

FRANCIS GAGNON-MOISAN

# Optimisation des détecteurs de la matrice HERACLES

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en physique  
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2006

©Francis Gagnon-Moisan, 2006

# Résumé

Ce mémoire de maîtrise présente différents détecteurs de la matrice HERACLES et les tests qui furent effectués afin de l'adapter aux nouvelles conditions expérimentales imposées au centre de recherche TRIUMF. Depuis sa création, l'ensemble de détecteurs qui composent aujourd'hui la matrice HERACLES a subi plusieurs modifications et devra en subir encore afin d'être à la fine pointe de la recherche moderne.

Cet ouvrage est divisé en trois chapitres distincts. Chaque chapitre traite d'une catégorie de détecteurs et des diverses recherches associées. Le premier chapitre traite des détecteurs à neutrons et des corrections à effectuer afin d'améliorer l'efficacité de détection. Le second aborde les modifications sur les détecteurs composés de scintillateurs CsI(Tl). Finalement, le troisième et dernier chapitre porte sur un type de photomultiplicateur à position qui est envisagé dans la composition de la matrice.

Ce travail présente une combinaison de simulations effectuées grâce au logiciel GEANT4 et d'expériences en laboratoire. Les résultats des simulations furent utilisés pour obtenir des corrections à des données d'une expérience et à connaître les meilleures corrections potentielles à tester pour les différents détecteurs.

# Avant-propos

Ce mémoire est l'aboutissement de deux années d'études et de recherches en physique nucléaire, un domaine qui, malgré tous les regards d'incompréhension qu'il génère, est selon moi un des plus captivants. Au cours de ces années j'ai pu me familiariser avec les différents concepts qui gèrent la physique des collisions d'ions lourds. Cette expérience fut autant profitable au plan académique qu'au plan personnel. C'est pourquoi je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire, monsieur René Roy, professeur à l'Université Laval, pour m'avoir introduit dans le groupe de recherche sur les ions lourds de l'Université Laval et avoir su être à la fois un directeur attentionné et une personne fort agréable à côtoyer.

Je crois qu'il serait impensable de passer à côté du support technique que monsieur Claude St-Pierre, professeur émérite à l'Université Laval, a su me procurer durant toute la durée de mes travaux de maîtrise. Sans son aide et ses judicieux conseils, je serais encore à tenter de faire fonctionner mes premières expérimentations. Son expérience fut un atout indéniable tout au long de ces deux années.

Maintenant, j'aimerais remercier mes différents collègues. Sans eux, le travail aurait été une tâche souvent plus ardue. Tout d'abord, je remercie Dany pour son expertise. Ensuite, il y a Frédérick, qui cherche toujours le "bogue" et qui pose toujours les bonnes questions pour vous mettre dans l'embarras. Il reste que sans lui, plusieurs de mes résultats seraient encore incomplets. Il y a aussi Josiane et Alexandre, qui ont été de très bons collaborateurs. Et finalement, Jérôme, qui malgré tout, a su m'apprendre beaucoup au plan technique et personnel.

*À mon père.*

# Table des matières

Résumé	ii
Avant-propos	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Introduction	1
<b>1 Les détecteurs à neutrons</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction	4
1.2 La détection de neutrons : principes de bases	4
1.3 Le BC-501A	5
1.4 Les simulations d'efficacité avec GEANT4	9
1.4.1 La géométrie et la composition des matériaux dans la simulation GEANT4	9
1.4.2 Résultats des simulations	15
1.4.3 Comparaison des simulations avec Nakao	15
1.5 Conclusion	18
<b>2 Les détecteurs CsI(Tl)</b>	<b>19</b>
2.1 Introduction	19
2.2 Le principe des détecteurs CsI(Tl)	19
2.2.1 Les caractéristiques du CsI(Tl)	20
2.3 Les détecteurs originaux d'HÉRACLES	23
2.3.1 La géométrie et caractéristiques originales	23
2.3.2 Les tests à l'origine	25
2.3.3 La nouvelle problématique	25
2.4 Les simulations GÉANT4	27
2.4.1 Les géométries testées	28

2.4.2	Les problèmes de la simulation . . . . .	28
2.4.3	Les résultats . . . . .	30
2.4.4	Conclusions des simulations GEANT4 . . . . .	35
2.5	Les tests expérimentaux . . . . .	37
2.5.1	Le montage utilisé . . . . .	38
2.5.2	Les résultats . . . . .	39
2.6	Les modifications retenues . . . . .	42
2.6.1	La nouvelle géométrie . . . . .	42
2.6.2	Vérification des modifications . . . . .	44
2.6.3	Tests sous vide . . . . .	46
2.7	Conclusion . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Les détecteurs à position</b> . . . . .	<b>49</b>
3.1	Introduction . . . . .	49
3.2	Le montage expérimental . . . . .	49
3.2.1	Les différents modèles . . . . .	50
3.2.2	Mesures de résolution de pic gamma . . . . .	51
3.2.3	Les mesures de résolution d'un canal . . . . .	52
3.2.4	Les mesures de diaphonie . . . . .	52
3.3	Les résultats . . . . .	54
3.3.1	Mesures de résolution de pic gamma . . . . .	54
3.3.2	Les mesures de résolution d'un canal . . . . .	57
3.3.3	Les mesures de diaphonie . . . . .	58
3.4	Conclusion . . . . .	60
	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>61</b>
	<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Les détecteurs à neutrons</b> . . . . .	<b>65</b>
A.1	Descriptions des répertoires du programme de simulation geant4 . . . . .	65
A.2	Exemples de code GEANT4 . . . . .	66
A.2.1	Création d'un matériel dans le cadre d'une simulation GEANT4 . . . . .	66
A.2.2	Création d'un volume simple . . . . .	66
A.2.3	Distribution uniforme sur une surface circulaire . . . . .	67
A.3	La simulation GEANT4 . . . . .	68
A.4	résultats des simulations . . . . .	69
A.5	Comparaison avec Nakao et différentes versions de GEANT4 . . . . .	83
<b>B</b>	<b>Les détecteurs CsI(Tl)</b> . . . . .	<b>85</b>
B.1	Tableau résumé . . . . .	86
B.2	Anneau 4 . . . . .	88

B.2.1	détecteur 1	88
B.2.2	détecteur 2	89
B.2.3	détecteur 3	90
B.2.4	détecteur 4	91
B.2.5	détecteur 5	92
B.2.6	détecteur 6	93
B.2.7	détecteur 7	94
B.2.8	détecteur 8	95
B.2.9	détecteur 9	96
B.2.10	détecteur 10	97
B.2.11	détecteur 11	98
B.2.12	détecteur 12	99
B.2.13	détecteur 13	100
B.2.14	détecteur 14	101
B.2.15	détecteur 15	102
B.2.16	détecteur 16	103
B.3	Anneau 5	104
B.3.1	détecteur 17	104
B.3.2	détecteur 18	105
B.3.3	détecteur 19	106
B.3.4	détecteur 20	107
B.3.5	détecteur 21	108
B.3.6	détecteur 22	109
B.3.7	détecteur 23	110
B.3.8	détecteur 24	111
B.3.9	détecteur 25	112
B.3.10	détecteur 26	113
B.3.11	détecteur 27	114
B.3.12	détecteur 28	115
B.3.13	détecteur 29	116
B.3.14	détecteur 30	117
B.3.15	détecteur 31	118
B.3.16	détecteur 32	119
<b>C</b>	<b>Le photomultiplicateur à position</b>	<b>120</b>
<b>D</b>	<b>Le contenu du CD-ROM</b>	<b>130</b>
D.1	Detecteurs_neutrons	130
D.2	Detecteurs_CsI(Tl)	131

# Liste des tableaux

1	Faisceaux prévus pour les expériences qui seront menées à TRIUMF. . . . .	2
1.1	Les caractéristiques physiques pour les différents détecteurs à neutrons utilisés à TAMU. . . . .	11
2.1	Les différents paramètres par défaut des simulations GEANT4, avec le résultat des simulations avec et sans guide pour ces paramètres, avec 100 000 photons lancés. . . . .	31
2.2	Variation des mesures entre 2 expériences espacées dans le temps. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 300 secondes, avec un détecteur de l'anneau 5. . . . .	40
2.3	Résultats des expériences sur le détecteur de l'anneau 5. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 300 secondes, avec une tension d'alimentation au PM de -1050V. . . . .	41
2.4	Résultats des expériences sur le détecteur de l'anneau 4. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 300 secondes, avec une tension d'alimentation au PM de -1050V. . . . .	42
2.5	Résultats des expériences sous vide pour un détecteur de l'anneau 4 et de l'anneau 5. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 50 minutes pour le détecteurs de l'anneau 4 et 20 min. pour le détecteur de l'anneau 5, avec une tension d'alimentation au PM de -980V dans les 2 cas. . . . .	47
2.6	Résultats des expériences sous vide sur les détecteur de l'anneau 4 et 5, avec le sélecteur multicanaux. Mesures effectuées avec une tension d'alimentation au PM de -980V. . . . .	47
3.1	Comparaison entre les valeurs expérimentales et théoriques pour différentes sources. . . . .	57
3.2	Variation de la résolution du PMP à position en fonction du canal de sortie du PMP . . . . .	58
B.1	Tableau des résolutions pour les détecteurs de l'anneau 4. . . . .	86
B.2	Tableau des résolutions pour les détecteurs de l'anneau 5. . . . .	87

# Liste des figures

1.1	Mesures de la section efficace pour les réactions neutron-carbone et neutron-hydrogène [ENDF] . . . . .	6
1.2	Intensité lumineuse en fonction de l'énergie incidente des différentes particules . . . . .	7
1.3	Résultats d'une simulation GEANT4 illustrant les particules ayant reçu un transfert d'énergie des neutrons dans le BC-501A en fonction de l'énergie des neutrons incidents et de l'efficacité de détection des neutrons. Pour chaque tranche d'énergie de 1 MeV, 15 000 neutrons ont été simulés. . . . .	8
1.4	Géométrie des détecteurs à neutrons. Les dimensions des différents cylindres sont représentées par les rayons R1, R2 et R3 et les hauteurs L1 et L2. Les valeurs de ces dimensions sont disponibles dans le tableau [1.1].	10
1.5	Disposition des détecteurs pour l'expérience FIRST 2003. Les détecteurs sont ordonnés du premier à 27° au huitième à 145°. . . . .	10
1.6	Efficacité et particules produites pour le détecteur numéro 8 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,515MeVee . . . . .	16
1.7	Comparaison de l'efficacité pour 2 versions du code GEANT4 en fonction des résultats de Nakao pour un seuil de 0.543 MeV . . . . .	17
2.1	Décomposition en différentes impulsions du signal total observé à la sortie d'un photomultiplicateur, en provenance d'un cristal de CsI(Tl) irradié par des particules chargées. . . . .	20
2.2	Spectre d'émission du CsI(Tl) pour diverses concentrations de Tl avec des protons incidents de 4.4 MeV, [MUR63] . . . . .	21
2.3	Spectre d'émission du CsI(Tl) en fonction de diverses particules ionisantes. La concentration de Tl est de 0.002 mole % ,[MUR63] . . . . .	22
2.4	CsI(Tl) originaux. 1 : $\Delta E$ plastique, 2 : Cristal de CsI(Tl), 3 : Guide de Lumière, 4 : PM Hamamatsu R580, 5 : Connecteurs HV et BNC . . . . .	23
2.5	Matrice HÉRACLES, vue schématique des différents anneaux . . . . .	24
2.6	Matrice HÉRACLES, vue en 3D des différents anneaux. . . . .	24

2.7	Graphique de l'intensité lumineuse en fonction de différentes particules, selon l'équation [2.2] pour des paramètres arbitraires. . . . .	26
2.8	Photo illustrant la détérioration de l'interface entre le cristal et le guide de lumière sur les détecteurs CsI(Tl) . . . . .	28
2.9	Visualisation de la simulation GEANT4 pour la géométrie originale du détecteur CsI(Tl). En jaune, c'est le cristal de CsI(Tl), en rouge, le guide de lumière, en gris la surface de détection du PM. Les lignes vertes représentent les photons lancés lors de la simulation et les lignes bleu, rouge et violette, les axes des coordonnées (x,y,z). . . . .	29
2.10	Visualisation de la simulation GEANT4 pour la géométrie sans le guide de lumière. Le volume gris représente le cristal de CsI(Tl) et le jaune la surface de détection du PM. Les lignes vertes représentent les photons lancés lors de la simulation et les lignes rouge et bleu, les axes des coordonnées (x,y,z). . . . .	29
2.11	Variation de l'efficacité de détection selon la longueur d'absorption dans le cristal de CsI(Tl), pour 100 000 photons simulés. . . . .	32
2.12	Variation de l'efficacité de détection selon $\sigma_\alpha$ dans le cristal de CsI(Tl), pour 100 000 photons simulés. . . . .	33
2.13	Variation de l'efficacité de détection selon $\sigma_\alpha$ dans le guide de lumière en plexiglas, pour 100 000 photons simulés. . . . .	34
2.14	Variation de l'efficacité de détection selon la variation du coefficient de réflexion dans le cristal de CsI(Tl), pour 100 000 photons simulés. . . . .	36
2.15	Schéma du montage de l'électronique pour les détecteurs composés de cristaux de CsI(Tl). . . . .	38
2.16	Position des divers trous pour positionner la source alpha sur la surface avant des cristaux de CsI(Tl). . . . .	39
2.17	Position des différents pics tels qu'observés sur le sélecteur multicanaux pour le détecteur de l'anneau 5. . . . .	41
2.18	Position des différents pics tels qu'observés sur le sélecteur multicanaux pour le détecteur de l'anneau 4. . . . .	43
2.19	Nouvelle géométrie des détecteurs CsI(Tl) des anneaux 4 et 5. Légende : 1 ; cristal CsI(Tl), 2 ; PM Hamamatsu R580, 3 ; connecteurs H.V. et BNC	44
2.20	Synchronisation des portes rapides et lentes par rapport au signal, pour un CsI(Tl). . . . .	45
2.21	Schéma du montage CAMAC utilisé pour tester les CsI(Tl). . . . .	46
2.22	Schéma du montage pour l'expérience sous vide avec les détecteurs CsI(Tl) modifiés. . . . .	48
3.1	Schéma du PM à positions. . . . .	50
3.2	Dimensions du PM à position R5900U-00-L16, en mm. . . . .	51
3.3	Schéma du montage pour la spectroscopie gamma. . . . .	53

3.4	Dimensions du cristal de CsI(Tl) utilisé dans les tests avec le PMP. Les dimensions sont : $h = 8\text{mm}$ , $l = 1.5\text{mm}$ et $L = 15\text{mm}$ . . . . .	53
3.5	Mesures de diaphonie selon Hamamatsu pour le photomultiplicateur R5900U-00-L16. . . . .	55
3.6	Spectre d'une source $^{137}\text{Cs}$ tel qu'observé avec un cristal NaI(Tl) et un photomultiplicateur Hamamatsu R5900U-00-L16. . . . .	55
3.7	Spectre d'une source $^{60}\text{Co}$ tel qu'observé avec un cristal NaI(Tl) et un photomultiplicateur Hamamatsu R5900U-00-L16. . . . .	56
3.8	Étalonnage du détecteur NaI(Tl) couplé au PMP . . . . .	56
3.9	Tension observée à l'oscilloscope sur les différents canaux de sortie du PMP pour différentes tensions et positions du cristal sur la surface de la photocathode. . . . .	59
A.1	Schema de l'arborescence d'un répertoire de programme GEANT4, basé sur les exemples "novices". . . . .	68
A.2	Efficacité du détecteur numéro 1 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à $1,090\text{MeV}$ . . . . .	69
A.3	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 1. . . . .	70
A.4	Efficacité du détecteur numéro 2 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à $0,688\text{MeV}$ . . . . .	71
A.5	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 2. . . . .	72
A.6	Efficacité du détecteur numéro 3 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à $1,250\text{MeV}$ . . . . .	73
A.7	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 3. . . . .	74
A.8	Efficacité du détecteur numéro 4 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à $0,853\text{MeV}$ . . . . .	75
A.9	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 4. . . . .	76
A.10	Efficacité du détecteur numéro 5 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à $1,160\text{MeV}$ . . . . .	77
A.11	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 5. . . . .	78
A.12	Efficacité du détecteur numéro 6 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à $0,934\text{MeV}$ . . . . .	79
A.13	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 6. . . . .	80

A.14	Efficacité du détecteur numéro 8 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,515MeV . . . . .	81
A.15	Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 8. . . . .	82
A.16	Comparaison de l'efficacité pour 2 versions du code GEANT4 en fonction des résultats de Nakao pour un seuil de 0.196 MeV . . . . .	83
A.17	Comparaison de l'efficacité pour 2 versions du code GEANT4 en fonction des résultats de Nakao pour un seuil de 2.04 MeV . . . . .	84
B.1	Dimensions des cristaux de CsI(Tl) pour l'anneau 4 : a=5.0 cm, b=d=3.8 cm, c=3.8 cm, e=4.5 cm, f=h=3.2 cm, g=3.3 cm, i=3.0 cm, j=2.8 cm et l'anneau 5 :a=6.2 cm, b=d=5.0 cm, c=5.2 cm, e=5.8 cm, f=h=4.4 cm, g=4.5 cm, i=3.0 cm, j=3.2 cm . . . . .	85
C.1	Spectre théorique source de $^{137}\text{Cs}$ , avec un cristal de NaI [ORT84] . . . . .	120
C.2	Spectre théorique source de $^{60}\text{Co}$ , avec un cristal de NaI [ORT84] . . . . .	121
C.3	Mesure de résolution du PMP, canal 7, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).122	
C.4	Mesure de résolution du PMP, canal 8, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).123	
C.5	Mesure de résolution du PMP, canal 9, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).124	
C.6	Mesure de résolution du PMP, canal 10, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).125	
C.7	Mesure de résolution du PMP, canal 11, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).126	
C.8	Mesure de résolution du PMP, canal 11, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).127	
C.9	Mesure de résolution du PMP, canaux 8+9+10, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl). . . . .	128
C.10	Mesure de résolution du PMP, canaux 7+8+9+10+11, source de $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl). . . . .	129

# Introduction

Dans le cadre d'expériences de physique nucléaire, les chercheurs tentent de comprendre ce qui se produit lors de collisions entre deux noyaux. Afin d'observer le produit de ces réactions, les scientifiques doivent concevoir des multidétecteurs pour détecter un maximum de particules qui résultent de ces collisions. Ces ensembles de détecteurs peuvent devenir très complexes, car chaque détecteur possède des caractéristiques qui lui sont propres. Ainsi, un détecteur seul ne peut pas détecter tous les types de particules émises lors d'une réaction. C'est pourquoi il doit être combiné avec plusieurs autres détecteurs, disposés tout autour de la cible, où se produisent les réactions, afin de maximiser la collection d'informations pertinentes pour effectuer les analyses requises. Pour y parvenir, les détecteurs sont disposés autour de la cible afin de pouvoir analyser les différentes corrélations entre les particules émises lors d'un même événement. Ces ensembles multidétecteurs sont nommés  $4\pi$  en raison de la disposition sphérique tout autour de la cible. Un autre exemple de ce type d'installation est le multidétecteur INDRA [POU95], localisé au centre de recherche du GANIL, en France.

Depuis le début des années 1990, le groupe de recherche sur les ions lourds de l'Université Laval utilise son propre ensemble hétéroclite de détecteurs, afin d'effectuer la détection de particules chargées et neutres. Connue au début des années 1990 sous le nom de CRL-Laval [GOU93], cette matrice a subi plusieurs transformations avant de devenir la matrice connue aujourd'hui sous le nom de HERACLES ("HEavy-ions Reactions Array Characteristic for Light Excited Systems"). Aujourd'hui formée avec plus de 64 détecteurs, cette matrice doit subir une autre série de modifications en raison de sa relocalisation au centre de recherche ISAC-II, TRIUMF, à Vancouver. Ce centre de recherche produit des faisceaux dits exotiques (composés d'éléments instables). Bientôt, ces faisceaux seront disponibles, au nouveau centre ISAC-II, à des énergies raisonnables pour effectuer des analyses isotopiques. Il est important que la matrice de détecteurs HERACLES soit alors prête à analyser les produits des réactions induites par les premiers faisceaux disponibles.

Isotope	Énergie(s) MeV/A	Intensité particules/sec.	Cible
$^{20}\text{Na}$	8 - 15	$5 \times 10^7$	C
$^{24}\text{Na}$	8 - 15	$5 \times 10^7$	C
$^{26}\text{Na}$	8 - 12 - 15	$5 \times 10^7$	C, Mg

TAB. 1: Faisceaux prévus pour les expériences qui seront menées à TRIUMF.

Le centre ISAC-II à TRIUMF offre une opportunité unique dans le but d'étudier les collisions inélastiques à basse énergie. Les faisceaux prévus devraient posséder une énergie située entre 8 MeV/A et 15 MeV/A, ainsi qu'une couverture isotopique assez large pour pouvoir observer l'impact du ratio proton/neutron du projectile sur l'isospin (voir tableau [1]). Les résultats obtenus seront comparés avec le code de simulation dynamique AMD [ONO03], afin de mieux comprendre les effets de l'énergie de symétrie. Ainsi, il devient important de connaître tous les fragments produits lors d'une collision, pour pouvoir identifier clairement les différentes corrélations des différents produits.

La matrice HERACLES est un ensemble complet de détecteurs. La plus récente modification de cette matrice comprend l'introduction de détecteurs à neutrons. Les détecteurs à neutrons de la matrice HERACLES ont également été utilisés dans le cadre de l'expérience FIRST 2003. Lors de cette expérience, les détecteurs ont été placés à l'extérieur de la chambre à réactions, devant divers obstacles. Des corrections à l'efficacité de détection sont alors nécessaires afin d'obtenir les bons taux de neutrons produits par réaction et détectés dans les différents détecteurs. Le logiciel GEANT4 a servi pour obtenir les courbes d'efficacité pour chaque détecteur. La validité des simulations est testée en comparant les résultats obtenus avec des résultats expérimentaux. Des simulations similaires serviront dans les prochaines expériences HERACLES, en adaptant les paramètres simulés, puisque les détecteurs à neutrons seront utilisés. Les résultats des différentes séries de simulations d'efficacité des détecteurs à neutrons sont présentés dans le chapitre 1 de ce mémoire.

La principale préparation nécessaire pour l'adaptation d'HERACLES aux installations de TRIUMF concerne les détecteurs de particules chargées, composés d'un scintillateur de CsI(Tl). Ces détecteurs furent introduits au moment de la conception de la matrice CRL-Laval. Une révision de leurs caractéristiques s'impose afin de s'assurer d'optimiser la collection d'information de qualité lors des expériences qui seront menées à ISAC-II. Pour obtenir une idée des modifications à effectuer, le logiciel GEANT4 [GEA03] a été utilisé. Les résultats des simulations et des tests en laboratoire sont présentés dans le cadre de ce mémoire, dans le chapitre 2.

La dernière section de ce mémoire traite de l'utilisation d'un photomultiplicateur à position dans le cadre d'une expérience de physique nucléaire. Ces appareils possèdent des caractéristiques qui sont très intéressantes pour les différentes expériences qui seront menées à TRIUMF. Par exemple, l'utilisation de tels appareils pourrait permettre d'obtenir plus d'informations sur la position des particules émises lors des réactions. Les résultats précédents n'avaient pas permis de conclure quant à l'utilisation de ce type de photomultiplicateurs dans ce genre d'expérience [GÉL05]. Les résultats des divers tests effectués afin de compléter les analyses précédentes sont présentés dans la troisième section.

# Chapitre 1

## Les détecteurs à neutrons

### 1.1 Introduction

Les détecteurs à neutrons ne furent introduits dans la matrice HERACLES que récemment, dans le cadre d'expériences à TAMU ("Texas A&M University"). Ces détecteurs se distinguent des autres utilisés jusqu'à présent par le type de particules qu'ils détectent. Les neutrons sont particulièrement difficiles à détecter, en raison de leur charge nulle. Un autre problème présent est la disposition à l'extérieur de la chambre à réactions des détecteurs. Cette disposition requiert une correction sur les mesures d'efficacité, en raison des différents obstacles que les neutrons doivent franchir avant d'aboutir dans le détecteur. Ce chapitre aborde les principes de base de la détection des neutrons ainsi que les différents problèmes qui s'y rattachent. Le logiciel GEANT4 a servi pour simuler les courbes d'efficacité.

### 1.2 La détection de neutrons : principes de bases

Les neutrons sont des particules massives difficiles à détecter pour plusieurs raisons. La plus importante est qu'ils ne sont pas chargés électriquement, ce qui implique qu'ils interagissent uniquement avec les noyaux des atomes. De plus, les neutrons peuvent être générés avec une énergie de quelques  $eV$ , jusqu'à plusieurs  $GeV$ , ce qui implique des détecteurs efficaces sur une plage très large d'énergies. Il est impossible de détecter directement les neutrons (comme dans le cas des protons ou des autres particules chargées) et il faut se fier aux produits des réactions secondaires qu'ils provoquent afin de les

détecter. Il est possible de distinguer 4 types de réactions qui peuvent mener à la détection d'un neutron :

1. l'absorbction du neutron par un noyau, provoquant l'émission d'une particule chargée ;
2. l'absorbction du neutron avec fission du noyau ;
3. l'absorbction du neutron libérant un isotope radioactif qui peut être détecté et mesuré ;
4. la diffusion des neutrons sur des noyaux légers (comme un proton), avec une particule de recul qui produit de l'ionisation.

La section efficace de ces réactions varie beaucoup en fonction de l'énergie des neutrons incidents. Cette fluctuation n'est pas linéaire, comme il est possible de le constater sur la figure (1.1), ce qui implique une grande variété de méthodes de détection, selon l'énergie des neutrons qu'il est question de détecter et l'information qui est recherchée. La méthode utilisée lors des expériences avec HÉRACLES opéré à TAMU [THE05a] consiste à mesurer le temps de vol à l'aide d'un détecteur organique, du BC-501A [BIC], afin de déterminer l'énergie des neutrons, possédant une énergie cinétique qui pouvait être comprise entre quelques centaines de keV ( $\sim 700$  keV) et quelques dizaines de MeV ( $\lesssim 50$  MeV).

### 1.3 Le BC-501A

Le BC-501A est un composé organique liquide, composé de xylène ( $C_8H_{10}$ ) et de naphthalène ( $C_{10}H_8$ ), donc essentiellement un mélange de carbone et d'hydrogène. Anciennement connu sous le nom de NE-213, ce composé a fait l'objet de plusieurs recherches [ARN98],[VER68],[BAT61],[FOW80],[THO71],[DRO80],[CEC79],[UWA82],[TAK01],[SHI9][LOC76], afin d'établir avec précision la réponse en lumière par rapport à l'énergie du neutron incident. Comme mentionné dans la section précédente, le neutron ne peut être directement détecté. Dans le cas du BC-501A, les neutrons entrent en collision avec les composés du liquide et ce sont les particules chargées produites dans ces réactions qui sont à l'origine de la lumière émise dans ce liquide scintillant. Il est alors possible de distinguer cette lumière de celle des gammas, par l'analyse de la forme de l'impulsion électrique générée par le photomultiplicateur. Cependant, à partir d'une certaine énergie de neutrons incidents, il est impossible de distinguer la lumière des réactions secondaires produites par les neutrons d'avec les gammas. Cette énergie limite est appelée le seuil de détection. Il doit être évalué pour chaque détecteur.

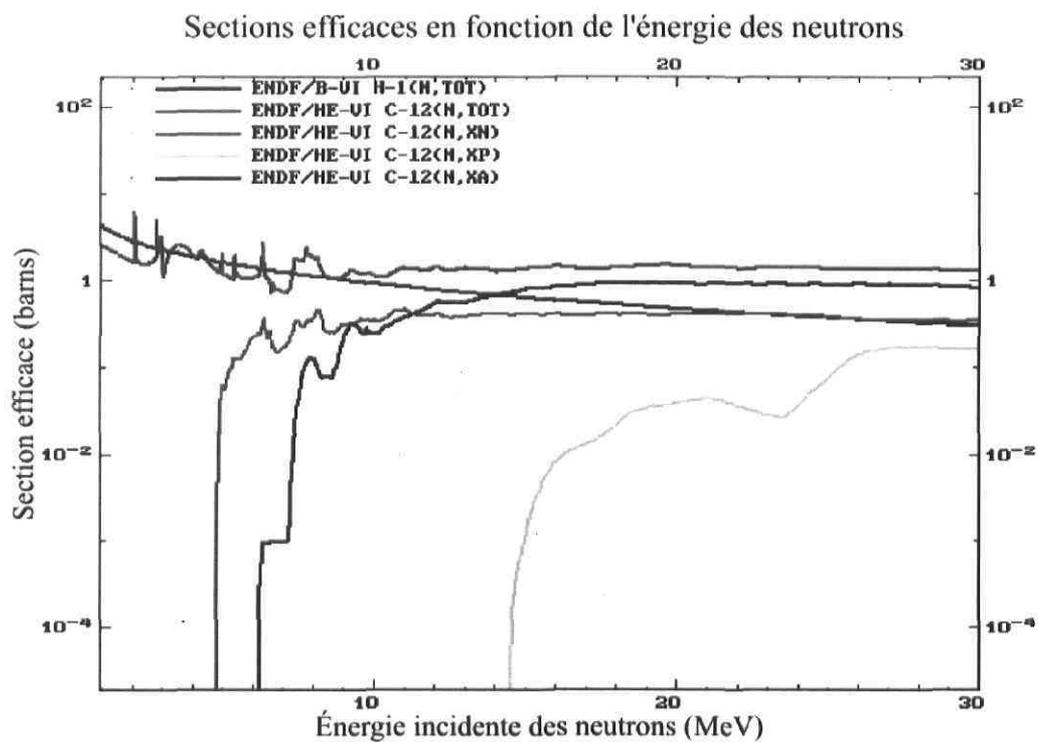


FIG. 1.1: Mesures de la section efficace pour les réactions neutron-carbone et neutron-hydrogène [ENDF]

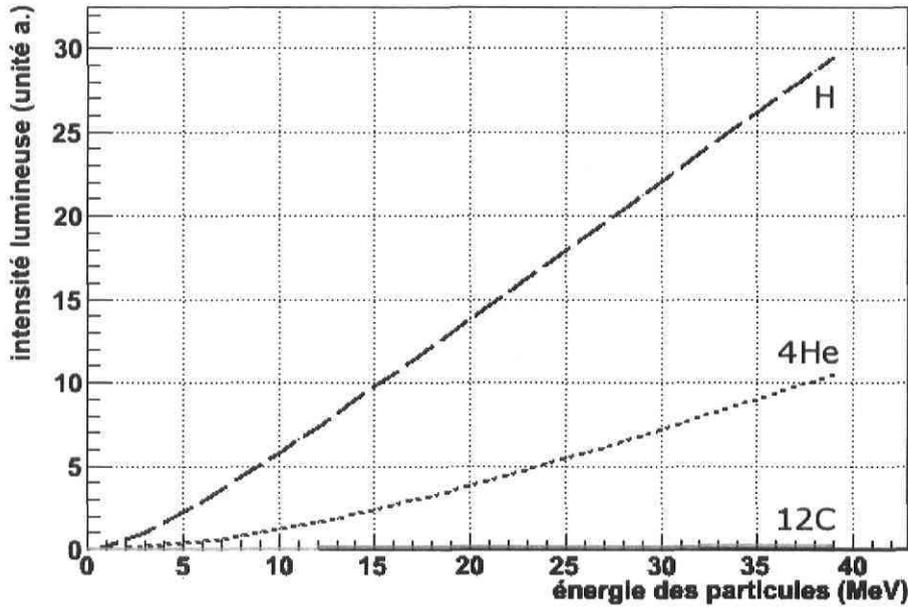


FIG. 1.2: Intensité lumineuse en fonction de l'énergie incidente des différentes particules

Les protons provenant de la réaction  $H(n,n)p$  sont les principaux générateurs de lumière, mais d'autres réactions avec le carbone vont également émettre des particules chargées qui produiront de la lumière en se désexcitant. Dans le cas du BC-501A, plusieurs papiers [UWA82], [VER68], [CEC79] tentent d'établir la relation entre la lumière produite et l'énergie de la particule produite lors d'une collision avec un neutron.

$$\text{Proton}^1 : L_P = 0.83 \times E_{\text{proton}} - 2.82 \times (1 - e^{-0.25 \times E_{\text{proton}}^{0.93}}) \quad (1.1)$$

$$\text{Deuton}^2 : L_{\text{deut.}} = 0.75 \times E_{\text{deut.}} - 4.5 \times (1 - e^{-0.16 \times E_{\text{deut.}}}) \quad (1.2)$$

$$\text{Particule } \alpha^3 : L_\alpha = 0.41 \times E_\alpha - 5.9 \times (1 - e^{-0.065 \times E_\alpha^{1.01}}) \quad (1.3)$$

$$\text{Carbone}^4 : L_C = 0.00531163 \times E_C \quad (1.4)$$

La figure (1.2) représente la lumière émise en fonction de l'énergie incidente des particules. Il est possible de constater que la lumière produite par les protons domine celle produite par les autres types de particules. Comme les particules émettrices de lumière sont produites suite à une collision avec les neutrons incidents, le nombre de

<sup>1</sup>[BIC]

<sup>2</sup>[NAK95]

<sup>3</sup>[CEC79]

<sup>4</sup>[VER68]

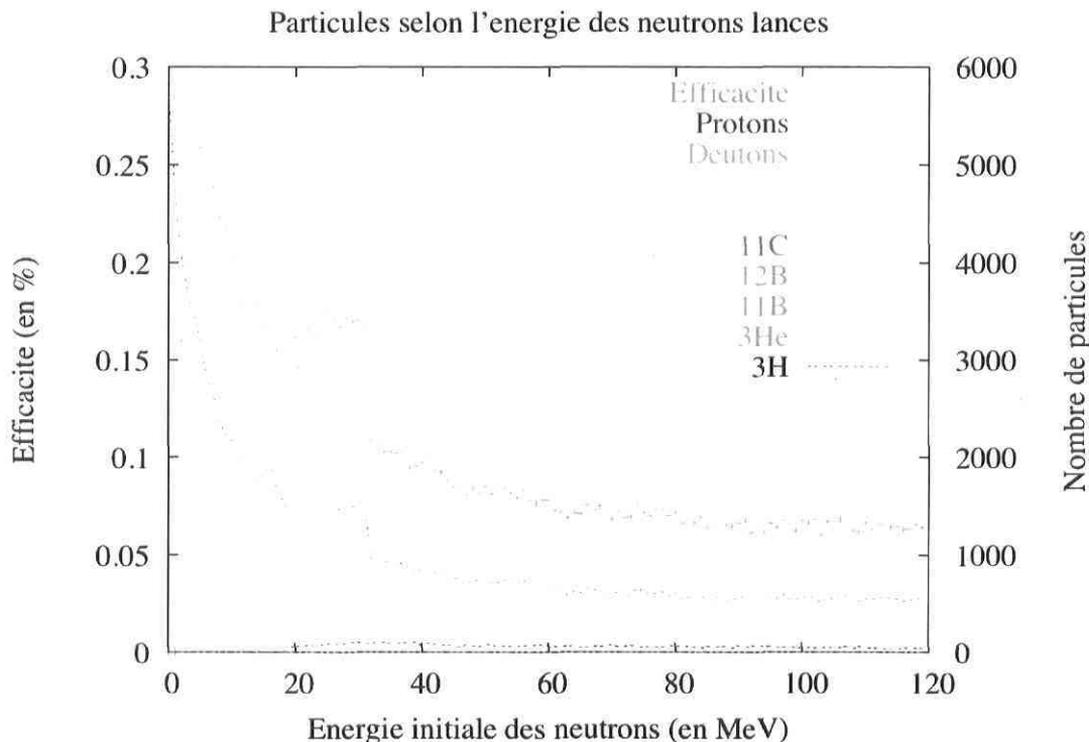


FIG. 1.3: Résultats d'une simulation GEANT4 illustrant les particules ayant reçu un transfert d'énergie des neutrons dans le BC-501A en fonction de l'énergie des neutrons incidents et de l'efficacité de détection des neutrons. Pour chaque tranche d'énergie de 1 MeV, 15 000 neutrons ont été simulés.

chaque type de particules engendrées dans le BC-501A par le passage des neutrons sera fonction de divers facteurs, comme la section efficace, dépendante de l'énergie du neutron incident. Cette dépendance est clairement indiquée sur la figure [1.1].

Ainsi, afin de déterminer aisément le nombre de chaque particule résultant de la collision du neutron avec le carbone, le code de simulation GEANT4[GEA03] a été utilisé. Sur la figure [1.3], il est possible de voir que les produits des réactions sont dominés par les protons et les  $^{12}\text{C}$ . Ces particules sont émises lors de collisions élastiques. D'autres particules sont produites, mais elles ne représentent pas une proportion significative du total produit et elles ne contribuent pas significativement à la production de lumière dans le BC-501A.

## 1.4 Les simulations d'efficacité avec GEANT4

Le code de simulation GEANT4[GEA03] est un code de simulation versatile conçu pour la physique nucléaire et des particules. Il permet d'effectuer des simulations sur des expériences complexes et ainsi prévoir certaines améliorations ou défauts que l'expérience pourrait contenir avant de procéder à la véritable expérimentation. Il est donc possible, grâce à GEANT4, d'effectuer des simulations des expériences à un coût pratiquement nul, mais aussi d'évaluer certaines caractéristiques difficilement quantifiables en laboratoire. Dans le cas des détecteurs à neutrons utilisés à TAMU, GEANT4 a servi pour calculer leur efficacité. Les éléments importants de la simulation comprennent :

1. La géométrie des détecteurs ;
2. Les obstacles que les neutrons peuvent rencontrer avant de pénétrer dans le BC-501A ;
3. Les caractéristiques chimiques et physiques du BC-501A.

Comme il s'agit d'une simulation, une comparaison avec les résultats expérimentaux de Nakao [NAK95] est effectuée afin de confirmer la validité du code de simulation GEANT4 et de montrer qu'il est possible d'utiliser les résultats obtenus pour déterminer l'efficacité de nos détecteurs.

### 1.4.1 La géométrie et la composition des matériaux dans la simulation GEANT4

Lors de l'expérience avec FIRST 2003 [THE05b], 8 détecteurs à neutrons ont été utilisés. Sur ce nombre, 6 proviennent de la matrice HÉRACLES, du groupe de recherche sur les ions lourds de l'Université Laval, plus 2 autres qui sont fournis par M.S.U. ("Michigan State University") . Les 6 détecteurs de Laval et les 2 empruntés ont une forme cylindrique et doivent être disposés à l'extérieur de la chambre à réaction, en raison de l'espace qu'ils occupent, comme illustré sur la figure [1.5]. Inévitablement, les neutrons que les détecteurs sont en mesure d'identifier passent au travers de différents obstacles, comme le mur de la chambre à réaction et dans le cas d'un des modules, il y avait un cristal de CsI en raison d'un détecteur dans la chambre de réactions, dans la trajectoire des neutrons.

Ces éléments doivent être pris en charge dans la simulation, malgré le fait que leur influence ne risque pas d'être majeure puisque les neutrons de ces énergies n'interagissent pas beaucoup avec la matière. Les différents détecteurs ont les caractéristiques indiquées dans le tableau [1.1] et illustrées sur l'image [1.1]. Pour faciliter la représentation des

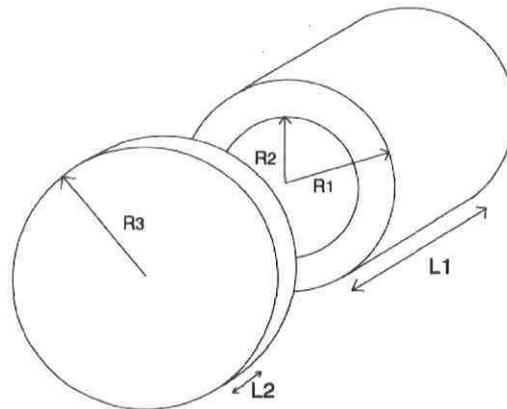


FIG. 1.4: Géométrie des détecteurs à neutrons. Les dimensions des différents cylindres sont représentées par les rayons  $R1$ ,  $R2$  et  $R3$  et les hauteurs  $L1$  et  $L2$ . Les valeurs de ces dimensions sont disponibles dans le tableau [1.1].

