

DEVELOPPEMENT DE METHODE POUR L'ETALONNAGE EN EFFICACITE D'UN DETECTEUR CZT 500s EN UTILISANT UNE SOURCE D'IODE-131, SOUS L'APPROXIMATION QUASI-PONCTUELLE



DEVELOPMENT OF METHOD FOR THE EFFICIENCY CALIBRATION OF A CZT 500s DETECTOR USING A SOURCE OF IODE-131, UNDER QUASI-PONCTUAL APPROXIMATION

| Justin Francis Ratovonjanahary ^{1*} | Naivo Rabesiranana ^{2,3} | Haritiana Lucette Ralairisoa ¹ | A. Giscard Rakotoarimanana ¹ | Elise Octavie Rasoazanany ¹ | A. Rasata Ravelo ⁴ | Roland Raboanary ^{1,2} | et | A. Justinien Franck Ratovonjanahary ¹ |

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

². Faculté des Sciences | Université d'Antananarivo | BP 906-101 Antananarivo | Madagascar |

³. Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) | Madagascar |

⁴. Laboratoire des Radio-Isotopes (LRI) | Université d'Antananarivo | Madagascar |

| Received November 01, 2022 | Accepted November 17, 2022 | Published January 03, 2022 | ID Article | Justin-Ref1-ajira11121-Madagascar |

RESUME

Contexte : La mesure par spectrométrie gamma avec le système CZT500s nécessite des étalonnages en énergie et en efficacité, en utilisant des sources de rayonnement gamma de référence ou étalons. Idéalement, cet étalon doit être ponctuel, mais, dans la pratique, toute source a une dimension finie. Le problème est alors de chercher une configuration géométrique qui permet de faire une approximation quasi-ponctuelle des sources étalons. **Objectif :** Développer une méthode permettant de faire l'étalonnage en efficacité du système CZT500s avec une source d'Iode-131 non ponctuelle, mais considérée comme quasi-ponctuelle sous certaine configuration géométrique. **Méthode :** Evaluer les débits mesurés en présence de la source d'Iode-131 à différentes distances, variant de 10 cm à 350 cm, avec le débitmètre IdentiFinder et tracer la courbe distance-débit de dose. A partir du terme source, qui n'est applicable que pour une source ponctuelle à 1m du détecteur, calculer le débit à cette distance en fonction de l'activité connue de l'iode-131. Utiliser ce débit comme référence et calculer les débits correspondant de 10 cm à 350 cm en utilisant le modèle de variation du débit de dose en fonction de l'inverse carré de la distance. Utiliser les tests statistiques sur les résidus et sur les valeurs aberrantes pour déterminer la distance à partir de laquelle on peut considérer la source comme quasi-ponctuelle. Finalement, utiliser la distance de 1m, pour les déterminations de l'efficacité et de l'activité. **Résultats :** Les résultats sont comparables à partir de 20 cm. La source d'Iode-131 non ponctuelle peut être considérée comme ponctuelle à partir de cette distance, si on utilise l'IdentiFinder. L'efficacité du détecteur CZT 500s placée à 1 mètre de la source considérée comme ponctuelle décroît en fonction de l'énergie, elle est maximale pour les gammas d'énergie environ 200 keV. **Conclusion :** On retrouve les mêmes résultats par comparaison visuelle. Cependant, avoir des références quantitatives assure mieux la validité et la fiabilité des tests. Un programme a été conçu pour le graphe de la courbe d'efficacité et faire le calcul de l'activité. Finalement, la transformation du débit de dose en activité est réalisée dans les conditions de l'expérience.

Mots-clés: 131-I, Spectrométrie Gamma, CZT-500s, Etalonnage en efficacité, Dosimétrie

ABSTRACT

Context: Measurement by gamma spectrometry with the CZT500s system associated with an MCA166 requires energy and efficiency calibrations, using reference gamma radiation sources or standards. Ideally, this standard should be punctual, but in practice any source has a finite dimension. The problem is then to find a geometrical configuration, which allows making a quasi-punctual approximation of the standard sources. **Objective:** To develop a method for performing the efficiency calibration of a CZT500s detector system with a non-point Iodine-131 source, which can be considered as quasi-punctual under certain geometric configuration. **Method:** Assess the dose rates measured in the presence of the Iodine-131 source at various distances, varying from 10 cm to 350 cm, using the IdentiFinder and plot the distance-dose rate curve. From the source term, which is only applicable for a point source at 1m from the detector, calculate the dose rate at this distance according to the Iodine-131 known activity. Use this dose rate as a reference and calculate the corresponding dose rates from 10 cm to 350 cm, using the dose rate variation model as a function of the square inverse of the distance. Use statistical tests on the residuals and on the outliers to determine the distance from which the source can be considered as quasi-punctual. Finally, use the distance of 1m, a prerequisite for the use of the source term, for the efficiency and activity determinations. **Results:** The results are comparable from 20 cm. The Iodine-131 non-point source can be considered quasi-punctual from this distance, for the IdentiFinder used as a dose rate meter. The CZT500s detector efficiency placed 1 meter from the quasi-punctual source decreases as a function of energy, with a maximum for gamma-ray energy at around 200 keV. **Conclusion:** This result can be inferred from visual comparison. However, having quantitative benchmarks better ensures the validity and reliability of the tests. A computer program has been designed to display the efficiency curve and the activity calculation, which is determined with precision. Finally, the transformation of the dose rate into activity is carried out under the conditions of the experiment.

