

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Saad Dahleb - Blida1
Faculté de Physique



MEMOIRE DE MASTER

FILIERE : Physique

OPTION : Physique Des Rayonnements

Thème :

Evaluation de l'efficacité du scan automatique par le gamma scanning
pour la détection des défauts artificiels dans une colonne.

Présenté par :

- Bayou WALAA
- Khelifa MERIEM

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2025

Jury de soutenance :

YANALLAH Abdelkader	MCB	USDB	Président
BOUKEFFOUSSA Khelifa	Chercheur principal	CRNA	Examineur
BOUNEMIA Louisa	Chercheur principal	CRNA	Encadreur
KHELIFI Rachid	Professeur	USDB	Co-Encadreur

الملخص:

يقدم المشروع دراسة لتقنية "المسح الإشعاعي غاما" الأوتوماتيكية وتطبيقها في المختبر. في هذا الإطار، قمنا بإجراء عمليات مسح باستخدام مصدر مشع محكم الإغلاق ينبعث منه إشعاع غاما، وهو السيزيوم-137، وكاشف بلوري NaI(Tl)، ورافعة أوتوماتيكية على عمود نموذجي. أجرينا مسحًا مرجعيًا تلاه مسحات مع إدخال عيوب في العمود. الهدف الرئيسي من هذه التجارب هو تشخيص الحالة الداخلية للعمود من خلال تحليل تخفيف إشعاع الغاما في نقاط مختلفة على طولها، وذلك بفضل أتمتة النظام.

تُظهر نتائج هذه الدراسة أن هذه التقنية الأوتوماتيكية تسمح بتحديد العيوب الموجودة في الأعمدة بفعالية دون الحاجة إلى فكها، وهو ما يُعرف بالفحص غير المدمر (NDT). وبالتالي، تشكل هذه التقنية أداة ثمينة للتشخيص السريع والموثوق للمعدات الصناعية.

كلمات مفتاحية: المسح الإشعاعي غاما، التوهين، الأتمتة، الفحص غير المدمر

Abstract:

The project presents a study of the automatic "Gamma scanning" technique and its application in the laboratory. In this context, we performed scans using a sealed gamma radiation source, Cesium-137, a NaI (Tl) scintillation detector, and an automatic elevator on a standard column. We conducted a reference scan followed by scans with introduced defects on the column. The main objective of these experiments is to diagnose the internal condition of the column by analyzing the attenuation of gamma radiation at various points along it, thanks to the automation of the system.

The results of this study show that this automated technique effectively identifies anomalies present in the columns without requiring their disassembly, corresponding to nondestructive testing (NDT). Thus, it constitutes a valuable tool for the rapid and reliable diagnosis of industrial equipment.

Keywords: Gamma scanning, Attenuation, Automation, NDT.

Résumé :

Le projet présente une étude de la technique automatique de « Gamma scanning » et de son application en laboratoire. Dans ce cadre, nous avons réalisé des scans à l'aide d'une source scellée émettrice de rayonnements gamma, Césium-137, d'un détecteur scintillateur NaI (Tl) et d'un élévateur automatique sur une colonne type. Nous avons effectué un scan de référence, suivi de scans avec l'introduction de défauts sur la colonne. L'objectif principal de ces expériences est de diagnostiquer l'état interne de la colonne en analysant l'atténuation du rayonnement gamma à différents points le long de celle-ci, grâce à l'automatisation du système.

Les résultats de cette étude montrent que cette technique automatisée permet d'identifier efficacement les anomalies présentes dans les colonnes sans nécessiter leur démontage, ce qui correspond à un contrôle non destructif (CND). Elle constitue ainsi un outil précieux pour le diagnostic rapide et fiable des équipements industriels.

Mots clés : Gamma scanning, Atténuation, Automatisation, CND

Dédicace

Moi, Walâa, je prends ces lignes pour exprimer ma propre dédicace à...

À **ma mère, Hadjira**, ma héroïne, mon refuge, mon idole.

Tu as tout sacrifié pour moi, avec un amour et une force inébranlable, tu as tout donné pour que je puisse avancer, portant mes rêves comme s'ils étaient les tiens.

Chaque ligne de ce mémoire est un hommage à ton courage et à ton amour inépuisable.

À **mon père, Saddek**, que la vie m'a enlevé trop tôt, mais dont la mémoire reste gravée dans mon cœur et continue de m'inspirer.

Ton souvenir m'a accompagné silencieusement tout au long de ce parcours.

Ce travail, je l'écris aussi pour toi, avec la nostalgie de ce qu'on n'a pas pu vivre ensemble.

À **mes chères sœurs, Kaouther, Kenza et Lyna**, qui m'ont entouré de leur tendresse, de leur écoute, leur amour, de leur soutien indéfectible sans faille.

Vous m'avez appris à tenir debout, à sourire malgré les tempêtes, et à croire que tout est possible quand on est bien entouré. Ce que je suis, je vous le dois en grande partie.

Merci pour votre présence même dans les moments les plus difficiles, vos encouragements, et votre foi en moi, même quand la mienne vacillait.

À **mes petits neveux, Chihab, Ryhem et Mélyne**, sources intarissables de joie et de lumière dans ma vie.

Ces éclats de rire et d'innocence qui illuminent mes journées.

Vous êtes une source intarissable de joie, d'inspiration et de lumière dans ma vie, bien plus que vous ne le saurez jamais.

À **mon âme ami, Walid**, notre relation fidèle m'a porté et motivé tout au long de ce parcours. Compagnon de route, confident, force tranquille dans les tempêtes.

Ta présence a été un pilier, ta connaissance un trésor. Merci d'avoir été là, simplement.

À **mon enseignant, Fayçal**, non seulement en tant qu'enseignant, mais surtout en tant que guide, source d'inspiration et exemple de rigueur et d'engagement.

Vous avez su faire naître en moi le goût de l'effort, le sens du détail et l'envie de toujours aller plus loin, ce mémoire est aussi le reflet de ce que vous avez semé en moi : exigence, méthode et passion.

À **mon binôme, Meriem**, pour la collaboration harmonieuse, l'investissement constant, l'engagement, le sérieux et l'esprit d'équipe dont elle a fait preuve, tout au long de ce travail.

Et à **mes proches**, pour leur soutien constant, leur patience et leur amour tout au long de ce parcours.

Ce mémoire est le fruit d'un parcours personnel, mais il est nourri de tout l'amour, le soutien et les liens qui m'entourent.

À vous, de tout cœur — merci.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de mes efforts, à ceux qui occupent une place unique dans mon cœur :

À mes chers parents, pour leur amour infini, leur patience et leur soutien dans chaque étape de ma vie.

À mon grand-père Dadi, mon héros, mon repère, celui qui continue de vivre à travers mes souvenirs et mon cœur... Allah yarahmou.

À ma douce princesse Sidra, source de lumière et de joie, qui embellit ma vie par sa simple présence.

À toute ma famille, pour leur présence, leurs encouragements et leur affection.

À ma binôme Walaa, pour ta présence, ta patience et ta précieuse collaboration tout au long de ce parcours.

À mes amis, pour les moments partagés, le soutien dans les moments de doute, et l'amitié sincère

Avec toute ma gratitude et mon affection

Khelifa Meriem

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tout d'abord, **Mme. Bounemia Louisa**, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, et son accompagnement bienveillant tout au long de ce travail. Son expertise et sa rigueur scientifique ont été déterminants dans l'orientation et la qualité de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à **l'ensemble du corps enseignant** et administratif du département de **Physique**, de **l'université de Blida1**, pour la qualité de l'enseignement dispensé et l'environnement favorable à l'apprentissage et à la recherche.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux **membres du jury** qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce travail. Leur regard critique et leurs remarques constructives constituent pour moi une source précieuse d'apprentissage et d'amélioration.

Merci à vous pour l'attention portée à mon travail et pour l'enrichissement intellectuel que votre retour m'a apporté.

À **notre promotion**, avec qui nous avons partagé des années riches en apprentissages, en défis et en souvenirs inoubliables, nous gardons en mémoire ces années de partage, de travail et de complicité, qui ont marqué nos parcours universitaires.

Enfin, nous souhaitons remercier **nos familles, nos amis et nos proches** pour leur soutien moral, leur patience et leur encouragement, qui nous ont permis d'aller au bout de cette étape avec détermination.

À toutes et à tous, merci.

Liste des figures :

CHAPITRE I : Partie Théorique

Figure I.1 : Effet Photoélectrique.....	3
Figure I.2: Diffusion Compton.....	4
Figure I.3: Création des paires	5
Figure I.4 : Variations des coefficients d'atténuation massiques pour l'iodure de sodium (NaI).....	6
Figure I.5: Organigramme de la chaine de détection	8
Figure I.6 : Schéma explicatif du fonctionnement d'un NaI(Tl)	8
Figure I.7 : Schéma descriptif d'un scan de colonne par rayonnements gamma.....	10
Figure I.8 : Exemple d'un profil de scan gamma de la colonne	11

CHAPITRE II : Matériels et méthode

Figure II.1 : Dispositif expérimental utilisé au niveau de laboratoire CRNA.....	15
Figure II.2: Détecteur NaI (Tl) sur le support.....	18
Figure II.3 : Compteur d'impulsions (Ratemeter)	18
Figure II.4 : L'élévateur automatique de la source et détecteur	19
Figure II.5 : Un exemple d'affichage du profil avec le logiciel « column scanning software »	20
Figure II.6: Les dimensions de la colonne avec les plateaux(a). La forme d'un plateau rempli(b). Une coupe de la colonne par simulation Sketch Up(c).....	20
Figure II.7 : Position X (a). Position Y (b)	23

CHAPITRE III : Résultats et discussion

Figure III.1 : Schéma de la manipulation sans colonne.....	27
Figure III.2 : Variations de l'intensité des rayonnements dans une colonne vide	29
FigureIII.3 : Profil du scan gamma de référence suivant X.....	30
FigureIII.4 : Comparaison entre les graphes de référence et celui de la colonne vide.....	30
FigureIII.5 : Profil du scan gamma de référence suivant Y.....	31
Figure III.6 : Profil du scan gamma du défaut suivant X avec le graphe de référence.....	33
FigureIII.7 : Confrontation du scan à défaut avec le schéma en 3D.....	34
FigureIII.8 : Profil du scan gamma du défaut suivant Y avec le tracé de la référence	34
FigureIII.9 : Profil du scan du défaut avec le profil de référence.....	35
Figure III.10 : Confrontation du scan à défaut avec le schéma en 3D.....	36
FigureIII.11 : Tracé du profil gamma du problème.....	37
FigureIII.12 : Comparaison entre le graphe du problème avec le profil de la référence	38
FigureIII.13 : Tracé du scan du problème en variant la haute tension	39
FigureIII.14 : Comparaison entre les profils du scan de défaut en gardant et en variant la haute tension	39
FigureIII.15 : Confrontation du scan à défaut avec le schéma en 3D.....	40

Liste des tableaux

CHAPITRE II : Matériels et méthode

Tableau II.1 : Les dimensions de chaque élément..... 21

Tableau II.2 : Les dimensions de la zone de la colonne soumise au scan..... 22

CHAPITRE III : Résultats et discussion

TableauIII.1 : Les résultats de variation la haute tension 28

TableauIII.2 : Les mesures du bruit de fond 28

TableauIII.3 : Les conditions initiales du profil de scan..... 31

Table des matières

Résumé

Dédicace

Remerciements

Liste des figures

Liste de tableaux

Introduction Générale

Chapitre 1 : Partie théorique

A.1 Interaction photon-matière.....	3
a Effet photoélectrique	3
b Diffusion Compton.....	4
c Création des paires	4
A.2 Atténuation des photons dans la matière	5
a Détection des rayonnements gamma	6
• Les détecteurs à scintillation	6
b Chaîne de détection gamma	7
• Détecteur NaI(Tl)	8
• Préamplificateur	8
• Amplificateur	9
• Codeur (ADC).....	9
• Compteur d'impulsions	9
 B.1 La méthode Gamma Scanning	9
B.2 Principe de la technique	10
B.3 Développement de la technique Gamma Scanning à travers le temps	11
B.4 Domaines d'applications du Gamma Scanning	11
a Travaux précédents à l'échelle industriel de la technique	11
b Avantages et limite du Gamma Scanning.....	12
B.5 Radioprotection	13

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

II.1 Matériels utilisés.....	15
II.1.1 Source radioactive	15
II.1.2 Chaîne d'acquisition.....	17
a Détecteur	17
b Compteur d'impulsions	18
c Moteur d'automatisme	19
d Logiciel column scan.....	19
e Colonne	20
II.1.3 Déroulement de l'expérience.....	21
a Mesures initiales	21
b Scan de référence	22
c Scan à défauts.....	23

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Introduction	26
III.1 Calcul d'erreurs.....	26
III.2 Les mesures initiales	27
• Scan de la colonne vide	29
III.3 Scan de la colonne de référence	31
III.4 Scan de la colonne présentant un défaut.....	33
III.4.1 Scan de la colonne avec plateau incliné.....	33
III.4.2 Scan de la colonne avec plateaux superposés.....	35
III.4.3 Colonne avec deux plateaux inclinés simultanément.....	37
Conclusion Générale	42
Bibliographie.....	45

INTRODUCTION GENERALE

Les raffineries du monde entier ont reconnu l'intérêt de l'utilité de la technique gamma scanning pour examiner les problèmes des colonnes de distillation dont les industries chimiques et pétrochimiques sont les principaux bénéficiaires, car les colonnes de distillation sont l'un des composants de base. Le gamma scanning est devenu un instrument de diagnostic populaire pour les colonnes de distillation[1]. Il permet d'obtenir une vision plus précise des conditions de production au sein d'un réservoir de procédé[2].

Cet outil de diagnostic intense utilisé depuis environ 40 ans est efficace, rapide et économique[2].