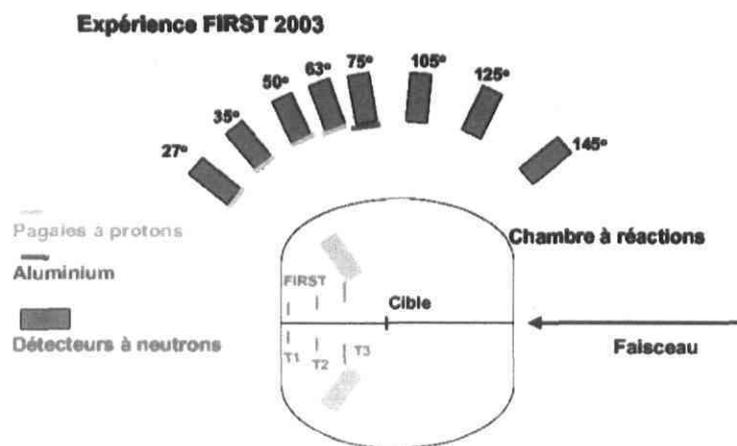


FIG. 1.5: Disposition des détecteurs pour l'expérience FIRST 2003. Les détecteurs sont ordonnés du premier à  $27^\circ$  au huitième à  $145^\circ$ .

détecteurs	R2	R1	L1	R3	L2
1,3,4,6	6,35 cm	6,99 cm	12,7 cm	6,99 cm	1,27 cm
5	6,35 cm	6,99 cm	12,7 cm	6,99 cm	1,91 cm
2,7	6,35 cm	6,99 cm	12,7 cm	6,99 cm	0,5 cm

TAB. 1.1: Les caractéristiques physiques pour les différents détecteurs à neutrons utilisés à TAMU.

volumes lors de la simulation, la paroi frontale a été simulée comme un disque au devant du détecteur, comme représenté sur la figure [1-4]. Il n'y a pas de paroi arrière, puisqu'à cet emplacement, il y a le photomultiplicateur. Pour la simulation, on considère qu'un photon qui arrive à cette paroi est détecté. Dans le cas où il y avait un cristal de CsI devant le détecteur, un cylindre avec une épaisseur similaire à celle du cristal était placé devant le détecteur, lors de la simulation, afin d'inclure correctement l'effet que le cristal induit sur la trajectoire des neutrons. Cette simplification de la géométrie est correcte, considérant la faible déviation des neutrons dans ces matériaux, à cause du peu d'interactions qu'ils ont avec la matière. Finalement, les volumes physiques de la simulation sont placés dans un milieu vide, c'est-à-dire sans influence sur la trajectoire des neutrons. La simulation est ainsi simplifiée, sans compromettre sa validité, puisque les neutrons interagissent très peu avec l'air et que toute la zone comprise à l'intérieur de la chambre se retrouve dans une condition de vide relatif.

Un élément qui n'a pas été pris en charge lors de la simulation est le fond, généré par des neutrons qui ont diffusé de manière aléatoire avant de pénétrer dans le détecteur, ou encore qui proviennent de sources externes à l'expérience. Ce fond peut être négligé dans la mesure où cette simulation ne cherche pas à reproduire l'ensemble de l'expérience, mais seulement à évaluer l'efficacité des détecteurs à neutrons. Le bruit de fond est une composante essentielle dont il faut tenir compte lors d'une véritable expérience, mais dans le cadre de cette simulation bien précise, il n'est pas pertinent de chercher à reproduire le fond, car cette composante est trop dépendante de l'environnement dans lequel l'expérience a lieu. La seule façon vraiment efficace d'évaluer le fond est de le mesurer expérimentalement.

Le mur de la chambre et le contenant du BC-501A sont construits, dans le cadre la simulation, avec de l'acier "pur", donc qui ne contient pas d'impuretés et d'autres constituants (comme la peinture sur les parois extérieures des détecteurs). La différence réelle entre de l'acier contenant des impuretés et celui qui est pur ne devrait pas venir influencer les résultats, puisque les neutrons interagissent peu avec de telles couches minces, ce qui permet de négliger les impuretés lors de la simulation. La même approximation est faite pour tous les matériaux simulés : les impuretés sont assez négligeables pour ne considérer que la composition chimique élémentaire des matériaux utilisés.

Finalement, les différents contenants et matériaux secondaires compris dans la conception des détecteurs sont négligés dans les simulations. Cela comprend les contenants de verre, les élastiques et tous les autres matériaux utilisés. Ces matériaux ne sont pas inclus dans les simulations, principalement en raison du peu d'influence qu'ils ont sur la trajectoire des neutrons. Leur densité est généralement faible ou encore leur épaisseur est assez mince pour que la probabilité d'interaction des neutrons à l'intérieur de ces matériaux soit négligeable.

Dans le code de simulation GEANT4 [GEA03], il est possible de facilement programmer les différentes caractéristiques mentionnées dans la sous-section précédente. Le code de simulation utilisé est celui de l'exemple novice NO2 [GEA05], fourni avec le logiciel, et modifié à nos besoins [GRO03], pour inclure les différentes caractéristiques de nos détecteurs. Le code de simulation est divisé en différentes sections, gérant chacune une partie bien précise de la simulation. La description détaillée de chacun des répertoires est disponible en annexe, ainsi qu'une illustration schématique des répertoires [A.1].

## Les caractéristiques physiques des détecteurs

Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit d'intégrer et de modifier des volumes dans une simulation qui représente la situation réelle des détecteurs à neutrons utilisés par notre équipe. Le fichier source complet qui gère cette partie est inclus en annexe (ExN02DetectorConstruction.cc), de même que les autres fichiers sources pertinents à ce travail. Les parties qui ont été modifiées sont principalement celles qui permettent la création de nouveaux volumes et la composition de ces derniers. GEANT4 "reconnaît" les éléments, mais il est important de définir la composition, la densité, l'état (solide, liquide, etc.) de chaque composé chimique créé. Ainsi, si on veut avoir un volume de BC-501A, il faut définir la composition du matériel en spécifiant un composé liquide de carbone et d'hydrogène, avec une densité de  $0.874\text{g/cm}^3$ . Le ratio du nombre d'atomes d'hydrogène par rapport à ceux de carbone est de 1,21. Pour la définition en c++ de ces caractéristiques, voir en annexe l'exemple *Création d'un matériel dans le cadre d'une simulation GEANT4*.

Avec ces données, GEANT4 sera en mesure de simuler un volume avec les caractéristiques chimiques spécifiées. Il est possible d'ajouter des caractéristiques physiques à un composé, comme la distance que peut parcourir la lumière avant d'être absorbée, l'indice de réfraction, etc.

Afin de simuler un volume avec des propriétés physiques, il faut initialiser un volume logique et un volume physique, dans un espace limité, un milieu où aura lieu la

simulation. Ce milieu sera nommé "monde", puisque rien d'autre n'existe en dehors de ce volume lors de la simulation. La définition de cet environnement est similaire à celle d'un solide à l'intérieur de cet espace. Le volume logique est créé afin d'inclure la composition de la forme en trois dimensions qui est créée. Le volume physique est initialisé pour définir les dimensions et la position que le solide occupe dans le volume monde. GEANT4 comprend une panoplie de formes géométriques pré-définies en trois dimensions, ce qui permet de facilement inclure des solides complexes dans le volume monde. Un exemple de la partie du code (fichier source `ExN02DetectorConstruction.cc`) qui définit le volume représentant un détecteur à neutrons est disponible à l'annexe *Création d'un volume simple*.

GEANT4 permet de contrôler avec précision la géométrie, la disposition dans l'espace, la composition chimique, les propriétés physiques des volumes créés, mais il existe aussi d'autres options, par exemple celles de visualisation, qui n'auront pas d'influence sur les simulations, mais qui demeurent néanmoins très pratiques. Encore là, le nombre d'options est vaste et complexe.

## La physique de GEANT4

Une fois que les détecteurs sont créés correctement dans GEANT4, il est important d'utiliser les bons processus physiques dans l'exécution de la simulation, sinon tout le travail sera effectué pour rien. GEANT4 dispose d'une très grande librairie de renseignements (comme les sections efficaces des réactions) et de codes permettant l'exécution de simulations physiques complexes. Lors de l'écriture d'un programme de simulation, afin de faciliter le travail du programmeur, il s'agit de simplement spécifier les différentes contraintes ou processus qu'on veut inclure dans la simulation. Par exemple, il ne s'agit pas de réécrire un code de propagation de particules chargées dans un milieu, mais de simplement spécifier dans le code, le type de particules qu'on veut simuler, leurs conditions initiales (trajectoire, énergie) et les types d'interactions qui devront être prises en charge.

Pour les conditions initiales, il est possible de facilement les regrouper dans un seul fichier source. Dans le cas de l'exemple NO2 et de notre simulation, ces données sont contenues dans le fichier `ExN02PrimaryGeneratorAction.cc`, disponible en annexe. Les neutrons ont été lancés avec une énergie initiale comprise entre 1 MeV et 40 MeV, avec une distribution aléatoire sur la surface circulaire du détecteur. Afin d'obtenir une distribution aléatoire, le générateur de nombres aléatoires fournis avec le code de GEANT4 (`G4UniformRand`) est utilisée. Un extrait de code qui a été inclus dans l'exemple NO2 afin de lancer aléatoirement des neutrons sur toute la surface du

détecteur est disponible à l'annexe *Distribution uniforme sur une surface circulaire*.

Les processus physiques qui devront être inclus dans la simulation sont spécifiés dans le fichier *ExN02PhysicsList.cc*, toujours dans le répertoire  $\sim$ /src. Ainsi, pour inclure les bibliothèques appropriées, il s'agit de créer un pointeur qui va être associé avec la bibliothèque en question. Dans le cas de notre simulation, plusieurs processus ont été inclus, en fonction des particules concernées. Voici un bref résumé des particules et des processus qui sont pris en charge par le programme de simulation :

- *Gammas* : effet photoélectrique, diffusion Compton, création de paires.
- *Protons* : collisions élastiques et inélastiques.
- *Neutrons* : collisions élastiques et inélastiques, fission, capture.
- *Électrons* : diffusions multiples, ionisation, bremsstrahlung.
- *Positrons* : diffusions multiples, ionisation, bremsstrahlung et annihilation du positron.
- $\mu^+, \mu^-$  : diffusions multiples, ionisation, bremsstrahlung et production de paires.
- *deutons, tritons,  $\alpha$*  : collisions élastiques et inélastiques.

D'autres particules sont également comprises dans les définitions des processus, mais il s'agit de particules des hautes énergies qui ne devraient pas, normalement, être produites dans les réactions simulées pour ce travail.

Finalement, afin de gérer l'émission de la lumière par les différentes particules, une section du code contenu dans le fichier source *ExN02EventAction.cc* est réservée à cet effet. Après une réaction, chaque particule produite est identifiée. Si une particule chargée est générée par la collision d'un neutron avec un autre élément, on considère alors que cette particule chargée émettra de la lumière, proportionnellement à l'énergie qui lui sera transmise par la réaction avec le neutron. Ainsi, pour un proton produit par la collision élastique d'un neutron, on calculera la lumière émise à l'aide de l'équation [1.1], pour un deutéron on utilisera l'équation [1.2], pour une particule  $\alpha$  l'équation [1.3] et pour toutes les autres particules de masse plus élevée, on utilise l'équation [1.4]. La lumière émise est calculée en MeVee (1 MeVee est équivalent à la lumière générée par un électron de 1 MeV). C'est à ce moment que le seuil de détection (seuil à partir duquel la distinction entre la lumière associée aux gammas et celle des neutrons est possible) entre en jeu dans nos simulations. Si l'énergie lumineuse totale prédite est supérieure au seuil du détecteur, le nombre de neutrons détectés est augmenté de un, sinon, le neutron est considéré comme perdu et n'est donc pas détecté.

## 1.4.2 Résultats des simulations

Grâce à GEANT4, il est possible d'avoir une idée très précise de ce qui se produit lors des réactions. Il ne s'agit que de l'extraire du programme. Dans notre situation, les données pertinentes sont l'efficacité des détecteurs (ratio du nombre de neutrons détectés sur le nombre incident) selon l'énergie des neutrons incidents, le nombre de particules produites et leur type (protons, deutons, tritons, alphas, etc.) en fonction de l'énergie incidente des neutrons. Ces données permettent d'établir une comparaison avec des données expérimentales obtenues par Nakao[NAK95]. Ce point est traité dans la section suivante.

Les résultats obtenus sont présentés à l'annexe A. Entre les différents détecteurs, il n'est pas surprenant de constater qu'il n'y a pas de grande différence. L'aspect de la distribution est la même pour tous les détecteurs, ce n'est que l'efficacité moyenne qui augmente ou diminue selon le détecteur. Si on prend le cas du détecteur numéro 8, qui est celui dont l'efficacité moyenne est la plus élevée, on obtient le graphique [1.6].

Le maximum d'efficacité est rapidement atteint lorsque l'énergie des neutrons incidents est autour de 5 MeV. Ainsi, dans le cas du détecteur 8, le maximum d'efficacité atteint est de 42.6%, pour une énergie initiale des neutrons de 5 MeV. Par la suite, l'énergie décroît exponentiellement, sauf à un endroit, entre 20 et 30 MeV d'énergie initiale pour les neutrons, où l'efficacité forme un plateau. Il est intéressant de noter que ce changement de courbure correspond à la variation de production des différentes particules, comme la présence des deutons qui augmente à cet endroit, mais surtout la production de protons qui fait un plateau au même endroit. Cependant, cette partie de l'efficacité demeure anecdotique, et reflète plutôt la difficulté que nous avons à obtenir des sections efficaces réalistes pour les neutrons des énergies intermédiaires. Ainsi, il s'agit plus du fait qu'à partir de cette énergie, GEANT4 inclut un processus de production de protons qu'il n'incluait pas à plus basse énergie, et comme les processus sont inclus à partir d'une énergie fixe, c'est pourquoi on observe un plateau.

## 1.4.3 Comparaison des simulations avec Nakao

Les travaux de Nakao[NAK95] permettent d'établir une comparaison directe avec nos simulations, pour établir l'efficacité du code de simulation GEANT4. Les résultats de Nakao sont limités à seulement quelques seuils de détection. Lorsque les simulations ont été effectuées, deux itérations du code GEANT4 étaient alors disponibles : la version 4.5 et la version 4.6.1. Dans les deux cas, afin de mesurer l'efficacité des détecteurs,

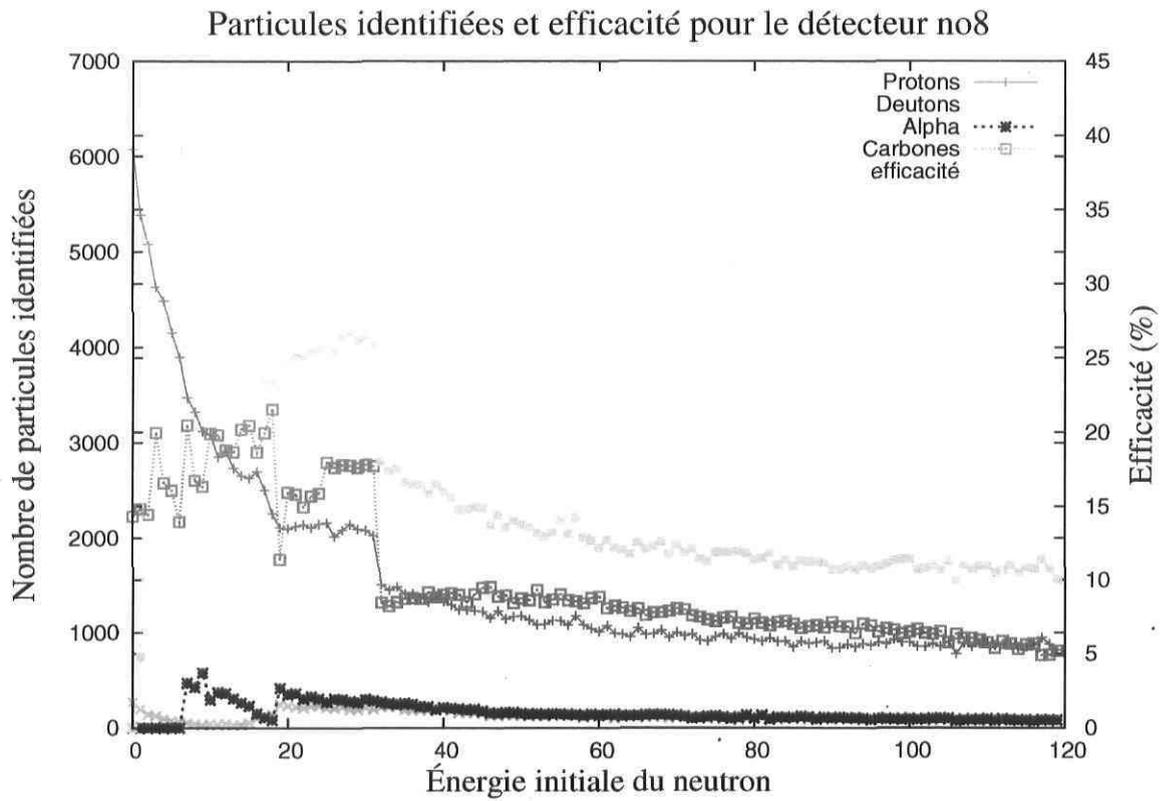


FIG. 1.6: Efficacité et particules produites pour le détecteur numéro 8 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,515MeV

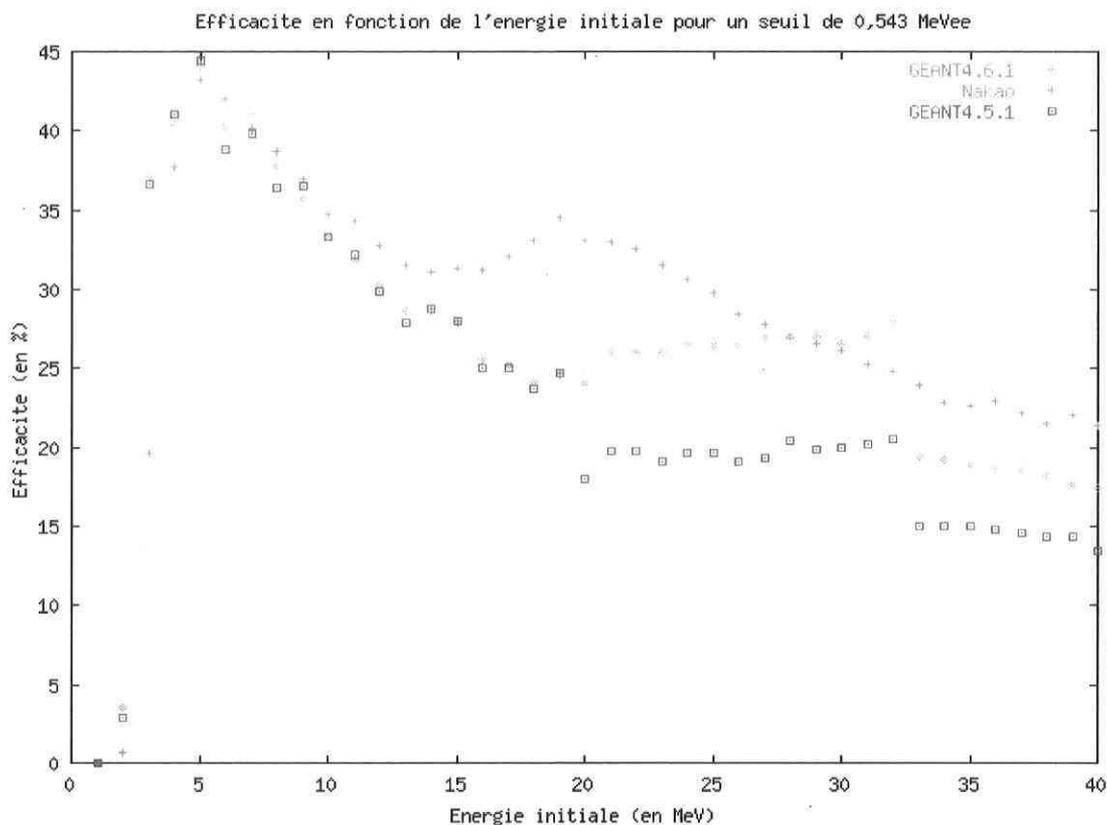


FIG. 1.7: Comparaison de l'efficacité pour 2 versions du code GEANT4 en fonction des résultats de Nakao pour un seuil de 0.543 MeV

15000 neutrons pour chaque tranche de 1 MeV en énergie initiale ont été "lancés", pour des seuils de détection de 0.196MeV, 0.543MeV et 2.04MeV. La figure [1.7] démontre des améliorations importantes au niveau du code de simulation entre la version 4.5 et la 4.6.1. Ces améliorations comprennent une meilleure gestion des événements par le simulateur et plusieurs corrections mineures. La liste complète des modifications est disponible à la référence [GEA05]. De manière générale, l'efficacité tend à se rapprocher des valeurs obtenues par Nakao, même pour la section du plateau (entre 18 MeV et 32 MeV), où on observe que l'écart entre les données expérimentales et celles de la simulation est réduit et que si on moyenne les résultats obtenus, la tendance semble plus en accord avec les résultats expérimentaux. Pour les énergies supérieures à 32 MeV de neutrons incidents, l'écart entre les données de la simulation et celles de Nakao est coupé de moitié, ce qui est une bonne amélioration. Aussi, toutes les simulations effectuées ont été reprises avec la l'itération la plus récente et les résultats présentés ont tous été obtenus avec la version 4.6.1.

Si on compare, grâce à la figure [1.7], la simulation avec les données expérimentales, pour des neutrons de faible énergie (entre 5 et 15 MeV), le code de simulation est fiable, avec une marge d'erreur inférieure à 5% par rapport aux résultats de Nakao, pour des énergies inférieures à 15 MeV. Cependant, à partir de 15-18 MeV, il semble y avoir une zone où l'efficacité forme un plateau, autant pour les résultats de Nakao que ceux obtenus lors de la simulation. Comme vu précédemment, ce plateau peut être expliqué par une modification des processus de collision. La figure [1.6] illustre bien ce changement, car la production de protons semble étroitement liée à l'efficacité de détection. Ainsi, le plateau observé pour l'efficacité de détection des neutrons entre 18 et 32 MeV suit la tendance des protons produits. Pour les énergies supérieures à 32 MeV par neutron incident, l'accord entre la simulation et les résultats expérimentaux semble être à nouveau plus réaliste. D'autres graphiques [A.16] et [A.17] sont disponibles en annexe.

## 1.5 Conclusion

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel GEANT4 permettent d'obtenir des courbes de correction d'efficacité satisfaisante. La comparaison avec les résultats de Nakao démontre une bonne compatibilité entre ce code de simulation et les expériences. Cependant, il est important de noter que les résultats de Nakao pour les basses énergies ne sont pas parfaits. Les résultats expérimentaux sont compris entre 5 et 135 MeV. À l'extérieur de ces limites, ce travail fait lui-même appel à un code de simulation Monte-Carlo. Ainsi, pour de faibles énergies de neutrons incidents, on se retrouve à comparer un code avec un autre code de simulation. Cependant, les résultats obtenus démontrent tout de même une bonne compatibilité entre nos résultats et les siens. Les courbes d'efficacité devraient devenir de plus en plus précises en raison de l'amélioration des moyens techniques. Tant que les problèmes ne seront pas résolus, les résultats pour des neutrons de basse énergie demeurent théoriques.

# Chapitre 2

## Les détecteurs CsI(Tl)

### 2.1 Introduction

La matrice HÉRACLES utilise les détecteurs CsI depuis ses débuts en tant que matrice CRL-Laval. Ils constituent un ensemble important de cette matrice. Avec le déplacement de la matrice au nouveau centre d'expérimentation ISAC-II, à TRIUMF, dans la ville de Vancouver, une révision de leur conception est nécessaire afin de les adapter aux nouvelles installations, puisque ces détecteurs ont été conçus pour fonctionner avec des faisceaux beaucoup plus énergétiques que ceux qui seront disponibles à TRIUMF. Pour bien saisir les implications des récentes conditions expérimentales, la première section de ce chapitre est dédiée au principe de détection utilisé avec les détecteurs CsI(Tl) sur HÉRACLES. Ensuite, la seconde partie traite des détecteurs avant leur modification et des problèmes possibles avec ces nouvelles conditions. La troisième section traite des simulations GEANT4 effectuées afin de mesurer l'impact des diverses modifications possibles à la matrice. La quatrième partie présente des tests en laboratoire pour confirmer les résultats de ces simulations. Finalement, la dernière section présente la nouvelle géométrie adoptée et les tests sur les détecteurs modifiés, qui ont été effectués afin de confirmer la qualité des modifications effectuées.

### 2.2 Le principe des détecteurs CsI(Tl)

Le CsI(Tl) est un matériel qui est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années pour la détection d'ions légers. Longtemps surpassés par les détecteurs semi-conducteurs, les

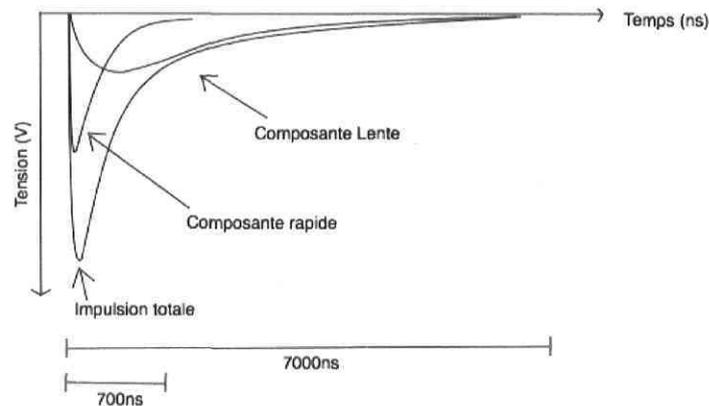


FIG. 2.1: Décomposition en différentes impulsions du signal total observé à la sortie d'un photomultiplicateur, en provenance d'un cristal de CsI(Tl) irradié par des particules chargées.

détecteurs utilisant les cristaux de CsI(Tl) sont de nouveau utilisés depuis le milieu des années 80 pour différentes raisons :

- Ils possèdent une intensité lumineuse et une résolution en énergie qui sont comparables à celles du NaI(Tl), tout en étant beaucoup moins hygroscopiques.
- Il y a une forte dépendance de l'intensité et de la forme lumineuse en fonction des particules ionisantes.
- Les cristaux sont peu coûteux et sont faciles à manipuler pour leur donner les formes et caractéristiques désirées.
- Les cristaux sont insensibles aux champs magnétiques.

### 2.2.1 Les caractéristiques du CsI(Tl)

#### Les caractéristiques du signal

L'iodure de césium dopé au thallium (CsI(Tl)) est une substance cristalline inorganique qui a la propriété d'émettre de la lumière lors du passage de particules chargées. Cette lumière sera caractéristique de la particule en fonction de son pouvoir ionisant. Il est possible de distinguer deux composantes principales  $\tau$  de décroissance temporelle dans l'émission du spectre lumineux provenant du CsI(Tl) [STO58],[ALA85],[BEN89],[SCH90],[HOI [WAG01],[FUL57]. La première composante  $\tau_r$  est caractérisée par le pouvoir ionisant de la particule et elle s'étale sur une durée d'environ 700ns. La valeur de cette com-

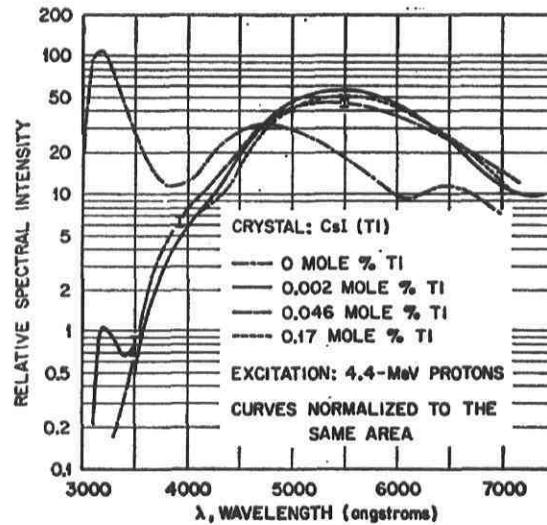


FIG. 2.2: Spectre d'émission du CsI(Tl) pour diverses concentrations de Tl avec des protons incidents de 4.4 MeV, [MUR63]

posante va augmenter lorsque le pouvoir ionisant de la particule incidente augmente. La seconde composante  $\tau_l$  est indépendante du type de particule et s'étale sur une période de  $7\mu s$ . Les valeurs de ces composantes sont encore sujettes à débats. Lorsque la lumière est observée par un photomultiplicateur relié à un oscilloscope, il n'est pas possible d'observer les deux composantes indépendamment, ce qui est observé est la somme des deux composantes, le signal total, tel qu'illustré sur la figure 2.1. Il est alors possible d'établir une relation de l'intensité de la lumière en fonction du temps :

$$L(t) = L_r e^{-\frac{t}{\tau_r}} + L_l e^{-\frac{t}{\tau_l}} \quad (2.1)$$

où  $L(t)$  est l'amplitude de l'impulsion lumineuse à un temps  $t$  et  $L_r$ ,  $L_l$  sont les amplitudes des composantes rapide et lente du signal lumineux. Le maximum d'émission se situe à une longueur d'onde aux environs de 580 nm.

## Le principe de scintillation

Le principe de scintillation du CsI(Tl) est loin d'être un phénomène simple [NAG95], [GOU93], [PÂR01a] et plusieurs théories existent afin d'expliquer ce phénomène. À cette étape de la discussion, il est pertinent de préciser que les caractéristiques des différentes contributions présentes dans le spectre d'émission du CsI(Tl) proviennent de phénomènes physiques indépendants les uns des autres.

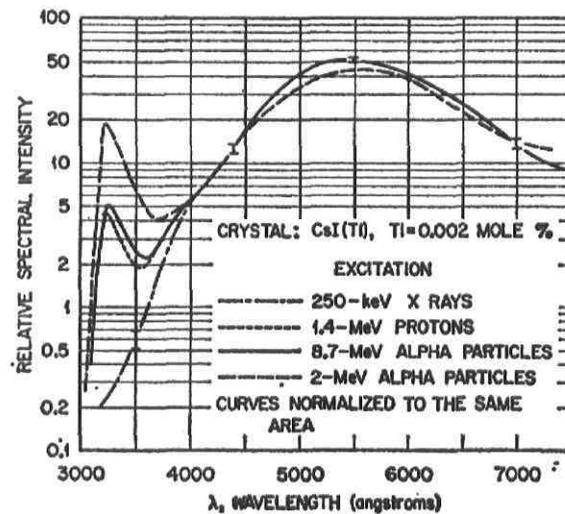


FIG. 2.3: Spectre d'émission du CsI(Tl) en fonction de diverses particules ionisantes. La concentration de Tl est de 0.002 mole % ,[MUR63]

La principale contribution est centrée à 550 nm et son origine est encore sujette à débats. Les travaux de Murray [MUR63] constituent une théorie de base qui a été raffinée au cours des décennies qui ont suivi. Bien que le principe derrière la production de cette bande soit encore mal compris, nous savons par contre qu'elle provient des dopants de thallium qui sont insérés dans la structure cristalline cubique centrée du CsI [HAM01]. Il est possible de corroborer cette affirmation sur la figure [2.2] puisque plus la concentration en thallium augmente, plus la bande localisée à 5500Å domine le spectre d'émission.

Le seconde bande d'émission, qui est caractéristique des cristaux de CsI purs, est localisée à 330 nm. Son origine est grandement liée au pouvoir ionisant ( $dE/dx$ ) des particules qui sont arrêtées dans le cristal de CsI(Tl). Sur la figure [2.3] , il est possible d'observer cette dépendance, car plus la particule est ionisante, plus la bande d'émission localisée à 3300Å est prononcée.

Lorsqu'une particule ionisante pénètre dans le CsI(Tl), elle va générer un certain nombre d'électrons et de trous proportionnel à son ( $dE/dx$ ). Si la particule est arrêtée dans le milieu, le nombre total d'électrons et de trous sera alors proportionnel à l'énergie de la particule au moment où elle pénètre dans le cristal. La recombinaison directe des électrons et des trous mène à la production d'un photon avec une longueur d'onde de 330 nm. Cela vient expliquer la dépendance de cette bande spectrale avec le pouvoir ionisant des particules incidentes. Cependant, le spectre d'émission est dominé par la bande d'émission associé au  $Tl^+$ . La théorie de Murray [MUR63] explique que les

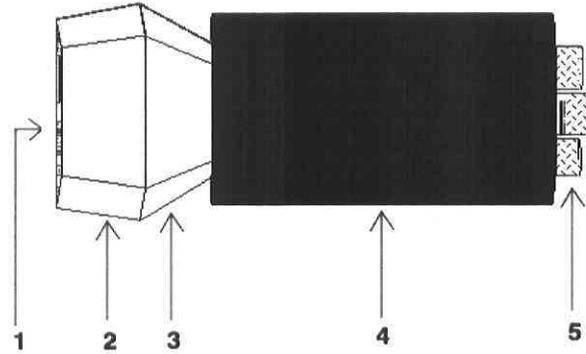


FIG. 2.4: CsI(Tl) originaux. 1 :  $\Delta E$  plastique, 2 : Cristal de CsI(Tl), 3 : Guide de Lumière, 4 : PM Hamamatsu R580, 5 : Connecteurs HV et BNC

trous créés par la particule ionisante peuvent être pris "par eux-même" pour une durée temporelle qui est fonction de la température du cristal. Ainsi, un  $Tl^+$  peut capturer un électron et ensuite, un trou qui est pris "par lui-même" pourra être absorbé par le centre  $Tl^0$ , s'il est thermiquement excité. Cette capture entraînera la production d'une lumière caractéristique des centres  $Tl^+$ .

## 2.3 Les détecteurs originaux d'HÉRACLES

### 2.3.1 La géométrie et caractéristiques originales

Les détecteurs CsI(Tl) d'HÉRACLES à l'origine étaient formés d'une mince couche ( $80\mu\text{m}$ ) de plastique scintillant NE-102A, suivie d'un cristal CsI(Tl) et d'un guide de lumière en Lexguard, un polycarbonate, rattaché à un photomultiplicateur Hamamatsu R580, comme illustré sur la figure [2.4]. La forme trapézoïdale du CsI(Tl) a été conçue afin de permettre de disposer les 16 détecteurs d'un anneau sur toute la largeur d'un arc de la sphère de détection, comme illustré sur les figures [2.5] et [2.6]. Les dimensions exactes du cristal sont disponibles en annexe. L'épaisseur de 3.1cm du CsI(Tl) a été choisie [GOU93] à partir d'un calcul effectué grâce au logiciel STOPEX, afin de pouvoir arrêter des protons possédant une énergie cinétique pouvant aller jusqu'à 100MeV.

Le CsI(Tl) est un matériel légèrement hygroscopique. Ainsi, le polissage des cristaux devient crucial, puisque le CsI(Tl) réagit avec l'air et forme une mince couche blanche en surface, ce qui a pour effet de diminuer la transmission de la lumière entre les interfaces. Ainsi, il est important de bien polir les cristaux à l'aide de papiers avec un

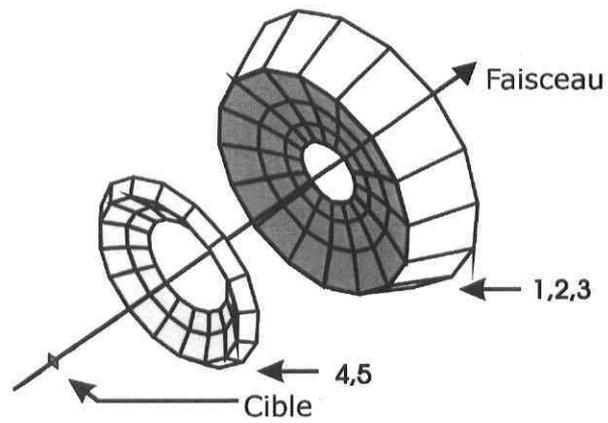


FIG. 2.5: Matrice HÉRACLES, vue schématique des différents anneaux

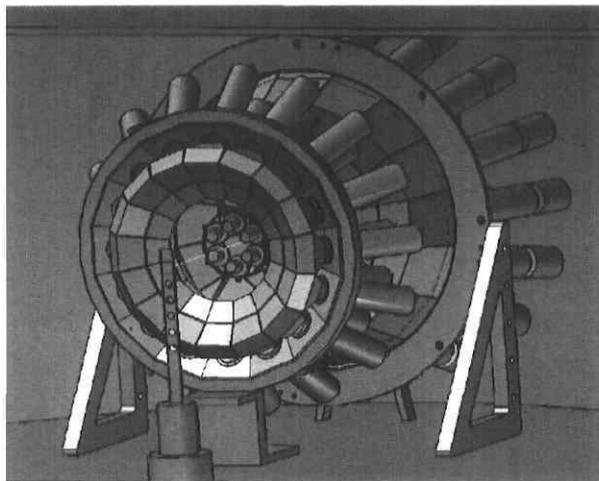


FIG. 2.6: Matrice HÉRACLES, vue en 3D des différents anneaux.

grain de seulement quelques microns et une pâte diamantée à base d'alcool afin de finir le polissage et donner le plus de transparence aux cristaux. Cette tâche a exigé plusieurs dizaines d'heures à Mireille Gourde [GOU93] au début des années 1990, dans le cadre de sa maîtrise.

### 2.3.2 Les tests à l'origine

Au moment de la conception de ces détecteurs, plusieurs simulations furent effectuées et quelques tests furent réalisés afin de déterminer les meilleurs composants pour le guide de lumière et les colles aux interfaces. À l'époque, il a été déterminé qu'un guide en Lexguard, un polycarbonate servant dans la construction de vitres pare-balles, avec un indice de réfraction  $n=1.586$ , serait le meilleur choix. Pour joindre le cristal de CsI(Tl) à ce guide de lumière, une colle UV a été utilisée.

De plus, dans le cadre de son mémoire, Mireille Groude [GOU93] démontre avec des expériences menées au Van De Graaff en 1991, que sans le guide de lumière, la collection de lumière semble moins uniforme. Cependant, dans les quelques résultats disponibles, il est également possible de constater que la résolution de la collection de la lumière se dégrade avec l'introduction d'un guide de lumière.

### 2.3.3 La nouvelle problématique

L'installation de la matrice à TRIUMF impose plusieurs modifications au montage original, pour au moins deux raisons principales : les caractéristiques des réactions qui sont prévues à l'étude et l'âge des détecteurs et du matériel.

#### La nouvelle physique

Il est important que la matrice soit adaptée et remise en état dans l'objectif de l'utiliser avec les faisceaux qui seront disponibles à TRIUMF. Déjà, nous savons que les  $\Delta E$  ne seront plus utilisés afin d'abaisser le seuil des détecteurs et ils ont été enlevés de la surface des CsI. Ensuite, la première vérification qui a été menée consiste à analyser la quantité de photons qui seront produits en considérant l'énergie par nucléon des faisceaux qui seront disponibles à TRIUMF. Il est possible d'avoir une bonne idée de la lumière émise (L) dans le CsI(Tl) en fonction des particules incidentes, de charge Z

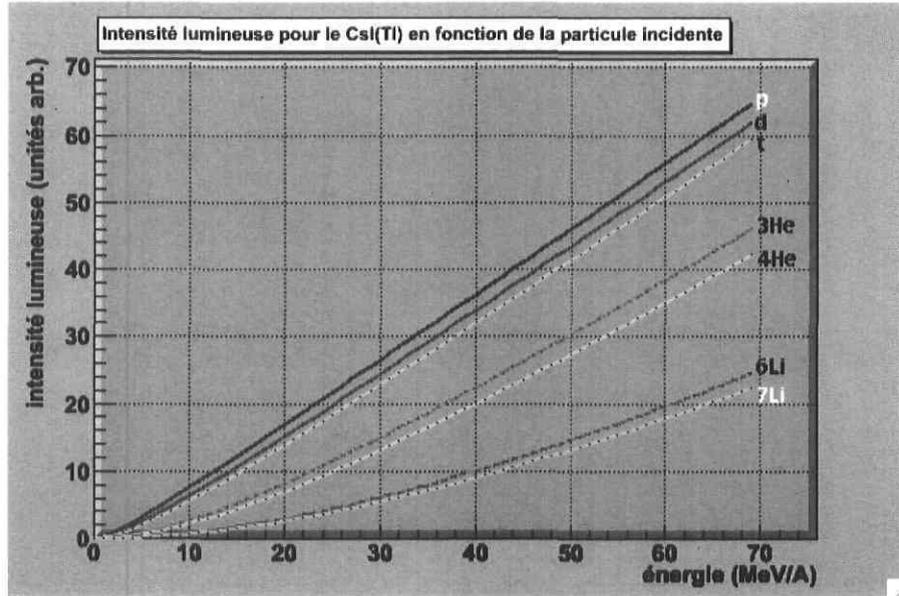


FIG. 2.7: Graphique de l'intensité lumineuse en fonction de différentes particules, selon l'équation [2.2] pour des paramètres arbitraires.

et de masse  $A$ , et de leur énergie ( $E$ ) en utilisant la relation suivante [LAR94] :

$$L(E, Z, A) = a_0 + a_1 \left( E - a_2 A Z^2 \ln \left( \frac{E + a_2 A Z^2}{a_2 A Z^2} \right) \right) \quad (2.2)$$

Les valeurs des constantes  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  peuvent être obtenues à l'aide de données expérimentales. Ce qui nous intéresse dans ce cas-ci, c'est la différence en intensité de la lumière qui sera émise lorsque des protons, ou toute autre particule chargée, entrera dans le cristal de CsI(Tl). L'énergie des faisceaux disponibles à TAMU était d'environ 40 MeV/nucléon (selon les expériences), tandis qu'à TRIUMF, les faisceaux les plus énergétiques, attendus pour 2007-08 auront une énergie d'environ 15 MeV/nucléon. Comme il est possible de le constater sur la figure[2.7], la différence entre la lumière produite pour les différentes particules entre les énergies de TAMU et de TRIUMF est majeure. À TRIUMF, les CsI(Tl) devraient produire moins que la moitié de la lumière qu'ils produisaient à TAMU. Il est alors important que la collection de la lumière dans ces détecteurs soit la plus efficace possible et que la résolution soit au maximum possible. Pour déterminer si la configuration d'origine est à privilégier ou si des modifications s'imposent, des simulations à l'aide du logiciel GEANT4 ont été menées. De plus, une série de tests en laboratoire a été réalisée afin de s'assurer de la validité de ces simulations.