Keywords: 131-I, Gamma spectrometry, CZT-500s, Efficiency calibration, Dosimetry.

1. INTRODUCTION

Pour l'utilisation de la spectrométrie gamma avec le système CZT/500(s) associé à un MCA166, deux types d'étalonnage sont indispensables : l'étalonnage en énergie et l'étalonnage en efficacité, qui nécessitent de disposer de source de rayonnement gamma de référence ou étalon. Le présent travail a pour objectif de développer une méthode permettant de faire l'étalonnage en efficacité du système avec une source d'Iode-131 non ponctuelle en flacon dont l'activité est connue à une date de référence donnée [1]. Cette source a plusieurs pics exploitables pour l'étalonnage en énergie. La connaissance de son activité à un moment bien précis permet de faire l'étalonnage en efficacité en faisant l'hypothèse que cette source peut être considérée comme quasi-ponctuelle à partir d'une certaine distance source-détecteur.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Dosimétrie et Spectrométrie Gamma

Dans ce travail, des résultats des mesures obtenues par utilisation de dosimètre et par la spectrométrie gamma sont combinés.

2.1.1. IdentiFINDER

Un débitmètre l'identiFINDER, qui est un spectromètre portatif numérique, est utilisé et permet [2] :

- la recherche de sources de rayonnement ;
- l'identification automatique de radionucléides par analyse de spectres de rayonnements gamma ;
- la mesure de dose gamma et du débit de dose.

2.1.2. Chaîne spectrométrique

Le détecteur utilisé est le CZT/500(s), associé à un MCA166. C'est un détecteur de rayonnement gamma à base de cadmium, zinc et tellure. Le logiciel utilisé est le WinSPEC for Inspector. Ce logiciel ne permet de faire que l'étalonnage en énergie [3]. Un programme VBA application pour Excel a été utilisé pour le compléter afin de pouvoir automatiser l'étalonnage en efficacité et de mesurer par la suite l'activité. Une bibliothèque contenant les énergies des pics gamma et le rapport d'embranchement correspondant est disponible dans ce programme.

2.2. Etalonnage en énergie

L'étalonnage en énergie consiste à chercher une fonction linéaire [4] :

$$E = aC + b \quad (1)$$

avec E l'énergie du rayonnement gamma, C le numéro du canal correspondant, et a et b des constantes de régression à déterminer. Cette fonction est déjà intégrée dans Winspec for Inspector en utilisant les pics bien identifiés sur le spectre de la source d'Iode-131.

2.3. Etalonnage en efficacité

L'étalonnage en efficacité consiste à tracer la courbe d'efficacité (E) du détecteur à partir de la formule :

$$\varepsilon(E) = \frac{N_N}{Axt_c x P_\gamma} \quad (2) \quad [6]$$

E : énergie du rayonnement gamma émis par l'étalon (keV),

N : aire nette du pic d'absorption totale à l'énergie E (en nombre de coups),

A : activité du radionucléide (Bq),

t : Temps de comptage (s),

P : rapport d'embranchement ou probabilité d'émission gamma à l'énergie E (%).

La méthode des moindres carrés est utilisée pour déterminer l'équation de la courbe d'efficacité. Elle consiste à chercher une fonction polynôme de la forme :

$$(E) = a_0 + a_1 x E + a_2 x E^2 + a_3 x E^3 + \dots + a_n x E^n, \quad (3)$$

où les coefficients $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ sont à déterminer en utilisant les paires de données ($E, \varepsilon(E)$) [7]. Il s'agit alors de résoudre le problème de moindres carrés pour le système d'équations surdéterminé

$Ac=Y$

où A est la matrice composée par les fonctions de base et c la matrice colonne des paramètres à déterminer. La solution est donnée par le vecteur c qui satisfait les équations normales [7]

$$(A^T A)c = A^T Y$$

La fonction LINEX de VBA Excel permet de calculer directement ces coefficients. Le coefficient de détermination ainsi que l'erreur type sur l'efficacité sont aussi calculés.

Pour le calcul d'activité, l'efficacité ϵ_0 pour une énergie E_0 donnée est déterminée à partir de la courbe d'efficacité obtenue. La relation (4) suivante permet de calculer l'activité d'un radionucléide :

$$A_0 = \frac{N_N}{\epsilon_0 x t_c x P_\gamma} \tag{4}$$

A_0 : activité du radionucléide (Bq),

ϵ_0 : efficacité à l'énergie E_0 ,

L'aire nette N_N à l'énergie E_0 est donnée par le logiciel WinSPEC for Inspectors.

