

ORIGINAL ARTICLE

CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DE L'ÉTALONNAGE EN ÉNERGIE ET EN EFFICACITE DU DÉTECTEUR CZT/500(S) DU LABORATOIRE LPNPE



CONTRIBUTION TO IMPROVING THE ENERGY AND EFFICIENCY CALIBRATION OF THE LPNPE LABORATORY'S CZT/500(S) DETECTOR

| Maminirina Tantely RANAIVOARIMALALA ^{1*} | Haingo Laza ANDRIAMPANARIVO ² | F. Elliot SAHOA ¹ | R. Radomanana RAKOTONARIVO ¹ | Ony Fenomampionona RABETOKOTANY ¹ | Dieudonné solofonirina RAVELOMANANTSOA ¹ | et | A. J. Franck RATOVOJANAHARY ¹ |

¹. Parcours de Physique Nucléaire Appliquée et Environnement | Université d'Antananarivo | Madagascar |². Parcours de Techniques Non Destructives | Université d'Antananarivo | Madagascar || DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17909203> | Received November 22, 2025 | Accepted December 11, 2025 | Published December 13, 2025 | ID Article | Tantely-Ref3-6-22ajiras021225 |

RESUME

Contexte : L'étalonnage en énergie et en efficacité de toutes sortes de spectromètre gamma nécessite, un étalon (ou matériau de référence) multi pics d'énergies bien visibles et dont l'activité est connue. Un logiciel de traitement de spectre permettant de faire les deux types d'étalonnage est également nécessaire. Actuellement, malgré le nombre et le type d'étalon très limité d'une part et la limitation de choix sur le nombre de pics (énergies) à utiliser offerts par le logiciel d'acquisition et de traitement de spectre « Winspec for Inspector » pour le calcul du facteur d'étalonnage d'autre part, une méthodologie d'étalonnage adapté est déjà mise en place dans le laboratoire LPNPE. Cependant, des améliorations sont toujours à faire aussi bien pour la précision des mesures que pour la rapidité des tâches. **Objectifs :** L'objectif principal de ce travail est donc de porter une amélioration en ayant recours à l'automatisation de ces deux types d'étalonnage. Pour que cet objectif soit atteint, deux tâches ont été réalisées : Le premier est de développer un programme informatique simulant l'étalonnage en énergie du détecteur offrant une possibilité d'utilisation autant de pics que voulu. Le second c'est de développer un autre programme permettant de calculer et d'afficher la courbe d'étalonnage en efficacité du détecteur. **Méthode :** - Premièrement, effectuer une mesure spectrométrique avec le détecteur CZT/500(s) en utilisant l'Iode-131 disponible en flacon dont l'activité est connue. Ensuite, déterminer le numéro de canal correspondant à chaque énergie de l'Iode-131 répertoriée dans la bibliothèque des radionucléides. Puis relever chaque numéro de canal suivant l'énergie correspondante et enfin calculer le coefficient d'étalonnage de la courbe par la méthode de moindre carrée. Cette méthode est fonctionnelle dans le programme informatique développé pour l'étalonnage en énergie du détecteur. - Deuxièmement, utiliser le même spectre d'Iode-131 obtenu précédemment puis évaluer les moyennes des aires nettes de chaque pic d'absorption totale relative aux quatre régions d'intérêt. Ensuite, développer le programme d'étalonnage en efficacité utilisant la méthode de moindre carré à l'aide de la fonction MMULT et MINVERSE du langage VBA-EXCEL. Ce programme permet de calculer l'efficacité du détecteur correspondant à chaque valeur d'énergie. **Résultat et conclusion:** Cette étude concernant le programme d'étalonnage a permis au laboratoire LPNPE d'améliorer aussi bien la mesure qualitative que l'analyse quantitative avec le détecteur CZT/500(s). Les résultats obtenus par les deux types d'étalonnage montrent la fiabilité des programmes informatiques développés par VBA-EXCEL.

Mots clés : Spectrométrie gamma, CZT/500(s), étalonnage en énergie et en efficacité, VBA/EXCEL

ABSTRACT

Context: Energy and efficiency calibration of all types of gamma spectrometers requires a multi-peak reference standard (or material) with clearly visible energy peaks and known activity. A spectrum processing software capable of performing both types of calibration is also necessary. Currently, despite the limited number and types of available standards on one hand, and the restricted selection of peaks (energies) offered by the acquisition and processing software "Winspec for Inspector" for calculating the calibration factor on the other hand, an adapted calibration methodology has already been implemented at the LPNPE laboratory. However, improvements are still needed, both in terms of measurement accuracy and task efficiency. **Objectives:** The main objective of this work is therefore to bring improvements by automating both types of calibration. To achieve this goal, two tasks were carried out: The first was to develop a computer program that simulates the energy calibration of the detector, allowing the use of as many peaks as desired. The second was to develop another program capable of calculating and displaying the detector's efficiency calibration curve. **Method:** - First, perform a spectrometric measurement using the CZT/500(s) detector with the available Iodine-131 source of known activity. Then, identify the channel number corresponding to each energy of Iodine-131 listed in the radionuclide library. Next, record each channel number according to its corresponding energy, and finally calculate the calibration coefficient of the curve using the least squares method. This method is implemented in the computer program developed for the detector's energy calibration. - Second, use the same Iodine-131 spectrum obtained previously, then evaluate the average net areas of each total absorption peak corresponding to the four regions of interest. Next, develop the efficiency calibration program using the least squares method with the MMULT and MINVERSE functions in VBA-Excel. This program calculates the detector's efficiency for each energy value. **Results and conclusion:** This study on the calibration program has enabled the LPNPE laboratory to improve both qualitative measurement and quantitative analysis using the CZT/500(s) detector. The results obtained from both types of calibration demonstrate the reliability of the computer programs developed with VBA-Excel.

Keywords: gamma-ray spectrometry, CZT/500(S), energy and efficiency calibration, VBA/EXCEL

1. INTRODUCTION

Le tellurure de cadmium-zinc (CdZnTe, CZT) est un semiconducteur à large bande interdite qui s'est imposé comme un matériau prometteur pour la détection des rayonnements X et gamma. Ce composé ternaire présente des propriétés exceptionnelles qui le distinguent des autres semiconducteurs : un numéro atomique élevé ($Z_{\text{Cd}} = 48$, $Z_{\text{Zn}} = 30$, $Z_{\text{Te}} = 52$) assurant une bonne efficacité de détection, une bande interdite suffisamment large ($\approx 1,6$ eV) permettant un fonctionnement à température ambiante, et une résolution en énergie satisfaisante pour de nombreuses applications (Owens et al., 2002 ; Del Sordo et al., 2009). Ces caractéristiques font du CZT un matériau de choix pour la spectrométrie gamma en médecine nucléaire, en sécurité nucléaire, en astrophysique et en surveillance environnementale.

