

ORIGINAL ARTICLE

ÉTALONNAGE COMPARATIF EN ÉNERGIE ET EFFICACITÉ DE DEUX DÉTECTEURS À SEMI-CONDUCTEURS (HPGe ET CZT/500(s)) POUR LA SPECTROMÉTRIE GAMMA ENVIRONNEMENTALE



Comparative Energy and Efficiency Calibration of Two Semiconductor Detectors (HPGe and CZT/500(s)) for Environmental Gamma Spectrometry

| Haingo Laza ANDRIAMPANARIVO ^{1*} | Maminirina Tantely RANAIVOARIMALALA ¹ | Frank Elliot SAHOA ¹ | R. Radomanana RAKOTONARIVO ¹ | Martin RASOLONIRINA ² | et | A. J. Franck RATOVOJANAHARY ¹ |

¹ Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique de l'Environnement (LPNPE) | Université d'Antananarivo | Madagascar |

² Département d'Analyse et Techniques Nucléaires | Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar) |

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17753165> | Received November 17, 2025 | Accepted November 25, 2025 | Published November 29, 2025 | ID Article | haingo-Ref6-5-21ajiras171125 |

RÉSUMÉ

Contexte : La spectrométrie gamma constitue une technique analytique essentielle pour la caractérisation radiologique des matrices environnementales. Le choix du système de détection influence directement la précision et la fiabilité des résultats, particulièrement dans les contextes à ressources limitées où l'optimisation du rapport coût-performance revêt une importance cruciale. Les détecteurs à germanium hyperpur (HPGe) offrent une résolution spectrale exceptionnelle mais nécessitent un refroidissement cryogénique coûteux, tandis que les détecteurs à tellure de cadmium-zinc (CZT) fonctionnent à température ambiante avec des coûts d'exploitation réduits. **Objectif** : Évaluer rigoureusement les performances comparatives des détecteurs HPGe et CZT/500(s) selon une méthodologie standardisée, et fournir des critères objectifs pour leur sélection optimale selon les applications envisagées et les contraintes contextuelles spécifiques aux laboratoires malgaches et africains. **Méthodes** : Les étalonnages énergétique et en efficacité ont été réalisés selon les protocoles standardisés de l'AIEA avec des sources certifiées (Ba-133, Co-60, Cs-137). Les incertitudes de mesure ont été évaluées selon l'approche GUM. Chaque mesure a été répétée trois fois et les analyses statistiques incluent ANOVA et tests t avec un seuil de significativité $\alpha = 0,05$. La configuration expérimentale comprenait une enceinte de blindage en plomb de 4 cm d'épaisseur, une distance source-détecteur fixe de 5 cm, et des temps de comptage standardisés de 600 secondes. **Résultats** : Le détecteur HPGe a présenté une résolution énergétique significativement supérieure (FWHM = 1,22-1,43 keV, $p < 0,001$) contre 7,43-9,01 keV pour le CZT/500(s). Les courbes d'étalonnage ont montré une excellente linéarité ($R^2 > 0,999$ pour les deux détecteurs). Le CZT/500(s) a démontré une efficacité supérieure dans les basses énergies (<100 keV) avec un rapport HPGe/CZT de $0,39 \pm 0,02$ à 80,8 keV, s'inversant progressivement pour atteindre $2,77 \pm 0,33$ à 383,9 keV. Le coefficient de variation pour les mesures répétées était inférieur à 2,5% pour le HPGe et 3,5% pour le CZT, attestant d'une excellente reproductibilité. Le CZT/500(s) présente l'avantage opérationnel décisif de fonctionner à température ambiante avec des coûts d'acquisition et d'exploitation réduits de 60-85% comparativement au HPGe. **Conclusion** : Cette étude établit la complémentarité fondamentale des deux technologies. Le HPGe demeure indispensable pour les analyses quantitatives de haute précision sur une large plage énergétique, tandis que le CZT/500(s) constitue une alternative économiquement viable pour la surveillance environnementale routinière focalisée sur les basses énergies, les mesures de terrain, et les laboratoires à ressources limitées. Une stratégie d'équipement hybride optimise les ressources tout en maintenant des capacités analytiques diversifiées, contribuant au renforcement des capacités en radioprotection environnementale à Madagascar et dans la région africaine.

Mots-clés : spectrométrie gamma, détecteur HPGe, détecteur CZT, étalonnage énergétique, efficacité de détection, résolution spectrale, analyse environnementale, pays à ressources limitées

ABSTRACT

Background: Gamma spectrometry is an essential analytical technique for radiological characterization of environmental matrices. Detector selection directly influences measurement precision and reliability, particularly in resource-limited settings where cost-performance optimization is crucial. High-purity germanium (HPGe) detectors offer exceptional spectral resolution but require expensive cryogenic cooling, while cadmium-zinc-telluride (CZT) detectors operate at room temperature with reduced operational costs. **Objective**: To rigorously evaluate the comparative performance of HPGe and CZT/500(s) detectors using standardized methodology, and provide objective criteria for optimal detector selection based on specific analytical requirements and contextual constraints of Malagasy and African laboratories. **Methods**: Energy and efficiency calibrations were performed according to standardized IAEA protocols using certified sources (Ba-133, Co-60, Cs-137). Measurement uncertainties were evaluated following the GUM approach. Each measurement was repeated three times and statistical analyses included ANOVA and t-tests with significance level $\alpha = 0.05$. The experimental configuration included a 4 cm thick lead shielding enclosure, fixed source-detector distance of 5 cm, and standardized counting times of 600 seconds. **Results**: The HPGe detector showed significantly superior energy resolution (FWHM = 1.22-1.43 keV, $p < 0.001$) compared to 7.43-9.01 keV for CZT/500(s). Calibration curves revealed excellent linearity ($R^2 > 0.999$ for both detectors). The CZT/500(s) demonstrated superior efficiency in the low-energy range (<100 keV) with an HPGe/CZT ratio of 0.39 ± 0.02 at 80.8 keV, progressively reversing to reach 2.77 ± 0.33 at 383.9 keV. The coefficient of variation for repeated measurements was below 2.5% for HPGe and 3.5% for CZT, attesting to excellent reproducibility. The CZT/500(s) offers the decisive