2.4. Montage

La source Iode-131 utilisée comme étalon est contenue dans un flacon cylindrique en verre. Le schéma du montage est donné dans la figure 1. L'activité de l'étalon qui a été mesurée par un activimètre, le 25 février 2020 à 15h 38 min, est de 1,69 mCi, c'est-à-dire 62,53 MBq. Cette valeur est prise comme activité initiale A_0 .



Figure 1: Schéma du montage.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Propriétés de l'Iode-131

C'est un radionucléide émetteur gamma et β^- . Il se désintègre en xénon-131 stable (^{131}Xe) par désintégration bêta et en émettant des rayonnements gamma, avec une période de 8,02 jours (voir Tableau 1).

Nuclide	Energy (keV)		Emission Probability per decay	
	E_γ	uncertainty	P_γ	uncertainty
53-I-131	80.1850	± 0.0019	0.02607	± 0.00027
	284.305	± 0.005	0.0606	± 0.0006
	364.489	± 0.005	0.812	± 0.008
	636.989	± 0.004	0.0726	± 0.0008
	722.911	± 0.005	0.01796	± 0.00020

Tableau 1 : Table des émissions gamma de l'Iode-131 [8].

(Source https://www-nds.iaea.org/xgamma_standards/genergies1.htm)

3.2 Mesure des débits de dose de l'Iode-131 à des distances différentes

Le 07 mars 2020 à 11h30, des mesures de débit de dose (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) ont été effectuées avec le débitmètre « IdentiFINDER », pour des distances entre la source de rayonnement gamma (Iode-131) et le débitmètre variant de 10 cm à 350 cm. Seize (16) mesures ont été effectuées pour chaque distance et la moyenne a été calculée pour représenter la valeur du débit (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Débits de dose mesurés par le débitmètre « IdentiFINDER ».

Distances (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250	300	350
Moyenne débit de dose $\mu\text{Sv.h}^{-1}$	80,65	30,13	15,24	9,11	6,03	4,92	3,57	3,17	2,23	1,81	0,88	0,54	0,38	0,31	0,25

Activité de l'Iode-131 à la date des mesures des débits de dose

On a considéré comme temps de référence le 25 février 2020 à 15h38min, quand l'activité de la source Iode-131 a été mesurée. L'activité de l'étalon est obtenue en appliquant la loi de décroissance radioactive :

$$A(t) = A_0 e^{-\ln 2 t / T} \quad (5)$$

Ainsi, au 7 mars 2020 à 11h 30 min, date de mesure, c'est-à-dire après 10,8278 jours, la valeur de l'activité est de :

$$A(10,8278) = 24,5304 \text{ MBq ou } 0,662983 \text{ mCi}$$

3.3 Calculs des débits de dose à 1 mètre de la source, en utilisant le terme source.

A 1 mètre de la source, le débit de dose est donné par le terme source [9] :

$$D = 1,3 \cdot 10^{-10} \cdot A \cdot E \cdot \frac{I}{100} \quad (6)$$

Avec :

D : Débit de dose absorbé (mGy.h⁻¹),

A : activité (Bq) d'une source ?

E : énergie de rayonnement émis par la source (MeV),

I : intensité (%).

Pour chaque énergie de rayonnement gamma de l'Iode-131, en utilisant l'équation 6, on a le tableau 3 :

Tableau 3: Résultat des calculs des débits de dose à 1 mètre de la source pour chaque énergie du rayonnement gamma de l'Iode-131 à une activité de 24530400 Bq.

Energie (MeV)	Intensité (%)	Activité de la source (Bq)	Débit de dose à 1mètre de la source (μSv.h ⁻¹)
0,364	81,200	24530400	0,944
0,284	6,060	24530400	0,055
0,637	7,260	24530400	0,147
0,723	1,796	24530400	0,041
0,080	2,607	24530400	0,007
TOTAL			1,194

3.4 Débit de dose à des distances différentes pour un modèle ponctuel de la source

En appliquant le modèle de l'inverse carré de la distance au débit de dose de référence à 1 mètre, on obtient les résultats qui sont représentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Débits de dose absorbée de l'Iode-131, calculés en fonction de la distance.

