

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعد دحلب البلدية (1)
Université SAAD DAHLEB-Blida 1



Faculté des Sciences
Département de physique

Mémoire de fin d'études

POUR OBTENIR LE DIPLÔME DE

MASTER EN PHYSIQUE

Domaine : Sciences De la Matière

Option : Physique des Rayonnements

THEME

Détermination expérimentale des concentrations d'éléments légers (C, O) à l'état de traces dans des cibles solides d'oxydes en couches minces via la technique nucléaires d'analyse par faisceaux d'ions (RBS, NRA).

Présenté par :
Bouchelaghem Amal

Soutenu le : 04/07/2024

Devant le jury :

Nom	Grade/Lieu	Qualité
Mr Khelifi.Rachid	Professeur/université Blida	Président
Mme Silhadi.Hana	Chercheur principal/CRNA	Rapportrice
Mme Benarous. Samiha	Chercheur principal/ CRNA	Examinatrice

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement le Directeur Général du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) Dr. Abderrahim GUITTOUM pour m'avoir accordée l'accès nécessaire pour effectuer mon stage de master au sein de CRNA. Cette opportunité a été cruciale pour le bon déroulement de mon mémoire de master.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à ma directrice de mémoire, Dr. SILHADI Hana, Chercheur Principal au CRNA, pour son encadrement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail. Ses encouragements et son expertise ont été d'une grande aide dans l'aboutissement de ce mémoire de master.

Je remercie sincèrement les membres du jury, Dr. Benarous Samiha, Chercheur Principal au CRNA et Monsieur KHELIFI Rachid, Professeur à université Blida 1, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et d'assumer les rôles d'examinatrice et de président du jury, respectivement. Leurs expertises et leurs remarques constructives sont grandement appréciées.

Je tiens à remercier le personnel de l'accélérateur V.D.G de centre de recherche d'Alger pour leur assistance technique et leur disponibilité. Un remerciement particulier à Monsieur Ster Mammeri, chercheur expert au CRNA, pour son temps, ses précieux conseils et son aide tout au long de cette étude.

Je voudrais également exprimer ma gratitude à mes collègues et à mes enseignants pour leur soutien continu, leurs conseils précieux et leur collaboration tout au long de mon parcours à l'université. Leur aide et leurs encouragements ont été essentiels pour mener à bien ce travail.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien et leur collaboration ont été inestimables.

ملخص

ل طرق التحليل باستخدام الحزم الايونية، المستمدة من الفيزياء النووية تطبيقات عديدة في فيزياء المواد والحماية من الإشعاع

والفيزياء الطبية. حيث تعتمد هذه الطرق على التفاعل بين الأيونات السريعة وذرات المادة، مما يسمح بجمع معلومات تفصيلية حول السُمك و الستويكيومترية والتركيب العنصري.

تسمح تقنية قياس طيف التشتت الخلفي لردفورد RBS وتقنية تحليل التفاعل النووي (NRA) من تحديد تراكيز العناصر الخفيفة مثل الكربون والأكسجين في أهداف صلبة من الأكاسيد مثل SiO_2/Si و $SnO_2/Bi/Si$. حيث يستخدم ثاني أكسيد السيليكون بشكل خاص في تطبيقات تكنولوجية متنوعة بسبب مقاومته للبيئات ذات الإشعاعات الشديدة.

تتميز تقنية NRA بكفاءة عالية في الكشف عن العناصر الخفيفة ونظائرها وتحديد كمياتها، على الرغم من تفاوت حساسيتها.

ان التجارب التي أُجريت سمحت بجمع بيانات قيمة لتطوير تقنيات تحليل المواد بالحزم الايونية، مما يُظهر فعالية وتحديات تقنيي NRA وRBS فالنتائج التي تم الحصول عليها تفتح آفاقًا جديدة لتحسين عمليات التصنيع وتوصيف المواد المعقدة.

الكلمات المفتاحية: التقنيات النووية، قياس طيف التشتت الخلفي لردفورد (RBS)، تحليل التفاعل النووي (NRA)، الستويكيومترية، السُمك، تركيزات العناصر.

ABSTRACT

Ion beam analysis methods, derived from nuclear physics, find numerous applications in materials physics, radioprotection, and medical physics. These methods rely on the interaction between fast ions and the atoms of the material, allowing the collection of detailed information on thickness, stoichiometry, and elemental composition. RBS and NRA techniques enable the experimental determination of light element concentrations, such as Carbon and Oxygen, in solid oxide targets like SiO₂/Si and SnO₂/Bi/Si. Silicon dioxide, in particular, is widely used in various technological applications due to its resistance to intense radiation environments. The NRA technique is particularly effective in detecting and quantifying light elements and their isotopes, despite its variable sensitivity. The experiments conducted have provided valuable data for improving ion beam analysis techniques, demonstrating the effectiveness and challenges associated with NRA and RBS. The results obtained open new perspectives for optimisations manufacturing processes and characterizing complex materials.

Keywords : Nuclear Techniques, Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS), Nuclear Reaction Analysis (NRA), Stoichiometry, Thickness, Elemental Concentrations.

Résumé

Les méthodes d'analyse par faisceau d'ions, issues de la physique nucléaire, trouvent de nombreuses applications en physique des matériaux, radioprotection et physique médicale. Elles reposent sur l'interaction entre des ions rapides et les atomes du matériau, permettant de récolter des informations détaillées sur l'épaisseur, la stœchiométrie et la composition élémentaire. Les techniques RBS et NRA permettent de déterminer expérimentalement les concentrations d'éléments légers comme le carbone et l'oxygène dans des cibles solides d'oxydes telles que SiO_2/Si et $\text{SnO}_2/\text{Bi}/\text{Si}$. Le dioxyde de silicium, en particulier, est largement utilisé dans diverses applications technologiques en raison de sa résistance aux environnements de rayonnements intenses. La technique NRA est particulièrement efficace pour détecter et quantifier les éléments légers et leurs isotopes, malgré sa sensibilité variable. Les expériences réalisées ont permis de recueillir des données précieuses pour l'amélioration des techniques d'analyse des matériaux par faisceau d'ions, démontrant l'efficacité et les défis associés à la NRA et à la RBS. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optimisation des procédés de fabrication et la caractérisation des matériaux complexes.

Mots clés : Techniques Nucléaires, Spectrométrie de Rétrodiffusion de Rutherford (RBS), Analyse par Réactions Nucléaires (NRA), Stœchiométrie, épaisseur, concentrations élémentaires.

Liste des tableaux

Tableau.1. Réaction nucléaire induit par les deutons sur des éléments de Carbone, Oxygène et l'Azote.....	19
Tableau II-1 Récapitulatif des conditions expérimentales utilisées lors de l'analyse RBS.....	28
Tableau. II-2 Valeurs des facteurs cinématiques et des énergies de rétrodiffusion calculées à partir de la relation (I-2).....	28
Tableau. II-3 : Tableau présentatif des valeurs de pouvoir d'arrêt, d'énergie de rétrodiffusion et les épaisseurs déterminées via un calcul théorique et via SIMNRA pour les deux cibles (Au/Si et SiO ₂ /Si).....	31
Tableau. III-1 :Tableau récapitulatif des conditions expérimentales utilisées lors de l'analyse RBS.....	36
Tableau. III-2 : descriptif du facteur cinématique, l'énergie de rétrodiffusion et le canal de Surface pour chaque élément présent dans les cibles étudiées.....	37
Tableau. III-3 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (Bi/SnO ₂ /Si) via la simulation par le code SIMNRA	40
Tableau. III-4 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (SiO ₂ /Si) via la simulation par le code SIMNRA.....	40
Tableau. III-5 : Les conditions expérimentales pour l'analyse NRA.....	41
Tableau III-6 : Tableau récapitulatif de différentes réactions nucléaires observées lors de l'analyse par NRA pour la couche SiO ₂ /Si à une énergie de deutons de 950 keV et à un angle de diffusion de 150°	41
Tableau. III-4 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (BiSnO ₂ /Si) via la simulation par le code SIMNRA des spectre NRA.....	44

Liste des figures

Figure.I.1 : Méthodes nucléaires d'analyse par faisceaux d'ions.....	03
Figure.I.2 :Schéma illustratif de la cinématique de diffusion dans le référentiel du Laboratoire (L).....	05
Figure.I.3 : Schéma descriptif de la section efficace de Rutherford.....	07
Figure.I.4 : Cinématique de collisions de la technique nucléaire RBS.....	08
Figure.I.5. Image présentant le mode d'utilisation du code SRIM-2013 pour le calcul de pouvoir d'arrêt.....	09
Figure.I.6. Pouvoirs d'arrêt électronique et nucléaire calculés par le code SRIM pour des ions He+ incidents sur différentes cibles solides (C, Si, Cu, Sn, Bi).....	10
Figure.I.7 : Variation du facteur cinématique en fonction de l'angle de diffusion (θ) et de la masse de la cible (M2).....	12
Figure.I.8. Schéma descriptif du phénomène de straggling dit "étalement énergétique"	13
Figure. I.9. Schéma du principe physique de la méthode NRA.....	14
Figure.10 : Schéma illustratif de la désintégration du noyau composé.....	15
Figure.11 : Cinématique de collisions dans le système du Laboratoire.....	18
Figure.12 : Définition de la section efficace d'une réaction nucléaire.....	20
Figure.14 : Schéma descriptif du principe d'évaporation thermique via un canon-à-électrons.....	23
Figure.15 : Représentation schématique de l'accélérateur Van de Graaf de 3.75 MV d'Alger	24
Figure.16 : Une vue intérieure de la chambre à réaction utilisée dans ce travail.....	26
Figure.17 : Schéma de l'ensemble expérimental (électronique).....	27
Figure II-6 : Schéma descriptif du processus de rétrodiffusion des ions sur une couche mince.....	29
Figure II-6. Exemple d'un spectre RBS obtenu pour une cible de Au/Si en montrant la position des numéros de canal C0 et Cx sur le spectre.....	29
Figure II-7 : droite d'étalonnage de la chaîne de détection de la technique RBS.....	30
Figure II-8 : un spectre RBS relatif à la cible (SiO2/Si).....	32
Figure. II-9 : Schéma descriptif de la géométrie de détection utilisée par le code SIMNRA.....	32
Figure III-1 : Une prise d'écran du logiciel SIMNRA montrant la manière comment introduire les conditions expérimentales et la procédure de simulation d'un spectre RBS avant l'ajustement.....	35

