en présence d'échantillons contaminés.

Nous pouvons voir sur la figure 5.37 la distribution  $C_{Net}$  des mesures réalisées avec l'un de nos prototypes sur des échantillons contaminés. Cette distribution est centrée sur  $\langle C_{Net} \rangle$  qui est la valeur moyenne des taux de comptage nets obtenus. Le taux de comptage  $C_{Net}$  est égal au taux de comptage  $C_{mes}$  corrigé du bruit de fond  $C_{BdF}$ . La valeur moyenne des taux de comptage nets peut également s'écrire  $\langle C_{Net \text{ cont.}} \rangle = \langle C_{mes \text{ cont.}} \rangle - \langle C_{BdF} \rangle$ . Les mesures sont toutes effectuées pendant un temps  $T_{BdF} = T_{mes} = T$ .

La détermination de la limite de détection (LD) repose sur le même principe vu précédemment pour le calcul de SD. Alors, l'estimation de l'écart type de ce taux de comptage peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \sigma_{C_{Net}}^2 &= \left( \frac{\sigma_{N_{mes}}}{T} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{N_{BdF}}}{T} \right)^2 = \frac{1}{T^2} (\sigma_{N_{mes}}^2 + \sigma_{N_{BdF}}^2) \\ &= \frac{1}{T^2} (\sigma_{N_{Net.}}^2 + \sigma_{N_{BdF}}^2) \\ &= \frac{1}{T^2} (\sigma_{N_{mes}}^2 + \sigma_{N_{BdF}}^2 + \sigma_{N_{BdF}}^2) \\ &= \frac{1}{T^2} (LD \times T + \sigma_{N_{BdF}}^2 + \sigma_{N_{BdF}}^2) \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

$$= \frac{LD}{T} + \frac{2\sigma_{N_{BdF}}^2}{T^2} \quad (5.5.3)$$

Dans l'équation 5.5.2 ci-dessus, nous écrivons  $\sigma_{N_{mes}}^2 = LD \times T$ , cette simplification peut être effectuée car l'accroissement est Poissonien. En effet, dans le cas présent la distribution  $C_{N_{mes}}$  est considérée comme Poissonienne car la contamination surfacique mesurée n'est, a priori, pas affectée par d'autres fluctuations systématiques.

De plus, nous pouvons également voir sur la figure 5.37 que LD peut également s'écrire :

$$LD = SD + k_{1-\beta} \times \sigma_{C_{Net}}$$

Et que si nous reportons les équations 5.5.1 et 5.5.3 dans l'équation précédente nous obtenons :

$$\begin{aligned} LD &= \sqrt{2} \times \frac{k\sigma_{NBdF}}{T} + k\sqrt{\frac{LD}{T} + \frac{2\sigma_{NBdF}^2}{T^2}} \\ \Rightarrow \frac{LD}{k} - \frac{\sigma_{NBdF}}{T} &= \sqrt{\frac{LD}{T} + \frac{2\sigma_{NBdF}^2}{T^2}} \\ \Rightarrow LD^2 - \frac{4\sqrt{2} \times LD \times \sigma_{NBdF}}{T} + \frac{8\sigma_{NBdF}^2}{T^2} &= 4\left(\frac{LD}{T} + \frac{2\sigma_{NBdF}^2}{T^2}\right) \\ \Rightarrow LD^2 - \frac{4LD \times \sigma_{NBdF}}{T}(\sqrt{2}\sigma_{NBdF}^2 + 1) &= 0 \end{aligned}$$

Nous obtenons donc finalement comme solution :  $LD = \frac{4}{T} (1 + \sqrt{2}\sigma_{NBdF}) = 4\left(\frac{1}{T} + \sqrt{2}\sigma_{C_{BdF}}\right)$

Comme nous avons pu le voir pour le cas simplifié de la partie 2.3.1, la limite de détection correspond à un taux de comptage en c/s. Le passage en Bq (ou Bq<sub>éq</sub>) nous donne accès à un nouvel indicateur : l'AMD ou Activité Minimale Détectable qui s'écrit :

$$AMD(Bq) = \frac{LD(c/s) \times r}{\rho_{4\pi(c/s/Bq)}}$$

où  $\rho_{4\pi(c/s/Bq)}$  est le rendement du détecteur dans  $4\pi$  sr au radionucléide concerné et  $r$  est le coefficient de correction d'échantillon qui correspond à la nature du support (ce coefficient est égal à 1 pour les mesures  $\beta/\gamma$  et à 2 pour les mesures  $\alpha$ ).

L'AMD peut également être donnée en Bq/cm<sup>2</sup> et son calcul dépendra du mode de mesure (directe ou indirecte) et/ou de la surface de détection de l'appareil de mesure.

### 5.5.3.2 Détermination de l'AMD des prototypes lors de nos essais en BR

La détermination des SD et LD de nos prototypes s'est déroulée sur site EDF dans plusieurs ambiances  $\gamma$  comprises entre 1 et 120  $\mu$ Sv/h. Comme nous avons pu le remarquer dans les formules précédentes seuls les temps de comptages et l'écart type du taux de comptage  $\sigma_{C_{BdF}}$  influent sur le SD, la LD et l'AMD.

Dans un premier temps, nos essais ont donc consisté à la réalisation de mesure de bruit de fond dans des ambiances différentes. Nous avons, ensuite, pour chaque prototype, tracé les distributions des taux de comptage de chaque module optique ainsi que celle de la soustraction des ces deux voies. Enfin, nous avons représenté la distribution obtenue pour la soustraction des deux voies de mesure pour plusieurs valeurs d'intégration (1, 2 et 4 secondes). Pour les calculs de SD, LD et AMD, nous

avons utilisé les moyennes quadratiques (notée RMS dans les graphiques). Nous avons également ajusté nos distributions à l'aide de fonctions Gaussiennes. Ceci nous permet de comparer le RMS de nos distributions et le  $\sigma$  des fonctions d'ajustage. Au final, nous avons injecté dans la formule précédente de LD la moyenne quadratique à la place de l'écart type  $\sigma$ . La formule de LD s'écrit donc :

$$LD (c/s) = 4 \left[ \frac{1}{T} + \sqrt{2} \times RMS(C_{BdF}) \right]$$

De plus, pour calculer l'AMD de nos prototype, nous prenons :

- le coefficient de correction de l'échantillon  $r$  est égal à 1 car nous réalisons des mesures  $\beta/\gamma$ ,
- $\rho_{4\pi} = 0,24 \text{ c/s/Bq}$  pour le prototype v2.1 car le seuil de discrimination a été fixé à 90 mV,
- $\rho_{4\pi} = 0,25 \text{ c/s/Bq}$  pour le prototype v2.2 car le seuil de discrimination a été fixé à 90 mV,
- $S_{Détekteur} = 102 \text{ cm}^2$ , pour les deux prototypes.

$$AMD (Bq/cm^2) = \frac{\frac{4}{\rho_{4\pi}} \left[ \frac{1}{T} + \sqrt{2} \times RMS(C_{BdF}) \right]}{S_{Détekteur}}$$

Lors de nos essais, nous avons testé les deux prototypes l'un après l'autre. Pour chaque prototype les essais se sont déroulés en deux temps. Dans un premier temps, nous avons réalisé une acquisition de bruit de fond dans le bâtiment réacteur (BR), puis nous avons mesuré plusieurs frottis dont l'activité avait été au préalable vérifiée par un agent du service SPR du CNPE de Chinon. L'analyse qui suit ne concerne que l'acquisition du bruit de fond et la détermination de l'AMD de nos prototypes. Les mesures de frottis seront traitées un peu plus tard et serviront à valider ou invalider notre modèle.

### Mesures dans un bruit de fond de 1-3 $\mu\text{Sv/h}$ - Prototype v2.1

L'acquisition du bruit de fond  $\gamma$  a été réalisée pendant 300 secondes. Les taux de comptage échantillonnés sur chaque voie toutes les secondes sont visibles sur la figure 5.38. Nous pouvons également observer les distributions des taux de comptage pour chaque voie ainsi que leurs évolutions en fonction du temps d'intégration (moyenne glissante de 1, 2 et 4 secondes).

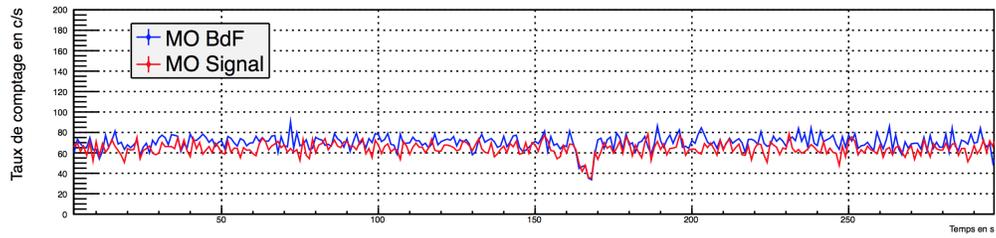
Pour le calcul de l'AMD, nous n'utiliserons pas ces données mais celles directement issues de la soustraction entre la voie "Signal + BdF" et "BdF". Le chronogramme de cette soustraction, toujours échantillonnée à la seconde, est présenté sur la figure 5.38. Elle est accompagnée des distributions en fonction de la profondeur de la moyenne glissante utilisée.

La moyenne quadratique (RMS) obtenue pour la distribution sur 1 seconde est de 7,1. Elle atteint 4,9 en 2 secondes puis 3,5 en 4 secondes. Ce sont ces valeurs de moyenne quadratique que nous intégrons à notre formule de LD afin d'obtenir l'AMD de notre prototype v2.1 dans une ambiance de 1-3  $\mu\text{Sv/h}$ .

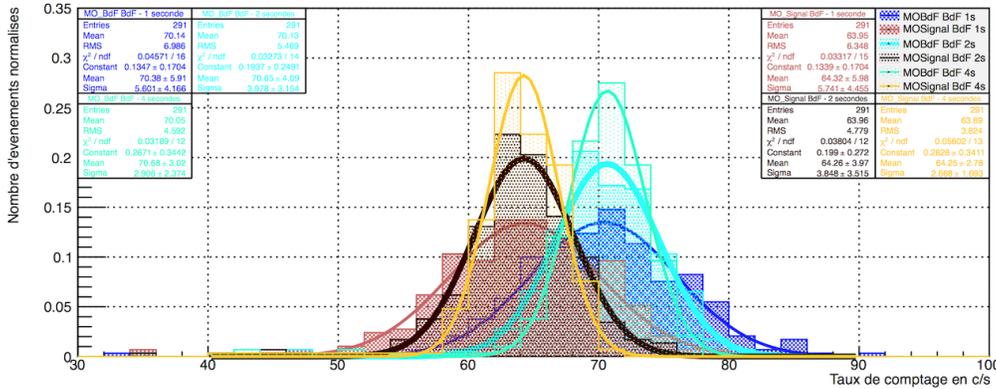
### Mesures dans un bruit de fond de 1-3 $\mu\text{Sv/h}$ - Prototype v2.2

Pour le prototype v2.2 la méthode utilisée a été identique. L'acquisition du bruit de fond  $\gamma$  a été réalisée pendant 270 secondes. Les distributions des taux de comptage finals (voie "BdF" soustraite à la voie "Signal + BdF") en fonction de la profondeur de la moyenne glissante choisie sont présentées

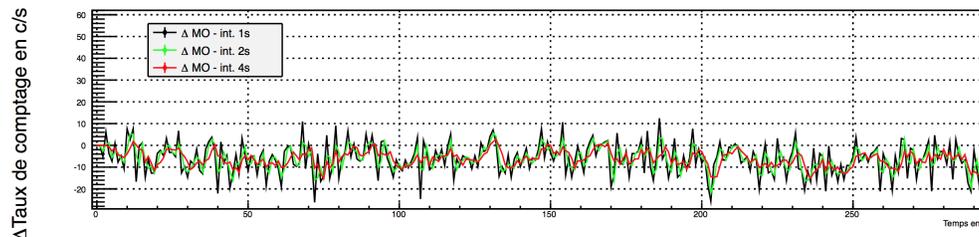
# CHAPITRE 5. PROTOTYPES PRÉ-INDUSTRIELS : QUALIFICATION, VALIDATION ET PERFORMANCES



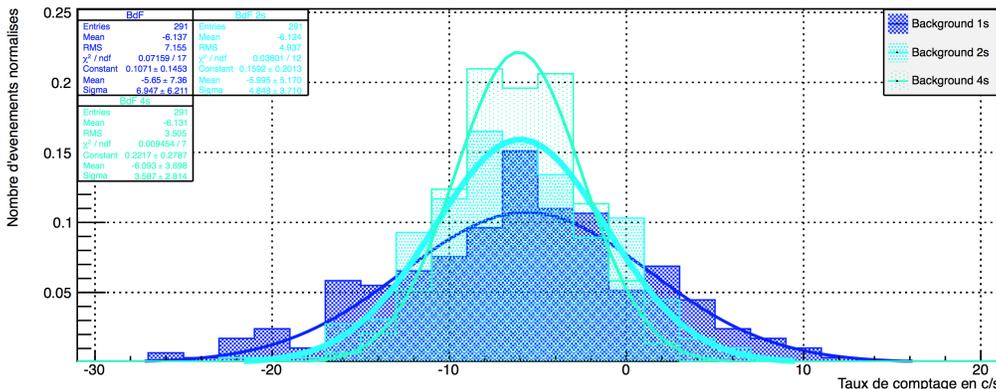
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 5.38: Essais du prototype v2.1 dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 1 et 3  $\mu\text{Sv/h}$ . Chronogrammes des taux de comptage bruts des 2 voies du prototype (a) et du taux de comptage final en fonction de la profondeur de la moyenne glissante (c). Distributions de ces taux de comptages et évolution en fonction de la profondeur de la moyenne glissante respectivement (b) et (d).

sur la figure 5.39. Les trois distributions correspondent à trois profondeurs de moyennes glissantes sur 1, 2 et 4 secondes.

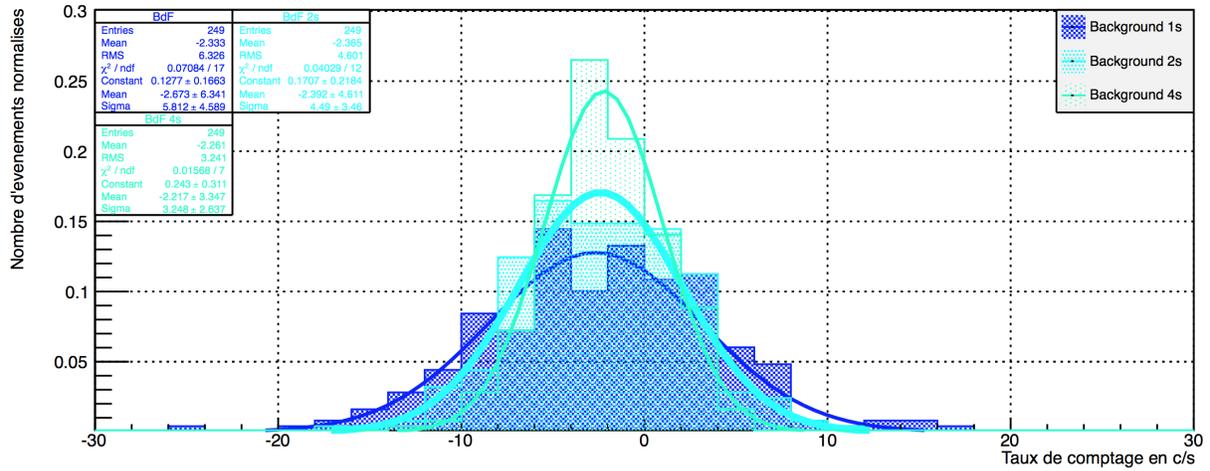


FIGURE 5.39: Essais du prototype v2.2 dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 1 et 3  $\mu\text{Sv/h}$ . Distributions des différences de taux de comptage entre les voies “Signal + BdF” et “BdF” pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes.