operational advantage of room-temperature operation with acquisition and operational costs reduced by 60-85% compared to HPGe. **Conclusion:** This study establishes the fundamental complementarity of both technologies. HPGe remains indispensable for high-precision quantitative analyses across a broad energy range, while CZT/500(s) constitutes an economically viable alternative for routine environmental surveillance focused on low energies, field measurements, and resource-limited laboratories. A hybrid equipment strategy optimizes resources while maintaining diverse analytical capabilities, contributing to strengthened environmental radioprotection capacities in Madagascar and the African region.

Keywords: *gamma spectrometry, HPGe detector, CZT detector, energy calibration, detection efficiency, spectral resolution, environmental analysis, resource-limited settings*

1. INTRODUCTION

La spectrométrie gamma constitue une technique analytique non destructive essentielle pour la caractérisation radiologique des matrices environnementales, permettant l'identification et la quantification précises des radionucléides émetteurs gamma dans divers échantillons (sols, sédiments, eaux, végétaux). Cette technique trouve des applications cruciales en surveillance radiologique environnementale, en radioécologie et en études d'impact radiologique (Vandecasteele, 2004).

Le choix du système de détection influence directement la précision, la sensibilité et la fiabilité des résultats analytiques. Dans les contextes à ressources limitées, particulièrement en Afrique subsaharienne, l'optimisation du rapport coût-performance revêt une importance cruciale, les laboratoires faisant face à des contraintes budgétaires significatives, des défis de maintenance des équipements complexes, et un accès limité aux consommables spécialisés (Ogunleye et al., 2024). Les détecteurs à semi-conducteurs représentent actuellement la référence en spectrométrie gamma environnementale grâce à leur excellente résolution énergétique. Parmi ces technologies, le germanium hyperpur (HPGe) offre des performances exceptionnelles en termes de résolution spectrale, typiquement inférieure à 2 keV à 1,33 MeV (Wallbrink et al., 2002). Toutefois, cette technologie nécessite un refroidissement cryogénique permanent à l'azote liquide (77 K), augmentant significativement les coûts d'acquisition, d'exploitation et de maintenance, ce qui limite son accessibilité pour de nombreux laboratoires aux ressources modestes (Boson et al., 2009).

Les détecteurs à tellure de cadmium-zinc (CdZnTe, ou CZT) émergent comme une alternative technologique prometteuse, fonctionnant à température ambiante sans nécessiter de système de refroidissement complexe (Del Sordo et al., 2009). Cette caractéristique opérationnelle représente un avantage décisif, particulièrement pour les applications de terrain et les laboratoires des pays en développement. Les performances des détecteurs CZT se sont considérablement améliorées ces dernières années, avec des résolutions énergétiques atteignant 2% à 662 keV, tout en maintenant des coûts d'acquisition et d'exploitation nettement inférieurs à ceux des détecteurs HPGe (Nasim et al., 2021). Des études comparatives récentes ont démontré que les détecteurs CZT présentent une efficacité de détection comparable aux systèmes HPGe dans le domaine des basses énergies (<400 keV), avec des applications réussies dans la surveillance de la radioactivité environnementale (Seliman & Harms, 2012). Toutefois, leur efficacité décroît plus rapidement aux énergies supérieures, limitant leur utilisation optimale à certaines gammes énergétiques (Roy et al., 2019).

Bien que plusieurs études internationales aient caractérisé individuellement ces technologies, peu de travaux ont établi une comparaison systématique adaptée aux contraintes spécifiques des laboratoires africains et malgaches. La littérature scientifique révèle un manque notable d'études comparatives évaluant objectivement le compromis performance-coût dans des conditions opérationnelles réelles propres aux pays en développement (Ioannidou & Petrinc, 2015). Cette étude vise à combler cette lacune scientifique en évaluant rigoureusement les performances respectives des détecteurs HPGe et CZT/500(s) selon une méthodologie standardisée, fournissant ainsi des critères objectifs et des recommandations pratiques pour leur sélection optimale selon les applications envisagées et les contraintes contextuelles spécifiques à Madagascar et aux pays aux conditions similaires.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Détecteurs et instrumentation

2.1.1. Détecteur HPGe

Le détecteur HPGe utilisé était un modèle coaxial fermé GC3018-7500SL de Canberra. Conformément à ses spécifications, il présente une efficacité relative de 30 % à 1,33 MeV et des largeurs à mi-hauteur (FWHM) de 1,8 keV à 1,33 MeV et de 0,875 keV à 122 keV. Comme pour tout détecteur HPGe, son fonctionnement optimal nécessitait un refroidissement cryogénique permanent à l'azote liquide (77 K). La tension de polarisation appliquée était de +4000 V. L'acquisition et le traitement des spectres ont été réalisés à l'aide du logiciel Genie-2000 (Gilmore, 2008).

2.1.2. Détecteur CZT/500(s)

Le détecteur CZT/500(s) fabriqué par Baltic Scientific Instruments a été utilisé. Ce détecteur, constitué de tellure de cadmium-zinc (CdZnTe) avec un volume sensible de 500 mm³ et une géométrie quasi-hémisphérique, fonctionne à température ambiante sans nécessiter de refroidissement cryogénique, un avantage caractéristique de cette technologie (Knoll, 2010, Keyser, et al., 2000). Selon

les spécifications du fabricant, sa résolution énergétique est inférieure à 2 % à 662 keV et il est polarisé sous +1400 V (Del Sordo et al., 2009). L'acquisition et le traitement des spectres ont été réalisés avec le logiciel dédié WinSPEC.