Distance (cm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Débit de dose (μSv.h⁻¹)	119,4	29,86	13,27	7,47	4,78	3,32	2,44	1,87	1,47	1,194
Distance (cm)	150	200	250	300	350					
Débit de dose (μSv.h⁻¹)	0,53	0,298	0,191	0,132	0,097					

3.5 Distance à partir de laquelle on peut considérer la source d'iode-131 comme ponctuelle

Les résidus, calculés à partir de la différence entre les mesures par Identifinder à celles obtenues par le modèle, sont exprimés par la formule 7 suivante :

$$\text{Résidu} = \text{Valeur modèle} - \text{valeur observée} \quad (7)$$

Les résidus normalisés ou *studentisés* sont obtenus en divisant les résidus par leur écart-type.

$$\text{Résidu studentisé} = \frac{\text{Résidu}}{\text{Ecart Type résidu}} \quad (8)$$

Points aberrants

On définit un point aberrant comme une observation pour laquelle le résidu est particulièrement élevé. Il est généralement accepté que les observations dont le résidu studentisé est supérieur à 3 peuvent être considérées

comme des points aberrants [10]. On peut alors dire que le point n'obéit pas à la relation qui a été établie par le modèle.

Le **Tableau 5** donne les débits de dose mesurés expérimentalement par le débitmètre IdentiFINDER et les débits de dose obtenus par la théorie de l'inverse carré de la distance.

Distance (cm)	IdentiFINDER (µSv/h)	Loi Inverse carré (µSv/h)	Résidus	Résidus Studentisés
10	80,65	119,444	-38,794	-3,78543014
20	30,13	29,861	0,269	0,02624841
30	15,24	13,271	1,969	0,19213053
40	9,11	7,465	1,645	0,16051535
50	6,03	4,777	1,253	0,12226489
60	4,92	3,317	1,603	0,15641709
70	3,5	2,437	1,063	0,10372512
80	3,17	1,866	1,304	0,12724135
90	2,23	1,474	0,756	0,07376876
100	1,81	1,194	0,616	0,06010788
150	0,89	0,53	0,36	0,03512798
200	0,54	0,298	0,242	0,02361381
250	0,34	0,191	0,149	0,01453908
300	0,31	0,132	0,178	0,01736883
350	0,25	0,097	0,153	0,01492939

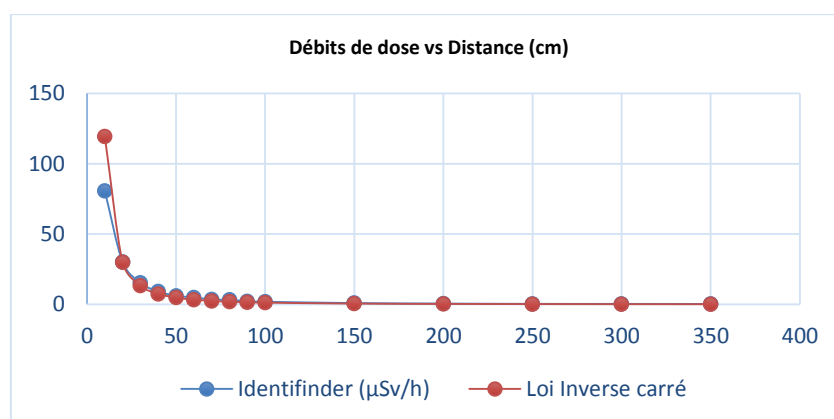


Figure 2: Courbes qui représentent les débits de dose mesurés par le débitmètre IdentiFINDER et les résultats obtenus par le modèle.

Interprétation

Les mesures faites par l'IdentiFINDER collent bien à la théorie d'une source ponctuelle à partir d'une distance de 20 cm. La représentation des boîtes à moustaches des résidus normalisés illustre la présence de la valeur aberrante à 10 cm indiquée par l'astérisque sur la figure 3. Lorsqu'on enlève ce point de la série de données, aucune valeur aberrante n'est plus détectée. Il est important de noter que ce test ne nécessite pas de vérifier la normalité de la distribution [11]. De plus, les valeurs des résidus et résidus studentisés pour la distance 10 cm avec un résidu studentisé supérieur à 3, confirme que le point correspondant n'obéit pas au modèle.

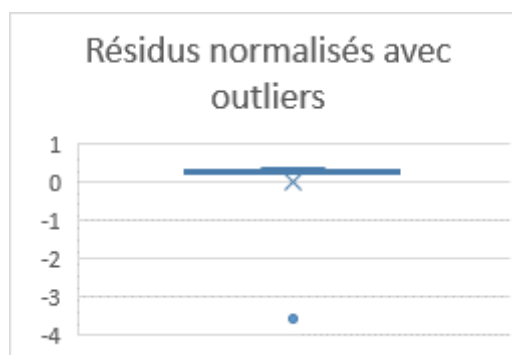


Figure 3 : Boîtes à moustaches des résidus studentisés avec valeur aberrante -3,6 qui correspond à la distance 10 cm.