Figure III-2 : Une prise d'écran du logiciel SIMNRA de simulation du spectre RBS si dessus après l'ajustement.....	35
Figure. III-3 : étalonnage de la chaine de détection de la technique RBS.....	38
FigureIII-4: Une prise d'écran du logiciel SIMNRA montrant la procédure de simulation du spectre RBS de la cible Bi/SnO2/Si.....	39
FigureIII-6. Le spectres RBS expérimental et simulait par le code SMINRA de la cible Bi/SnO2/Si rapporté sur le logiciel origine.....	39
Figure. III-3 : Droite d'étalonnage de la chaine de détection dans le cas de l'analyse NRA.....	42
Figure. III-4 : Spectre expérimentale NRA obtenu à un angle $\theta=150^\circ$ par rapport à la direction initiale d'un faisceau $2H^+$ d'énergie 950 keV SiO2/Si.....	43
Figure. III-5 : Spectre expérimentale NRA obtenu à un angle $\theta=150^\circ$ par rapport à la direction initiale d'un faisceau $2H^+$ d'énergie 950 keV pour un cible Bi/SiO2/Si.....	43

Sommaire

Remerciement	
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Rappels théoriques sur les techniques nucléaires d'analyse par faisceaux d'ions	
Introduction.....	03
1.1 Technique de rétrodiffusion de Rutherford (RBS).....	04
1.1.1 Principe de fonctionnement.....	04
1.1.2 Cinématiques de collisions.....	04
1.1.1.1 Le facteur cinématique.....	04
1.1.1.2 La section efficace différentielle de diffusion de Rutherford.....	06
1.1.1.3 Section efficace de diffusion de non-Rutherford.....	07
1.1.2 Perte d'énergie et pouvoir d'arrêt des ions dans la matière.....	08
1.1.2. Sensibilité de la technique RBS.....	11
1.1.2.1. Résolution en énergie.....	11
1.1.2.1 La résolution en masse.....	11
1.1.2.2 Résolution en profondeur	12
1.2 Technique d'analyse par réactions nucléaires NRA.....	13
1.2.1 Principe de fonctionnement.....	14
1.2.2 Lois de conservations et bilan énergétique.....	16
1.2.3 Cinématique de collisions.....	16
1.2.4 Les réactions induites par les deutons.....	18
1.2.5 Sections efficaces des réactions nucléaires induites par les deutérons.....	19
Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.....	22
II.1. Préparation des échantillons cibles utilisés.....	22
II.2 Dispositif expérimental d'analyse.....	23
II.2.1 L'accélérateur Van de Graaff (V.D.G.).....	23
II.2.2 Chambre à diffusion.....	25
II.2.3 Chaîne de détection.....	26
II.3 Mode opératoire pour l'analyse par faisceau d'ions	26
II.3.1. Analyse RBS.....	26

II.3.2. Analyse NRA.....	27
II.3.3. L'étalonnage de la chaine de détection.....	27
II.4 Détermination de l'épaisseur via la cinématique de collisions.....	30
II.5. Simulation des spectres expérimentaux via le code simulation SIMNRA.....	32
II.5.1 Introductions des conditions de l'expérience.....	33
Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion.....	34
III.1. Analyse RBS	36
III.1.1 L'étalonnage de la chaine de détection pour l'analyse RBS	36
III.2.1. Etalonnage de la chaine de détection pour l'analyse NRA.....	41
III.2.2. Simulation des spectres par SIMNRA.....	42
Conclusion générale.....	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	46

Introduction générale

Les méthodes d'analyse par faisceau d'ions, issues de la physique nucléaire, ont trouvé de nombreuses applications en physique Nucléaires et Physique des matériaux, en radioprotection et physique médicale. Ces techniques reposent sur l'interaction atomique ou nucléaire entre des ions rapides (énergies de l'ordre du MeV) et les atomes constituant le matériau à analyser. Lorsque ces ions interagissent avec la matière, ils subissent un ralentissement et une modification de leur trajectoire (rétrodiffusion), accompagnés de l'émission de rayonnements X, γ ou de particules légères provenant du matériau cible. L'analyse spectroscopique des produits secondaires permet de récolter des informations détaillées sur le matériau, telles que son épaisseur, sa stœchiométrie, l'identification des éléments présents en surface ou en profondeur, ainsi que la quantification d'éléments légers à l'état de trace.

Les principaux avantages de l'analyse par faisceau d'ions résident dans leur caractère non destructif pour la plupart des matériaux, leur faible sensibilité aux effets de matrice et leur capacité quantitative absolue. Parmi les techniques reposant sur les produits secondaires de l'interaction particule chargée-matière, on trouve la diffusion élastique, la rétrodiffusion de Rutherford (RBS), la diffusion des noyaux de recul (ERDA), ainsi que les réactions nucléaires (NRA), l'émission des rayons X (PIXE) et des rayons γ (PIGE). Ce mémoire se concentre spécifiquement sur deux techniques nucléaires d'analyse, à savoir, la NRA et la RBS.

L'objectif de ce travail est de déterminer expérimentalement les concentrations d'éléments légers (C, O) à l'état de traces dans différentes cibles solides d'oxydes (SiO_2/Si , $\text{SnO}_2/\text{Bi}/\text{Si}$) en utilisant les deux techniques d'analyse par rétrodiffusion RBS et par réactions nucléaires (NRA). Plus précisément, nous avons ciblé deux types d'échantillons : une couche mince de dioxyde de silicium (SiO_2) déposée sur du silicium (Si) et une autre du dioxyde d'étain (SnO_2) déposée sur le bismuth et un substrat de silicium (Si).

Le dioxyde de silicium (SiO_2) a suscité une attention considérable ces dernières années car est largement utilisé dans plusieurs applications technologiques, notamment, dans les dispositifs d'analyse et de détection opérant dans des environnements de rayonnements intenses et au niveau des installations nucléaires lourdes.

. La technique NRA se distingue par sa capacité à détecter et quantifier les éléments légers jusqu'à l'hydrogène et même leurs isotopes, ce qui est un avantage par rapport à la RBS qui présente des

INTRODUCTION GENERAL

limitations de résolution en masse pour ces éléments. Toutefois, la sensibilité de la NRA n'est pas constante et dépend de l'existence de réactions nucléaires spécifiques pour chaque élément à détecter.

Ce mémoire est structuré en trois étapes principales. La première étape consiste en une recherche bibliographique approfondie sur les techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions, en particulier, la RBS et la NRA. Ce paragraphe fournit un aperçu théorique des principes sous-jacents et du fonctionnement de ces deux méthodes, ainsi que leurs avantages et limitations respectifs. Nous examinons comment ces techniques permettent de sonder la composition et la structure des matériaux à différentes échelles de profondeur.

La deuxième étape est dédiée à la description des dispositifs expérimentaux utilisés pour l'analyse par faisceau d'ions. Nous décrivons en détail les équipements et les paramètres expérimentaux employés dans nos études, ainsi que les ajustements nécessaires pour optimiser la précision et la sensibilité des mesures. Cette section inclut également une discussion sur les codes de simulation et les logiciels utilisés, comme SIMNRA, qui permettent de modéliser et d'interpréter les résultats expérimentaux avec une grande précision.

La dernière étape du mémoire présente les spectres expérimentaux obtenus par NRA et RBS, suivis de leur analyse et interprétation à l'aide de simulations numériques. Nous comparons les résultats obtenus pour les deux types d'échantillons étudiés, mettant en évidence les différences et les similarités observées. Ce paragraphe inclut une discussion approfondie des résultats, avec une évaluation critique des données et des conclusions tirées de ces analyses.

Les spectres expérimentaux NRA utilisés dans ce travail ont été obtenus lors d'expériences réalisées au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA), en utilisant des ions $^2\text{H}^+$ et $^4\text{He}^+$ d'énergies de l'ordre du MeV. Ces expériences ont permis de collecter des données précieuses pour la compréhension et la quantification des éléments légers dans les matériaux étudiés. Le but ultime de ce travail est de contribuer à l'amélioration des techniques d'analyse des matériaux par faisceau d'ions, en mettant en évidence les potentialités et les défis associés à la NRA et à la RBS pour l'étude des couches minces et des matériaux massifs.

Ce mémoire vise non seulement à fournir une compréhension approfondie des principes et des applications de la NRA et de la RBS, mais également à démontrer leur efficacité dans l'analyse des matériaux complexes. Les résultats obtenus devraient offrir des perspectives nouvelles pour l'optimisation des procédés de fabrication et de caractérisation des matériaux, tout en ouvrant des voies pour de futures recherches dans ce domaine fascinant et en constante évolution.