## Les problèmes matériels

Un problème important qui caractérise la matrice est l'état des détecteurs. Les détecteurs ont été montés à Chalkriver, en Ontario, au début des années 1990 et ensuite transportés à TAMU, au Texas, pour ensuite être déménagés une deuxième fois à TRIUMF, Vancouver. Tous ces transports, combinés à plus de 10 ans d'utilisations dans différents milieux ont contribué à la détérioration progressive des détecteurs. Ainsi, comme il est possible de le constater sur la figure [2.8], certains détecteurs ont mal vieilli et la couche de colle UV utilisée pour coller le cristal de CsI(Tl) au guide de lumière semble avoir cristallisé, un peu comme du givre sur des fenêtres mal isolées en hiver.

Ce genre de problèmes techniques doit être absolument corrigé et nécessite de décoller à la fois le guide du cristal, mais également le guide du PM, afin de minimiser les risques de bris en cours de manipulations. Ainsi, si des modifications au niveau de la géométrie des détecteurs est à faire, il s'agit d'un bon moment, vu les réparations qui doivent être effectuées.

Un autre élément important est le coût en temps et en argent des modifications des détecteurs. Ainsi, peu importe la géométrie qui sera déterminée comme étant la plus optimale, le minimum de modifications reste le meilleur choix, en raison du coût des modifications. Il est essentiel que le support original des détecteurs puisse être utilisé afin de minimiser le temps nécessaire aux modifications. Ainsi, dans cette perspective, un nouvel usinage des CsI(Tl) impliquant une modification majeure à la couverture angulaire est à éliminer en raison des coûts et des problèmes techniques qu'il entraîne. Donc, en conclusion, la question est de savoir si on enlève tous les guides de lumière ou est-ce qu'il est plus avantageux de les conserver (ce qui implique une remise à neuf des détecteurs quand même).

## 2.4 Les simulations GÉANT4

Le code de simulation GEANT4 permet de traiter le transport de la lumière dans différents matériaux et son comportement à diverses interfaces, comme la réflexion, la transmission, la réfraction et l'absorption. Il est important de noter que GEANT4 fait une distinction nette entre les photons dits "optiques" et les rayons gamma [GUM02]. Le code utilisé est inspiré de l'exemple novice NO6 [GEA05] et de la présentation de Peter Gumlinger [GUM02].

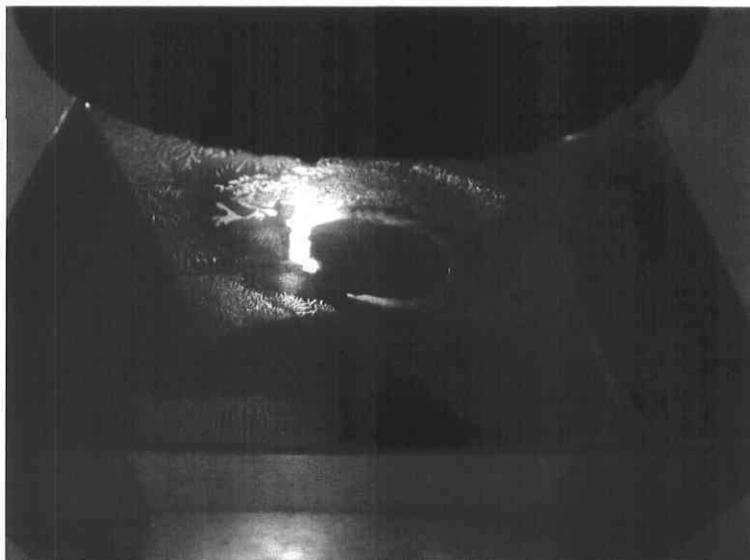


FIG. 2.8: Photo illustrant la détérioration de l'interface entre le cristal et le guide de lumière sur les détecteurs CsI(Tl)

### 2.4.1 Les géométries testées

La première étape des simulations consiste à savoir si le guide de lumière [2.4] qui rattache le cristal de CsI(Tl) au PM réduit la collection de la lumière et de quel facteur. La géométrie originale est donc comparée à une géométrie différente. Après en avoir discuté avec les différents membres du groupe, en tenant compte des tests effectués dans le passé [GOU93] et des limitations techniques et financières, deux principales options ont été retenues pour effectuer les simulations : le détecteur sans guide de lumière (le cristal collé directement sur le PM) et la géométrie originale, comprenant le guide en Lexguard. Il est possible d'avoir un aperçu visuel des deux géométries sur les figure [2.9] et [2.10].

### 2.4.2 Les problèmes de la simulation

Le premier élément que la simulation ne permet pas de reproduire efficacement est la forme trapézoïdale des cristaux. Afin de pouvoir les disposer le plus efficacement possible sur tout un arc de la sphère, les cristaux ont été coupés avec une forme particulière. Cependant, en raison de problèmes rencontrés avec le générateur de volumes de GEANT4, il a été impossible de reproduire cette forme exactement. Le problème origine des faces avant et arrière qui sont deux trapèzes de tailles différentes. Le simula-

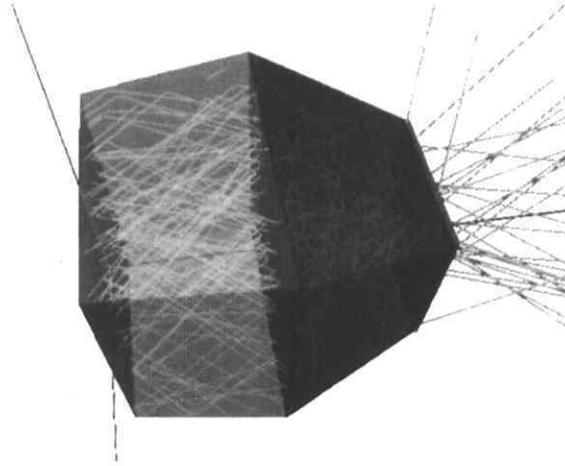


FIG. 2.9: Visualisation de la simulation GEANT4 pour la géométrie originale du détecteur CsI(Tl). En jaune, c'est le cristal de CsI(Tl), en rouge, le guide de lumière, en gris la surface de détection du PM. Les lignes vertes représentent les photons lancés lors de la simulation et les lignes bleu, rouge et violette, les axes des coordonnées  $(x,y,z)$ .

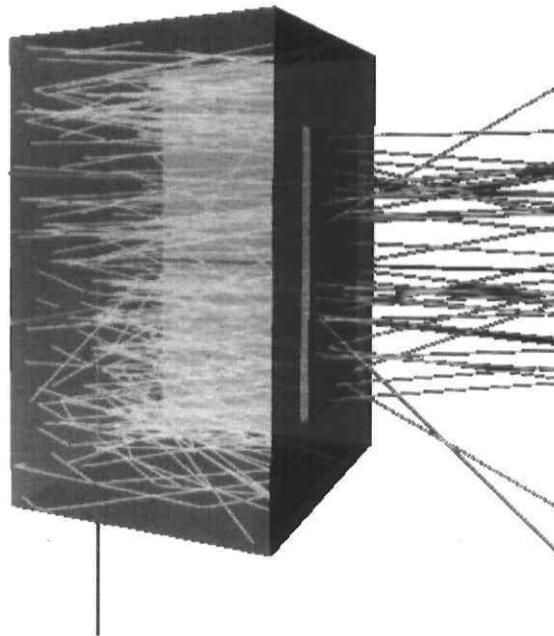


FIG. 2.10: Visualisation de la simulation GEANT4 pour la géométrie sans le guide de lumière. Le volume gris représente le cristal de CsI(Tl) et le jaune la surface de détection du PM. Les lignes vertes représentent les photons lancés lors de la simulation et les lignes rouge et bleu, les axes des coordonnées  $(x,y,z)$ .

teur GEANT4 possède plusieurs fonctions prédéfinies qui gèrent la création de volumes, une pour chaque type de solide qu'on veut simuler. Celle reliée à cette géométrie particulière génère une erreur lorsque les paramètres de la forme réelle du CsI sont indiqués. Pour palier à ce problème, au lieu de faces trapézoïdales, la simulation utilise des faces rectangulaires.

Le second élément qui est difficile à évaluer lors des simulations concerne les divers paramètres de la simulation. Ainsi, il est complexe d'évaluer avec précision le coefficient de réflexion le plus approprié pour ces simulations, puisque ce paramètre dépend de la longueur d'onde, du matériel utilisé pour emballer le détecteur, etc. Ce paramètre peut grandement influencer le nombre de photons qui seront produits à la sortie du détecteur. Le programme de simulation GEANT4 propose diverses alternatives pour tenir compte d'une certaine granularité à la surface des volumes, en plus de tenir compte des coefficients de réfraction, d'un paramètre de réflexion et d'un autre paramètre d'efficacité de transmission, toujours aux interfaces des différents volumes.

### 2.4.3 Les résultats

Avec comme objectif d'obtenir le meilleur aperçu possible, les différents paramètres qui influencent l'efficacité de détection lors des simulations ont été modifiés et testés grâce à plusieurs simulations. Les paramètres sont le libre parcours moyen, la rugosité des parois et leur réflectivité. Il existe d'autres paramètres qu'il est possible de modifier, mais dans le cadre de ces simulations, ce sont ceux qui sont les plus difficiles à évaluer expérimentalement, de manière absolue. Afin de pouvoir établir une base de référence, les valeurs par défaut des paramètres utilisés sont indiquées dans le tableau [2.1].

De plus, les simulations ont toutes été effectuées dans les mêmes conditions générales. Cela implique que le nombre de photons qui sont générés pour chaque simulation est de 100 000 et qu'ils sont distribués aléatoirement sur la face frontale du cristal. La direction de leur impulsion est également aléatoire (mais seulement dans la demi-sphère en direction du PM), ainsi que leur polarisation. Chaque simulation est lancée avec des paramètres invariables durant son exécution, ce qui implique que la variation des paramètres est effectuée entre différentes simulations.

Finalement, le procédé utilisé pour évaluer l'efficacité de détection est le suivant : un volume de détection avec une surface correspondant à celle du PM est généré. Ainsi, lorsqu'un photon pénètre dans ce volume, il est considéré comme détecté par le PM. Donc, l'efficacité de détection sera le ratio du nombre de photons pénétrant dans ce volume sur le nombre de photons émis.

	CsI(Tl)	Plexiglas
Rugosité	0.1 rad	0.1 rad
Réfectivité	0.75	0.75
Indice de réfraction (n)	1.788	1.586
Longueur d'absorption	1.5 m	1.5 m
	Avec guide	Sans guide
Efficacité de détection	34.408 %	40.132 %

TAB. 2.1: Les différents paramètres par défaut des simulations GEANT4, avec le résultat des simulations avec et sans guide pour ces paramètres, avec 100 000 photons lancés.

### Le libre parcours moyen

Le libre parcours moyen, ou encore la longueur d'absorption dans le CsI(Tl), correspond à la distance moyenne (en mètre) qu'un photon peut parcourir avant d'être absorbé par le milieu. Cependant, les cristaux dont nous disposons datent du début des années 90. Le CsI(Tl) étant légèrement hygroscopique, il est raisonnable de penser que le libre parcours moyen des photons sera plus faible que dans le cas d'un cristal "neuf" en raison des réactions qu'il subit avec l'humidité ambiante.

Un autre phénomène qui peut influencer le libre parcours moyen des photons dans les cristaux de CsI est l'exposition prolongée aux radiations. Ces cristaux ont servis dans plusieurs expériences depuis leur introduction dans la matrice HERACLES au début des années 90, ce qui implique plusieurs centaines d'heures d'expositions à des doses variables de radiations. Selon le fabricant Bicron [BIC], le cristal de CsI(Tl) peut perdre de 10 à 15% en transmission de photons après une exposition d'environ 10 Gray. Cependant, certains dommages sont réversibles. Dans la situation présente, il est peu probable que cette cause vienne influencer de manière significative les résultats.

La variation de l'efficacité de détection des photons en fonction du libre parcours moyen peut donc nous donner une bonne idée de la meilleure géométrie à adopter, pour l'ensemble des cristaux. Les résultats présentés sur la figure [2.11] démontrent que pour un libre parcours moyen des photons supérieur à 1m, l'écart d'efficacité de détection entre la géométrie avec un guide de lumière et sans guide est stable et légèrement supérieur à 5%, pour un gain d'environ 15% en collection de lumière. Ce paramètre n'a donc pas vraiment d'impact, tant que la lumière peut se propager sur une distance moyenne de plus d'un mètre.

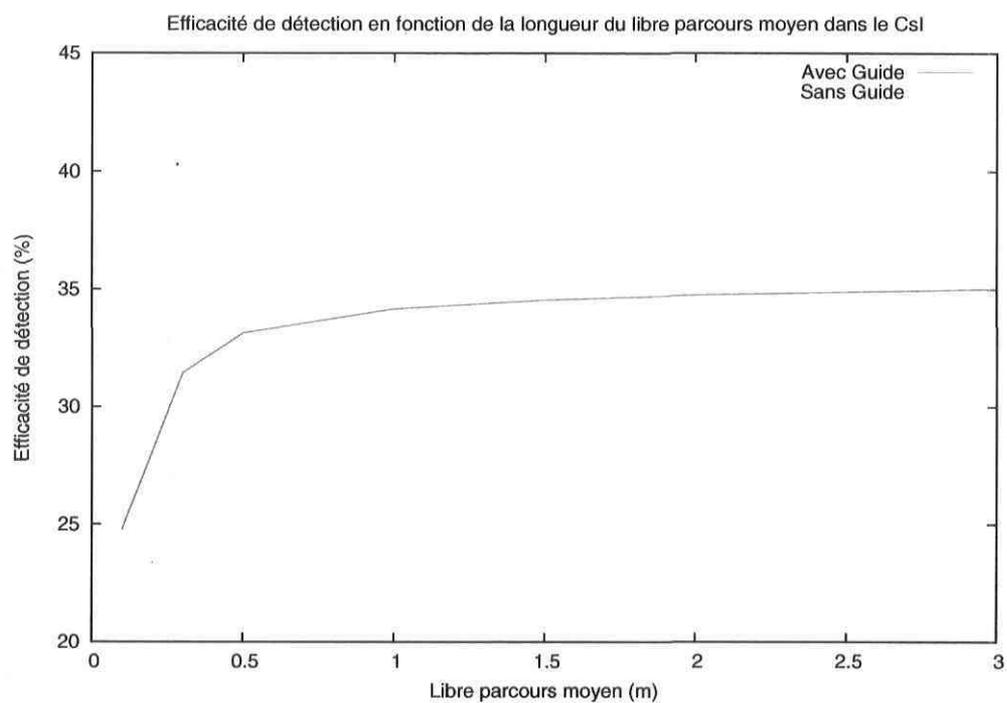


FIG. 2.11: Variation de l'efficacité de détection selon la longueur d'absorption dans le cristal de CsI(Tl), pour 100 000 photons simulés.

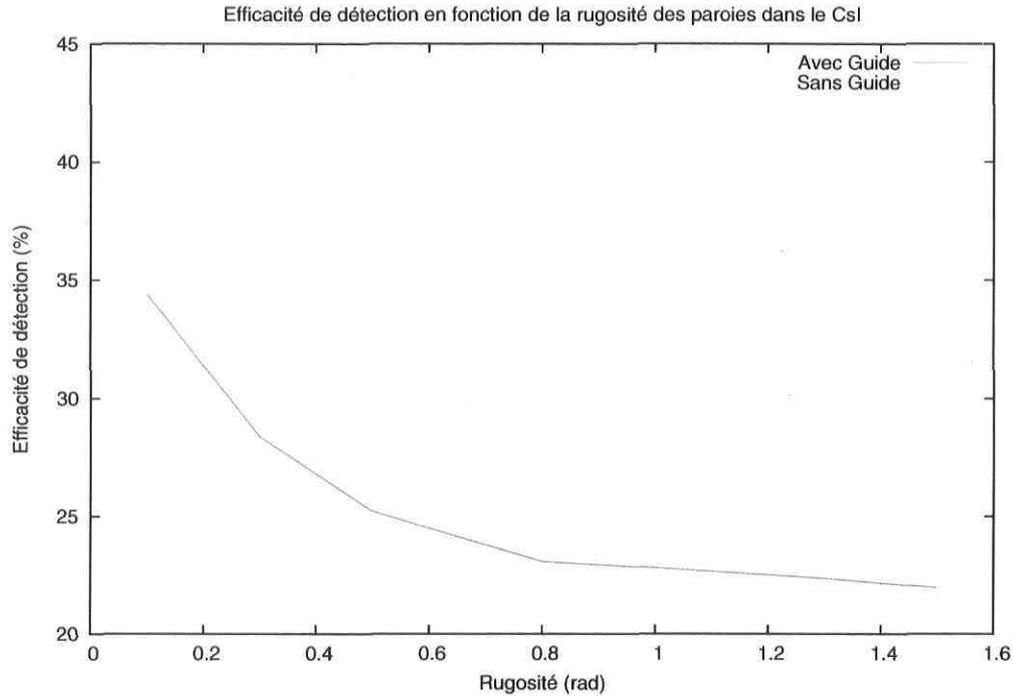


FIG. 2.12: Variation de l'efficacité de détection selon  $\sigma_\alpha$  dans le cristal de CsI(Tl), pour 100 000 photons simulés.

## La rugosité

Il existe différents modèles pouvant gérer différents types de granularité des interfaces dans le code de simulation GEANT4. Les deux types de surfaces qui peuvent être générés sont le type "POLISHED", et le type "GROUND". Le type "POLISHED" considère que la surface est parfaitement polie et que la normale de cette surface est celle qui est définie par la géométrie du volume, tandis que pour le type "GROUND", la surface est composée de micro-facettes. Il faut donc spécifier un angle  $\beta$  entre la normale de cette micro-facette et la surface moyenne. Pour cela, différents modèles sont disponibles. Celui utilisé dans le cadre de ces simulations est le modèle "UNIFIED". Pour ce modèle, il faut spécifier un angle  $\sigma_\alpha$ , en radian. Cet angle sert à déterminer les limites d'une gaussienne comprise entre 0 rad et  $\sigma_\alpha$  rad, sur laquelle on tire une valeur aléatoire afin de déterminer l'orientation en 3D des micro-facettes. Ainsi, la variation du paramètre de rugosité  $\sigma_\alpha$  peut venir influencer l'efficacité de détection.

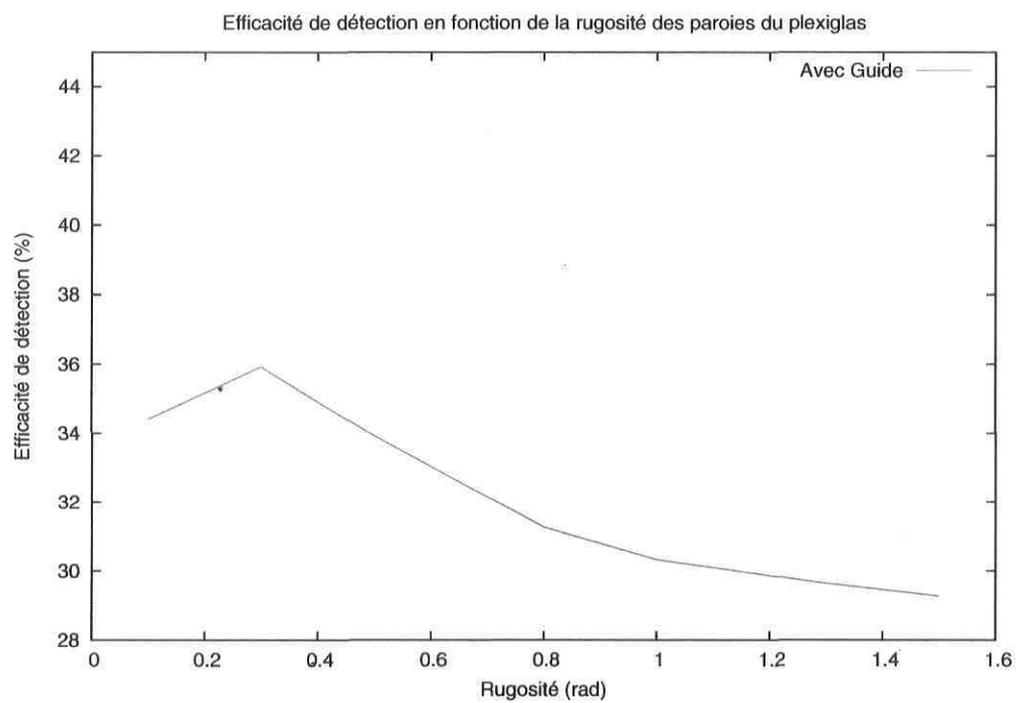


FIG. 2.13: Variation de l'efficacité de détection selon  $\sigma_\alpha$  dans le guide de lumière en plexiglas, pour 100 000 photons simulés.

Les résultats représentés dans les graphiques [2.12] et [2.13] illustrent une nette détérioration de l'efficacité de détection avec l'augmentation du paramètre  $\sigma_\alpha$ . De plus, l'écart entre les différentes configurations de détection est en faveur de l'option sans guide. Il est possible d'observer un écart variant entre 5 et 8 % d'efficacité de détection, ce qui représente un gain variant entre 15 et 25% de la collection de lumière pour la géométrie sans guide de lumière.

### Le coefficient de réflexion

Le dernier paramètre qui est testé dans le cadre de ces simulations est le coefficient de réflexion. Dans le programme de simulation GEANT4, il est possible de spécifier un coefficient qui représente la fraction des photons qui seront réfléchis pour une ou un ensemble de parois appartenant à un volume. Ainsi, il est clair que ce paramètre va venir influencer les résultats obtenus puisque les photons ne sont pas tous générés dans la direction idéale pour être captés par la fenêtre du photomultiplicateur et qu'ils devront ainsi subir un nombre plus ou moins important de réflexions.

Les résultats des simulations sont représentés dans le graphique [2.14]. Il est possible de constater que sans le guide de lumière, l'efficacité de détection est supérieure, mais elle est alors beaucoup plus sensible aux variations de la réflexion à l'intérieur du cristal de CsI(Tl).

#### 2.4.4 Conclusions des simulations GEANT4

Les simulations effectuées à l'aide du programme de simulation GEANT4 permettent de déterminer que sans le guide de lumière, l'efficacité de collection des photons est améliorée d'un gain supérieur à 15 %. Il est également possible de constater que peu importe les variations de divers paramètres, l'efficacité de détection demeure toujours supérieure sans le guide de lumière. Cependant, ces simulations ne permettent pas d'établir si la résolution de la collection de la lumière sera aussi bonne si le guide de lumière est supprimé.

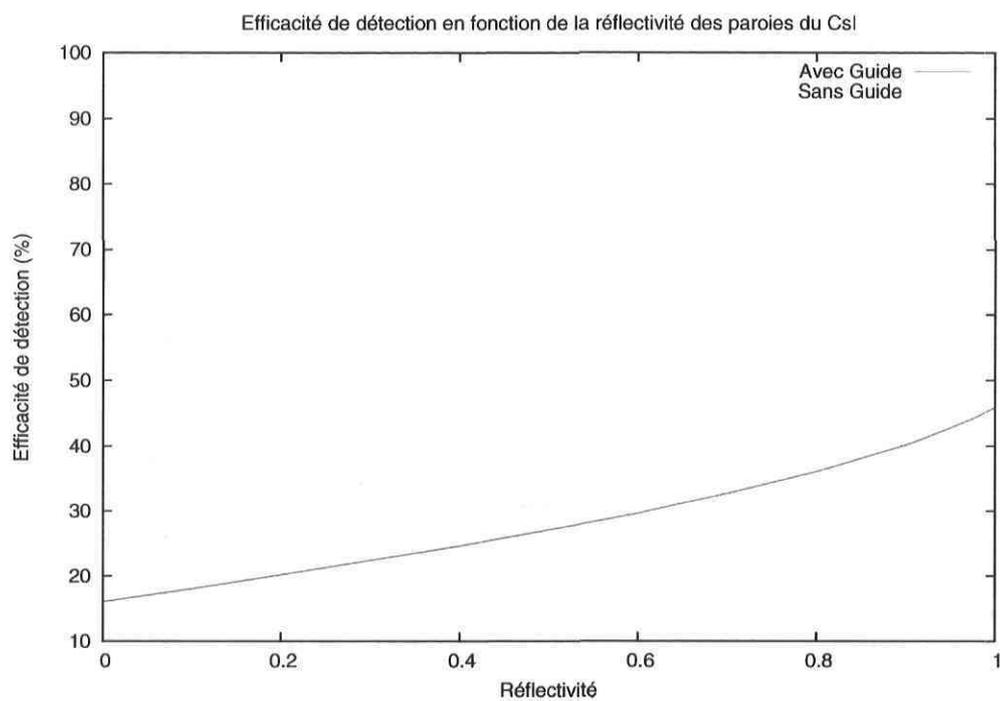


FIG. 2.14: Variation de l'efficacité de détection selon la variation du coefficient de réflexion dans le cristal de CsI(Tl), pour 100 000 photons simulés.

## 2.5 Les tests expérimentaux

Dans le but de vérifier les résultats obtenus avec les simulations, une série de tests en laboratoire a été effectuée. Les tests consistent en la mesure de la position du pic caractéristique produit par des particules alpha dans le CsI(Tl) et analysé par un sélecteur multicanaux. Le sélecteur multicanaux est un appareil qui est relié à un ordinateur et qui sert à identifier et classer les impulsions selon leur amplitude. Il s'agit d'un appareil complexe qui classe les impulsions analogiques en attribuant à chaque valeur d'amplitude, en volt, une allocation mémoire, afin d'emmagasiner le nombre de signaux possédant la même amplitude. Ces cases mémoires sont nommées canaux. La fenêtre d'analyse du sélecteur multicanaux affiche un graphique du nombre de coups en fonction de canaux.

Comme les particules alpha sont produites avec sensiblement toutes la même énergie, les photons produits dans le CsI(Tl) devraient être émis avec sensiblement les mêmes caractéristiques. Ainsi, lorsque les photons sont captés par le photomultiplicateur, il y aura une courbe caractéristique d'une amplitude relativement constante qui sera ainsi générée. Cela aura pour effet de produire un pic sur l'affichage du sélecteur multicanaux, avec deux caractéristiques qui sont essentielles à l'analyse de cette expérience.

La première est la position du pic sur l'axe des canaux de l'affichage du sélecteur. La position du pic est déterminée par le logiciel du sélecteur multicanaux qui fait correspondre une courbe gaussienne sur le spectre obtenu. Plus le pic sera à une position élevée, plus il y a de photons qui sont détectés, car l'amplitude du signal provenant de l'anode du PM dépend du nombre de photons qui sont captés par la photocathode. Donc, si le pic se déplace vers des canaux plus élevés sur l'axe de l'afficheur du sélecteur, cela indique qu'il y a plus de photons en moyenne qui sont collectés, en raison d'une plus grande efficacité de détection.

La seconde caractéristique est la largeur à mi-hauteur du pic (LMH). Cette valeur permet de déterminer si la collection de la lumière est efficace, en effectuant le ratio suivant :

$$R = \frac{LMH}{\text{amplitude} - \text{moyenne}} \quad (2.3)$$

La résolution [2.3] permet d'évaluer les variations relatives dans l'efficacité de la collection lumineuse, d'un événement à un autre. Dans le cas où toutes les particules détectées ont les mêmes caractéristiques, une meilleure résolution sera caractérisée par une diminution de la largeur du pic à la mi-hauteur, sans déplacement du pic (une valeur en pourcentage plus faible). En situation d'expérience, lorsque les particules détectées ne sont pas connues à l'avance, une meilleure résolution permet de mieux distinguer

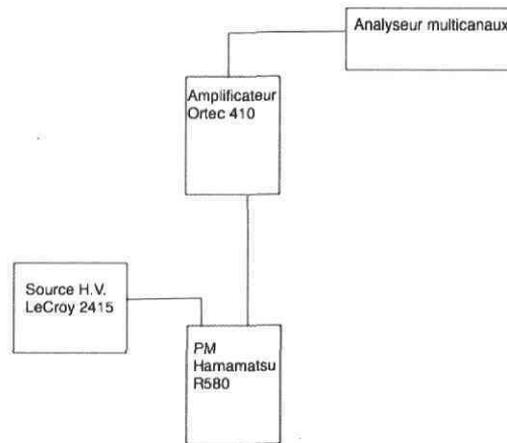


FIG. 2.15: Schéma du montage de l'électronique pour les détecteurs composés de cristaux de CsI(Tl).

les différents éléments et leurs isotopes qui interagissent dans le détecteur. Elle permet également une meilleure précision en énergie sur une base événement par événement.

### 2.5.1 Le montage utilisé

Le montage utilisé est représenté sur le schéma de la figure [2.15]. Il s'agit d'un montage simple, afin de minimiser les variations de mesures entre les différentes expériences. La source radioactive utilisée est une pastille d'américium 241, produisant des particules alpha d'une énergie de 5.44 MeV et 5.48 MeV. La portée moyenne dans l'aluminium pour ces particules à cette énergie est de  $25\mu\text{m}$ . Un collimateur en Al d'un diamètre de 1mm est placé devant la source afin de sélectionner des particules  $\alpha$  se propageant dans la même direction, puisque la perte d'énergie dans l'air peut être importante sur des courtes distances.

Dans le but d'effectuer une comparaison la plus juste possible, l'interface entre le CsI(Tl) et le guide de lumière a été enlevée, les parois nettoyées et le medium de contact remplacé par de la graisse optique. Les tests ont été menés sur un détecteur de l'anneau 4 et de l'anneau 5 (voir les figures [2.5],[2.6]).

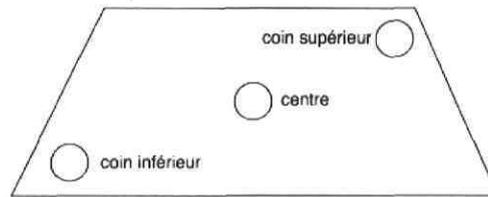


FIG. 2.16: Position des divers trous pour positionner la source alpha sur la surface avant des cristaux de CsI(Tl).

Finalement, afin d'uniformiser les résultats entre les différentes prises de mesures, un guide pour placer la source à trois différentes positions sur la surface avant du cristal a été conçu, tel qu'illustré sur la figure [2.16]. Il s'agit d'une feuille épaisse d'aluminium avec 3 trous de 5 mm de diamètre. Cette feuille sert également de couverture réfléchissante pour la face frontale du détecteur.

## 2.5.2 Les résultats

Les résultats sont divisés en trois catégories : stabilité du montage, détecteurs anneau 5, détecteurs anneau 4. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques (spectres obtenus sur le sélecteur multicanaux).

### La stabilité du montage

Pour confirmer que le montage est assez stable entre 2 mesures, sur une période qui peut s'étaler sur plusieurs heures, une expérience a été effectuée en fin de journée et a été reprise le lendemain matin, après une nuit où le montage a été mis hors tension. Les résultats sont disponibles dans le tableau [2.2].

### Le détecteur de l'anneau 5

Les résultats des expériences menées sur le détecteur de l'anneau 5 sont donnés dans le tableau [2.3] et illustrés dans le graphique [2.17]. Il est possible de constater que sans

	28 février 2005	1 mars 2005
position du pic (canal)	368.26	371.96
LMH	23.10	22.92
Résolution (%)	6.3	6.2

TAB. 2.2: Variation des mesures entre 2 expériences espacées dans le temps. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 300 secondes, avec un détecteur de l'anneau 5.

le guide de lumière, la collection de lumière est plus efficace, car la position du pic en canaux est plus élevée, ainsi que l'amplitude observée à l'oscilloscope. Les résolutions des mesures sans guide sont du même ordre de grandeur, légèrement supérieures à celles obtenues avec le guide de lumière.

Un autre résultat important à noter, est l'uniformité de la collection de lumière pour les différentes positions de la source d'américium sur la surface du cristal. Pour ce détecteur, l'uniformité semble meilleure, puisque la résolution reste davantage constante. Il est aussi intéressant de remarquer que la résolution est toujours moins bonne dans le coin inférieur, en raison de la forme géométrique du cristal. En effet, comme ce coin forme un angle aigu, le nombre de réflexions avant qu'un photon traverse le cristal peut être plus élevé que pour un angle obtus.

Finalement, l'analyse du rapport signal sur bruit nous apprend que le signal se distingue davantage du bruit dans le cas sans guide de lumière. Cette donnée est particulièrement intéressante, puisque les expériences seront menées à des énergies plus basses, d'où la nécessité d'avoir un signal qui se distingue plus facilement du bruit.

#### Le détecteur de l'anneau 4

Les résultats concernant les tests effectués sur le détecteur CsI(Tl) de l'anneau 4 sont donnés dans le tableau [2.4] et illustrés dans la figure [2.18]. Comme dans le cas des détecteurs de l'anneau 5, la collection de lumière est meilleure sans guide, puisque la position des pics est plus élevée sur l'échelle du sélecteur multi-canaux, ainsi que la tension observée à l'oscilloscope. Les valeurs des résolutions montrent le même comportement et sont légèrement meilleures dans les cas sans guide de lumière. Aussi, il est intéressant de noter que les tensions observées pour le détecteur de l'anneau 4 sont plus élevées que celles observées par le détecteur de l'anneau 5, en raison du volume du détecteur qui est plus faible, dans le cas de l'anneau 4, ce qui permet à plus de photons

	Pic (canal)	LMH (canaux)	Amplitude (V)	Résolution (%)	Signal/bruit
Avec le guide de lumière					
coin inférieur	548.51	39.47	$1.56 \pm 0.2$	7.2	2.2
centre	461.32	30.91	$1.26 \pm 0.2$	6.7	1.77
coin supérieur	527.66	34.49	$1.56 \pm 0.2$	6.5	1.76
Sans le guide de lumière					
coin inférieur	1265.95	82.26	$4.12 \pm 0.4$	6.5	3.17
centre	1199.30	66.23	$3.76 \pm 0.4$	5.5	3.00
coin supérieur	1250.78	69.25	$4.06 \pm 0.4$	5.5	3.13

TAB. 2.3: Résultats des expériences sur le détecteur de l'anneau 5. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 300 secondes, avec une tension d'alimentation au PM de -1050V.

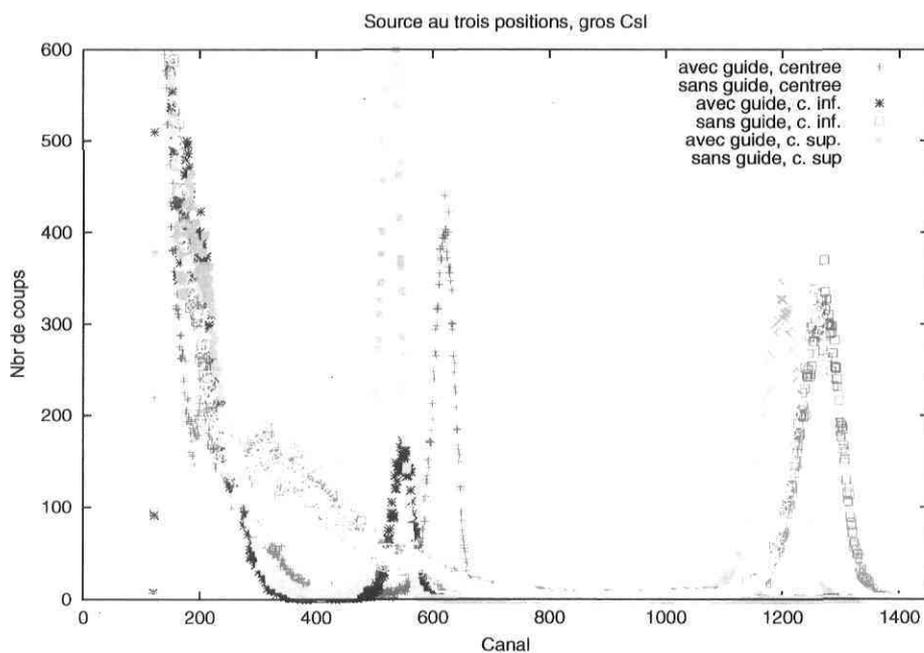


FIG. 2.17: Position des différents pics tels qu'observés sur le sélecteur multicanaux pour le détecteur de l'anneau 5.

	Pic (canal)	LMH (canaux)	Amplitude (V)	Résolution (%)	Signal/bruit
Avec le guide de lumière					
coin inférieur	608.94	42.33	$1.72 \pm 0.2$	7.0	3.04
centre	619.79	40.12	$1.72 \pm 0.2$	6.5	2.82
coin supérieur	610.51	40.09	$1.72 \pm 0.2$	6.6	2.77
Sans le guide de lumière					
coin inférieur	1550.17	105.26	$4.88 \pm 0.5$	6.8	7.05
centre	1485.62	76.65	$4.7 \pm 0.5$	5.2	6.75
coin supérieur	1528.58	83.76	$4.75 \pm 0.5$	5.5	5.09

TAB. 2.4: Résultats des expériences sur le détecteur de l’anneau 4. Mesures effectuées sur une période d’acquisition de données de 300 secondes, avec une tension d’alimentation au PM de -1050V.

d’être captés par le PM avant d’être absorbés par le milieu.

Dans le cas de ce détecteur, l’uniformité de collection lumineuse est moins bonne dans le cas sans guide de lumière. Ce résultat vient en contradiction avec celui obtenu pour le détecteur de l’anneau 5. Toutefois, en raison de la différence peu marquée entre la résolution avec et sans guide de lumière, cette observable n’a pas été retenue comme caractéristique décisive pour évaluer si le guide serait conservé. Afin d’obtenir une réponse plus claire, à savoir si la résolution est meilleure avec ou sans guide, il aurait fallu tester quelques détecteurs supplémentaires.

En dernier lieu, comme pour le détecteur de l’anneau 5, le rapport du signal sur le bruit est meilleur pour un détecteur sans guide de lumière. Toutes ces observations viennent confirmer que les guides nuisent davantage pour le type d’expériences qui seront menées.

## 2.6 Les modifications retenues

### 2.6.1 La nouvelle géométrie

La nouvelle géométrie des détecteurs CsI(Tl) des anneaux 4 et 5 de la matrice HERACLES est illustrée sur la figure[2.19]. Cette géométrie est le choix retenu en raison de la simplicité de la modification, du faible coût relié aux manipulations et

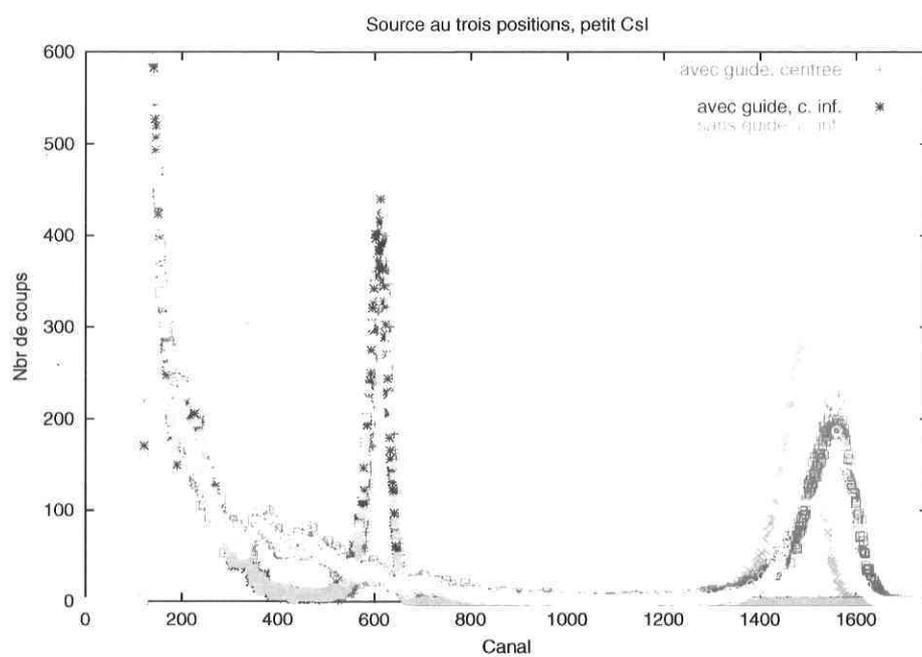


FIG. 2.18: Position des différents pics tels qu'observés sur le sélecteur multicanaux pour le détecteur de l'anneau 4.