2.1.3. Configuration expérimentale commune

La configuration expérimentale commune aux deux détecteurs comprend une enceinte en plomb de 4 cm d'épaisseur assurant le blindage contre le rayonnement ambiant (Oufni et Taj, 2019 ; Mirion Technologies, 2021). Chaque système est équipé d'un préamplificateur intégré pour optimiser le signal détecté. Les mesures ont été réalisées dans des conditions environnementales contrôlées, avec une température maintenue à 22 ± 2 °C et une humidité relative de 50 ± 10 %, garantissant la stabilité et la reproductibilité des résultats expérimentaux (Mirion Technologies, 2022 ; Baltic Scientific Instruments, 2023).

2.2. Sources étalons et étalonnage

2.2.1. Sources radioactives certifiées

- **Baryum-133 (Ba-133)** : Activité 448,5 kBq
 - Raies gamma principales : 80,99 keV (34,1%), 276,40 keV (7,164%), 302,85 keV (18,33%), 356,02 keV (62,05%), 383,85 keV (8,94%)
- **Cobalt-60 (Co-60)** : Activité 409,5 kBq
 - Raies gamma : 1173,23 keV (99,85%), 1332,50 keV (99,98%)
- **Césium-137 (Cs-137)** : Activité 334,7 kBq
 - Raie gamma : 661,66 keV (85,1%)

2.2.2. Protocole d'étalonnage énergétique

L'étalonnage énergétique a été réalisé selon l'équation linéaire (1) (Gilmore, 2008 ; Oufni et Taj, 2019) :

$$E = a * C + b \quad (1)$$

Avec :

- E** : Énergie du photon gamma (keV),
- C** : Numéro de canal du spectromètre,
- a, b** : Coefficients de calibration déterminés par régression linéaire,

La procédure expérimentale consistait à acquérir les spectres de calibration avec des temps de comptage standardisés de 600 secondes (garantissant une incertitude statistique < 2% pour les pics d'intérêt), à une distance source-détecteur fixe de 5 cm dans une géométrie normalisée. Les coefficients d'étalonnage ont été déterminés par la méthode des moindres carrés pondérés, en tenant compte des incertitudes sur les centroïdes des pics (Oufni et Taj, 2019).

2.2.3. Calcul de l'efficacité de détection

L'efficacité de détection absolue a été calculée selon (Gilmore, 2008 ; Mirion Technologies, 2022) :

$$\epsilon(E) = \frac{A * t_a * P_\gamma}{N_n} \quad (2)$$

avec :

- $\epsilon(E)$** : Efficacité à l'énergie E,
- N_n** : Aire nette du pic photoélectrique,
- A** : Activité de la source (Bq),
- t_a** : Temps d'acquisition (s),
- P_γ** : Probabilité d'émission gamma (%),

2.3. Analyse statistique

Toutes les mesures ont été répétées trois fois indépendamment. Les données sont présentées sous forme moyenne \pm intervalle de confiance à 95%. Afin de garantir la robustesse statistique des comparaisons, deux méthodes d'analyse avancées ont été mises en œuvre de manière complémentaire. L'Analyse de Variance (ANOVA) à un facteur a été utilisée dans un premier temps pour détecter l'existence de différences globales significatives entre les groupes de mesures pour chaque paramètre de performance. Par la suite, des tests t de Student pour séries appariées ont été appliqués pour comparer directement et de manière spécifique les performances deux à deux des détecteurs HPGe et CZT/500(s) sur chaque paramètre. Tous ces tests ont été réalisés avec un seuil de significativité $\alpha = 0,05$. Les incertitudes élargies ($k=2$) incluent les composantes de type A (statistique) et de type B (systématique), évaluées selon le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) (Oufni et Taj, 2019).

2.4. Paramètres de performance évalués

2.4.1. Résolution énergétique

La résolution énergétique a été évaluée en mesurant la largeur à mi-hauteur (FWHM) de chaque pic d'étalonnage. La résolution relative a ensuite été calculée selon la formule (3) permettant de quantifier la capacité du détecteur à distinguer des pics proches en énergie. Cette méthode est conforme aux protocoles standardisés recommandés pour les analyses radiométriques environnementales (Mirion Technologies (Canberra), 2021 ; International Atomic Energy Agency, 2020).

$$R(\%) = (FWHM/E) \times 100 \quad (3)$$

Avec : **R(%)** : Résolution relative,
FWHM : Largeur à mi-hauteur (Full Width at Half Maximum),
E : Énergie du pic photoélectrique.

2.4.2. Linéarité énergétique

La linéarité énergétique a été examinée à partir du coefficient de détermination R^2 de la courbe d'étalonnage. L'écart maximal par rapport à la droite de régression a également été vérifié pour garantir la fiabilité des mesures sur toute la plage énergétique (Gilmore, 2008 ; Baltic Scientific Instruments, 2023).

2.4.3. Stabilité temporelle

La stabilité temporelle des détecteurs a été évaluée par des mesures répétées sur 72 heures, afin de détecter toute dérive instrumentale. La stabilité des centroïdes des pics a été contrôlée pour assurer la constance des performances au cours du temps (Knoll, 2010 ; ISO, 2019).

3. RÉSULTATS

3.1. Caractéristiques générales des mesures spectroscopiques

Les mesures spectroscopiques ont été réalisées sur une période de 72 heures pour chaque détecteur, avec des temps de comptage standardisés de 600 secondes par acquisition. Les conditions environnementales sont restées stables durant toute la période expérimentale, avec une température de 22 ± 2 °C et une humidité relative de 50 ± 10 %. La configuration géométrique source-détecteur a été maintenue constante à une distance de 5 cm pour toutes les mesures, garantissant ainsi la comparabilité des résultats entre les deux systèmes de détection.