Le balayage s'effectue habituellement avec une source gamma mono-énergétique positionnée en diagonale et à l'opposé par rapport au détecteur. La source et le détecteur seront élevés au long de la zone à scanner à l'aide d'un élévateur automatique en mesurant le rayonnement à différentes hauteurs. La mesure de rayonnement, tracée en fonction du pas, crée un profil gamma de la colonne qui est ensuite lié aux composants internes de la colonne afin d'analyser son état[1].

Ce travail de recherche porte sur l'étude et l'application de la technique automatique de gamma scanning à l'échelle laboratoire (au centre de recherche nucléaire d'Alger, CRNA). L'objectif principal est de réaliser des scans à petite échelle afin de mieux comprendre cette méthode, tout en mettant en évidence l'intérêt de l'automatisation dans le domaine de l'analyse non destructive. L'intégration de l'automatisme permet d'améliorer la précision, la répétabilité et l'efficacité des mesures, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour le contrôle et la surveillance des matériaux sans altération.

Dans la première partie du mémoire, des notions concernant l'interaction des rayonnements avec la matière et le processus de détection de ces rayonnements par deux méthodes, la spectrométrie gamma et le comptage simple, sont fournies ainsi que le principe de la technique gamma scanning et son développement.

La deuxième partie traite les matériels utilisés pour effectuer les scans sur une colonne (un tube métallique contenant des étages remplis) ainsi que du déroulement de l'expérience.

La troisième partie présente les résultats des expériences réalisées au laboratoire, y intégrant les scans de référence, les scans à défauts et le tracé du rapport d'atténuation, qui seront analysés et interprétés dans ce chapitre.

.

Chapitre 1 :

PARTIE THEORIQUE

A.1 Interaction photon-matière

Lorsqu'un photon pénètre un milieu, il a une certaine probabilité d'interagir avec les électrons atomiques de ce milieu ou avec son noyau, qui dépend de l'énergie de ce photon incident[3]. Quoiqu'il y ait un large nombre d'interactions possibles connues pour les rayons gamma avec la matière qui peuvent avoir lieu, dont elles sont classées en deux catégories : en premier, les trois majeures interactions qui sont l'effet photo-électrique, la diffusion Compton et la création des paires. En second lieu ; on a les interactions les moins importantes qui peuvent également se produire : la diffusion Rayleigh (avec un électron lié) et la diffusion Thomson (avec un électron libre)[4].

Toutes ces interactions mènent à un transfert partiel ou complet de l'énergie du rayon gamma à l'énergie de l'électron.

a. Effet photo électrique

Dans l'effet photo électrique, le photon interagit avec l'atome, lui cède totalement son énergie à un électron des couches profondes qui est éjecté de l'atome (**Figure I.1**), l'électron éjecté est appelé photoélectron, émis avec une énergie cinétique E_e donnée par [3] :

$$E_e = E_\gamma - E_l \quad (I.1)$$

Avec E_γ : l'Energie du photon incident

E_l : l'Energie de liaison d'électron

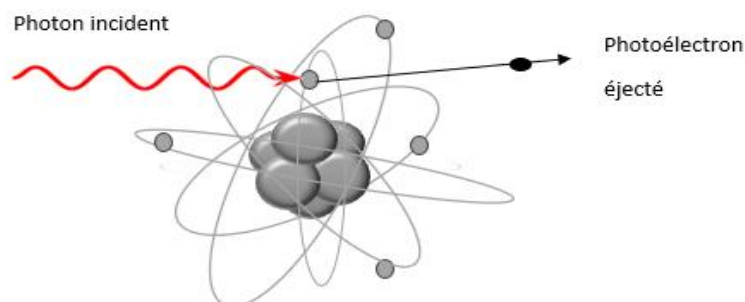


Figure I.1 : Effet Photoélectrique [5]

Suite à l'éjection du photoélectron, un réarrangement du cortège électronique, un électron d'une couche supérieure vient occuper l'orbite vacante, ceci peut se traduire par l'émission d'un ou de plusieurs rayonnements X Fluorescence, soit par l'émission d'un électron Auger [6]

La section efficace σ_γ dépend du numéro atomique Z de la cible et l'énergie du photon incident E_γ , elle est définie par [6] :

$$\sigma_\gamma \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (I.2)$$

Avec $4 \leq n \leq 5$

Le seuil d'énergie d'un photon pour une section efficace est l'énergie minimale nécessaire pour qu'un photon interagisse avec un atome et en éjecte un électron. En dessous de cette énergie de seuil, la probabilité d'interaction (section efficace) est nulle.

b. Diffusion Compton

L'effet Compton est une diffusion élastique entre un photon incident et un électron faiblement lié à l'atome, considéré libre et en repos car son énergie est négligeable devant l'énergie du photon, cette énergie est partagée entre le photon diffusé et l'électron éjecté[7].

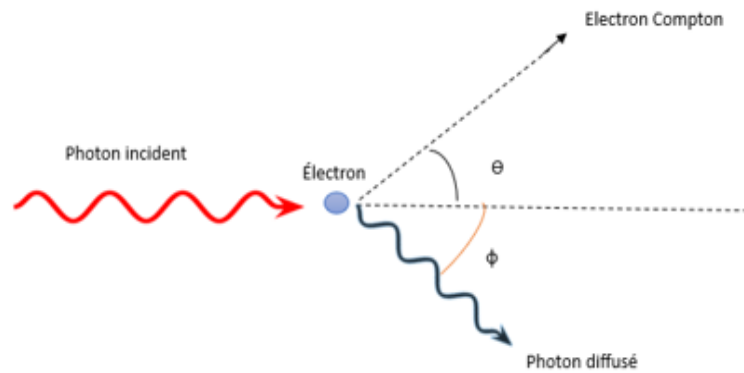


Figure I.2: Diffusion Compton [8].

L'Energie du photon diffusé E'_γ est donnée par la relation suivante :

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (I.3)$$

Avec E_γ : énergie du photon incident

$m_0 c^2$: énergie de l'électron au repos

c. Création des paires (Matérialisation)

Ce phénomène consiste à la création d'une paire électron-positron quand un photon γ pénètre au voisinage du champ coulombien du noyau où le photon disparaît et son énergie est utilisée pour créer la paire. Ce processus n'est possible que si l'énergie du photon est supérieure à deux fois la masse de l'électron au repos soit 1,022MeV. Il génère des rayonnements secondaires ;

un électron et un positron dans deux directions opposées. A la fin du ralentissement, le positron s'annihile avec un électron au repos du milieu, en émettant deux photons d'annihilation d'énergie de 511 KeV[9] . D'après la conservation de l'énergie :

$$E_\gamma = T_{e^-} + T_{e^+} + 2m_0c^2 \quad (I.4)$$

Avec T_{e^-} et T_{e^+} sont respectivement les énergies cinétiques de l'électron et du positron.

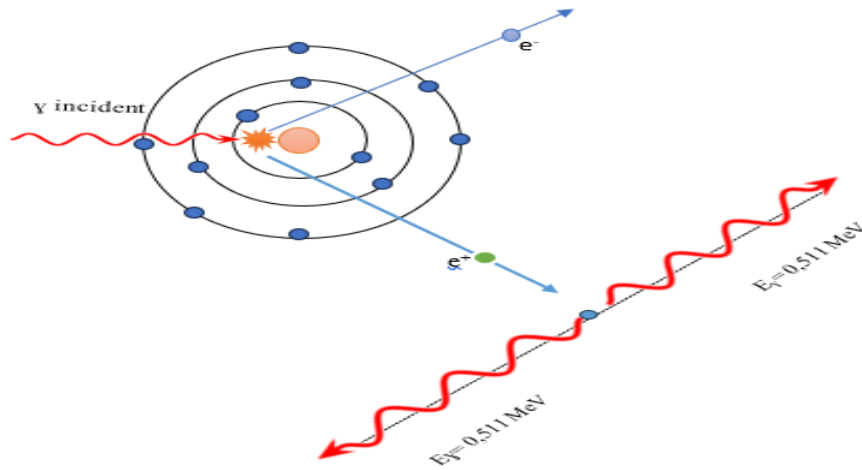


Figure I.3: Création des paires [6], [9].

A.2 Atténuation des photons dans la matière

L'atténuation du photon s'exprime par le coefficient d'atténuation qui représente la fraction des photons incidents interagissant par unité de longueur, ce coefficient est lié à la section efficace totale σ_{tot} celle des interactions du photon avec la matière.

Pour un faisceau incident d'intensité I_0 , l'intensité des photons I traversant un matériau d'épaisseur x sans interaction est donnée par [3] :

$$I = I_0 e^{-\mu_l x} \quad (I.5)$$

Avec : μ : coefficient d'atténuation linéaire définit par :

$$\mu_l = n\sigma_{tot} \quad (I.6)$$

Où : $n = \frac{N_a \rho}{M}$; N_a nombre d'Avogadro, ρ la densité et M la masse molaire.

σ_{tot} la section efficace total c'est la somme de la section efficace de chaque effet

$$\sigma_{tot} = \sigma_{ph} + \sigma_{cp} + \sigma_{Dc} \quad (I.7)$$

À partir de l'équation (I.5), on déduit le coefficient A_t :

$$A_t = \ln \frac{I_0}{I} = \mu_m \rho x \quad (I.8)$$

et $\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho}$, μ_m : coefficient d'atténuation massique

Cela montre que l'atténuation dépend de l'énergie du photon incident et qu'elle est proportionnelle de manière directe à la densité du matériau pour une épaisseur « x » fixe.

Pour une énergie gamma précise, les matériaux de densité inférieure atténuent moins les rayons gamma que ceux de haute densité. Ainsi, pour une densité de matériau déterminée, l'atténuation des rayons gamma de haute énergie est moindre par rapport à celle des rayons gamma de basse énergie, car beaucoup plus de rayons gamma d'énergie haute pénètrent le matériau sans interagir[1], [10].

La **Figure I.4** donne la variation, en fonction de l'énergie des photons incidents, des coefficients d'atténuation massiques, partiels et totaux pour l'iodure de sodium (NaI), calculés par le programme XCOM.

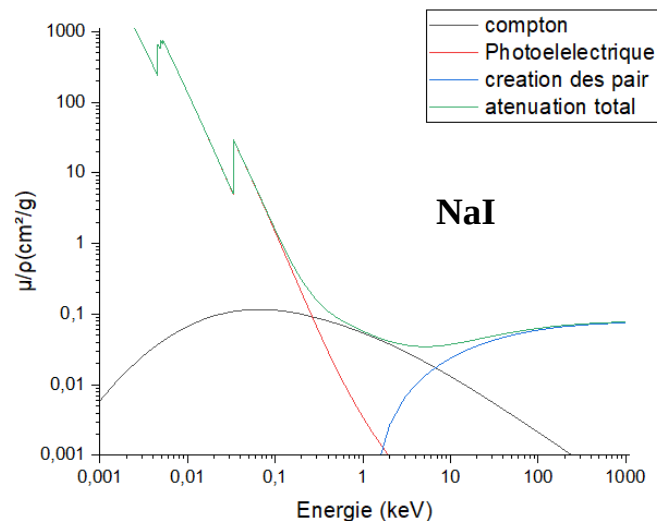


Figure I.4 : Variations des coefficients d'atténuation massiques pour l'iodure de sodium (NaI)

a. Détection des rayonnements gamma

➤ Les détecteurs à scintillation

La détection des rayonnements ionisants par scintillation dans certain matériau est la méthode la plus ancienne et la plus utilisable pour la spectrométrie dont le principe est basé sur l'émission de la lumière suite à l'absorption d'un rayonnement ionisant (photon ou particule chargée). Les scintillateurs sont repartis en deux catégories[4], [11] :

- **Les scintillateurs organiques**

Les scintillateurs organiques sont généralement plus rapides mais produisent moins de lumière. Ils se constituent d'atomes de carbone et d'hydrogène, caractérisés par leur efficacité élevée pour la spectrométrie β et la détection de neutrons rapides. Ils existent sous forme [4], [11]:

- Cristaux organiques : stilbène, naphthalène.
- Plastiques : le polymère.
- Liquides : le xylène.

- **Les scintillateurs inorganiques**

Les matériaux inorganiques (généralement choisis un isolant) ont tendance à avoir le meilleur rendement lumineux et la meilleure linéarité en outre, leur temps de réponse est relativement lent où il existe un grand "gap" en énergie (bande interdite) entre la bande de valence et de conduction. Ils sont composés soit de matériaux purs (avec structure cristalline parfaite ou avec des défauts) soit de cristaux dopés (avec un comportement qui va être dominé par les atomes d'impuretés appelés activateurs ou dopants quand ils sont introduits volontairement). Ils se trouvent seulement en forme solide ou rarement sous forme d'une poudre incorporée à un substrat, parmi les plus répandus on cite [4], [11] :

- l'Iodure de sodium dopé avec le lithium (NaI(Tl))
- l'Iodure de césium dopé avec le lithium (CsI(Tl))
- L'Iodure de césium dopé avec le sodium (CsI(Na))

b. Chaîne d'acquisition gamma

La chaîne de mesure est un ensemble de détection permet de convertir l'énergie des rayonnements en signal mesurable. Celle-ci se compose généralement de détecteur, préamplificateur, amplificateur, un convertisseur analogique numérique ADC, analyseur multicanaux MCA ou compteur d'impulsion pour le comptage simple MSA, un pc d'acquisition et un logiciel d'analyse [5], [12] .