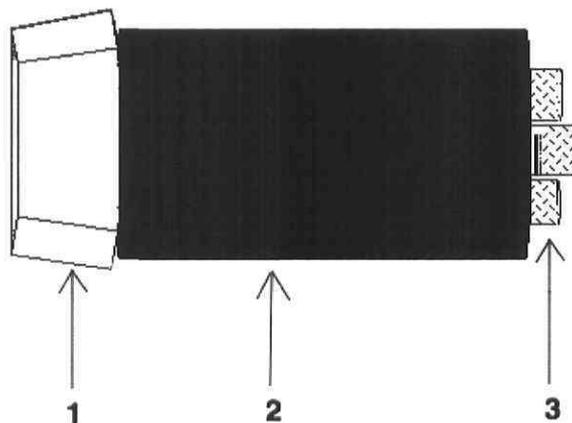


FIG. 2.19: Nouvelle géométrie des détecteurs CsI(Tl) des anneaux 4 et 5. Légende : 1 ; cristal CsI(Tl), 2 ; PM Hamamatsu R580, 3 ; connecteurs H.V. et BNC

des gains obtenus dans les différentes simulations et tests effectués en laboratoire. Les détecteurs ont subi leur modification au cours du printemps 2005, grâce au travail de 2 étudiants d'été et d'un collègue au doctorat. Les cristaux ont été nettoyés, polis et collés directement sur la face en borosilicate des PM, grâce à la colle optique BC-600. Ils ont été enveloppés de papier d'aluminium sauf pour la face frontale qui a été recouverte de mylar aluminisé. L'opération a nécessité plusieurs dizaines d'heures de travail.

## 2.6.2 Vérification des modifications

Après avoir modifié tous les détecteurs des anneaux 4 et 5, il était important de vérifier si tous les détecteurs étaient toujours en mesure de fonctionner, au cas où, dans une manipulation, un PM aurait été brisé. Le montage utilisé pour ces tests est un système CAMAC relié à un ordinateur, afin de pouvoir analyser les signaux en provenance des PM avec la technique d'analyse rapide-lente. Cette technique consiste à intégrer la partie rapide et lente du signal (voir figure [2.1]) et d'effectuer un graphique en 3D de la valeur d'intégration rapide en fonction de la lente, le nombre de coups étant la troisième dimension. Les particules identiques devraient se retrouver sur une droite, et concentrées en un point si elles possèdent toutes la même énergie cinétique.

Le montage utilisé est représenté à la figure [2.21]. Le principe est le suivant : le signal analogique en provenance du PM est divisé en 2. La première branche sera celle intégrée par le QDC tandis que la seconde servira à générer les portes logiques pour spécifier au QDC quand commencer et arrêter l'intégration du signal. La synchronisation des portes par rapport au signal provenant du CsI(Tl) est illustrée sur la figure [2.20]. Le

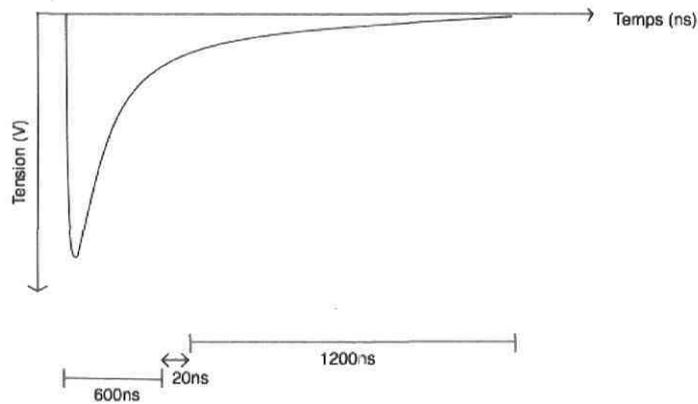


FIG. 2.20: Synchronisation des portes rapides et lentes par rapport au signal, pour un CsI(Tl).

signal de la première branche doit être retardé afin d'être synchronisé avec les signaux logiques produits par le système. Afin de générer les portes logiques, il faut que le discriminateur (FCC8) soit déclenché par un signal analogique (qui provient du PM) qui dépasse un seuil fixé manuellement. Lorsqu'il est déclenché, il envoie une impulsion logique qui sera divisée par un FIFO ("first in, first out"), en trois branches. Une de ces branches est reliée au "CD Register" qui précise au module CAMAC qu'il doit acquérir l'information pour la transmettre à l'ordinateur. La deuxième branche se rend à un module générateur de portes ("Gate generator"). Ce générateur génère 2 portes. La première sert au "controler unit" qui bloque l'arrivée de nouveaux signaux durant une période correspondant à la largeur de la porte logique et correspondante à la durée d'acquisition d'un événement. La seconde porte sert à préciser au QDC le début et la fin de l'intégration sur l'impulsion analogique du PM. Cette porte sert à déterminer la composante lente du signal. Revenons au dernier signal sortant du FIFO. Il est envoyé à une unité logique, qui sert à générer la porte pour préciser le début et la fin de l'intégration sur le signal analogique du PM afin d'évaluer la composante rapide du signal. Il est nécessaire d'utiliser ce module, car la composante rapide est beaucoup plus courte que la lente et la durée de la porte doit être alors beaucoup plus petite. Ainsi, ce module ne peut générer la porte lente et vice-versa.

Les détecteurs ont été testés avec une source de particules alpha connue,  $^{241}\text{Am}$ , avec un collimateur de 3 mm de diamètre et de 2mm d'épais. Les faces frontales des détecteurs étaient recouvertes d'un mylar aluminisé et la source était collée directement sur le mylar.

Les résultats de ces tests sont disponibles en annexe. En général, il semble que tous

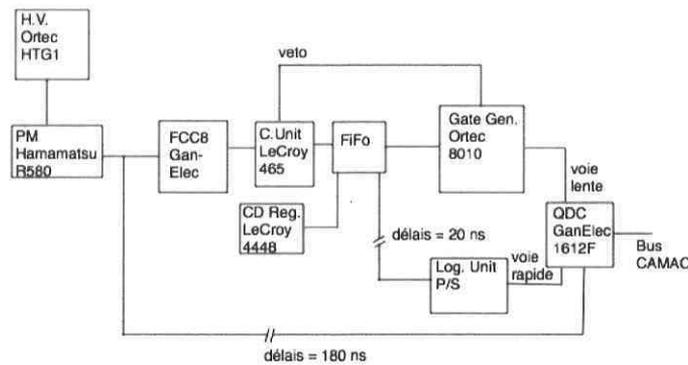


FIG. 2.21: Schéma du montage CAMAC utilisé pour tester les CsI(Tl).

les détecteurs fonctionnent correctement. Cependant, leur gain n'est pas identique, ce qui est explicable en raison de la sensibilité de ces appareils et du nombre d'utilisations qu'ils ont eues.

### 2.6.3 Tests sous vide

Après avoir modifié tous les détecteurs, une série de tests a été effectuée dans la chambre à vide du Van De Graaff avec un système d'acquisition similaire à celui qui sera utilisé dans le cadre des expériences à TRIUMF. Le montage est illustré dans le schéma de la figure [2.22]. Le but est d'obtenir une confirmation que les modifications au détecteurs seront bénéfiques en situation réelle d'expérience et que l'uniformité de détection est bonne sur toute la surface de détection et non juste à trois positions précises.

#### Le montage expérimental

Pour cela, un détecteur de chaque anneau (4 et 5) a été installé dans une chambre à vide, avec une source radioactive  $^{241}\text{Am}$ , non-collimatée et à 14.5 cm de la surface frontale du détecteur. La surface frontale des détecteurs a été recouverte d'une feuille de mylar aluminisée de  $2\ \mu\text{m}$ , afin de laisser passer les particules alpha tout en réfléchissant la lumière produite à l'intérieur du cristal de CsI(Tl). Les détecteurs utilisés sont ceux qui ont été modifiés à TRIUMF, ainsi le cristal est directement collé sur la surface de collection de lumière du PM, avec de la colle optique BC-600.

	Position du pic (u. arb.)	LMH (u. arb.)	Amplitude (mV)	Résolution (%)
anneau 4	2695	212	140	7.87
anneau 5	2366	160	240	6.76

TAB. 2.5: Résultats des expériences sous vide pour un détecteur de l'anneau 4 et de l'anneau 5. Mesures effectuées sur une période d'acquisition de données de 50 minutes pour le détecteurs de l'anneau 4 et 20 min. pour le détecteur de l'anneau 5, avec une tension d'alimentation au PM de -980V dans les 2 cas.

	Position du pic (canal)	LMH (canaux)	Résolution (%)
anneau 4	1453.87	115.79	7.96
anneau 5	1120.99	68.30	6.1

TAB. 2.6: Résultats des expériences sous vide sur les détecteur de l'anneau 4 et 5, avec le sélecteur multicanaux. Mesures effectuées avec une tension d'alimentation au PM de -980V.

L'analyse est effectuée grâce à un système CAMAC relié à un ordinateur localisé à 50m de la chambre à vide. Le signal analogique en provenance du PM est intégré par le QDC lorsqu'une porte est générée par le module RDV 8/16, qui se déclenche lorsque le FCC8 envoie un signal, pour signifier qu'il y a un signal analogique qui est prêt à être analysé. Le signal au complet est intégré, puisque l'information qui est recherchée est la résolution de détection avec un tel système. Donc, si la collection de lumière est uniforme, les valeurs d'intégration des signaux en provenance du PM devraient être toutes concentrées dans un pic avec une résolution élevée, puisque les particules émises de cette source sont très uniformes en énergie.

## Les résultats

Les résultats sont présentés dans le tableau [2.5]. En plus des tests avec un système CAMAC, une série de tests avec le sélecteur multicanaux, avec le même montage que dans la section [2.5], a été effectuée. Les résultats sont présentés dans le tableau [2.6].

Ces résultats viennent confirmer que la résolution globale des détecteurs modifiés est comparable à des expériences passées [GOU93], malgré le fait qu'ils n'ont plus de guide de lumière. Les détecteurs CsI(Tl) de la matrices HÉRACLES ont été modifiés selon ces spécifications, afin d'optimiser ces détecteurs pour les expériences qui seront menées à TRIUMF dans les années à venir.

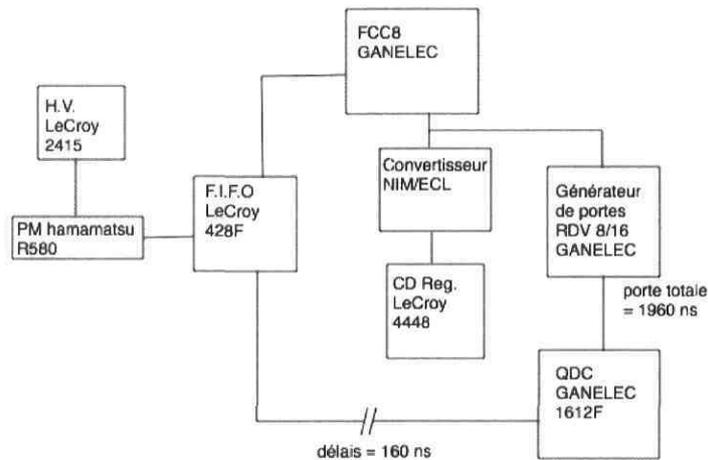


FIG. 2.22: Schéma du montage pour l'expérience sous vide avec les détecteurs CsI(Tl) modifiés.

## 2.7 Conclusion

Lors de la conception de la matrice CRL-Laval, les détecteurs CsI(Tl) ont été équipés d'un guide de lumière afin d'uniformiser la collection de la lumière. Cependant, les simulations et les tests expérimentaux effectués dans le cadre de ce mémoire démontrent que l'introduction de ces guides altère grandement la collection de lumière. De plus, la collection de la lumière n'est pas toujours plus uniforme, comme le démontre les tests effectués sur le détecteur de l'anneau 5. Comme les énergies des faisceaux attendus à TRIUMF seront beaucoup plus faibles que celles disponibles dans les expériences passées, il est important que la collections d'information soit optimisée au maximum dans ces détecteurs.

# Chapitre 3

## Les détecteurs à position

### 3.1 Introduction

Les détecteurs à position ont déjà fait l'objet du travail de maîtrise de Guy-Philippe Gélinas [GÉL05]. Cependant, à cause d'un problème majeur lors des manipulations, les résultats obtenus n'ont pas permis de conclure sur l'utilisation potentielle de ces détecteurs dans une version future de la matrice HERACLES. Le but du travail effectué dans cette section est de corriger cette erreur et d'effectuer les tests afin de parvenir à une conclusion sur l'utilisation de ces détecteurs dans une future expérience, avec comme objectif de le combiner à un scintillateur pour effectuer l'identification de particules chargées.

### 3.2 Le montage expérimental

Plusieurs modèles de photomultiplicateurs à position ("mapmt" pour "MultiAnode PhotoMultiplier Tube", ou encore "PMP" pour PhotoMultiplicateur à Position, en français) existent sur le marché. Ces photomultiplicateurs ont comme principale caractéristique plusieurs anodes comprises dans un même module. Ainsi, sur un même module, il est possible de retrouver plusieurs zones indépendantes sur la surface de collection de lumière, permettant d'obtenir un signal pour chaque zone individuellement. Ce système peut être comparé à la situation où on assemblerait un certain nombre de PM côte à côte, mais à une échelle beaucoup plus petite.

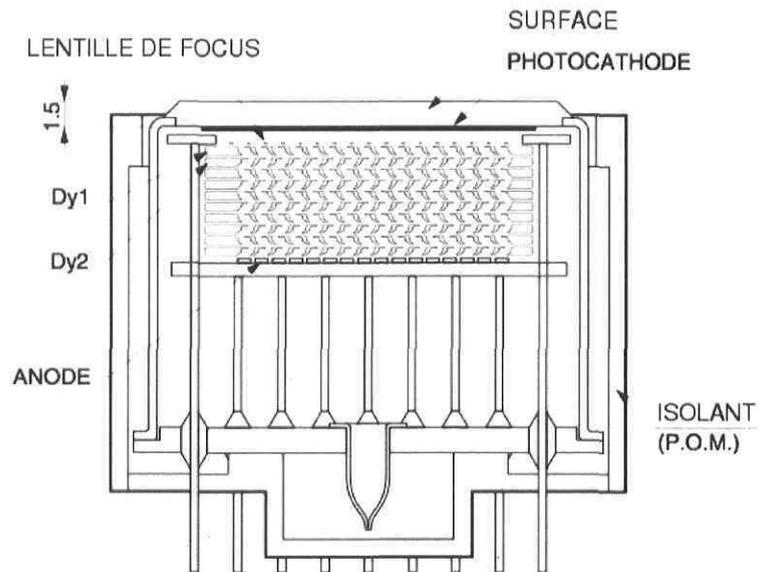


FIG. 3.1: Schéma du PM à positions.

Ce genre d'appareil permet ainsi d'effectuer une analyse en position beaucoup plus précise et c'est le genre de détails qui peuvent devenir cruciaux dans une étude de corrélation. C'est pourquoi, dans le cadre d'une future expérience HERACLES, ce genre de photomultiplicateur combiné à un scintillateur adéquat peut devenir très intéressant.

### 3.2.1 Les différents modèles

Les différents modèles utilisés dans le cadre des expériences menées sur cette catégorie de PM proviennent tous de la compagnie nipponne Hamamatsu. Deux modèles de la série R5900 ont été utilisés et ils se distinguent facilement, par la forme et la disposition des anodes, observables à la surface de collection de lumière. Le premier R5900U-00-M16 est construit avec 16 anodes réparties en cellules carrées sur la surface. Le second, R5900U-00-L16, est également composé de 16 anodes, mais réparties en bandes linéaires. Les dimensions du modèle linéaire (R5900U-00-L16) sont identifiées sur la figure [3.2]. Ce modèle procure une information uniquement en une dimension, selon l'orientation dans l'espace du détecteur. Cependant, le R5900U-00-M16 n'a pu être utilisé car il se produisait des décharges même à basse tension.

Le schéma de la figure [3.1] illustre clairement qu'il s'agit d'un photomultiplicateur utilisant 10 étages de dynodes, sur une distance aussi courte que 1 cm. Dans le cas

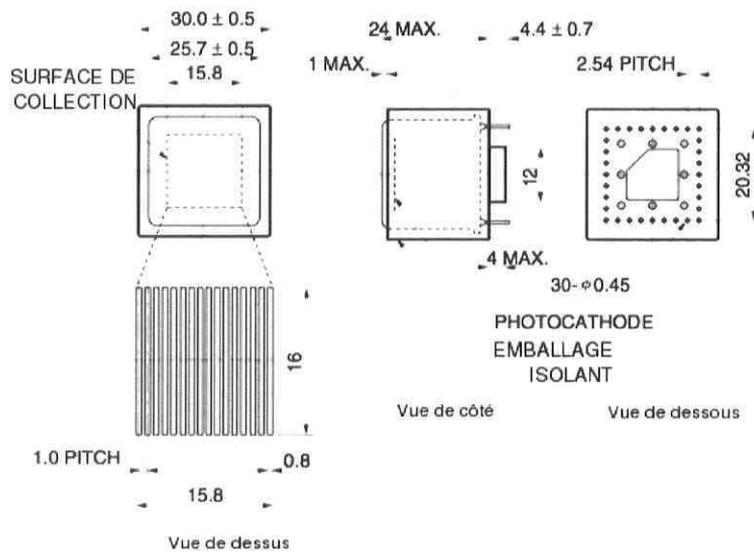


FIG. 3.2: Dimensions du PM à position R5900U-00-L16, en mm.

d'un photomultiplicateur plus "traditionnel", le nombre d'étages est le même que dans le cas d'un PM hamamatsu R580 (ceux qui sont utilisés pour les anneaux 4 et 5 de la matrice HERACLES), mais les étages sont espacés sur une distance d'environ 10cm. Ainsi, le R5900U-00-L16 est un PM ultra-compact, qu'il est possible de positionner à des endroits inaccessibles aux autres PM à cause de leur taille.

### 3.2.2 Mesures de résolution de pic gamma

La première série d'expériences consiste à analyser le spectre de sources gamma composées de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{60}\text{Co}$ , afin de déterminer la résolution du pic observé à l'oscilloscope, en provenance d'un cristal  $\text{NaI}(\text{Tl})$ . Le cristal est de forme cylindrique, avec un diamètre de 3cm, et une hauteur de 3 cm également. Ces expériences ont été effectuées avec comme objectif de vérifier l'état de fonctionnement du PMP, puis qu'auparavant aucun spectre caractéristique d'une source radioactive n'a été obtenu à l'aide de ce photomultiplicateur.

Les spectres des sources gamma de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{60}\text{Co}$  sont bien connus [ORT84]. Les spectres théoriques sont disponibles en annexe. Le pic photoélectrique de la source de  $^{137}\text{Cs}$  doit être à 662 keV et ceux du  $^{60}\text{Co}$  à 1.17 MeV et 1.33 MeV. Le cristal utilisé est un  $\text{NaI}(\text{Tl})$  de la compagnie ORTEC, modèle 1R1. Le montage utilisé est illustré sur la figure [3.3].

La première remarque importante à effectuer sur ce montage concerne la grosseur du cristal de NaI(Tl). Comme ce cristal est fortement hygroscopique, il est scellé dans un emballage métallique, à l'abri de l'humidité de l'air ambiant. Ainsi, à cause du format plus volumineux imposé par cet emballage, la surface du cristal recouvre toute l'aire de la surface de collection des 16 anodes. Donc, approximativement, une photocathode se retrouve à collecter 1/16 des photons émis lorsque les gammas interagissent dans le NaI(Tl). Un couplage des différents canaux est alors nécessaire pour obtenir une résolution qui représente la véritable résolution du système. Ainsi, lorsque dans ce travail les canaux sont dits "sommés", une jonction en "T" est utilisée pour coupler le signal en provenance de 2 canaux différents.

La seconde remarque concerne l'ajout de la résistance de 1 M $\Omega$  en parallèle à l'entrée du système d'analyse. Cette résistance permet à l'anode d'éviter de se décharger et ainsi de maintenir le courant constant à la sortie du PMP.

### 3.2.3 Les mesures de résolution d'un canal

Afin d'effectuer une mesure plus précise sur la résolution d'un canal, un cristal de CsI(Tl) a été taillé avec les dimensions illustrées sur la figure [3.4]. Le morceau est emballé soigneusement dans du mylar aluminisé. Une source de  $^{241}\text{Am}$  est placée sur la surface de ce morceau, afin de produire un pic observable au sélecteur multicanaux. Un guide métallique a été taillé pour pouvoir centrer le cristal sur chaque canal du photomultiplicateur. La jonction entre le cristal et la vitre du PMP est assurée par de la graisse optique. Ce type d'analyse est similaire à celle effectuée au chapitre 2 de ce mémoire.

### 3.2.4 Les mesures de diaphonie

Les mesures de diaphonie consistent à vérifier si la lumière produite par le cristal est captée par plus d'un canal à la fois, lorsqu'un cristal de CsI(Tl) est taillé et placé pour qu'un seul canal ne soit recouvert. Une source  $\alpha$  est utilisée pour obtenir une scintillation dans le cristal, sans toutefois avoir comme objectif d'obtenir la meilleure résolution possible. Il s'agit donc de mesurer la tension sur l'ensemble des anodes. En considérant que le cristal est bien centré sur la photocathode, un signal très faible devrait être capté sur les anodes avoisinantes. La compagnie Hamamatsu a évalué [3.5] ce phénomène à l'aide d'un signal très précis, provenant d'une lampe au tungstène caractérisée par une surface d'éclairage de 100 $\mu\text{m}$ . Les évaluations de Hamamatsu prévoient un niveau de

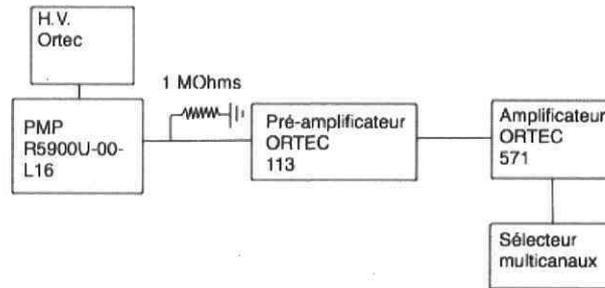


FIG. 3.3: Schéma du montage pour la spectroscopie gamma.

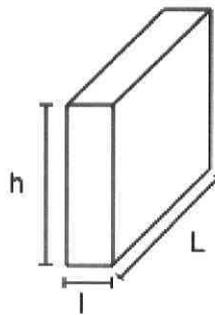


FIG. 3.4: Dimensions du cristal de CsI(Tl) utilisé dans les tests avec le PMP. Les dimensions sont :  $h = 8\text{mm}$ ,  $l = 1.5\text{mm}$  et  $L = 15\text{mm}$

diaphonie très faible.

## 3.3 Les résultats

### 3.3.1 Mesures de résolution de pic gamma

Les spectres ont été obtenus avec les réglages suivants pour le PMP (pour les deux sources radioactives) :

- Tension d'alimentation = -700V
- Capacité sur la pré-amplification = 0pF
- Gain sur l'amplificateur = 200

Il est important de noter que dans les deux cas, les canaux 2 à 14 sont additionnés. Enfin, le sélecteur multicanaux a un piédestal de 108 canaux, ce qui doit être pris en compte lors des calculs de résolution.

#### Spectroscopie de la source $^{137}\text{Cs}$

La source de  $^{137}\text{Cs}$  est collée sur la surface métallique de l'emballage du cristal. Le spectre obtenu est présenté sur la figure [3.6].

#### Spectroscopie de la source $^{60}\text{Co}$

La source de  $^{60}\text{Co}$  est collée sur la surface métallique de l'emballage du cristal. Le spectre obtenu est présenté sur la figure [3.7].

#### Analyse des résultats spectroscopiques

L'étalonnage du cristal NaI(Tl) est illustré sur la figure [3.8]. Cet étalonnage permet de comparer les résultats mesurés pour les différents pics caractéristiques des sources utilisées, afin de vérifier la validité des mesures effectuées. Les résultats sont présentés dans le tableau [3.1]. Il est possible de constater que les résultats obtenus correspondent à ceux définis pour ces sources, avec un écart maximal de 15,7% pour la valeur de la limite Compton pour la source de  $^{137}\text{Cs}$ .

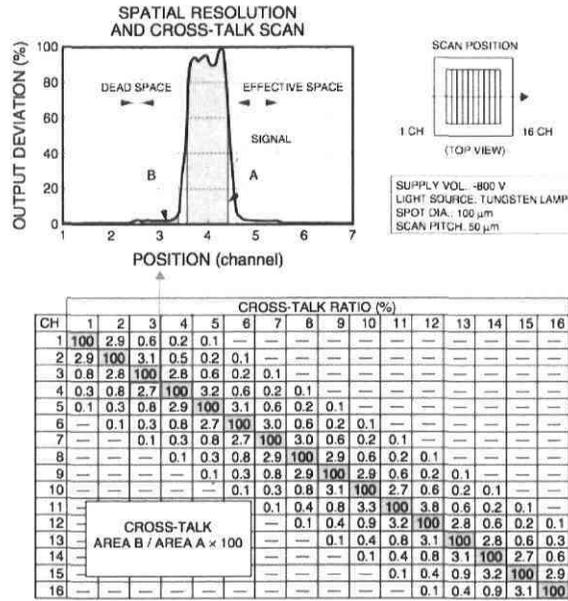


FIG. 3.5: Mesures de diaphonie selon Hamamatsu pour le photomultiplicateur R5900U-00-L16.

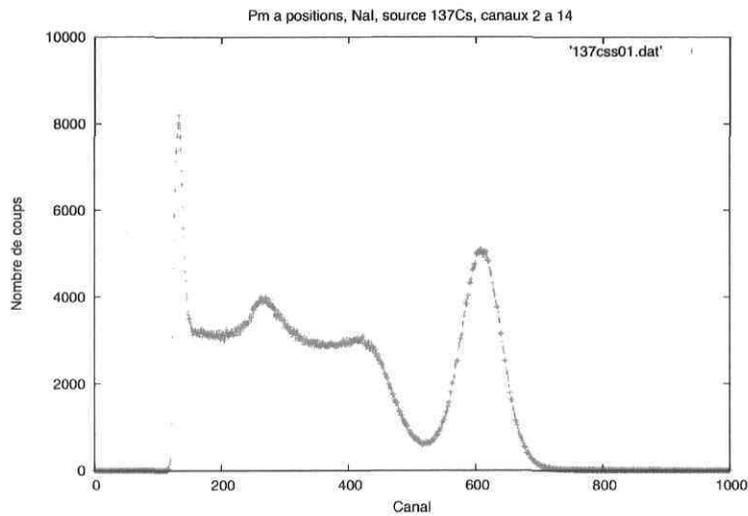


FIG. 3.6: Spectre d'une source <sup>137</sup>Cs tel qu'observé avec un cristal NaI(Tl) et un photomultiplicateur Hamamatsu R5900U-00-L16.

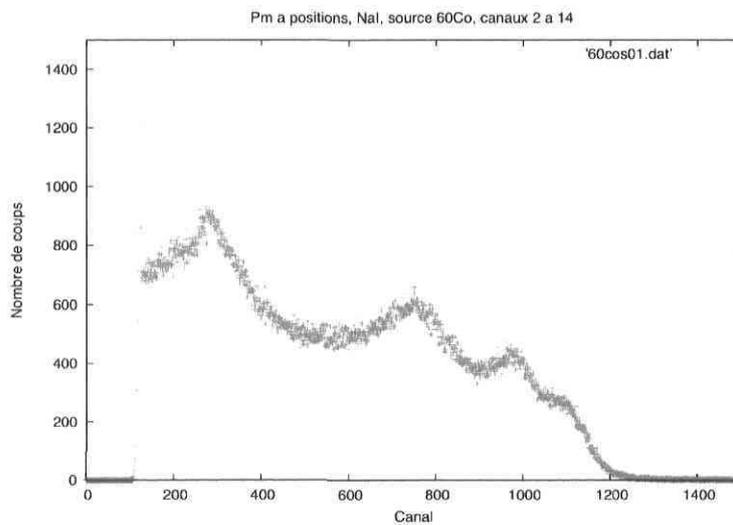


FIG. 3.7: Spectre d'une source  $^{60}\text{Co}$  tel qu'observé avec un cristal NaI(Tl) et un photomultiplicateur Hamamatsu R5900U-00-L16.

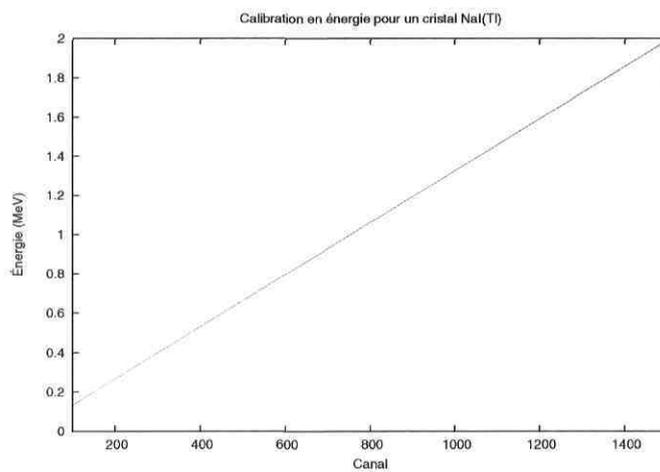


FIG. 3.8: Étalonnage du détecteur NaI(Tl) couplé au PMP

	Position (Canal)	Conversion (MeV)	Valeur théorique (MeV)
Source césium 137			
photopic	501.9	0.665	0.662
Compton	312.1	0.413	0.478
rétrodiffusion	159.5	0.211	0.184
Source cobalt 60			
photopic 1	983	1.302	1.33
photopic 2	864	1.145	1.17
rétrodiffusion	170.5	0.226	0.210

TAB. 3.1: Comparaison entre les valeurs expérimentales et théoriques pour différentes sources.

La largeur à mi-hauteur du pic photoélectrique de  $^{137}\text{Cs}$  permet d'obtenir une première estimation pour la résolution du PMP. Dans ce cas-ci, elle est de 77.7 canaux, ce qui donne une résolution de 15,5%. Cette incertitude est raisonnable, puisque celle obtenue dans le guide ORTEC [ORT84] est du même ordre de grandeur (11,5%).

### 3.3.2 Les mesures de résolution d'un canal

Le cristal de CsI(Tl) est centré sur le canal 9. Les mesures sont effectuées sur les canaux individuels entourant le canal 9 (les canaux 7, 8, 10 et 11), avec les mêmes conditions expérimentales. En plus des mesures individuelles, deux mesures de canaux groupés sont présentées (les canaux 8+9+10 et le groupe 7+8+9+10+11). Les canaux qui ne sont pas utilisés sont terminés par des résistances de 50 $\Omega$ . Tous les graphiques sont disponibles à l'annexe C. La tension d'alimentation du PMP est de -700V et le temps d'acquisition de données est de 3 minutes dans tous les cas. Les résultats sont résumés dans le tableau [3.2].

La première chose importante à réaliser, c'est l'étalement en canaux du signal. Le signal en provenance du CsI(Tl) est détecté sur une plage importante de canaux. Ce problème est analysé dans la section suivante.

La deuxième remarque concerne la résolution des mesures effectuées. Il est possible de constater que plus on se rapproche du canal où est centré le cristal, plus la résolution est précise. Cela est prévisible, puisque plus de lumière pourra être collectée en provenance du cristal. De plus, lorsque les canaux sont sommés, la résolution augmente significativement pour atteindre 7.8%, ce qui est alors comparable aux résultats obtenus

Canal (PMP)	Position pic (Canal)	FWHM (canal)	Résolution (%)
7	1145.66	127.91	11.16
8	1126.18	131.85	11.7
9	1115.86	108.21	9.7
10	1037.81	113.63	10.949
11	1006.97	117.81	11.7
8+9+10	1386.93	122.9	8.86
7+8+9+10+11	1486.12	115.61	7.8

TAB. 3.2: Variation de la résolution du PMP à position en fonction du canal de sortie du PMP

avec un PM standard (voir le chapitre 2 de ce mémoire).

Le troisième élément concerne la collection de lumière. Lorsque les canaux sont combinés, il est possible de constater que la tension observée à l'oscilloscope augmente. Ainsi, plus de photons sont détectés lorsque plusieurs canaux sont combinés. Cela se traduit par une augmentation positive de la position en canal sur l'axe du sélecteur multicanaux.

### 3.3.3 Les mesures de diaphonie

Les mesures de diaphonie sont effectuées sur l'ensemble des canaux, pour une position en canal du cristal de CsI(Tl). Les mesures sont toutes effectuées avec les mêmes conditions expérimentales (mêmes gains à l'amplificateur et pré-amplificateur). Les deux tensions d'alimentation du PMP testées sont -800V et -900V. L'ensemble des résultats obtenus est présenté sur la figure [3.9].

La première remarque intéressante sur ces résultats est la largeur (en canaux) sur laquelle le signal est perçu. Beaucoup d'efforts ont été mis en place afin de s'assurer que le cristal de CsI(Tl) était bien aligné sur la fente d'un canal du PMP, cependant, on voit que l'ensemble des canaux proches du canal visé reçoivent une partie du signal. Dans des conditions idéales, Hamamatsu prédit que la diaphonie sera presque nulle [HAM01]. La principale différence entre les expériences d'Hamamatsu et celles menées ici concerne la largeur du faisceau lumineux projeté sur la fente des photocathodes. Dans notre situation, le cristal fait un peu plus que la largeur d'une photocathode (2mm), tandis que Hamamatsu utilise un faisceau d'un diamètre de 100  $\mu\text{m}$ . De plus, la lumière produite par les particules  $\alpha$  n'est pas focalisée. Donc, comme il y a une épaisseur

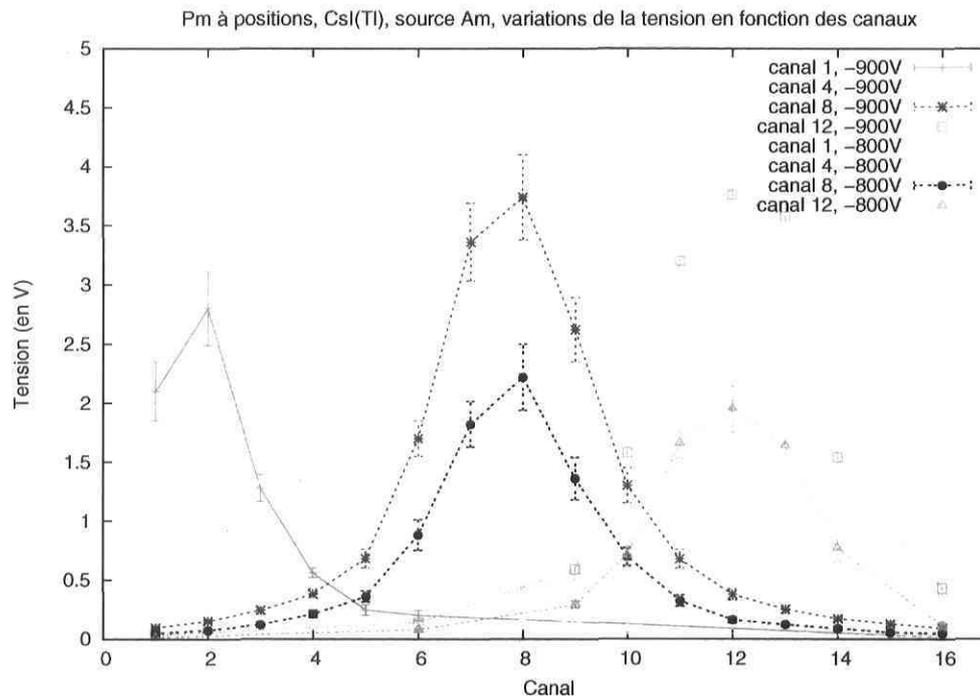


FIG. 3.9: Tension observée à l'oscilloscope sur les différents canaux de sortie du PMP pour différentes tensions et positions du cristal sur la surface de la photocathode.

non négligeable composée de diverses interfaces (graisse optique, vitre en borosilicate) entre la surface du CsI(Tl) et la photocathode, les photons qui ne sont pas émis dans la direction de la photocathode visée peuvent être captés par les autres photocathodes voisines. C'est ce que confirme les résultats obtenus, puisque un signal significatif est perçu principalement par les deux photocathodes collées sur celle visée.

La seconde remarque concerne la différence entre les mesures avec une tension d'alimentation du PMP de -900V et -800V. En fait, il est possible de constater que la seule différence est que les tensions observées sont moins élevées dans le cas à -800V, ce qui est normal, puisque la tension à l'anode est moins importante. Ainsi, les résultats ne sont pas meilleurs à -800V ou à -900V, mais avec un meilleur gain, plus d'événements pourront être analysés.

## 3.4 Conclusion

L'ensemble des tests effectués a permis de déterminer que ce modèle de PMP fonctionne et qu'il serait possible de l'utiliser dans une expérience de physique nucléaire. Les tests sur la spectroscopie gamma ont permis de vérifier sa capacité à produire un signal utilisable avec les appareils utilisés dans notre laboratoire. De plus, ces tests, ainsi que ceux avec la résolution du pic d'une source de particules  $\alpha$  ont permis de déterminer la résolution des canaux individuels et aussi celle pour une somme de canaux. Les résolutions obtenues sont du même ordre de grandeur que celles obtenues avec un PM plus traditionnel. Finalement, la diaphonie entre les différents canaux a été évaluée. Les tests effectués ont permis de déterminer que pour un cristal de CsI(Tl) de la largeur d'une photocathode, plusieurs canaux captent le signal lumineux produit dans ce cristal.

Cependant, avant d'être utilisé dans la matrice HÉRACLES, plusieurs problèmes devront être résolus, le principal étant celui de la diaphonie entre les différents canaux. La solution la plus simple serait d'utiliser un modèle possédant une plage morte plus importante entre les différentes photocathodes. De plus, il existe différentes dispositions de photocathodes plus intéressantes, comme sur le modèle R5900U-00-M16 où les photocathodes sont carrées. Ce modèle est nettement plus intéressant, également en raison du fait qu'il est plus facile de tailler un cristal en rectangle ou carré que de faire une feuille de 1.5mm de CsI(Tl).

# Conclusion

La matrice HÉRACLES est un ensemble de détecteurs en constante évolution. Afin de la maintenir à un niveau acceptable et l'adapter aux nouvelles expériences, plusieurs tests et simulations furent menés dans le cadre de ce travail. Les résultats qui furent obtenus dans le cadre de cette maîtrise concernent trois types de détecteurs différents.

Dans le premier cas, les résultats obtenus avec les simulations des détecteurs à neutrons permettent d'obtenir des courbes d'efficacité pour effectuer les corrections nécessaires sur les mesures effectuées. Le logiciel GEANT4 s'est avéré être un outil assez performant afin d'effectuer les simulations pour obtenir les corrections d'efficacité recherchées. Lorsque comparées à des résultats expérimentaux, les simulations reproduisent ces données avec une marge d'erreur relativement faible (autour de 5% d'écart pour des neutrons avec une énergie initiale inférieure à 15 MeV). Ces résultats démontrent également que tout n'est pas encore parfait. Certaines gammes d'énergies incidentes de neutrons ne sont pas encore bien connues et cela est visible dans les résultats des simulations, surtout aux basses énergies. Dans les prochaines expériences d'HERACLES à TRIUMF, Vancouver, ces détecteurs seront utilisés. Les corrections d'efficacité encore plus complexes seront alors nécessaires pour obtenir les mesures désirées.