La moyenne quadratique (RMS) obtenue pour la distribution sur 1 seconde est de 6,3. Elle atteint 4,6 en 2 secondes puis 3,2 en 4 secondes. Ce sont ces valeurs de moyenne quadratique que nous intégrons à notre formule de LD afin d’obtenir l’AMD de notre prototype v2.2 dans une ambiance de 1-3  $\mu\text{Sv/h}$ .

### Mesures dans un bruit de fond de 12-18 $\mu\text{Sv/h}$ - Prototype v2.1

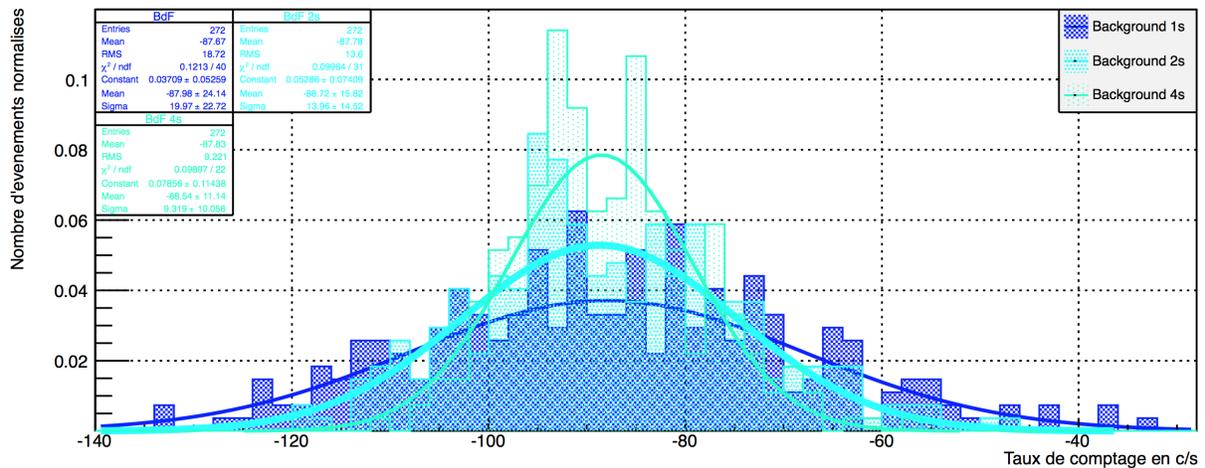


FIGURE 5.40: Essais du prototype v2.1 dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 12 et 18  $\mu\text{Sv/h}$ . Distributions des différences de taux de comptage entre les voies “Signal + BdF” et “BdF” pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes.

Dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 12 et 18  $\mu\text{Sv/h}$ , l'acquisition du bruit de fond  $\gamma$  avec le prototype v2.1 a été réalisée pendant 270 secondes. Les distributions des taux de comptage finals (voie "BdF" soustraite à la voie "Signal + BdF") en fonction de la profondeur de la moyenne glissante choisie sont présentées sur la figure 5.40. Les trois distributions correspondent à trois profondeurs de moyennes glissantes sur 1, 2 et 4 secondes.

La moyenne quadratique (RMS) obtenue pour la distribution sur 1 seconde est de 18,7. Elle atteint 13,6 en 2 secondes puis 9,2 en 4 secondes. Ce sont ces valeurs de moyenne quadratique que nous intégrons à notre formule de LD afin d'obtenir l'AMD de notre prototype v2.1 dans une ambiance de 12-18  $\mu\text{Sv/h}$ .

### Mesures dans un bruit de fond de 10-15 $\mu\text{Sv/h}$ - Prototype v2.2

Pour le prototype v2.2, la méthode utilisée a été identique. L'acquisition du bruit de fond  $\gamma$  a été réalisée pendant 270 secondes. Les distributions des taux de comptage finals (voie "BdF" soustraite à la voie "Signal + BdF") en fonction de la profondeur de la moyenne glissante choisie sont présentées sur la figure 5.41. Les trois distributions correspondent à trois profondeurs de moyennes glissantes sur 1, 2 et 4 secondes.

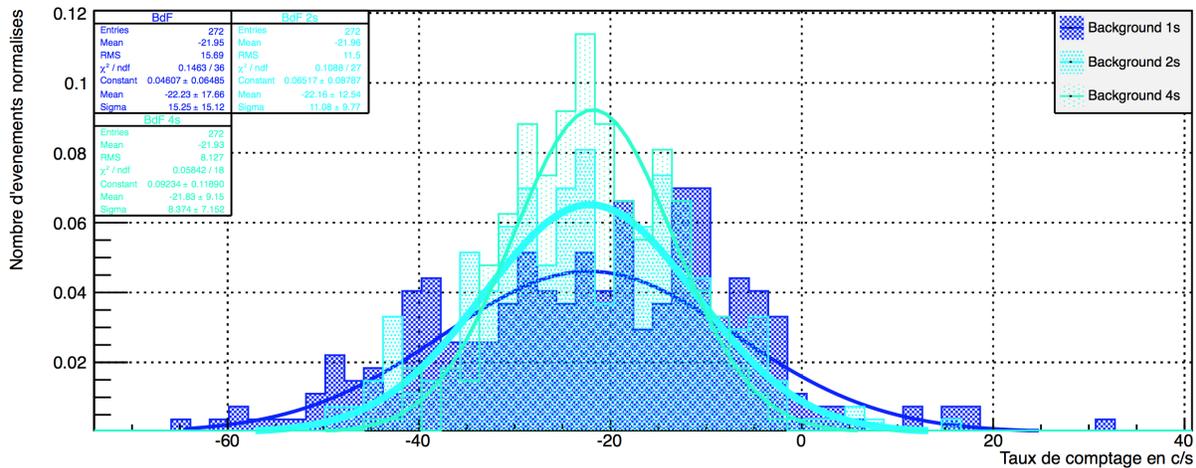


FIGURE 5.41: Essais du prototype v2.2 dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 10 et 15  $\mu\text{Sv/h}$ . Distributions des différences de taux de comptage entre les voies "Signal + BdF" et "BdF" pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes .

La moyenne quadratique (RMS) obtenue pour la distribution sur 1 seconde est de 15,7. Elle atteint 11,5 en 2 secondes puis 8,1 en 4 secondes. Ce sont ces valeurs de moyenne quadratique que nous intégrons à notre formule de LD afin d'obtenir l'AMD de notre prototype v2.2 dans une ambiance de 10-15  $\mu\text{Sv/h}$ .

### Mesures dans un bruit de fond de 25-35 $\mu\text{Sv/h}$ - Prototype v2.1

Dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 25 et 35  $\mu\text{Sv/h}$ , l'acquisition du bruit de fond  $\gamma$  avec le prototype v2.1 a été réalisée pendant 320 secondes. Les distributions des taux de comptage finals

(voie “BdF” soustraite à la voie “Signal + BdF”) en fonction de la profondeur de la moyenne glissante choisie sont présentées sur la figure 5.42. Les trois distributions correspondent à trois profondeurs de moyennes glissantes sur 1, 2 et 4 secondes.

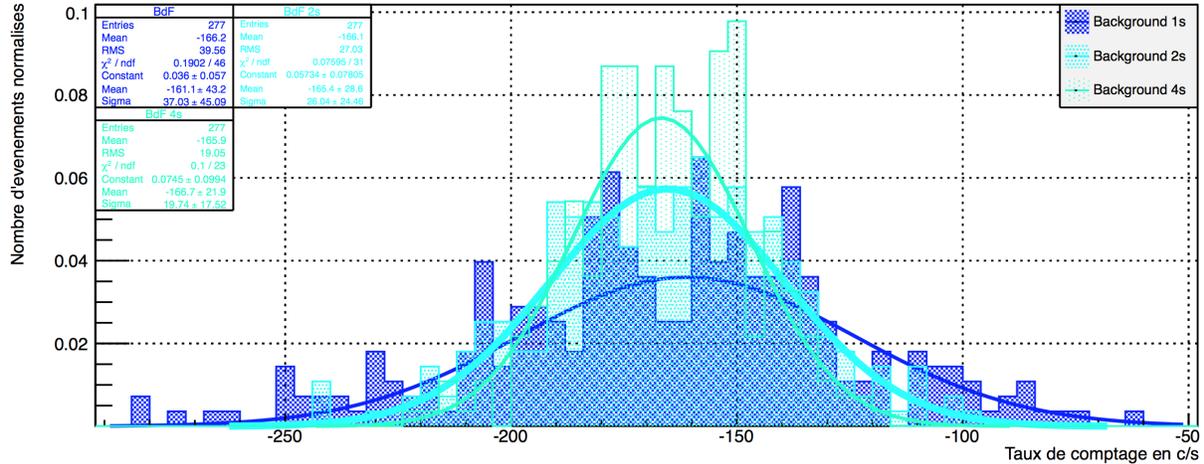


FIGURE 5.42: Essais du prototype v2.1 dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 25 et 35  $\mu\text{Sv/h}$ . Distributions des différences de taux de comptage entre les voies “Signal + BdF” et “BdF” pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes.

La moyenne quadratique (RMS) obtenue pour la distribution sur 1 seconde est de 39,6. Elle atteint 27,0 en 2 secondes puis 19,1 en 4 secondes. Ce sont ces valeurs de moyenne quadratique que nous intégrons à notre formule de LD afin d’obtenir l’AMD de notre prototype v2.1 dans une ambiance de 25-35  $\mu\text{Sv/h}$ .

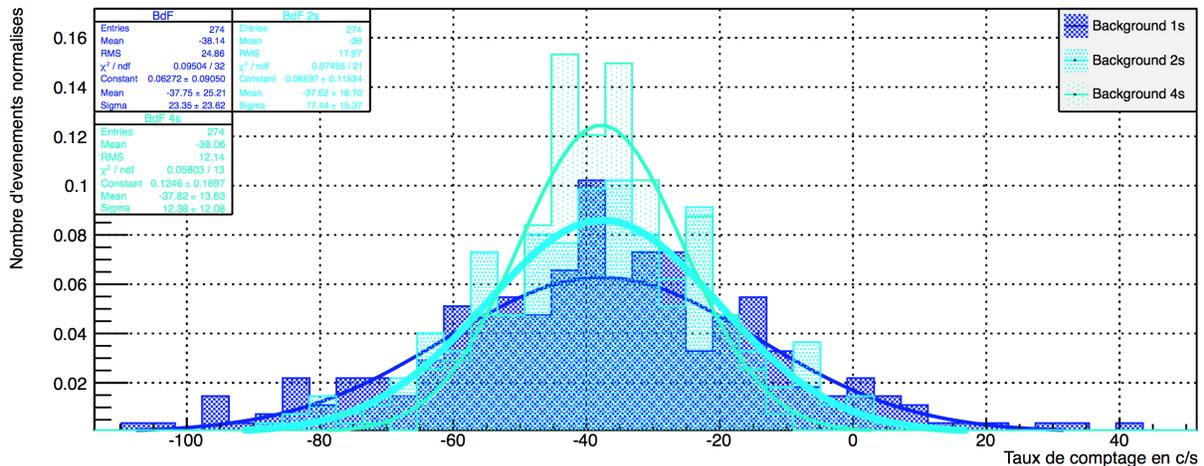


FIGURE 5.43: Essais du prototype v2.2 dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 25 et 35  $\mu\text{Sv/h}$ . Distributions des différences de taux de comptage entre les voies “Signal + BdF” et “BdF” pour des moyennes glissantes de 1, 2 et 4 secondes.

### Mesures dans un bruit de fond de 25-35 $\mu\text{Sv/h}$ - Prototype v2.2

Pour le prototype v2.2, la méthode utilisée a été identique. L'acquisition du bruit de fond  $\gamma$  a été réalisée pendant 270 secondes. Les distributions des taux de comptage finals (voie "BdF" soustraite à la voie "Signal + BdF") en fonction de la profondeur de la moyenne glissante choisie sont présentées sur la figure 5.43. Les trois distributions correspondent à trois profondeurs de moyennes glissantes sur 1, 2 et 4 secondes.

La moyenne quadratique (RMS) obtenue pour la distribution sur 1 seconde est de 24,9. Elle atteint 18,0 en 2 secondes puis 12,1 en 4 secondes. Ce sont ces valeurs de moyenne quadratique que nous intégrons à notre formule de LD afin d'obtenir l'AMD de notre prototype v2.2 dans une ambiance de 25-35  $\mu\text{Sv/h}$ .

### Récapitulatif des résultats obtenus

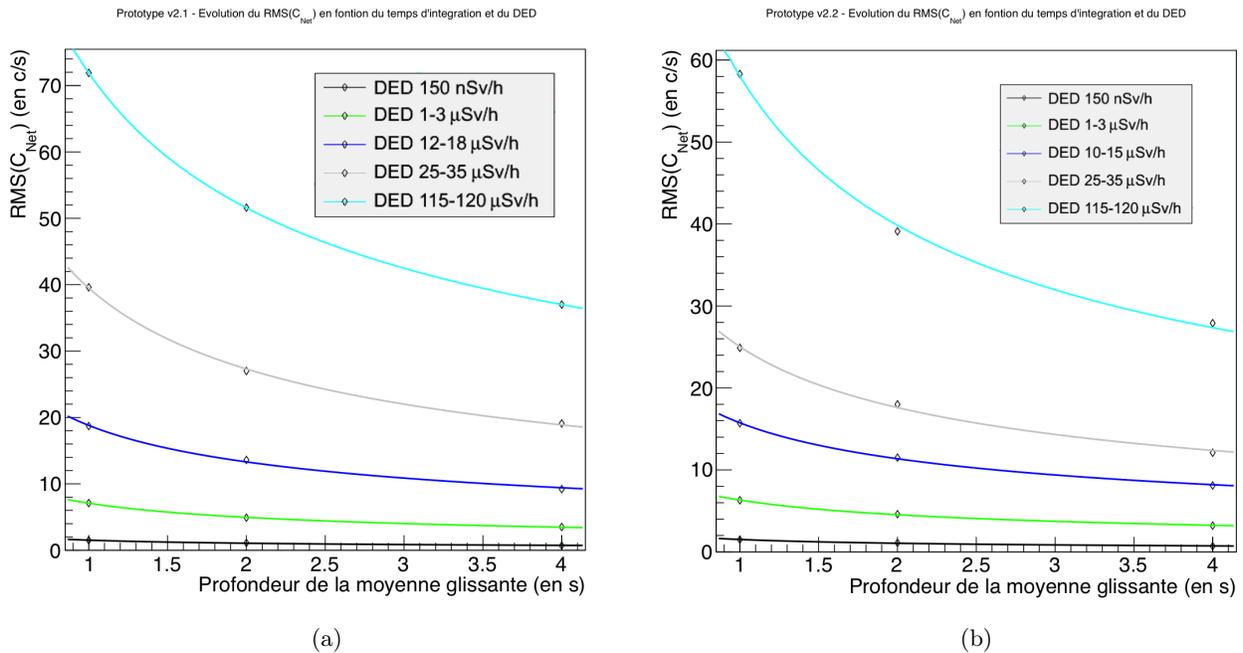


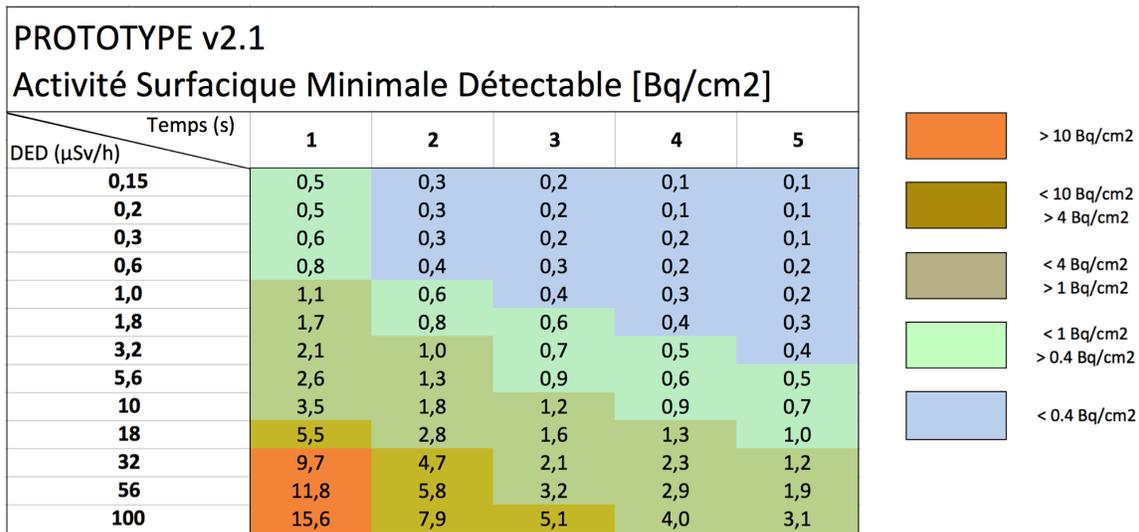
FIGURE 5.44: Evolution des RMS ( $C_{\text{Net}}$ ) obtenus lors de nos essais en laboratoire et en CNPE en fonction de la durée d'intégration avec le prototype v2.1 (a) et v2.2 (b).

