HAL
open science

Simulation de la détection du rayonnement gamma par un détecteur germanium. Utilisation des plate-formes Gate et Geant4

F. Courtine, Didier Miallier, Thierry Pilleyre, S. Sanzelle

To cite this version:

F. Courtine, Didier Miallier, Thierry Pilleyre, S. Sanzelle. Simulation de la détection du rayonnement gamma par un détecteur germanium. Utilisation des plate-formes Gate et Geant4. 20emes Journees des LARDS, Oct 2003, Clermont-Ferrand, France. pp.1-5. in2p3-00023950

HAL Id: in2p3-00023950
https://hal.in2p3.fr/in2p3-00023950

Submitted on 29 Mar 2005

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

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

Simulation de la détection du rayonnement gamma par un détecteur germanium
Utilisation des plate-formes G.A.T.E. et G.E.A.N.T.4

COURTINE Fabien, MIALLIER Didier, PILLEYRE Thierry, SANZELLE Serge

équipe THERMOLUMINESCENCE (TL)-Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC)

IN2P3-CNRS-Université Blaise Pascal-63177 Aubière cedex

1-Résumé

Nous disposons d'un spectromètre au germanium intrinsèque pour réaliser des mesures d'activité d'échantillons radioactifs. Il est nécessaire de faire un étalonnage en efficacité du spectromètre. Celui-ci peut-être réalisé expérimentalement mais pour des raisons pratiques, nous ne pouvons le faire que pour certaines plages d'énergies et certains milieux, ceci étant fonction des échantillons de référence dont nous disposons. Or il peut arriver que nous soyons amenés à mesurer l'activité de nucléides inconnus dans d'autres milieux. Pour étendre l'étalonnage, nous avons utilisé les plates-formes de simulation G.A.T.E et G.E.A.N.T.4. Tout d'abord, dans les simulations nous avons modélisé une source ponctuelle en configuration « puits » du détecteur et négligé les zones mortes de celui-ci. Nous nous sommes rendus compte qu'elles jouaient un rôle important dans l'efficacité de détection. Comme leurs dimensions données par le constructeur sont imprécises, nous avons dû faire des ajustements entre efficacité expérimentale et efficacité simulée pour déterminer leurs valeurs. Finalement nous sommes arrivés à un modèle de zone morte dont l'épaisseur est variable. Avec ce modèle on arrive à une valeur moyenne du rapport efficacité simulée sur efficacité expérimentale de (0.97+/-0.01).

2-Problématique

Notre objectif est de détecter et de déterminer l'activité de radio-nucléides émetteurs gamma, dans un intervalle d'énergie allant de 20 keV à 1500 keV, pour différents milieux solides ou liquides. Pour ce faire nous disposons d'un détecteur au germanium intrinsèque qui est un mono-cristal cylindrique (figure n° 1) .