Les détecteurs CsI(Tl) de la matrice HERACLES ont fait l'objet de la deuxième partie de ce mémoire. L'installation de la matrice HERACLES à Vancouver a nécessité une révision des composantes de ces détecteurs afin de maximiser la collection de lumière. Afin de connaître les meilleures modifications possibles, des simulations furent conduites à l'aide du logiciel GEANT4. Les résultats de ces simulations démontrent une amélioration significative (plus de 15% de gain) de la collection lumineuse lorsque les guides de lumière sont supprimés du montage. Cependant, ces tests ne permettent pas de conclure sur la résolution de la collection des photons. Ainsi, une série de tests avec les détecteurs fut menée et ils ont permis de conclure que la résolution est peu affectée par la présence ou l'absence d'un guide de lumière. Pour optimiser la collection de la lumière, les guides de lumière reliant les cristaux de CsI(Tl) aux photomultiplicateurs

ont été retirés. Les 32 détecteurs des anneaux 4 et 5 de la matrice HERACLES ont été modifiés et ils sont maintenant prêts à être utilisés dans une expérience à TRIUMF. Les tests sur ces 32 détecteurs sont présentés en annexe de ce mémoire.

Finalement, la dernière partie de ce mémoire traite de l'utilisation des photomultiplicateur Hamamatsu de la série R5900. Il a été déterminé que ces photomultiplicateurs pourraient être utilisés dans le cadre d'une expérience HERACLES. Les différents tests avec des particules alphas démontrent que ces détecteurs peuvent servir à identifier différents types de particules chargées. Afin de compléter l'analyse de performance de ces détecteurs, il faut effectuer une analyse temporelle. Cependant, il serait plus intéressant de trouver d'autres modèles, probablement mieux adaptés aux conditions expérimentales et aux caractéristiques des scintillateurs utilisés. En raison des budgets limités, ce genre d'expérience n'a pu être conduite.

# Bibliographie

- [ARN98] F. Arneodo *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A418, 285 (1998)
- [ALA85] J. Alarja *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A242, 352-354 (1985)
- [BAT61] R. Batchelor *et al.*, Nucl. Instr. Meth. 13, 70 (1961)
- [BEA96] L. Beaulieu, *Production de fragments dans la réaction périphérique  $^{35}\text{Cl} + ^{197}\text{Au}$  à 43A MeV*, thèse de doctorat, Université Laval, juillet 1996
- [BEN89] F. Benrachi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A281, 137-142 (1989)
- [BIC] Bicron (St-Gobain Industrial Ceramic, Inc), *BC-501A : Liquid Scintillator*,  
<http://www.bicron.com>
- [CEC79] R.A. Cecil *et al.*, Nucl. Instr. Meth. 161, 439 (1979)
- [DRO80] M. Drog *et al.*, Nucl. Instr. Meth. 176, 477 (1980)
- [ENDF] Evaluated Nuclear Data File (ENDF)  
<http://www-nds.iaea.org/exfor/endl00.htm>
- [FOM94] A.S. Fomichev *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A344, 378-383 (1994)
- [FOW80] J.L. Fowler *et al.*, Nucl. Instr. Meth. 175, 449 (1980)
- [FUL57] C.B. Fulmer, Phys. Rev. 108, 1113 (1957)
- [GEA03] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A506, 250 (2003)
- [GEA05] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/Examples/>
- [GÉL05] G.P. Gélinas, *Prototype de détection avec photomultiplicateurs à position*, mémoire de maîtrise, Université Laval, janvier 2005
- [GIN01] L. Gingras, *Le rôle de l'asymétrie de masse et de l'asymétrie d'isospin en voie d'entrée pour la production de particules et de fragments dans les collisions d'ions lourds*, thèse de doctorat, décembre 2001
- [GOU93] M. Gourde, *Développement et performances de détecteurs de particules chargées appliqués à l'étude des réactions avec ions lourds*, mémoire de maîtrise, Université Laval, mars 1993

- [GRO03] D. Groleau, *Guide d'utilisation de GEANT4 appliqué aux recherches sur les neutrons*, U.Laval, 2003
- [GUM02] P. Gumplinger, TRIUMF/GEANT4, User's Workshop at CERN, Nov. 2002
- [HAM01] M.M.Hamada *et al.*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.48, NO.4, August 2001, 1148-1153
- [HOR92] D.Horn *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A320, 273-276 (1992)
- [LAR94] Y.Larochelle, Nucl. Instr. Meth. A348, 167-172 (1994)
- [LEO94] W.R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, 2nd ed., Springer-Verlag(1994), ISBN 0-387-57280-5
- [LOC76] J.A.Lockwood *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A138, 353-362 (1976)
- [MUR63] R.Gwin AND R.B.Murray, Phys. Rev. vol.131, NO. 2 (1963) 508-512
- [NAG95] V.Nagirnyi *et al.*, J.Phys. : Condens. Matter 7 (1995) 3637-3653
- [NAK03] T. Nakamura, J. Nucl. Rad. Sc., Vol.4, No.2, pp.R15-R24 (2003)
- [NAK95] N. Nakao *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A362, 454 (1995)
- [ORT84] EG&G ORTEC, "Experiments in Nuclear Science, AN34 Laboratory Manual", 3rd edition revised
- [ONO03] A. Ono *et al.*, Phys.Rev. C68, (2003) 051601-1,5 (R)
- [PÂR01a] M.Pârlog *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A482, 674-692 (2002)
- [PÂR01b] M.Pârlog *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A482, 693-706 (2002)
- [POU95] J.Pouthas *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A357, 418-442 (1995)
- [SHI91] K.Shin & Y.Ishii, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A308, 609-615 (1991)
- [SCH90] P.Schotanus *et al.*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 37, NO. 2, April 1990, 177-182
- [STO58] R.S.Storey *et al.*, Proc. Phys. Soc. vol 72 part 1, no°463, p. 1 à 8 (1958)
- [TAK01] M.Takada *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A465, 498-511 (2001)
- [THE05a] D.Thériault *et al.*, Phys.Rev. C71, (2005)
- [THE05b] D.Thériault, *Composition isotopique et ratios neutrons/protons de la matière nucléaire émise dans les réactions d'ions lourds aux énergies intermédiaires*, thèse de doctorat, Université Laval, novembre (2005)
- [THO71] S.T.Thornton & J.R. Smith, Nucl. Instr. Meth. 96, 551 (1971)
- [UWA82] Y.Uwamino *et al.*, Nucl. Instr. Meth. 204, 179 (1982)
- [VER68] V.V.Verbinsky *et al.*, Nucl. Instr. Meth. 65, 8 (1968)
- [WAG01] A.Wagner *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A456, 290-299 (2001)

# Annexe A

## Les détecteurs à neutrons

### A.1 Descriptions des répertoires du programme de simulation geant4

Il est possible d'accéder à ces fichiers à partir du répertoire principal du code de simulation (dans le cas qui nous intéresse, il a été nommé *detec.bc501a/*) :

`~/geant4/geant4dg/detec.bc501a/`

Maintenant, voici le contenu typique de ce répertoire qui comprend différents types de fichiers (voir la représentation schématique sur la figure [A.1] :

- *Fichiers nécessaires à la compilation.* Cela comprend tous les fichiers systèmes, qui n'ont pas de lien direct avec la simulation, mais qui sont requis par le compilateur pour une exécution rapide et facile de la compilation des différentes composantes de la simulation («GNUmakefile»). Cela comprend également un fichier primaire de compilation, qui compilé en premier initialise les différentes bibliothèques systèmes utilisées et qui appelle les différents fichiers sources à être compilés.
- *Les fichiers sources.* Ce sont tous les fichiers à compiler. Ils contiennent les principales caractéristiques de la simulation et appellent les différentes bibliothèques à utiliser pour la simulation. Ils sont tous contenus dans un même sous-répertoire (`~/src`).
- *Les bibliothèques.* Elles contiennent les définitions des variables utilisées par les différents fichiers sources. Chaque fichier source a une bibliothèque associée, contenue dans un autre répertoire, à la même hauteur à partir du répertoire principal du code de simulation (`~/include`).
- *Les fichiers de sortie.* Cette catégorie de fichiers inclut tous les fichiers produits lors de la simulation ; ils comprennent les résultats de la simulation. Par exemple,

dans les simulations effectuées, un fichier de visualisation est généré (g4\_XX.wrl, format vrml) ainsi que différents fichiers de sortie en format texte (sortie.out). Il est possible de modifier leurs contenu et caractéristiques à partir des différents fichiers sources, en fonction de ce qui est désiré comme information.

- *Le fichier exécutable.* C'est le fichier qui est produit lors de la compilation, exécutable par la machine.
- *Le fichier de séquence type.* Ce fichier permet d'automatiser le lancement du programme et l'exécution du fichier exécutable, avec différentes options, sans avoir à entrer plusieurs lignes de commandes à chaque exécution (run.mac).

## A.2 Exemples de code GEANT4

### A.2.1 Création d'un matériel dans le cadre d'une simulation GEANT4

```
//BC 501-A -> matériel des détecteurs, un composé de carbone et d'hydrogène
a = 1.01*g/mole;
G4Element* elH = new G4Element(name="Hydrogen", symbol="H", iz=1, a);
a = 12.01*g/mole;
G4Element* elC = new G4Element(name="Carbon", symbol="C", iz=6, a);
density = 0.874*g/cm3;
G4Material* BC501A = new G4Material(name="BC 501-A", density, ncomponents=2,
kStateLiquid);
BC501A->AddElement(elH, natoms=54792);
BC501A->AddElement(elC, natoms=45208);
```

### A.2.2 Création d'un volume simple

```
//-----
// Détecteur de neutrons 1
//-----
G4VSolid * solidDetec1 = new G4Tubs("détecteur1", 0., 6.35*cm, 6.35*cm, 0, 2*M_PI);
// fonction pour créer le volume physique
G4LogicalVolume * logieDetec1 = new G4LogicalVolume(solidDetec1, BC501A, "détecteur1", 0,0,0); // fonction pour créer le volume logique
```

```

G4VPhysicalVolume *physiDetec1
= new G4PVPlacement(0, // pas de rotation
G4ThreeVector(0,0,0), // à (0,0,-)
"detecteur1", // son nom
logicDetec1, // son volume logique
physiAir1, // Son volume mère
false, // pas d'opération booléenne
0); // pas de champ particulier

```

### A.2.3 Distribution uniforme sur une surface circulaire

```

G4double px=0., py=1., px1=0., py1; //initialise les variables des moments orientés
les axes x,y et z
G4int i=0;
while(i==0) // Permet de cibler aléatoirement l'angle d'entrée du détecteur
px1 = 2*(G4UniformRand()-0.5)*6.35;
py1 = 150.;
if (px1/py1 <= 0.042 && px1/py1 >= -0.042)
i=1;
px = px1/(sqrt(pow(px1,2) + pow(py1,2)));
py = py1/(sqrt(pow(px1,2) + pow(py1,2)));

```

### A.3 La simulation GEANT4

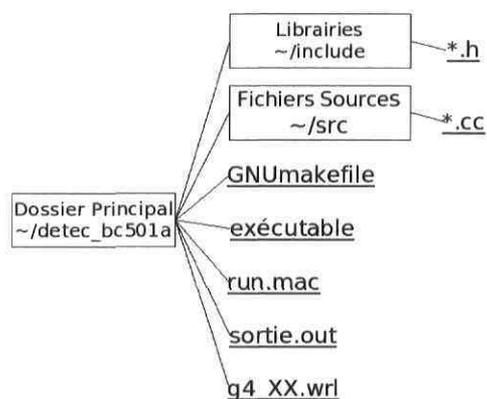
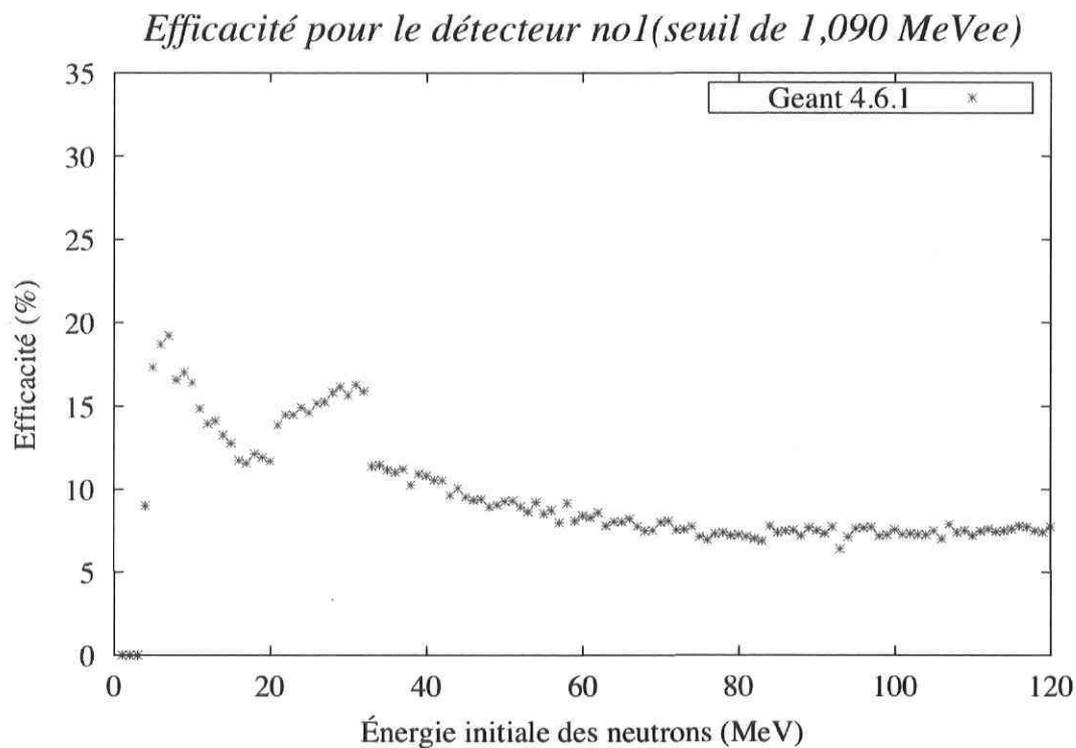


FIG. A.1: Schema de l'arborescence d'un répertoire de programme GEANT4, basé sur les exemples "novices".

## A.4 résultats des simulations



(\*) NIM A506 (2003) 250–303  
<http://www.wasd.web.cern.ch/www.wasd/geant4/geant4.html>

FIG. A.2: Efficacité du détecteur numéro 1 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 1,090MeV

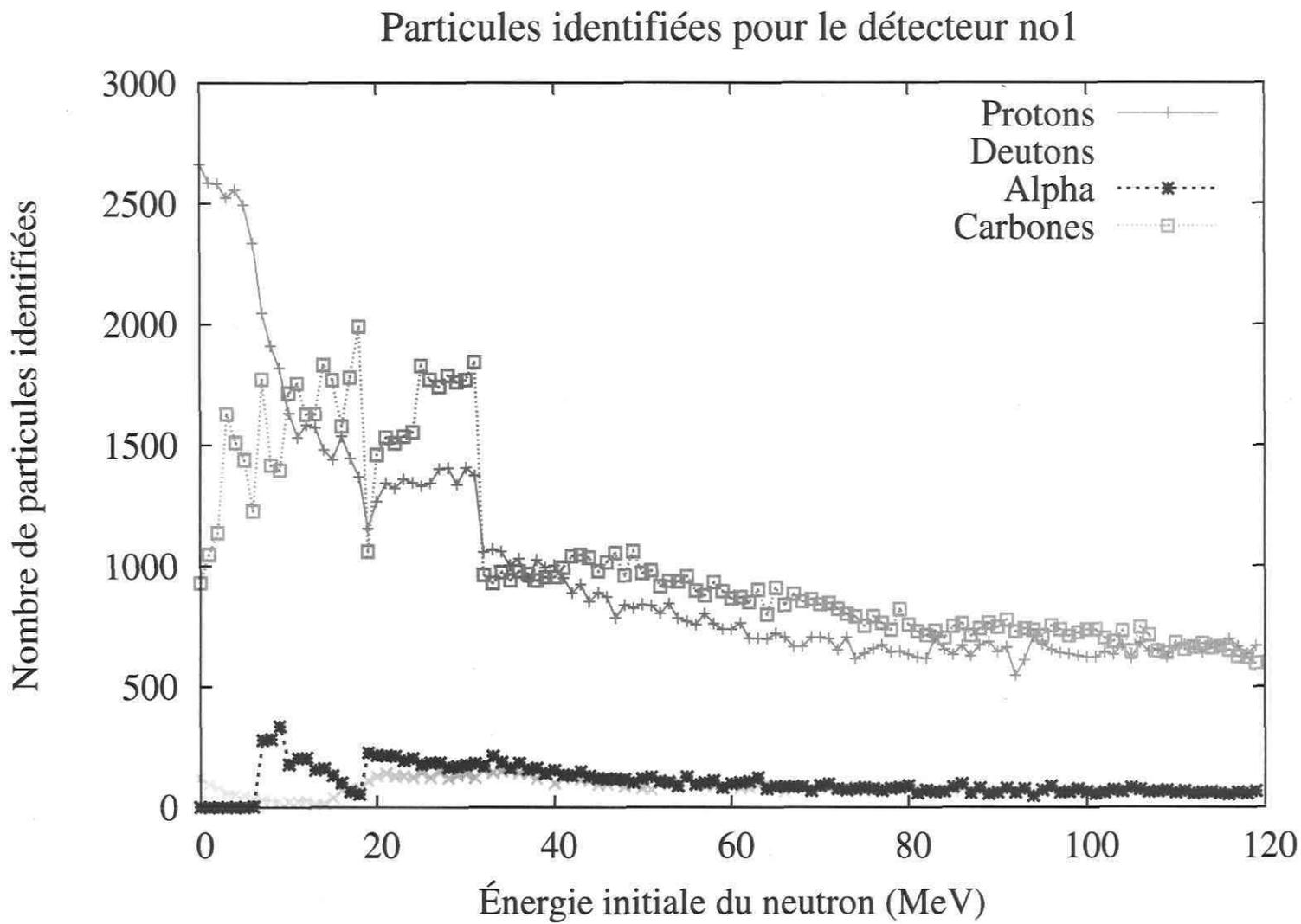
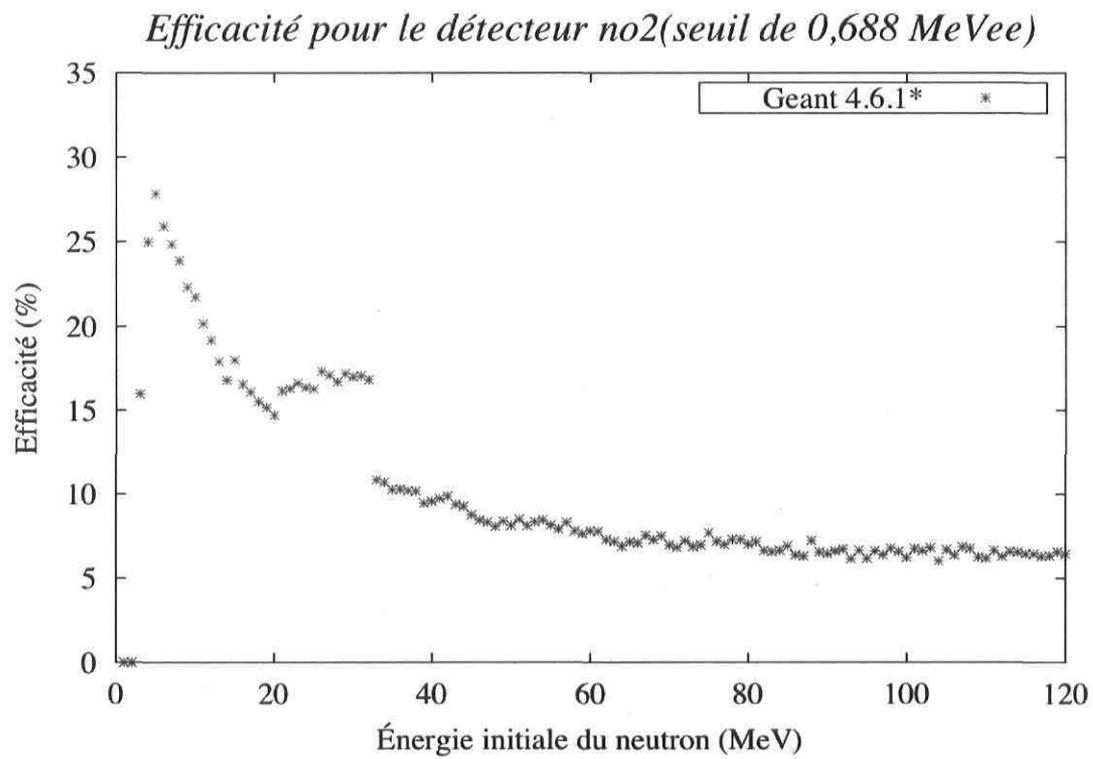


FIG. A.3: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 1.



(\*) NIM A506 (2003) 250–303  
<http://www.wasd.web.cern.ch/www.wasd/geant4/geant4.html>

FIG. A.4: Efficacité du détecteur numéro 2 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,688MeV

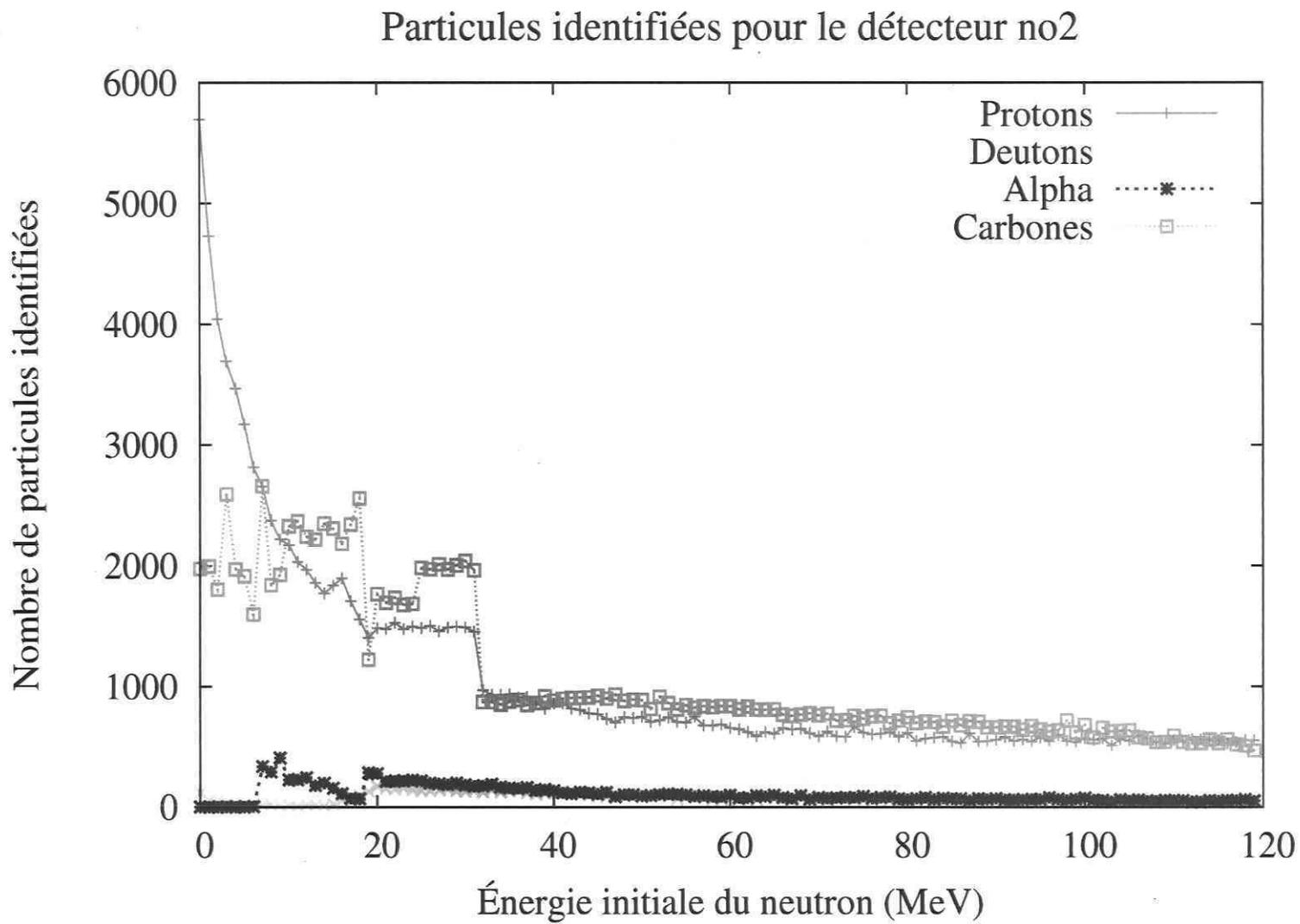
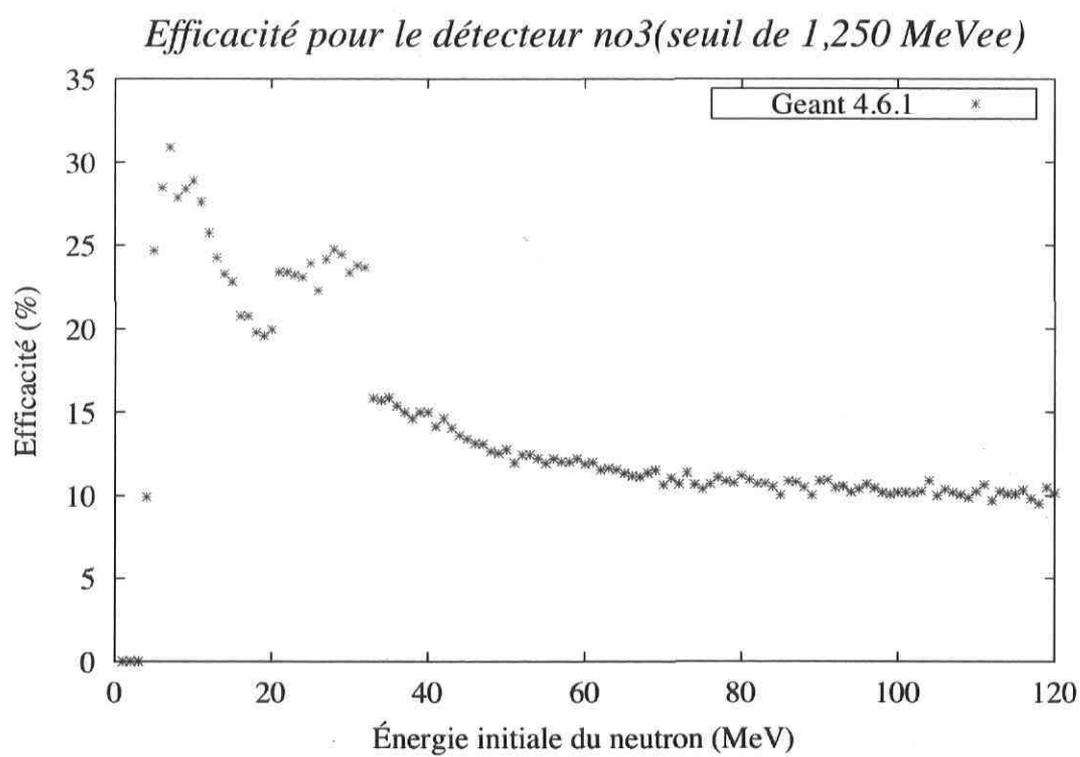


FIG. A.5: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 2.



(\*) NIM A506 (2003) 250–303  
<http://www.wasd.web.cern.ch/www.wasd/geant4/geant4.html>

FIG. A.6: Efficacité du détecteur numéro 3 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 1,250MeV

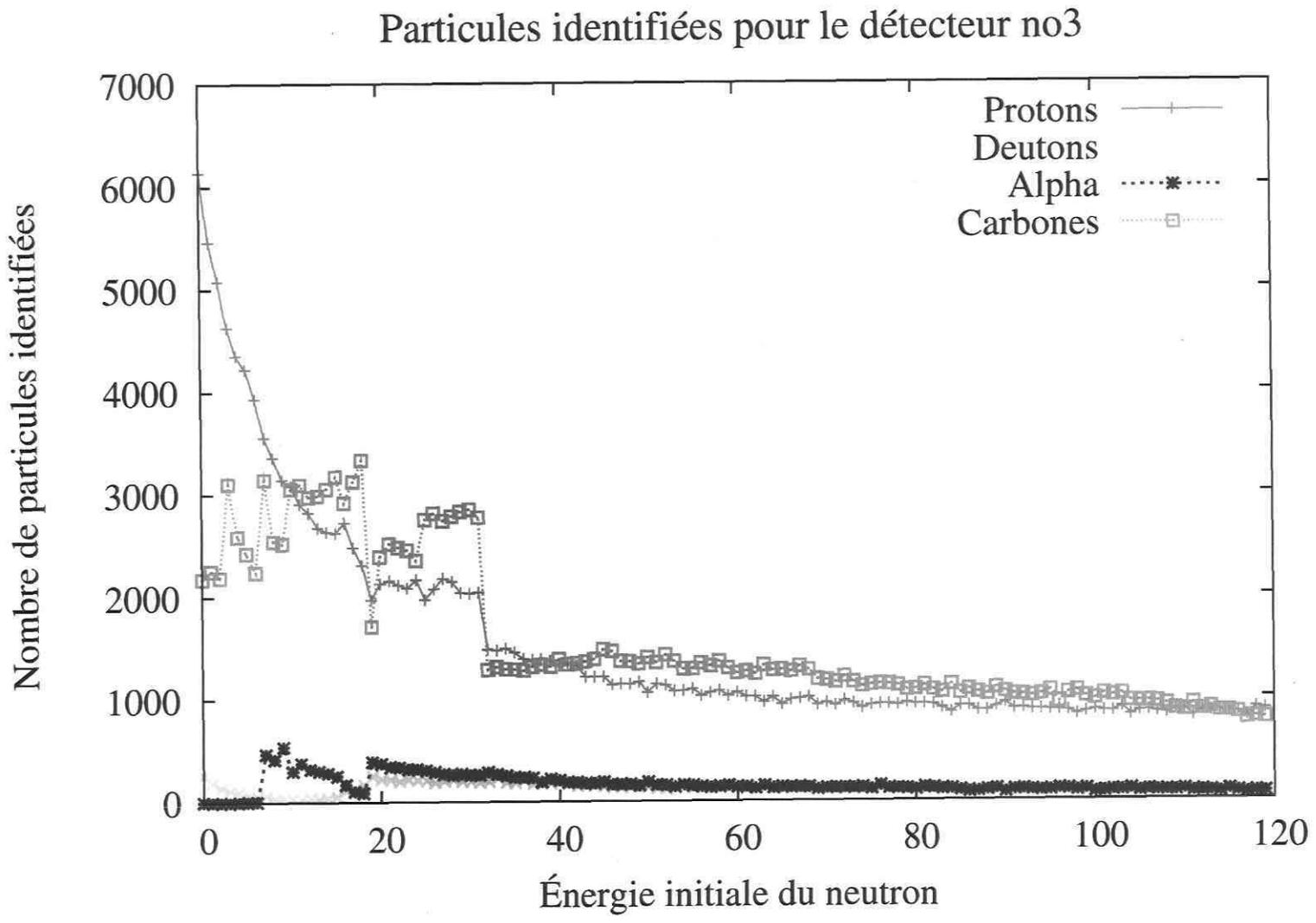


FIG. A.7: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 3.

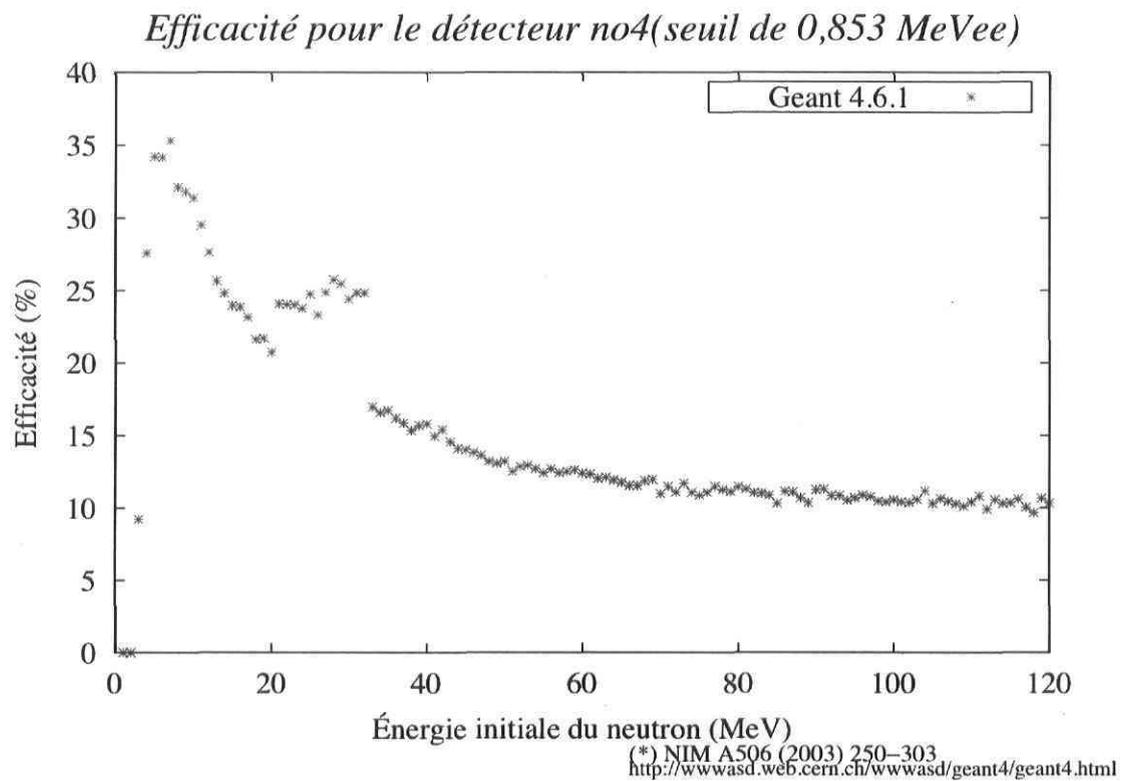


FIG. A.8: Efficacité du détecteur numéro 4 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,853MeV

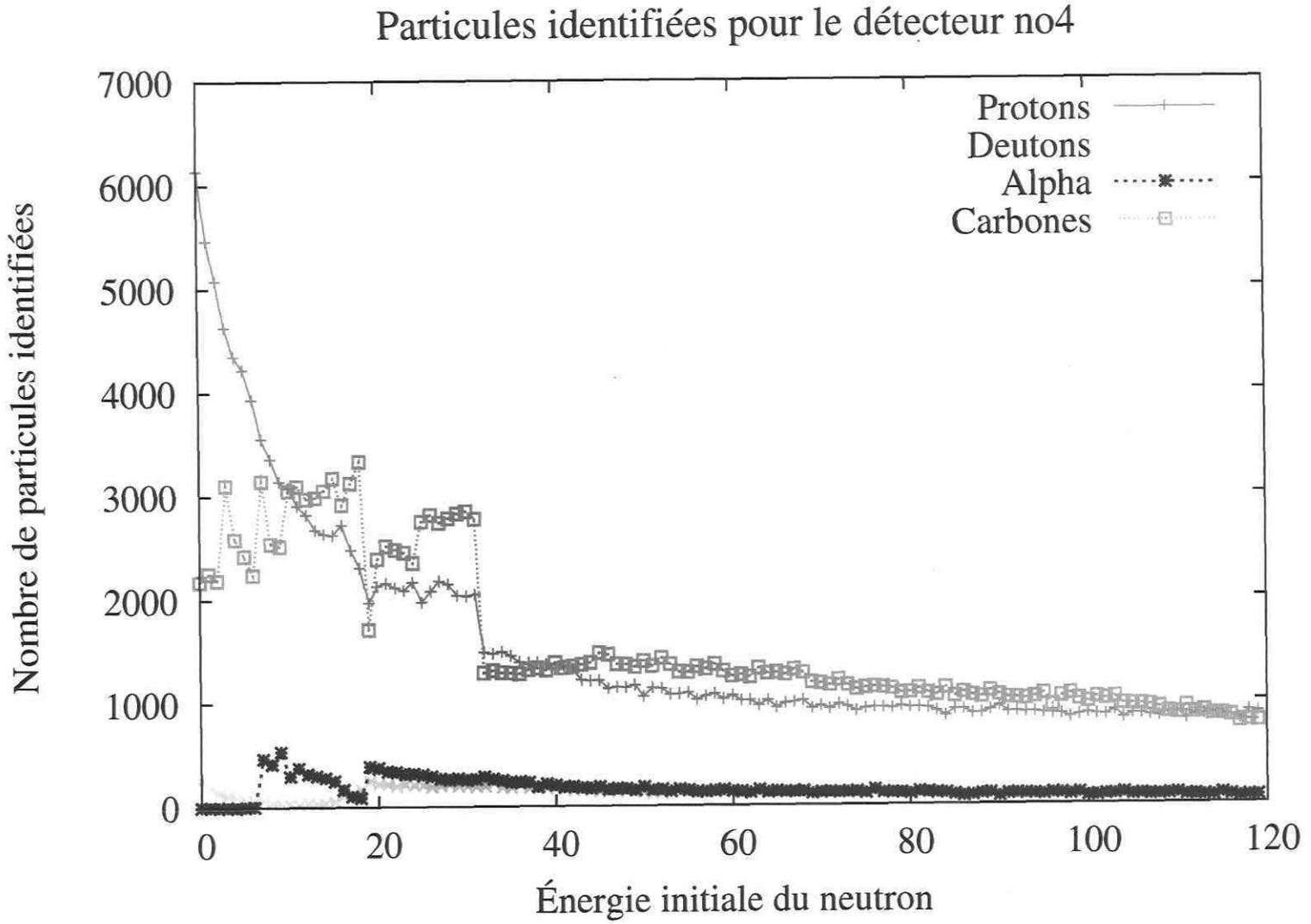
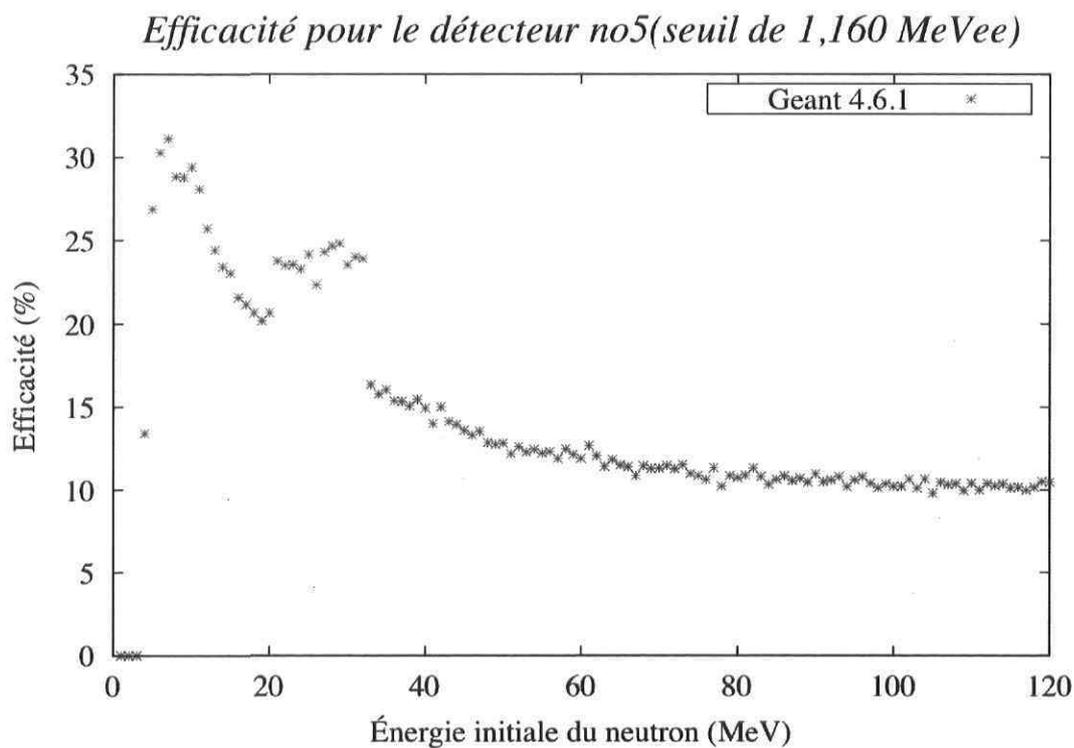


FIG. A.9: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 4.