Les moyennes quadratiques (RMS) obtenues pour chaque ambiance  $\gamma$  et pour chaque prototype (voir figure 5.44) sont ensuite intégrées dans la formule d'AMD ci-dessous (décrite dans la sous-partie précédente). Nous avons complété les résultats obtenus dans les trois ambiances présentées précédemment avec des essais supplémentaires effectués dans en BR à 115-120  $\mu\text{Sv/h}$ . Nous avons également ajouté un résultat obtenu au CENBG dans une ambiance estimée à 150 nSv/h.

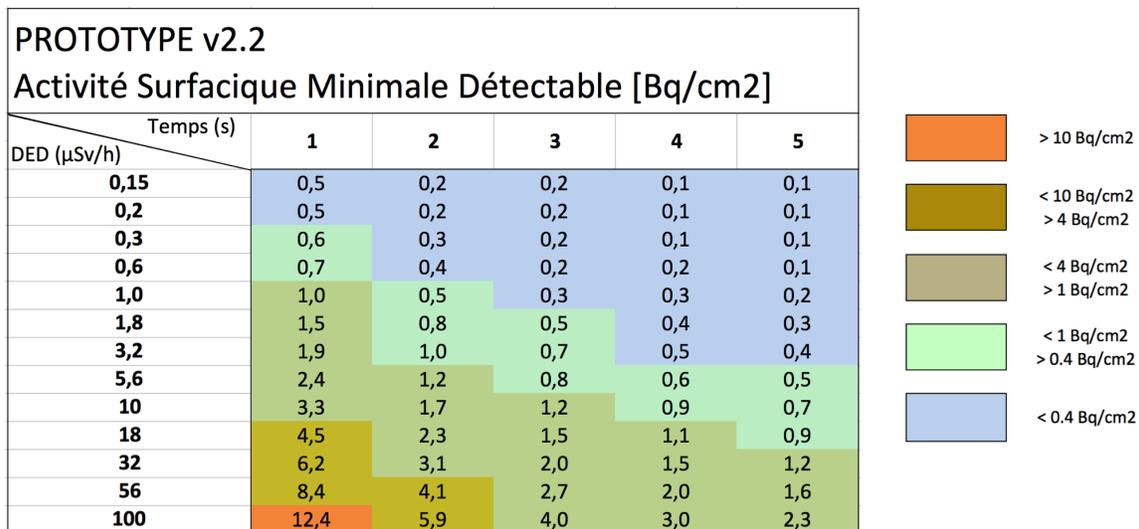
$$AMD (Bq/cm^2) = \frac{4}{\rho_{4\pi}} \left[ \frac{1}{T} + \sqrt{2} \times RMS(C_{BdF}) \right] S_{\text{Détecteur}}$$

- $\rho_{4\pi} = 0,24 \text{ c/s/Bq}$  pour le prototype v2.1 car le seuil de discrimination a été fixé à 90 mV,
- $\rho_{4\pi} = 0,25 \text{ c/s/Bq}$  pour le prototype v2.2 car le seuil de discrimination a été fixé à 90 mV,
- $S_{\text{Détecteur}} = 102 \text{ cm}^2$ , pour les deux prototypes.

Finalement, les résultats obtenus dans 5 ambiances différentes nous permettent, via une interpolation linéaire, de définir l'évolution de l'AMD de nos appareils pour une ambiance spécifique. Pour la variation de l'AMD en fonction du temps de mesure, ce sont les graphiques présentés figure 5.44 qui nous permettent de déterminer l'évolution de l'AMD. Dans ces deux graphiques les 5 points expérimentaux sont ajustés à l'aide d'une fonction de puissance (type  $y = ax^b$ ).



(a)



(b)

FIGURE 5.45: Tableaux récapitulatifs des sensibilités atteintes par les prototypes v2.1 (a) et v2.2 (b). L'évolution de l'AMD est présentée en fonction du temps de comptage et du DED ambiant.

Nos essais ainsi que les interpolations effectuées nous permettent de définir des tableaux de sensibilité pour nos deux prototypes. Ces tableaux représentent les activités minimales détectables (AMD) par nos prototypes pour une ambiance  $\gamma$  (DED) et un temps de mesure donnés. Nous avons volontairement limité le tableau pour des mesures de 5 secondes car un de nos objectifs principaux était de concevoir un appareil permettant de réaliser une mesure en moins de 3-4 secondes. De plus nous pouvons voir sur la figure 5.44 qu'à partir de 4 secondes d'intégration, l'évolution du RMS est moins rapide. La figure 5.45 présente les tableaux des AMD atteignables par les prototypes v2.1 et v2.2.

Les résultats obtenus sont très importants car ils nous permettent de voir que l'objectif d'avoir une AMD inférieure à 4 Bq/cm<sup>2</sup> dans une ambiance importante et fluctuante de l'ordre de 30  $\mu$ Sv/h se révèle atteignable en moins de 3 secondes par nos deux prototypes. Nous pouvons constater également que le prototype v2.2 a de meilleures performances. Pour ce dernier nous pouvons nous attendre à des sensibilités encore plus intéressantes. Par exemple, l'AMD de 4 Bq/cm<sup>2</sup> semble atteignable en environ 2 secondes dans des DED pouvant s'élever jusqu'à 56  $\mu$ Sv/h. Dans 30  $\mu$ Sv/h, une AMD d'environ 2 Bq/cm<sup>2</sup> pourrait être détectée en 3 secondes de mesure. Les objectifs que nous nous étions fixés au début de l'étude semblent donc être réalisés, d'autant plus que les AMD données dans les tableaux de sensibilité sont données pour un niveau de confiance de 97,5 %<sup>3</sup>. Il ne reste qu'une seule étape qui consiste à vérifier expérimentalement les données de ces tableaux récapitulatifs. Ces essais de vérification sont l'objet de la prochaine sous-partie.

#### 5.5.4 Validation des AMD définis avec des mesures de frottis dans différentes ambiances $\gamma$

Afin de vérifier le modèle qui nous a permis de produire les tableaux de résultats vus dans la partie précédente, nous avons réalisé une série d'essais supplémentaire en CNPE. Il s'agit de la deuxième partie des essais effectués au CNPE de Chinon. La première partie des essais consistait à mesurer les taux de comptage générés par le bruit de fond  $\gamma$  sur nos prototypes. La deuxième partie des essais consiste à mesurer plusieurs frottis qui ont été préalablement mesurés par le service SPR du CNPE de Chinon. Nous avons à notre disposition 4 frottis d'activités différentes. Nous présenterons dans cette partie les résultats obtenus avec des frottis de 200 et 450 Bq. Ces derniers représentent respectivement une activité surfacique de 1,96 Bq/cm<sup>2</sup> et 4,41 Bq/cm<sup>2</sup> car la surface active de nos prototypes est de 102 cm<sup>2</sup>.

Nous avons choisi de présenter 2 résultats de mesure de frottis (200 et 450 Bq) par ambiance  $\gamma$  testée. Nous avons sélectionné les ambiances de 1-3  $\mu$ Sv/h, 10-18  $\mu$ Sv/h et 25-35  $\mu$ Sv/h pour chaque prototype. Les résultats obtenus pour le prototype v2.1 sont présentés sur la figure 5.46 et ceux du prototype v2.2 sur la figure 5.47. Les temps d'intégration des distributions ont été choisis afin de pouvoir comparer ces résultats avec ceux des tableaux de sensibilité communiqués dans la partie précédente (voir figure 5.45).

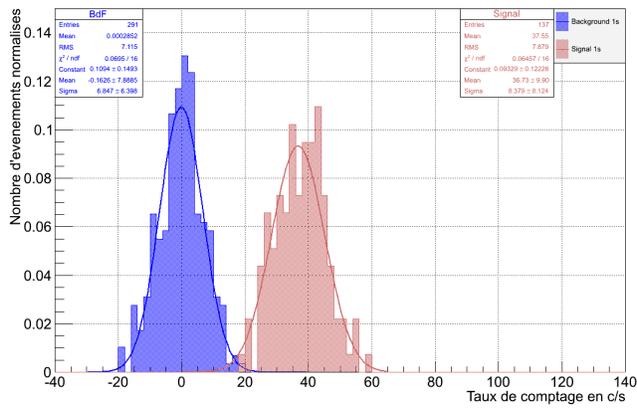
Lors des essais en CNPE, nous avons utilisé la même méthode de mesure pour chaque ambiance  $\gamma$ . Les essais se déroulaient de la manière suivante :

- Mesure du bruit de fond pendant quelques minutes,
- Mesure des différents frottis pendant 1-2 minutes,
- Mesure du bruit de fond pendant quelques secondes.

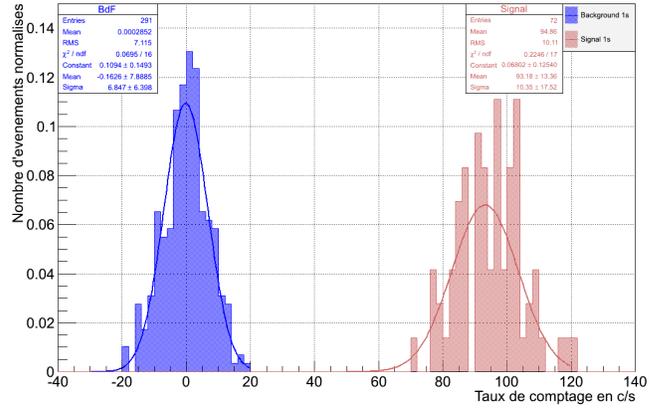
---

3. Le niveau de confiance a été abordé précédemment (voir figure 2.25).

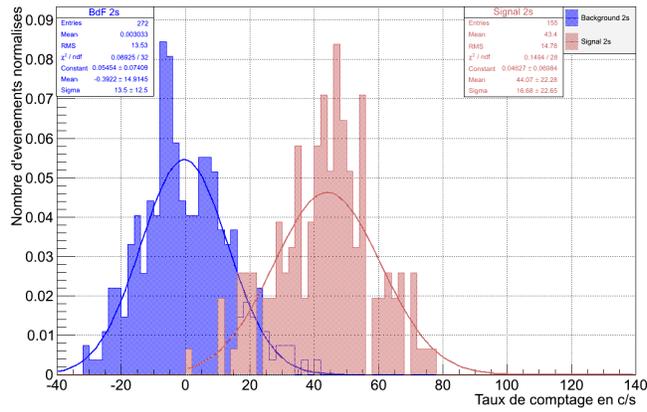
CHAPITRE 5. PROTOTYPES PRÉ-INDUSTRIELS : QUALIFICATION, VALIDATION ET PERFORMANCES



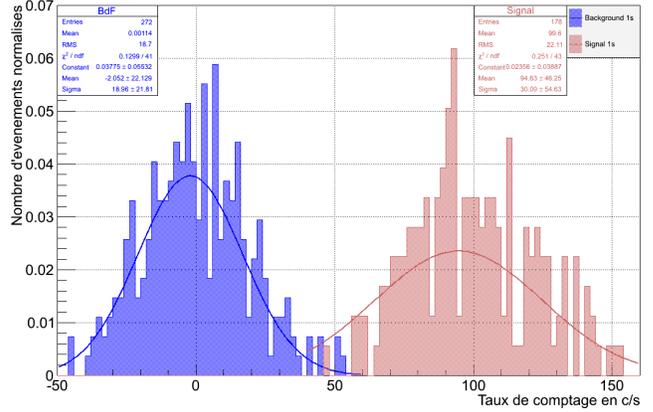
(a) DED 1-3  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 200 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 1\text{s}$



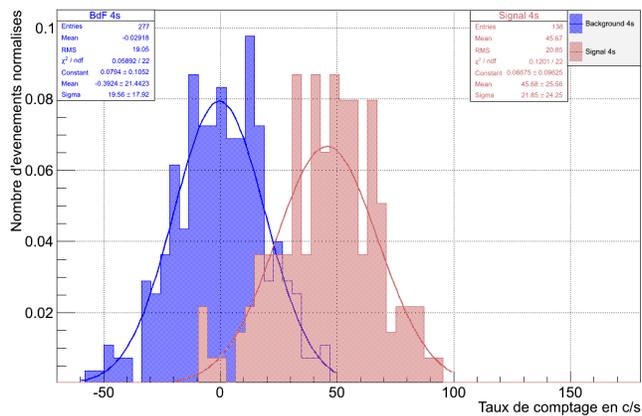
(b) DED 1-3  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 450 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 1\text{s}$



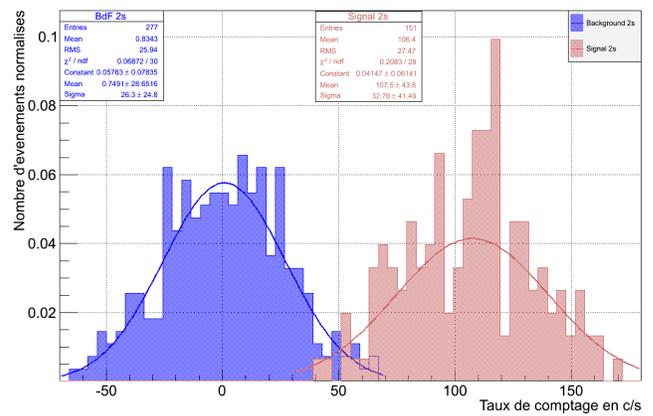
(c) DED 12-18  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 200 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 2\text{s}$



(d) DED 12-18  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 450 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 1\text{s}$



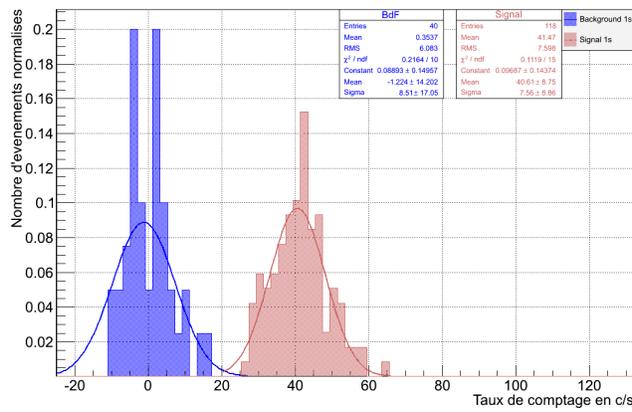
(e) DED 25-35  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 200 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 4\text{s}$



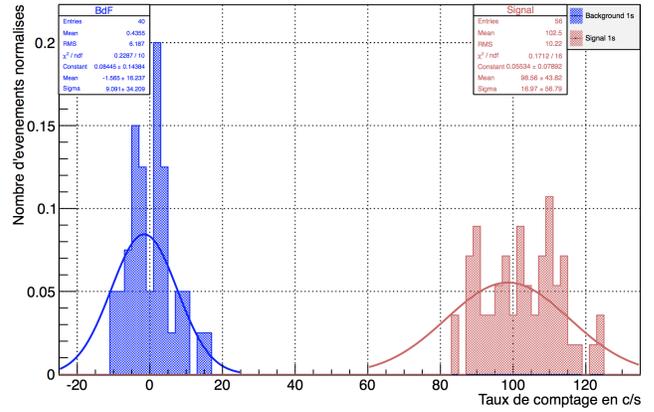
(f) DED 25-35  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 450 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 2\text{s}$

FIGURE 5.46: Résultats des mesures effectuées avec le prototype v2.1 sur des frottis de 200 Bq et 450 Bq dans des ambiances de 1-3  $\mu\text{Sv/h}$ , 12-18  $\mu\text{Sv/h}$  et 25-35  $\mu\text{Sv/h}$ .