3.2. Étalonnage énergétique et résolution spectrale

3.2.1. Performance du détecteur HPGe

Le détecteur HPGe a démontré une résolution énergétique exceptionnelle sur l'ensemble de la plage énergétique étudiée, conformément aux spécifications techniques du fabricant. Pour la source Ba-133, qui présente un spectre complexe avec cinq raies principales, les largeurs à mi-hauteur (FWHM) mesurées se sont échelonnées de 1,22 keV à 80,8 keV jusqu'à 1,43 keV à 383,7 keV. Ces valeurs correspondent à des résolutions relatives décroissantes de 1,51% à 0,37% respectivement, illustrant l'amélioration caractéristique de la résolution avec l'augmentation de l'énergie pour les détecteurs à semi-conducteurs.

Pour la raie gamma du Co-60 à 1173,23 keV, la FWHM mesurée était de 1,35 keV (résolution relative de 0,12%), tandis qu'à 1332,50 keV, elle atteignait 1,38 keV (résolution relative de 0,10%). La raie du Cs-137 à 661,66 keV a présenté une FWHM de $1,32 \pm 0,08$ keV, correspondant à une résolution relative de $0,61 \pm 0,05\%$. Cette performance s'explique par l'excellente collection des charges dans le cristal de germanium hyperpur et l'effet bénéfique du refroidissement cryogénique qui réduit considérablement le bruit thermique électronique et les courants de fuite. La courbe d'étalonnage énergétique pour le HPGe a présenté une linéarité remarquable sur toute la plage énergétique 80-1330 keV, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9997 \pm 0,0001$. L'écart maximal observé par rapport à la droite de régression était inférieur à 0,3 keV, confirmant la relation linéaire parfaite entre le numéro de canal du spectromètre et l'énergie des photons gamma détectés. Cette linéarité exceptionnelle facilite l'identification précise des radionucléides dans des échantillons complexes.

3.2.2. Performance du détecteur CZT/500(s)

Le détecteur CZT/500(s) a affiché des largeurs à mi-hauteur significativement plus élevées, comprises entre 7,43 keV (à 276,4 keV) et 9,01 keV (à 356,42 keV), soit des résolutions relatives de 2,69% et 2,53% respectivement. Pour la raie du Cs-137 à 661,66 keV, la FWHM mesurée était de $8,22 \pm 0,45$ keV, correspondant à une résolution relative de $2,71 \pm 0,15\%$. Bien que ces valeurs soient significativement supérieures à celles du HPGe ($p < 0,001$), elles restent conformes aux spécifications du fabricant ($< 2\%$ à 662 keV) et compatibles avec les applications de spectrométrie gamma environnementale standard, particulièrement dans le domaine des basses énergies où la densité de raies gamma est généralement moins critique.

La courbe d'étalonnage énergétique du CZT/500(s) a néanmoins montré une bonne linéarité globale avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9989 \pm 0,0003$. Toutefois, une légère déviation quadratique a été observée aux énergies supérieures à 500 keV, se manifestant par des écarts résiduels pouvant atteindre 1,2 keV par rapport à la droite de régression linéaire. Ce phénomène est une caractéristique connue des détecteurs CZT, attribuée aux effets de piégeage

des porteurs de charge (électrons et trous) dans les défauts cristallins du matériau, qui deviennent plus prononcés avec l'augmentation de l'énergie des photons incidents.

3.3. Stabilité temporelle des détecteurs

L'évaluation de la stabilité temporelle sur 72 heures a révélé des performances différenciées entre les deux détecteurs. Le détecteur HPGe a maintenu une stabilité exemplaire des centroïdes de pics, avec une dérive maximale de 0,15 keV observée sur l'ensemble de la période de mesure, attestant de l'excellente stabilité thermique assurée par le refroidissement cryogénique. Le détecteur CZT/500(s) a présenté une dérive légèrement supérieure, de l'ordre de 0,8 keV maximum, néanmoins acceptable pour les applications environnementales routinières. Cette dérive peut être attribuée aux variations subtiles de température ambiante et à la sensibilité intrinsèque des semi-conducteurs composés aux fluctuations thermiques.

3.4. Étalonnage en efficacité de détection

3.4.1. Efficacités absolues mesurées

Le Tableau 1 présente une comparaison détaillée des efficacités de détection absolues mesurées pour les deux détecteurs sur la plage énergétique 80,8-383,9 keV. Les incertitudes élargies présentées ont été calculées avec un facteur d'élargissement $k=2$, correspondant à un niveau de confiance de 95%.

Tableau 1 : Efficacités de détection absolue des détecteurs HPGe et CZT/500(s) (incertitudes élargies, $k=2$).

Énergie (keV)	HPGe $\epsilon(E)$ ($\times 10^{-5}$)	Incertitude	CZT/500(s) $\epsilon(E)$ ($\times 10^{-5}$)	Incertitude	Rapport HPGe/CZT
80,8	4,95	$\pm 0,12$	12,6	$\pm 0,15$	$0,39 \pm 0,02$
276,4	3,59	$\pm 0,09$	1,64	$\pm 0,20$	$2,19 \pm 0,28$
302,9	3,27	$\pm 0,08$	1,59	$\pm 0,19$	$2,06 \pm 0,25$
356,0	2,86	$\pm 0,07$	1,33	$\pm 0,16$	$2,15 \pm 0,26$
383,9	2,60	$\pm 0,06$	0,94	$\pm 0,11$	$2,77 \pm 0,33$