**Chapitre I : Rappels théoriques sur les techniques nucléaires d'analyse par
faisceaux d'ions**

Introduction

Les méthodes d'analyse par faisceau d'ions, désignées fréquemment par l'acronyme IBA (Ion Beam Analysis), sont initialement dérivées des expériences de la physique nucléaire[1]. Elles reposent sur l'interaction entre des ions légers rapides (de l'ordre du MeV) produits par un accélérateur de particules et les atomes constituant le matériau à analyser. Lorsque ces ions incidents traversent la matière, ils subissent un ralentissement et une altération de leur trajectoire (rétrodiffusion), accompagnés de l'émission de rayonnements X, γ ou de particules légères, qui proviennent de l'interaction de type atomique (coulombienne) ou par réaction nucléaire. Il est possible d'obtenir une variété d'informations sur le matériau soumis au bombardement ionique en détectant et analysant ces produits secondaires via l'analyse spectrométrique, telles que son épaisseur, sa composition chimique et l'identification de tout élément présent en surface ou en profondeur (profilage), ainsi que la quantification des constituants légers à l'état de traces. Différentes techniques d'analyses nucléaires par faisceaux d'ions peuvent être mentionnées selon la nature et la méthode de détection des particules émises lors de ces interactions ion-matière (RBS, NRA, ERDA, PIXE, PIGE, IBIL, etc..., voir figure.I.1 ci-dessus).

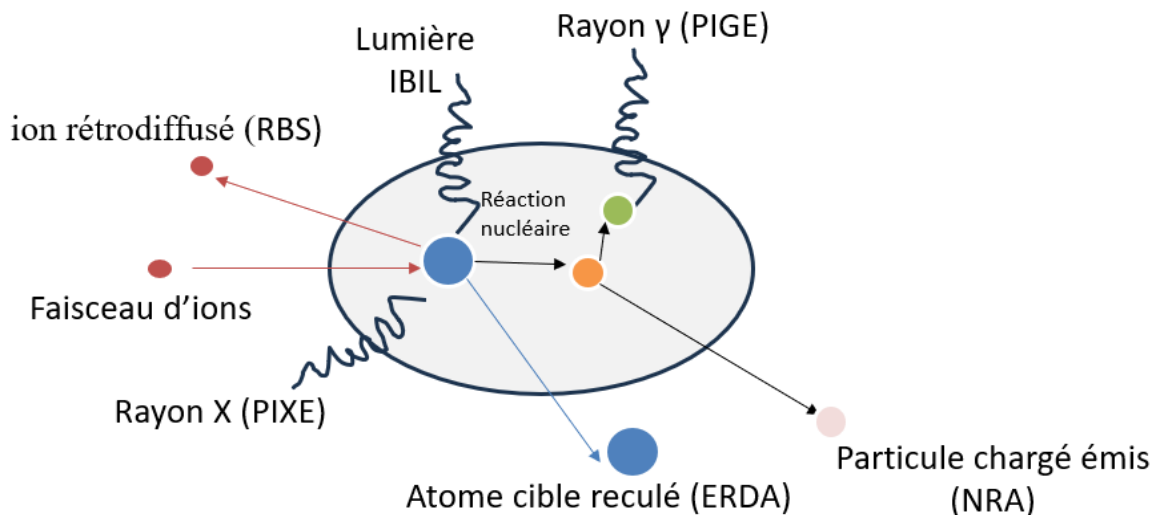


Figure.I.1 : Méthodes nucléaires d'analyse par faisceaux d'ions.

1.1 Technique de rétrodiffusion de Rutherford (RBS)

1.1.1 Principe de fonctionnement

La technique d'analyse nucléaire RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) a été mise en évidence pour la première fois en 1911 par Ernest Rutherford [2]. Cette méthode d'analyse non

destructive, qui n'induit pas de pulvérisation en surface, est basée sur l'utilisation des faisceaux d'ions légers (H^+ , He^+) des énergies de l'ordre du MeV pour déterminer les épaisseurs et la composition élémentaire des matériaux cibles étudiés. Son principe de base consiste à détecter les ions rétrodiffusés à des angles de diffusion élevés (proche de 180°) après l'interaction avec les noyaux des atomes cibles du matériau à analyser. La connaissance préalable de l'angle de diffusion (ou de détection) permet d'identifier qualitativement les éléments présents à différentes profondeurs, donc il n'est pas nécessaire d'utiliser un standard (ou référence) comme d'autres techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions, telles que la PIXE. Cependant, la technique RBS est mieux adaptée pour l'analyse des couches minces (c.-à-d., de l'ordre du nanomètre jusqu'à quelques micromètres) et la détection d'impuretés ainsi que l'étude des profils d'implantation ionique dans les matériaux solides à étudier[3]. Cette technique permet aussi une étude quantitative via la détermination de l'épaisseur de la cible et les concentrations des éléments présents dans la matrice.

Ainsi, la technique d'analyse RBS repose sur les concepts physiques suivants [4] :

- le facteur cinématique,
- la section efficace de Rutherford,
- le pouvoir d'arrêt,
- Les fluctuations statistiques de la perte d'énergie.

Ces concepts physiques seront synthétisés dans les paragraphes suivants.

1.1.2 Cinématiques de collisions

1.1.1.1 Le facteur cinématique

La méthode RBS, est basée sur la rétrodiffusion élastique de particules chargées incidentes (Z_1, M_1), généralement légères d'énergie de l'ordre de quelques MeV suite à une interaction coulombienne avec un noyau de l'échantillon-cible (Z_2, M_2) . Il faut pour se faire que la distance entre les deux noyaux reste plus grande que les distances caractéristiques des forces nucléaires[2]

Dans ce cas-là, nous prenons en compte la collision d'une particule "ion" énergétique de masse M_1 et de vitesse initiale V_0 d'énergie E_0 , ($E_0 = \frac{1}{2} M_1 V_0^2$) avec une particule cible de masse M_2 , qui est initialement au repos dans le référentiel du laboratoire (voir Figure I-1). L'ion incident est rétrodiffusé à un angle de diffusion θ avec une vitesse V_1 d'énergie E_1 ($E_1 = \frac{1}{2} M_1 V_1^2$),

et l'atome cible est dévié à un angle de recul φ où il atteint une vitesse V_2 d'énergie E_2 .

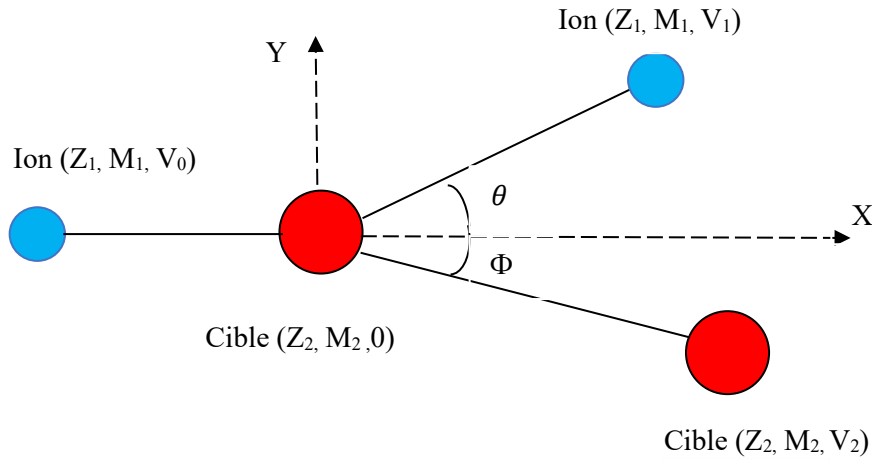


Figure.I.2 : Schéma illustratif de la cinématique de diffusion dans le référentiel du Laboratoire (L).

La conservation de l'énergie cinétique et la conservation de la quantité de mouvement sont exprimées par les équations suivantes :

$$\frac{1}{2} M_1 V_0^2 = \frac{1}{2} M_1 V_1^2 + \frac{1}{2} M_2 V_2^2, \quad (I-1)$$

$$M_1 V_0 = M_1 V_1 \cos \theta + M_2 V_2 \cos \Phi \quad \text{et} \quad 0 = M_1 V_1 \sin \theta - M_2 V_2 \sin \Phi, \quad (I-2)$$

En éliminant \$\Phi\$ et \$V_2\$ on peut établir la relation suivante :

$$\frac{V_1}{V_0} = \mp \frac{\sqrt{M_1^2 - M_2^2 \sin^2 \theta} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2}. \quad (I-3)$$

Nos hypothèses de départ que \$M_1 < M_2\$ le facteur cinématique \$K\$ est défini comme le rapport de l'énergie du projectile avant et après la collision sous la forme suivante[3] :

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \frac{V_1^2}{V_0^2} = \left[\frac{\sqrt{M_1^2 - M_2^2 \sin^2 \theta} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right]^2. \quad (I-4)$$

Le facteur cinématique \$K\$ mesure la variation d'énergie, il dépend de la masse du noyau cible \$M_2\$, de la masse de la particule incidente \$M_1\$ et de l'angle de rétrodiffusion \$\theta\$. D'après la relation (I-4), nous remarquons que lorsque le facteur cinématique est inférieur à l'unité (\$K < 1\$), cela peut indiquer certaines caractéristiques de la collision, telles que la direction de dispersion des particules après l'interaction[1]. Par exemple, Si \$M_1 = M_2\$, la valeur de \$K_{cin}\$ est nulle pour \$\theta = 90^\circ\$. Pour la condition \$M_1 > M_2\$, le projectile dispersé vers l'avant.