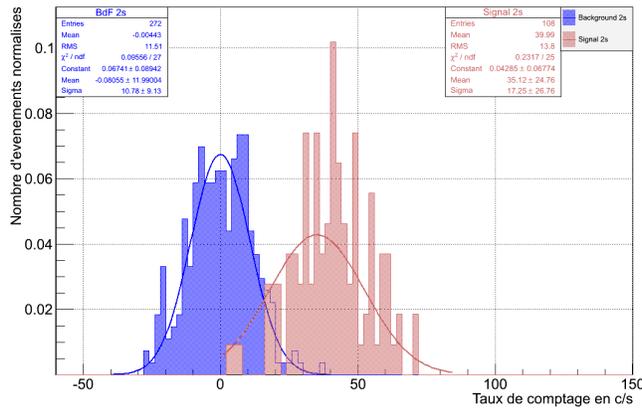
# CHAPITRE 5. PROTOTYPES PRÉ-INDUSTRIELS : QUALIFICATION, VALIDATION ET PERFORMANCES



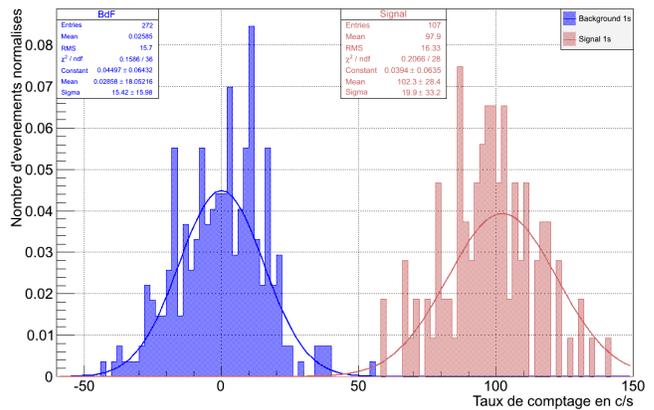
(a) DED 1-3  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 200 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 1\text{s}$



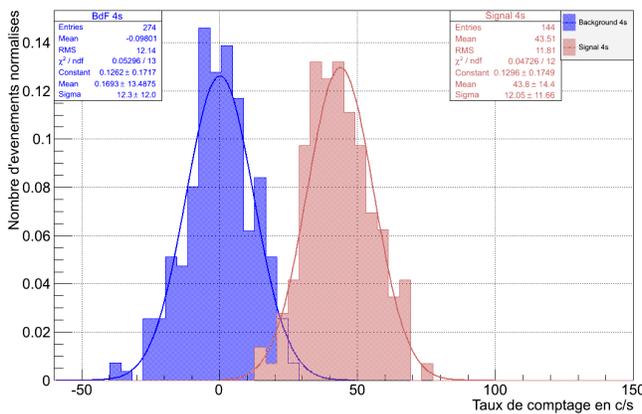
(b) DED 1-3  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 450 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 1\text{s}$



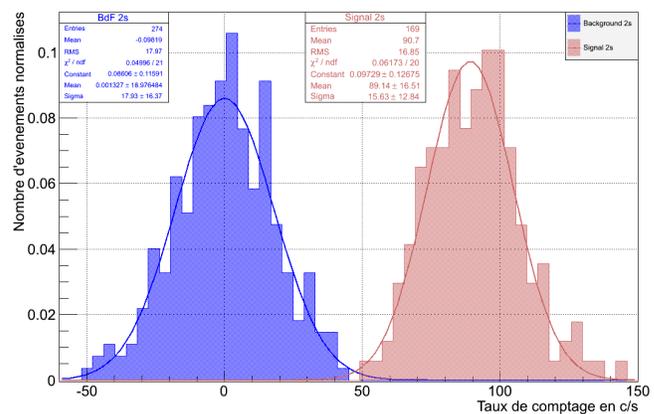
(c) DED 10-15  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 200 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 2\text{s}$



(d) DED 10-15  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 450 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 1\text{s}$



(e) DED 25-35  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 200 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 4\text{s}$



(f) DED 25-35  $\mu\text{Sv/h}$  - Frottis 450 Bq -  $T_{\text{intégration}} = 2\text{s}$

FIGURE 5.47: Résultats des mesures effectuées avec le prototype v2.2 sur des frottis de 200 Bq et 450 Bq dans des ambiances de 1-3  $\mu\text{Sv/h}$ , 10-15  $\mu\text{Sv/h}$  et 25-35  $\mu\text{Sv/h}$ .

L'idéal aurait été de faire ces mesures sur des sources étalonnées de faible activité mais nous n'avons pas pu amener notre source de cobalt 60 sur site. Le service SPR nous a procuré des frottis de plusieurs activités (100 Bq, 130 Bq, 200 Bq et 450 Bq). Or, le problème réside dans le fait que l'activité de ces frottis n'est pas connue de manière précise et qu'elle peut évoluer par dispersion au gré de nos déplacements et de leurs manipulations.

### Validation des AMD estimées pour le prototype v2.1

Dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 1 et 3  $\mu\text{Sv/h}$ , le tableau de sensibilité du prototype v2.1 (voir figure 5.45) nous donne une estimation d'AMD comprise entre 1,1 et 2,1  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 1 seconde. Le premier essai présenté sur la figure 5.46 (a) montre les distributions obtenues pour nos mesures de bruit de fond (BdF) et mesures sur frottis. L'activité de 200 Bq présente sur le frottis est équivalente à une activité surfacique de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$ . Nous pouvons observer que les deux distributions sont bien disjointes et que l'estimation du tableau de sensibilité est confirmée par cet essai. De même, sur la figure (b), l'essai avec un frottis de 450 Bq (soit une activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$ ) confirme les premiers essais effectués avec le frottis de 200 Bq.

Dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 12 et 18  $\mu\text{Sv/h}$ , le tableau de sensibilité du prototype v2.1 (voir figure 5.45) nous permet d'extrapoler une estimation d'AMD comprise entre 3,9 et 5,5  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 1 seconde et comprise entre 2,0 et 2,8  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 2 secondes. L'essai présenté sur la figure 5.46 (c) montre les distributions obtenues lors de la mesure du frottis de 200 Bq (soit une activité surfacique de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$ ). Nous pouvons observer que les deux distributions ne sont pas assez disjointes pour représenter un indice de confiance de 97,5 %. Ici, l'indice de confiance est plutôt de l'ordre de 87 %<sup>4</sup>. Les estimations de notre tableau de sensibilité restent toutefois cohérentes car elles prévoient une AMD comprise entre 2,0 et 2,8  $\text{Bq/cm}^2$ . Cette constatation est confirmée par la mesure du frottis de 450 Bq où les distributions présentées sur la figure (d) sont disjointes. L'activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$  du frottis confirme l'estimation du tableau de sensibilité qui prévoyait une AMD comprise entre 3,9 et 5,5  $\text{Bq/cm}^2$ .

Enfin, dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 25 et 35  $\mu\text{Sv/h}$ , le tableau de sensibilité du prototype v2.1 (voir figure 5.45) nous permet d'extrapoler une estimation d'AMD comprise entre 3,8 et 4,8  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 2 secondes et comprise entre 1,9 et 2,4  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 4 secondes. L'essai présenté sur la figure 5.47 (e) montre les distributions obtenues lors de la mesure du frottis de 200 Bq (soit une activité surfacique de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$ ). Nous pouvons observer que les deux distributions sont disjointes mais pas suffisamment pour représenter un indice de confiance de 97,5 %. Ici, l'indice de confiance est plutôt de l'ordre de 65 %. Les estimations de notre tableau de sensibilité restent toutefois cohérentes car elles prévoient une AMD comprise entre 1,9 et 2,4  $\text{Bq/cm}^2$ . En effet, nous n'étions pas censé voir ce frottis de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$  avec un indice de confiance de 97,5 %. Pour la mesure du frottis de 450 Bq (soit une activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$ ), les distributions présentées sur la figure (f) sont disjointes et l'indice de confiance de 97,5 % est quasiment atteint. Cette mesure confirme l'estimation du tableau de sensibilité qui prévoyait une AMD comprise entre 3,8 et 4,8  $\text{Bq/cm}^2$ .

Les essais menés avec le prototype v2.1 confortent et valident le tableau de sensibilité que nous avons déterminé dans la partie précédente. Seul un essai (celui effectué en 2 secondes avec un frottis

4. Les indices de confiance donnés, lorsque les distributions se recouvrent partiellement, ont été calculées à l'aide de fonctions d'erreur. Ces dernières ont été appliquées aux ajustements Gaussiens effectués sur nos distributions et dont les paramètres sont données sur les figures 5.46 et 5.47.

de 200 Bq dans une ambiance de 12-18  $\mu\text{Sv/h}$ ) n'est pas complètement en accord avec notre modèle mais les résultats obtenus ne s'éloignent guère des prévisions.

### Validation des AMD estimées pour le prototype v2.2

Dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 1 et 3  $\mu\text{Sv/h}$ , le tableau de sensibilité du prototype v2.2 (voir figure 5.45) nous donne une estimation d'AMD comprise entre 1,0 et 1,9  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 1 seconde. Le premier essai présenté sur la figure 5.47 (a) montre les distributions obtenues pour nos mesures de bruit de fond (BdF) et mesures sur frottis. L'activité de 200 Bq présente sur le frottis équivaut à une activité surfacique de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$ . Nous pouvons observer que les deux distributions sont bien disjointes et l'estimation du tableau de sensibilité est confirmée par cet essai. De même, sur la figure (b), l'essai avec un frottis de 450 Bq (soit une activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$ ) confirme les premiers essais effectués avec le frottis de 200 Bq.

Dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 10 et 15  $\mu\text{Sv/h}$ , le tableau de sensibilité du prototype v2.2 (voir figure 5.45) nous permet d'extrapoler une estimation d'AMD comprise entre 3,3 et 4,2  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 1 seconde et comprise entre 1,7 et 2,2  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 2 secondes. L'essai présenté sur la figure 5.47 (c) montre les distributions obtenues lors de la mesure du frottis de 200 Bq (soit une activité surfacique de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$ ). Nous pouvons observer que les deux distributions sont disjointes mais pas suffisamment pour représenter un indice de confiance de 97,5 %. Ici, l'indice de confiance est plutôt de l'ordre de 89 %. Les estimations de notre tableau de sensibilité restent toutefois cohérentes car elles prévoient une AMD comprise entre 1,7 et 2,2  $\text{Bq/cm}^2$ . Cette constatation est confirmée par la mesure du frottis de 450 Bq où les distributions présentées sur la figure (d) sont disjointes. L'activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$  du frottis confirme l'estimation du tableau de sensibilité qui prévoyait une AMD comprise entre 3,3 et 4,2  $\text{Bq/cm}^2$ .

Enfin, dans une ambiance  $\gamma$  comprise entre 25 et 35  $\mu\text{Sv/h}$ , le tableau de sensibilité du prototype v2.2 (voir figure 5.45) nous permet d'extrapoler une estimation d'AMD comprise entre 2,9 et 3,3  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 2 secondes et comprise entre 1,4 et 1,6  $\text{Bq/cm}^2$  pour une mesure en 4 secondes. L'essai présenté sur la figure 5.47 (e) montre les distributions obtenues lors de la mesure du frottis de 200 Bq (soit une activité surfacique de 1,96  $\text{Bq/cm}^2$ ). Nous pouvons observer que les deux distributions sont disjointes avec un indice de confiance très proche de 97,5 %. Les estimations de notre tableau de sensibilité sont proches de ce résultat puisqu'elles prévoyaient une AMD comprise entre 1,4 et 1,6  $\text{Bq/cm}^2$ . Pour la mesure du frottis de 450 Bq (soit une activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$ ), les distributions présentées sur la figure (f) sont disjointes. Elles attestent toutefois que notre tableau d'estimation n'est pas assez conservatif puisque l'AMD prédite est comprise entre 2,9 et 3,3  $\text{Bq/cm}^2$  et que le frottis testé représente une activité surfacique de 4,41  $\text{Bq/cm}^2$ , les distributions auraient dues être plus écartées.

Les essais menés avec le prototype v2.2 confirment en grande partie le tableau de sensibilité que nous avons déterminé dans la partie précédente. Seuls les essais (dans une ambiance de 25-35  $\mu\text{Sv/h}$ ) montrent que nos estimations sont légèrement optimistes.

Tous les résultats obtenus lors des essais effectués avec les deux prototypes dans les différentes ambiances  $\gamma$  ainsi que la comparaison avec les valeurs prédites par notre modèle statistique sont résumés dans le tableau 5.2.

Proto	DED (en $\mu\text{Sv/h}$ )	Frottis mesurés (en Bq)	Equivalent en activité surfacique (en Bq/cm <sup>2</sup> )	AMD estimées (en Bq/cm <sup>2</sup> )	Temps de mesure associé (en secondes)	RMS de la distri. BdF (en c/s)	RMS de la distri. Frottis (en c/s)	Différence de comptage Frottis/BdF (en c/s)	Seuil de décision SD (en c/s)	Indice de confiance (1- $\beta$ ) (en %)
v2.1	1-3	200 Bq	1,96	1,1-2,1	1	7,1	7,9	37,6	14,2	100
	1-3	450 Bq	4,41	1,1-2,1	1	7,1	10,1	94,9	14,2	100
	12-18	200 Bq	1,96	2,0-2,8	2	13,5	14,8	43,4	27,1	86,6
	12-18	450 Bq	4,41	3,9-5,5	1	18,7	22,1	99,6	37,4	99,8
	25-35	200 Bq	1,96	1,9-2,4	4	19,1	20,9	45,6	38,1	64,0
	25-35	450 Bq	4,41	3,8-4,8	2	27,0	27,5	106,4	54,0	97,2
v2.2	1-3	200 Bq	1,96	1,0-1,9	1	6,2	7,6	41,0	12,4	100
	1-3	450 Bq	4,41	1,0-1,9	1	6,2	10,2	102,1	12,4	100
	10-15	200 Bq	1,96	1,7-2,2	2	11,6	13,8	41,0	23,1	88,9
	10-15	450 Bq	4,41	3,3-4,2	1	15,7	16,3	97,9	31,4	100
	25-35	200 Bq	1,96	1,4-1,6	4	12,1	11,9	43,6	24,3	94,7
	25-35	450 Bq	4,41	2,9-3,3	2	18,0	16,9	90,8	35,9	99,9

TABLE 5.2: Tableau récapitulatif des essais effectués en CNPE et comparaison avec les estimations de notre modèle statistique.