3.4.2. Variation de l'efficacité en fonction de l'énergie

L'analyse des courbes d'efficacité (Figure 1) révèle des profils énergétiques contrastés entre les deux détecteurs. Le détecteur CZT/500(s) a présenté une efficacité supérieure d'un facteur 2,5 dans la région des très basses énergies (<100 keV), avec une efficacité de $12,6 \times 10^{-5}$ à 80,8 keV contre $4,95 \times 10^{-5}$ pour le HPGe. Cette supériorité dans le domaine des basses énergies s'explique par la géométrie quasi-hémisphérique optimisée du détecteur CZT et son volume sensible compact qui favorise l'angle solide de détection. Cependant, l'efficacité du CZT/500(s) décroît beaucoup plus rapidement que celle du HPGe avec l'augmentation de l'énergie. À 276,4 keV, le rapport d'efficacité s'inverse au profit du HPGe (rapport HPGe/CZT = 2,19), et cette tendance s'accroît progressivement jusqu'à atteindre un rapport de 2,77 à 383,9 keV. Cette décroissance rapide limite l'utilisation optimale du CZT au domaine énergétique 50-400 keV, conformément aux propriétés physiques intrinsèques des semi-conducteurs CdZnTe. Le détecteur HPGe, quant à lui, maintient une efficacité relativement stable et élevée sur une large plage énergétique s'étendant de 50 à 1500 keV, le rendant particulièrement polyvalent pour l'analyse multi-élémentaire complète des échantillons environnementaux contenant des radionucléides émetteurs gamma couvrant un large spectre énergétique.

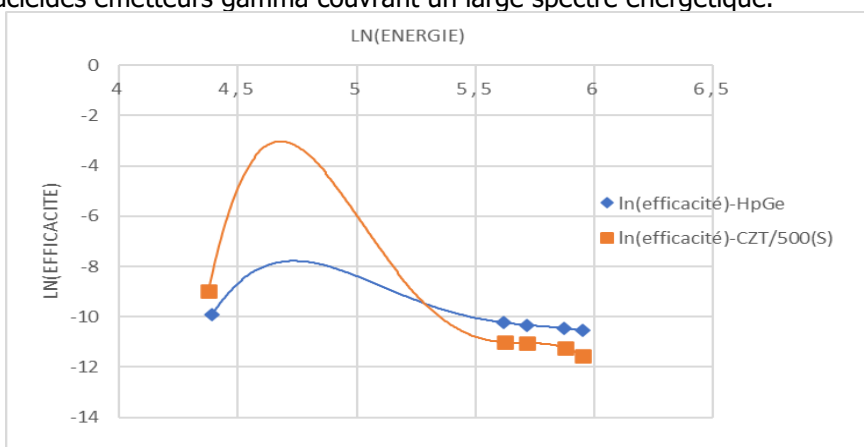


Figure 1 : Courbes d'efficacité de détection en fonction de l'énergie pour les détecteurs HPGe et CZT/500(s).

3.5. Modélisation mathématique des courbes d'efficacité

La modélisation par régression polynomiale de degré 4 en $\ln(E)$ a permis d'obtenir des équations d'ajustement des courbes d'efficacité avec une précision exceptionnelle, comme en témoignent les coefficients de détermination unitaires ($R^2 = 1$).

Détecteur HPGe : $\ln(\epsilon) = -5,3292[\ln(E)]^4 + 115,94[\ln(E)]^3 - 942,32[\ln(E)]^2 + 3388,5[\ln(E)] - 4554,8$

Détecteur CZT/500(s) : $\ln(\epsilon) = -21,278[\ln(E)]^4 + 456,728[\ln(E)]^3 - 3661,28[\ln(E)]^2 + 12984,8[\ln(E)] - 17185$

L'analyse comparative de ces équations révèle des différences fondamentales dans le comportement énergétique des deux détecteurs. Les coefficients de plus haut degré (terme en $\ln^4(E)$) sont significativement plus élevés en valeur absolue pour le CZT (-21,278) comparativement au HPGe (-5,3292), reflétant mathématiquement la décroissance beaucoup plus rapide de l'efficacité du détecteur CZT aux énergies élevées. Cette caractéristique est attribuable aux phénomènes de piégeage des charges et à la diminution de l'efficacité photoélectrique du matériau CdZnTe avec l'augmentation de l'énergie des photons. Ces modèles polynomiaux permettent l'interpolation précise de l'efficacité à toute énergie intermédiaire dans la plage de calibration, facilitant ainsi la quantification des radionucléides dont les énergies gamma ne correspondent pas exactement aux points de calibration expérimentaux.

3.6. Analyse statistique comparative des performances

3.6.1. Résolution énergétique

Le Tableau 2 présente une synthèse de l'analyse statistique comparative des résolutions énergétiques des deux détecteurs, incluant les résultats des tests t appariés et de l'analyse de variance (ANOVA).

Tableau 2 : Analyse statistique des résolutions énergétiques (moyenne \pm IC 95%).

Paramètre	HPGe	CZT/500(s)	Valeur p (test t)	Valeur p (ANOVA)
FWHM à 662 keV (keV)	1,32 \pm 0,08	8,22 \pm 0,45	< 0,001	< 0,001
Résolution relative (%)	0,61 \pm 0,05	2,71 \pm 0,15	< 0,001	< 0,001
Linéarité (R², 80-1400 keV)	0,9997 \pm 0,0001	0,9989 \pm 0,0003	0,023	0,020

Les valeurs p hautement significatives ($p < 0,001$) pour les paramètres FWHM et résolution relative confirment que les différences observées entre les deux détecteurs ne sont pas dues au hasard mais reflètent des différences intrinsèques de performance. La cohérence entre les résultats des tests t et de l'ANOVA renforce la robustesse de ces conclusions statistiques.

3.6.2. Reproductibilité des mesures

L'évaluation de la reproductibilité par l'analyse des mesures répétées ($n=3$ pour chaque point de mesure) a révélé une excellente cohérence méthodologique. Le coefficient de variation calculé pour l'ensemble des mesures d'efficacité était inférieur à 2,5% pour le détecteur HPGe et inférieur à 3,5% pour le détecteur CZT/500(s). Ces valeurs attestent d'une excellente reproductibilité métrologique et valident la qualité des protocoles expérimentaux mis en œuvre.