D'autre part, l'énergie transférée par le projectile à l'atome cible est donnée par :

$$\Delta E = E_0 - E_1 = E_0 \left[1 - \left(\frac{\sqrt{M_1^2 - M_2^2 \sin^2 \theta} + M_1 \cos \theta}{M_1 + M_2} \right)^2 \right] \quad (I-5)$$

Dans les expériences d'analyse RBS, l'énergie initiale E_0 et la masse M_1 de l'ion incident sont des paramètres connus expérimentalement. Lorsque l'ion incident interagit avec la cible et subit une rétrodiffusion, son énergie après la diffusion E_1 est mesurée à un angle de diffusion θ à l'aide d'un détecteur. Dans ce contexte, le seul paramètre inconnu est la masse de l'atome cible M_2 . En mesurant l'énergie de l'ion rétrodiffusé et en connaissant les autres paramètres tels que l'énergie initiale de l'ion incident et l'angle de diffusion, il est possible de déterminer la masse de l'atome cible en utilisant des relations cinématiques. En exploitant le facteur cinématique et en analysant les données expérimentales de rétrodiffusion, il est donc possible d'identifier les éléments présents dans la cible en déterminant la masse de l'atome cible M_2 .

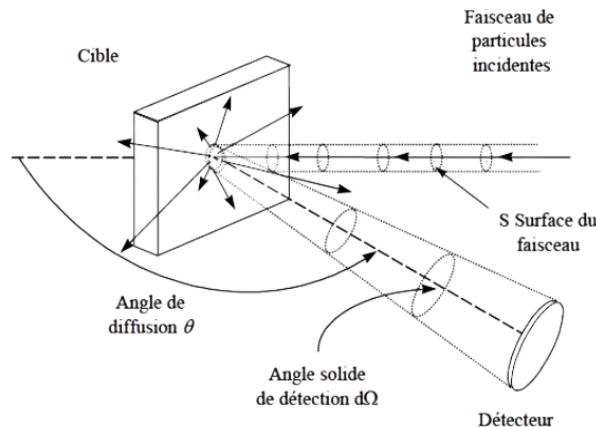


Figure.I.3 : Schéma descriptif de la section efficace de Rutherford

1.1.1.2 La section efficace différentielle de diffusion de Rutherford

La section efficace différentielle de diffusion de Rutherford notée $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)$ est une grandeur physique assimilée à une surface, liée à la probabilité pour que la particule incidente soit diffusée dans un angle solide spécifique après interaction avec la cible.[5] Elle est habituellement exprimée en unité de barn (10^{-24} cm^{-2}).

Pour calculer la section efficace de collision élastique entre un projectile (de masse M_1 et de charge Z_1) et le noyau d'un atome (de masse M_2 et de charge Z_2) on considère que :

- L'interaction entre les noyaux est purement coulombienne.
- L'influence des électrons sur la trajectoire de la particule incidente est négligeable.

Pour une interaction purement coulombienne, la section efficace de diffusion de Rutherford, s'écrit dans le système du laboratoire comme :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{4}{\sin^4 \theta} \frac{\left[\sqrt{M_1^2 - M_2^2 \sin^2 \theta} + M_1 \cos \theta \right]^2}{\sqrt{M_1^2 - M_2^2 \sin^2 \theta}}, \quad (I-6)$$

Avec Z_1 et Z_2 sont, respectivement, les numéros atomiques de l'ion incident et de l'atome cible et e la charge élémentaire de l'électron ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ c). D'après la relation (I-6), nous remarquons que la probabilité de diffusion augmente avec la charge du noyau et diminue avec l'augmentation de l'énergie cinétique des particules incidentes et l'angle de diffusion. Ce qui signifie que la méthode RBS est plus efficace à détecter les éléments lourds que les éléments légers ($Z < 13$) constituant la cible.

1.1.1.3 Section efficace de diffusion de non-Rutherford

Les sections efficaces deviennent non-Rutherford si les forces nucléaires entre le projectile et les noyaux cibles deviennent importantes[6]. Cela se produit à des énergies incidentes élevées, à des angles de diffusion élevés (θ) et à de faibles valeurs de Z_2 ($Z \leq 16$). Pour des énergies suffisamment élevées, la distance d'approche entre le projectile et les noyaux cibles se réduit aux dimensions de la taille du noyau, par conséquent les forces nucléaires à courte portée commencent alors à influencer le processus de diffusion et des écarts par rapport aux sections efficaces de Rutherford également de kE_0 . Lorsque les conditions expérimentales impliquent des énergies élevées ou des éléments légers ($Z \leq 16$), les effets de résonance non-Rutherford deviennent significatifs et peuvent entraîner des variations importantes dans la section efficace de diffusion. Ces effets peuvent être observés lors des expériences de rétrodiffusion élastique à haute énergie.

La section efficace de diffusion de non-Rutherford est généralement exprimée en fonction de la section efficace de diffusion de Rutherford, avec un facteur de correction F qui tient en compte des interactions non coulombiennes et des effets de résonance. La relation générale entre les deux sections efficaces de diffusion de non-Rutherford (σ_{NR}) et de Rutherford (σ_R) peut être formulée comme suit :

$$\sigma_{NR} = F \times \sigma_R, \quad (I-7a)$$

Où F est un facteur de correction où la section efficace de diffusion de non-Rutherford donné par la relation suivante:

$$F = 1 - 0.049 Z_1 Z_2^3 / E_c, \quad (I-7b)$$

où E_c est l'énergie de la particule dans le repère du centre de masse.

1.1.2 Perte d'énergie et pouvoir d'arrêt des ions dans la matière

Lorsqu'une particule chargée énergétique d'énergie E_0 pénètre dans une cible solide d'épaisseur Δx , elle interagit avec les atomes et les électrons de la cible, ce qui entraîne une perte d'énergie de la particule. Cette perte d'énergie se produit à travers une série de collisions élastiques et inélastiques avec les atomes et les électrons de la cible. La perte d'énergie moyenne par unité de distance parcourue est appelée pouvoir d'arrêt et est généralement notée $\frac{dE}{dx}$ [3].

En RBS, l'analyse en profondeur est déduite de la perte d'énergie de la particule incidente sur son trajet aller et retour dans la cible (voir figure.I.4).

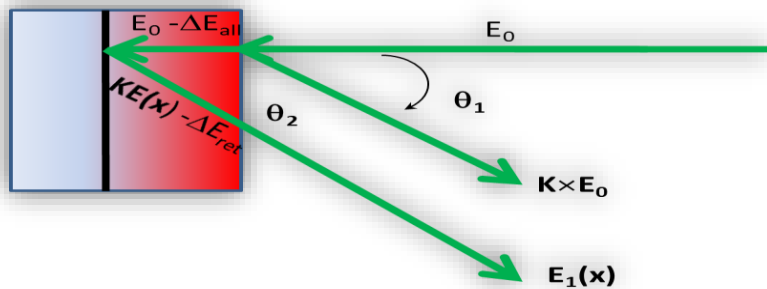


Figure.I.4 : Cinématique de collisions de la technique nucléaire RBS.

Le pouvoir d'arrêt des ions dans la matière peut être exprimé en termes de deux composantes principales :

- **La perte d'énergie nucléaire (S_n)** : liée à l'interaction élastique avec les noyaux cibles, significative à basse énergie ($\sim keV$),
- **La perte d'énergie électronique (S_e)** : associée à l'interaction inélastique avec les électrons cibles, prédominante à haute énergie de l'ordre du MeV.

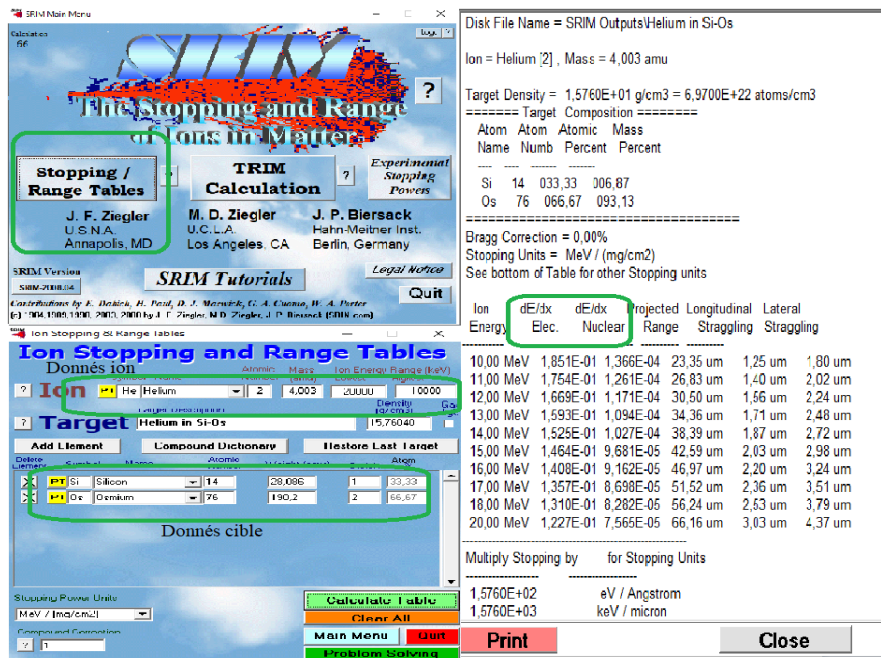


Figure.I.5. Image présentant le mode d'utilisation du code SRIM-2013 pour le calcul de pouvoir d'arrêt.