## 5.6 Conclusions des essais menés sur les prototypes v2.1 et v2.2

Nous avons réalisé plusieurs générations de prototypes opérationnels, tous basés sur le principe d'un détecteur surfacique doublé d'un compteur de garde. Une soustraction dynamique du bruit de fond doit permettre de s'affranchir de ses fluctuations. Une optimisation du design a conduit à augmenter le rendement et l'homogénéité. Finalement, deux prototypes conçus à partir de deux guides de lumière différents, l'un plein et l'autre évidé, ont été complètement testés.

Les essais de validation réalisés sur les prototypes v2.1 et v2.2 ont été effectués au CENBG, dans les locaux de l'entreprise Carmelec et surtout au CNPE de Chinon. Ils ont porté sur la mesure du rendement au cobalt 60, l'homogénéité surfacique de notre détecteur, la dépendance angulaire au bruit de fond  $\gamma$  (flux uni-directionnel ou ambiance dans  $4\pi$  sr), la dépendance aux fluctuations de ce bruit de fond et également la validation des AMD prédites par notre modèle statistique.

Des rendements au  $^{60}\text{Co}$  de l'ordre de 25 %, tout à fait satisfaisant, ainsi qu'une homogénéité de réponse surfacique de  $\pm 7\%$  (pour le prototype v2.1) et  $\pm 11\%$  (pour le prototype v2.2) ont été mesurés. La sensibilité directionnelle au flux  $\gamma$  (irradiateur  $^{137}\text{Cs}$ ) a été notée et représente un maximum de  $\pm 420$  Bq pour le prototype v2.1 et de  $\pm 480$  Bq pour le prototype v2.2. Ces niveaux d'activité correspondent à l'inhomogénéité entre nos deux modules optiques (différence des taux de comptage) pondérée par le rendement au  $^{60}\text{Co}$ . Ces essais nous ont également permis de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans la transmission et la collection de lumière. Enfin, les prototypes ont été testés au CNPE de Chinon dans des conditions réelles d'utilisation. Ces essais nous ont permis de déterminer les limites de détection atteignables par nos prototypes dans les conditions radiologiques dégradées régnant en zone réglementée. Le design retenu nous a permis de constater une quasi-transparence de nos prototypes à des fluctuations rapides et importantes de DED. Enfin, des activités minimales détectables (AMD) de l'ordre de 1 Bq/cm<sup>2</sup> dans un DED de 1  $\mu\text{Sv/h}$  et de 4 Bq/cm<sup>2</sup> dans un DED de 30  $\mu\text{Sv/h}$  peuvent être atteintes pour des temps de mesure inférieurs à 2 secondes.

Nous allons maintenant présenter l'évolution du prototype de laboratoire vers un appareil industrialisable ainsi que ses différentes déclinaisons possibles.



# Chapitre 6

## Discussion et Perspectives

### Sommaire

---

<b>6.1 Les prochaines étapes vers un prototype industriel . . . . .</b>	<b>194</b>
6.1.1 Dimensionnement de l'électronique nécessaire . . . . .	195
6.1.2 Réalisation d'un algorithme de mesure dédié . . . . .	197
6.1.3 Réalisation de simulations optiques sous GEANT4 . . . . .	199
<b>6.2 Evolutions et adaptations possibles aux différents besoins . . . . .</b>	<b>200</b>

---

*Les essais menés en CNPE nous ont montré que les spécifications fixées au début de notre étude avaient été atteintes et même dépassées. La limite de détection (LD) de  $4 \text{ Bq/cm}^2$  est respectée dans des ambiances  $\gamma$  très élevées c'est à dire de l'ordre de  $80\text{-}100 \mu\text{Sv/h}$ . Compte tenu de ces résultats, notre partenaire EDF nous a demandé de réfléchir sur plusieurs points. Le premier concerne la production d'ici la fin de l'année 2016 d'un prototype complètement autonome. Le deuxième est plus ambitieux puisqu'il traite des limites de détection obtenues. EDF nous demande d'envisager des améliorations susceptibles de repousser encore plus loin les limites de notre prototype. L'objectif serait de se rapprocher le plus possible d'une LD de  $0,4 \text{ Bq/cm}^2$  dans une ambiance  $\gamma$  de l'ordre de  $35 \mu\text{Sv/h}$ .*

*Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes qui nous séparent d'un prototype industriel. Nous décrirons, notamment, les points d'amélioration retenus et à mettre en place prochainement. Enfin, nous listerons les évolutions et adaptations possibles de notre étude par rapport à divers besoins existants au sein des CNPE et dans le domaine du démantèlement.*

### 6.1 Les prochaines étapes vers un prototype industriel

La prochaine étape de notre étude sera la réalisation d'un prototype de contaminamètre complètement autonome. Cette dernière devrait intervenir d'ici la fin de l'année 2016. Cette étape suppose que nous soyons capable de nous affranchir de l'utilisation d'une batterie externe, d'une carte d'acquisition externe et d'un PC portable. Le contaminamètre devra donc embarquer sa batterie ainsi qu'une carte électronique permettant de discriminer des signaux et de traiter ces informations à l'aide d'un algorithme.

Pour obtenir de meilleurs résultats, l'algorithme utilisé devra être programmé et testé dans toutes les configurations possibles. Toutes les mesures effectuées au cours de nos 4 sessions d'essais

au CNPE de Chinon ont été sauvegardées et pourront être utilisées lors de la mise au point de ce dernier. L'utilisation de données mesurées sur le terrain sera un avantage indéniable.

Une fois terminé, ce prototype complètement autonome pourra être testé par des intervenants en CNPE. La remontée des informations nous permettra d'améliorer notre logiciel, de garantir des mesures toujours plus fiables et de meilleures limites de détections.

Pour la réalisation de l'appareil final, plusieurs pistes sont encore envisagées à propos de l'optimisation du guide de lumière. Pour ce faire, nous implémenterons dans GEANT4 un module supplémentaire qui permettra de tenir compte de la propagation de la lumière dans les modules optiques de notre détecteur. De plus, nous souhaiterions simuler l'utilisation de fibre optique shiftuse à la place du GdL "fish tail".

### 6.1.1 Dimensionnement de l'électronique nécessaire

Un des principaux défis pour passer à l'étape d'un prototype autonome sera de changer notre système d'acquisition afin de passer de la carte Wave Catcher à une carte électronique embarquée dans l'appareil. Le Wave Catcher utilisé jusqu'ici est assimilable à un oscilloscope. Sa bande passante, extrêmement élevée de 500MHz/3,2GS/s, lui permet d'être sensible à des fronts de montée très abrupts.

D'un point de vue technique nous n'avons pas besoin des fonctionnalités avancées d'un tel système. De plus, et d'un point de vue économique, nous ne pouvons pas nous permettre d'embarquer une carte aussi "luxueuse" sur chaque détecteur. Un gain d'un facteur 10 environ sur son coût devra être effectué.

Le conditionnement du signal d'entrée sera une étape cruciale. Par exemple, les signaux mesurés sur les voies de sortie du prototype v2.2 ont une amplitude moyenne de -200 mV, les temps de montée des signaux sont de l'ordre de quelques nanosecondes (typiquement 5 nanosecondes) et la durée moyenne d'un signal est de l'ordre de la vingtaine de nanosecondes. Afin de mieux quantifier les caractéristiques de nos signaux de sortie, nous avons numérisé 1000 événements à l'aide du Wave Catcher avec un échantillonnage toutes les 500 ps. Les résultats sont disponibles figure 6.1. Le temps de montée est le temps nécessaire à un signal d'amplitude  $A_0$  pour passer de  $0,1A_0$  à  $0,9A_0$ . Le temps de descente est le temps nécessaire pour passer de  $0,9A_0$  à  $0,1A_0$ . Enfin, le temps FWHM est le temps pendant lequel l'amplitude du signal est supérieure à  $0,5A_0$ .

La numérisation des signaux nous confirme que ces derniers sont très rapides et que nous devons adapter l'électronique de notre carte d'acquisition interne afin de ne pas dégrader le signal d'entrée.

L'amplitude des signaux détectés sont de l'ordre de -200 mV, à ce niveau il n'y a pas de problème de discrimination mais lorsque le prototype sera autonome, il faudra veiller à ce que les perturbations extérieures (par exemple toutes les problématiques traitées par la CEM : 50 Hz, sensibilité aux champs électromagnétiques,...) ne viennent pas polluer les taux de comptage observés. Il faudra également prévoir un filtrage efficace et minimiser la longueur des câbles entre les ponts diviseurs des PM et la carte électronique.

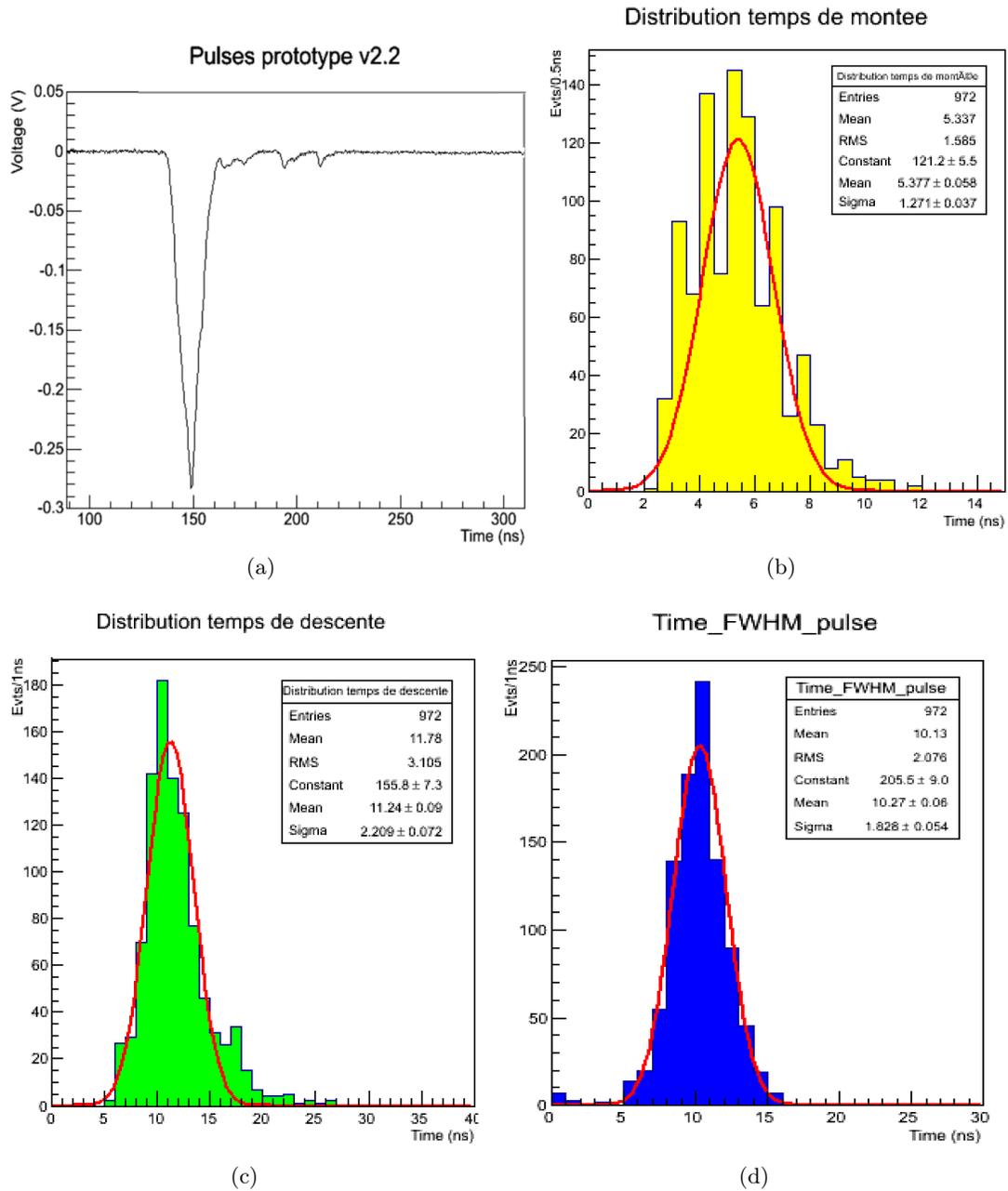


FIGURE 6.1: Exemple de signal mesuré en sortie de PM (a). Distributions des temps de montée des signaux (b), des temps de descente (c) et le temps FWHM (d).

La conception de la carte électronique devra également tenir compte de plusieurs contraintes dictées par le caractère industriel de l'appareil à produire :

- l'encombrement de la carte devra être compatible avec l'espace disponible à l'intérieur du boîtier de l'appareil. La carte devra donc être conçue de manière à être la plus compacte possible. Elle devra nous laisser un maximum de liberté pour travailler sur l'ergonomie de l'appareil industriel,
- la conception de la carte devra tenir compte des contraintes d'autonomie. Les types de batterie couramment utilisés sur les appareils portatifs ont des capacités de l'ordre de 2500 mAh et délivre une tension de 3,7 V. EDF souhaite disposer de plusieurs jours d'autonomie sur l'appareil en mesure. Si nous visons une autonomie de 3 jours, la carte électronique devra donc avoir une consommation totale inférieure à 25-30 mA.

Le compromis performance/autonomie sera certainement une étape complexe du passage vers un prototype industriel. La tâche sera d'autant plus difficile qu'en plus de la carte électronique, des deux ponts diviseurs de tensions, l'appareil final devra aussi intégrer à minima : un écran LCD, des LED (pour le fonctionnement général mais aussi l'IHM<sup>1</sup>), des capteurs de distances et de vitesse de balayage et un buzzer.

### 6.1.2 Réalisation d'un algorithme de mesure dédié

Les résultats obtenus au cours de nos essais en centrale nucléaire étaient issus de mesures brutes à la seconde. Ces dernières ne nous ont pas permis de travailler sur la réponse temporelle des prototypes. Ce travail est extrêmement important car une mesure de contamination surfacique réalisée trop vite se révélera inutile.

Une des exigences retenue au début de la présente étude était une réponse rapide (inférieure à 2-3 secondes typiquement). Les tableaux de résultats présentés en conclusion du chapitre 5 montrent que nos objectifs ont été atteints. Toutefois, l'ajout d'un algorithme de mesure nous permettra de gagner en stabilité de mesure (via des moyennes glissantes par exemple) et nous permettra de diminuer les LD et AMD annoncées. Par contre, un des points faibles d'un algorithme stabilisateur est qu'il sera moins réactif aux variations. Or, EDF nous demande de trouver un compromis entre ces deux demandes : avoir une mesure stable et fiable et avoir un appareil réactif.

Carmelec possède déjà des compétences en développement d'algorithme puisque ses appareils de mesure de débit d'équivalent de dose en possèdent tous un. Nous pouvons observer sur la figure 6.2 deux comportements différents d'algorithmes, déjà développés et implémentés sur des radiamètres par la société Carmelec. Le premier algorithme (a) est plus réactif alors que le deuxième est plus stable (b).

Enfin, l'algorithme devra également être conçu pour rendre l'appareil "intelligent" et détecter les cas particuliers où la réalisation de mesure n'est pas possible (DED trop élevé, vitesse de passage trop rapide, distance surface/détecteur trop grande,...). Le détecteur devra calculer en temps réel son SD, sa LD et son AMD et vérifier que le seuil demandé par l'intervenant est compatible avec les conditions de mesure. Si ce n'est pas le cas, l'appareil devra indiquer à l'intervenant la cause du problème.