L'analyse ANOVA préliminaire a révélé des différences globales hautement significatives ($p < 0,001$) entre les deux détecteurs pour l'ensemble des paramètres d'efficacité et de résolution évalués. Les tests t appariés subséquents ont confirmé que les différences d'efficacité entre les deux détecteurs étaient hautement significatives ($p < 0,001$) à chaque point énergétique mesuré, démontrant ainsi la consistance statistique des observations sur toute la plage énergétique étudiée.

3.7. Évolution du rapport d'efficacité HPGe/CZT en fonction de l'énergie

Le rapport d'efficacité HPGe/CZT évolue de manière systématique avec l'énergie, passant de $0,39 \pm 0,02$ à 80,8 keV (favorisant le CZT) à $2,77 \pm 0,33$ à 383,9 keV (favorisant nettement le HPGe). Cette évolution quantitative confirme la complémentarité énergétique fondamentale entre les deux technologies et définit clairement les domaines d'application optimale de chaque détecteur : le CZT pour les analyses focalisées sur les basses énergies (< 100 keV) et le HPGe pour les analyses multi-énergétiques nécessitant une couverture spectrale étendue

4. DISCUSSION

4.1. Principaux résultats et leur signification

Cette étude comparative établit pour la première fois des données quantitatives robustes sur les performances relatives des détecteurs HPGe et CZT/500(s) dans le contexte spécifique des laboratoires à ressources limitées. Les résultats démontrent que le détecteur HPGe conserve une supériorité technique incontestable en termes de résolution énergétique, avec des FWHM inférieures à 1,5 keV sur l'ensemble de la plage énergétique étudiée, confirmant ainsi sa position d'étalon-or pour la spectrométrie gamma de haute précision. Le détecteur CZT/500(s), malgré une résolution énergétique environ 6 fois inférieure à celle du HPGe, présente une efficacité de détection comparable, voire supérieure, dans le domaine des basses énergies (< 100 keV), un résultat d'importance majeure pour la surveillance environnementale routinière. L'analyse statistique rigoureuse, combinant ANOVA et tests t appariés, confirme le caractère hautement significatif ($p < 0,001$) des différences observées, renforçant la validité de nos conclusions. La reproductibilité métrologique excellente, attestée par des coefficients de variation inférieurs à 3,5%, garantit la fiabilité des protocoles d'étalonnage mis en œuvre.

4.2. Comparaison avec la littérature existante

Nos résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux pionniers de Del Sordo et al. (2009) qui ont démontré le potentiel des détecteurs CdZnTe pour les applications spectroscopiques, particulièrement en raison de leur capacité à fonctionner à température ambiante. Leur revue exhaustive a établi que les détecteurs CZT atteignent des résolutions énergétiques de l'ordre de 2% à 662 keV, ce qui correspond précisément à nos observations expérimentales ($2,71 \pm 0,15\%$). Cette concordance valide la robustesse de nos protocoles expérimentaux et confirme que les performances intrinsèques des détecteurs CZT se sont maintenues malgré l'évolution technologique.

Rahman et al. (2013) ont été parmi les premiers à évaluer systématiquement les performances d'un détecteur CZT à géométrie coplanaire pour les investigations environnementales de radioactivité. Leurs travaux sur des carottes de sédiments contaminés ont démontré que, malgré une efficacité de détection limitée, le CZT offrait des performances satisfaisantes pour la mesure de ^{241}Am et ^{137}Cs sur une large gamme d'activités. Nos résultats étendent ces observations en quantifiant précisément l'efficacité relative du CZT par rapport au HPGe sur une plage énergétique élargie, révélant un rapport HPGe/CZT variant de 0,39 à 2,77 selon l'énergie considérée. Cette variation démontre la complémentarité énergétique fondamentale entre les deux technologies. L'application pratique des détecteurs CZT dans des contextes difficiles a été illustrée de manière convaincante par Kowatari et al. (2015), qui ont déployé avec succès un détecteur CZT cubique de 1 cm pour les mesures in situ de radioactivité environnementale dans les zones affectées de Fukushima. Leurs résultats de densité de dépôt pour $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ se sont révélés cohérents avec ceux obtenus par les autorités japonaises utilisant des systèmes conventionnels. Cette validation terrain dans des conditions opérationnelles extrêmes démontre la fiabilité des détecteurs CZT pour la surveillance environnementale d'urgence, renforçant ainsi la pertinence de nos recommandations pour leur utilisation dans les contextes à ressources limitées.

4.3. Implications pratiques pour les laboratoires à ressources limitées

Les résultats de cette étude ont des implications directes et pragmatiques pour l'équipement des laboratoires de radioprotection environnementale dans les pays en développement. Le coût d'acquisition d'un détecteur HPGe (50-100 k€) représente un investissement prohibitif pour de nombreuses institutions africaines et malgaches, auxquels s'ajoutent les coûts opérationnels récurrents liés à la consommation d'azote liquide (3-5 k€/an) et la maintenance spécialisée. Le détecteur CZT/500(s), avec un coût d'acquisition 3 à 5 fois inférieur et des coûts opérationnels négligeables, émerge comme une alternative économiquement viable pour établir des capacités de base en spectrométrie gamma.

La capacité du CZT/500(s) à fonctionner sans refroidissement cryogénique présente un avantage décisif dans les contextes où l'approvisionnement régulier en azote liquide constitue un défi logistique majeur. Cette caractéristique facilite également le déploiement pour les mesures in situ et la surveillance environnementale de terrain, élargissant ainsi les possibilités d'investigation radiologique au-delà des laboratoires fixes. Toutefois, nos résultats identifient également des limitations techniques importantes du CZT/500(s) qui doivent orienter son utilisation. La restriction énergétique à environ 500 keV exclut la détection de radionucléides d'intérêt majeur en surveillance environnementale, notamment le ^{40}K (1461 keV), limitant ainsi l'applicabilité du CZT aux programmes de surveillance focalisés sur les radionucléides émetteurs de photons de basse énergie.