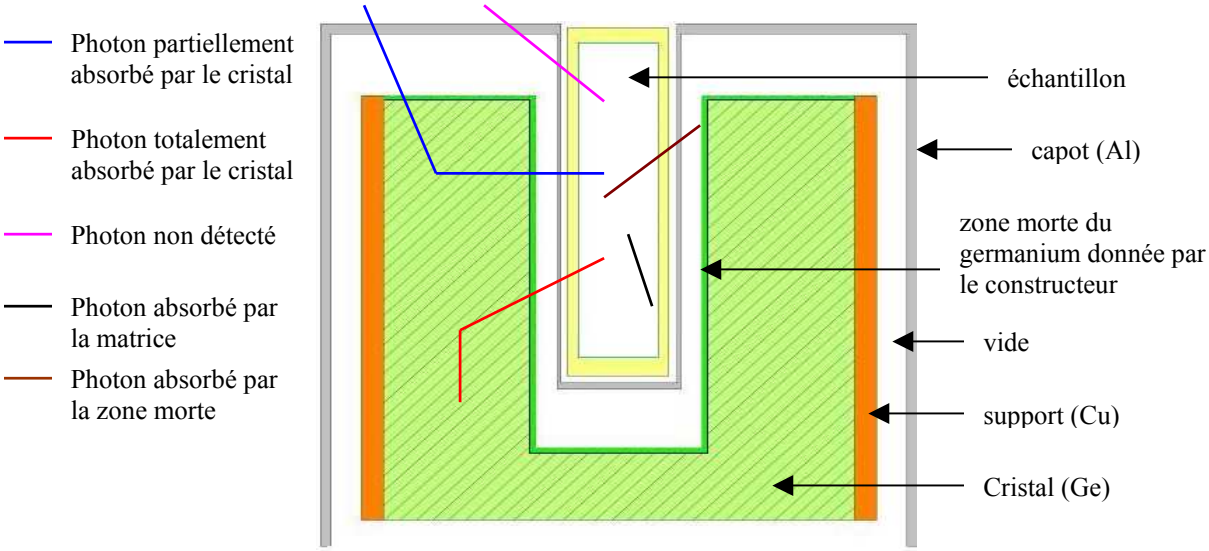

Figure n° 1 : schéma du détecteur au germanium
Le cristal est sous vide. Les zones mortes externes ne sont pas représentées.

Le détecteur peut être utilisé dans deux configurations : soit l'échantillon est introduit à l'intérieur du détecteur (configuration « puits » qui est représentée sur la figure n° 1) soit il entoure celui-ci (configuration « marinelli »). Ici nous nous limiterons à la géométrie puits, de même nous ne nous intéresserons qu'au cas des sources ponctuelles.
Nous voulons évaluer l 'efficacité de comptage ε qui est le rapport entre le nombre de photons détectés et le nombre de photons émis par l'échantillon. Lorsqu'un noyau radioactif se désintègre en émettant un photon, il peut se présenter plusieurs cas :

- Le photon est totalement absorbé par le cristal ce qui permet de remonter à l'activité des radio-nucléides par une mesure dans le « photopic » à l'énergie nominale du photon.
- Le photon est partiellement absorbé et ressort du détecteur. Il laisse donc dans le détecteur une énergie variable sans contribuer au photopic.
- Le photon n'est pas détecté car le cristal de germanium ne couvre pas les 4π stéradian (effet géométrique).
- Le photon est absorbé totalement ou partiellement par l'échantillon lui-même (effet de matrice) et ne sera jamais détecté dans le photopic.
- Le photon est absorbé par la zone morte du cristal de germanium. Bien qu'il soit absorbé par le cristal, il ne contribue pas au photopic car il s'agit d'une zone inactive. Ceci contribue aussi à diminuer l'efficacité de détection.

A cela se rajoutent aussi d'autres problèmes :

- L'efficacité dépend de l'énergie ce qui requiert de faire des étalonnages sur une large gamme d'énergie. Mais cela nécessite de disposer d'une grande quantité d'échantillons de référence.
- L'efficacité est fonction des caractéristiques du cristal (géométrie, dimensions, zones mortes), et du détecteur (géométrie et nature des matériaux qui le constituent) ainsi que des paramètres de réglage de l'électronique de la chaîne d'acquisition qui ne sont pas pris en compte ici.

3-Méthode

Dans notre cas un étalonnage entièrement expérimental ne serait pas possible pour les raisons suivantes :

- Les effets de matrice sont différents d'un échantillon à un autre
- Même si nous disposons de suffisamment d'échantillons de référence pour couvrir toute la gamme d'énergie voulue, peu sont utilisables à cause du biais introduit par les cascades. En effet, considérons un noyau radioactif qui retourne à l'état fondamental en passant par un niveau excité. Pendant un temps très court, il peut y avoir une émission simultanée de deux gamma au lieu d'un seul. Les deux photons peuvent être absorbés (totalement ou partiellement) de manière simultanée, ce qui induit un défaut de comptage dans le photopic.