Contrairement aux détecteurs au germanium de haute pureté (HPGe) qui nécessitent un refroidissement cryogénique, les détecteurs CZT fonctionnent à température ambiante, offrant ainsi des avantages considérables en termes de portabilité, de coût opérationnel et de simplicité d'utilisation (Roy et al., 2019). Les développements récents dans les technologies de croissance cristalline ont permis d'améliorer significativement la qualité des cristaux CZT, notamment en réduisant la densité des défauts et en améliorant l'homogénéité compositionnelle (Roy et al., 2021). Cependant, malgré ces avancées technologiques, l'exploitation optimale des détecteurs CZT requiert des procédures d'étalonnage rigoureuses et bien adaptées aux spécificités du système de mesure. En spectrométrie gamma, deux types d'étalonnage sont essentiels pour garantir la fiabilité des mesures : l'étalonnage en énergie pour l'identification qualitative des radionucléides, et l'étalonnage en efficacité pour la quantification précise de leur activité. L'étalonnage en énergie établit la relation entre les canaux du système d'acquisition et les énergies des photons gamma détectés, tandis que l'étalonnage en efficacité détermine la réponse du détecteur en fonction de l'énergie. Ces deux calibrations nécessitent l'utilisation de sources de référence certifiées et de logiciels de traitement appropriés (Abbaszadeh et al., 2016 ; Abbene et al., 2017). Plusieurs défis pratiques limitent cependant la mise en œuvre optimale de ces procédures d'étalonnage dans de nombreux laboratoires. Premièrement, la disponibilité de sources de référence multi-énergétiques certifiées est souvent limitée, particulièrement dans les laboratoires des pays en développement. Deuxièmement, les logiciels d'acquisition commerciaux imposent fréquemment des restrictions sur le nombre de points d'étalonnage utilisables, ce qui peut limiter la précision de la calibration sur l'ensemble du spectre énergétique. Troisièmement, les procédures manuelles d'étalonnage sont chronophages et susceptibles d'erreurs humaines, notamment lors du traitement de nombreux échantillons.

Dans le contexte du laboratoire LPNPE (Laboratoire de Physique Nucléaire, Physique et Environnement) à Madagascar, ces limitations sont particulièrement prégnantes. Le système actuel, composé d'un détecteur CZT/500(s) couplé à un analyseur multicanaux MCA-166 et au logiciel "WinSpec for Inspector", restreint l'étalonnage en énergie à un maximum de trois points d'étalonnage. Cette limitation peut s'avérer insuffisante pour garantir une linéarité optimale de la réponse du détecteur sur une large gamme énergétique. De plus, le logiciel ne permet pas d'effectuer l'étalonnage en efficacité, nécessitant ainsi des calculs manuels fastidieux et sources d'imprécisions.

Face à ces contraintes, l'automatisation des procédures d'étalonnage apparaît comme une solution prometteuse pour améliorer simultanément la précision des mesures, l'efficacité opérationnelle et la traçabilité des données. L'objectif principal de ce travail est donc de développer des outils informatiques permettant d'automatiser et d'optimiser les deux types d'étalonnage du détecteur CZT/500(s). Plus spécifiquement, cette étude vise à : (i) développer un programme d'étalonnage en énergie permettant l'utilisation d'un nombre accru de points de calibration (jusqu'à six énergies), (ii) développer un programme d'étalonnage en efficacité intégrant le calcul automatique des coefficients par la méthode des moindres carrés, et (iii) valider ces programmes par comparaison avec des sources de référence certifiées. L'approche méthodologique adoptée repose sur l'implémentation en langage VBA-Excel de programmes de calibration utilisant la méthode des moindres carrés pour déterminer les coefficients d'étalonnage. Pour l'étalonnage en énergie, un modèle linéaire reliant les numéros de canaux aux énergies des photons gamma est utilisé. Pour l'étalonnage en efficacité, un modèle polynomial d'ordre trois, couramment utilisé en spectrométrie gamma, est employé pour représenter la dépendance énergétique de l'efficacité du détecteur. La validation des programmes est effectuée en utilisant une source d'Iode-131 de référence couvrant la gamme énergétique 280-730 keV.

Cette étude s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue des capacités analytiques du laboratoire LPNPE pour la surveillance de la radioactivité environnementale à Madagascar. Les outils développés visent à surmonter les limitations des systèmes commerciaux disponibles tout en maintenant une rigueur métrologique conforme aux standards internationaux de la spectrométrie gamma. Au-delà du contexte spécifique du laboratoire LPNPE, cette approche pragmatique, basée sur des outils logiciels accessibles et des méthodes mathématiques éprouvées, pourrait constituer un modèle transférable à d'autres laboratoires disposant de ressources limitées mais désireux d'améliorer leurs capacités en spectrométrie gamma.

1. MATERIELS ET METHODES

2.1. Matériels

2.1.1. Source radioactive de référence

Une source d'Iode-131 (^{131}I) a été utilisée comme étalon pour les deux types d'étalonnage. Cette source présentait une activité initiale de 350 μCi (12,95 MBq) mesurée le 24 mars 2025. L'Iode-131 possède une période radioactive de 8,02 jours et émet quatre raies gamma principales d'énergies 284,305 keV, 364,489 keV, 636,989 keV et 722,911 keV, couvrant ainsi une gamme énergétique de 280 à 730 keV appropriée pour l'étalonnage du détecteur CZT/500(s). La mesure spectrométrique a été réalisée le 01 avril 2025, soit 8 jours après la date de référence, correspondant à une activité corrigée de 175,90 μCi (6 508 664,227 Bq) après décroissance radioactive.

2.1.2. Chaîne de spectrométrie gamma

La chaîne de spectrométrie gamma utilisée comprenait les composants suivants (Figure 1) :

- Détecteur CZT/500(s) : détecteur à base de cadmium, zinc et tellure, de diamètre extérieur 23 mm et de hauteur 33 mm (sans connecteur), polarisé par une haute tension de +1100 V,
- Préamplificateur : pour la réduction du bruit électronique,
- Amplificateur : pour la mise en forme et l'amplification du signal,
- Convertisseur analogique-numérique (CAN) : pour la conversion du signal analogique en signal discret,
- Analyseur multicanaux MCA-166 : pour l'analyse et l'enregistrement des spectres,
- Micro-ordinateur équipé du logiciel "WinSpec for Inspector" (GBS Electronic).

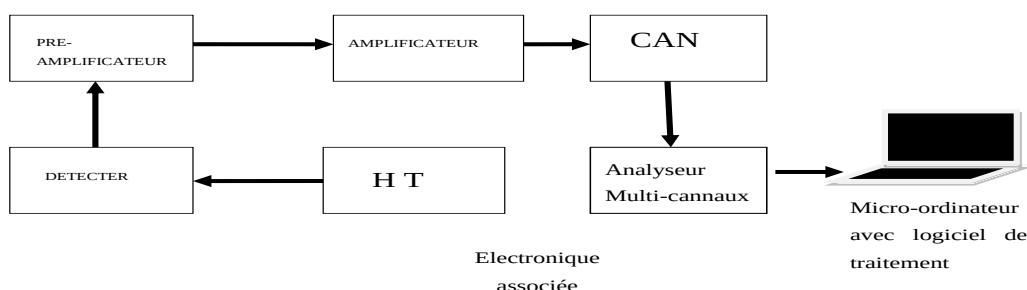


Figure 1 : Schéma de la chaîne de spectrométrie gamma utilisée pour l'étalonnage du détecteur CZT/500(s).