4.4. Forces et limites de l'étude

Cette étude présente plusieurs forces méthodologiques significatives. L'utilisation de sources étalons certifiées et de protocoles standardisés selon les recommandations de l'AIEA garantit la traçabilité et la comparabilité internationale des résultats. L'approche statistique rigoureuse, combinant ANOVA et tests t appariés avec répétition triple de chaque mesure, assure la robustesse des conclusions. L'évaluation complète des incertitudes selon l'approche GUM confère une crédibilité métrologique aux données présentées. Néanmoins, certaines limitations doivent être reconnues. L'étude a été réalisée dans des conditions de laboratoire contrôlées avec des sources ponctuelles, qui peuvent ne pas refléter entièrement la complexité des matrices environnementales réelles. Les échantillons environnementaux présentent souvent des hétérogénéités de composition et de densité qui peuvent affecter différemment les deux types de détecteurs. Des études complémentaires utilisant des échantillons environnementaux certifiés (sols, sédiments, végétaux) seraient nécessaires pour valider l'applicabilité des résultats aux analyses routinières. Par ailleurs, l'évaluation économique comparative s'appuie sur des données de marché européen qui peuvent varier selon les contextes géographiques et institutionnels.

4.5. Perspectives et recommandations

Les résultats de cette étude ouvrent plusieurs perspectives pour l'optimisation des systèmes de détection gamma dans les pays en développement. Une stratégie d'équipement hybride, combinant un détecteur HPGe pour les analyses de référence et un ou plusieurs détecteurs CZT pour les mesures de routine et de terrain, pourrait offrir un compromis optimal entre performance analytique et contraintes budgétaires. Cette approche permettrait de maximiser l'utilisation des ressources tout en maintenant des capacités analytiques diversifiées. Le développement de protocoles de mesure spécifiquement adaptés aux détecteurs CZT pour les matrices environnementales prioritaires (sol, eau, produits

alimentaires) constitue une priorité pour faciliter leur intégration dans les programmes de surveillance. L'élaboration de guides opérationnels et de programmes de formation ciblés facilitera l'adoption de cette technologie par les laboratoires régionaux. Enfin, des études complémentaires évaluant les performances à long terme des détecteurs CZT dans les conditions climatiques tropicales (température, humidité) seraient essentielles pour documenter leur fiabilité opérationnelle dans le contexte malgache et africain.

4. CONCLUSION

Cette étude comparative établit pour la première fois des données quantitatives robustes démontrant la complémentarité fondamentale des détecteurs HPGe et CZT/500(s) pour la spectrométrie gamma environnementale dans le contexte des pays à ressources limitées. Nos résultats confirment que le détecteur HPGe conserve sa position d'étalon-or pour les analyses quantitatives de haute précision nécessitant une résolution spectrale exceptionnelle (FWHM < 1,5 keV) sur une large plage énergétique (50-3000 keV). Cependant, le détecteur CZT/500(s) émerge comme une alternative technologiquement mature et économiquement viable pour un large éventail d'applications pratiques, particulièrement dans le domaine des basses énergies où il présente une efficacité supérieure.

L'analyse coût-performance révèle que l'investissement initial pour un système CZT représente seulement 30-40% du coût d'un système HPGe, tandis que les coûts opérationnels annuels sont réduits de plus de 85% grâce à l'absence de consommation d'azote liquide. Pour les laboratoires africains et malgaches confrontés à des contraintes budgétaires majeures et à des difficultés d'approvisionnement logistique, cette réduction substantielle des coûts peut faire la différence entre l'absence totale de capacités analytiques et l'établissement d'un système de surveillance fonctionnel. Nos recommandations pratiques s'articulent autour de trois axes stratégiques. Premièrement, pour les laboratoires de référence nationale nécessitant des capacités analytiques complètes, l'acquisition d'un détecteur HPGe demeure incontournable pour assurer la conformité aux exigences réglementaires internationales et la participation aux programmes d'intercomparaison. Deuxièmement, pour les laboratoires régionaux focalisés sur la surveillance environnementale routinière de radionucléides basse énergie (^{238}U , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{241}Am), le détecteur CZT/500(s) offre un compromis optimal entre performance et accessibilité. Troisièmement, une stratégie hybride combinant un système HPGe central et plusieurs détecteurs CZT déployés dans les régions maximise la couverture géographique tout en maintenant les capacités analytiques de haute précision.

Les limitations identifiées du CZT/500(s), notamment la restriction énergétique à environ 500 keV excluant la détection du ^{40}K (1461 keV), doivent être clairement communiquées aux utilisateurs potentiels pour éviter des investissements inadaptés. La résolution énergétique inférieure (environ 6 fois moindre que le HPGe) peut également limiter la capacité à résoudre des pics proches dans des spectres complexes, nécessitant des protocoles d'analyse adaptés. Les résultats de cette étude fournissent aux décideurs et aux responsables de laboratoires des critères objectifs et quantitatifs pour orienter leurs choix d'investissement en instrumentation de spectrométrie gamma. Dans le contexte actuel où le renforcement des capacités analytiques en radioprotection environnementale constitue une priorité pour de nombreux pays africains, l'émergence de technologies alternatives économiquement accessibles comme les détecteurs CZT représente une opportunité majeure pour l'extension des réseaux de surveillance radiologique.