---

1. IHM : Interface homme-machine

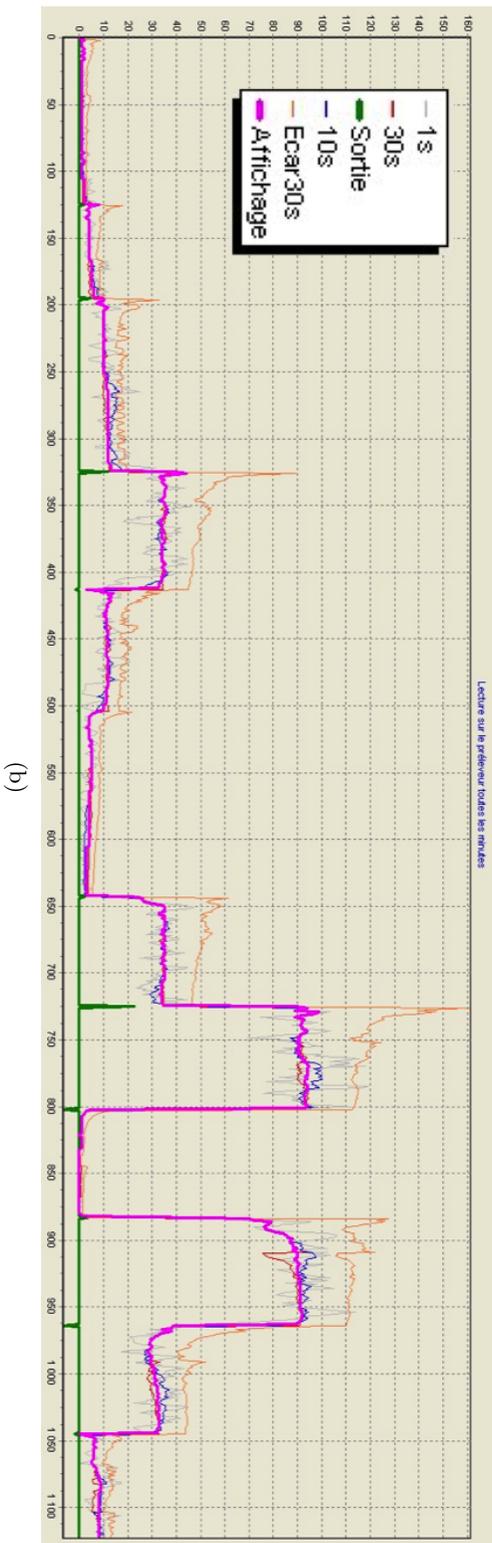
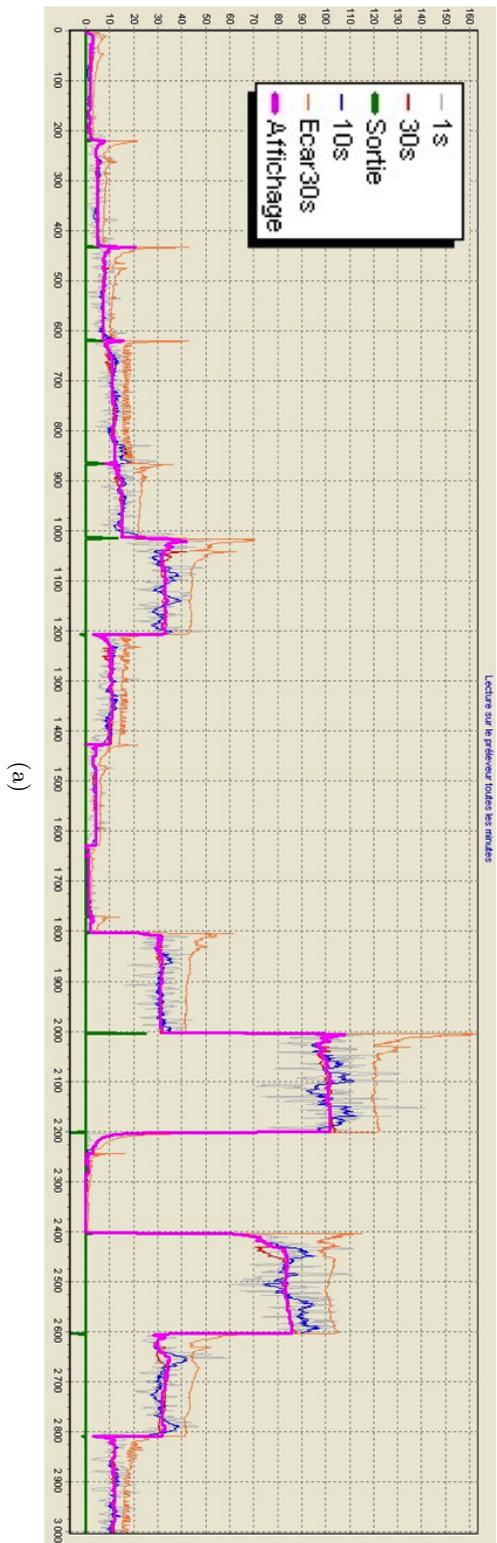


FIGURE 6.2: Exemples de différents algorithmes de traitement. Le premier (a) est plus réactif et le deuxième (b) est plus stable. La valeur affichée ainsi que différentes moyennes glissantes sont également représentées.

L'interface homme machine (IHM) qui utilisera les informations issues de l'algorithme sera d'autant plus simple que l'algorithme prendra en compte un nombre important de paramètres.

### 6.1.3 Réalisation de simulations optiques sous GEANT4

Les prototypes v2.1 et v2.2 nous ont permis d'obtenir des résultats intéressants. Toutefois, au-delà de la performance de mesure, l'appareil doit également respecter les exigences liées à l'ergonomie. Par exemple, à l'heure actuelle, le prototype v2.2, qui est le plus prometteur, pèse un peu plus de 2kg. Ce poids n'est pas compatible avec celui d'un appareil de chantier.

La prochaine étape de notre étude sera donc de redimensionner les guides de lumière afin de les rendre moins volumineux et donc moins lourds. Encore une fois, nous allons devoir affiner nos choix afin de trouver le bon compromis entre ergonomie et résultats physiques. Plusieurs options sont en cours d'étude, parmi lesquelles :

- l'utilisation d'un guide de lumière plus fin, de 5 mm d'épaisseur par exemple,
- l'utilisation de fibres optiques shifteuses en lieu et place du fish-tail pour guider la lumière du scintillateur vers le photomultiplicateur.

Le grand avantage de la fibre optique est qu'elle nous permettrait d'utiliser un PM plus petit, par exemple de 1 pouce de diamètre. Nos prochains essais porteront sur la réalisation d'un guide de lumière composé d'une plaque en PMMA de 10 mm d'épaisseur, de 4 fibres optiques shifteuses de type BCF91A et d'un PM ET Enterprises 9111 SB.

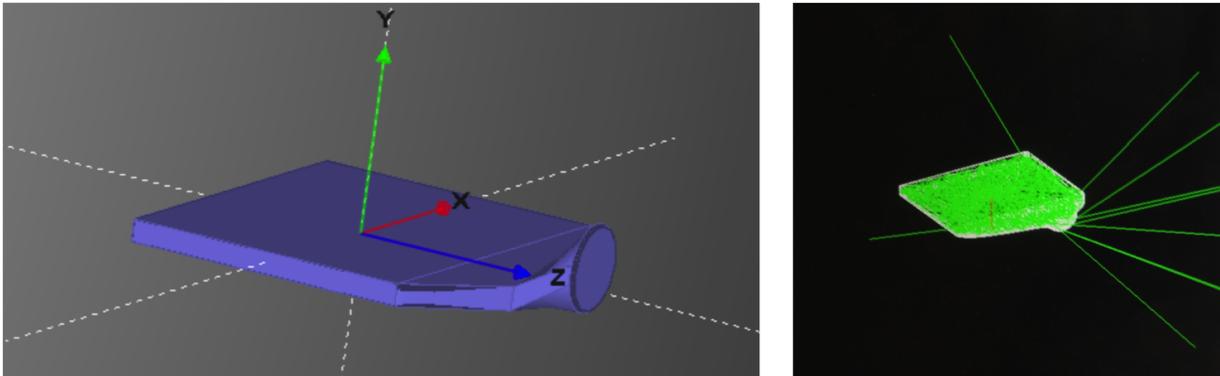


FIGURE 6.3: Présentation d'un guide de lumière défini en GDML et issu des plans mécaniques (STEP) à gauche. Visualisation d'une simulation optique intégrant le parcours des photons lumineux (à droite).

Dans le cadre de cette étude, il est également prévu d'intégrer les parties création et propagation de la lumière à notre simulation GEANT4. Ce type de simulation est déjà utilisé par le groupe "Neutrino/Faibles Radioactivités" du CENBG. Cette évolution de notre simulation GEANT4 pourra également être complétée par l'ajout des volumes réellement utilisés lors de nos essais. En effet, la société TRAD commercialise le logiciel FASTRAD qui permet de transformer un plan mécanique au format STEP en volume défini en GDML. Un exemple de résultat obtenu avec ce programme est présenté figure 6.3. Cette figure comprend aussi une première visualisation de notre simulation GEANT4 avec l'implémentation de ces deux nouveaux outils.

## 6.2 Evolutions et adaptations possibles aux différents besoins

Le contaminamètre développé au cours de cette étude avait pour but de remplacer les sondes SBM2D utilisées en sortie de chantier et en sortie de zone. L'objectif principal est de pouvoir mesurer une contamination  $\beta$  inférieure à  $4 \text{ Bq/cm}^2$  dans une ambiance  $\gamma$  élevée et fluctuante de l'ordre de  $30 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ . Cette spécification n'est atteinte par aucun appareil disponible actuellement sur le marché.

Nous avons démontré que cette limite de détection est envisageable en moins de 2 secondes pour des débits d'équivalent de dose de l'ordre de  $40 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ . Cette avancée majeure en matière de détection permettra, à condition d'être retenue lors d'un futur appel d'offres, aux intervenants en zones contrôlées de mieux contrôler la dissémination de contamination lors de chantiers.

Au début de notre étude nous nous sommes basés sur l'utilisation de la sonde SBM2D sur les chantiers et, notamment, sur ses principales utilisations qui sont : le contrôle surfacique, le contrôle lors d'un saut de zone ou bien le contrôle de frottis/chiffonnettes. Mais au-delà du remplacement de la sonde SBM2D qui est toujours utilisée sur site, notre étude a permis de mettre au jour une multitude de besoins liés à la mesure de contamination surfacique. Ces besoins ont peut-être trouvé une réponse avec notre étude et plusieurs adaptations du concept développé sont d'ores et déjà envisagées. Parmi ces besoins, le mesureur de frottis (mesure indirecte) et la mesure grande surface (mesure directe) émergent de nos investigations.

### Contaminamètre de chantier

Le contaminamètre de chantier est la principale cible de l'étude que nous venons de présenter. Ce dernier se présente sous deux formes : soit mono-bloc et autonome (Dolphy  $\beta$  ou MiniTrace  $\beta$ ), soit en deux-blocs (sonde SBM2D connectée à l'afficheur/ictomètre MIP 10). Dans ce dernier cas, la sonde n'est évidemment pas autonome. Les deux types d'appareils sont illustrés par la figure 6.4.

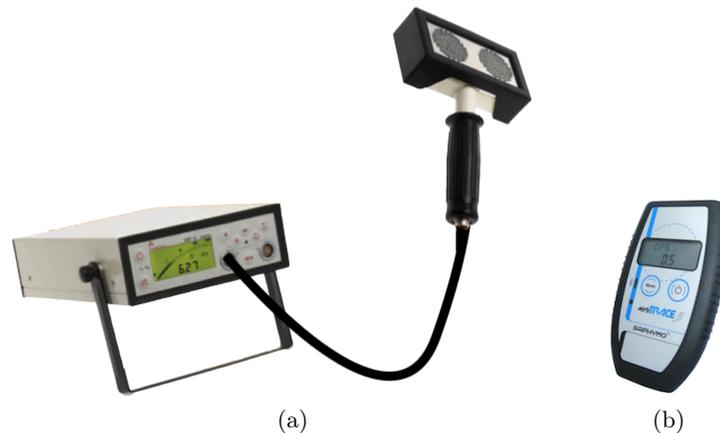


FIGURE 6.4: Illustrations d'un appareil en deux-blocs : MIP 10 et de sa sonde SBM2D (a) et d'un appareil monobloc : le MiniTrace  $\beta$  (dim.  $84 \text{ mm} \times 29 \text{ mm} \times 139 \text{ mm}$ ) (b).

L'appareil que nous allons concevoir aura donc deux utilisations possibles. Il sera utilisé, comme

la sonde SBM2D, couplé à un ictomètre, mais il pourra également être utilisé de façon autonome. Les utilisations différeront suivant le type de besoin et deux modes de fonctionnement devront être programmés. Un premier mode, pour les utilisateurs non initiés, où l'appareil donnera une indication simple : contaminé ou non-contaminé. Le deuxième mode sera plus complet et donnera à l'utilisateur (a priori à destination du service SPR<sup>2</sup>) une mesure de contamination, le calcul en temps réel de la limite de détection, la présence d'un bruit de fond fluctuant ainsi que toutes les informations relatives à la mesure (surface à mesurer trop éloignée, vitesse de balayage trop rapide, bruit de fond  $\gamma$  trop important,...).

### Mesure indirecte de frottis et chiffonnettes

Un appareil uniquement dédié à la mesure de frottis pourra trouver son utilisation à l'issue de cette étude. Les frottis ont une surface définie de 44 mm de diamètre et l'adaptation d'un appareil de 50 mm de diamètre actif peut donc être suffisante.



FIGURE 6.5: Prototype de mesureur de frottis BT-45 (en noir).

La diminution de la surface active du détecteur, baptisé BT-45 frottis, permet de diminuer d'un facteur 5 notre sensibilité au bruit de fond  $\gamma$ . La figure 6.5 montre le prototype réalisé et testé au sein de la société Carmelec. Les résultats obtenus avec ce prototype sont prometteurs et laissent penser que cet appareil pourra être commercialisé dans un avenir relativement proche.

2. SPR : service de prévention des risques

La sensibilité aux rayonnements  $\gamma$  du prototype BT-45 a été testée dans l'irradiateur ( $^{137}\text{Cs}$ ) de la société Carmelec. Les mesures de rendements au cobalt 60 ont été effectuées avec la source que nous avons utilisée précédemment dans l'étude du contaminamètre. Plusieurs seuils de discrimination ont été testés et il s'avère qu'un seuil compris entre 300 et 400 mV garanti un rapport signal/bruit optimal. Pour un seuil à 300 mV, la sensibilité du BT-45 aux rayonnements  $\gamma$  en irradiateur est de 1,67 c/s/ $\mu\text{Sv/h}$  et le rendement au cobalt 60 est de 13 % environ.

### Mesure directe de grandes surfaces

La présente étude est également susceptible d'intéresser EDF dans le cadre de la mesure de contamination sur de grandes surfaces. En effet, la réalisation de cartographie peut être très chronophage et l'idée d'adapter notre concept à un détecteur grande surface semble être intéressante.