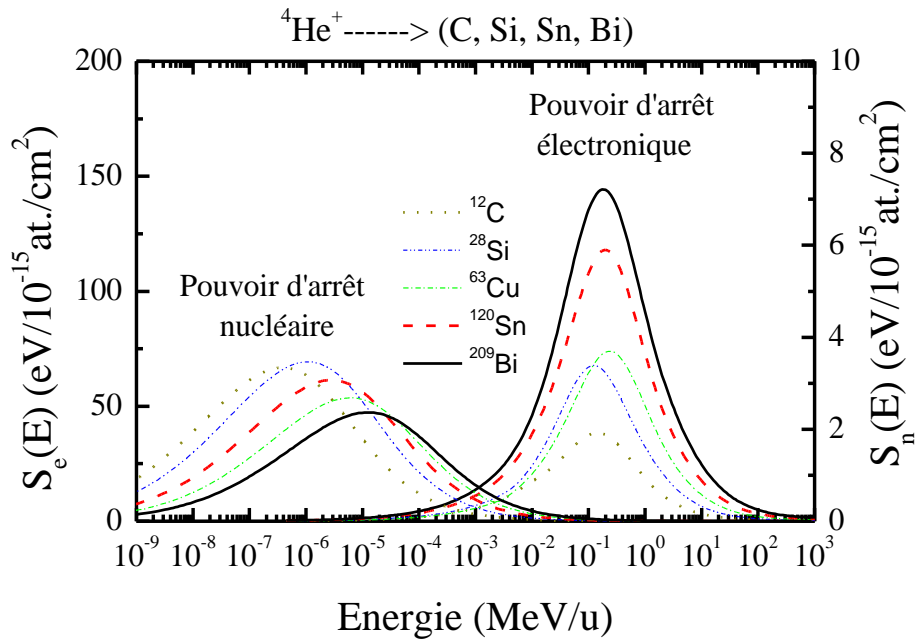


Figure.I.6. Pouvoirs d'arrêt électronique et nucléaire calculés par le code SRIM pour des ions He⁺ incidents sur différentes cibles solides (C, Si, Cu, Sn, Bi).

En combinant ces deux composantes, on peut obtenir une description complète de la manière dont les ions interagissent avec la matière et perdent de l'énergie lors de leur traversée.

$$S(E)_t = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_n + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_e = S_n(E) + S_e(E), \quad (I-8)$$

Le pouvoir d'arrêt peut être exprimé en unité du MeV/ μm comme aussi par l'unité souvent utilisée ($\text{MeV}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{cm}^2$) en divisant la perte d'énergie moyenne perdue par la densité volumique du matériau traversé ρ (g/cm^3).

Plusieurs paramètres interviennent dans le calcul du pouvoir d'arrêt des ions dans la matière, tels que le potentiel d'interaction, les corrections de couches, les effets de densité[7], et l'écrantage de la charge des noyaux cibles, des nombreux modèles théoriques et semi-empiriques développés depuis le début du 20^e siècle jusqu'à nos jours, offrant une estimation très précise du pouvoir d'arrêt dans les matériaux. Voici quelques points importants à considérer concernant les modèles utilisés pour calculer le pouvoir d'arrêt des ions :

Modèles théoriques classiques

- **Modèle de Bethe** : Proposé par Hans Bethe en 1930, ce modèle théorique décrit la perte d'énergie des particules chargées dans la matière en considérant les interactions avec les électrons du matériau.[8]
- **Modèle de Bethe-Bloch** : Une extension du modèle de Bethe qui prend en compte les effets de l'écran électronique et des corrections relativistes pour calculer le pouvoir d'arrêt des ions dans la matière[9].
- **Modèle de Bohr** : Développé par Niels Bohr, ce modèle permet de calculer la perte d'énergie des particules chargées en interaction avec les électrons des atomes du matériau.[5]
- **Modèle de Lindhard et al.** : Un modèle utilisé pour étudier les interactions des ions avec la matière, en prenant en compte les effets de l'écran électronique et les interactions nucléaires.

Approches semi-empiriques modernes :

- **Modèle ZBL (Ziegler, Biersack, Littmark)** : Une approche semi-empirique développée pour calculer le pouvoir d'arrêt des ions avec la matière, en ajustant les données expérimentales via des formules semi-empiriques.
- **Codes de simulation comme SRIM[10]** : Des logiciels de simulation tels que SRIM intègrent le modèle ZBL pour calculer le pouvoir d'arrêt des ions dans divers matériaux en introduisant les conditions expérimentales relatives à l'ion incident (énergie, masse, numéro atomique) et celles de la cible (masse, densité, numéro atomique et composition chimique, etc...).

1.1.2. Sensibilité de la technique RBS

1.1.2.1. Résolution en énergie

La résolution en énergie du système de détection (détecteur et chaîne électronique de détection) joue un rôle majeur dans l'identification des particules qui se trouvent dans la même profondeur et qui ont des masses atomiques similaires. Pour identifier ces particules, il est nécessaire de connaître la résolution en énergie du détecteur. La technique RBS utilise généralement des détecteurs à barrière de surface, basés sur la création de paires électron-trous lors du passage des ions rétrodiffusés dans le détecteur. [1] Le nombre de paires électron-trous créées est proportionnel à l'énergie des ions détectés.

1.1.2.1 La résolution en masse

Cela est dû à la variation de la quantité d'énergie transférée par la particule incidente aux atomes cibles, lorsque M_2 augmente le transfert d'énergie devient minimal de telle sorte que l'énergie des particules rétrodiffusées s'approchera de l'énergie initiale de la particule incidente E_0 [11]. Nous pouvons dire que la méthode RBS est plus sensible à détecter les éléments légers que les éléments lourds. L'énergie et la nature du faisceau incident jouent un rôle crucial dans l'analyse des couches minces par RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry). Le choix de l'énergie du faisceau est essentiel, car il influence directement la profondeur de pénétration des ions dans la cible, en affectant ainsi la sensibilité et la résolution de la technique. De plus, la variation du facteur cinématique en fonction de la masse et de l'angle de diffusion est un élément clé à considérer lors de la sélection de l'énergie du faisceau (voir figure.I.7). Cette variation détermine la capacité de la technique à distinguer les éléments légers des éléments lourds dans la cible, ce qui influence la résolution en masse et en énergie lors de l'analyse RBS.

La quantité d'énergie transférée par la particule incidente aux atomes cibles varie en fonction de la masse de ces atomes. Lorsque la masse M_2 augmente, le transfert d'énergie devient minimal, ce qui fait que l'énergie des particules rétrodiffusées se rapproche de l'énergie initiale de la particule incidente E_0 . En conséquence, la méthode RBS est plus sensible à la détection des éléments légers que des éléments lourds. Par ailleurs, si en dérivant $E_1 = K_{cin}E$ par rapport à M_2 , nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta E = E_0 \left(\frac{dK}{dM_2} \right) \Delta M_2 \quad (I-9)$$

où ΔM_2 et ΔE sont, respectivement, la résolution en masse et en énergie du détecteur.

Lorsque l'échantillon contient deux isotopes d'un même élément avec une faible différence de masse, la capacité de distinguer et de séparer ces isotopes est ce qu'on appelle la résolution en masse de la

technique RBS. Cette résolution en masse est un paramètre important pour identifier et quantifier les isotopes présents dans un échantillon.

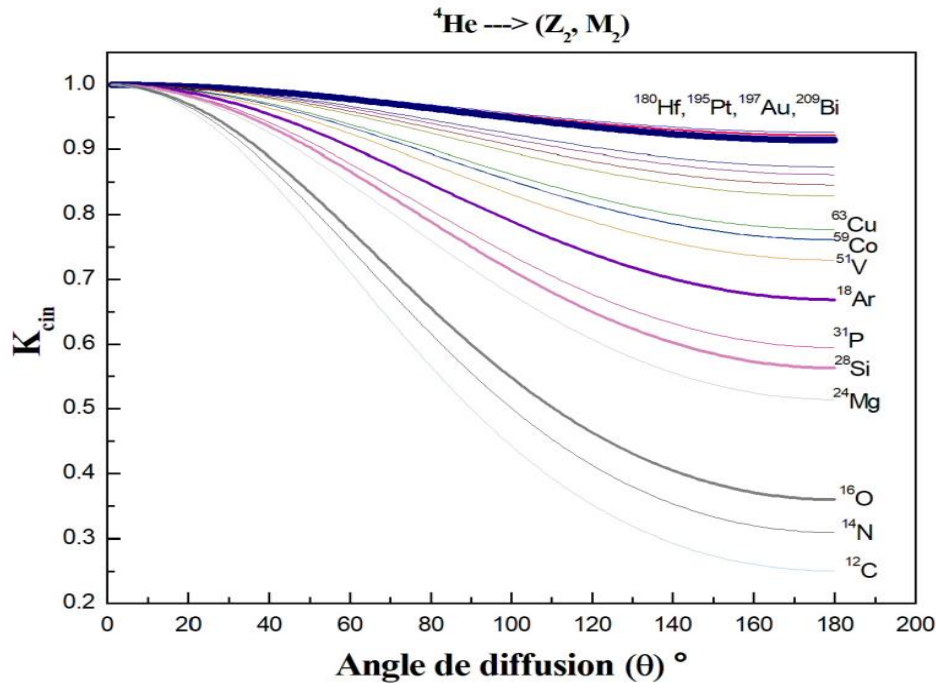


Figure.I.7 : Variation du facteur cinématique en fonction de l'angle de diffusion (θ) et de la masse de la cible (M_2).