2.1.3. Logiciels

Le logiciel "WinSpec for Inspector" a été utilisé pour l'acquisition des spectres et la détermination des numéros de canaux correspondant aux pics d'énergie. Ce logiciel permet un étalonnage en énergie limité à trois points maximum. Les programmes d'étalonnage automatisés ont été développés en langage VBA (Visual Basic for Applications) sous Microsoft Excel pour surmonter cette limitation.

2.2. Paramètres d'acquisition

Les paramètres suivants ont été utilisés pour l'acquisition spectrométrique :

- Plage de canaux : 2048 canaux ;
- Gain grossier (GG) : 200 ;
- Gain fin (GF) : 0,5 ;
- Temps d'acquisition : 300 secondes.

Ces paramètres ont été optimisés pour la gamme énergétique étudiée (280-730 keV) afin d'obtenir une résolution adéquate et un nombre de coups statistiquement significatif.

1.1. Méthodes

Lors du développement du programme informatique avec le langage VBA EXCEL, la méthode de moindre carré est la solution pour déterminer les coefficients de la courbe d'étalonnage en énergie. L'application de cette méthode n'est pas limitée uniquement à cette première approche mais elle est aussi utilisée pour calculer le coefficient d'étalonnage ainsi que l'efficacité du détecteur correspondant à chaque valeur des énergies.

1.1.1. Etalonnage en énergie

Pour réaliser l'étalonnage en énergie d'un spectromètre gamma, on utilise un certain nombre de sources radioactives émettant des rayonnements gamma dont les énergies sont connues avec une grande précision. Sur chacun des spectres obtenus on relève les amplitudes des impulsions, correspondant aux raies d'absorption totale. On peut également utiliser

les raies de fuite si elles existent. Ensuite, on associe à chaque amplitude mesurée (ou au numéro du canal), l'énergie de référence correspondante. On trace la courbe joignant les différents points ; pour un bon spectromètre celle-ci doit être une droite dans une large plage d'énergie (Debertin et al., 1988).

La courbe $E=f(C)$ a pour équation $E = aC + b$, a et b étant déterminés par la méthode de moindres carrés. Pour calculer les coefficients d'étalonnage de la courbe, on définit trois grandeurs S_{CC} , S_{EE} , S_{CE} :

- Somme des écarts par rapport à la moyenne des canaux

$$S_{CC} = \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C}) \quad (1)$$

- Somme des écarts par rapport à la moyenne des énergies

$$S_{EE} = \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E}) \quad (2)$$

- Produit de la somme des écarts par rapport à la moyenne des canaux et des énergies

$$S_{CE} = \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(E_i - \bar{E}) \quad (3)$$

On peut en déduire :

- La pente de la droite :

$$a = \frac{S_{CE}}{S_{CC}} \quad (4)$$

- L'ordonnée à l'origine :

$$b = \bar{E} - a\bar{C} \quad (5)$$

- L'écart-type de la pente :

$$S_a = \sqrt{\frac{S_{EE}^2}{S_{CC}}} \quad (6)$$

- l'écart-type des résidus :

$$S_r = \sqrt{\frac{S_{EE} - a^2 S_{CC}}{N-1}} \quad (7)$$

- l'écart-type de l'ordonnée à l'origine

$$S_b = S_r \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N C_i^2}{N \sum_{i=1}^N C_i^2 - (\sum_{i=1}^N C_i)^2}} \quad (8)$$

- le coefficient de corrélation ou de Person

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N C_i E_i - \sum_{i=1}^N C_i \sum_{i=1}^N E_i}{\sqrt{[N \sum_{i=1}^N C_i^2 - (\sum_{i=1}^N C_i)^2][N \sum_{i=1}^N E_i^2 - (\sum_{i=1}^N E_i)^2]}} \quad (9)$$

C : numéro de canal ;

E : énergie du rayonnement (keV) ;

N le nombre de paires et $\bar{C}$ et $\bar{E}$ sont respectivement les valeurs moyennes des canaux et des énergies.

1.1.2. Etalonnage en efficacité

Pour établir un étalonnage en efficacité, on doit utiliser des sources étalons qui sont de nature et de formes semblables à celles de l'échantillon à analyser. Elles sont référencées par une activité massique ou volumique ou un taux d'émission photonique des principales raies gamma. Une courbe de rendement en fonction de l'énergie est obtenue pour une géométrie et une matrice donnée. A partir de cette courbe, les efficacités de détection des différents pics des échantillons sont exploitées pour le calcul d'activité (Dziri, 2013).

$$\epsilon(E) = \frac{N_N}{A * T_C * P_\gamma} \quad (10)$$

E : Energie du rayonnement gamma émis par l'étalon (keV) ;

N_N : Aire nette du pic à l'énergie E ;

A : Activités des radionucléides (Bq) ;

P_γ : Probabilité d'émission gamma d'énergie E (%).

L'efficacité du détecteur en fonction de l'énergie du rayonnement gamma émis est donnée par la relation suivante :

$$\epsilon(E) = a_0 + a_1 * E + a_2 * E^2 + \dots + a_n * E^n \quad (11)$$

L'utilisation de la méthode de moindres carrés permet de déterminer les coefficients d'étalonnage $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$.

Dans ce cas-là, il faut résoudre l'équation matricielle de la forme :

$$A * B = C \quad (12)$$

$$A * A^{-1} * B = C * A^{-1} \quad (13)$$

$$B = C * A^{-1} \quad (14)$$

A : Matrice des énergies,
 B : Matrice colonne formée par a_0, a_1, a_2, a_n ,
 C : Matrice colonne des efficacités,
 A^{-1} : Matrice inverse de A,

Deux fonctions dans VBA Excel sont utilisées pour la résolution de l'équation matricielle: la fonction MMULT et la fonction MINVERSE. Ces deux fonctions permettent de calculer respectivement le produit matriciel et la matrice inverse (Vanin et al. (1999).

2. RESULTATS

2.1. Résultat de l'étalonnage en énergie du détecteur CZT/500(s)

2.1.1. Paramètre nécessaire pour cet étalonnage

Pour étalonner en énergie un détecteur de rayonnement gamma, quelques paramètres sont nécessaires :

- Les valeurs des énergies écrites dans la bibliothèque des radionucléides avec le numéro de canal correspondant à chacun d'eux. Ce dernier est calculé automatiquement par le logiciel winspec.
- La plage de canal. Pour ce détecteur, trois plages de canal sont fréquemment utilisées : 1024 canaux, 2048 canaux et 4096 canaux.
- Les paramètres gains doivent être déterminés avant toute mesure. On a deux sortes des gains : le gain grossier GG et le gain fin GF.
- Le temps d'acquisition (temps de comptage) de la mesure.