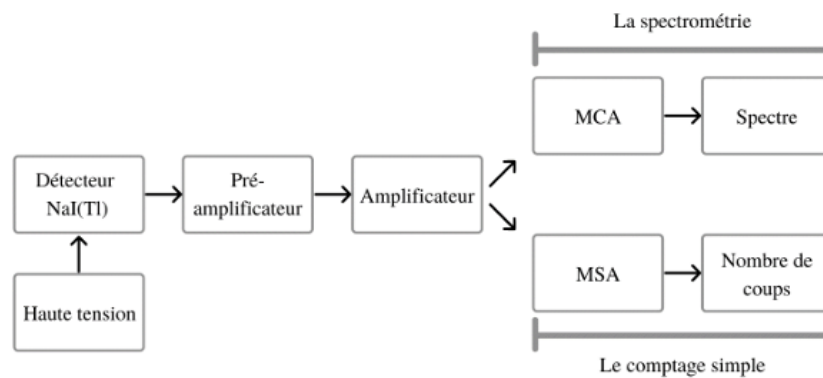


Figure I.5: Organigramme de la chaîne de détection [11].

- **Détecteur NaI(Tl)**

Le détecteur est l'élément de base dans une chaîne de détection, dans notre travail on s'est intéressé à l'iodure de sodium dopé avec du lithium, il est plus souvent utilisé dans la spectrométrie gamma. Son fonctionnement est basé sur l'excitation des électrons du cristal scintillateur par l'énergie cédée du photon cela conduit à l'émission de la lumière. Ce cristal est placé sur un tube photomultiplicateur qui va à son tour transformer la scintillation à une impulsion électrique[4], [13].

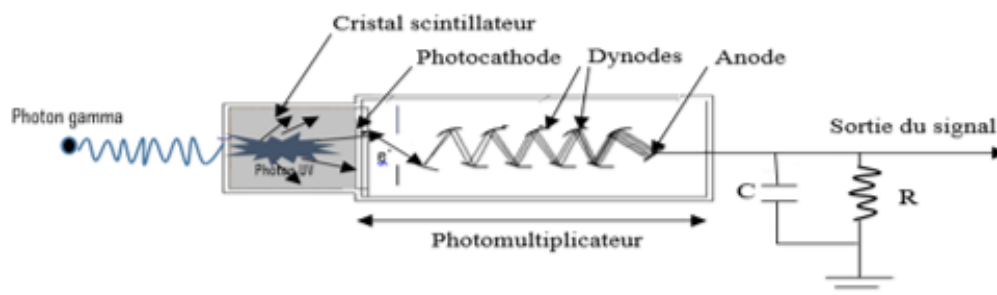


Figure I.6 : Schéma explicatif du fonctionnement d'un NaI(Tl) [11]

- **Préamplificateur**

Il s'agit d'une partie essentielle dans la chaîne de détection qui a pour but d'améliorer le rapport signal-bruit de fond par diminuer le bruit de fond autour du détecteur. On doit toujours le mettre au plus près du détecteur à cause du signal très faible qui est à l'ordre de quelques microampère(μA) qui peut être atténué facilement. Donc il doit ainsi permettre au signal pré amplifié d'être envoyé sur une dizaine de mètres[14].

- **Amplificateur**

Le signal sorti du préamplificateur doit passer par une deuxième étape au niveau de l'amplificateur qui va à son tour faire son rôle qui est partagé en deux principales parties[14] :

- Amplifier le signal reçu du préamplificateur d'un facteur de 100.
- La mise en forme du signal obtenu.

- **Codeur (ADC)**

Suite à l'amplification d'un signal continu, on doit utiliser un analyseur des signaux analogiques en des signaux numériques (ADC) qui transforme l'amplitude du signal électrique en un nombre proportionnel à l'énergie déposée dans le cristal[14].

- **Compteur d'impulsions (MCS : Multi Channel Scaler)**

C'est un instrument électronique composé d'un compteur qui marque le nombre d'impulsions sorties sur un intervalle ajustable et d'un minuteur qui démarre et arrête la durée d'accumulation de ce compteur MCS dont son principe de fonctionnement est basé sur la production d'un signal de sortie numérique une fois que le signal d'entrée électrique dépasse un certain seuil fixe[10].

B.1 La technique de gamma scanning

Au fil des années, l'industrie a connu un développement considérable dans le domaine de l'inspection des équipements et des divers dispositifs d'expérimentation. Dans ce contexte, il est devenu essentiel de disposer d'outils de diagnostic puissants pour identifier et résoudre efficacement de nombreux problèmes.

À cette fin, plusieurs méthodes non destructives (MND) se sont imposées comme des alliées précieuses pour localiser et diagnostiquer les défaillances des équipements, adaptées à leur nature spécifique. Parmi elles, la technique du Gamma Scanning se distingue particulièrement. Elle est reconnue comme un excellent instrument d'analyse, capable de résoudre environ 70 % des défaillances affectant les colonnes industrielles.

Cependant, pour garantir la précision de l'analyse par Gamma Scanning, il est impératif de disposer d'informations détaillées sur les composants et les structures internes de la colonne. L'absence de ces données essentielles complique en effet souvent l'interprétation du profil gamma obtenu. De plus, afin d'améliorer la fiabilité et la justesse du Gamma Scanning, il est crucial de réduire le bruit de fond présent dans les données brutes, en employant diverses méthodes d'optimisation[10].

B.2 Principe de la technique

La technique de Gamma Scanning repose sur un principe simple et efficace pour l'inspection des colonnes industrielles. Elle consiste à utiliser une source gamma scellée mono-énergétique positionnée d'un côté de la colonne et un détecteur placé à la même hauteur, de l'autre côté [1].

Pour réaliser un balayage complet, la source et le détecteur sont déplacés de manière synchrone le long de la colonne, avançant par petits incréments [2]. Ce mouvement permet de mesurer l'atténuation des rayons gamma à travers les différents matériaux et densités présents à l'intérieur de la colonne comme la **Figure I.7** le montre.

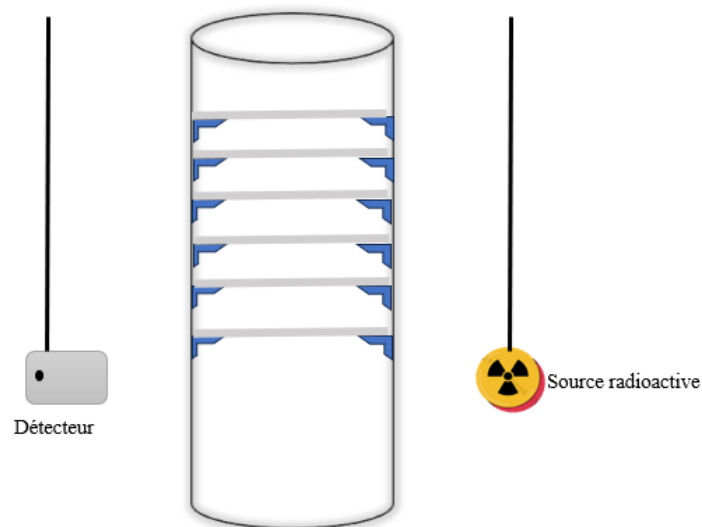


Figure I.7 : Schéma descriptif d'un scan de colonne par rayonnements gamma.

L'atténuation des rayonnements gamma est un phénomène clé dans cette technique ; elle dépend directement de la longueur de parcours du faisceau à travers la colonne et de la densité du matériau qu'il traverse.

Le résultat de ce balayage est un profil de scan, présenté sous la forme d'un tracé longitudinal. Ce tracé représente graphiquement l'absorption des rayonnements en fonction de la distance parcourue par le détecteur le long de l'axe de la colonne [2], [10].

En d'autres termes, il nous montre comment la quantité de rayons gamma reçue varie à mesure que l'on scanne la colonne de bas en haut. La **Figure I.8** est un exemple typique d'un tel profil, montrant les différentes densités et niveaux à l'intérieur d'une colonne de distillation.

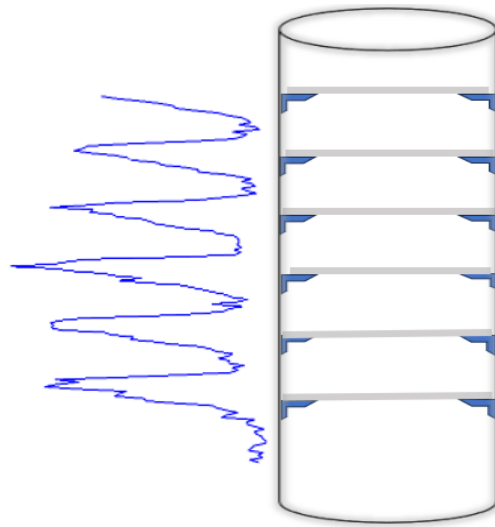


Figure I.8 : Exemple d'un profil de scan gamma de la colonne.

B.3 Développement de la technique Gamma Scanning à travers le temps

À ses débuts, le gamma scanning nécessitait un déplacement manuel de la source et du détecteur par les manipulateurs avec des arrêts fréquents pour effectuer les mesures. Cette méthode, est plus lente, exposait davantage les manipulateurs aux radiations et pouvait souffrir d'une moindre précision due aux erreurs humaines.

Pour pallier ces limitations, les chercheurs ont développé des dispositifs motorisés permettant un déplacement contrôlé et régulier de l'équipement. Cette automatisation assure une plus grande précision, accélère la procédure et améliore significativement la sécurité radiologique des opérateurs.

B.4 Domaines d'applications du Gamma Scanning

Le **gamma scanning** est une technique de contrôle non destructif qui emploie des sources radioactives émettant des rayons gamma pour analyser la structure interne d'équipements industriels. Cette méthode est utilisée dans plusieurs domaines :

- **Inspection de colonnes de distillation et de réacteurs chimiques** : Cette application permet de détecter les défauts, les obstructions ou les variations de densité au sein des colonnes industrielles [15] .
- **Contrôle de phase dans les installations lourdes et denses** : Le gamma scanning étudie la distribution des phases (gaz, liquide, solide) dans des équipements comme les compresseurs axiaux, les pompes, les couplages hydrodynamiques, les pipelines, les réacteurs et les colonnes de distillation [16].

- **Évaluation des processus industriels** : Il est employé pour diagnostiquer le fonctionnement des dispositifs, optimiser les procédés et modéliser les écoulements multiphasiques à l'aide de radiotraceurs gamma [17].
- **Tomographie gamma** : Cette technique combine des mesures gamma avec des méthodes de reconstruction pour obtenir des images en 3D. Elle est particulièrement utile pour l'étude des structures complexes en rotation ou en mouvement [16] .
 - **Avantages et limite du Gamma Scanning**
- **Avantages du Gamma Scanning**

La technique de balayage gamma est largement utilisée et appliquée par les industries pétrochimiques et chimiques à cause de divers avantages[1], [18].Parmi eux :

- Cet instrument d'analyse puissant est efficace, rapide [2].
 - La méthode du gamma scanning offre, en direct, la démonstration la plus précise des conditions de production à l'intérieur d'un réservoir de processus[19].
 - Déminer énormément les temps d'arrêt dues à des réparations[2].
 - Balayage de colonne est une technologie pratique, permettant d'examiner les détails internes d'une colonne de distillation en fonctionnement[20]
 - Aucune préparation des colonnes (que ce soit pour un échafaudage ou une mise en scène supplémentaire) ni démontage des éléments n'est requis[20]
 - Convient à toutes les dimensions de colonnes[20].
 - Utilise un système d'acquisition, de récupération et d'analyse de données assisté par ordinateur, permettant des résultats rapides, précis et fiables. Les données collectées et stockées par ordinateur peuvent être utilisées immédiatement et servir à des comparaisons ultérieures[20].
- **Limite du Gamma Scanning**

Exposition aux radiations : Les rayons gamma, en raison de leur grande capacité de pénétration, les rayons gamma peuvent présenter un risque pour la santé, ce qui nécessite la mise en place de mesures de sécurité rigoureuses[21] .

Résolution spatiale limitée : En comparaison avec d'autres méthodes telles que la tomographie par rayons X ou l'IRM, la résolution spatiale est inférieure[21].

Coût élevé : L'équipement représente un coût important, à l'entretien, et la gestion des déchets radioactifs y contribue également[21].

Temps d'acquisition : Les scans peuvent être longs, surtout pour obtenir des images de haute résolution[21].

Complexité dans l'estimation des limites de détection : La méthode de tomographie gamma associée à la spectrométrie haute résolution présente des difficultés pour établir les activités minimales détectables (MDA)[22].

B.5 Radioprotection

L'utilisation de rayonnements ionisants exige le respect de règles précises afin de prévenir tout risque pour les opérateurs et l'environnement. Bien que la technique de gamma scanning non destructive soit considérée comme plus sécurisée que d'autres méthodes [10], elle impose néanmoins une stricte adhésion aux règles suivantes [17] :

- **Utilisation d'une source scellée à faible activité :** Cette mesure empêche la dispersion de la matière radioactive dans le milieu ambiant. Le seul risque direct lié à ce type de manipulation est l'exposition externe à la source.
- **Recours à l'automatisation :** L'emploi de systèmes automatisés permet de réduire significativement la durée d'exposition du personnel.
- **Respect des distances de sécurité :** Il est impératif de maintenir une distance suffisante par rapport à la source de rayonnement.

Chapitre 2 :

MATERIEL ET METHODE

I.1 Matériels utilisés

Le dispositif utilisé pour réaliser les expériences de scan en utilisant la technique nucléaire de gamma scanning est montré sur la **figure II.1**. Il constitue un prototype utilisé à l'échelle de laboratoire pour simuler les problèmes rencontrés à l'échelle industrielle.