1.1.2.2 Résolution en profondeur

Lors du passage d'un faisceau d'ions énergétique à travers une cible solide, son énergie se fait démunie au fur et à mesure qu'il pénètre en profondeur principalement à cause des chocs coulombiens avec les électrons cibles. La perte d'énergie du faisceau incident est distribuée autour d'une valeur moyenne ΔE dont l'importance augmente avec l'épaisseur ΔX (voir figure 8). Cette distribution appelée "straggling" est due aux fluctuations statistiques dans le nombre et la nature des collisions rencontrées par les ions incidents[12]. Les ions incidents monocinétiques à l'entrée de la cible n'auront plus donc la même énergie après avoir atteint une profondeur ΔX . L'effet du straggling est l'un des facteurs dégradants de la résolution en profondeur de la technique d'analyse RBS. La résolution en profondeur dépend de plusieurs facteurs, notamment l'énergie de l'ion incident, la nature du matériau cible et son épaisseur. Une résolution en profondeur plus élevée permet une meilleure discrimination des couches de matériaux solides à différentes profondeurs.

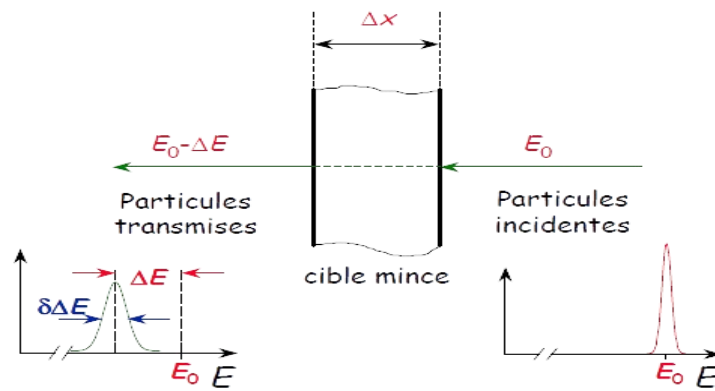


Figure.I.8. Schéma descriptif du phénomène de straggling dit "étalement énergétique"

1.2 Technique d'analyse par réactions nucléaires NRA

La technique d'analyse par réactions nucléaires (NRA) est une méthode d'analyse utilisée pour étudier la composition des matériaux en sondant les noyaux atomiques à l'aide de réactions nucléaires spécifiques[7]. Cette technique repose sur la production de réactions nucléaires induites par des projectiles énergétiques qui interagissent avec les noyaux des cibles, en conduisant à des réactions de transformation des noyaux et à l'émission des particules détectables (Voir figure.I.9). Les particules détectées sont par la suite analysées pour déterminer la composition et la distribution en profondeur des éléments légers jusqu'à l'hydrogène et les isotopes des éléments légers, offrant ainsi une sensibilité de détection variable en fonction des éléments analysés dans l'échantillon[2].

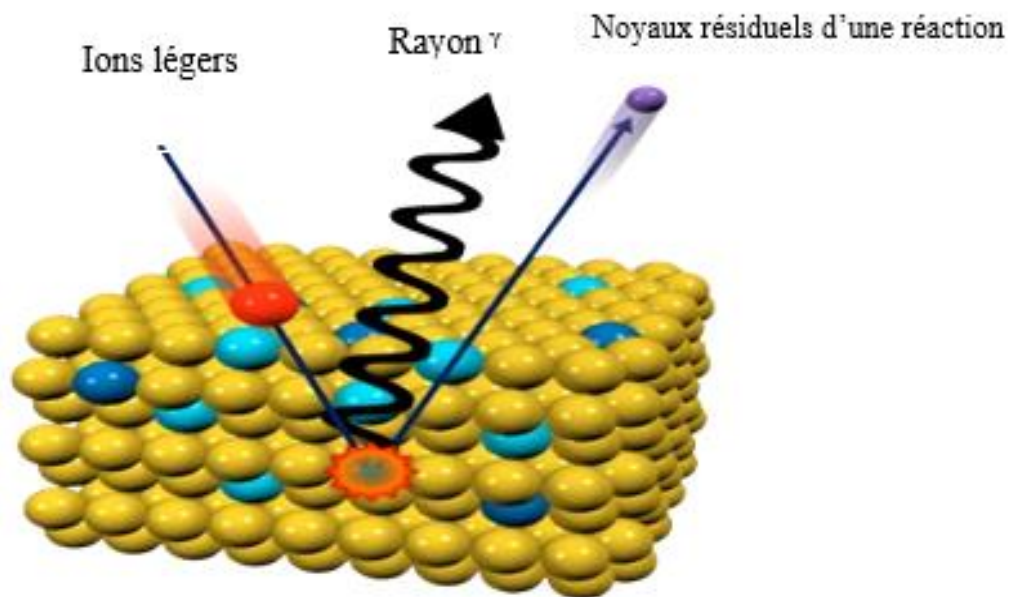


Figure. I.9. Schéma du principe physique de la méthode NRA.

1.2.1 Principe de fonctionnement

Lorsque le faisceau de particules, tel que des protons ou des deutérons, possède une énergie suffisante pour surmonter la barrière coulombienne, il peut induire des réactions nucléaires spécifiques avec les noyaux cibles. Ces réactions génèrent des particules secondaires accompagnés par fois par l'émission des rayons gamma, dont l'énergie et le type de ces particules émises sont caractéristiques des éléments impliqués.[6] En clair, en analysant les spectres collectés des particules émises, il est possible d'identifier les éléments présents et d'obtenir des informations sur leur distribution en profondeur dans l'échantillon. Cette méthode est particulièrement utile pour l'analyse quantitative des éléments légers et permet une étude détaillée de la composition isotopique sans détruire l'échantillon.

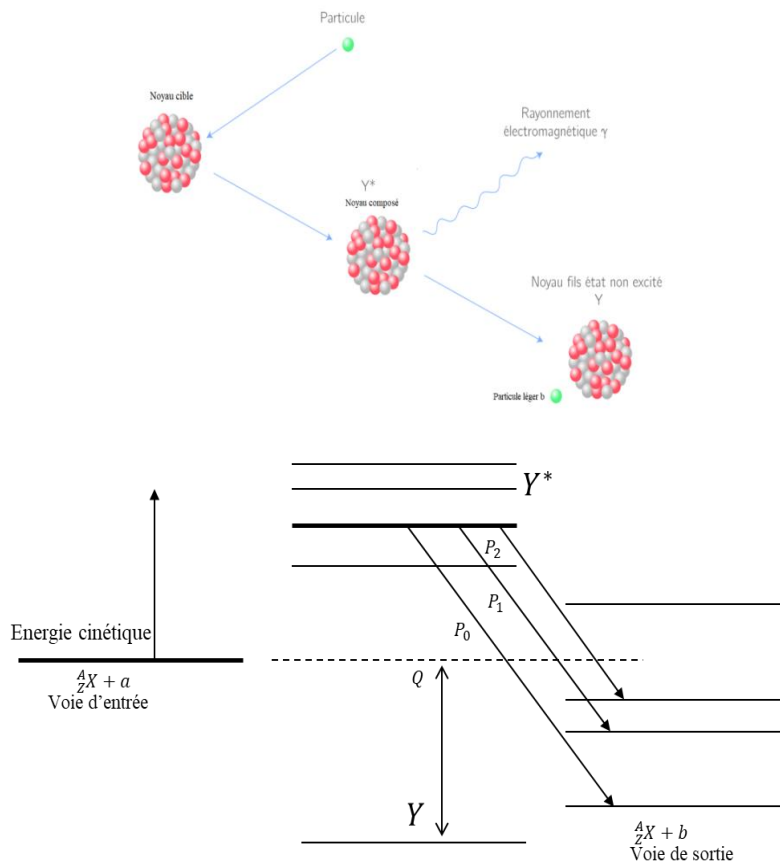


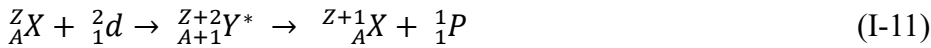
Figure.10 : Schéma illustratif de la désintégration du noyau composé.

Le processus de la réaction nucléaire peut être représenté par une équation de réaction nucléaire où un projectile (a) interagit avec un noyau cible (X) pour former un noyau composé instable (N_c^*) qui se désintègre en produisant des particules détectées (b et Y) ainsi que des rayons gamma ou d'autres particules chargées (voir figure I.10). Cette réaction est généralement notée de manière abrégée sous la forme $X(a, b)Y$, indiquant les réactifs ($a + X$) et les produits ($b + Y$) de la réaction.



Ce genre d'interactions que nous allons traiter dans ce qui suit se produit généralement avec des éléments légers ($Z < 15$) comme (H, Li, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, P, S), qui à leur tour sont éjectés avec des éléments légers ($^1\text{H}^+$, $^2\text{H}^+$, $^3\text{He}^+$, $^4\text{He}^+$) et plus rarement par des ions plus lourds (^{15}N , ^{19}F) avec une section efficace appréciable et contrairement à la RBS ne peuvent être qu'expérimentale.

Dans le cadre de l'analyse par Réactions Nucléaires (NRA), les deutons sont généralement utilisés comme projectiles pour interagir avec les noyaux des atomes cibles dans les échantillons ; sont choisis comme projectiles dans cette technique en raison de leur faible énergie de liaison de 2.2 MeV et de leur capacité à induire des réactions nucléaires spécifiques avec les éléments cibles, notamment les éléments légers tels que l'oxygène, le carbone et d'autres éléments présents en surface des échantillons. Les réactions induites par les deutons, telles que les réactions (d, p), (d, α), (d, n), permettent de détecter et d'analyser ces éléments légers à l'état de trace. Les réactions les plus utilisées sont les réactions (d, p) qui ont des bilans énergétiques importants, nous traduisons ce processus comme suite :



1.2.2 Lois de conservations et bilan énergétique

La loi de conservation de l'énergie totale dans une réaction nucléaire est un principe fondamental en physique des particules. Bien que, l'énergie totale avant la réaction est égale à l'énergie totale après la réaction, en prenant en compte toutes les formes d'énergies impliquées dans le processus d'interaction. Cette loi conduit à la définition de la quantité Q , qui représente l'énergie libérée ou absorbée lors de la réaction.[9] Cette quantité est définie comme la différence de la somme des masses avant et après la réaction, nous avons donc :

$$E_{\text{initiale}} = E_{\text{finale}}. \quad (\text{I-11a})$$

$$E_a + M_a C^2 + E_X + M_X C^2 = E_b + M_b C^2 + E_Y + M_Y C^2 \quad (\text{I-11b})$$

$$Q = [(M_a + M_X) - (M_b + M_Y)] C^2, \quad (\text{I-11c})$$

Pour $Q > 0$ la réaction est exo-énergétique, dans ce cas la réaction est possible indépendamment de l'énergie de la particule incident.