C'est pourquoi nous avons choisi la voie d'un étalonnage semi-expérimental : il s'agit de faire un étalonnage avec des milieux de composition et d'activité connus qui seront combinés avec des simulations Monte-Carlo sur G.E.AN.T.4. Pour accéder à d'autres énergies et calculer les effets de matrice. G.E.A.N.T.4 est une plate-forme de simulation Monte Carlo développé au C.E.R.N. par les physiciens des hautes énergies pour simuler des collisions entre particules ainsi que les interactions avec le détecteur dans des accélérateurs. Récemment, des extensions à basse énergie ont été apportées à G.E.A.N.T.4 en vue d'une application à la médecine nucléaire.
G.E.A.N.T.4 utilise le langage orienté objet qui nécessite quelques bases, c'est pourquoi, dans un souci de convivialité, une interface utilisateur ne nécessitant pas la pratique du langage orienté objet a été implémentée : il s'agit de G.A.T.E..
Dans un premier temps nous avons réalisé des simulations avec G.A.T.E. d'une source de photons de 32 keV déplacée verticalement dans le puits, puis nous fait une comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus par mesure de l'efficacité de détection de la raie X à 32 keV d'une source ponctuelle de ^{137}Cs étalonnée.

4-Résultats

Nous avons procédé en deux étapes. Tout d'abord nous avons fait une simulation simplifiée dans laquelle nous avons négligé les zones mortes, c'est-à-dire que tout le volume du cristal de germanium est actif pour la détection. En réalité, pour améliorer la conduction entre le cristal de germanium et les zones de contact P et N, il existe des zones dopées (zones mortes) qui ne participent pas à la détection. Dans le cristal de germanium, on distingue deux types de zones mortes :

- Une zone morte « interne » qui correspond à l'implantation de bore le long du puits de germanium.
- Une zone morte « externe » qui est due à la diffusion du lithium sur la paroi externe du germanium.

D'après les renseignements fournis par le constructeur, elles sont de faibles dimensions, il nous est donc apparu raisonnable de ne pas en tenir compte.
Ceci nous a permis d'obtenir les courbes de la figure n° 2.
On voit qu'il y a une apparente similitude entre les deux courbes bien qu'elles ne soient pas superposées. Cela nous a amenés à croire que la géométrie utilisée n'est pas complètement aberrante et que les zones mortes sont un paramètre important dans la détection des photons. En effet, l'efficacité simulée est toujours supérieure à l'efficacité expérimentale ce qui laisse penser que les zones mortes se comportent comme un absorbeur, ce qui a des conséquences importantes sur l'efficacité de détection puisqu'une certaine quantité des photons perdront de l'énergie, non comptabilisée, dans la zone morte et ne se retrouveront pas dans le photopic.