2.1.2. Mode opératoire

- La mesure a été faite le 01 avril 2025 avec la source d'Iode-131 dont l'activité est de 175,90 μ Ci soit 6508664,227Bq.
- Plage de canal : 2048 canaux.
- Les gains grossiers et les gains fins sont respectivement GG=200 et GF=0,5.
- Le temps d'acquisition est fixé : 300s.

Après l'acquisition de mesure, le spectre suivant est affiché à l'interface du logiciel « winspec » (Voir **figure 2**).

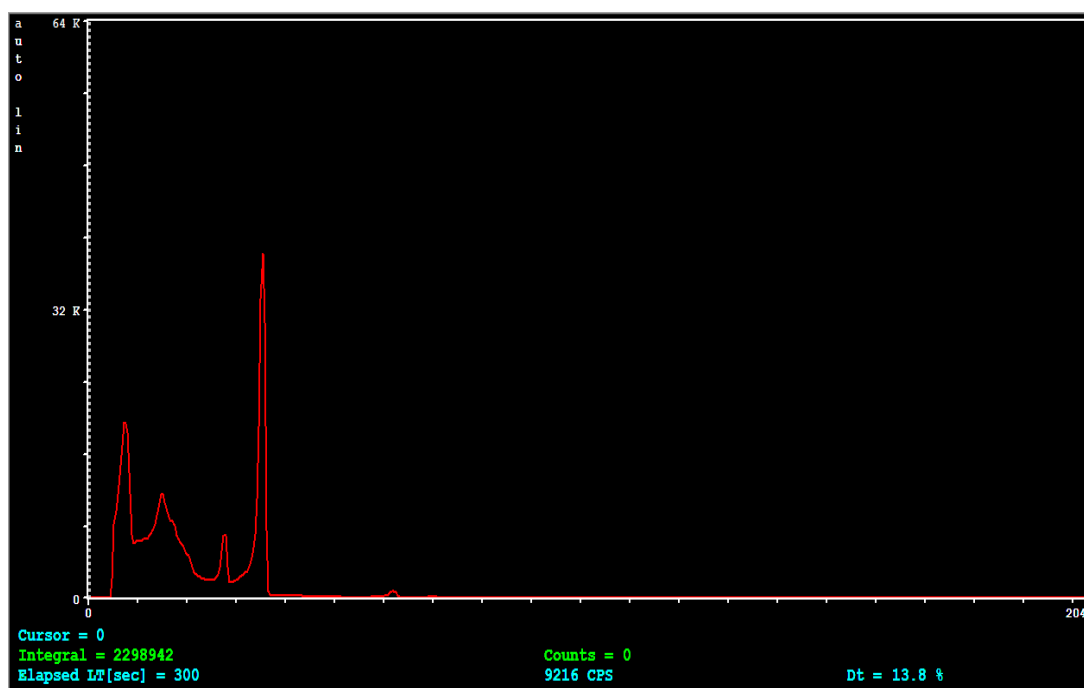


Figure 2 : Spectre d'Iode-131 avant l'étalonnage en énergie du détecteur CZT/500(s).

On a parlé précédemment que l'étalonnage en énergie avec le logiciel « WinSPEC for Inspector» est limité au nombre maximum de trois énergie. Si on veut obtenir une équation d'étalonnage mieux que celle de winspec , on doit augmenter le nombre d'énergie. Le programme informatique développé par le langage Visual basic permet de faire un étalonnage en énergie du détecteur avec un nombre d'énergie maximal de six. Outre l'équation et la courbe d'étalonnage, ce programme offre également la possibilité de calculer le gain de l'amplificateur, la plage des énergies et le gain du détecteur.

On a ainsi déterminé par le « WinSPEC for Inspector » le numéro de canal de chaque pic de l'Iode-131 correspondant respectivement à l'énergie 284.405keV, 364.489keV, 636.989keV et 722.911keV. Pour les quatre régions d'Intérêt, les

moyennes de canal de chaque pic et celles de l'énergie sont représentées dans le **tableau 1** suivant.

Tableau1 : Moyenne de canal des pics de l'Iode-131 visible dans le spectre et valeur des énergies.

Région d'intérêt	256-292	336-372	600-636	676-724
Energie du pic(KeV)	284,305	364,489	636,989	722,911
Numéro de canal	278,22	356,63	622,64	706,09

2.1.3. Courbe d'étalonnage en énergie

La **figure 3** suivante représente l'interface du programme informatique développée pour l'étalonnage en énergie du détecteur CZT/500(s).

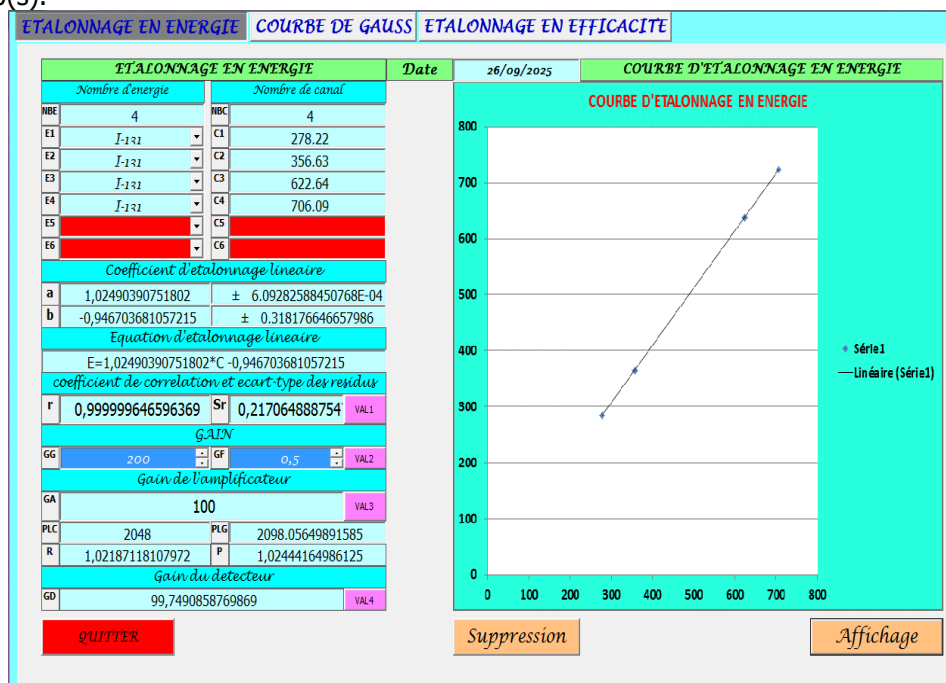


Figure 3 : Interface du programme pour l'étalonnage en énergie.

A partir de ce programme, l'équation d'étalonnage de la courbe et ses coefficients sont calculé puis affichés. Ces coefficients d'étalonnage permettent d'étalonner le détecteur dans une gamme d'énergie large. On peut choisir parmi les trois méthodes d'étalonnage représenté dans la **figure 4** suivante pour étalonner en énergie le détecteur avec le logiciel « winspec for Inspector ».