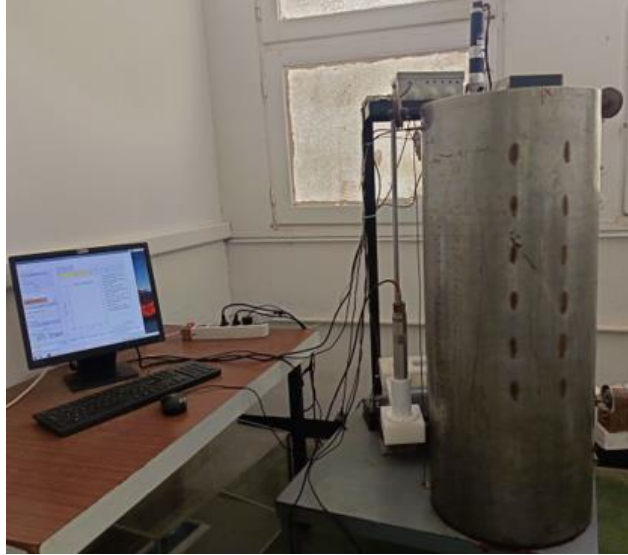


Figure II.1 : Dispositif expérimental utilisé en laboratoire CRNA

Comme le montre la figure précédente, ce dispositif est composé de :

- Une source radioactive scellée.
- Une chaîne d'acquisition ; comporte :
- Un détecteur scintillateur de type NaI (Tl).
- Une colonne de distillation.
- Un compteur d'impulsion (Ratemeter).
- Un moteur d'automatisme.
- Logiciel column scan

II.1.1 Source radioactive

Notre étude repose sur l'utilisation du césium 137 (isotope ^{137}Cs), une source radioactive artificielle produite par fission nucléaire. Sa désintégration se caractérise par émission β^- et γ .

- Dans le domaine industriel, les sources scellées de ^{137}Cs sont principalement employées pour :

La mesure de densité,

L'étalonnage des instruments de détection [23].

Informations sur le ^{137}Cs :

- $E_\gamma = 661,65 \text{ KeV}$
- $t_{1/2} = 30,07 \text{ années}$

➤ Calcul de l'activité

Pour le calibrage du détecteur, nous avons utilisé une source de faible activité. L'activité initiale de la source, depuis sa fabrication, diminue avec le temps d'utilisation. Elle est calculée selon la loi de décroissance radioactive suivante :

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (II.1)$$

Avec :

$A(t)$: l'activité de la source en fonction du temps en (Bq)

A_0 : l'activité initial de la source en (Bq) ($A_0 = 333 \cdot 10^3 \text{ Bq}$ la Date d'industrialisation = 2007)

λ : la constante radioactive (s^{-1})

La constante radioactive est propre à chaque élément, car elle est liée à la période de demi-vie de cet élément. Elle peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (II.2)$$

- Avec : $t_{1/2} = 30,07 \text{ années}$

➤ Constante radioactive $\lambda = 7,3 \text{E-}10$

➤ Activité le jour d'utilisation le 16/04/2025 $\Rightarrow A = 218 \text{ KBq}$

Le choix de la source radioactive et de son activité doit être soigneusement déterminé en fonction de plusieurs paramètres critiques. Tout d'abord, le diamètre de la colonne influence directement l'atténuation du rayonnement : plus la colonne est large, plus une activité élevée est nécessaire pour garantir un signal détectable. Ensuite, les configurations internes, telles que la présence de structures ou de matériaux absorbants (parois métalliques, fluides denses, etc.), modifient la pénétration des rayonnements et imposent une sélection rigoureuse de l'énergie des particules émises (dans le cas du ^{137}Cs , le photon γ de 662 keV offre un bon compromis pour les applications industrielles). Enfin, les contraintes statistiques liées au comptage des rayonnements – incluant la précision requise, le temps de mesure et le rapport signal/bruit –

doivent être prises en compte pour optimiser l'activité de la source tout en respectant les normes de radioprotection [24].

On peut déterminer l'activité idéale de la source radioactive A pour le gamma scanning en utilisant la formule suivante :

$$A = \frac{D d^2 2^{\frac{e}{X_{1/2}}}}{\Gamma} \quad (II.3)$$

Avec :

D = Débit de dose requis au détecteur (pratiquement accepté à 10 μ Sv/h)

d = Diamètre interne de la colonne

e = Épaisseur de la double paroi de la colonne

$X_{1/2}$ = Épaisseur à mi-hauteur (mm) pour l'acier et la source

Γ = Constante gamma pour la source gamma

II.1.2 Chaîne d'acquisition

a. Détecteur

Dans la pratique, nous avons utilisé un scintillateur de type NaI(Tl), le plus couramment employé dans l'industrie. Ce scintillateur, de forme cylindrique solide, possède un diamètre de D=3,1 cm.

À l'échelle industrielle, la configuration spécifique du détecteur garantit des résultats, même en cas de rotation due à des perturbations externes comme le vent, les tremblements de terre, etc[10].

Le compteur d'impulsions est relié au détecteur par un câble électronique et polarisé par une tension réglable, qui dans notre cas est fixée à 950 V.

La calibration du détecteur, réalisée à l'aide d'une source d'étalonnage, constitue une étape essentielle et indispensable avant toute utilisation, afin d'assurer la précision des résultats obtenus [10].



Figure II.2: Détecteur NaI (Tl) sur le support

b. Compteur d'impulsions (Ratemeter)

Le ratemeter est un enregistreur de données utilisé pour le comptage de l'impulsion, il est lié d'un coté au détecteur par un câble électrique et de l'autre coté à un ordinateur via un autre câble électrique. Cet appareillage contient des options qui doivent être réglées manuellement telles que :

- Ajuster la haute tension (HV ; en anglais Hight Voltage).
- Ajuster le mode de comptage, qui est le mode accumulatif (ModeA).
- Ajuster le temps de comptage (TimeB ; pris dans notre projet comme $T_c=60s$).
- Une sortie numérique (RS232) qui facilite la transmission des informations à l'ordinateur.



Figure II.3 : Compteur d'impulsions (Ratemeter)

c. Moteur d'automatisme

L'utilisation de l'automatisme a facilité le déroulement de l'expérience sans aucun obstacle et cela pour minimiser le temps d'exposition au milieu radioactif (au tour de la source) en appuyant sur la touche de démarrage au début du scan et sur la touche d'extinction une fois que le scan est achevé. D'abord, le dispositif doit être placé en position de départ, puis le balayage se réalise sur le long de la colonne en suivant des pas programmés à l'avance [25]. Le détecteur et la source sont placés sur des supports perpendiculaires à l'axe de l'appareil.

Il est évident que, dans la technique du Gamma Scanning, l'absence de collimation causée par une contrainte de poids sur l'élévateur a diminué la précision des mesures, en laissant passer le bruit de fond et en empêchant la formation d'un faisceau parallèle.



Figure II.4 : L'élévateur automatique de la source et détecteur

d. Logiciel column scan

Les valeurs sont visualisables sur le petit écran du ratemètre, bien qu'une seule valeur soit obtenue par comptage. Afin de faciliter les opérations de scan, un logiciel d'analyse est intégré directement sur un ordinateur. Ce dernier permet d'afficher simultanément un profil graphique de l'intensité en fonction de la zone de la colonne à scanner, avec un temps de comptage identique.

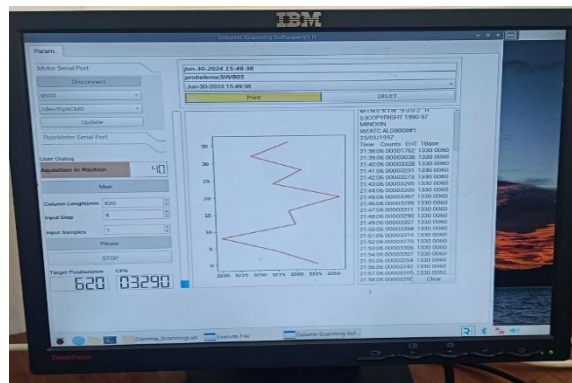


Figure II.5 : Un exemple d’affichage du profil avec le logiciel « column scanning software »

e. Colonne

La colonne utilisée est un exemple pour effectuer des tests de gamma scanning au sein du laboratoire du CRNA.

La colonne, de diamètre $D=40,5$ cm, est un cylindre qui possède 12 supports soudés, chacun des deux doit être en face l’un de l’autre au même niveau sur la paroi intérieure de la colonne, de façon que chaque paire de supports opposée soulève un plateau. Dans le modèle de notre étude, nous avons utilisé 6 plateaux remplis, ce qui nous a permis de créer des défauts à l’intérieur de la colonne et d’effectuer notre analyse. Les figures ci-dessous schématisent la colonne :

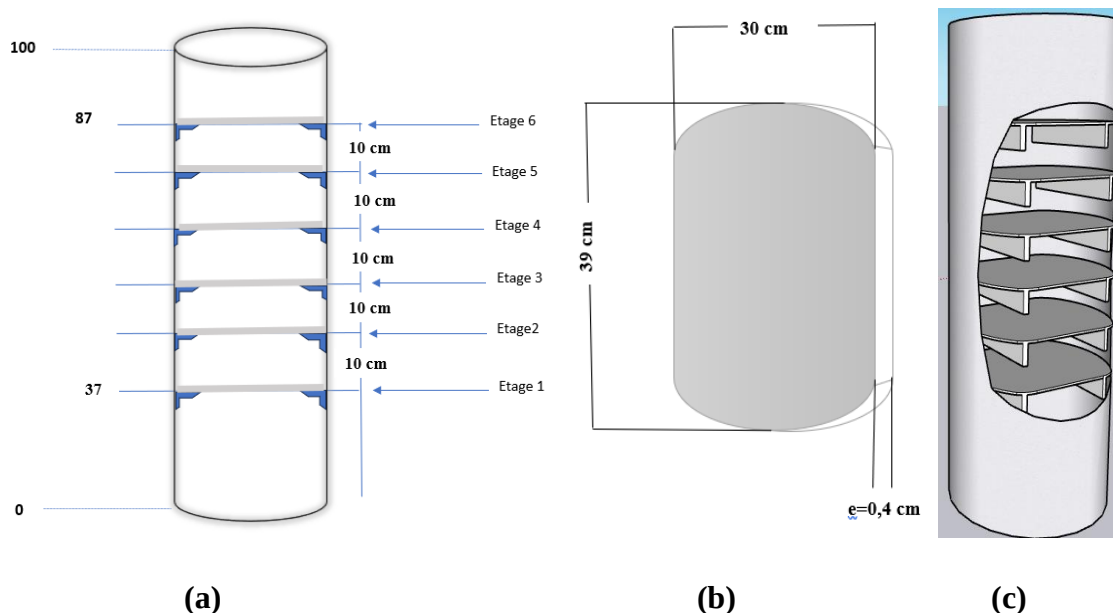


Figure II.6: (a) Les dimensions de la colonne avec les plateaux. (b). La forme d’un plateau rempli. (c) Une coupe de la colonne par simulation SketchUp

Les dimensions issues sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Les dimensions de chaque élément.

Elément	Hauteur (cm)	Largeur (cm)	Epaisseur (cm)
Colonne	100	40,5	0,4
Support	10,2	4,1	0,3
Plateau 1	39,1	29,2	0,4
Plateau2	39	29,9	0,8
Plateau3	39,1	29,9	0,6
Plateau6	39,1	29,8	0,5

II.1.3 Déroulement de l'expérience

a. Mesures initiales

Préalablement au scan de la colonne de référence et de la colonne endommagée, quatre mesures préparatoires ont été réalisées afin d'optimiser la précision des acquisitions ultérieures. Ces étapes permettent d'établir des références et de corriger les effets parasites inhérents au système de mesure.

- La première manipulation concerne la détermination de l'intensité initiale I_0 du rayonnement gamma émis par la source radioactive (^{137}Cs). Cette mesure de référence est effectuée en l'absence de tout matériau atténuateur, avec la source et le détecteur positionnés à une distance fixe de 51 cm. Les paramètres de mesure incluent un temps d'acquisition de 60 secondes et une haute tension de 950 V appliquée au détecteur. Cette valeur de haute tension a été sélectionnée conformément aux critères de résolution optimale, garantissant une incertitude statistique inférieure à 5%.
- Une seconde mesure a été réalisée dans les mêmes conditions géométriques mais avec une haute tension portée à 1330 V. Cette variation permet d'évaluer l'influence de ce paramètre sur la sensibilité du détecteur et d'optimiser le rapport signal/bruit pour les mesures ultérieures, tout en évitant la saturation du système de détection.
- La troisième étape consiste en la mesure du bruit de fond environnemental. Ce bruit comprend l'ensemble des signaux parasites captés par le détecteur, incluant les rayonnements naturels (terrestres et cosmiques) ainsi que les rayonnements résiduels présents dans l'environnement du laboratoire. Pour cette mesure, le détecteur positionné dans son support et aucune source radioactive externe n'est utilisée. Les paramètres d'acquisition (temps de comptage de 60 s, haute tension de 950 V) sont identiques à

ceux de la mesure I_0 afin de permettre une soustraction cohérente des interférences lors du traitement des données.

- Enfin, la quatrième mesure évalue l'atténuation due à la structure de la colonne vide. Cette étape cruciale permet de quantifier spécifiquement l'absorption du rayonnement gamma par les parois métalliques de la colonne, en l'absence de tout matériau interne. Les conditions expérimentales (temps de comptage de 60 s, haute tension de 950 V) sont maintenues identiques aux mesures précédentes pour assurer la cohérence de l'ensemble des données. Les résultats obtenus fournissent une base essentielle pour l'interprétation correcte des spectres de scan ultérieurs.

b. Scan de colonne de référence

Le scan de référence est une analyse effectuée sur une colonne dans des conditions normales, sans défauts ni anomalies. Il sert de base ou de modèle de comparaison pour les scans ultérieurs. Son intérêt majeur réside dans sa capacité à fournir un profil standard de la colonne, permettant ainsi d'identifier rapidement tout dysfonctionnement ou défaut, comme des plateaux mal positionnés, en comparant le profil d'un scan suspect à celui du scan de référence.