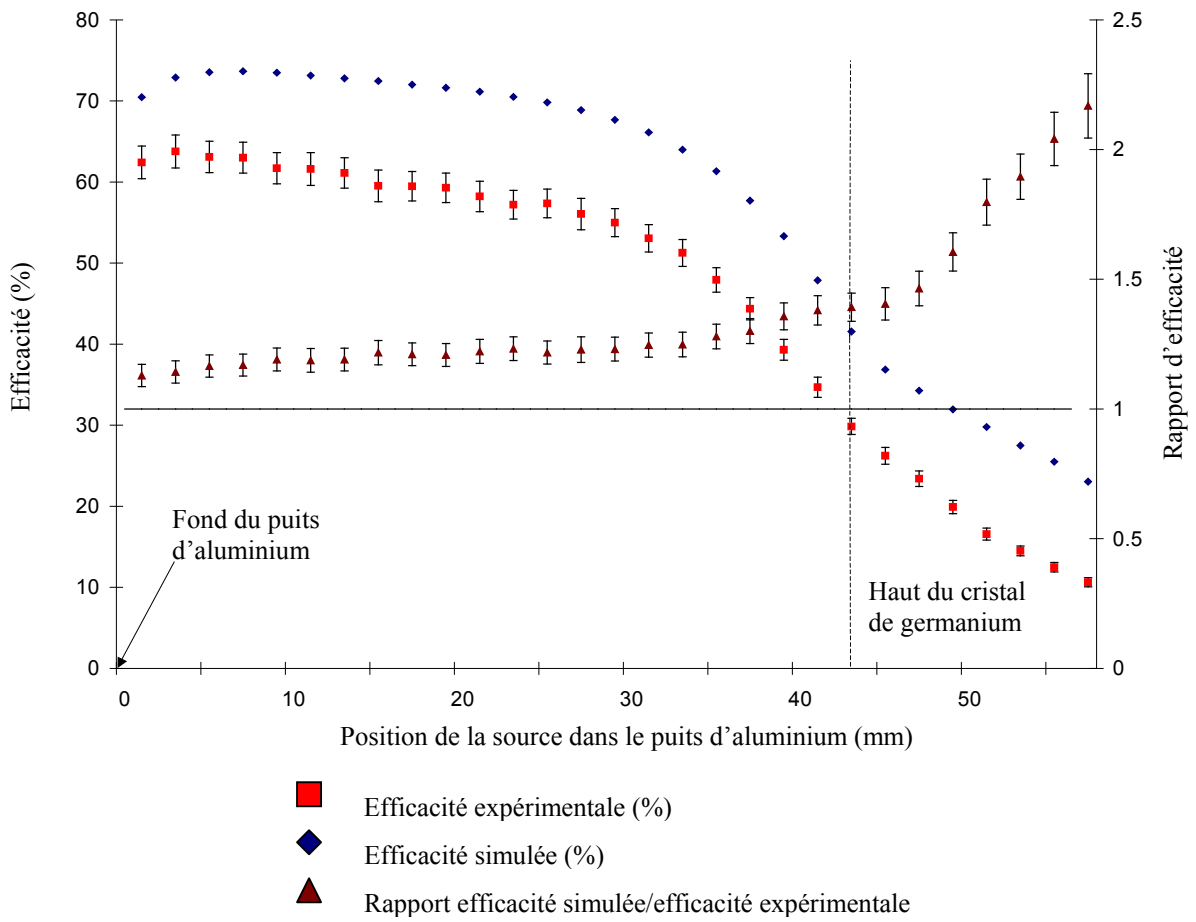

Figure n° 2 : comparaison de l'efficacité théorique et expérimentale pour la raie à 32 keV (les barres d'erreurs sont à deux écarts-types, l'incertitude sur l'efficacité simulée est estimée à 2%).

Dans un deuxième temps, nous avons introduit les zones mortes dans les simulations. Le problème repose sur le fait qu'on ne connaît pas leurs dimensions (celles fournies par le constructeur sont imprécises); c'est pourquoi nous avons choisi d'ajuster les efficacités simulées et expérimentales pour déterminer les dimensions des zones mortes. Ici nous ne nous intéresserons qu'à la zone morte interne puisque à basse énergie les photons sont tout de suite absorbés dans le cristal de telle sorte que les dimensions du cristal et la zone morte externe ne jouent aucun rôle dans l'efficacité à cette énergie.
Pour déterminer la taille de la zone morte externe, il faudrait utiliser des gamma de moyenne ou haute énergie puisque la zone morte agit alors comme une diminution du volume qui participe à la détection. La démarche que nous avons employée a déjà été utilisée par d'autres personnes [1] mais pour une position fixe de la source. L'originalité de ce travail a consisté à calculer l'efficacité pour différentes positions de la source à l'intérieur et à l'extérieur du puits d'aluminium.
Or nous nous sommes aperçus que l'accord entre la simulation et l'expérience ne pouvait pas être réalisé pour toutes les positions de la source si on considère que les zones mortes sont d'épaisseur constante. De plus, lorsqu'on regarde la figure n° 2 on voit nettement que le rapport de l'efficacité simulée sur l'efficacité expérimentale augmente au fur et à mesure que l'on se déplace vers le haut du puits d'aluminium. Ceci nous a conduit à penser l'épaisseur de la zone morte n'est pas la même suivant la position où l'on se trouve. Nous avons repris les simulations avec une zone morte à gradient d'épaisseur (c'est-à-dire dont l'épaisseur augmente au fur et à mesure que l'on monte dans le puits) en essayant d'ajuster simulation et expérience de manière à déterminer le profil de la zone morte. Pour la modélisation, nous avons utilisé une juxtaposition de cylindres de diamètres différents et de différentes hauteurs comme indiqué sur la figure n° 3.