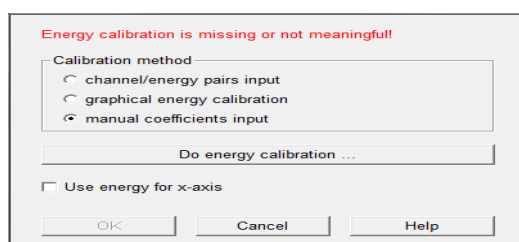


Figure 4 : Méthode d'étalonnage en énergie avec « WinSpec for Inspector ».

Parmi ces différentes méthodes de calibration affichée dans cette fenêtre, on choisit la dernière méthode « manuel coefficient input ». Celui-ci permet d'introduire l'équation d'étalonnage ainsi obtenu dans le programme développé par VBA-EXCEL. La **figure 5** suivante affiche la démarche à suivre pour cette méthode d'étalonnage.



Figure 5 : Fenêtre pour affecter les coefficients d'étalonnage.

L'exécution de cette dernière méthode a permis d'avoir le spectre étalonné suivant.

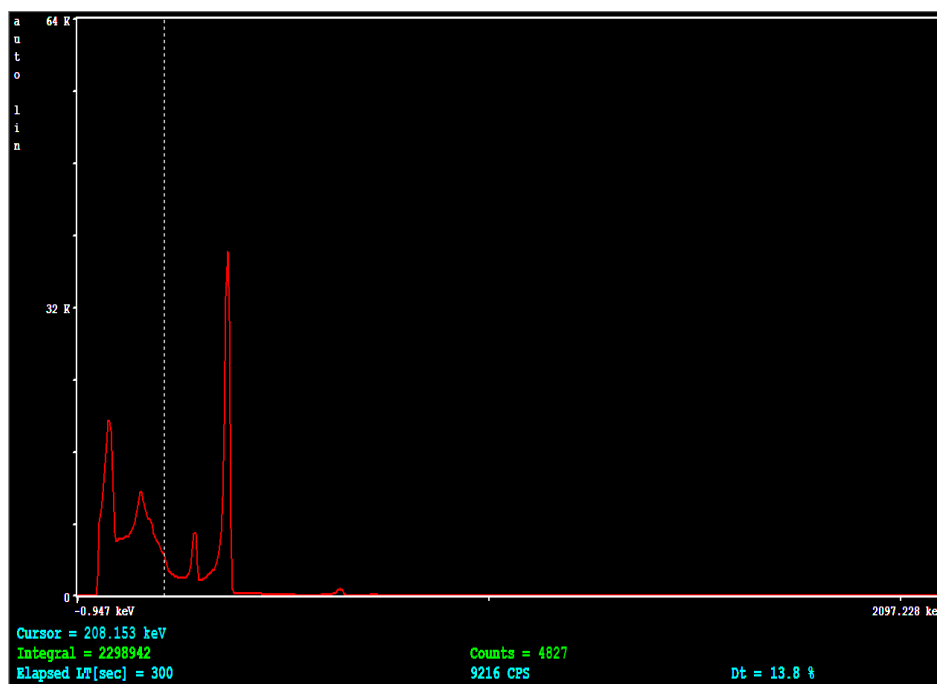


Figure 6 : Spectre de l'Iode-131 après étalonnage en énergie du détecteur CZT/500(s).

Les résultats des calculs utilisant le spectre étalonné sont illustrés dans le **tableau 2** suivant.

Tableau2 : Moyenne de canal et celle des énergies des pics de l'Iode-131 visible dans le spectre étalonné.

Région d'intérêt	256-292	336-372	600-636	676-724
Energie du pic(KeV)	284,52	364,66	637,69	722,62
Numéro de canal	278,51	356,69	623,06	705,92

2.1.4. Interprétation

Quelques écarts sont trouvés en comparant les valeurs des énergies vues dans la table des radionucléides et la moyenne des énergies obtenues après l'étalonnage en énergie du détecteur. Pour les quatre régions d'intérêt, on obtient respectivement les écarts suivants : 0,215 ; 0,171 ; 0,701 ; 0,291. Ces écarts sont dus à la fluctuation et aux choix du gain de l'amplificateur pour une plage de 2048 canaux. Par comparaison et en tenant compte ces écarts, on peut dire que l'équation d'étalonnage obtenue par le programme simulant l'étalonnage en énergie du détecteur est acceptable. De plus, la valeur du coefficient de corrélation $r=0,99$ qui est affichée à l'interface de ce programme confirme la fiabilité de ce programme d'étalonnage.

2.2. Résultat de l'étalonnage en efficacité

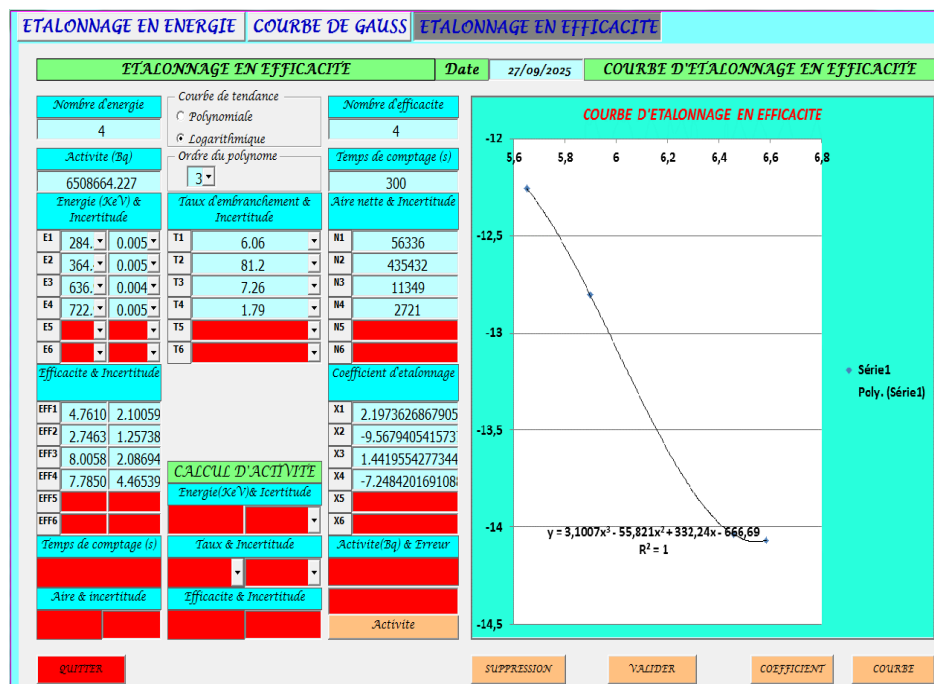
Le programme ainsi développé par le langage VBA-EXCEL permet aussi d'étalonner en efficacité le détecteur. Avant d'utiliser ce programme, quelques valeurs doivent être déterminées par le logiciel « WinSPEC for Inspector » tels que les valeurs des aires nettes correspondant à chaque énergie de la source. Outre ces valeurs, l'activité de la source et le temps de comptage sont aussi connues avant le lancement du programme. Le calcul inverse peut être effectué par ce programme.