Pour $Q < 0$, la réaction est endo-énergétique, dans ce cas il faut fournir de l'énergie E_{th} pour initier la réaction qui l'on appelle le seuil de réaction.

Pour $Q=0$ le choc élastique (RBS) ou recul élastique (ERD) gouverné par la conservation de l'énergie totale.

1.2.3 Cinématique de collisions

Lors de l'étude d'une collision entre un noyau projectile a en mouvement avec une vitesse V_a de masse M_a et d'énergie cinétique E_a et un noyau cible X de masse M_X supposé initialement au repos (voir figure.11), nous écrivons la conservation de la quantité de mouvement comme suit :

$$\vec{P}_a = \vec{P}_b + \vec{P}_Y. \quad (\text{I-12})$$

Par projection sur les axes (ox) et (oy) on aura :

$$M_a V_a = M_b V_b \cos \psi + M_Y V_Y \cos \xi, \quad (\text{I-13a})$$

$$0 = M_b V_b \sin \psi - (M_Y V_Y) \sin \xi. \quad (\text{I-13b})$$

Sachant que : $\left(\frac{1}{2}MV^2\right)$ nous obtenons donc :

$$(M_a T_a)^{\frac{1}{2}} = (M_b T_b)^{\frac{1}{2}} \cos \psi + (M_Y V_Y)^{\frac{1}{2}} \cos \xi, \quad (\text{I-13c})$$

$$0 = (M_b V_b)^{\frac{1}{2}} \sin \psi - (M_Y V_Y)^{\frac{1}{2}} \sin \xi \quad (\text{I-13d})$$

$$\Rightarrow \sin \psi = \left(\frac{M_Y T_Y}{M_b M_b}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \xi \quad (\text{I-13e})$$

En éliminant z et en remplaçant, $P^2 = 2MT$, où $T_X = 0$,

On trouve que :

$$\text{L'impulsion} \Rightarrow (M_a T_a) + (M_b T_b) - 2(M_a T_a M_b T_b)^{\frac{1}{2}} \cos \psi = M_Y T_Y \quad (\text{I-13f})$$

$$\text{Energie} \Rightarrow (M_a C^2 + T_a) + (M_X C^2) = (M_b C^2 + T_b) + (M_Y C^2 + T_Y) \quad (\text{I-13g})$$

Après l'élimination de T_Y de l'équation, on obtient la relation de Q qui s'exprime en termes des énergies cinétiques :

$$Q = \left(\frac{M_a}{M_Y} - 1\right) E_a + \left(\frac{M_b}{M_Y} + 1\right) E_b - \frac{2(M_a M_b E_a E_b)^{\frac{1}{2}} \cos \psi}{M_Y} \quad (\text{I-14a})$$

L'énergie des particules émises par la cible lors des réactions nucléaires peut en effet être calculée en utilisant les principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement :

$$(M_b + M_Y)T_b - 2(M_a M_b T_a \cos^2 \psi)^{\frac{1}{2}} T_b^{\frac{1}{2}} + (M_a - M_Y)T_a - M_Y Q = 0 \quad (\text{I-14b})$$

$$\text{D'où } T_b - \frac{2(M_a M_b T_a \cos^2 \psi)^{\frac{1}{2}} T_b^{\frac{1}{2}}}{(M_b + M_Y)} + \frac{(M_a - M_Y) T_a}{(M_b + M_Y)} - \frac{M_Y Q}{(M_b + M_Y)} = 0 \quad (\text{I-14c})$$

On note $A = \frac{(M_a M_b T_a)^{\frac{1}{2}}}{(M_b + M_Y)}$ et $B = \frac{(M_a - M_Y) T_a - M_Y Q}{(M_b + M_Y)}$, on obtient :

$$T_b - (2A \cos \psi) T_b^{\frac{1}{2}} + B = 0 \quad (\text{I-14d})$$

Dont les solutions sont :

$$T_b^{\frac{1}{2}} = A \left(\cos \psi \mp \sqrt{\cos^2 \psi - \frac{B}{A^2}} \right), \quad (\text{I-14e})$$

Avec T_a et M_a sont l'énergie et la masse des particules incidentes, respectivement. T_b , M_b ; sont l'énergie et la masse des particules émises, M_Y la masse de noyau résiduel et ψ l'angle de détection.

Lorsque Q est positif, il n'y a qu'une valeur de T_b possible correspondant au signe positif :

- Si $Q > 0$ et $T_a = 0 \Rightarrow T_b = -B \Rightarrow T_b = \frac{M_b}{M_b + M_Y} Q$
- Si $Q > 0$ et $M_Y > M_a \Rightarrow B > 0$, on obtient :
- $T_b^{\frac{1}{2}} = A \left(\cos \psi \mp \sqrt{\cos^2 \psi - \frac{B}{A^2}} \right)$,
- Si Q est négatif, on aboutit à deux valeurs de T_b .

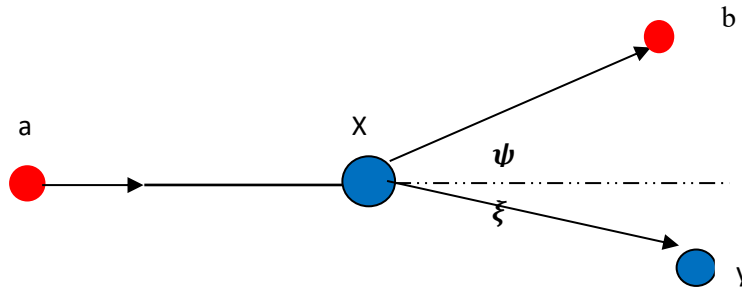


Figure.11 : Cinématique de collisions dans le système du Laboratoire.

1.2.4 Les réactions induites par les deutons

Dans la plupart des cas, nous utilisons des faisceaux de deutérons avec une énergie typiquement comprise entre 950 et 1100 keV dans la technique nucléaire NRA. Ces deutons sont accélérés à cette énergie à l'aide d'un accélérateur linéaire tel que celui de type le Van de Graaff, un équipement couramment utilisé en physique nucléaire. Le Van de Graaff est largement employé dans les laboratoires de recherche pour accélérer des particules chargées comme les deutons, comme celui du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) où il a été utilisé dans ce travail.

L'accélération des deutons à des énergies contrôlées dans la plage de 950 à 1100 keV permet d'induire des réactions nucléaires spécifiques avec les noyaux cibles, avec un bilan de réaction positif pour presque tous les éléments légers ($Z < 13$). Dans cette gamme d'énergies, la fonction d'excitation varie peu, ce qui permet d'obtenir des informations précises sur les éléments présents dans un échantillon et d'analyser leur distribution spatiale. Par exemple, il est possible de détecter des éléments comme l'oxygène (O) et le carbone (C) présents à la surface de l'échantillon cible sous forme de traces ou d'impuretés. Le tableau suivant mentionne des exemples de réactions nucléaires spécifiques impliquant des deutons et des noyaux cibles contenant de l'oxygène et du carbone, ainsi que les produits de ces réactions et les énergies associées.

Réaction A (d, p) B		Réaction A (d, α) B	
Elément cible A	Q (MeV)	Elément cible A	Q (MeV)
^{12}C	2.719	^{13}C	5.167
^{14}N	8.615	^{14}N	13.579
^{16}O	1.919	^{16}O	3.116

Tableau.1. Réaction nucléaire induit par les deutons sur des éléments de Carbone, Oxygène et l'Azote

Les réactions (d, p) (d, α) et (d, ^3He) sont des réactions nucléaires induites par des deutons qui peuvent se produire lors de l'interaction entre un deuton et un noyau cible.

^{12}C (d, p_0) ^{13}C , avec $E_{p0} = 2975.27$ keV.

^{16}O (d, α_0) ^{14}N , avec $E_{\alpha_0} = 2620.34$ keV.

^{16}O (d, p_0) ^{17}O , avec $E_{p0} = 2396.09$ keV

^{16}O (d, p_1) ^{17}O , avec $E_{p1} = 1608.64$ keV.