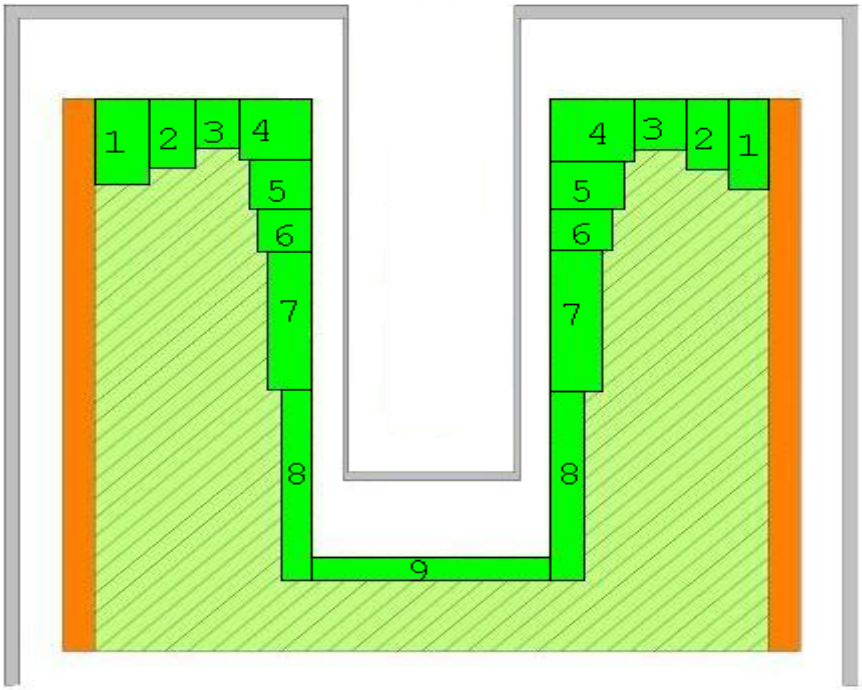

Figure n° 3 : profil de la zone morte interne utilisé pour les modélisations
La partie active du germanium est en vert clair et en vert foncé les différentes zones mortes.
NB : les proportions entre les dimensions des différentes parties de la zone morte et celles du détecteur n'ont pas été respectées dans un souci de clarté.

Cylindre n°	Diamètre interne (mm)	Diamètre externe (mm)	Hauteur (mm)
1	46	58	0.112
2	46	34	0.105
3	23.102	34	0.05
4	23	23.102	6
5	23	23.098	6
6	23	23.090	6
7	23	23.072	18
8	23	23.046	18
9	23	0	0.002

Finalement, avec ce modèle (zone morte à gradient d'épaisseur) nous avons pu obtenir un bon accord entre la simulation et l'expérience pour toutes les positions du puits (figure n° 4). Ceci tendrait à confirmer la validité du modèle proposé à 32 keV pour une source ponctuelle dans la configuration puits du détecteur.