Dans ce cas-là, le programme évalue l'activité de la source connaissant son efficacité à une énergie ainsi que son aire nette. On a ainsi déterminé par le « WinSPEC for Inspector » les aires nettes de chaque pic de l'Iode-131 qui correspond respectivement à l'énergie 284,305keV, 364,489keV, 636,989keV et 722,911keV. Pour les quatre Régions d'Intérêt, les moyennes des aires nettes des pics, les valeurs des énergies et l'activité de la source à la date de mesure sont représentées dans le **tableau 3** suivant.

Tableau3 : Moyenne des aires nettes des pics de l'Iode-131 visible dans le spectre et valeur des efficacités.

Région d'intérêt	256-292	336-372	600-636	676-724
Energie du pic (KeV)	284,305	364,489	636,989	722,911
Aire nette	56336	435432	11349	2721
Activité (Bq)	6508664,227	6508664,227	6508664,227	6508664,227

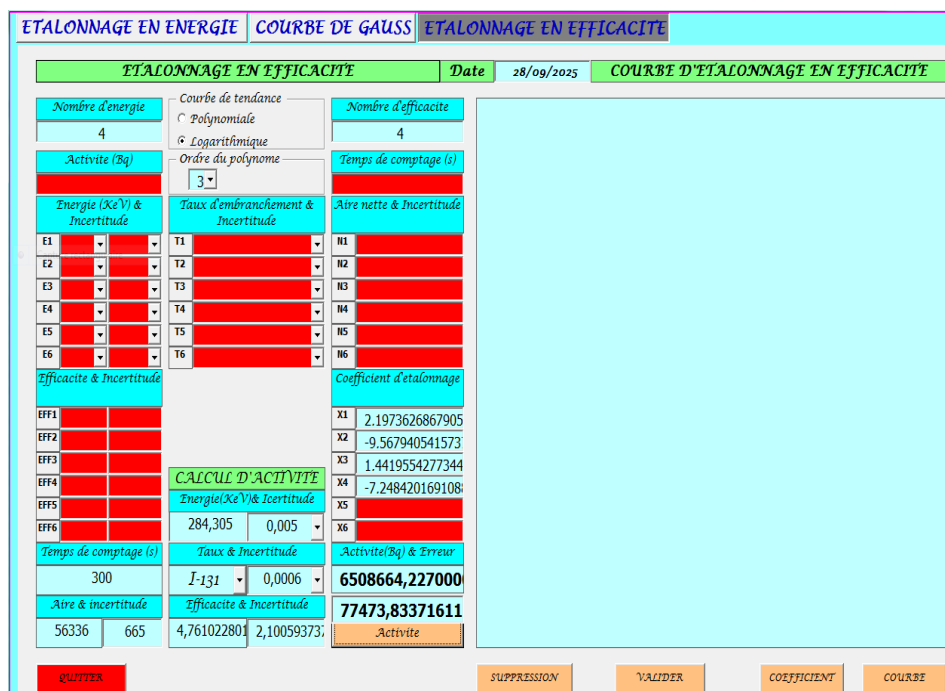
On affecte dans la case correspondante les valeurs trouvées dans le **tableau 3** puis on lance le programme simulant l'étalonnage en efficacité du détecteur. La courbe d'étalonnage ainsi que son équation, les valeurs des efficacités proportionnelles à chaque valeur des énergies sont représentées dans la **figure 7** suivante.



Dans la **figure 7**, les coefficients de la courbe d'étalonnage pour un polynôme d'ordre 3 sont calculés et affichés. On calcule le logarithme népérien de l'efficacité et celle des énergies pour afficher le spectre d'étalonnage en efficacité du détecteur.

2.2.1. Vérification de la fiabilité du programme d'étalonnage en efficacité

On fait le calcul inverse pour vérifier le bon fonctionnement de ce programme et que les résultats obtenus sont correctes. Utiliser l'équation d'étalonnage en efficacité obtenus par ce programme puis calculer la valeur de l'efficacité correspondant à l'énergie 284,305KeV. A partir de cette valeur, on calcule l'activité de la source puis on la compare à celle de l'Iode-131 à la date de mesure. La **figure 8** suivante illustre le calcul de l'activité en utilisant l'équation d'étalonnage.



L'activité de l'Iode-131 calculé par ce programme concorde à celle qu'on obtient à la date de mesure en tenant compte la décroissance radioactive. La conformité entre ces deux valeurs d'activité nous prouve le bon fonctionnement de ce programme. De plus, les coefficients d'étalonnage peuvent être utilisés pour calculer l'efficacité correspondant à une énergie puis l'activité d'un échantillon ayant la même condition de mesure et de volume similaire à celle de l'Iode-131.

3. DISCUSSION

Cette étude a permis de développer et de valider deux programmes informatiques d'étalonnage pour le détecteur CZT/500(s) du laboratoire LPNPE, représentant une avancée significative dans l'amélioration des capacités de mesure spectrométrique de ce laboratoire. Les résultats obtenus méritent d'être discutés au regard des performances attendues des détecteurs à base de tellure de cadmium-zinc et des méthodes d'étalonnage conventionnelles en spectrométrie gamma.

3.1 Performance de l'étalonnage en énergie

Les résultats de l'étalonnage en énergie montrent des écarts acceptables entre les valeurs théoriques et expérimentales (0,215 ; 0,171 ; 0,701 ; 0,291 keV pour les quatre régions d'intérêt). Ces écarts sont cohérents avec les performances typiques des détecteurs CdZnTe en spectrométrie gamma. Del Sordo et al. (2009) ont rapporté que les détecteurs CdZnTe présentent une bonne résolution énergétique à température ambiante, bien qu'elle soit légèrement inférieure à celle des détecteurs au germanium de haute pureté (HPGe). L'écart maximum observé (0,701 keV) représente environ 0,11% de l'énergie nominale (636,989 keV), ce qui est tout à fait acceptable pour des applications de caractérisation de sources radioactives. Le coefficient de corrélation obtenu ($r = 0,99$) confirme l'excellente linéarité de la réponse du détecteur sur la gamme d'énergie étudiée (284-723 keV). Cette linéarité est essentielle pour une identification fiable des radionucléides. Comme le soulignent Abbaszadeh et al. (2016), la caractérisation précise de la réponse énergétique des détecteurs CdZnTe est cruciale pour leur application en imagerie médicale et en physique nucléaire. Notre étude démontre que même avec un nombre limité de points d'étalonnage, une calibration de haute qualité peut être obtenue grâce à l'utilisation de la méthode des moindres carrés.