En l'absence de ce scan de référence, il reste possible de détecter des anomalies en analysant directement le profil de densité obtenu à partir du scan de la colonne et en le confrontant aux schémas mécaniques ainsi qu'aux principes de fonctionnement de la colonne. Cependant, cette méthode est moins précise et plus sujette à interprétation.

La procédure expérimentale débute par la disposition symétrique de six plateaux à l'intérieur de la colonne, garantissant une configuration standardisée. Ensuite, le détecteur et la source sont positionnés sur leur support à la même hauteur, afin d'assurer une acquisition homogène. L'analyse porte alors sur une zone spécifique de la colonne, permettant de recueillir un profil détaillé de densité. Le tableau suivant détaille les dimensions de la colonne.

Tableau II.2 : Les dimensions de la zone de la colonne soumise au scan.

	Point de départ	Distance entre les étages	Point final	Région à détecter
Dimension (cm)	37	10	87	50

Pour commencer l'expérience, nous allumons la chaîne de détection, réglons la haute tension à 950 V et le temps de comptage à 60 secondes, puis activons le mode d'accumulation. Par ailleurs, un fichier est créé dans le logiciel d'acquisition des données (column scanning

software), où nous sélectionnons le pas de déplacement, fixé ici à 4 mm. Une fois la connexion établie, un signal sonore confirme que toutes les étapes ont été correctement réalisées. L'élévateur permet ensuite de déplacer simultanément le détecteur et la source à la hauteur souhaitée. L'étude sera réalisée selon deux positions, X et Y, afin d'obtenir une cartographie complète.



Figure II.7 : position X, Plan X= 0 (a).



Figure II.7 : Position Y, Plan Y = 0 (b).

d. Scan à défauts

Dans cette expérience de gamma scanning, nous avons généré trois défauts (dans le réacteur modèle) et avons ainsi examiné différents paramètres.

- ❖ Le premier défaut est : le 3^{ème} plateau s'incline sur le 2^{ème} du côté droit : nous allons l'étudier en fonction des positions x et y et les résultats seront ensuite comparés à un profil de scan de référence, afin d'évaluer l'étendue de l'inclinaison et ses potentielles conséquences.
- ❖ Le deuxième défaut identifié se caractérise par un affaissement du troisième niveau de matière, qui repose intégralement sur le deuxième niveau, créant ainsi un contact direct et une adjacence complète entre les deux. Ce phénomène sera étudié précisément en analysant le profil de densité selon la position X du scan et en le comparant à un scan de référence pour en déterminer l'ampleur.
- ❖ Le troisième défaut identifié se manifeste par une configuration complexe : le troisième plateau s'incline et repose sur le deuxième niveau du côté gauche, tandis que le quatrième plateau s'incline et s'appuie sur le troisième du côté droit, formant ainsi un profil de densité caractéristique en forme de 'V' inversé (>). Pour analyser ce défaut, le travail initial consistera à examiner son profil le long de la position (X) et à le comparer à un scan de référence. Par la suite, une étude complémentaire sera menée en modifiant la haute tension (HT à 950 V) ; cette nouvelle mesure sera analysée indépendamment, sans recours au scan de référence.

En suivant les mêmes procédures que celles de l'expérience de référence (scan de référence), un balayage gamma est effectué sur toute la hauteur de la zone d'intérêt. Les résultats obtenus

sont ensuite comparés au scan de référence afin d'analyser et de diagnostiquer la problématique identifiée. Il est par ailleurs envisageable de simuler diverses anomalies au sein du laboratoire CRNA. Cette approche permettrait d'évaluer la fiabilité de la technique de gamma scanning et de déterminer la facilité avec laquelle différents défauts peuvent être détectés et caractérisés grâce à l'analyse du profil des comptes.

Chapitre 3 :

RESULTATS ET DISCUSSION.

Dans ce dernier chapitre du mémoire, nous évaluons l'efficacité du scan automatique réalisé par la technique du gamma scanning, en analysant les différents profils d'atténuation obtenus lors des scans de la colonne à l'échelle laboratoire.

La technique du gamma scanning nécessite des améliorations afin d'obtenir davantage de données précises sur la structure, l'état et le fonctionnement de la colonne. C'est pourquoi l'évaluation de l'efficacité du scan automatique constitue une étape essentielle, non seulement pour la modélisation des profils d'atténuation, mais aussi pour garantir la précision des mesures.

L'évaluation du projet s'appuie sur la succession des manipulations effectuées en laboratoire, réparties en trois parties principales :

- D'abord, les mesures initiales, indispensables pour interpréter correctement les résultats ;
- Ensuite, les scans de référence réalisés selon deux axes détaillés ci-dessous ;
- Enfin, les scans ciblant les défauts choisis, permettant d'atteindre les objectifs fixés à travers des interprétations et discussions approfondies

III.1 Calcul d'erreurs

Les expériences que nous venons de réaliser reposent sur le comptage simple du nombre de coups, c'est-à-dire que les valeurs obtenues correspondent à l'accumulation successive des particules détectées par le détecteur lors de chaque mesure.

Lorsqu'on effectue une mesure nucléaire, si x représente un nombre de comptages bruts et successifs, on peut directement appliquer la relation d'erreur ($\sigma = \sqrt{x}$). En revanche, dans le cas de la spectrométrie gamma, qui permet de distinguer différents isotopes en fonction de leurs énergies, l'utilisation de cette relation précédente est considérée comme incorrecte[26]. Car les calculs d'incertitude doivent alors prendre en compte la résolution spectrale et la distribution des pics.

L'approximation utilisée pour le calcul de l'erreur est donnée sous la forme ($x \pm \sqrt{x} \approx \bar{x} \pm \sqrt{\bar{x}}$) où ($\bar{x}$) représente la moyenne des comptages obtenus. En calculant la valeur ($\sqrt{\bar{x}}$) à chaque essai réalisé, on détermine, selon cette méthodologie, une erreur relative de 10% liée notamment aux dimensions de l'appareil expérimental (source, colonne et détecteur). Pour optimiser ce résultat, il est nécessaire d'augmenter le temps de comptage afin d'obtenir un nombre plus élevé

de coups, ce qui contribuera à réduire la marge d'erreur et améliorer la précision des mesures[27].

III.2 Les mesures initiales

La première étape a consisté en la réalisation de quatre manipulations en laboratoire, au cours desquelles nous avons utilisé uniquement la source radioactive au césium (^{137}Cs) et la chaîne de détection. L'objectif de ces expériences était d'étudier les effets des différents paramètres influençant le comptage des données.

- La mesure de I_0 dans la technique de gamma scanning correspond à la mesure de l'intensité initiale du rayonnement gamma émis par la source, avant qu'il ne traverse la colonne à analyser. Cette mesure est essentielle car elle sert de référence pour évaluer l'atténuation des rayons gamma due aux matériaux à l'intérieur de la colonne.

Placer la source radioactive et le détecteur face à face, chacun fixé sur son support, à la même distance que celle utilisée lors du scan de la colonne, mais sans la colonne entre eux. Cela permet de mesurer le flux gamma non atténué par la colonne.

Le nombre de coups est mesuré en deux positions bien définies, avec une haute tension de 950 V et un temps de comptage de 60 secondes.

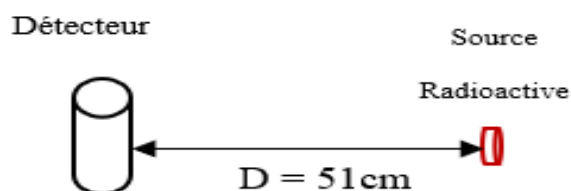


Figure III.1 : Schéma de la manipulation sans colonne.

On remarque que la source de césium (^{137}Cs) utilisée présente une intensité élevée, ce qui nous garantit de bonnes statistiques pour les expériences à venir.

- En suivant la même méthodologie, nous avons réalisé des mesures avec la source de césium en deux positions distinctes, à des distances de 44 cm et 76 cm, tout en faisant varier la haute tension de 950 V à 1330 V, avec un temps de comptage constant de 60 secondes.

Les résultats de cette manipulation sont présentés dans le **TableauIII.1** ci-dessous :

TableauIII.1 : Les résultats de la détection en variant la haute tension.

Variation de la haute tension	D= 44cm	D= 76cm	Moyenne
HT= 950V	3152 ± 56	2856 ± 53	3004 ± 54
HT= 1330V	3213 ± 56	3079 ± 55	3146 ± 56

On observe une légère augmentation du signal lorsque la haute tension est augmentée, avec une différence de $3146 - 3004 = 142$.

D'après les intervalles de confiance, l'augmentation observée n'est pas statistiquement très significative, bien qu'elle soit liée à l'élévation de la haute tension appliquée au détecteur. Étant donné que ces deux expériences ont été réalisées dans des conditions initiales identiques, à l'exception de la variation de la haute tension, on peut en déduire que cette augmentation conduit à un signal plus intense détecté et, par conséquent, à une atténuation apparente moindre.

Une augmentation maîtrisée de la haute tension entraîne une amélioration notable du signal détecté, sans toutefois provoquer la saturation du détecteur. Il est cependant essentiel de s'assurer que le détecteur reste dans sa plage de fonctionnement linéaire lorsque la haute tension est augmentée de manière continue, car au-delà d'un certain seuil, un phénomène de saturation pourrait survenir, compromettant la qualité des mesures.

- En général, le bruit de fond est le signal issu des sources naturelles ou artificielles non-associé à la source qu'on veut l'examiner et donc il est nécessaire de le quantifier et le soustraire du signal total obtenu pour une évaluation précise.

Pour cela, nous avons effectué quatre comptages en utilisant uniquement le détecteur fixé sur son support, avec un temps de comptage de $t_c=60$ et une haute tension (HT) réglée à 950 V. Les résultats de ces mesures sont présentés dans le **Tableau III.2** ci-dessous.

TableauIII.2 : Les mesures du bruit de fond sur le support.

	1 ^{ère} Mesure	2 ^{ème} Mesure	3 ^{ème} Mesure	4 ^{ème} Mesure	Moyenne
Sur le support	1584	1524	1507	1533	1537 ± 39

Les mesures montrent que le bruit de fond reste relativement constant. Toutefois, ce bruit de fond doit impérativement être pris en compte lors de l'analyse des faibles différences d'absorption afin d'éviter une surestimation des défauts. Il détermine également la sensibilité minimale du détecteur, car il peut masquer les variations fines d'atténuation.

- **Scan de la colonne vide**

La mesure de l'atténuation du rayonnement traversant la colonne vide (sans les plateaux) constitue une étape fondamentale pour évaluer sa contribution propre à l'atténuation globale. Cette mesure permet d'établir une courbe de référence initiale, essentielle pour identifier les perturbations et les anomalies observées lors du remplissage ultérieur de la colonne. Pour ce faire, il est nécessaire de calculer le rapport I_0/I pour chaque intensité enregistrée, puis d'appliquer le logarithme népérien afin d'obtenir les valeurs de l'axe des ordonnées. On aboutit ainsi à un graphe représentant les variations de l'atténuation ($\ln(I_0/I)$) en fonction de la hauteur traversée.

Ce scan issu, illustré dans la **Figure III.2**, reflète uniquement les caractéristiques géométriques et structurelles de la colonne, sans aucune interaction avec un matériau interne (plateau).

A l'aide du scan de référence selon l'axe X présenté dans la figure **Figure III.3**, on arrive à une comparaison entre le graphe de référence (colonne avec les plateaux) et celui de la colonne vide est présentée dans la **Figure III.4**. Les résultats montrent que la colonne vide, bien qu'elle ne contienne aucun plateau, contribue tout de même à une certaine atténuation du rayonnement.

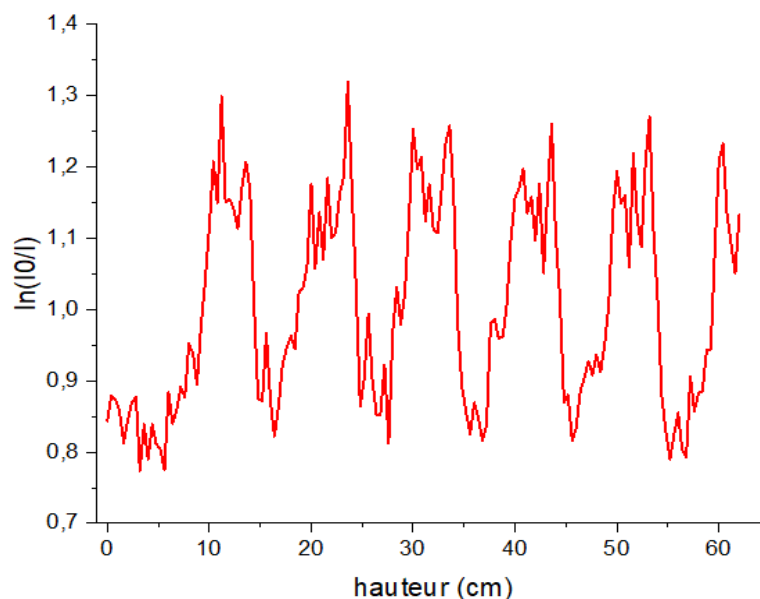


Figure III.2 : Les variations de coefficient A_i des rayonnements dans une colonne vide.