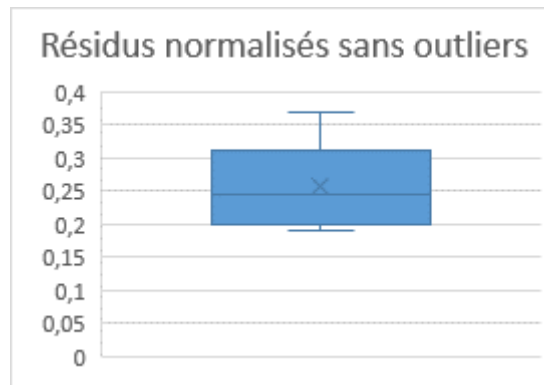


Figure 4 : Boites à moustaches des résidus studentisés sans valeur aberrante après élimination de la valeur $-3,6$ qui correspond à la distance 10 cm.

En se référant aux boites à moustaches et aux valeurs des résidus et résidus studentisés, on peut donc considérer la source étalon (Iode-131) comme ponctuelle à partir d’une distance de 20 cm, si on utilise le débitmètre « IdentiFINDER ». Par la suite, la distance de 1 mètre est utilisée pour les mesures afin d’être dans les mêmes conditions de validité du terme source.

3.6 Courbe d’étalonnage en efficacité

Le logiciel WinSPEC for Inspector ne permet pas de faire directement l’étalonnage en efficacité. Par contre, il peut être utilisé pour déterminer l’aire nette d’un pic.

Le 26 février à 12h46mn, trois mesures spectrométriques différentes ont été effectuées. L’un des spectres obtenus est représenté sur la figure 5. Le temps d’acquisition est de 300 s.

On a ainsi déterminé par le WinSPEC for Inspector l’aire nette de chaque pic de l’Iode-131 qui correspond respectivement à l’énergie 284.405keV, 364.489keV, 636.989keV et 722.911keV. Pour les quatre Régions d’Intérêt, les moyennes de l’aire nette de chaque pic et celles de l’efficacité sont représentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Moyenne de l’aire nette des pics de l’Iode-131 visible dans les spectres et valeurs de l’efficacité.

Région d’intérêt	264-292	302-378	614-650	714-726
Energie du pic (keV)	284,305	364,489	636,989	722,911
Aire nette (nb de coups)	668	8121	108	5
Activité (Bq)	57927300	57927300	57927300	57927300
Probabilité (%)	6,06	81,2	7,26	1,79
efficacité	$6,343 \cdot 10^{-09}$	$5,755 \cdot 10^{-09}$	$8,613 \cdot 10^{-10}$	$1,815 \cdot 10^{-10}$

On a utilisé la formule 2 pour tracer la courbe d’étalonnage en efficacité.

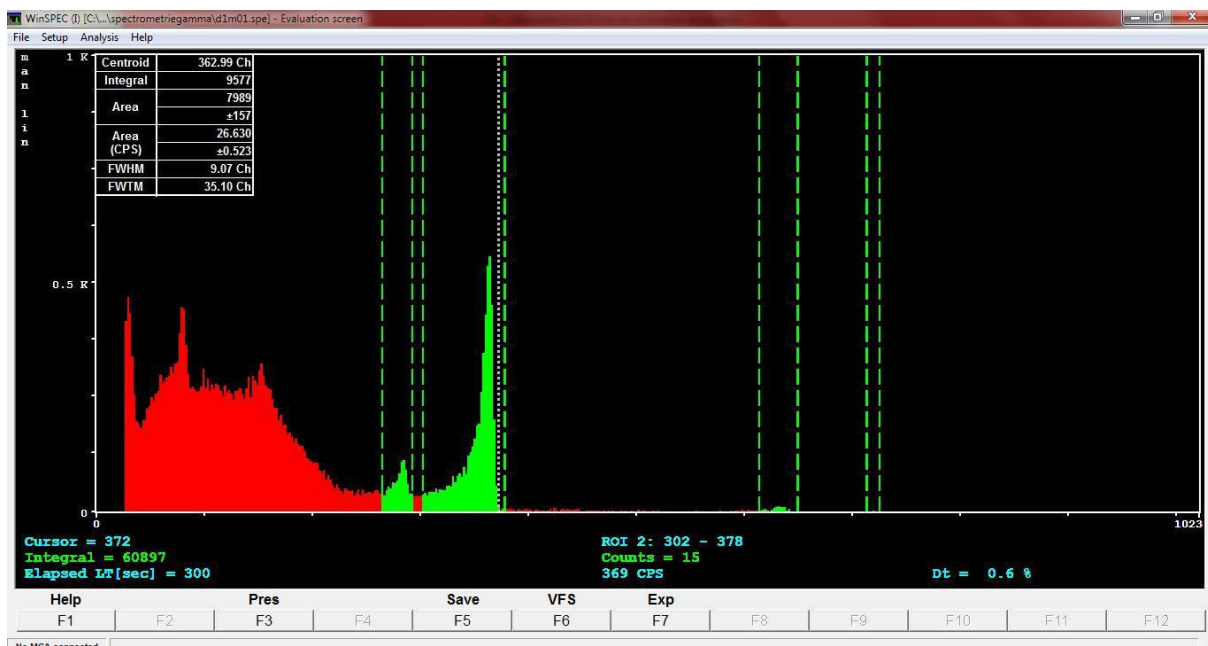


Figure 5: Spectre obtenu par le logiciel WinSPEC for inspectors.