L'amélioration apportée par le programme développé, permettant l'utilisation de jusqu'à six énergies contre trois pour le logiciel WinSpec, est significative. Cette flexibilité accrue permet une meilleure couverture de la gamme énergétique et réduit les incertitudes d'interpolation pour les énergies intermédiaires. Cette approche s'aligne sur les recommandations de Debertin et Helmer (1988) qui préconisent l'utilisation de multiples points d'étalonnage répartis sur toute la gamme d'énergie d'intérêt.

3.2 Fiabilité de l'étalonnage en efficacité

La concordance observée entre l'activité calculée par le programme d'étalonnage en efficacité et l'activité de référence de la source d'Iode-131 valide l'approche méthodologique adoptée. L'utilisation d'un polynôme d'ordre 3 pour modéliser la dépendance énergétique de l'efficacité du détecteur est cohérente avec les pratiques standard en spectrométrie gamma. Vanin et al. (1999) ont démontré que les méthodes de moindres carrés appliquées aux courbes d'efficacité fournissent des résultats précis lorsqu'elles sont combinées avec des sources d'activité connue. Le choix de l'Iode-131 comme source d'étalonnage présente des avantages et des limitations. Avec son énergie gamma principale à 364 keV (81,5% d'intensité) et sa période radioactive de 8,04 jours, l'Iode-131 est couramment utilisé en médecine nucléaire et en radioprotection (Carolan et al., 2016). Cependant, sa courte période nécessite des corrections de décroissance précises et une re-calibration fréquente du système. L'utilisation de sources à plus longue période, comme le Césium-137 ou l'Europium-152, pourrait compléter utilement ce protocole d'étalonnage pour assurer une couverture énergétique plus large et une stabilité temporelle accrue.

L'approche matricielle utilisée dans le programme, basée sur les fonctions MMULT et MINVERSE de VBA-Excel, offre l'avantage de la simplicité et de l'accessibilité. Cependant, elle présente certaines limitations numériques pour les matrices mal conditionnées. Des méthodes plus robustes, comme la décomposition en valeurs singulières (SVD), pourraient être envisagées dans les versions futures du programme pour améliorer la stabilité numérique des calculs.

3.3 Comparaison avec les détecteurs conventionnels

Les détecteurs CdZnTe présentent plusieurs avantages par rapport aux détecteurs HPGe conventionnels, notamment leur fonctionnement à température ambiante qui élimine le besoin de refroidissement cryogénique (Roy et al., 2019). Cette caractéristique rend le CZT/500(s) particulièrement adapté aux applications de terrain et aux mesures in-situ. Cependant, comme le notent Abbene et al. (2017), les détecteurs CdZnTe peuvent présenter des problèmes de piégeage de charges qui affectent la résolution énergétique, particulièrement pour les photons de haute énergie. La résolution énergétique du CZT/500(s), bien que satisfaisante pour de nombreuses applications, reste inférieure à celle des détecteurs HPGe. Cette limitation est inhérente aux propriétés de transport de charges du matériau CdZnTe. Néanmoins,

pour les applications de surveillance environnementale et de contrôle de sources radioactives dans le contexte de Madagascar, où la portabilité et la simplicité d'utilisation sont primordiales, le compromis performance/praticité du CZT/500(s) apparaît tout à fait approprié.

3.4 Limitations et perspectives d'amélioration

La principale limitation identifiée dans cette étude concerne la nature semi-expérimentale des programmes développés, qui nécessitent encore l'utilisation du logiciel WinSpec for Inspector pour le traitement initial des spectres et le calcul des aires sous les pics. Le développement d'un programme entièrement autonome, capable d'effectuer ces opérations de manière indépendante, constitue une perspective importante pour les travaux futurs. Des algorithmes de détection automatique de pics et de déconvolution spectrale, tels que ceux proposés par Bouchet (1995) pour les spectres gamma, pourraient être intégrés dans une version future du programme. Une autre amélioration potentielle concerne la prise en compte des corrections de coïncidence vraie. Pour certains radionucléides émettant des rayonnements gamma en cascade, ces corrections peuvent être significatives et affecter l'exactitude des mesures d'activité. L'intégration de facteurs de correction de coïncidence dans le programme d'étalonnage en efficacité permettrait d'étendre son domaine d'application à une gamme plus large de radionucléides.

L'implémentation d'une interface graphique conviviale (GUI) pourrait également faciliter l'utilisation des programmes par des opérateurs moins familiarisés avec VBA-Excel. Une telle interface permettrait une saisie plus intuitive des données, une visualisation en temps réel des résultats, et une génération automatique de rapports d'étalonnage conformes aux normes internationales de métrologie. Enfin, la validation des programmes développés pourrait être étendue par l'utilisation de sources multi-gamma certifiées (telles que l'Europium-152 ou des mélanges de radionucléides) couvrant une gamme énergétique plus large (de 100 keV à 2 MeV). Cette approche permettrait de tester la robustesse des algorithmes sur une variété de configurations expérimentales et de vérifier leur applicabilité à des échantillons environnementaux complexes.

3.5 Implications pratiques pour le laboratoire LPNPE

Les programmes développés représentent une amélioration significative des capacités analytiques du laboratoire LPNPE. L'automatisation partielle des procédures d'étalonnage réduit les risques d'erreurs humaines et accélère le processus de calibration. Cette efficacité accrue est particulièrement importante dans le contexte des mesures de routine où de nombreux échantillons doivent être analysés régulièrement. La flexibilité offerte par les programmes en termes de nombre de pics d'étalonnage permet d'optimiser la précision des mesures en fonction des besoins spécifiques de chaque application. Pour les analyses de surveillance environnementale, où la précision est critique, l'utilisation du maximum de pics disponibles est recommandée. Pour les mesures de screening rapide, un nombre réduit de pics peut suffire tout en maintenant une exactitude acceptable.

L'approche méthodologique développée dans cette étude peut servir de modèle pour d'autres laboratoires équipés de détecteurs CdZnTe, particulièrement dans les pays en développement où l'accès à des logiciels commerciaux sophistiqués peut être limité par des contraintes budgétaires. La documentation détaillée des procédures d'étalonnage et des algorithmes utilisés facilite le transfert de technologie et la reproductibilité des résultats.

4. CONCLUSION

Cette étude a permis de développer et de valider deux programmes informatiques d'étalonnage pour le détecteur CZT/500(s) du laboratoire LPNPE, améliorant significativement ses capacités en spectrométrie gamma. D'une part, un programme d'étalonnage en énergie a été conçu en utilisant l'Iode-131 comme source de référence. Basé sur la méthode d'ajustement linéaire par moindres carrés, ce programme permet l'utilisation de jusqu'à six pics d'énergie contre trois pour le logiciel WinSpec for Inspector, surpassant ainsi les limitations du système existant. L'équation d'étalonnage obtenue présente un excellent coefficient de corrélation ($r = 0,99$) et des écarts acceptables entre valeurs théoriques et expérimentales (0,215 à 0,701 keV), confirmant la fiabilité de l'approche. Le programme calcule également les paramètres essentiels du système : gain de l'amplificateur, plage énergétique et gain du détecteur.