(\*) NIM A506 (2003) 250–303  
<http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html>

FIG. A.10: Efficacité du détecteur numéro 5 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 1,160MeV

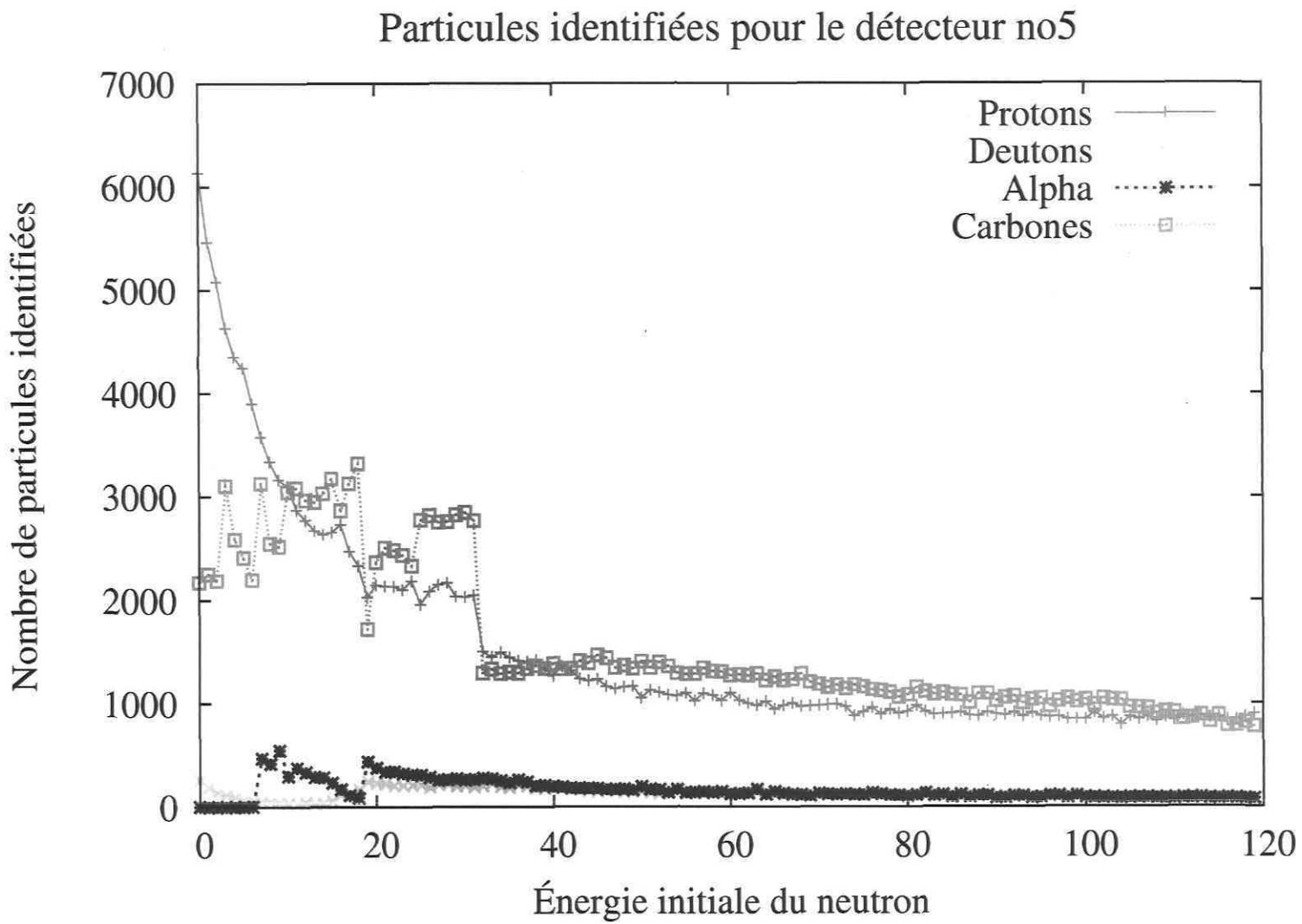


FIG. A.11: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 5.

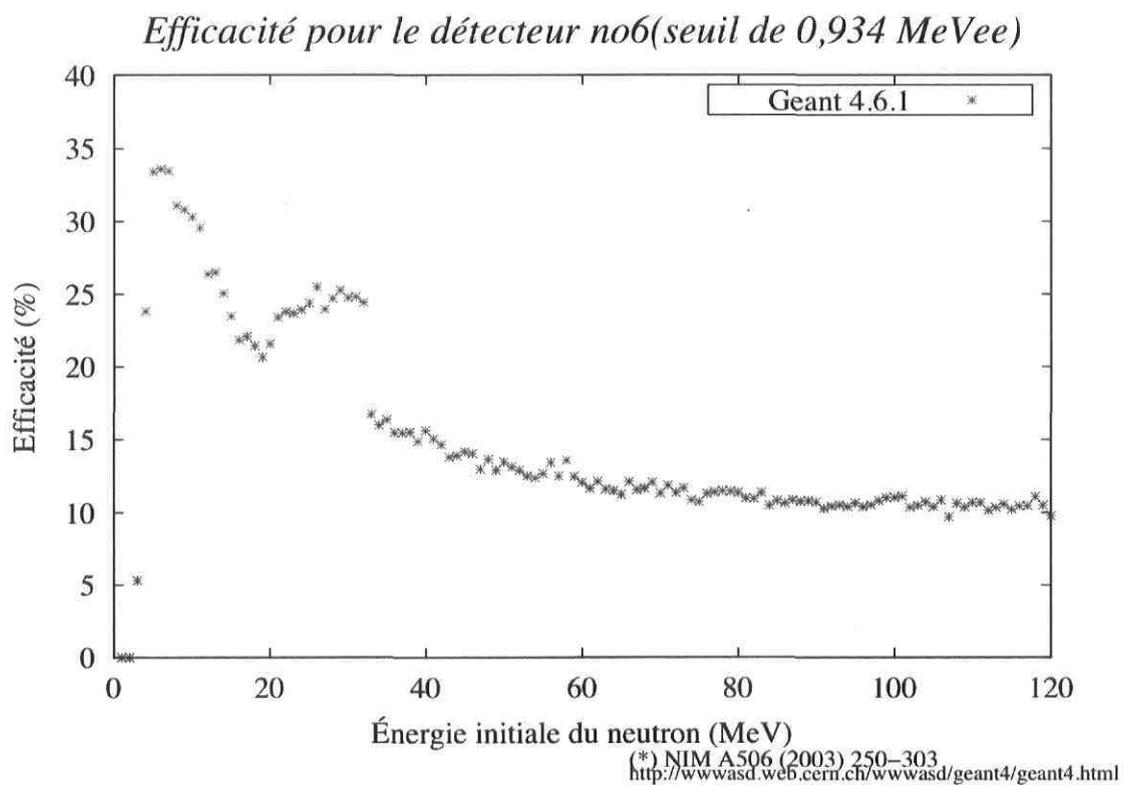


FIG. A.12: Efficacité du détecteur numéro 6 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,934MeV

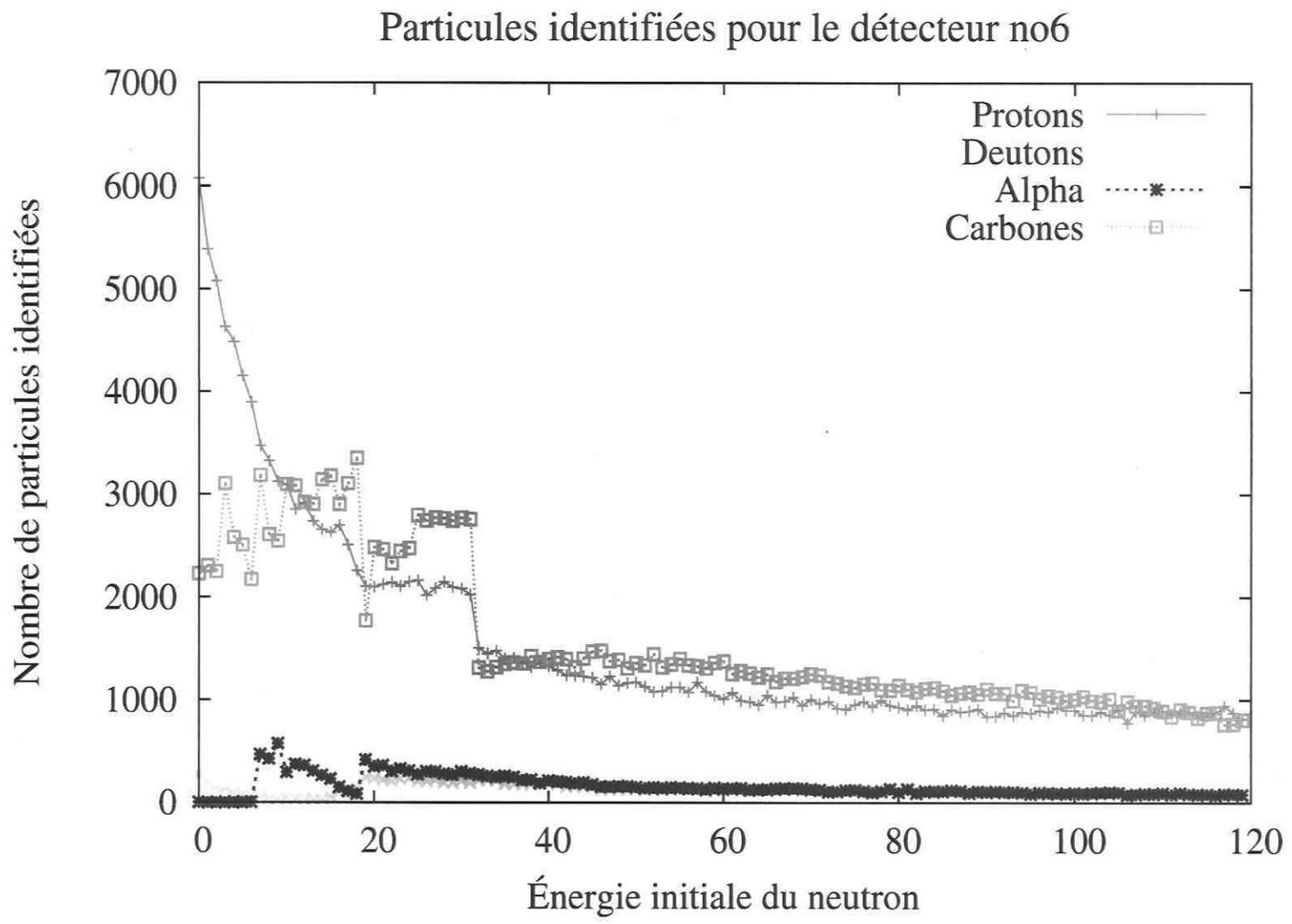


FIG. A.13: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 6.

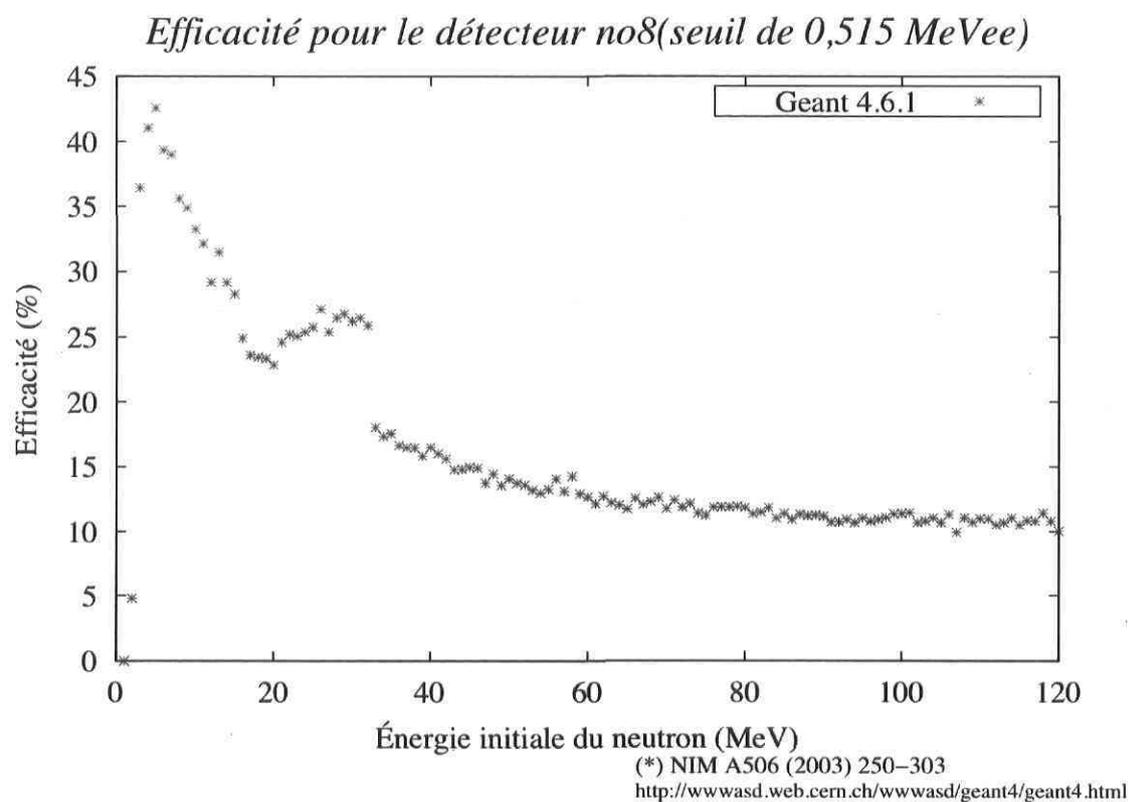


FIG. A.14: Efficacité du détecteur numéro 8 en fonction de l'énergie initiale des neutrons, selon la simulation GEANT4 pour un seuil de détection évalué à 0,515MeV

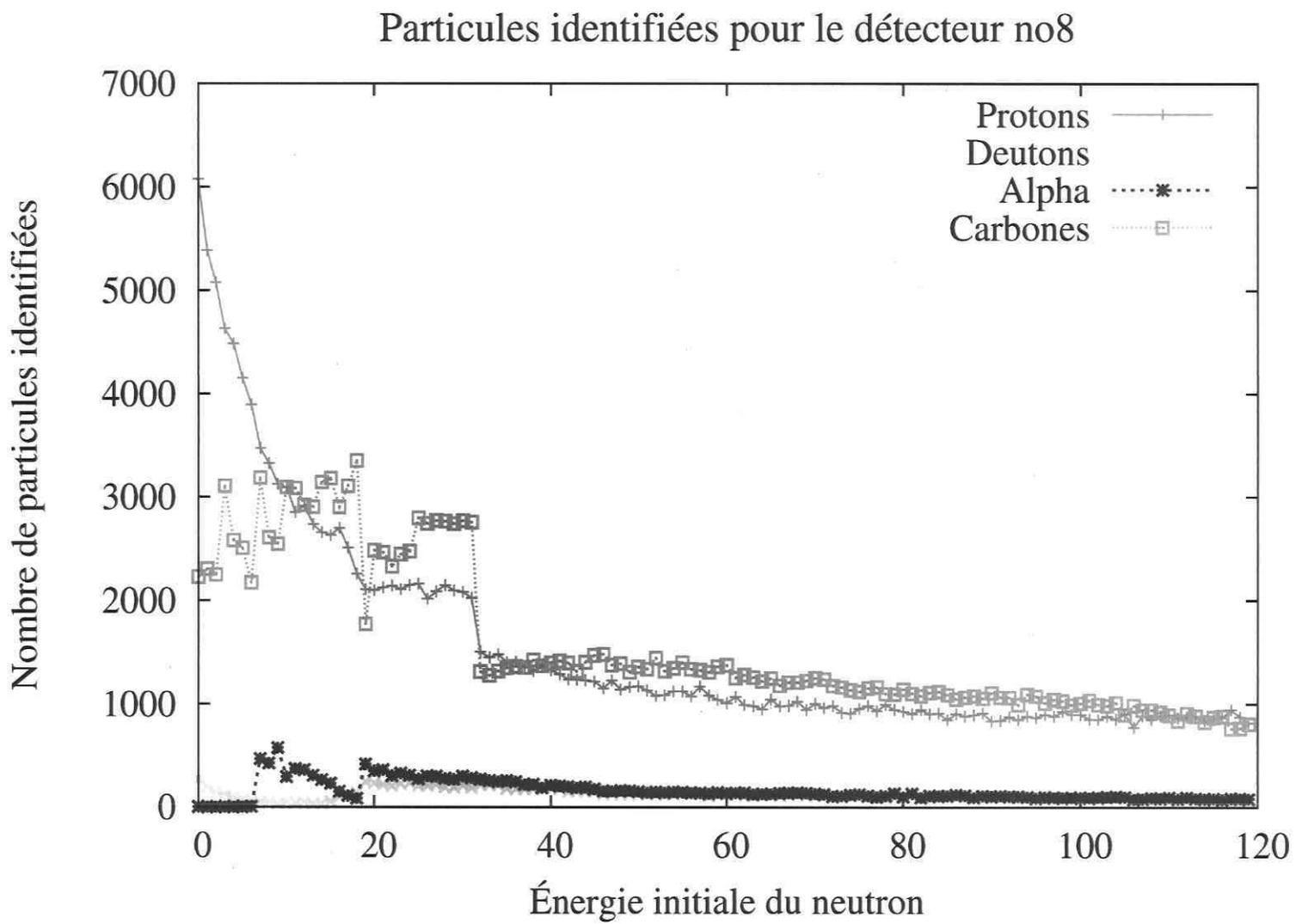


FIG. A.15: Particules produites lors du passage des neutrons dans le détecteur 8.

## A.5 Comparaison avec Nakao et différentes versions de GEANT4

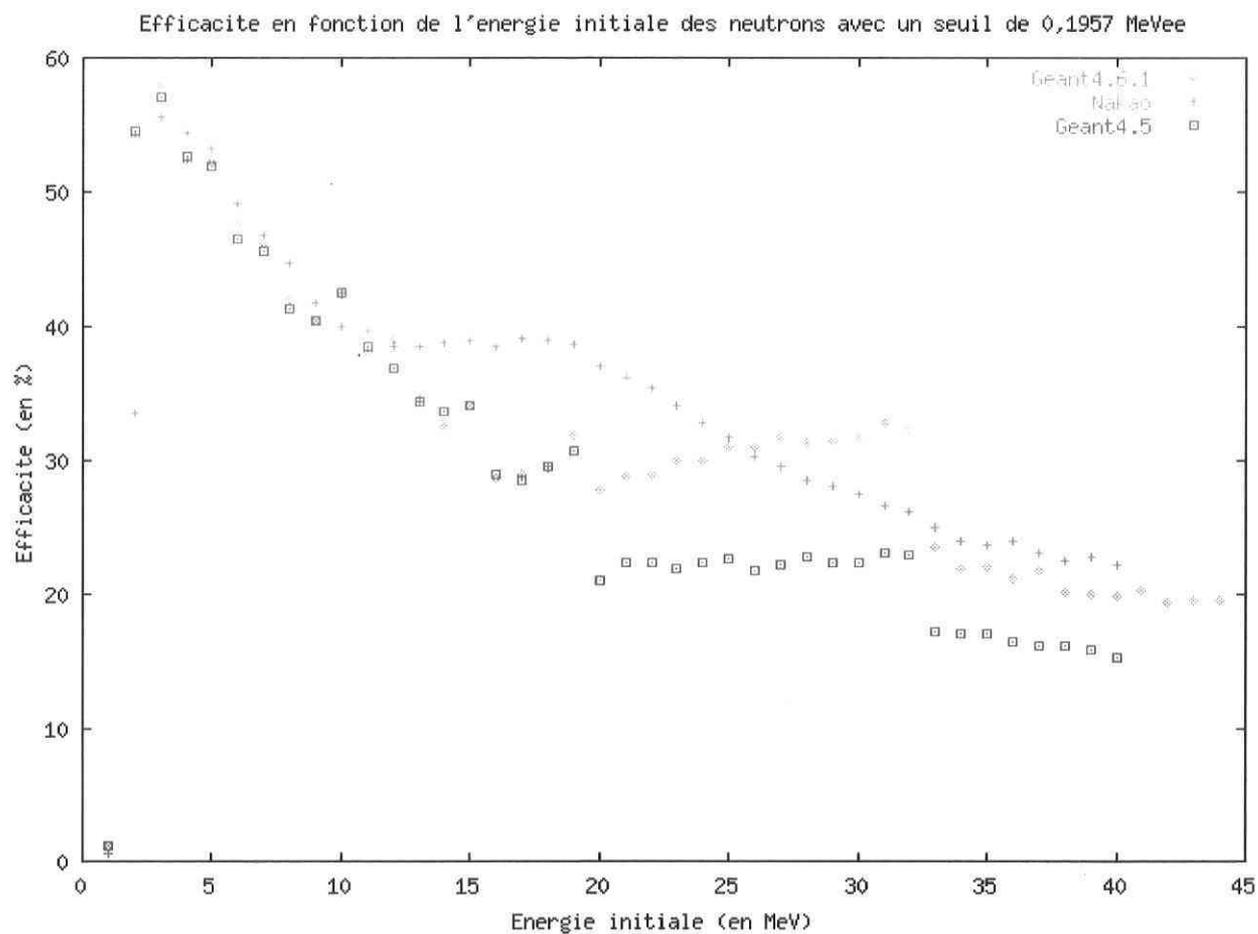


FIG. A.16: Comparaison de l'efficacite pour 2 versions du code GEANT4 en fonction des resultats de Nakao pour un seuil de 0.196 MeV

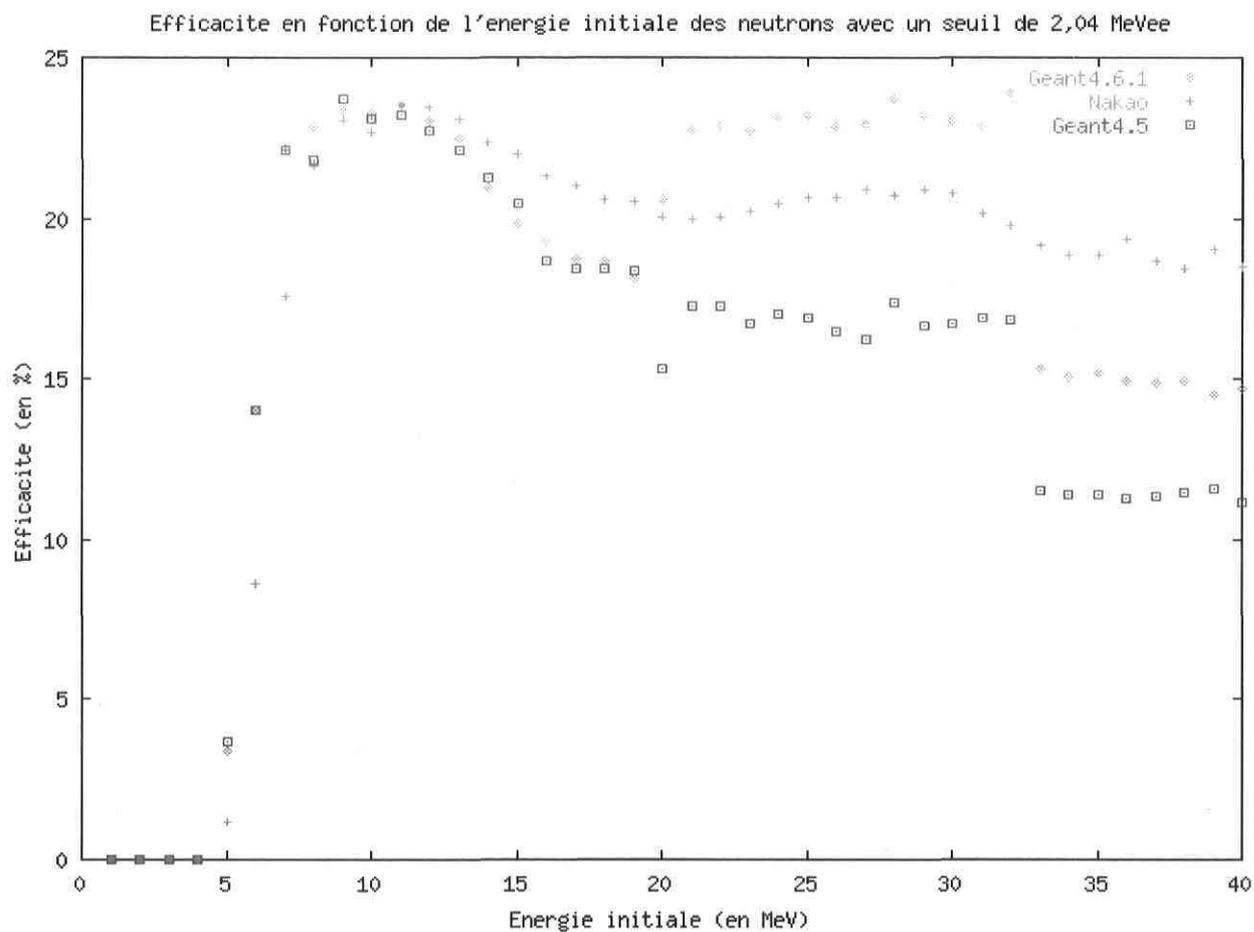


FIG. A.17: Comparaison de l'efficacité pour 2 versions du code GEANT4 en fonction des résultats de Nakao pour un seuil de 2.04 MeV

## Annexe B

### Les détecteurs CsI(Tl)

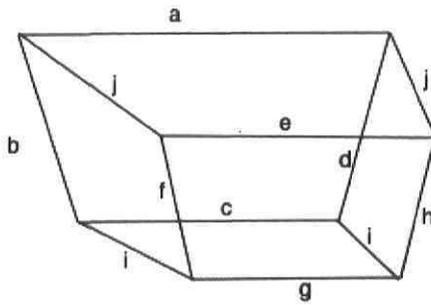


FIG. B.1: Dimensions des cristaux de CsI(Tl) pour l'anneau 4 :  $a=5.0$  cm,  $b=d=3.8$  cm,  $c=3.8$  cm,  $e=4.5$  cm,  $f=h=3.2$  cm,  $g=3.3$  cm,  $i=3.0$  cm,  $j=2.8$  cm et l'anneau 5 :  $a=6.2$  cm,  $b=d=5.0$  cm,  $c=5.2$  cm,  $e=5.8$  cm,  $f=h=4.4$  cm,  $g=4.5$  cm,  $i=3.0$  cm,  $j=3.2$  cm

## B.1 Tableau résumé

Détecteur	Rés. Rapide (%)	Rés. Lente (%)
1	14,7	17,0
2	14,2	12,0
3	11,8	8,1
4	11,5	17,6
5	10,4	8,7
6	15,0	17,0
7	17,8	22,9
8	13,2	18,2
9	7,8	17,0
10	11,4	16,0
11	13,0	16,7
12	11,2	19,0
13	12,1	14,7
14	10,1	17,0
15	12,2	17,0
16	9,6	10,7

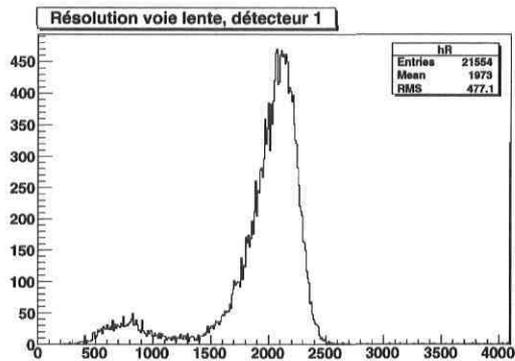
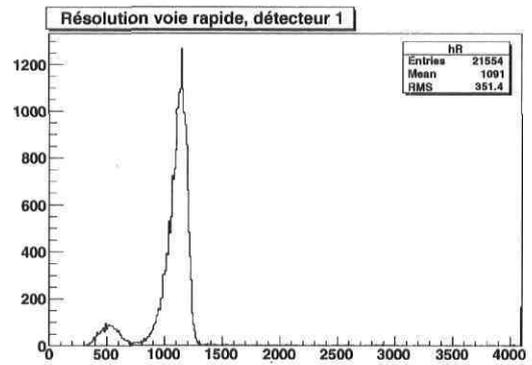
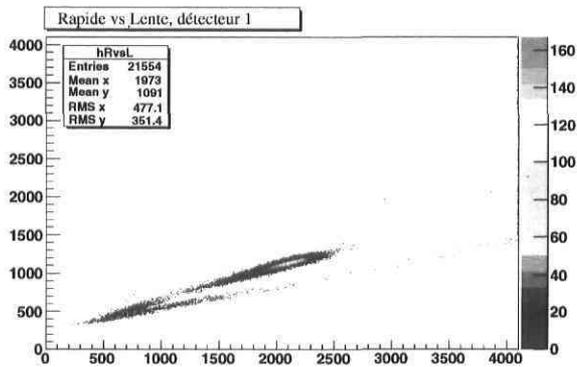
TAB. B.1: Tableau des résolutions pour les détecteurs de l'anneau 4.

Détecteur	Rés. Rapide (%)	Rés. Lente (%)
17	15,4	21,7
18	12,0	17,2
19	11,6	25,4
20	13,3	18,9
21	14,9	16,8
22	12,1	14,9
23	14,0	16,6
24	13,2	22,7
25	14,6	21,5
26	12,7	16,4
27	11,3	19,6
28	10,4	12,2
29	15,9	16,3
30	13,5	19,9
31	13,9	20,4
32	12,3	15,8

TAB. B.2: Tableau des résolutions pour les détecteurs de l'anneau 5.

## B.2 Anneau 4

### B.2.1 détecteur 1



Résolution : voie rapide = 14,7% voie lente = 17,0%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

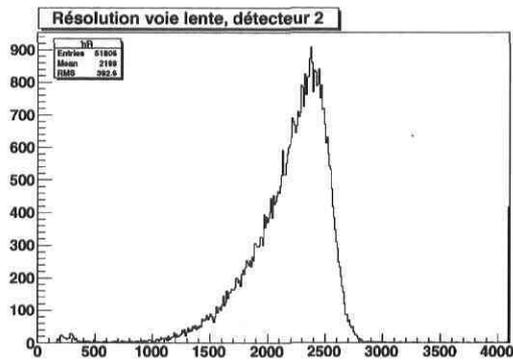
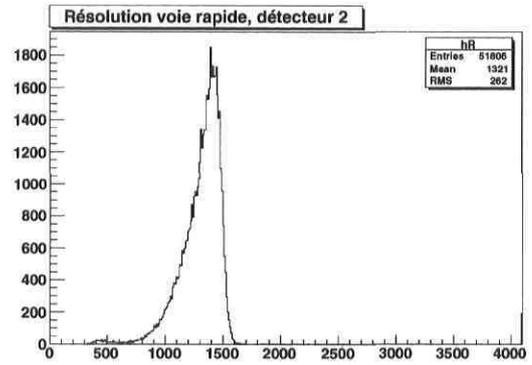
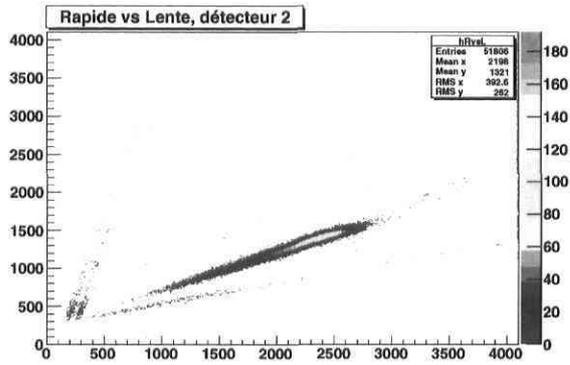
Sortie PM = 175 mV

Seuil FCC = 54 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.2 détecteur 2



Résolution : voie rapide = 14,2% voie lente = 12,0%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

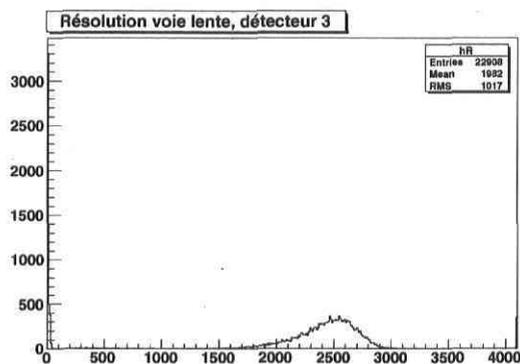
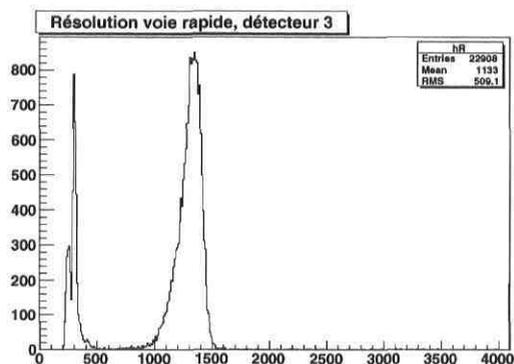
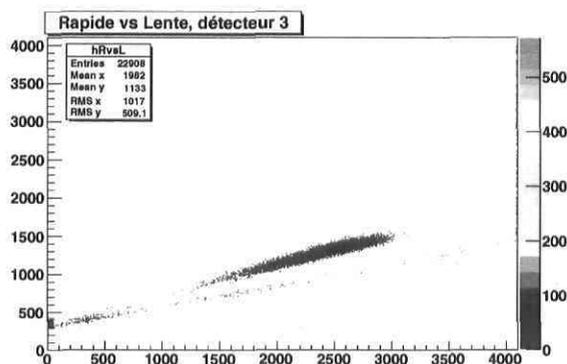
Sortie PM = 200 mV

Seuil FCC = 62 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.3 détecteur 3



Résolution : voie rapide = 11,8% voie lente = 8,1%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

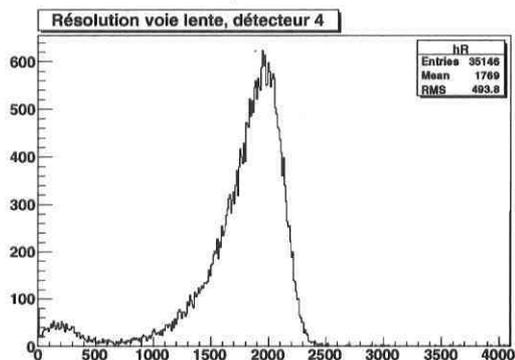
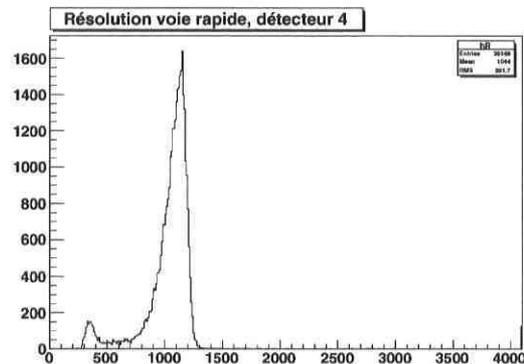
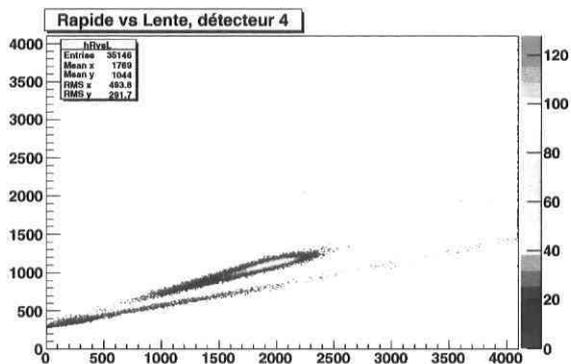
Sortie PM = 200 mV

Seuil FCC = 54 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.4 détecteur 4



Résolution : voie rapide = 11,5% voie lente = 17,6%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

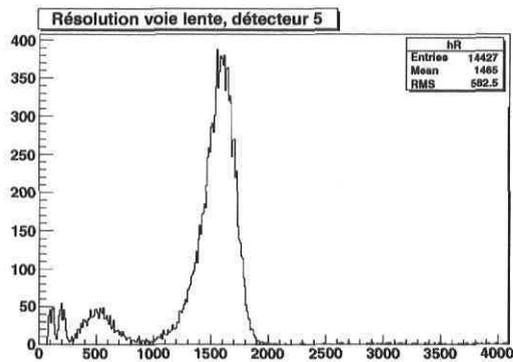
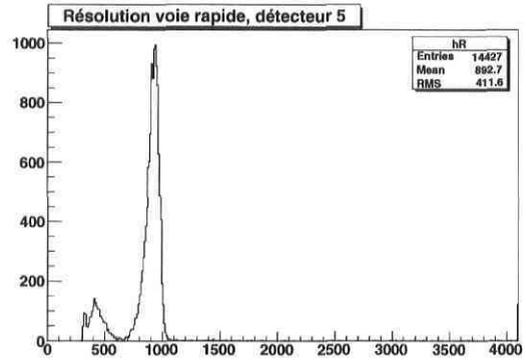
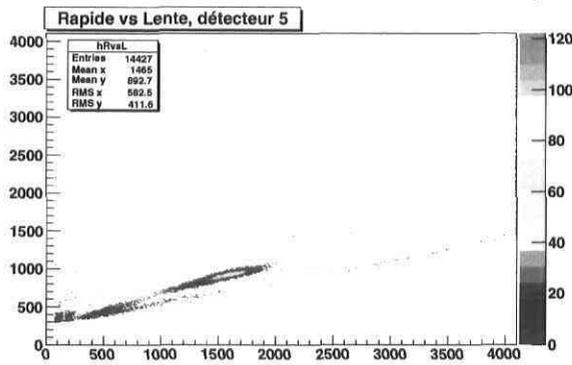
Sortie PM = 150 mV

Seuil FCC = 29 mV

Tension PM = -1290V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.5 détecteur 5



Résolution : voie rapide = 10,4% voie lente = 8,7%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

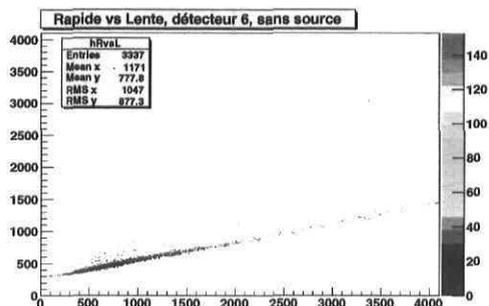
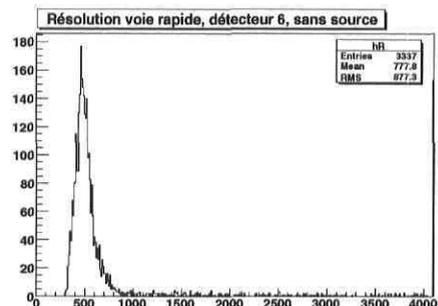
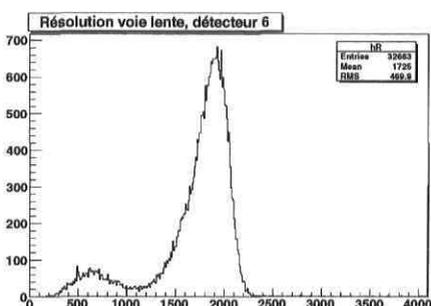
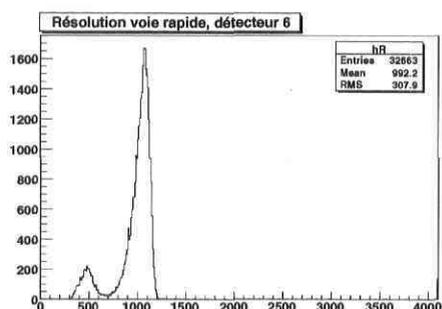
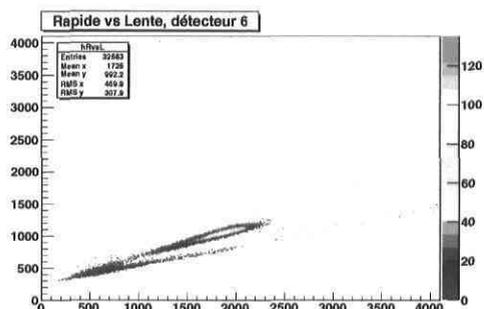
Sortie PM = 100 mV

Seuil FCC = 46 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.6 détecteur 6



Résolution : voie rapide = 15,0% voie lente = 17,0%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

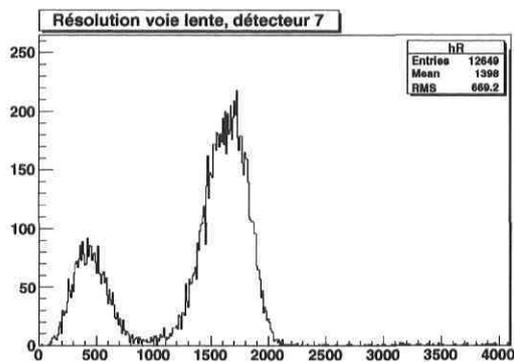
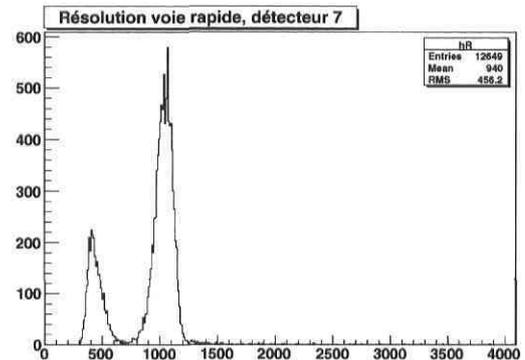
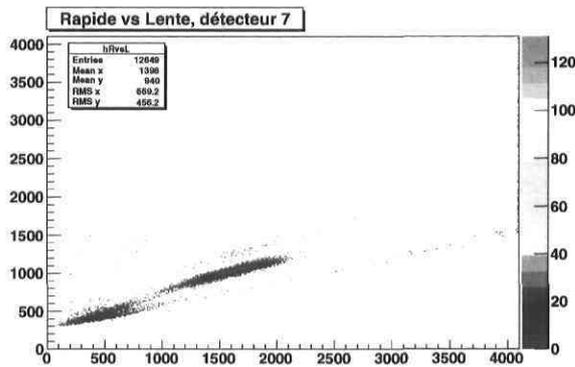
Sortie PM = 110 mV

Seuil FCC = 39 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.7 détecteur 7



Résolution : voie rapide = 17,8% voie lente = 22,9%

Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

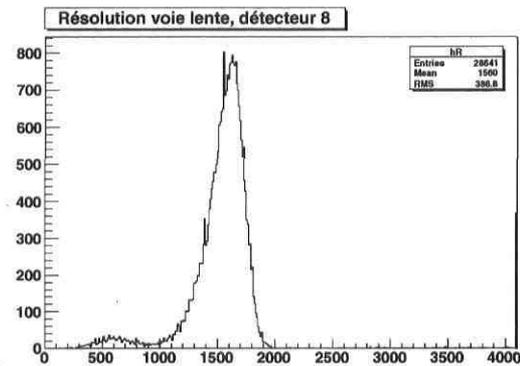
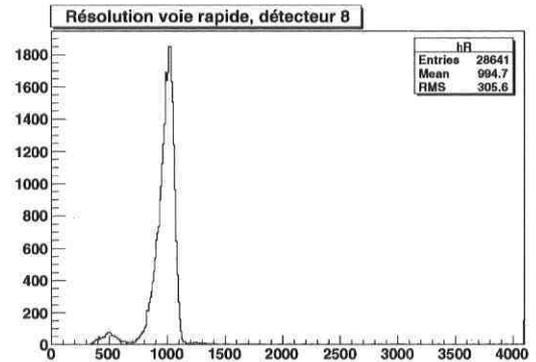
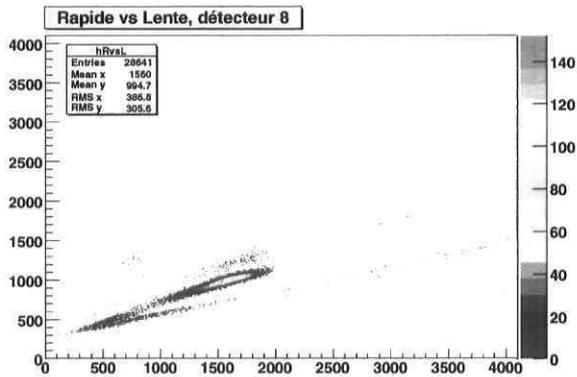
Sortie PM = 115 mV

Seuil FCC = 69 mV

Tension PM = -1500V

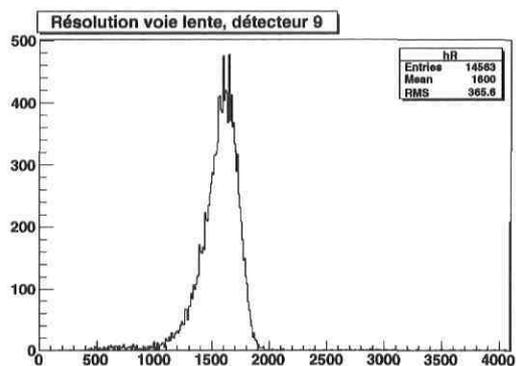
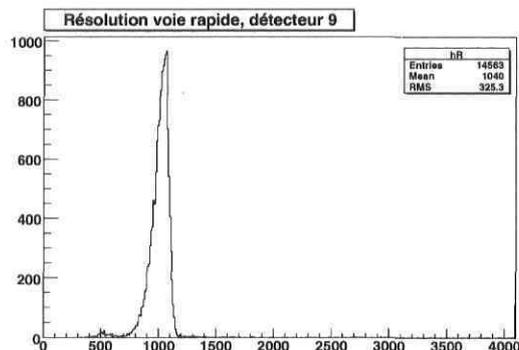
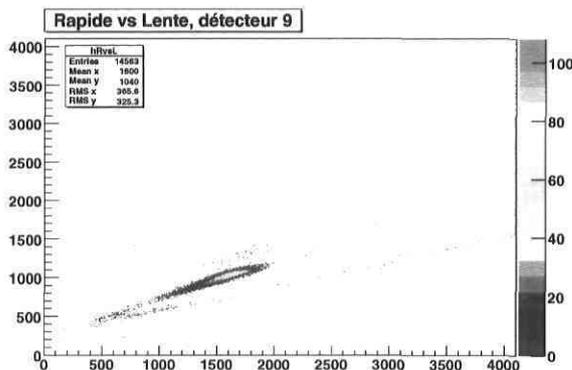
Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.8 détecteur 8



Résolution : voie rapide = 13,2% voie lente = 18,2%  
 Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s  
 Sortie PM = 115 mV  
 Seuil FCC = 47 mV  
 Tension PM = -1500V  
 Temps d'acquisition = 15 min.