Plusieurs solutions s'offrent à nous, soit nous développons un appareil muni d'une grande surface de détection (supérieure ou égale à 300 cm<sup>2</sup>), soit nous travaillons sur un concept permettant de combiner plusieurs détecteurs de 100 cm<sup>2</sup>. C'est cette deuxième solution que nous privilégions pour plusieurs raisons :

- nous avons constaté lors de notre étude qu'il est difficile de concevoir un appareil muni d'une grande surface de détection tout en conservant une homogénéité de l'ordre de +/- 15 % sur toute sa surface,
- l'utilisation de plusieurs appareils de 100 cm<sup>2</sup> à plusieurs avantages comme la possibilité de développer un algorithme utilisant tous les appareils afin de mieux connaître le bruit de fond  $\gamma$  ambiant. Enfin, l'utilisation de plusieurs appareils indépendants permet également de donner des informations sur la position de la contamination.
- l'utilisation de plusieurs appareils de 100 cm<sup>2</sup> permettrait à EDF de ne pas avoir plusieurs familles d'appareils différentes (100 cm<sup>2</sup>, 300 cm<sup>2</sup>, ...) et donc de minimiser les coûts (matériels, formations, ...),
- l'utilisation de plusieurs sondes identiques nous permet de garder la même sensibilité qu'avec un appareil seul mais sur une surface bien plus grande (si 3 appareils sont combinés, les résultats obtenus dans notre étude seront directement transposables sur 300 cm<sup>2</sup>).

Ce type d'appareil pourrait être utilisé pour les mesures de grandes surfaces tels que les sols, les murs ou les voiries.

Sur les trois utilisations citées ci-dessus, le contaminamètre de chantier fera l'objet d'un CCTP<sup>3</sup> de la part d'EDF d'ici 2017. Les deux autres utilisations possibles concernent le mesureur de frotis qui pourra être une bonne alternative aux appareils actuels (par exemple dans le domaine du démantèlement). La réalisation de mesures directes sur de grandes surfaces via l'utilisation de plusieurs contaminamètres de chantier est une solution très intéressante, mais elle dépend du résultat de l'appel d'offres sur les contaminamètres de chantier qui aura lieu en 2017.

Concernant le contaminamètre de chantier qui est le sujet principal de notre étude, un prototype autonome fonctionnel doit être réalisé pour la fin de l'année 2016. Ce dernier intégrera sa propre carte électronique et l'algorithme de traitement des données qui sont en cours de réalisation. Ensuite, l'appel d'offre devant être lancé par EDF d'ici début 2017, nous aurons entre 6 et 8 mois pour

---

3. CCTP : Cahier des clauses techniques particulières (cahier des charges)

parvenir à un appareil de pré-série. Cet appareil devra intégrer toutes les exigences d'EDF : mesures, ergonomie et utilisabilité. Il devra être assez abouti pour pouvoir être mis en production avant la fin de l'année 2017 (ou au plus tard début de l'année 2018).

# Conclusion

Le travail présenté portait sur la réalisation d'un contaminamètre  $\beta$  permettant de détecter des contaminations surfaciques comprises entre 0,4 et 4 Bq/cm<sup>2</sup> dans des ambiances  $\gamma$  importantes et fluctuantes de plusieurs dizaines de  $\mu$ Sv/h. Nous avons développé un concept permettant aux intervenants en zone réglementée de réaliser des mesures de contamination fiables et répétables dans des conditions radiologiques dégradées. La réalisation de telles mesures est un enjeu important pour EDF car il en va de la propreté radiologique de ses installations.

Au chapitre 1, nous avons présenté les principaux concepts de radioprotection, décrit les enjeux et mis au jour les besoins dans le domaine de la mesure de contamination surfacique. Au chapitre 2, nous avons réalisé un état de l'art complet afin de connaître les points faibles et les points forts des solutions actuellement disponibles sur le marché. L'état de l'art réalisé nous a ensuite permis de déterminer qu'aucun appareil actuellement disponible sur le marché ne s'approchait d'une telle capacité de mesure.

L'étude préliminaire et les simulations nous ont permis de cibler une technologie prometteuse : l'utilisation d'un scintillateur plastique fin couplé à un photomultiplicateur via un guide de lumière en PMMA. Cette technologie n'étant pas suffisamment performante pour obtenir les niveaux de limite de détection souhaités, notamment en ce qui concerne les fluctuations de bruit de fond, nous avons donc opté pour l'utilisation de deux modules optiques : un pour la mesure de contamination et un autre pour le suivi et la compensation du bruit de fond  $\gamma$ .

Avant de réaliser un prototype complet de contaminamètre, nous avons conçu un premier module optique de test. Ce dernier avait pour objectif de lever les deux principaux verrous technologiques : le scintillateur fin produit-il assez de lumière pour être utilisé dans cette étude et l'ajout d'un guide de lumière en PMMA est-il compatible avec notre montage ? La réalisation du prototype de module v0 nous a permis de lever ces verrous technologiques et nous a autorisé à poursuivre notre étude et concevoir un prototype de contaminamètre intégral.

Trois générations de contaminamètre ont été réalisées. Ces prototypes ont été conçus, assemblés, réglés et testés au CENBG et dans l'irradiateur de la société Carmelec. Les essais de rendement, d'homogénéité de réponse surfacique ainsi que de réponse angulaire au bruit de fond  $\gamma$  étaient des pré-requis avant de tester ces prototypes en centrale nucléaire. Des rendements tout à fait satisfaisants au <sup>60</sup>Co, de l'ordre de 25 %, et une homogénéité de réponse surfacique de +/- 7 % (pour le prototype v2.1) et +/-11 % (pour le prototype v2.2) ont été mesurés à ce rendement. La sensibilité à la directionnalité du flux  $\gamma$  (irradiateur <sup>137</sup>Cs) a été notée à un maximum de +/- 420 Bq pour le prototype v2.1 et de +/- 480 Bq pour le prototype v2.2. Ces niveaux d'activité correspondent à l'inhomogénéité entre nos deux modules optiques (différence des taux de comptage) pondérée par le rendement au <sup>60</sup>Co. Ces essais nous ont permis de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu

dans la transmission et la collection de lumière. Enfin, les prototypes ont été testés au CNPE de Chinon dans des conditions réelles d'utilisation. Ces essais nous ont permis de déterminer les limites de détection atteignables par nos prototypes dans les conditions radiologiques dégradées régnant en zone réglementée. Comme attendu, le design retenu pour nos prototypes nous permet d'avoir des mesures quasi-transparentes à des fluctuations rapides et importantes de DED. Enfin, des activités minimales détectables (AMD) de l'ordre de  $1 \text{ Bq/cm}^2$  dans un DED de  $1 \mu\text{Sv/h}$  et  $4 \text{ Bq/cm}^2$  dans un DED de  $35 \mu\text{Sv/h}$  peuvent être atteintes pour des temps de mesure inférieurs à 2 secondes.

Les résultats obtenus attestent la validité du concept que nous avons choisi d'étudier. Les objectifs que nous nous étions fixés au début de ce projet ont été atteints. Le travail qui doit maintenant être réalisé est d'une autre nature car il va falloir améliorer le design du détecteur afin que son ergonomie soit conforme à une utilisation de type "chantier". L'appareil devra également s'adapter au type d'intervenant utilisateur et passera donc par la réalisation d'un algorithme de mesure "intelligent" capable de prendre en compte toutes les conditions d'utilisation de l'appareil.

En définitive, notre étude apporte une solution réelle et viable à EDF pour atteindre un de ses principaux objectifs : le confinement de la contamination au plus près des chantiers. Cette problématique est d'autant plus importante que les travaux de maintenance au sein des CNPE vont s'intensifier. Le report de la durée d'utilisation des centrales nucléaires au delà de 40 ans et la mise en place d'un grand plan de modernisation de ses installations (grand carénage) lancé par EDF en est à l'origine.

La brique technologique que nous avons mise au point pourra également être utilisée pour d'autres applications comme la mesure de frottis, la mesure de grande surface ou même une intégration dans des portiques de détection. Les possibilités sont multiples mais passent tout d'abord par la réalisation du contaminamètre de chantier qui fera l'objet d'un appel d'offres de la part d'EDF d'ici 2017.

# Bibliographie

- [1] Ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer. Les réacteurs à eau pressurisée. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-reacteurs-a-eau-pressurisee.html>. Mis à jour le : 02/03/2016.
- [2] Electricité de France (EDF). Information sur l'origine de l'électricité fournie par EDF. <https://www.edf.fr/groupe-edf/information-sur-l-origine-de-l-electricite-fournie-par-edf>. Vu le : 17/08/2016.
- [3] Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Poursuite de fonctionnement au-delà de 40 ans des centrales nucléaires. <http://www.asn.fr/Controler/Actualites-du-controle/Reexamens-periodiques-et-poursuite-de-fonctionnement/Poursuite-de-fonctionnement-au-dela-de-40-ans-des-centrales-nucleaires>.
- [4] Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Chapitre 12 - les centrales nucléaires EDF, Rapport annuel 2015. p.368.
- [5] Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN). 40 ans et au-delà : c'est possible. <http://www.sfen.org/fr/rgn/40-ans-et-au-dela-cest-possible>. Mis à jour le : 03/2016.
- [6] Commission des finances de l'économie générale et du contrôle budgétaire. Rapport d'information sur le coût de la fermeture anticipée de réacteurs nucléaires : l'exemple de Fessenheim. <http://www.assemblee-nationale.fr/14/rap-info/i2233.asp>. Mis à jour le : 09/2014.
- [7] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) - Direction de la Sûreté des Réacteurs. Le réexamen de sûreté des réacteurs à eau sous pression de 900 MWe à l'occasion de leurs troisièmes visites décennales, DSR n° 285 - 2008. p.6.
- [8] Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Le parc français des centrales nucléaires. <http://www.asn.fr/Informer/Dossiers/La-surete-des-centrales-nucleaires/Le-parc-francais-des-centrales-nucleaires>. Mis à jour le : 21/06/2016.
- [9] Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN). Le Fonctionnement D'une Centrale Nucléaire. <http://www.sfen.org/fr/lenergie-nucleaire/le-fonctionnement-dune-centrale-nucleaire>. Vu le : 17-08-2016.
- [10] Electricité de France (EDF). Mémento de la Radioprotection en Exploitation, Edition 2014. p.36.
- [11] National Nuclear Data Center - Brookhaven National Laboratory based on ENSDF and the Nuclear Wallet Cards. Chart of nuclides. <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>. Vu le : 07/09/2016.

- [12] J. Guirlet, J. Rastoin, R. de Tourreil, and R. Virefleau. Compilation de données relatives aux produits de fission. [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/46/058/46058074.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/058/46058074.pdf). 07-1969.
- [13] M. F. James. Energy released in fission. *Journal of nuclear energy*, 23 :529, 1969.
- [14] R. Nave (Georgia State University). Uranium 235 fission example. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/u235chn.html#c2>. Vu le : 07/09/2016.
- [15] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement; 4th ed.* Wiley, New York, NY, 2010. p.45-46, 51, 68, 166, 202, 204-205, 284-285, 394 et 554.
- [16] A. Vivier and G. Lopez. *Calculs de doses générées par les rayonnements ionisants.* Principes et utilitaires. EDP Sciences, 2012.
- [17] Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN). Le Grand Carenage du Parc Nucléaire edf et les Actions Post Fukushima. [http://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/le\\_grand\\_carenage\\_du\\_parc\\_nucleaire\\_d27edf.pdf](http://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/le_grand_carenage_du_parc_nucleaire_d27edf.pdf). Mis à jour le : 01-2014.
- [18] J. Lochard. Les nouvelles recommandations de la cipr : un système de protection cohérent et robuste. In *Septième congrès national de radioprotection SFRP*, Angers, France, 15-18 Juin 2009.
- [19] H. Becquerel. Sur les radiations émises par phosphorescence. *C.R.A.S.*, 122 :420–421, 1896.
- [20] H. Becquerel. Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. *C.R.A.S.*, 122 :501–503, 1896.
- [21] M. Karst and S. Challe. Formation Radioprotection Personnel de Catégorie B Carmelec - rev. 7. Mis à jour le : 07/04/2015.
- [22] E. Chauveau. *Développement de compteurs à scintillation hautes performances et de très basse radioactivité pour le calorimètre du projet SuperNEMO.* PhD thesis, Université Bodeaux I, 2010.
- [23] Jean-Claude Nénot assisté de Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou, and Dominique Thierry. Publication 103 de la CIPR - Recommandations 2007 de la commission internationale de protection radiologique. *IRSN*, 2009.
- [24] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) - Pôle Radioprotection Environnement Déchets et Crise. Guide Pratique - Réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants (version 4). <http://dosimetre.irsn.fr/fr-fr/Documents/Guide%20Etudes%20de%20poste%202015.pdf>. 2015.
- [25] Alain Pin CEA / INSTN / AECO. Des grandeurs de protection aux grandeurs de mesures. [http://www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/05-PIN\\_Alain.pdf](http://www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/05-PIN_Alain.pdf). 24/11/2009.
- [26] C. Jimonet and H. Métivier. *Principes de radioprotection : Réglementation.* EDP Sciences, 17 avenue du Hoggar Parc d'activités de Coutaboef, BP112 91944 Les Ulis cedex A, France, 2007. p.90-91.

## BIBLIOGRAPHIE

- [27] Stéphane Roudeau - Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) UMR5797. Les effets biologiques des rayonnements ionisants. 2011.
- [28] Ministère de l'emploi. Arrêté du 15 mai 2006, modifié, relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000269112>. Version consolidée au 20 août 2016.
- [29] Electricité de France (EDF). Mémento de la Radioprotection en Exploitation, Edition 2014. p.36,38,44,166 et 242.
- [30] R. Tiberghien. Chaîne de puissance azote 16 sur le circuit de réfrigération de Mélusine. *Rapport CEA 2211*, page 15, 1962.
- [31] Laurent Stricker. Histoire de la radioprotection dans l'industrie nucléaire EDF : un exemple d'anticipation, Congrès National de la SFRP - Reims 2015.
- [32] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Les principaux radionucléides rejetés en cas d'accident affectant une centrale nucléaire. [http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/La\\_surete\\_Nucleaire/risque-nucleaire/mesures-radioactivite-crise/Pages/principaux-radionucleides-rejetes-en-cas-accident.aspx](http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque-nucleaire/mesures-radioactivite-crise/Pages/principaux-radionucleides-rejetes-en-cas-accident.aspx). Septembre 2013.
- [33] P. Bérard, M.L. Perrin, A. Desprès, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, and J. Brenot (DPHD). Fiche Radionucléide Cobalt 60. <http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/Documents/sante/Co60SAN.pdf>. Mis à jour le : 01/08/2001.
- [34] LNE-LNHB/CEA. Schéma de décroissance du cobalt 60. [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/Co-60\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Co-60_tables.pdf). 13/01/2006.
- [35] N. Valendru (EDF UNIE GPPE). Référentiel rp thème métrologie - Guide d'application - Mesure et contrôle de la contamination surfacique. Rapport D4550.35-07/2123 du 16/10/2007.
- [36] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Base de connaissances - Quelle est en France la moyenne de la radioactivité de l'air? [http://www.irsn.fr/FR/connaissances/faq/Pages/Quelle\\_est\\_en\\_France\\_la\\_moyenne\\_de\\_la\\_radioactivite\\_de\\_l\\_air.aspx](http://www.irsn.fr/FR/connaissances/faq/Pages/Quelle_est_en_France_la_moyenne_de_la_radioactivite_de_l_air.aspx). Mis à jour le :26-03-2011.
- [37] CEA Marcoule DEN/MAR/DUSP/SPR/LMPS. *Fiches Matériel Portable et Mobile Indice 6*. Mis à jour le : 01/01/2009.
- [38] CEA Marcoule DEN/MAR/DUSP/SPR/LMPS. *Classeur Veille Technologique Indice 2*. Mis à jour le : 01/03/2012.
- [39] LND, INC. Designers And Manufacturers of Nuclear Radiation Detectors. *7312 Pancake Mica Window - Alpha - Beta - Gamma Detector*.
- [40] K. Boudergui, G. D'Urso, E. Gaillard-Lecanu, M. Hamel, S. Jahan, V. Kondrasovs, M. Les-tang, S. Normand, C. Pittance, L. Rocha, M. Trocme, R. Woo, and A. Arnette. Study and development of detection devices for direct contamination measurements under high gamma background irradiation at edf nuclear power plants. In *ISOE European Symposium on Occupational Exposure Management at Nuclear Facilities*, Prague, Czech Republic, 20-22 Juin 2012.