- Scan de référence suivant la position X

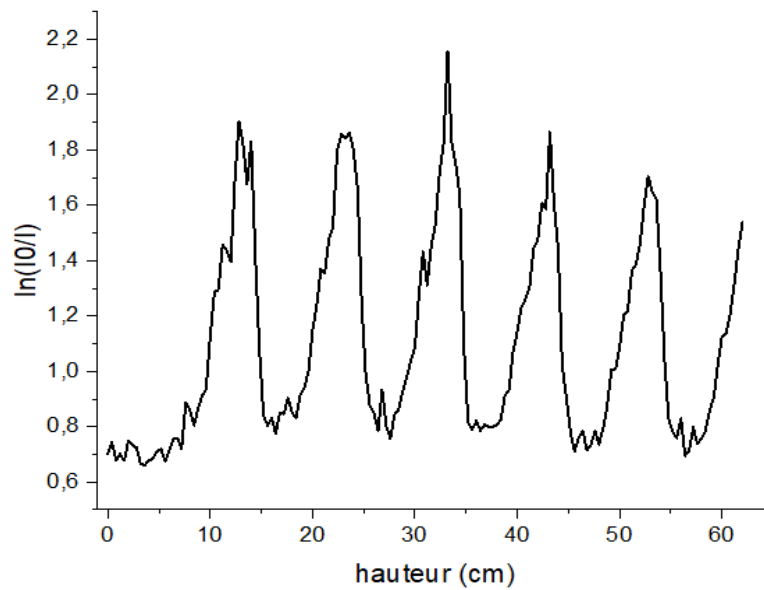


Figure III.3 : Profil du scan gamma de référence suivant X.

On remarque que les deux spectres ne se supposent pas sur eux-mêmes, cela veut dire que la colonne vide a une certaine atténuation des rayonnements gamma mais très faible par rapport au scan de référence.

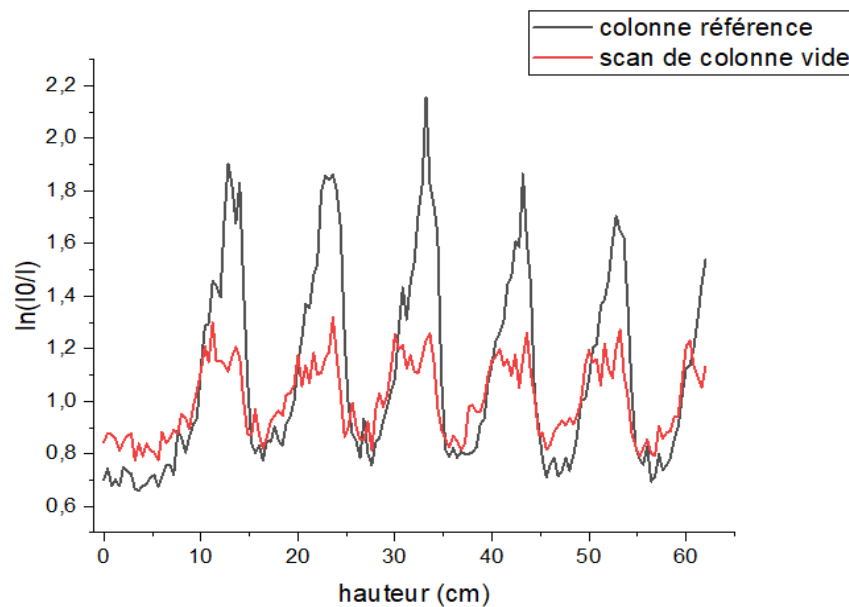


Figure III.4 : Comparaison entre les graphes de référence et ce de la colonne vide.

En comparant entre les deux tracés, on trouve qu'ils ont un comportement similaire des pics, cela témoigne que l'intérieur de la colonne s'agit d'un milieu homogène et qu'aucun élément significatif n'interfère avec le trajet des rayons, diminuant ainsi les variations d'intensité et les fluctuations observées. En l'absence des matériaux absorbants, plusieurs facteurs comme la

distance de la source de rayonnement ou ses propriétés géométriques peuvent influencer la mesure.

III.3 Scan de la colonne de références

Suite aux mesures initiales, on va effectuer deux scans de références avec la source du ^{137}Cs suivant deux positions différentes ;

- La première nommée « Position X ».
- La deuxième nommée par « Position Y ». Nous obtenons cette direction en faisant une rotation de la colonne selon un angle de $\frac{\pi}{2}$.

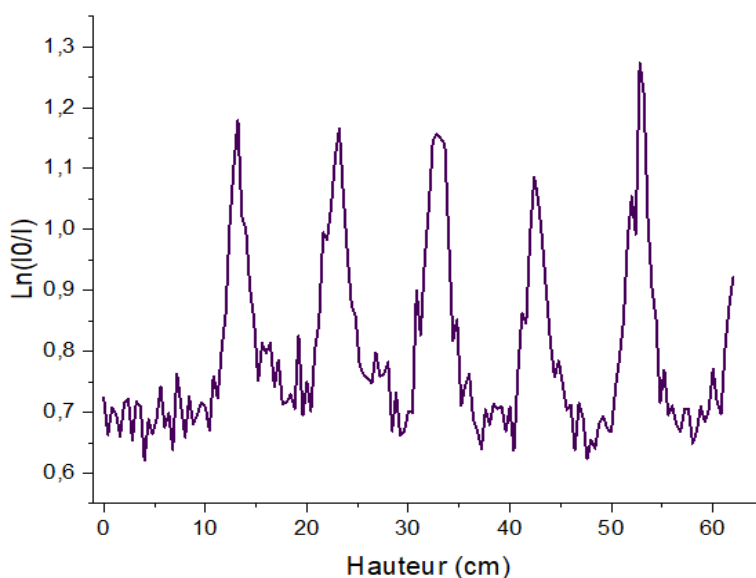
Le **Tableau III.3** regroupe les conditions initiales pour chaque scan.

TableauIII.3 : Les conditions initiales du profil de scan.

Source	Haute tension	Temps de comptage	Pas d'incrémentation
Césium , ^{137}Cs	HT = 950V	$t_c = 60\text{s}$	P= 4cm

Le graphe de la **FigureIII.3** représenté ci-dessus et celui de la **FigureIII.5** ci-dessous démontrent les variations de l'atténuation en fonction de la distance parcourue par le détecteur :

- Scan de référence suivant la position Y :



FigureIII.5 : Profil du scan gamma de référence suivant Y.

Le gamma scanning, méthode non invasive, constitue un outil de diagnostic performant pour le contrôle en temps réel des colonnes de distillation. Cette technique permet d'évaluer avec

précision la répartition des phases et de détecter d'éventuels dysfonctionnements sans arrêt de production.

L'analyse comparative des deux graphiques révèle une similitude notable dans le comportement général des courbes d'atténuation, avec des profils de pics présentant des caractéristiques morphologiques communes. Cependant, des différences significatives apparaissent au niveau des valeurs maximales d'absorption. On observe une alternance caractéristique entre des zones d'intensité réduite, correspondant aux espaces inter-plateaux où seul l'effet de la colonne vide se manifeste, et des pics d'atténuation prononcés où le signal atteint son intensité maximale, reflétant la présence des plateaux. Cette configuration périodique, bien que présentant des amplitudes différentes entre les deux cas étudiés, démontre la sensibilité de la technique gamma scanning pour distinguer clairement les contributions respectives de la structure de la colonne et des plateaux dans le processus d'atténuation du rayonnement.

L'analyse des pics révèle que leurs valeurs maximales d'atténuation diffèrent significativement, bien que les plateaux soient tous constitués du même matériau (acier). Cette variation observée suggère des différences d'épaisseur entre les plateaux. Ces résultats mettent en évidence que le paramètre déterminant dans l'atténuation des rayonnements gamma est la densité surfacique des éléments traversés (produit de la densité du matériau par son épaisseur), conformément aux principes fondamentaux de l'atténuation des rayonnements.

L'examen des profils d'atténuation met en évidence une différence notable entre les positions X et Y. Le long de la position X, correspondant à la traversée longitudinale des plateaux, on observe une atténuation maximale de 2,1. Cette valeur importante s'explique par le parcours complet du rayonnement à travers toute la longueur du plateau. À l'inverse, le profil suivant la position Y, représentant la traversée transversale, présente une atténuation maximale plus faible de 1,25, caractéristique du trajet réduit à travers la seule largeur du plateau. Cette disparité entre les deux positions (2,1 contre 1,25) illustre parfaitement le principe fondamental de l'atténuation des rayonnements, où l'absorption dépend directement de la distance parcourue dans le matériau. Les résultats confirment ainsi la sensibilité de la technique gamma scanning aux variations géométriques et son aptitude à discriminer les différentes orientations des structures internes. Cette observation corrobore par ailleurs la loi exponentielle d'atténuation, où l'intensité transmise décroît avec l'épaisseur traversée selon la relation.

III.4 Scan à défauts

Dans cette phase finale de l'étude expérimentale, nous évaluons la sensibilité de la technique de gamma scanning en introduisant trois types de défauts distincts au sein de la colonne. Chaque défaut est conçu pour présenter des caractéristiques uniques en modifiant différents paramètres clés : épaisseur des plateaux, densité du matériau et géométrie interne. Cette approche méthodique permet de tester la capacité de détection du système face à diverses anomalies potentielles.

III.4.1 Colonne avec plateau incliné

Le premier défaut correspond à l'inclinaison anormale d'un plateau par rapport à son support inférieur.

L'analyse de ce défaut sera conduite selon une approche bidimensionnelle, examinant séparément les profils d'atténuation suivant les positions X et Y. **La Figure III.6** présente en superposition les tracés du scan gamma pour la configuration défectueuse et la référence suivant la position (X), tandis que la **Figure III.8** offre la comparaison équivalente suivant la position (Y). Cette représentation superposée permet une évaluation précise des écarts entre le comportement nominal et la situation défectueuse pour chaque orientation spatiale, facilitant ainsi l'identification et la quantification des anomalies induites par l'inclinaison du plateau.

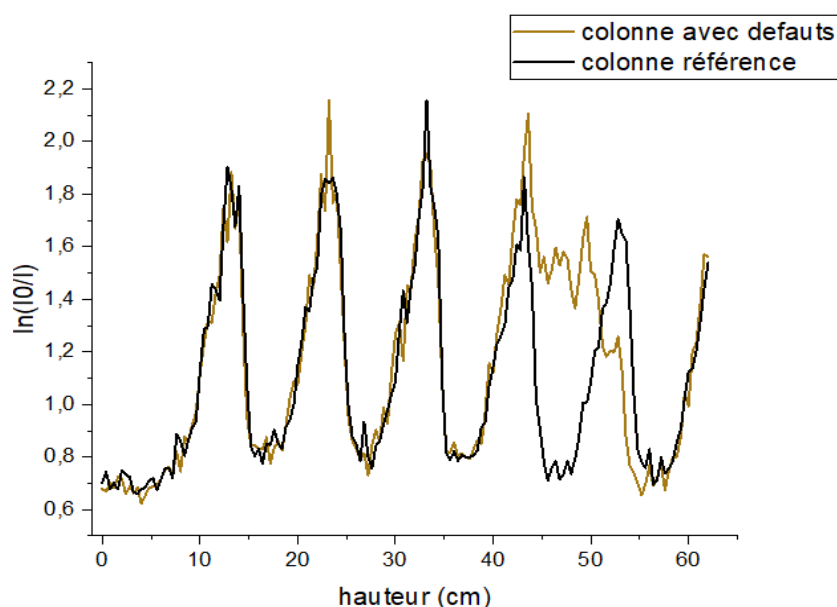


Figure III.6 : Le profil du scan gamma du défaut suivant X avec le graphe de référence.

L'analyse des deux graphes révèle un comportement oscillatoire périodique caractéristique des systèmes à plateaux, avec toutefois un écart notable entre la courbe de référence et celle du scan défectueux. On observe plus particulièrement entre 45 cm et 60 cm une divergence

significative, se manifestant par une atténuation plus prononcée dans le cas défectueux. Cette amplitude accrue suggère une extension spatiale importante du défaut selon cette direction.

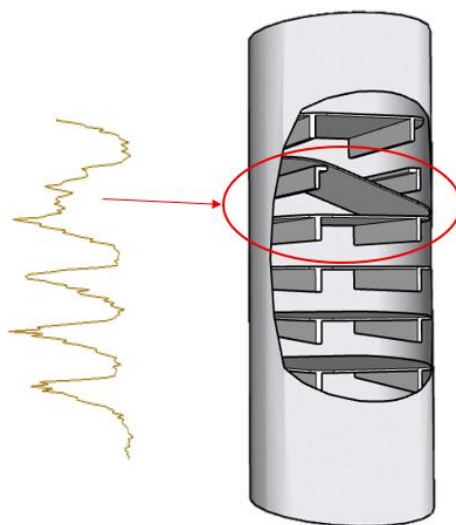


Figure III.7 : Confrontation du scan à défaut avec le schéma en 3D.

Physiquement, cette augmentation d'atténuation peut s'expliquer par deux phénomènes principaux : (1) une absorption supplémentaire due à une accumulation locale de matière, ou (2) une diffusion accrue du signal résultant de la modification de la géométrie du plateau incliné [28]. Ces résultats démontrent la sensibilité de la technique de gamma scanning à détecter et localiser précisément des défauts structurels dans les colonnes.

L'analyse de la **Figure III.7** confirme la présence d'une anomalie détectable dans le profil de scan gamma, correspondant précisément au défaut simulé dans cette étude. Les écarts observés entre les courbes de référence et celles du cas défectueux valident expérimentalement la sensibilité de la technique à identifier ce type particulier de dysfonctionnement structural.