Un programme informatique utilisant Visual Basic Application pour Excel a été conçu et développé afin de compléter WinSpec for Inspector pour l'étalonnage en efficacité. Ce programme permet de calculer par la méthode des moindres carrés les coefficients du polynôme représentant le modèle mathématique pour la courbe d'étalonnage (Voir Figure 6). Il permet par la suite de faire les calculs d'activité pour la mesure d'échantillons présentant des caractéristiques physiques similaires et pour des géométries de mesures semblables.

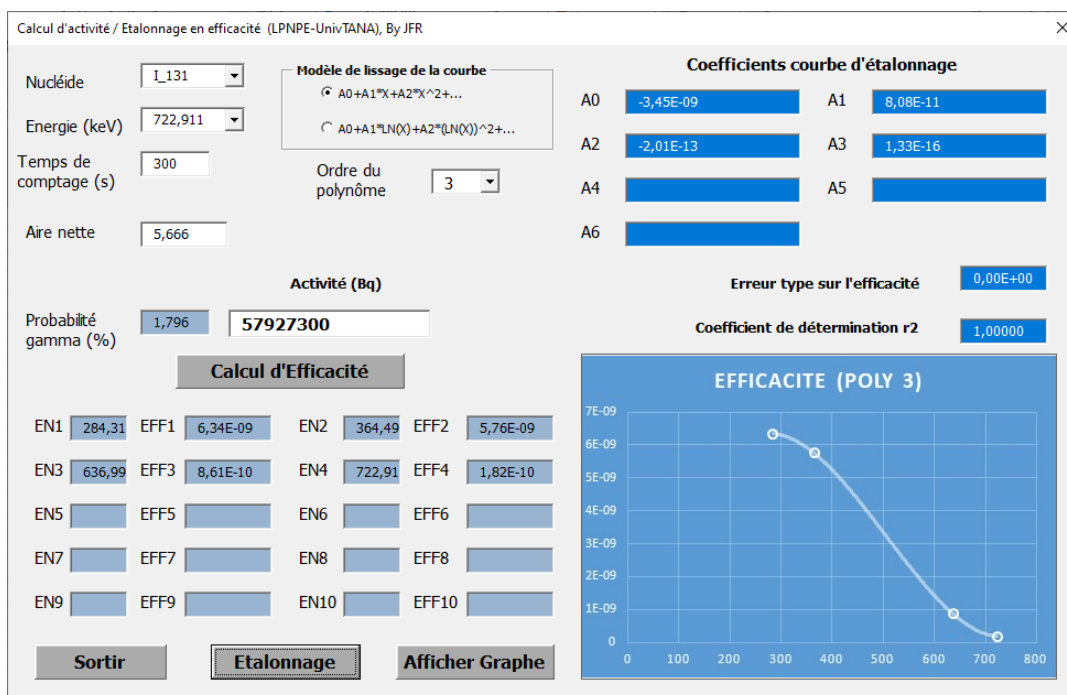


Figure 6: Formulaire VBA Excel pour le calcul et l'affichage de la courbe d'étalonnage en efficacité.

Dans la figure 6, les coefficients de la courbe d'étalonnage pour un polynôme d'ordre 3 sont calculés et affichés. Ces coefficients sont utilisés pour le calcul ultérieur d'activité pour une source ponctuelle et dans la gamme d'énergie entre 100 et 800 keV.

3.7 Vérification de la courbe d'étalonnage.

Le 12 mars 2020 à 11h34mn, l'activité A_0 de l'Iode-131 a été déterminé en utilisant l'équation de la courbe d'étalonnage en efficacité (E_0) qui correspond à l'énergie $E_0=284,305\text{keV}$. Ensuite, on a comparé A_0 avec celle qui est obtenue en appliquant la loi de décroissance radioactive. Le logiciel WinSPEC For Inspectors a permis de déterminer l'aire nette NN du pic qui correspond à l'énergie 284.305keV de l'Iode-131, et qui est de 172 ± 34 coups.