D'autre part, un programme d'étalonnage en efficacité a été développé en utilisant la même source d'Iode-131. Ce programme, reposant sur la méthode des moindres carrés couplée à des calculs matriciels via les fonctions MMULT et MINVERSE de VBA-Excel, génère une courbe d'efficacité polynomiale d'ordre 3 en fonction de l'énergie. La validation du programme par calcul inverse de l'activité de la source a confirmé la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs de référence, démontrant ainsi la fiabilité de l'outil pour les analyses quantitatives. Ce programme permet désormais le calcul d'activité d'échantillons inconnus après détermination de l'efficacité correspondant à l'énergie d'intérêt. Les résultats obtenus démontrent que des programmes accessibles, développés dans un environnement répandu comme VBA-Excel et basés sur des méthodes mathématiques éprouvées, peuvent améliorer substantiellement les performances métrologiques d'un laboratoire de radioactivité. L'automatisation partielle des procédures d'étalonnage

réduit les risques d'erreurs humaines, accélère les processus de calibration et offre une flexibilité accrue dans le choix du nombre de points d'étalonnage. Cette approche pragmatique est particulièrement pertinente pour les laboratoires disposant de ressources limitées, tout en garantissant des résultats de qualité conformes aux exigences de la spectrométrie gamma moderne.

Toutefois, les programmes développés présentent une limitation importante : leur nature semi-expérimentale nécessite l'assistance du logiciel WinSpec for Inspector pour le traitement initial des spectres, notamment pour la détection automatique des pics et le calcul des aires nettes. Cette dépendance partielle restreint l'autonomie complète du système d'étalonnage et impose un workflow en deux étapes pour chaque calibration.

Dans le cadre des travaux futurs, plusieurs axes d'amélioration sont envisageables. Le développement d'un programme entièrement autonome, intégrant des algorithmes de détection automatique de pics et de calcul d'aires nettes, constitue la priorité principale. L'implémentation de méthodes avancées de déconvolution spectrale permettrait de traiter des spectres complexes présentant des pics superposés. L'extension de la validation à d'autres sources multi-gamma (Europium-152, Césium-137) sur une gamme énergétique plus large (100 keV à 2 MeV) renforcerait la robustesse de l'approche. Enfin, l'intégration de corrections de coïncidence vraie pour les radionucléides émettant des cascades gamma et le développement d'une interface graphique conviviale faciliteraient l'utilisation opérationnelle des programmes.

En conclusion, cette étude apporte une contribution significative à l'amélioration des capacités analytiques du laboratoire LPNPE pour l'analyse qualitative et quantitative par spectrométrie gamma. Les outils développés renforcent l'autonomie du laboratoire dans ses missions de surveillance de la radioactivité environnementale à Madagascar, tout en offrant un modèle méthodologique transférable à d'autres laboratoires équipés de détecteurs CdZnTe. Les perspectives d'amélioration identifiées ouvrent la voie à des développements futurs qui consolideront davantage la position du laboratoire LPNPE comme centre de référence en radioprotection et métrologie des rayonnements pour la région.

5. REFERENCES

- Abbaszadeh, S., Gu, Y., Reynolds, P. D., & Levin, C. S. (2016). Characterization of a sub-assembly of 3D position sensitive cadmium zinc telluride detectors and electronics from a sub-millimeter resolution PET system. *Physics in Medicine & Biology*, 61(18), 6733–6753. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/18/6733>
- Abbene, L., Gerardi, G., Turturici, A. A., Raso, G., Benassi, G., Bettelli, M., Zambelli, N., Zappettini, A., & Principato, F. (2017). Development of new CdZnTe detectors for room-temperature high-flux radiation measurements. *Journal of Synchrotron Radiation*, 24(2), 429–438. <https://doi.org/10.1107/S1600577517000194>
- Bouchet, L. (1995). A comparative study of deconvolution methods for gamma-ray spectra. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 113, 167–183.
- Carolan, J. V., Hughes, C. E., Lucey, P. G., & Cunningham, J. D. (2016). Gamma spectrometry analysis of radioiodine in charcoal from high volume aerosol samples. *Radiation Physics and Chemistry*, 171, 108726. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108726>
- Courtine, F. (2007). Étalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle : Mesures expérimentales et modélisation par technique de Monte-Carlo (Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal). HAL. <https://theses.hal.science/tel-00147301v1>
- Debertin, K., & Helmer, R. G. (1988). Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors. North-Holland.
- Del Sordo, S., Abbene, L., Caroli, E., Mancini, A. M., Zappettini, A., & Ubertini, P. (2009). Progress in the development of CdTe and CdZnTe semiconductor radiation detectors for astrophysical and medical applications. *Sensors*, 9(5), 3491–3526. <https://doi.org/10.3390/s90503491>
- Dziri, S. (2013). Études expérimentales et simulation Monte-Carlo en spectrométrie γ : Correction des effets de cascades et de matrice pour des mesures environnementales (Thèse de doctorat, Université de Strasbourg). HAL. <https://theses.hal.science/tel-01062384>
- Owens, A., Bavdaz, M., Anderson, H., Gagliardi, T., Krumrey, M., Nenonen, S., Peacock, A., Taylor, I., & Tröger, L. (2002). The X-ray response of CdZnTe. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 484(1–3), 242–250. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)02026-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)02026-X)
- Ratovonjanahary, C., et al. (2015). LPNPE Lab's energy calibration method for gamma spectrometry using detector CZT-500s & MCA-166. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 11(2), 209–214.
- Roy, U. N., Camarda, G. S., Cui, Y., & James, R. B. (2021). Advances in CdZnTeSe for radiation detector applications. *Radiation*, 1(2), 123–130. <https://doi.org/10.3390/radiation120011>
- Roy, U. N., Camarda, G. S., Cui, Y., Gul, R., Yang, G., Zazvorka, J., Dedic, V., Franc, J., & James, R. B. (2019). Evaluation of CdZnTeSe as a high-quality gamma-ray spectroscopic material with better compositional homogeneity and reduced defects. *Scientific Reports*, 9(1), Article 7303. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43778-3>
- Vanin, V. R., Maidana, N. L., López-Herrera, M. E., Rado, P. R., & Alburquerque-Mar, R. F. (1999). Mixing activity-calibrated and uncalibrated gamma-ray sources in efficiency calibration. *Applied Radiation and Isotopes*, 52(3), 527–532. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(99\)00045-7](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(99)00045-7)



How to cite this article: Maminirina Tantely Ranaivoarimalala, Haingo Laza Andriampanarivo, F. Elliot SAHOA, R. Radomanana Rakotonarivo, Ony Fenomampionona Rabetokotany, Dieudonné Solofonirina Ravelomanantsoa et A. Justinien Franck Ratovonjanahary. CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DE L'ETALONNAGE EN ENERGIE ET EN EFFICACITE DU DETECTEUR CZT/500(S) DU LABORATOIRE LPNPE. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 22(6): 19-29. DOI : 10.5281/ZENODO.17909203

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>