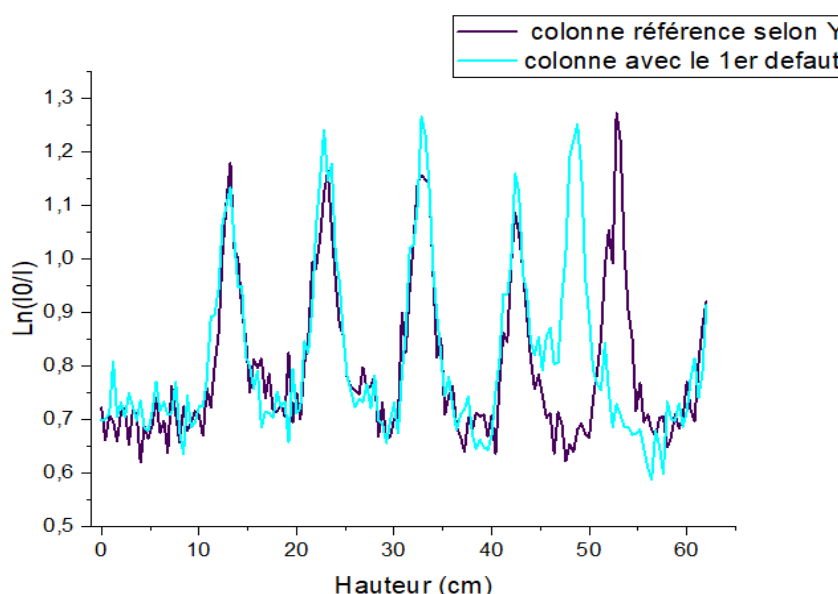


Figure III.8 : Le profil du scan gamma du défaut suivant Y avec le tracé de la référence.

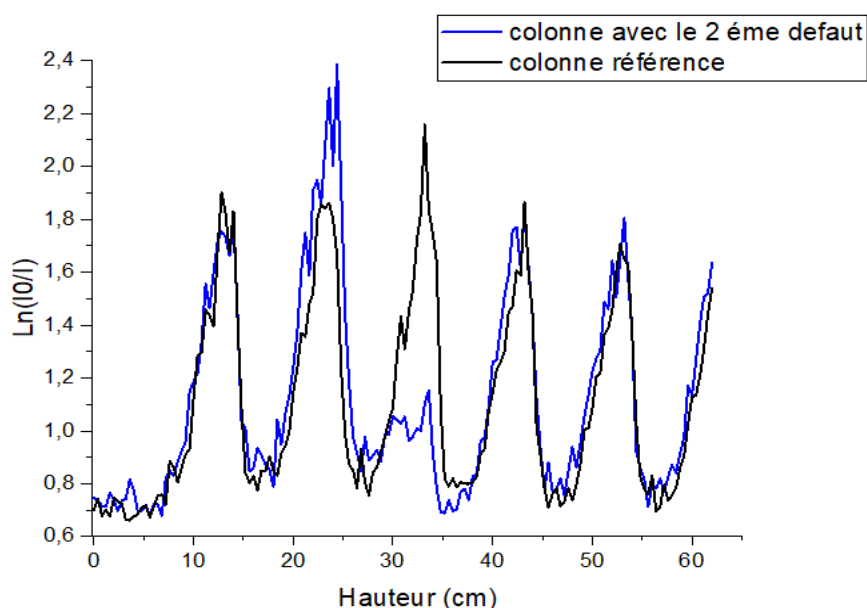
D'après le graphique, on constate que l'atténuation dans la colonne est globalement plus faible que celle mesurée suivant la position X, avec un maximum d'environ 1,25. Toutefois, une différence significative apparaît entre 45 cm et 60 cm, où l'atténuation dans la colonne dépasse nettement celle de la référence. Cette variation suggère une anomalie localisée ou une modification des propriétés du matériau dans cette zone spécifique, ce qui mérite une analyse plus approfondie.

Le défaut situé dans la colonne testée, confirme la pertinence de l'étude réalisée. Les mesures obtenues révèlent que, bien que les deux essais aient été effectués selon des axes différents, ils mettent en évidence la même anomalie visible entre 45 cm et 60 cm, mais avec des sensibilités distinctes. Cette anomalie correspond à un défaut physique qui perturbe l'atténuation habituelle du signal [28]. Ce phénomène pourrait résulter d'une accumulation de matière ou d'une augmentation locale de la densité dans la zone concernée. Le fait que cette zone soit détectable sur les deux axes indique que le défaut possède une composante tridimensionnelle, ne se limitant pas à un seul plan. Cette analyse croisée multi-axes souligne l'importance de la position du scan, car elle permet de préciser l'orientation, la forme ainsi que la nature du défaut [29].

III.4.2) Colonne avec deux plateaux superposés

Le défaut ajouté se manifeste par la superposition des plateaux, illustrant ainsi une interaction complexe entre les différentes zones.

Le scan du profil gamma de ce dernier, comparé à celui de la référence est présenté dans la figure **FigureIII.9** comme suit :



FigureIII.9 : Le profil du scan du défaut avec le profil de référence.

D'après le profil présenté ci-dessus, on observe une régularité marquée des pics d'atténuation sur la référence, ce qui témoigne clairement de la présence d'une structure homogène et bien ordonnée. Cette constance reflète un matériau ou une colonne aux propriétés uniformes, sans perturbations majeures. En revanche, la zone comprise entre 15 cm et 35 cm révèle une déviation localisée notable, où les pics d'atténuation apparaissent légèrement décalés et modifiés. Ce décalage suggère une altération ponctuelle des caractéristiques du matériau, indiquant un changement significatif par rapport au profil standard.

Cette anomalie pourrait s'expliquer par un mauvais positionnement ou un désalignement d'un plateau au sein de la colonne, ou encore par une augmentation locale de la densité, entraînant une modification des propriétés d'atténuation du signal gamma. En dehors de cette zone spécifique, notamment dans les intervalles [0 – 15 cm] et [35 – 65 cm], les courbes des profils s'alignent étroitement, ce qui confirme que le reste de la colonne conserve des caractéristiques similaires à celles de la référence. Cette observation met en évidence que le défaut est circonscrit et n'affecte pas l'ensemble de la structure, soulignant ainsi l'importance d'une analyse ciblée pour identifier précisément l'origine et la nature de cette perturbation[28].

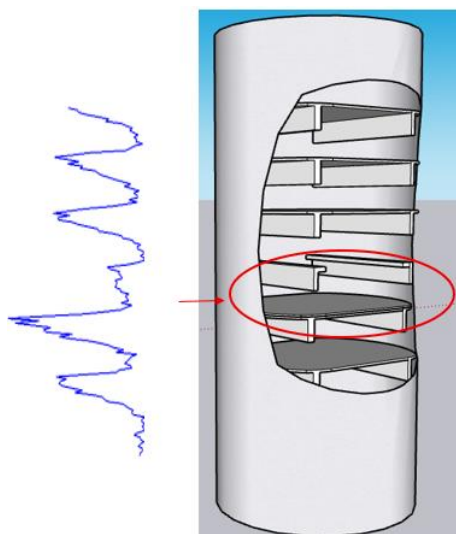


Figure III.10 : Confrontation du scan à défaut avec le schéma en 3D.

En projetant le graphe du défaut à son schéma tridimensionnel, il apparaît clairement que la variation de l'atténuation résulte effectivement d'une erreur de positionnement d'un plateau. Bien que cette anomalie soit moins prononcée que celles observées dans les graphiques précédents, elle reste néanmoins significative en raison de l'irrégularité et du décalage des pics d'absorption. Cette observation souligne l'impact localisé de ce défaut sur la structure, mettant en lumière l'importance d'un contrôle précis du placement pour garantir l'homogénéité globale.

III.4.3) Colonne avec deux plateaux inclinés simultanément

Le dernier défaut ajouté est le plus complexe. Deux plateaux de niveaux différents se superposent simultanément, chacun s'appuyant sur le niveau inférieur. Plus précisément, le plateau 4 s'incline vers la droite, reposant partiellement sur le plateau 3, tandis que le plateau 3 s'incline vers la gauche, s'appuyant sur le plateau 2. Cette configuration crée une interaction instable entre les niveaux.

L'étude de ce défaut sera réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, le profil obtenu sera comparé au scan de référence suivant X. Dans un second temps, l'analyse portera sur l'impact de la variation de la haute tension, passant de HT = 950 V à HT = 1330 V, en l'absence du scan de référence correspondant à cette haute tension. Ainsi, nous disposerons du tracé du profil gamma du défaut, accompagné d'une comparaison entre le graphe du défaut superposé au profil de référence, du profil du scan du défaut avec la haute tension variable, ainsi que d'une comparaison des scans du défaut en maintenant ou en modifiant la haute tension. Ces résultats sont présentés respectivement dans les **Figures III.11 à III.14** ci-dessous.

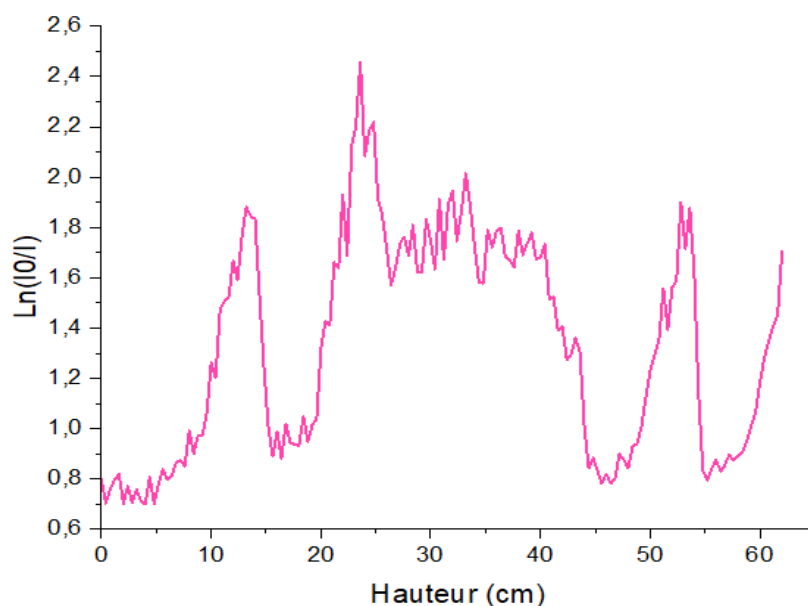


Figure III.11 : Le tracé du profil gamma du problème.

Le scan révèle une colonne dont l'intérieur est fortement endommagé sur une large portion, caractérisée par une absence nette de périodicité, en contraste avec les graphes précédents. Cette observation traduit une perturbation majeure ou un désordre significatif au sein de la structure interne de la colonne. Par ailleurs, on note une augmentation marquée du niveau d'atténuation dans certaines zones, notamment entre 10 cm et 40 cm, ce qui suggère la présence d'une densité très élevée ou d'un matériau fortement absorbant. Cette anomalie souligne l'importance d'une analyse approfondie pour comprendre l'origine et l'impact de ces modifications structurelles.[25].

Entre 45 cm et 50 cm, on observe une chute brusque de l'atténuation, suivie d'une reprise nette, ce qui pourrait correspondre à une zone vide ou creuse située entre les plateaux. Au-delà de 50 cm, le profil retrouve son comportement habituel et devient quasiment identique à celui de la référence. Cette variation ponctuelle souligne la présence d'une anomalie localisée sans affecter la structure globale[4].

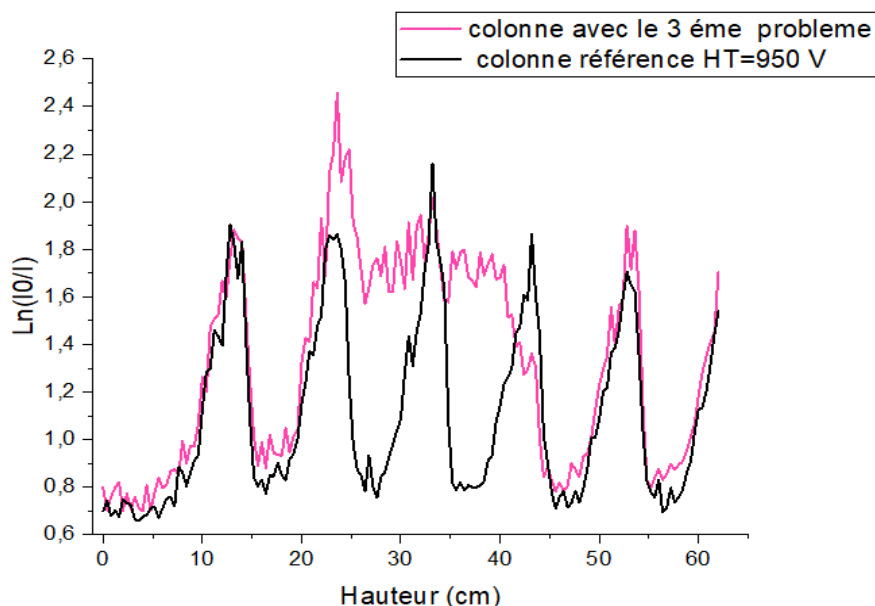


Figure III.12 : Comparaison entre le graphe du problème superposé avec le profil de la référence.

Les deux courbes présentées dans la figure précédente **Figure III.12**, montrent une alternance de pics ce qui indique que la structure interne de la colonne est toujours conservée dans les deux mesures. On observe, dans la région comprise entre 15 cm et 45 cm, que la courbe rose, correspondant au scan avec défaut, est globalement plus élevée que celle de la référence. Cela traduit une atténuation plus importante, probablement liée à un excès de matière absorbante.

Un décalage de certains pics est observé dans la région autour de 20, 30 et 40 cm, où les pics apparaissent atténués et élargis, ce qui indique une déformation interne. Au-delà de 50 cm (entre 50 et 65 cm), les deux courbes tendent à converger à nouveau, suggérant que la dernière partie de la colonne est intacte ou moins affectée.

La comparaison avec la référence montre que le défaut correspond à une anomalie réelle dans la colonne, plus sévère que celles détectées lors des scans précédents.

Dans la deuxième partie de cette expérience, nous cherchons à nous rapprocher davantage des conditions réelles, comme celles rencontrées dans les industries. En cas d'anomalie, il n'est pas toujours possible de disposer d'un scan de référence, ce qui oblige à réaliser l'étude sans comparaison préalable.

Nous analyserons donc le problème ajouté en comparant le scan effectué sous tension normale

avec celui réalisé sous tension modifiée, présentés respectivement dans les figures **Figure III.13** et **Figure III.14**.