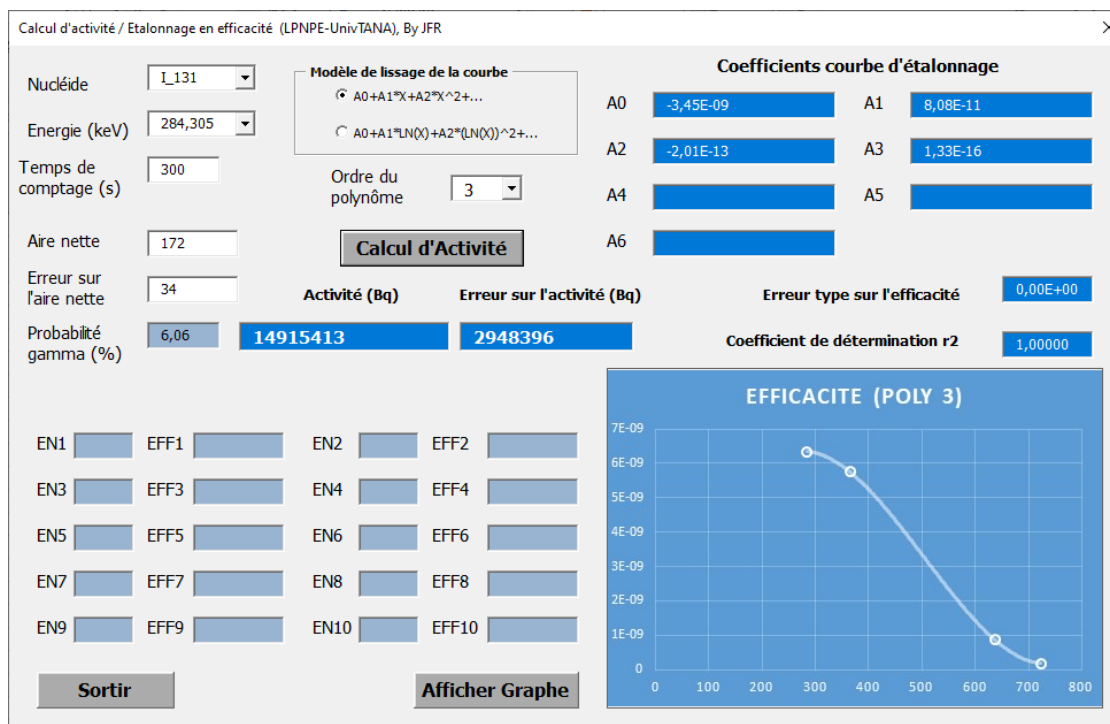


Figure 7: Formulaire VBA Excel pour le calcul et l'affichage de l'activité.

Un second formulaire VBA Excel (figure7) permet d'utiliser l'équation de la courbe d'étalonnage en efficacité précédemment déterminée afin de calculer l'activité de l'Iode-131. Dans cette étude, cette activité est de $14,92 \pm 2,95$ MBq pour le 12 mars 2020 à 11h34mn. Or, le calcul de l'activité de l'Iode-131 est de 15,91 MBq en considérant la loi de décroissance radioactive. En tenant en compte des incertitudes de mesure, on peut conclure qu'il y a correspondance entre la valeur déterminée par la courbe d'étalonnage et celle obtenue en utilisant la loi de décroissance radioactive.

3.8 Vérification des débits de dose

Le tableau 7 et la figure 8 montrent les activités de l'Iode-131 en fonction du débit de dose mesuré par IdentiFinder à 1 mètre, à différentes dates.

Tableau 7 : Activité de l'Iode-131 (MBq) en fonction du débit de dose ($\mu\text{Sv/h}$).

Date et heure	Moyenne débits de dose ($\mu\text{Sv/h}$)	Activité (MBq)
26/02/2020-12h46mn	3,22	57,948
27/02/2020-11h30mn	2,90	53,394
03/03/2020-11h47mn	1,89	34,625
07/03/2020-14h12mn	1,19	24,293
12/03/2020-11h40mn	0,70	15,914

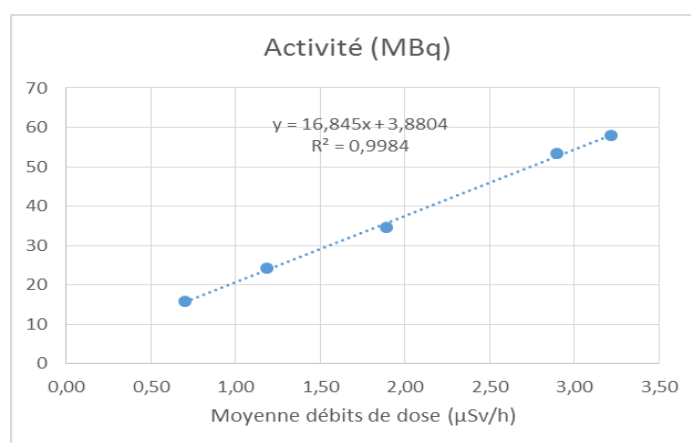


Figure 9 : Débits de dose mesurés par IdentiFinder à 1 mètre en fonction du temps.

L'équation obtenue est :

$$\dot{D} = 3,5668 \cdot e^{-10^{-6}t} \quad (11)$$

Au temps initial $t=0$, on a $\dot{D} = 3,5668 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$.

Ainsi, les 2 valeurs $3,479 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ et $3,5668 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ obtenues en utilisant les formules 10 et 11 du débit de doses estimées par calcul au temps initial concordent à 2% près.