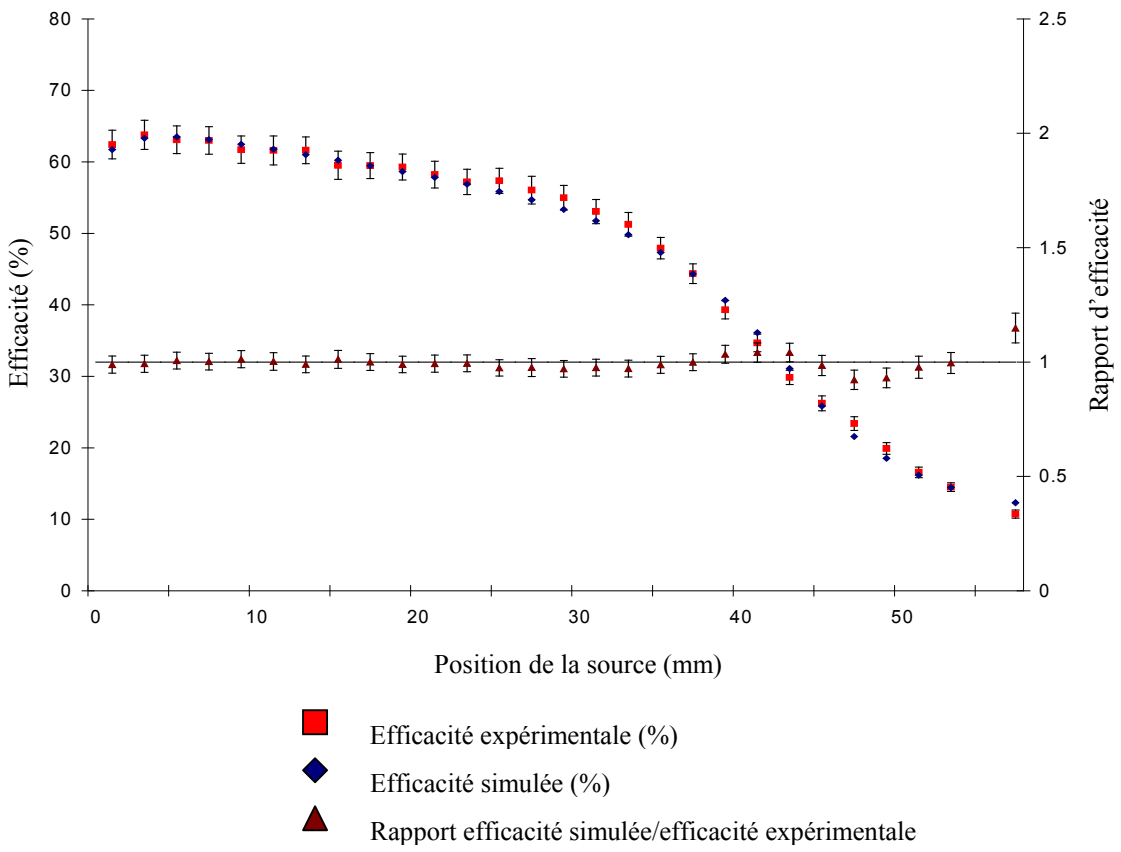

Figure n° 4 : comparaison de l'efficacité théorique et expérimentale pour la raie à 32 keV (les barres d'erreurs sont à deux écarts-types, l'incertitude sur l'efficacité théorique est estimée à 2%).

Si on veut calculer le rapport moyen entre efficacité simulée et efficacité expérimentale en utilisant la méthode des incertitudes pondérées, on trouve pour l'ensemble des points :

$$R = (0.97 +/- 0.01)$$

Ce qui atteste du bon accord entre la simulation et l'expérience.

5-Conclusion et perspectives

A 32 keV, pour l'étude de la zone morte interne nous avons un bon accord simulation-expérience qui demande à être amélioré pour des positions de la source supérieures à 44 mm. De la même manière il faudrait déterminer l'épaisseur de la zone morte externe à l'aide de la raie à 662 keV du ^{137}Cs, puis confirmer cette géométrie pour d'autres énergies. Une fois ceci fait nous pourrons utiliser des sources étendues et ainsi évaluer les coefficients d'auto absorption due à la matrice et tracer des courbes d'efficacité en fonction de l'énergie.
Nous ne savons pas si les dimensions des zones mortes déterminées sont réalistes mais cela n'est pas forcément important puisque pour l'étalonnage en efficacité celles-ci jouent le rôle de coefficients ajustables pour ramener les valeurs simulées aux valeurs expérimentales.

Références :

[1] : « Evaluation of Monte Carlo simulation of photon counting efficiency for germanium detectors », Sunita Kamboj et Bernd Kahn, Health Physics-April 1996, Volume 70, Number4, pp 512-519