## B.2.9 détecteur 9



Résolution : voie rapide = 7,8% voie lente = 17,0%

Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

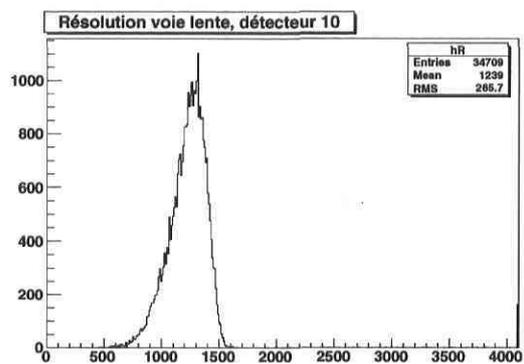
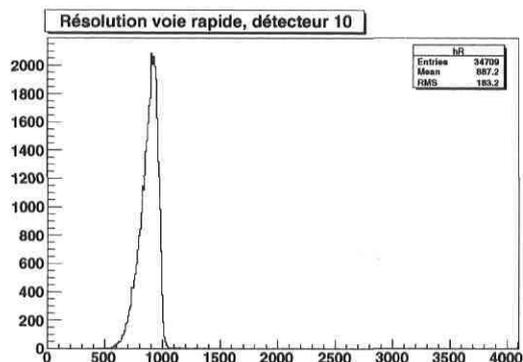
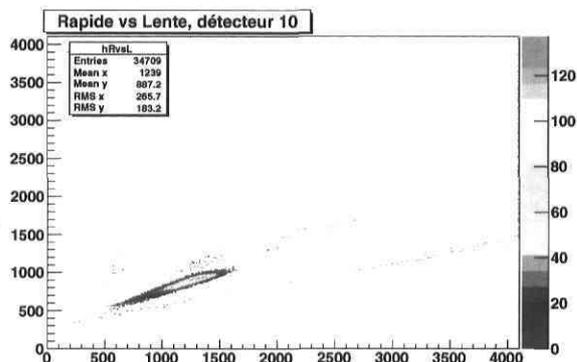
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 47 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.10 détecteur 10



Résolution : voie rapide = 11,4% voie lente = 16,0%

Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

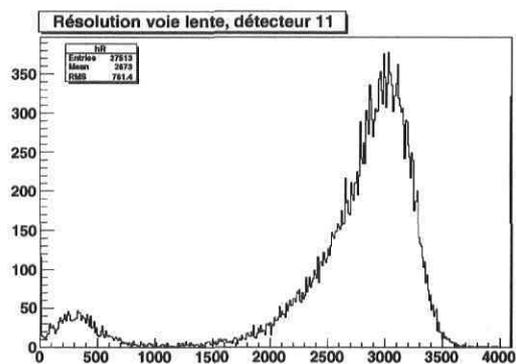
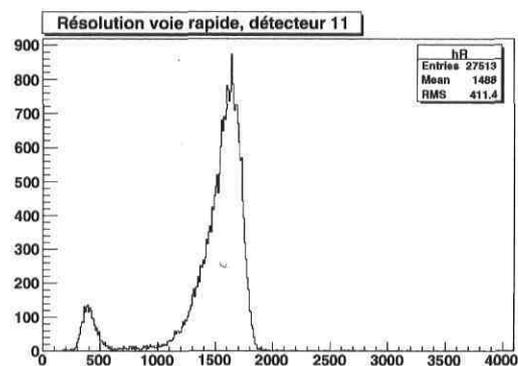
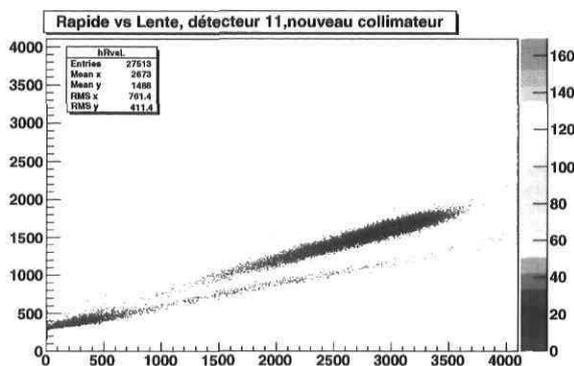
Sortie PM = 100 mV

Seuil FCC = 43 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.11 détecteur 11



Résolution : voie rapide = 13,0% voie lente = 16,7%

Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

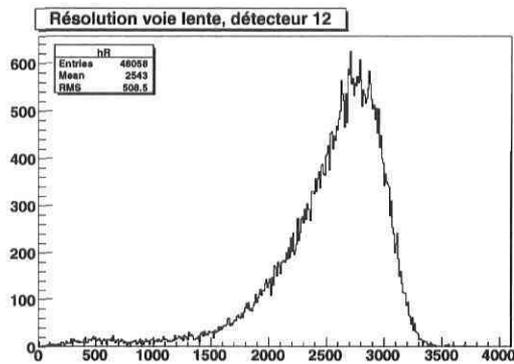
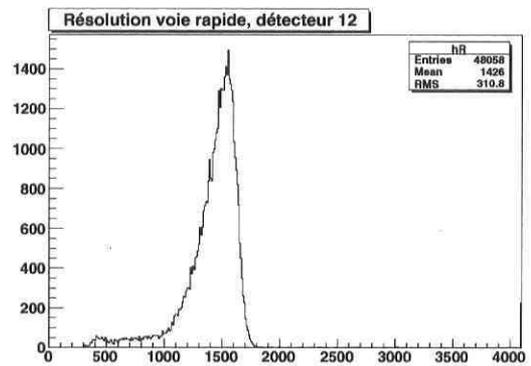
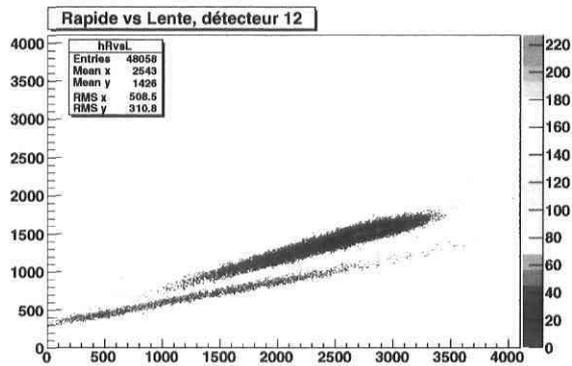
Sortie PM = 200 mV

Seuil FCC = 46 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.12 détecteur 12



Résolution : voie rapide = 11,1% voie lente = 19,0%

Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

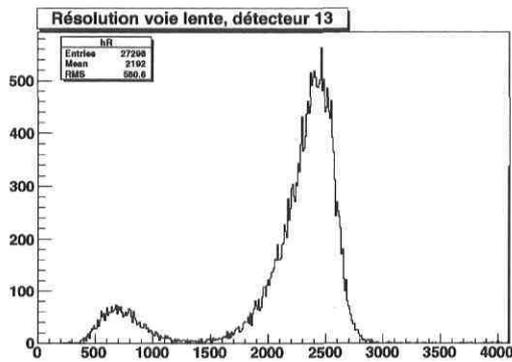
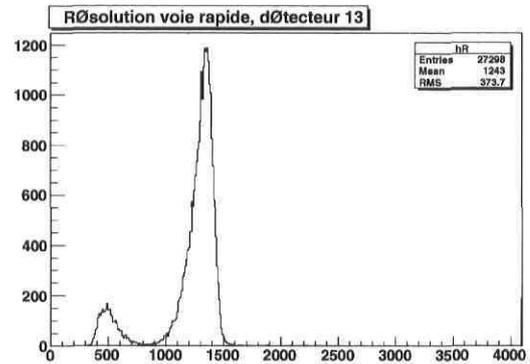
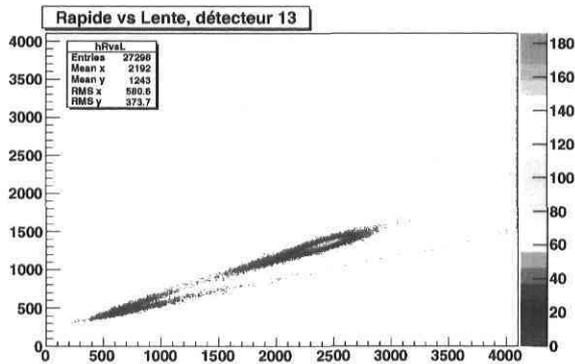
Sortie PM = 200 mV (amplifiée)

Seuil FCC = 46 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 14 min.

## B.2.13 détecteur 13



Résolution : voie rapide = 12,1% voie lente = 14,7%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

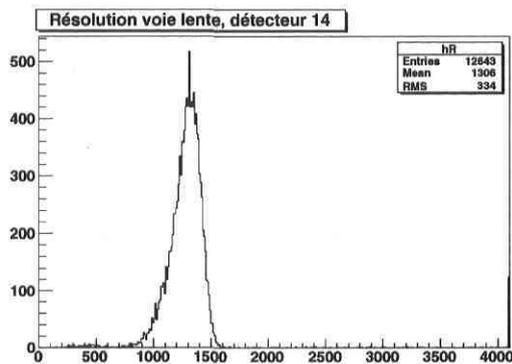
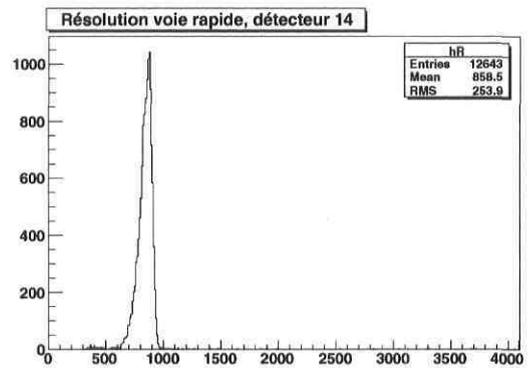
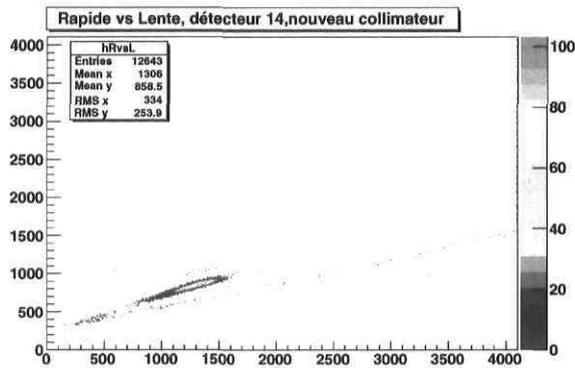
Sortie PM = 150 mV (amplifiée)

Seuil FCC = 69 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.14 détecteur 14



Résolution : voie rapide = 10,1% voie lente = 17,0%

Portes : Rapide = 650 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

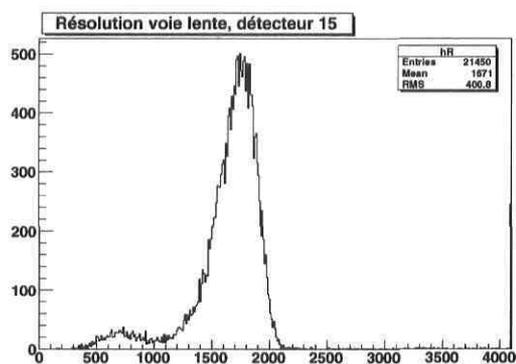
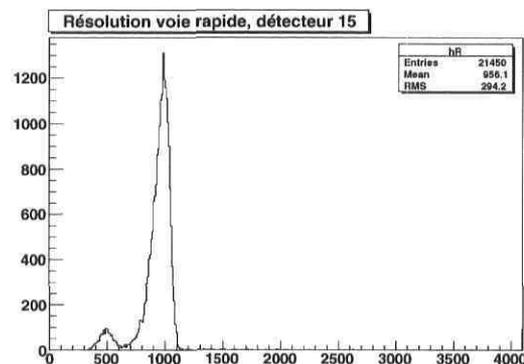
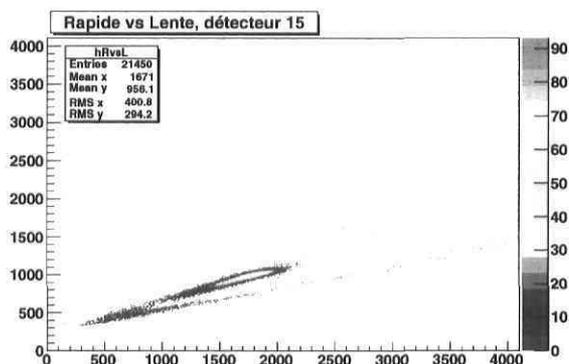
Sortie PM = 70 mV

Seuil FCC = 27 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.15 détecteur 15



Résolution : voie rapide = 12,2% voie lente = 17,0%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

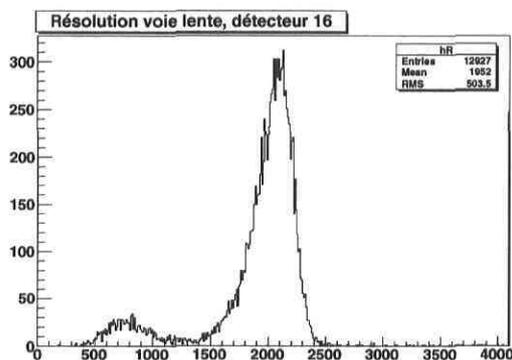
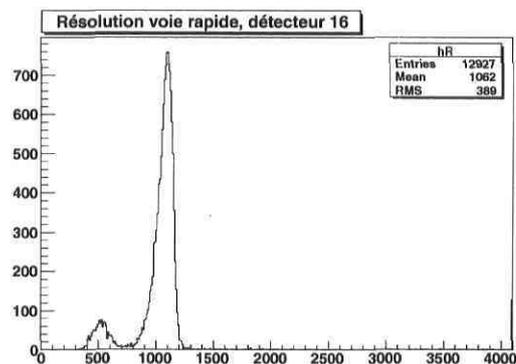
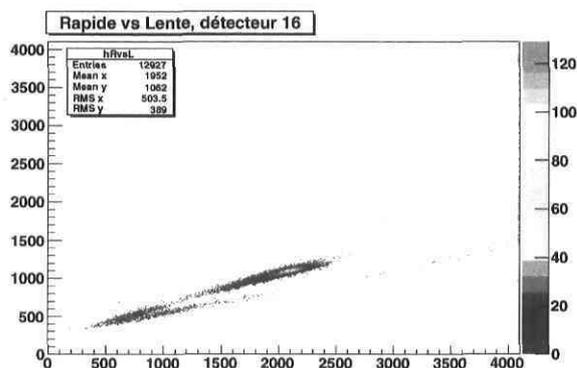
Sortie PM = 120 mV

Seuil FCC = 39 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.2.16 détecteur 16



Résolution : voie rapide = 9,6% voie lente = 10,7%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

Sortie PM = 100 mV

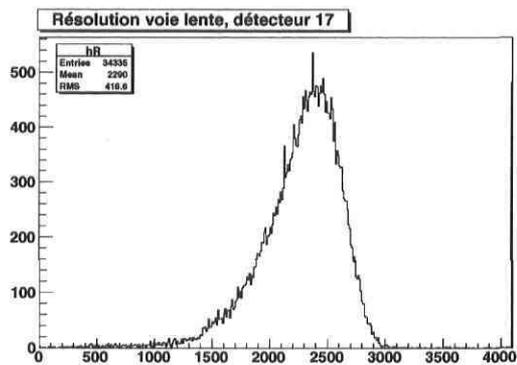
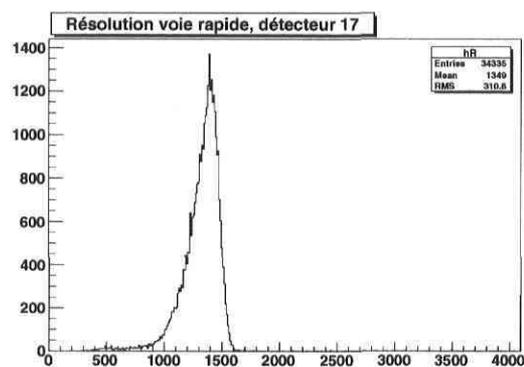
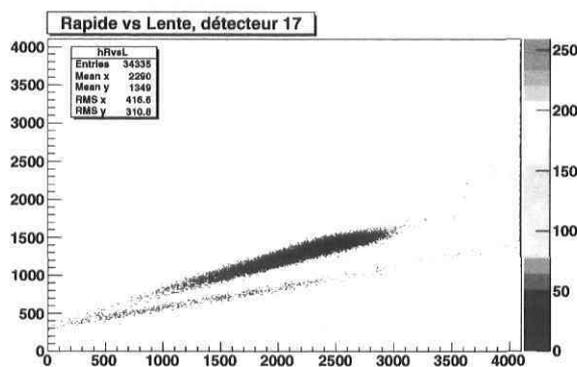
Seuil FCC = 54mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3 Anneau 5

### B.3.1 détecteur 17



Résolution : voie rapide = 15,4% voie lente = 21,7%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

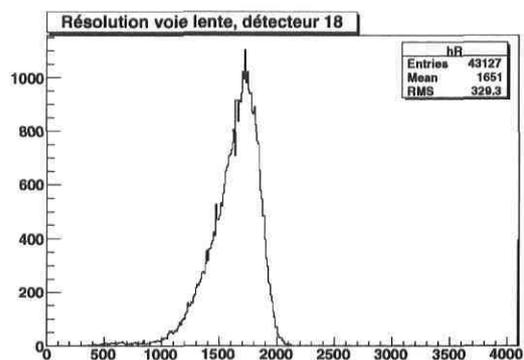
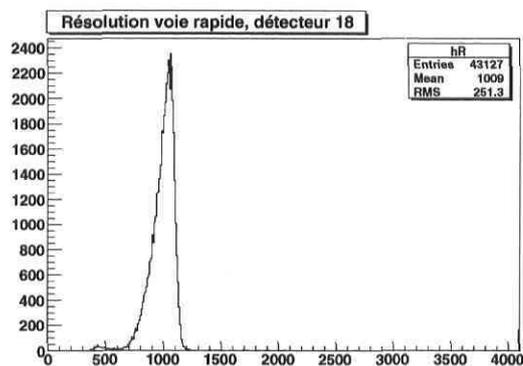
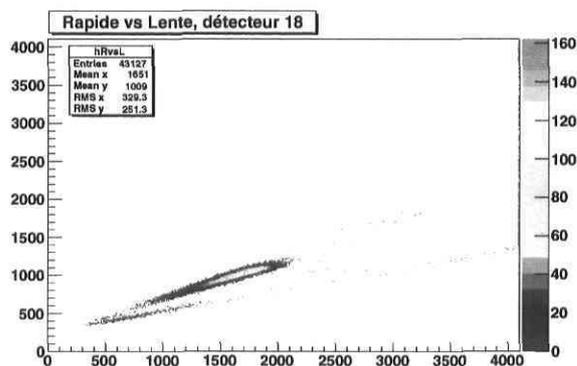
Sortie PM = 200 mV (amplifiée)

Seuil FCC = 58 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.2 détecteur 18



Résolution : voie rapide = 12,0% voie lente = 17,2%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

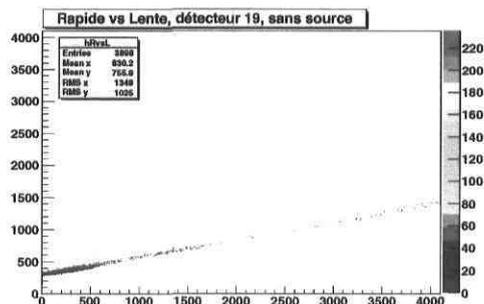
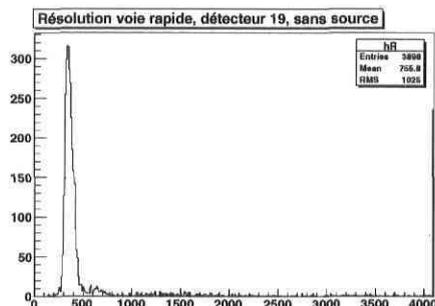
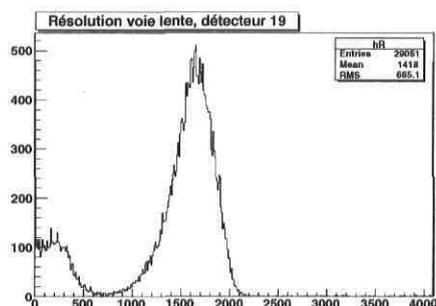
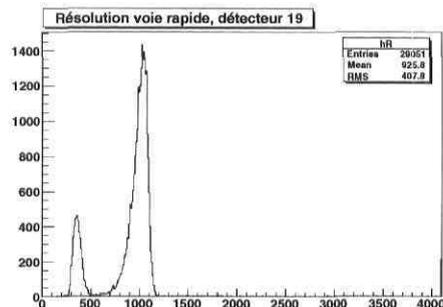
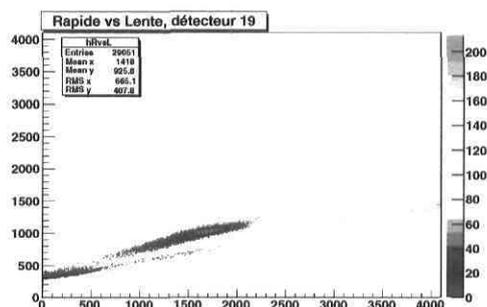
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 50 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.3 détecteur 19



Résolution : voie rapide = 11,6% voie lente = 25,4%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

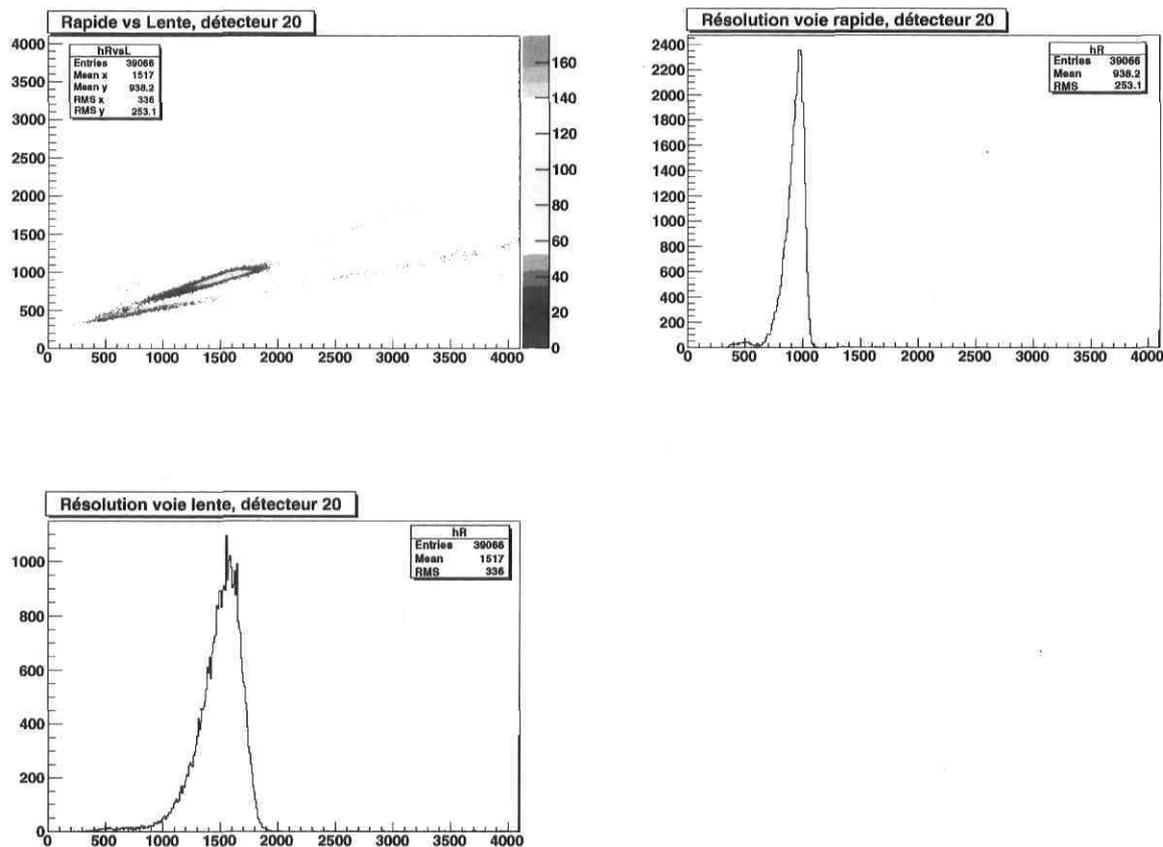
Sortie PM = 125 mV (amplifiée)

Seuil FCC = 35 mV

Tension PM = -1250V

Temps d'acquisition = 12 min. (pour les 2 séries de mesures)

## B.3.4 détecteur 20



Résolution : voie rapide = 13,3% voie lente = 18,9%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

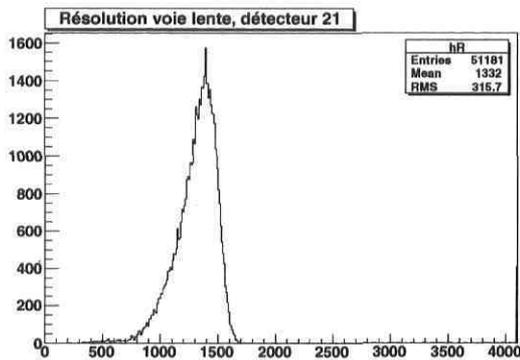
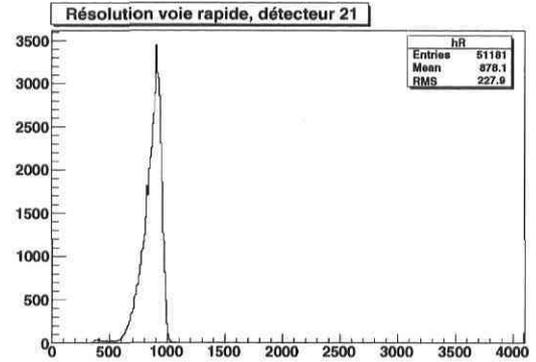
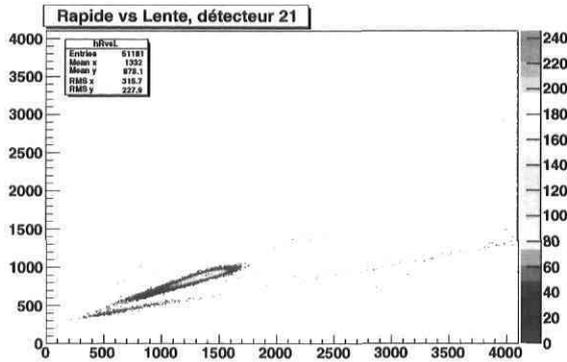
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 43 mV

Tension PM = -1500V

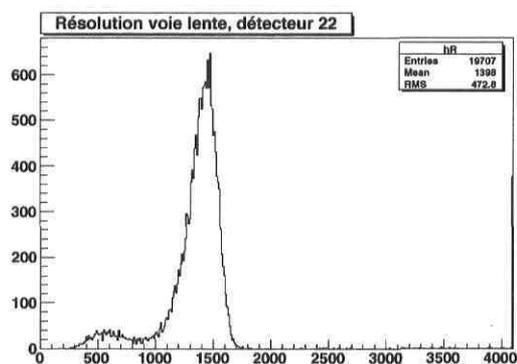
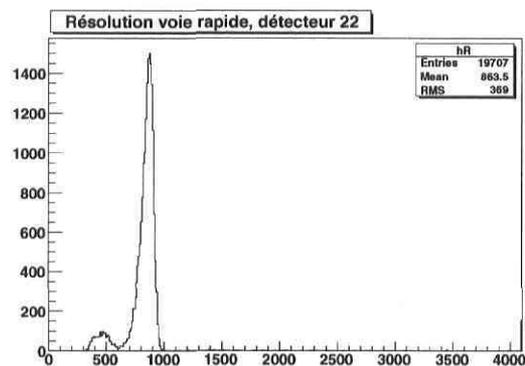
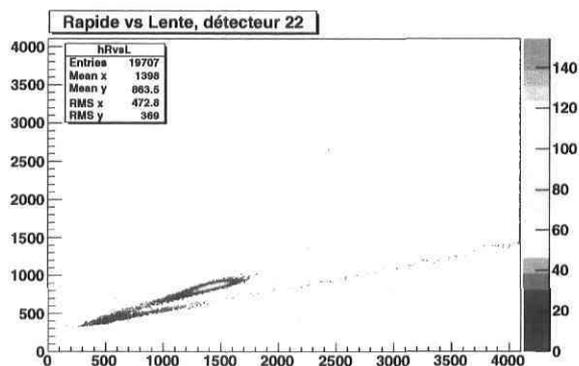
Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.5 détecteur 21



Résolution : voie rapide = 14,9% voie lente = 16,8%  
 Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s  
 Sortie PM = 115 mV  
 Seuil FCC = 43 mV  
 Tension PM = -1500V  
 Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.6 détecteur 22



Résolution : voie rapide = 12,1% voie lente = 14,9%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

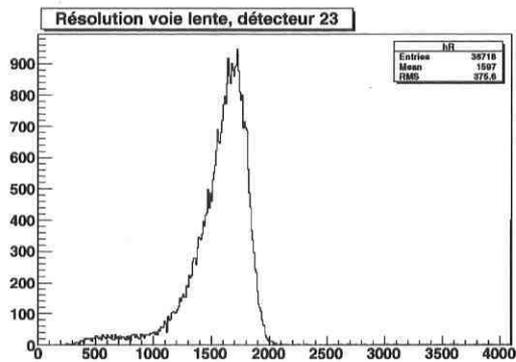
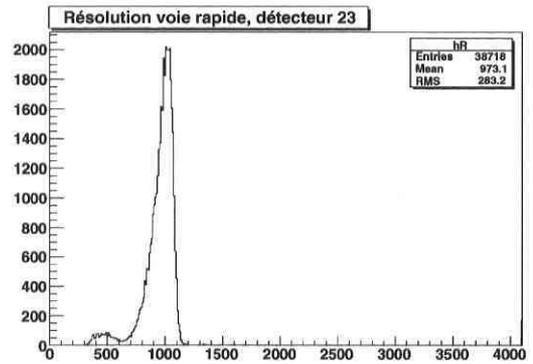
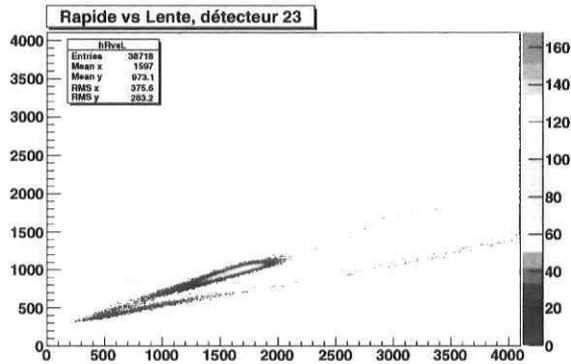
Sortie PM = 100 mV

Seuil FCC = 39 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.7 détecteur 23



Résolution : voie rapide = 14,0% voie lente = 16,6%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

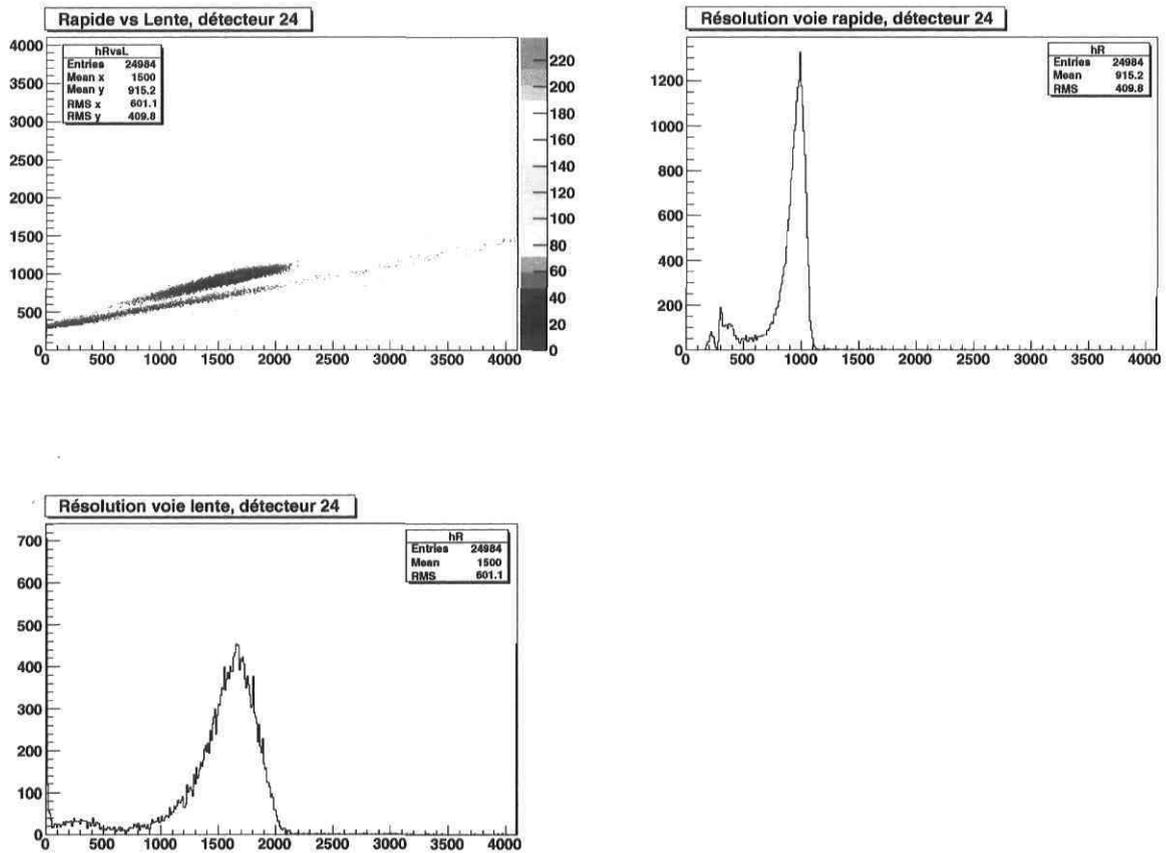
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 43 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.8 détecteur 24



Résolution : voie rapide = 13,2% voie lente = 22,7%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

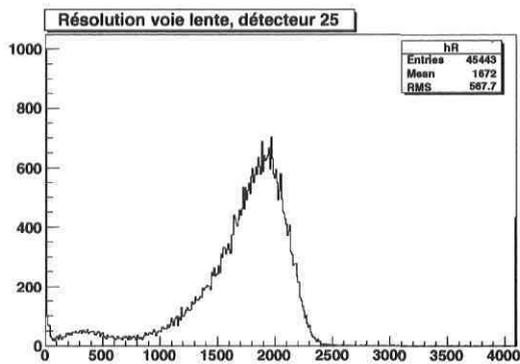
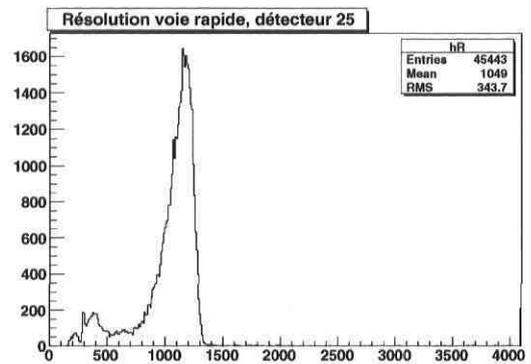
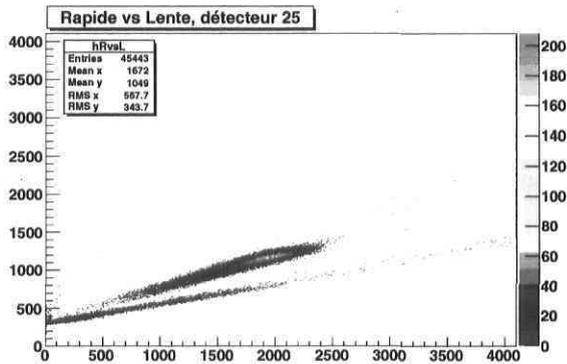
Sortie PM = 100 mV (amplifiée)

Seuil FCC = 24 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.9 détecteur 25



Résolution : voie rapide = 14,6% voie lente = 21,5%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

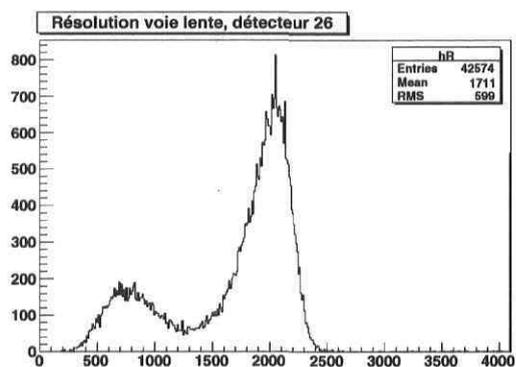
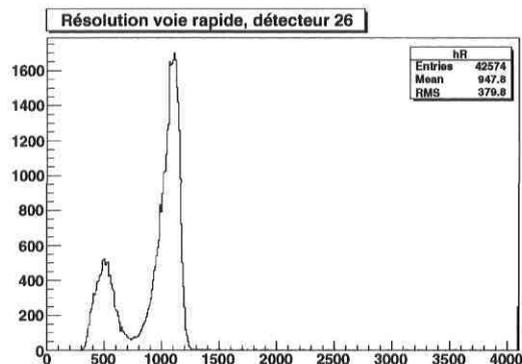
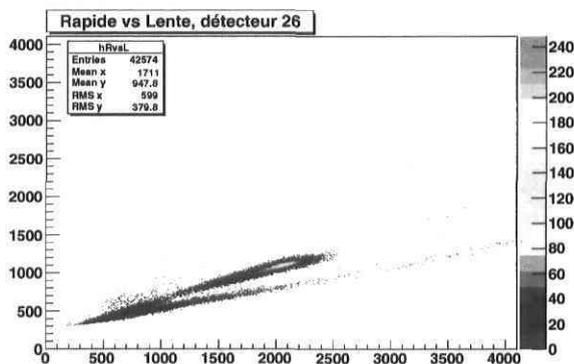
Sortie PM = 200 mV (amplifiée)

Seuil FCC = 28 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.10 détecteur 26



Résolution : voie rapide = 12,7% voie lente = 16,4%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

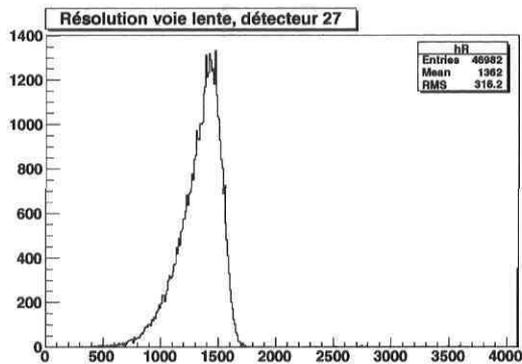
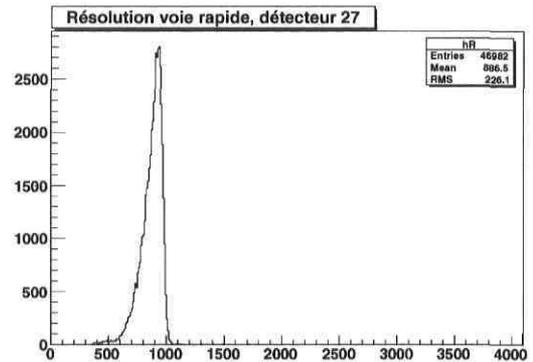
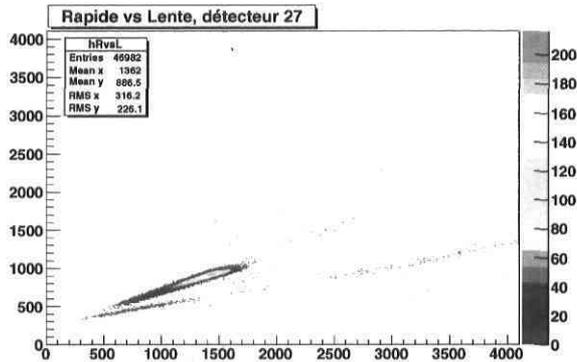
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 47 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 13 min.