4. CONCLUSION

Nous avons déterminé l'efficacité du détecteur CZT 500s en utilisant l'Iode-131 de forme physique non ponctuelle. Un outil de calcul de coefficients d'étalonnage en efficacité a été conçu et développé pour compléter le logiciel WinSpec for Inspector. La méthode de moindres carrés a été utilisée. Cet outil permet également de faire des calculs d'activité avec précision. Une conversion de débits de dose en activité, et vice versa, peut être effectuée.

En utilisant IdentiFinder, l'expérience menée lors de ce travail a prouvé que cette source radioactive peut être considérée comme ponctuelle à partir de 20 cm, et donc a fortiori à une distance de 1m. L'efficacité du détecteur CZT 500s varie en fonction de l'énergie du rayonnement gamma qu'il détecte. Elle décroît en fonction de cette énergie. Cette efficacité est maximale pour les rayonnements gamma d'énergie environ 200keV . Les valeurs de débits de dose calculées en utilisant respectivement la transformation activité-dose et la décroissance du débit de dose en fonction du temps concordent à 2% près.

En termes de contrainte, les études réalisées ont été limitées à l'utilisation d'une source considérée comme ponctuelle placée à 1 mètre du détecteur. En ce qui concerne les sources étendues, le coefficient d'étalonnage dépend de la

géométrie et de la nature de la source. Ainsi, pour qu'on puisse réaliser une analyse par spectrométrie gamma plus complète dans le Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique de l'Environnement (LPNPE), Mention Physique et Applications, Domaine Science et Technologies de l'Université d'Antananarivo, Madagascar, l'utilisation des matériaux de référence étendus à base de substances radioactives naturelles peut être considérée.

5. REFERENCES

- [1] Rakotoarimanana Andritiana Giscard, Etude de l'efficacité du détecteur CZT500s du Laboratoire LPNPE en utilisant une source ponctuelle d'Iode-131. M.Sc, Université d'Antananarivo. -2020. Available: <http://biblio.univ-antananarivo.mg/theses2/rechercheAction.action;jsessionid=4A9D28BC235CF939B70AF2D04F7E55F1>
- [2] identiFINDER ; User's Manual ; target systemelectronic gmbh. Available: <https://manualzz.com/doc/7025785/identifinder---nukeworker.com>
- [3] Ratovonjanahary et al., ; 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), June-August, 2015, pp. 209-214. Available: <http://iasir.net/AIJRSTEMpapers/AIJRSTEM15-601.pdf>
- [4] Gerald W. Recktenwald, Least Squares Fitting of Data to a Curve, Department of Mechanical Engineering, Portland State University, gerry@me.pdx.edu. Available: <https://web.cecs.pdx.edu/~gerry/nmm/course/slides/ch09Slides.pdf>
- [5] Daniela Pittauerova, Bernd Hettwig Helmut, W. Fischer; Mathematical efficiency calibration in gamma spectrometry for analysis of natural and fallout radionuclides in sediments; University of Bremen, Institute for Environmental Physics, Germany. Available: http://www.nks.org/download/RADIOANALYSIS2013/rw23pittauerova_1.pdf
- [6] I.A.A. Inour, H. Wagiran, N. Ibrahim, S. Hamzah, W. B. Siong, M. S. Elias, New approach for calibration the efficiency of HpGe detectors. AIP Conference Proceedings 1584, 38 (2014); Available: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4866101>
- [7] Gerald Recktenwald, A Curve-Fitting Cookbook for use with the NMM Toolbox, October 17, 2000, Available: https://www.academia.edu/20460390/A_Curve-Fitting_Cookbook_for_use_with_the_NMM_Toolbox
- [8] International Atomic Energy Agency, Recommended Decay Data, High Energy Gamma Ray Standards and Angular Correlation Coefficients, Volume 1, Vienna 2007. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1287_Vol1_web.pdf
- [9] Marc AMMERICH ; Le portail de la RP pratique et opérationnelle ; DOC-FO-6_3 Version du : 28 mars 2018 Available: https://www.rpcirkus.org/images/pdf/DOC-FO/DOC-FO-6_3_Protection_contre_l_exposition_externe.pdf
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Régression_linéaire
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Box_plot



Cite this article: Justin Francis Ratovonjanahary, Naivo Rabesiranana, Haritiana Lucette Ralaiarisoa, A. Giscard Rakotoarimanana, Elise Octavie Rasoazanany, A. Rasata Ravelo, Roland Raboanary et Justinien Franck Ratovonjanahary. DEVELOPPEMENT DE METHODE POUR L'ETALONNAGE EN EFFICACITE D'UN DETECTEUR CZT 500s EN UTILISANT UNE SOURCE D'IODE-131, SOUS L'APPROXIMATION QUASI-PONCTUELLE. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2021; 14(1): 1-9.

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/>