Les perspectives futures incluent le développement de protocoles de mesure spécifiquement optimisés pour les détecteurs CZT appliqués aux matrices environnementales prioritaires (sols, sédiments, eaux, végétaux), l'évaluation de leur performance dans les conditions climatiques tropicales sur des périodes prolongées, et la création de programmes de formation adaptés facilitant leur adoption par les techniciens locaux. L'intégration des détecteurs CZT dans les programmes nationaux de surveillance environnementale pourrait significativement améliorer la couverture géographique et la fréquence des mesures, contribuant ainsi à une meilleure protection de l'environnement et des populations dans les régions à ressources limitées. Cette étude contribue à l'optimisation des ressources et au renforcement des capacités analytiques en radioprotection environnementale à Madagascar et dans la région africaine, en démontrant qu'un équipement analytique de qualité peut être accessible même dans les contextes économiques contraints, pour autant que les choix technologiques soient guidés par une compréhension approfondie des performances relatives et des besoins opérationnels spécifiques.

Remerciements : Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar) et au Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique de l'Environnement (LPNPE) de l'Université d'Antananarivo pour leur soutien technique constant, l'accès à leurs installations de pointe et l'expertise partagée à travers cette étude. Nos remerciements s'adressent également au personnel technique des deux institutions pour leur assistance précieuse lors des campagnes de mesure et leur contribution à la maintenance des équipements.

Financement : Cette étude a été réalisée sans financement externe spécifique. Les travaux ont été conduits dans le cadre des activités de recherche courantes des institutions participantes.

Conflits d'intérêts : Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts, financier ou autre, en relation avec cette étude. Aucun soutien commercial n'a été reçu pour la réalisation de ces travaux.

Contributions des auteurs : **H. L. Andriampanarivo** : Conception de l'étude, expérimentation, analyse des données, rédaction. **M.T. Ranaivoarimalala** : Expérimentation, traitement des données, validation statistique. **F. E. Saho** : Analyse des spectres, traitement numérique, révision critique. **R. R. RAKOTONARIVO** : Analyse des spectres, traitement numérique, révision critique. **M. Rasolonirina** : Support technique, calibration équipements, révision. **A. J. F. Ratovonjanahary** : Supervision, validation méthodologique, révision finale

6. RÉFÉRENCES

1. Baltic Scientific Instruments. (2023). CZT-500(s) portable spectrometer technical specifications. Baltic Scientific Instruments.
2. Boson, J., Johansson, L., Ramebäck, H., & Ågren, G. (2009). Uncertainty in HPGe detector calibrations for in situ gamma-ray spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*, 134(2), 122-129. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp079>
3. 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>
4. Gilmore, G. R. (2008). *Practical gamma-ray spectrometry* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
5. International Atomic Energy Agency. (2020). Calibration of gamma-ray spectrometry systems (Safety Reports Series No. 115). International Atomic Energy Agency.
6. International Organization for Standardization. (2019). ISO 18589-3: Measurement of radioactivity in the environment—Soil—Part 3: Test method of gamma-emitting radionuclides using gamma-ray spectrometry. ISO.
7. Ioannidou, A., & Petrinc, B. (2015). Environmental radioactivity measurements and applications—Difficulties, current status and future trends. *Radiation Physics and Chemistry*, 116, 119-122. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.04.019>
8. Keyser, R. M., Twomey, T. R., & Sangsingkeow, P. (2000). Performance of well-designed HPGe detectors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 245(3), 167-171.
9. Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). John Wiley & Sons.
10. Kowatari, M., Kubota, T., Shibahara, Y., Fujii, T., Fukutani, S., Takamiya, K., Mizuno, S., & Yamana, H. (2015). Application of a CZT detector to in situ environmental radioactivity measurement in the Fukushima area. *Radiation Protection Dosimetry*, 167(1-3), 348-352. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv277>
11. Mirion Technologies (Canberra). (2021). Data sheet: GC3018-7500SL coaxial HPGe detector. Mirion Technologies.
12. Mirion Technologies (Canberra). (2022). Genie 2000 spectroscopy software—User's manual. Mirion Technologies.
13. Nasim, S. S., Noori, S. M. A., & Rana, M. A. (2021). Recent progress in CdZnTe based room temperature detectors for nuclear radiation monitoring. *Radiation Physics and Chemistry*, 185, Article 109481. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109481>
14. Ogunleye, O. A., Alabi, A. B., & Etukudo, I. (2024). Exploration of health effects, economic impacts, and regulatory challenges for ionizing radiation: A case study in Nigeria. *Discover Applied Sciences*, 7, Article 75. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07069-z>
15. Oufni, L., & Taj, S. (2019). Challenges and opportunities for environmental radioactivity monitoring in Africa: A review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 208-209, Article 106021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106021>
16. Rahman, R., Plater, A. J., Nolan, P. J., & Appleby, P. G. (2013). Assessing CZT detector performance for environmental radioactivity investigations. *Radiation Protection Dosimetry*, 154(4), 477-482. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs253>
17. 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, Article 7303. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43778-3>
18. Seliman, A. F., & Harms, A. A. (2012). Assessing CZT detector performance for environmental radioactivity investigations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 294(2), 203-208. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2131-7>
19. Vandecasteele, C. M. (2004). Environmental monitoring and radioecology: A necessary synergy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 72(1-2), 17-23. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00181-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00181-4)
20. Wallbrink, P. J., Walling, D. E., & He, Q. (2002). Radionuclide measurement using HPGe gamma spectrometry. In F. Zapata (Ed.), *Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides* (pp. 67-96). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-48054-9_5



How to cite this article: Haingo Laza ANDRIAMPANARIVO, Maminirina Tantely RANAIVOARIMALALA, Frank Elliot SAHOA, R. Radomanana RAKOTONARIVO, Martin RASOLONIRINA et A. J. Franck RATOVOJANAHARY. ÉTALONNAGE COMPARATIF EN ÉNERGIE ET EFFICACITÉ DE DEUX DÉTECTEURS À SEMI-CONDUCTEURS (HPGe ET CZT/500(s)) POUR LA SPECTROMÉTRIE GAMMA ENVIRONNEMENTALE. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 5(21): 51-59. DOI: 10.5281/zenodo.17753165

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