- [41] V. Kondrasovs, S. Normand, K. Boudergui, M. Hamel, C. Pittance, L. Rocha, and M. Trocme. Procédé de traitement de signal issu d'un scintillateur phoswich et detecteur à scintillation associé, nov 2011. Brevet n° FR2983311A1.
- [42] D. H. Wilkinson. The phoswich - a multiple phosphor. *Review of Scientific Instruments*, 23(8) :414–417, 1952.
- [43] K. Boudergui, G. D'Urso, E. Gaillard-Lecanu, M. Hamel, S. Jahan, V. Kondrasovs, M. Lestang, S. Normand, C. Pittance, L. Rocha, M. Trocme, and R. Woo. Innovative plastic scintillator detector for contamination monitor. In *ISOE European Symposium on Occupational Exposure Management at Nuclear Facilities*, Prague, Czech Republic, 20-22 Juin 2012.
- [44] M. Hamel, M. Trocme, C. Pittance, and L. Rocha. Détecteur à scintillation et procédé de fabrication associé, nov 2011. Brevet n° FR2983310A1.
- [45] M. F. L'Annunziata. *Handbook of Radioactivity Analysis*. Elsevier, 2012. p1022.
- [46] J. Elster and H. Geitel. Uber die durch radioactive emanation erregte scintillierende phosphoreszenz der sidot-blende. *Phys. Z.*, 4 :439–440, 1903.
- [47] W. Crookes. Certain properties of the emanations of radium. *Chem. News*, 87 :241, 1903.
- [48] Christian Bourgeois. *Interactions particules matière - Detecteurs*. Techniques de l'ingénieur, 1998.
- [49] A. Lyoussi. *Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire*. Génie atomique. EDP Sciences, 2012.
- [50] Thierry Pochet. *Détecteurs nucléaires - Différentes classes de détecteurs*. Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [51] LND, INC. Designers And Manufacturers of Nuclear Radiation Detectors. *Pancake Style Mica Windows Tube*.
- [52] Canberra Industries Inc. *GM Pancake Detectors*.
- [53] Thierry Pochet. *Détecteurs nucléaires - Principes physiques de fonctionnement*. Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [54] P. Lecoq (CERN). Principles and applications of scintillators. In *Scintillating Screen Applications in Beam Diagnostics, GSI*, 14-15 Feb. 2011.
- [55] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments : A how-to approach ; 2nd ed*. Springer, Berlin, 1994. p 54-58, 161-162, 175 et 202-204.
- [56] S. Tavernier. *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p 169-171, 176 et 179.
- [57] Super-Kamiokande collaboration. Super-Kamiokande detector structure. <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/index-e.html>.

## BIBLIOGRAPHIE

- [58] Jiangmen Underground Neutrino Observatory. Key Components Ordered for JUNO Experiment. [http://english.ihep.cas.cn/rs/fs/juno0815/PPjuno/201601/t20160105\\_158468.html](http://english.ihep.cas.cn/rs/fs/juno0815/PPjuno/201601/t20160105_158468.html). Mis à jour le :05-01-2016.
- [59] J. Von Borany, G. Mende, and B. Schmidt. Ion implanted nuclear radiation detectors passivated with anodic silicon oxide. *Nucl. Instrum. Meth.*, 212(489), 1983.
- [60] I. Ahmad. High sensitivity alpha-particle and electron spectroscopy. *Nucl. Instrum. Meth.*, 242(395), 1986.
- [61] J. Kemmer. Improvement of detector fabrication by the planar process. *Nucl. Instrum. Meth.*, 226(89), 1984.
- [62] International Electrotechnical Commission. IEC 60532 :2002 - radiation protection instrumentation : Alpha, beta and alpha/beta (beta energy > 60 keV) contamination meters and monitors, 2002.
- [63] M. Ammerich (CEA/Inspection générale et nucléaire). Tutoriale - De l'incertitude à la mesure. 7ème journées PCR - SFRP - 9 et 10 décembre 2010.
- [64] NF ISO 7503-1. Évaluation de la contamination de surface - partie 1 : Émetteurs bêta (énergie bêta maximale supérieure à 0,15 mev) et émetteurs alpha, 1988.
- [65] NF ISO 11929. Détermination des limites caractéristiques (seuil de décision, limite de détection et extrémités de l'intervalle de confiance) pour mesurages de rayonnements ionisants : Principes fondamentaux et applications, mai 2010.
- [66] A. Vivier, R. Fottorino, and B. Rousse. Seuil de décision et limite de détection : estimation, interprétation et optimisation. 1re partie : les principes de base. *Radioprotection*, 45(3) :321–343, 2010.
- [67] K. Protassov. *Probabilités et incertitudes dans l'analyse des données expérimentales*. Collection Grenoble sciences. Presses universitaires de Grenoble, 1999.
- [68] N.Valendru (EDF). Référentiel RP thème métrologie Guide d'application - Mesure et contrôle de la contamination surfaciques, 16 octobre 2007. D4550.35-07/2123 indice 0.
- [69] G. Meyer (ASN DTS). La réglementation relative au transport de sources radioactives, 21 juin 2013. Rencontre Interregionale de médecine nucléaire.
- [70] F. Meyer (Canberra). Mesure de contamination beta en fort bruit de fond gamma fluctuant, 3 avril 2014. Journées d'échanges Canberra, Aix-en-Provence.
- [71] Safety Series n° 6. *Notes on Certain Aspects of the Regulations*. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1961.
- [72] Safety Series n° 7. *Regulations for the safe transport of radioactive materials*. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1961.
- [73] Commission Economique pour l'Europe Comité des transports intérieurs. *ADR - Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route*. Nations Unies, New-York et Genève, 2014. ECE/TRANS/242 (Vol.I).

- [74] IAEA. *Radiological aspects of non-fixed contamination of packages and conveyances*. Vienna, juin 2005. IAEA-TECDOC-1449.
- [75] S. Moreau (EDF/DIN) and G. Abela (EDF/DPN). Exigences de conception pour le zonage radiologique et la propreté déchets de l'epr flamanville 3, 17-18 novembre 2009. Journées SFRP, La Hague.
- [76] C. Schieber, P. Crouail, L.-A. Beltrami, and C. Reaud (CEPN). Étude des règles et pratiques en vigueur à l'étranger en matière de délimitation et d'accès aux zones règlementées au titre de la radioprotection, juin 2013. RAPPORT N° 314.
- [77] LNE LNHB/CEA. Table de radionucléides - carbone 14. [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/Nuclides/C-14\\_tables.pdf](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/C-14_tables.pdf). Mis à jour le :12-01-2012.
- [78] C. de la Vaissière, J. Laberrigue-Frolow, Y. Sacquin, G. Audi, J.-C. Dran, F. Perrot, S. Roudeau, F. Lefèvre, J.-C. Angélique, A. Mahbouband C. Cantrel, J.-P. Husson, and F. de Oliveira. Neutrino-électron. <http://www.laradioactivite.com/site/pages/Neutrino.htm>. Mis à jour le :12-06-2016.
- [79] Stéphane Roudeau - Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) UMR5797. Interactions rayonnement matière. 2011.
- [80] A. Lyoussi. *Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire*. Génie atomique. EDP Sciences, 2012. p.19-29.
- [81] NIST Physical Measurement Laboratory. X-ray mass attenuation coefficients. <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>. Mis à jour : 21/09/2016.
- [82] NIST Physical Measurement Laboratory. Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions. <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>. Mis à jour : 21/09/2016.
- [83] J.-C. Moreau and M. Ammerich. *Personne Compétente en Radioprotection - Radioprotection pratique pour l'industrie et la recherche - Sources scellées*. EDP Sciences, 2010. p.90-91.
- [84] J.F. Williamson, J.F. Dempsey, A.S. Kirov, J.I. Monroe, W.R. Binns, and H. Hedtjarn. Plastic scintillator response to low-energy photons. *Physics in Medicine and Biology*, 44(4) :857, 1999.
- [85] ELJEN Technology. General Purpose EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212. <http://www.eljentechnology.com/index.php/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>, 2016.
- [86] C. Amsler et al. (Particle Data Group). 28. particle detectors. *Physics Letters B667*, 1, 2008. p.10-11.
- [87] Saint-Gobain Crystals. Organic scintillation materials. <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/SGC%20Organics%20Brochure.pdf>, 2015.
- [88] L. H. Sperling. *Introduction to Physical Polymer Science*. Hoboken, 2006. p.845.
- [89] W. H. Veazie. Properties of optically transparent adhesives, 1970.

## BIBLIOGRAPHIE

- [90] H. Spieler (LBNL). Introduction to radiation detectors and electronics - iv. scintillation detectors - 3. [http://www-physics.lbl.gov/~spieler/physics\\_198\\_notes\\_1999/PDF/IV-Scintillators-3.pdf](http://www-physics.lbl.gov/~spieler/physics_198_notes_1999/PDF/IV-Scintillators-3.pdf), 2 feb. 1999.
- [91] S.N. Ahmed. *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Elsevier Science, 2007. p.365-366.
- [92] A.I. Kilvington, C.A. Baker, and P. Illinesi. Reflective coverings for scintillation counters. *Nuclear Instruments and Methods*, 80(1) :177 – 178, 1970.
- [93] ET Enterprises. Understanding photomultipliers. <https://my.et-enterprises.com/pdf/Understanding%20Pmts.pdf>, 2011.
- [94] ET Enterprises. 38 mm (1.5") photomultiplier 9102B series data sheet. <https://my.et-enterprises.com/>, 2015.
- [95] RTC La radiotechnique Compelec. *Photomultiplicateurs*. RTC, 130 avenue Ledru Rollin 75540 Paris cedex 11, 1981. p. 72-73.
- [96] ET Enterprises. Photomultiplier HV base HV38K20CP series data sheet. <https://my.et-enterprises.com/>, 2015.
- [97] ET Enterprises. Voltage divider design. [http://www.et-enterprises.com/files/file/technical-information/rp069\\_voltage%20divider%20design.pdf](http://www.et-enterprises.com/files/file/technical-information/rp069_voltage%20divider%20design.pdf), 2011.
- [98] S. Agostinelli et al. GEANT4 : A simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth.*, A506 :250–303, 2003.
- [99] GEANT4 Collaboration. Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/geant4/>, 11/2016.
- [100] Valérie Chazel and Élie Tournalias (IRSN/DRPH/SRBE/LRTOX). Spectrométrie gamma sur échantillons du 15/10 27/10 et 04/10 - comptage des échantillons des journées du 30/09, 04/10, 06/10, 7/10, 14/10, 16/10 et 25/10. Présentation CNPE Tricastin 19/07/2015.
- [101] Laboratoire National Henry Becquerel (LNHB). Recommended data. <http://www.nucleide.org/toc.htm>, 2016.
- [102] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRP Publication 74*, 1996.
- [103] D. Paul (Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires / CEA Cadarache. De la dose au dosimètre. [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/048/33048122.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/048/33048122.pdf).
- [104] D. Breton and E. Delagnes. Fast analog sampler with great memory depth, 2005. US Patent 6.859.375.
- [105] C. Marquet, C. Cerna, E. Chauveau, H. Chiron, G. Claverie, L. Daudin, F. Delalee, A. Huber, C. Hugon, S. Leblanc, S. List, G. Lutter, I. Moreau, F. Perrot, F. Piquemal, A. Rebi, J.-S. Ricol, and A. Tizon. High energy resolution electron beam spectrometer in the mev range. *Journal of Instrumentation*, 10(09) :P09008, 2015.

- [106] LEA-CERCA. *Chapitre 5 - Catalogue spectrométrie*.
- [107] P Limkitjaroenporrn, J Kaewkhao, P Limsuwan, and W Chewpraditkul. Nonproportionality of electron response using cct : Plastic scintillator. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(9) :1780–1784, 2010.
- [108] Site internet EDF . Présentation de la centrale nucléaire de Chinon. <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-nucleaire-de-chinon/presentation>. 2016.
- [109] D. Breton, E. Delagnes, J. Maalmi, and Pascal Rusquart. The wavecatcher family of sca-based 12-bit 3.2-gs/s fast digitizers. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7097545/?reload=true&arnumber=7097545>. 2014.
- [110] Ministère du travail de la solidarité et de la fonction publique. Arrêté du 21 mai 2010 portant homologation de la décision n° 2010-dc-0175 de l’Autorité de sûreté nucléaire du 4 février 2010 précisant les modalités techniques et les périodicités des contrôles prévus aux articles R. 4452-12 et R. 4452-13 du code du travail ainsi qu’aux articles R. 1333-7 et R. 1333-95 du code de la santé publique. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022700536&fastPos=50&fastReqId=452858116&categorieLien=cid&oldAction=rechTexte>. Version consolidée au 19 octobre 2016.
- [111] N. Valendru (EDF UNIE GPRE). Référentiel rp thème métrologie - Guide d’application - Mesure et contrôle de la contamination surfacique. Rapport D4550.35-07/2123 du 16/10/2007, p.33.
- [112] M. Karst and C. Cerna. CR - Simulations GEANT4 comportement dans les MO - v1, 2015. Rapport interne CARMELEC/CENBG.
- [113] T. Foehrenbacher and D. Oster (IPHC Strasbourg). Rapport d’intervention n° R04-2015, 2015. Raccordement irradiateur Césium 137.

**Titre :** Mesure et discrimination de rayonnements bêta et gamma dans une ambiance gamma élevée et fluctuante - Conception, développement et caractérisation d'un contaminamètre haute sensibilité

**Résumé :** Dans le cadre des activités de maintenance des centrales nucléaires, les personnes intervenant sur des chantiers en zone contrôlée doivent effectuer des mesures de contamination surfacique sur leurs outils, gants, surtenuie de travail et sur les parties de leur corps susceptible d'être contaminées (cou et tête par exemple). Or, les mesures de contamination surfacique bêta ne peuvent pas toujours être réalisées au plus près des chantiers. Le bruit de fond gamma présent à ces endroits étant élevé et fluctuant, ce dernier perturbe les appareils utilisés habituellement pour la mesure de contamination surfacique.

L'objectif principal de ce travail était de concevoir un appareil de mesure adapté à la détection de contamination surfacique bêta de quelques Bq/cm<sup>2</sup> (typiquement < 4 Bq/cm<sup>2</sup>), dans une ambiance gamma de quelques dizaines de µSv/h (typiquement < 100 µSv/h) et fluctuante (typiquement de l'ordre de 30% en 1 seconde).

**Mots-clés :** scintillateur plastique fin, photomultiplicateur, guide de lumière, seuil de décision, limite de détection, activité minimale détectable, bruit de fond fluctuant, contamination surfacique, CNPE

**Title :** Measurement and discrimination of beta and gamma radiations in a high and fluctuating gamma environment - Design, development and characterization of a high sensitivity contamination meter

**Abstract :** In the framework of the nuclear power plants maintenance, the onsite workers in controlled areas must performed some surface contamination controls of their tools, gloves, working suits and over their body parts which may be contaminated (neck and head for instance). However, surface beta contamination measurements can't always been done as close as possible of the working location. The onsite ambient gamma background, being high and fluctuating, may disturb the radiation protection devices commonly used for surface contamination measurements.

The main goal of this work was to conceive a radiation protection device adapted to the beta surface contamination of about a few Bq/cm<sup>2</sup> (< 4Bq/cm<sup>2</sup> typicaly) in a fluctuating (typically 30% variation per second) ambient gamma background of a few µSv/h (typicaly <100 µSv/h).

**Keywords :** Thin plastic scintillator, photomultiplier, light guide, decision threshold, detection limit, minimal detectable activity, fluctuating background noise, beta surface contamination, nuclear power plant