## B.3.11 détecteur 27



Résolution : voie rapide = 11,3% voie lente = 19,6%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

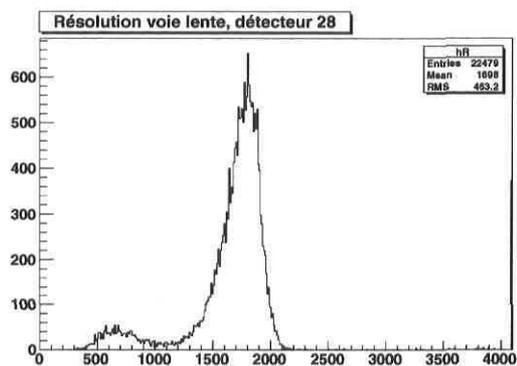
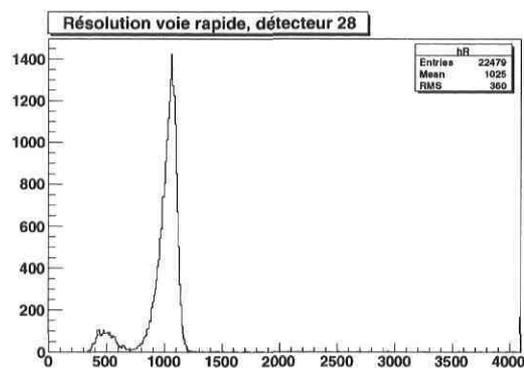
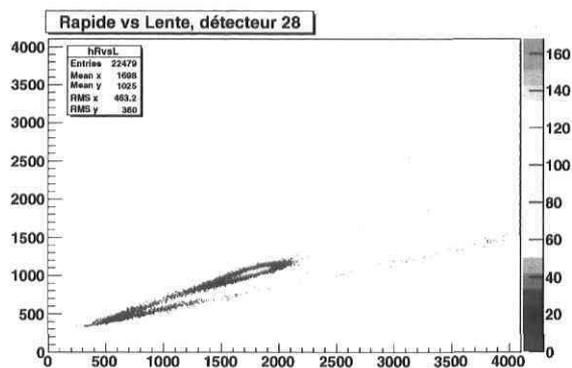
Sortie PM = 110 mV

Seuil FCC = 35 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.12 détecteur 28



Résolution : voie rapide = 10,4% voie lente = 12,2%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

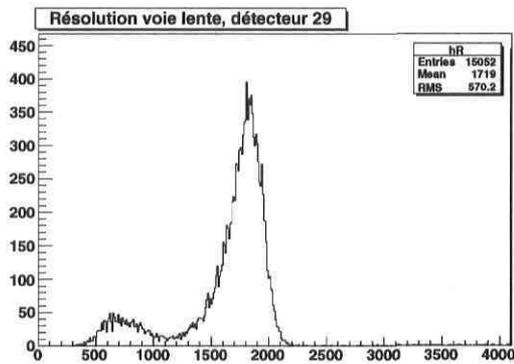
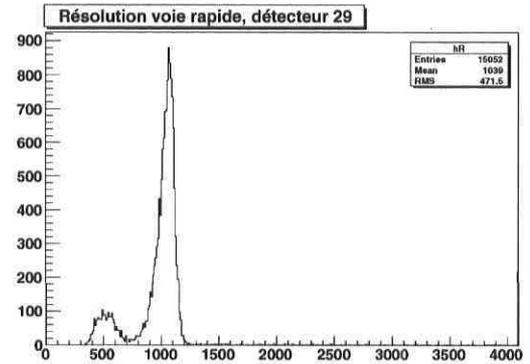
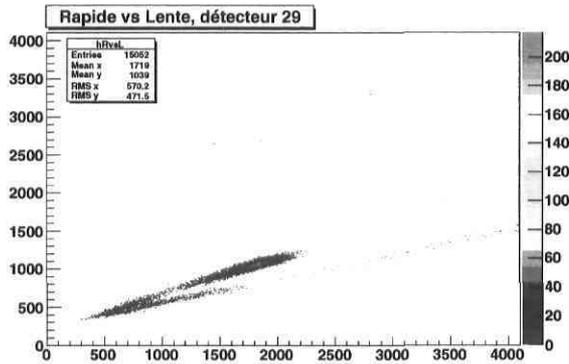
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 54 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.13 détecteur 29



Résolution : voie rapide = 15,9% voie lente = 16,3%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

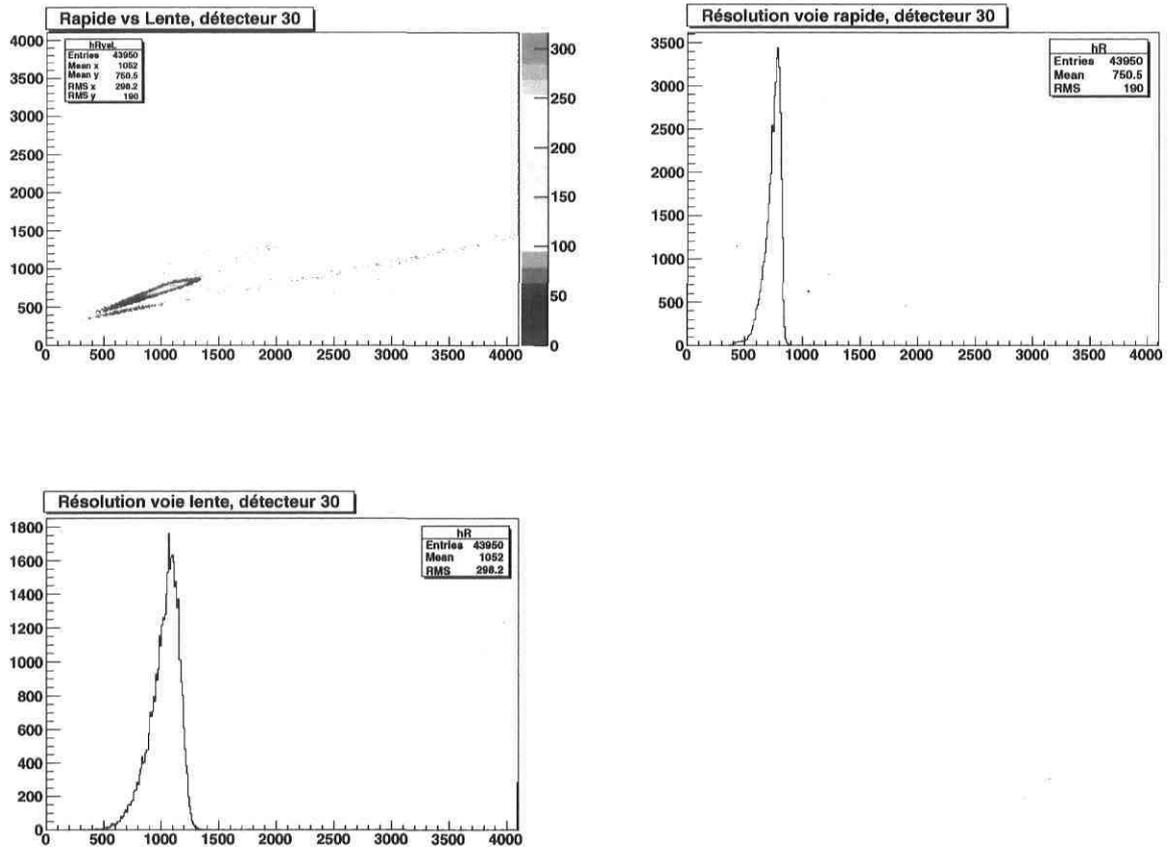
Sortie PM = 125 mV

Seuil FCC = 58 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

## B.3.14 détecteur 30



Résolution : voie rapide = 13,5% voie lente = 19,9%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

Sortie PM = 80 mV

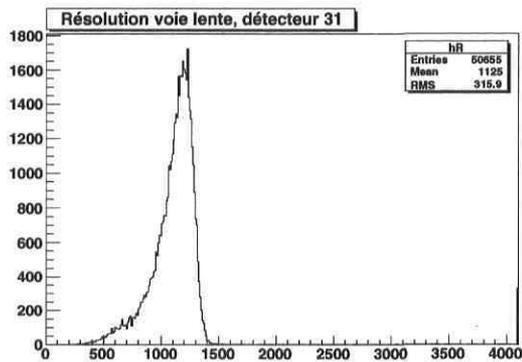
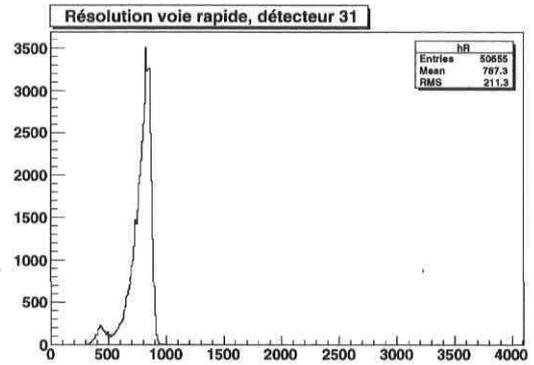
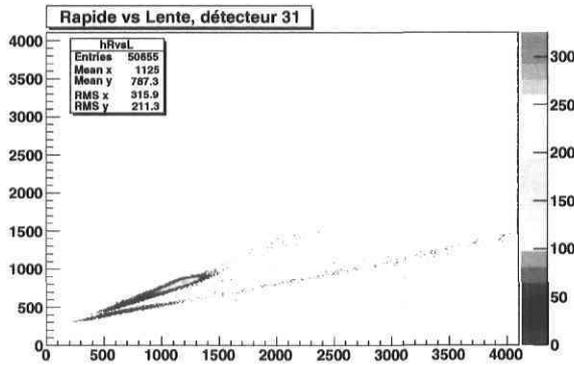
Seuil FCC = 28 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 10 min.

Remarque : présence de bulles macroscopiques (moins de 0,5 mm de diamètre) à l'interface CsI-PM

## B.3.15 détecteur 31



Résolution : voie rapide = 13,9% voie lente = 20,4%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

Sortie PM = 80 mV

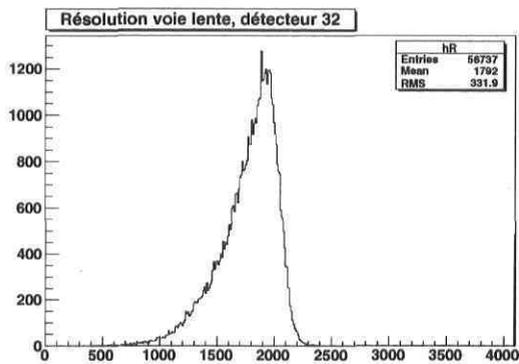
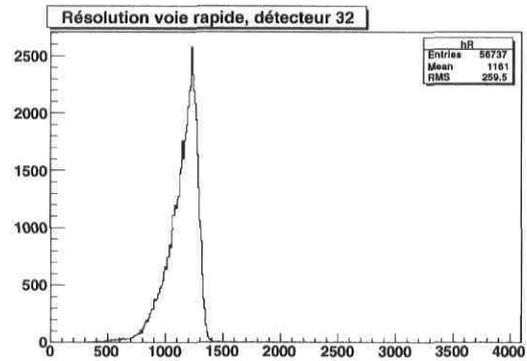
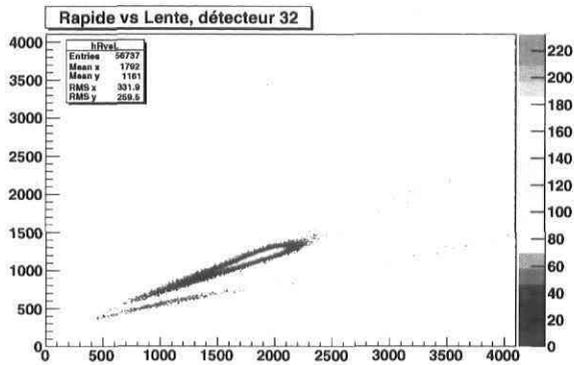
Seuil FCC = 24 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 11 min.

Remarque : cristale fendu de bord en bord (cause incertaine)

## B.3.16 détecteur 32



Résolution : voie rapide = 12,3% voie lente = 15,8%

Portes : Rapide = 600 ns Lente = 1,2  $\mu$ s

Sortie PM = 150 mV

Seuil FCC = 62 mV

Tension PM = -1500V

Temps d'acquisition = 12 min.

# Annexe C

## Le photomultiplicateur à position

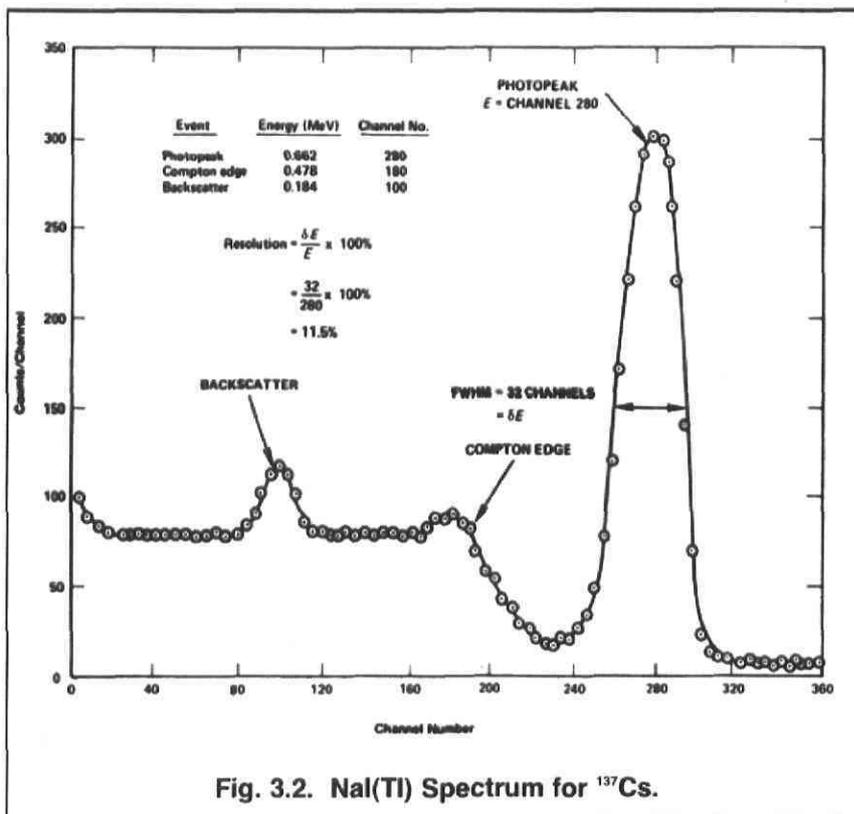
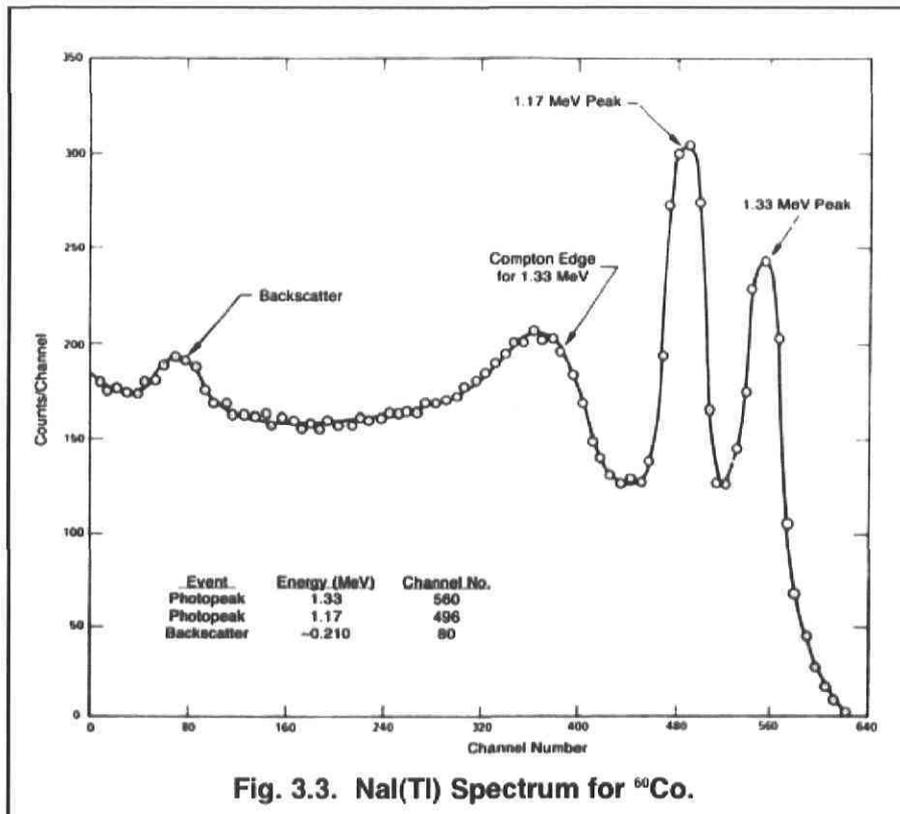


FIG. C.1: Spectre théorique source de <sup>137</sup>Cs, avec un cristal de NaI [ORT84]

FIG. C.2: Spectre théorique source de  $^{60}\text{Co}$ , avec un cristal de NaI [ORT84]

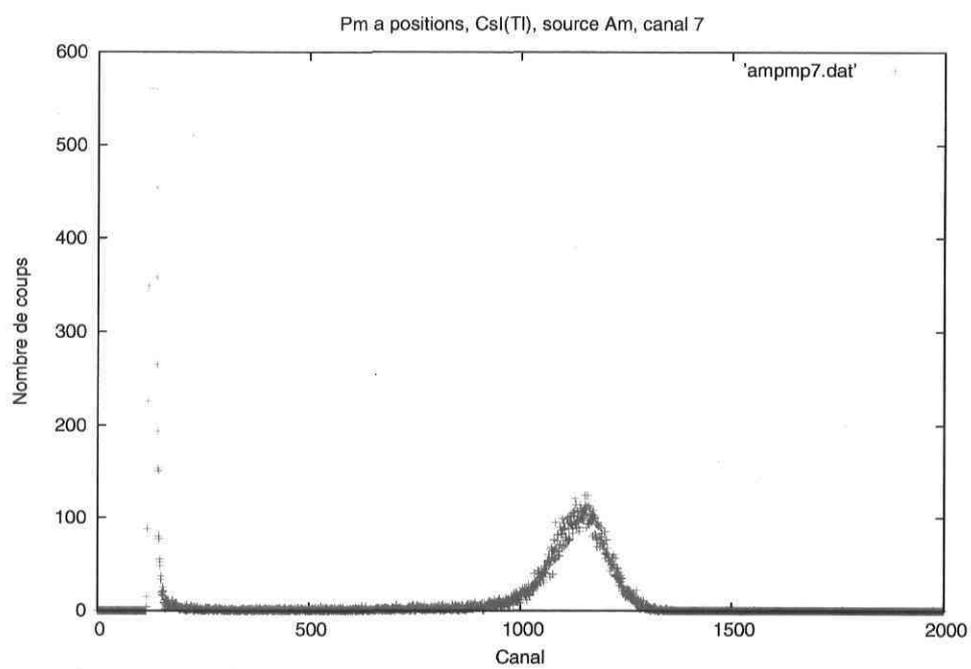


FIG. C.3: Mesure de résolution du PMP, canal 7, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

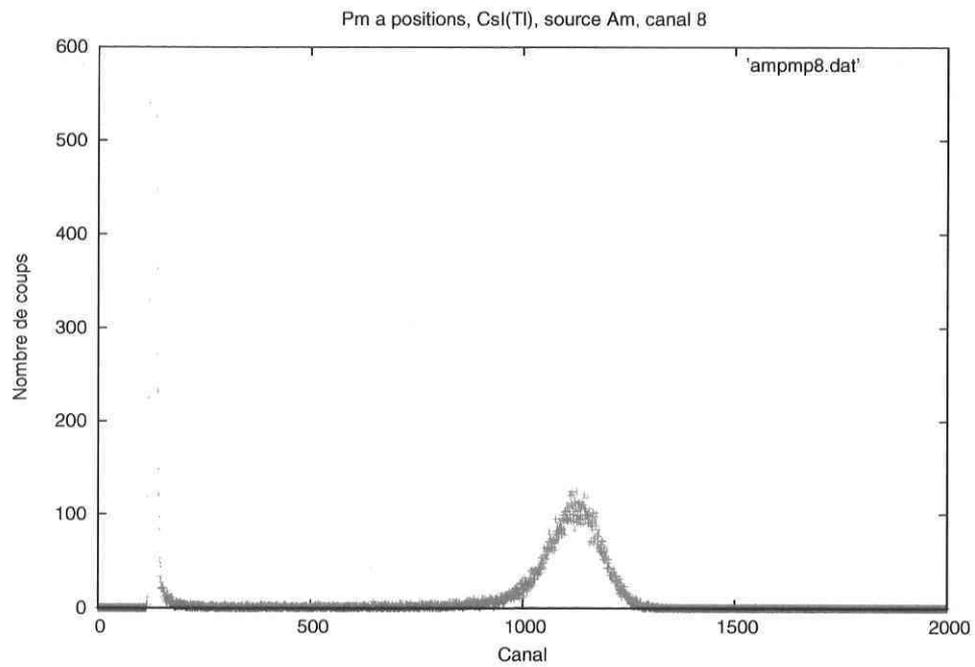


FIG. C.4: Mesure de résolution du PMP, canal 8, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

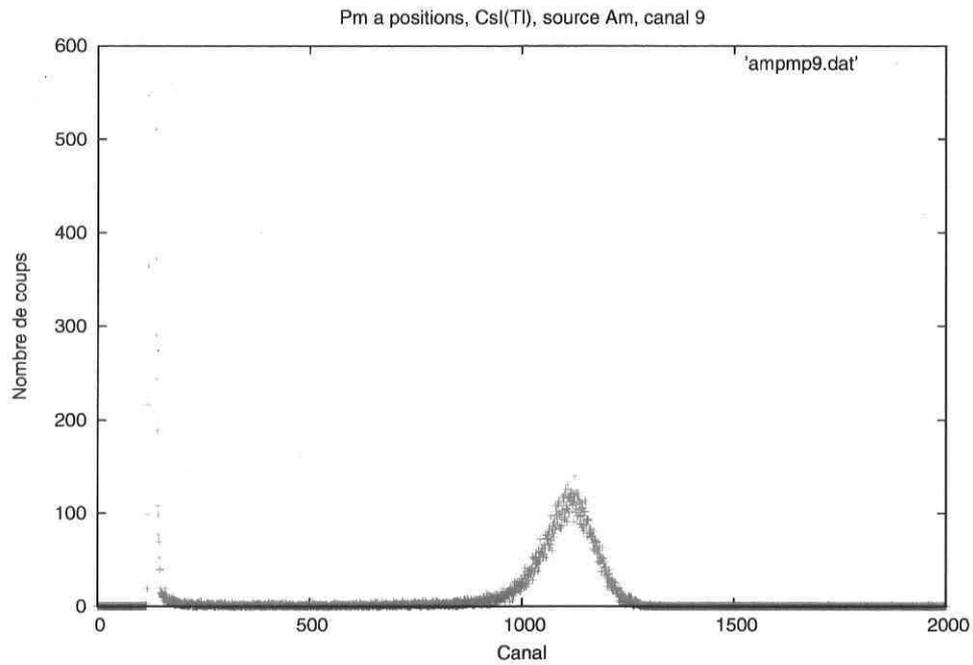


FIG. C.5: Mesure de résolution du PMP, canal 9, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

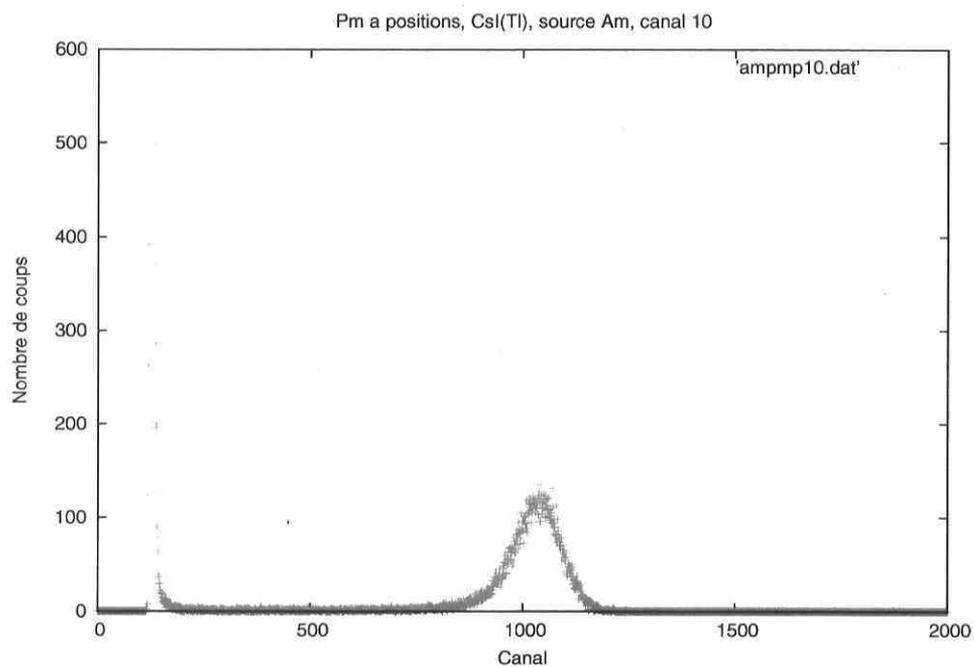


FIG. C.6: Mesure de résolution du PMP, canal 10, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

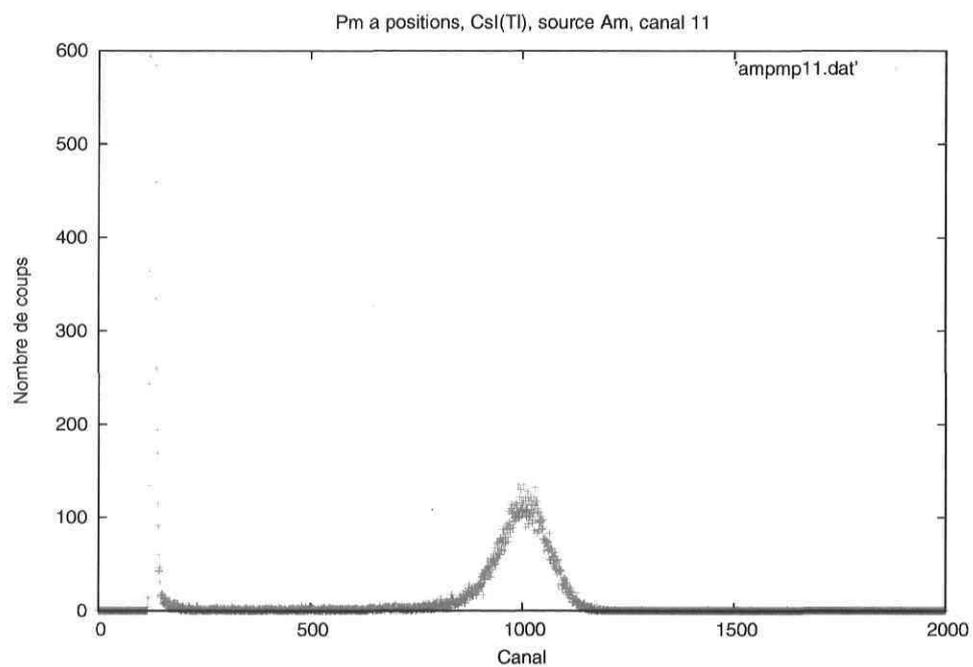


FIG. C.7: Mesure de résolution du PMP, canal 11, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

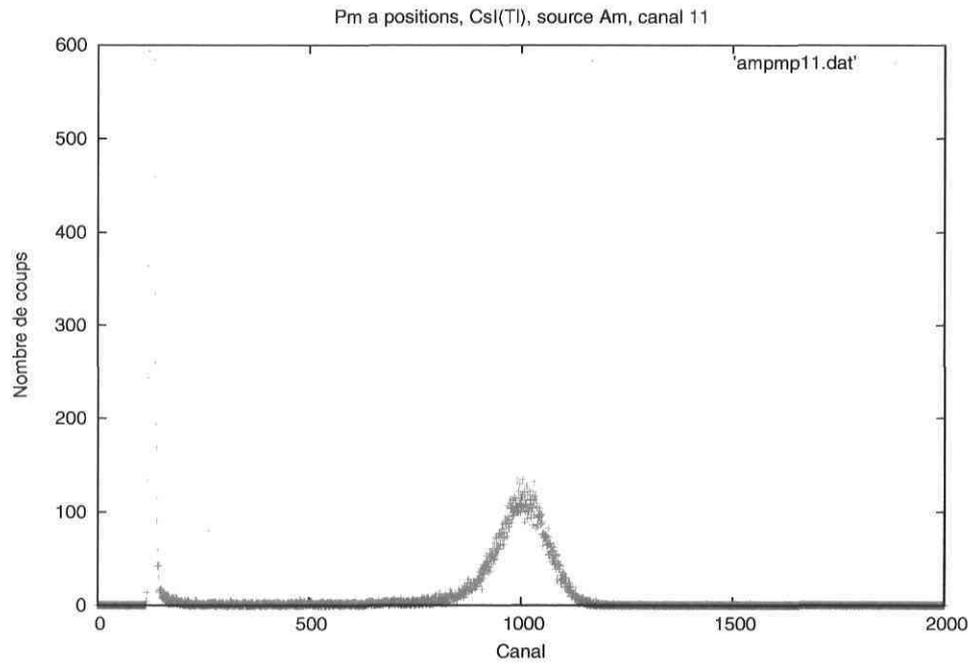


FIG. C.8: Mesure de résolution du PMP, canal 11, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

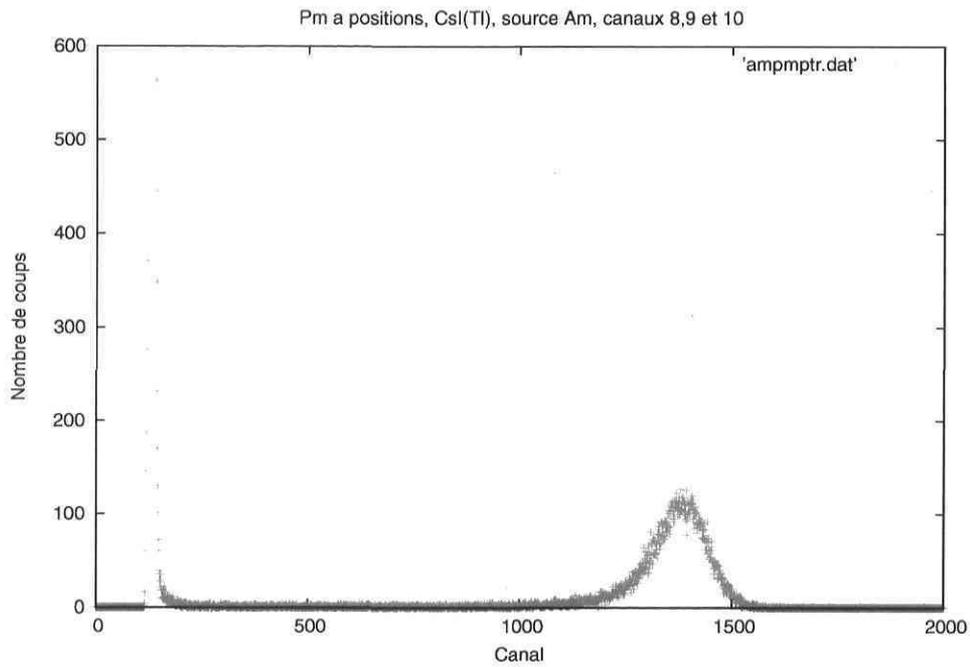


FIG. C.9: Mesure de résolution du PMP, canaux 8+9+10, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

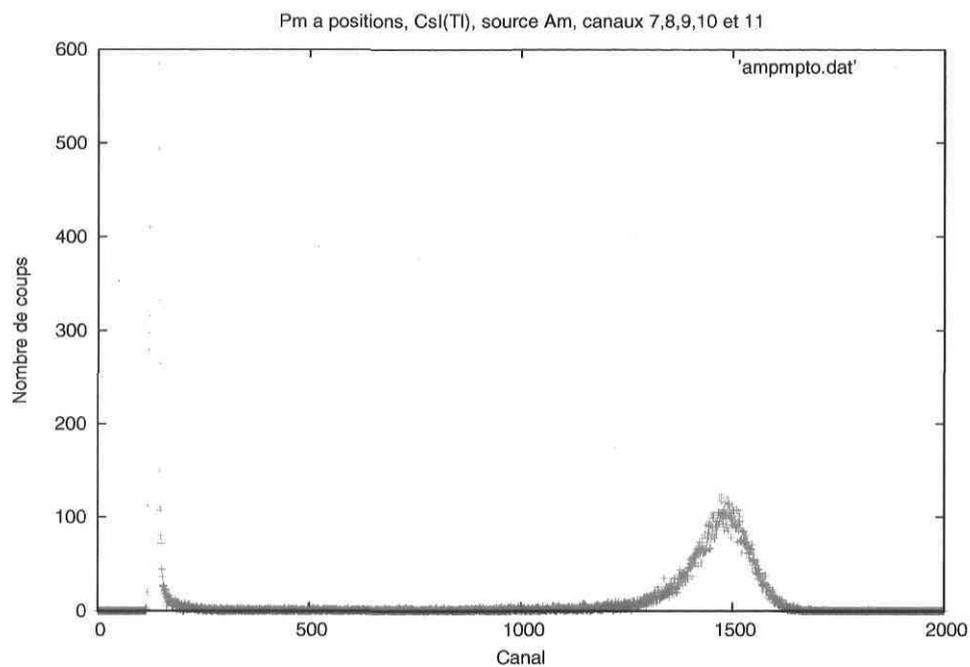


FIG. C.10: Mesure de résolution du PMP, canaux 7+8+9+10+11, source de  $^{241}\text{Am}$ , cristal de CsI(Tl).

# Annexe D

## Le contenu du CD-ROM

L'arborescence du CD-ROM est présentée, ainsi qu'un bref résumé du contenu de chaque dossier.

### D.1 Détecteurs\_neutrons

Ce dossier contient les programmes de simulation GEANT4 rattachés aux détecteurs à neutrons ainsi que les résultats associés.

#### **detec\_bc501a :**

Programme générique de simulation d'efficacité pour les différents détecteurs à neutrons.

#### **eff\_propres :**

Ensemble des graphiques et résultats bruts des différentes simulations pour chaque détecteur. Une visualisation 3D pour chaque situation est disponible en format VRML (fichiers \*.wrl). De plus, les fichiers macros utilisés pour générer les graphiques avec le logiciel GNUPLOT sont inclus (fichiers \*.gnu).

## D.2 Detecteurs\_CsI(Tl)

Ce dossier contient les programmes de simulation GEANT4 rattachés aux détecteurs CsI(Tl) de la matrice HERACLES. Il contient également les résultats des divers tests menés à TRIUMF sur l'ensemble des détecteurs.

### **tests\_TRIUMF :**

Contient les résultats des tests sur les CsI(Tl) menés à TRIUMF, au printemps 2005.

### **detCsI :**

Contient le programme de simulation GEANT4 pour le CsI(Tl).