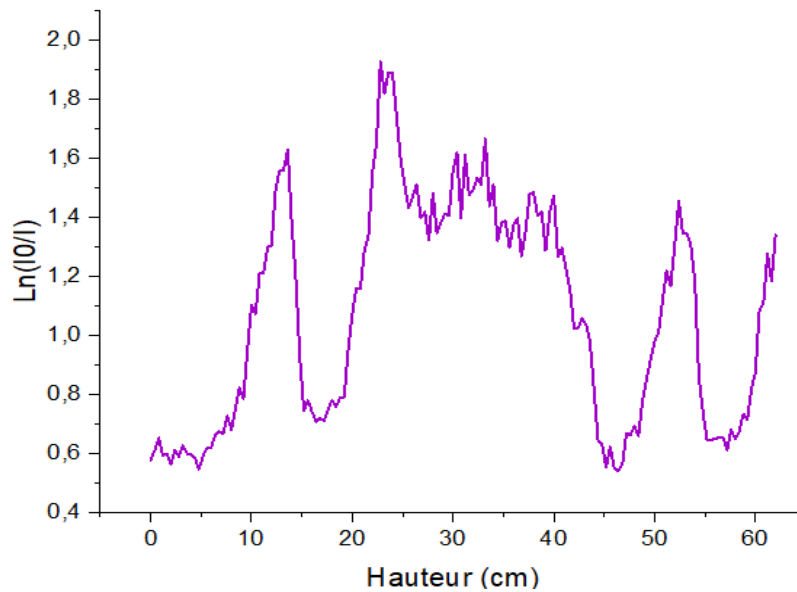


Figure III.13 : Le tracé du scan du problème en variant la haute tension.

Selon les graphiques, les deux courbes présentent une forme similaire, ce qui indique que la structure du signal est globalement conservée. Toutefois, cette structure varie lorsque la haute tension est modifiée, entraînant des valeurs d'atténuation plus faibles.

On observe des déviations brusques et une irrégularité des pics dans la région comprise entre 15 et 45 cm, ce qui révèle la présence d'un défaut dans cette partie de la colonne.

La diminution de l'atténuation apparente affecte la mesure : lorsque la haute tension augmente, les photons produits sont plus énergétiques et traversent plus facilement la matière, ce qui réduit leur absorption par les matériaux et diminue ainsi l'atténuation [30].

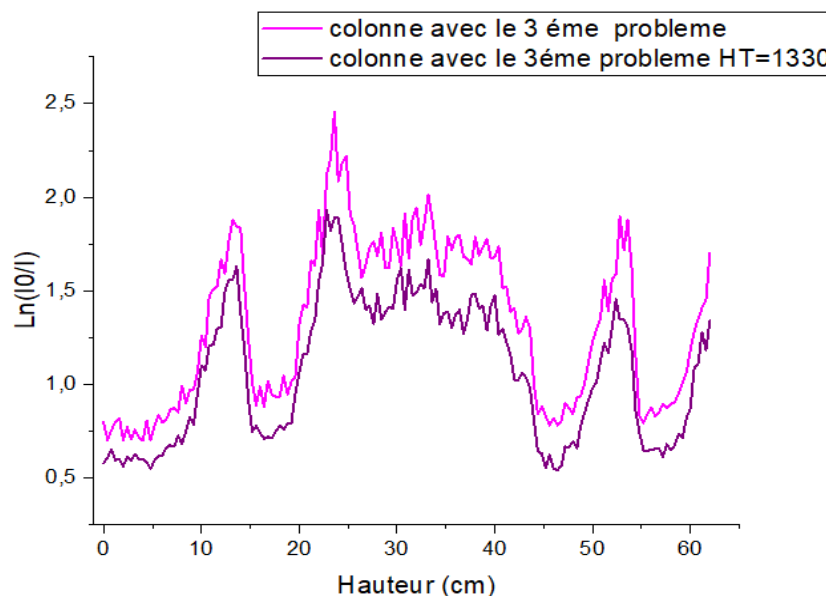


Figure III.14 : La comparaison entre les profils du scan de défaut en gardant et en variant la haute tension.

Ce phénomène est particulièrement marqué avec ce paramètre, car les pics d'atténuation deviennent moins prononcés. Il s'agit de la dépendance de l'atténuation à l'énergie des rayons gamma, conformément à la loi de Beer-Lambert (équation I.5, Chapitre I), où le coefficient d'atténuation $\mu(E)$ dépend de l'énergie des photons. Plus l'énergie E est élevée, plus ce coefficient diminue, ce qui conduit à une atténuation moindre enregistrée.

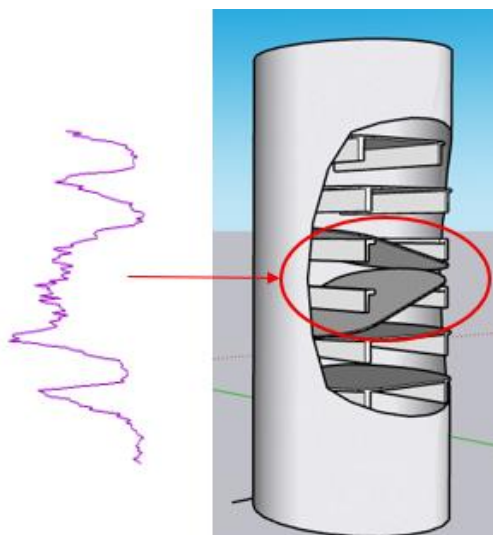


Figure III.15 : Confrontation du scan à défaut avec le schéma en 3D.

En projetant les deux graphes du même défaut, obtenus sous deux tensions différentes, sur le schéma tridimensionnel représentant l'état interne de la colonne et correspondant à sa structure mécanique réelle, on constate que les déviations soudaines confirment la présence de l'anomalie à l'intérieur de la colonne testée. Cela signifie que le reste de la colonne, en particulier les régions [0 – 15 cm] et [45 – 60 cm], est totalement sain.

En conclusion, le graphique met en évidence l'impact de l'énergie des photons sur l'atténuation mesurée. Ce comportement, attendu et conforme aux principes physiques, souligne l'importance de maintenir une tension stable tout au long des manipulations afin de faciliter la comparaison des scans.

CONCLUSION GENERALE

Les expériences réalisées au laboratoire du centre de recherche nucléaire d'Alger, utilisant la méthode de balayage par rayons gamma, illustrent une technique d'analyse non destructive particulièrement adaptée au domaine industriel. Cette approche permet de détecter efficacement les défauts internes sans altérer les matériaux étudiés, offrant ainsi un outil précieux pour le contrôle et la maintenance dans les secteurs industriels.

Grâce à cette méthode, nous avons pu établir des profils de scans gamma de la colonne examinée afin d'analyser et d'étudier ses différents composants, en utilisant une source isotrope scellée émettant des rayons gamma Cs-137.

Le processus d'analyse repose sur la comparaison entre le spectre de référence et celui présentant un défaut crié dans la colonne, révélant des écarts significatifs d'atténuation qui attestent la présence d'anomalies. D'après les résultats trouvés, les différents problèmes étudiés ont été identifier avec une plus grande précision en se basant sur la variation moyenne de l'atténuation.

Les profils de balayage automatique réalisés à l'aide de la source de césium ont permis de mieux détecter les défauts. L'analyse de l'atténuation des rayons gamma traversant la colonne a permis de mettre en lumière plusieurs phénomènes physiques () et l'effet des paramètres ciblés par cette étude.

Les différentes études menées, tant en conditions normales que dans des configurations présentant des anomalies, ont démontré que :

- L'atténuation du rayonnement est fortement influencée par la structure interne de la colonne, ce qui facilite l'identification d'anomalies localisées.
- Le bruit de fond enregistré en l'absence d'obstacles (plateaux) était relativement faible et stable, témoignant de la fiabilité du système de détection, bien qu'il doive être pris en compte lors de l'analyse des variations mineures.
- L'effet de la haute tension (HT) sur les mesures d'atténuation a été clairement observé. Une augmentation de la HT, et donc de l'énergie des photons, entraîne une diminution de l'atténuation apparente, liée à la baisse du coefficient d'absorption des matériaux à haute énergie. Ce phénomène souligne la nécessité de normaliser la HT lors des acquisitions afin de garantir une comparaison cohérente des résultats.

- Les résultats trouvés mettent en évidence l'importance d'un contrôle rigoureux des conditions expérimentales pour assurer la fiabilité des mesures et permettre une comparaison pertinente des atténuations.
- Scanner la colonne à plateaux selon deux positions dans les mêmes conditions améliore la précision, la fiabilité et la qualité de l'analyse, tout en facilitant la détection et la localisation des défauts.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Walinjar and G. Singh, 'Dual energy gamma scanning technique to analyze condition of distillation columns', 2011. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 669-672.
- [2] K. Laraki, R. Alami, R. Cherkaoui El Moursli, A. Bensitel, and L. El Badri, 'An expert system for improving the gamma-ray scanning technique', 2007. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 578(1) :340-344
- [3] A. Ahmad, 'Développement d'une méthode méthodologie d'analyse par spectrométrie gamma et Par activation neutronique pour l'étude de la distribution des radio traceurs et des terres rares dans le sol', 2015. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
- [4] Gleen F. Knoll, 'Book knoll', Radiation Detection and Measurement, 2000, 3rd edition
- [5] D. Samir, 'Etudes expérimentales et simulations monte carlo en spectrométrie gamma', 2013, Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
- [6] E. Gasser, 'Thèse spectrométrie gamma au laboratoire et in situ', 2014, thèse de doctorat, Université de Strasbourg
- [7] M. Nesrine, 'Mesures par spectrométrie gamma de l'activité des radioéléments présents dans différent milieux environnementaux', 2022. Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
- [8] J. Badel, 'Contrôle dosimétrique des traitements radiothérapie par simulation Monte Carlo de l'image de dose portale transmise', 2009, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [9] A. Nachab, 'Etude expérimentales et modélisation monte carlo et l'auto absorption gamma et de la dosimétrie active par capteur CM OS', 2013, Thèse de doctorat, 'Université Louis Pasteur - Strasbourg I, France et de l'Université Chouaïb Doukkali El Jadida, Maroc.
- [10] S. Amel, 'étude paramétrique de scan d'une colonne type avec la technique gamma scanning', 2020, mémoire de master, Université Blida 1.
- [11] K. Rachid, 'Cours académique Dr khelifi', 2024.
- [12] D. Degrelle, 'Caractérisation numérique de la technique de spectrométrie gamma par simulation Monte carlo', 2017, Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté.
- [13] Manus, 'Manus2009', 2009.
- [14] A. Ahmed and M. De Recherche, 'cours académique azzebouch', 2012.
- [15] M. Al Sa'D, J. Graham, G. P. Liney, and C. J. Moore, 'Quantitative comparison of 3D and 2.5D gamma analysis: Introducing gamma angle histograms', 2013. Physics in Medicine & Biology, 58(8) 2597-2608
- [16] A. Mishra, 'Article Gamma Cameras: Exploring the Technology, Applications, and Future Prospects', 2024, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 98 (1) 296–308
- [17] R. Venkataraman, S. Smith, J. Kirkpatrick, and S. Croft, 'Article Minimum Detectable Activity for Tomographic Gamma Scanning System-15648', 2015, WM2015 Conférence, Phoenix, Arizona, USA.
- [18] S. Sugiharto, 'On-line Diagnosing on Trayed Column of Etylene Plant Using Gamma Ray Scanning', 2012. Atom Indonesia, 38(3) 138-146.

BIBLIOGRAPHIE

- [19] B. Azmi and W. J. F. Nuklir, 'Gamma Scanning Technique for Investigating De-Ethanizer Column: On Field Experimental At NGL Plant', 2019. A Scientific Journal for the Applications of Isotopes and Radiation
- [20] Christina, 'Article Non-disruptive & on-line inspection Gamma-ray scanning for troubleshooting, optimisation and predictive maintenance of distillation columns non-disruptive & on-line inspection', 2005. [Online]. Available: <http://www.safan.com>
- [21] M. I. Haraguchi, H. Y. Kim, and W. A. P. Calvo, 'Results of process equipment imaging by tomographic gamma scan', 2018, CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 69.
- [22] IAEA, 'book Industrial Process Gamma Tomography', 2008.
- [23] J. vilela, 'IRSN-fiche_cesium137', 2014, [Online]. Available : https://www.irs.fr/sites/default/files/documents/professionnels_sante/documentation/IRSN-fiche_cesium137.pdf
- [24] IAEA, 'Book Industrial Application of Sealed Radioactive Source', 2020.
- [25] Y. Aamira, 'Automatisation de la technique de scannage par rayonnement gamma', 2010, mémoire de master, école nationale d'ingénieur de Tunis.
- [26] M. AMERICH, 'Radioprotection Cirkus Le portail de la RP pratique et opérationnelle Statistiques simples et Corrections de mesure', 2018. [Online]. Available : www.rpcirkus.org-www.forum-rpcirkus.com
- [27] INRS, 'Le calcul d'incertitude dans les méthodes de mesurage de l'exposition professionnelle Objectif Le calcul d'incertitude', 2015. [Online]. Available : <http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-resultat-calcul-incertitude.pdf><http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/metropol-resultat-calcul-incertitude.pdf>
- [28] O. Massoud, 'Modélisation et détermination expérimentale de l'atténuation ultrasonore dans les matériaux polycristallins', 2020, thèse de doctorat.
- [29] M. Stéphane NORMAND, 'Conception, réalisation et caractérisation d'un dispositif de détection neutronique basé sur l'utilisation de scintillateurs plastiques dopés au Bore', 2001, thèse de doctorat.
- [30] M. Aissani, I. Yahouni, 'Dosimétrie des photons de haute énergie', 2011. Mémoire de mater. Université de Tlemcen.