1.2.5 Sections efficaces des réactions nucléaires induites par les deutérons

La section efficace d'une réaction nucléaire est une mesure de la probabilité d'occurrence de cette réaction lors de l'interaction d'un faisceau de particules incidentes avec un noyau cible[13]. Lorsqu'un faisceau des particules avec un flux (nbr /cm² /s) de section s traverse un échantillon contenant n atome/cm³ et d'épaisseur dx , on obtient le nombre total de réaction par unité de temps :

$$R = \Phi s dP = (n \sigma dx)(s \Phi) = P \times I, \quad (\text{I-15a})$$

où I est l'intensité du faisceau et P la probabilité d'interaction définie comme :

$$P = \frac{\text{Nombre des noyaux cible} \times \text{surface efficace d'un noyau cible}}{\text{surface totale de la cible}} \quad (\text{I-15b})$$

$$\text{Si la surface est } \pi d^2 = \sigma_{Geo}, \text{ donc } , P = \frac{n\pi d^2}{s}$$

Lorsque le faisceau de particules traverse l'échantillon, l'intensité du faisceau varie de :

$$dI = -PI = - (n \sigma dx) \times I \quad (\text{I-15c})$$

$$\text{D'où } \frac{dI}{I} = -n \sigma dx.$$

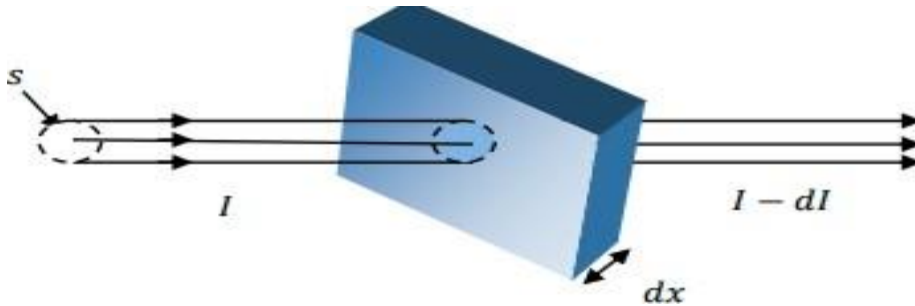


Figure.12 : Définition de la section efficace d'une réaction nucléaire.

En intégrant sur toute l'épaisseur de la cible, l'intensité du faisceau après sa traversée peut être calculée :

$$I = I_0 e^{(-n \sigma d)} \quad (\text{I-15d})$$

Cette équation montre comment l'intensité du faisceau décroît exponentiellement en fonction de l'épaisseur de la cible. Si l'échantillon est épais, il peut ralentir le mouvement des particules incidentes en raison des interactions multiples que les particules du faisceau subissent en traversant une plus grande quantité de matière. Lorsque les particules du faisceau traversent un échantillon épais, elles ont une plus grande probabilité d'interagir avec les cortèges électroniques des atomes constitutifs de la matière que les interactions nucléaires. Pour minimiser les effets de ralentissement des particules incidentes dans un échantillon épais, on choisit des échantillons relativement minces lors de nos expériences d'analyse par faisceaux d'ions.

Chaque noyau atomique présent dans un échantillon doit être considéré comme un centre d'interaction de diffusion ou d'absorption des particules incidentes[11]. Donc, le nombre interactions total par seconde est :

$$\Delta I = I_0 - I = (1 - e^{-n\sigma dx}) \quad (\text{I-15e})$$

**CHAPITRE I : RAPPELS THÉORIQUES SUR LES TECHNIQUES NUCLÉAIRES
D'ANALYSE**

où $\sigma \times d \ll 1$, d'où, $\sigma = \frac{\Delta I}{I_0 n d x}$,

Les valeurs des sections efficaces dans les réactions nucléaires dépendent, de l'énergie de la particule incidente, la charge et la masse du noyau cible. Ces paramètres influencent la probabilité d'interaction entre la particule incidente et le noyau cible, ce qui se reflète dans la section efficace de la réaction nucléaire. La formule de la section efficace près des résonances pour une réaction nucléaire de la forme $X(a,b)Y$ peut être exprimée en fonction de la section efficace de Rutherford et des largeurs de transition pour l'émission des particules a et b . Dans ce qui suit, nous donnons la formulation générale de la section efficace de résonance pour cette réaction nucléaire :

$$\sigma(a, b) = \sigma_c(a) \times \frac{\Gamma_b}{\Gamma} \quad (\text{I-16})$$

où :

- $\sigma_c(a)$ est la section efficace pour la formation du noyau composé, exprimée en termes de la section efficace de Rutherford,
- Γ_b est la largeur de transition pour l'émission de la particule b ,
- Γ est la largeur totale de la résonance est donnée par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau},$$

Où τ est la durée de vie moyenne d'un état.

La formule de Breit-Wigner s'écrit alors au voisinage d'un seul niveau de résonance :

$$\sigma(a, b) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_R)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} = \frac{\sigma_{R(a,b)}}{1 + \left[\frac{(E - E_R)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}\right]^2} \quad (\text{I-17})$$

Si $E = E_R$, alors la section efficace de résonance pour la réaction nucléaire $X(a,b)Y$ est donnée par :

$$\sigma(a, b) = \frac{\lambda^2}{\pi} \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{\Gamma^2}, \text{ où :}$$

- λ est la longueur d'onde de Broglie de la particule incidente,
- Γ_a est la largeur partielle de l'émission de la particule a dans la réaction inverse,
- Γ_b est la largeur de transition pour l'émission de la particule b ,
- Γ est la largeur totale de la résonance.

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

II.1. Préparation des échantillons cibles utilisés

Les échantillons cibles étudiés dans ce mémoire, à savoir (SiO₂) et (Bi /SnO₂ /Si), ont été élaborés sous forme de couches minces déposées sur des substrats de silicium à température ambiante, en utilisant la technique d'évaporation thermique (voir figure.14). Dans cette technique, le matériau cible sous forme de poudre est chauffé à des températures élevées jusqu'à atteindre sa phase vapeur, permettant ainsi de recouvrir le substrat dans une chambre à vide. La méthode de dépôt thermique est couramment utilisée pour la préparation de couches minces de matériaux.

Le processus commence par le chargement du matériau à déposer dans un creuset en tungstène, placé dans une enceinte sous vide. Le creuset de tungstène, chauffé par effet Joule, contient le matériau sous forme de poudre ou de petites tranches avec une pureté de l'ordre de 99,99 %. L'évaporation est effectuée sous une pression inférieure à 3×10^{-6} Torr, dans une enceinte en forme de cloche, maintenue sous vide par un système de pompage composé d'une pompe primaire (pompe à palettes) et d'une pompe secondaire à diffusion d'huile (voir figure.14). Il est essentiel que la température de fusion du matériau à évaporer soit inférieure à celle du creuset utilisé. Lorsque la température de chauffage dépasse la température de liquéfaction du matériau, ses entités atomiques ou moléculaires s'échappent du creuset sous forme de vapeur et se propagent dans l'enceinte. Ces vapeurs se déplacent en ligne droite jusqu'à entrer en contact avec la surface du substrat, placé à une distance spécifique de 15 cm au-dessus du creuset. Lorsque les vapeurs du matériau en fusion touchent la surface froide du substrat, elles se condensent et se solidifient, formant ainsi une couche mince du matériau sur le substrat avec une épaisseur définie. Le choix de la nature du substrat dépend de la résolution en énergie ou du pic de l'élément cible à déposer, celui-ci devant être distinct de celui du substrat. Dans notre expérience, nous avons utilisé les échantillons suivants : Bi /SnO₂/Si, SiO₂/Si avec une cible de Au/Si pour la calibration de la chaîne de détection.

Il convient aussi de noter que le dépôt des cibles a été précédé d'une procédure intensive de nettoyage des substrats en silicium. Les solvants chimiques utilisés pour ce processus sont le méthanol, l'acétone, le trichloréthylène et l'acide fluorhydrique. Ce dernier est également utilisé dans le jet pour nettoyer le substrat en silicium de tous les contaminants et oxydes natifs présents à la surface du substrat en silicium.

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

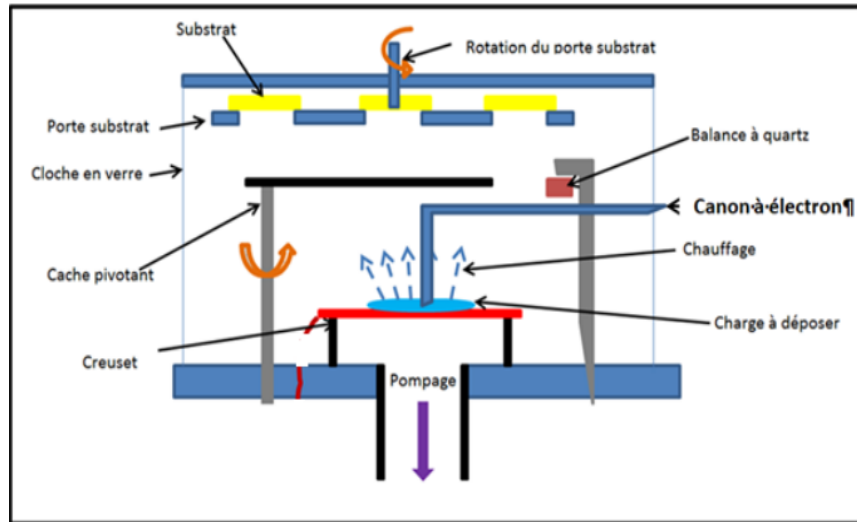


Figure.14 : Schéma descriptif du principe d'évaporation thermique via un canon-à-électrons.

II.2 Dispositif expérimental d'analyse

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude comprend principalement trois éléments. Tout d'abord, un accélérateur de particules, employé pour générer des faisceaux d'ions. Ensuite, une chambre de réaction, où se déroule l'expérience d'analyse (RBS et NRA), permet l'interaction entre les faisceaux d'ions et les échantillons. Enfin, une chaîne électronique de détection est utilisée pour détecter et analyser les particules émises par les échantillons.

II.2.1 L'accélérateur Van de Graaff (V.D.G.)

L'accélérateur utilisé pour l'analyse par faisceau d'ions est de type Van de Graaff (V.D.G) de 3,75 MeV en exploitation au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (C.R.N.A.), (voir figure 15). Cette installation est capable de produire trois types de faisceaux d'ions (des protons ${}^1_1H^+$ des deutons ${}^2_1H^+$ des particules alpha (${}^4_2He^+$) grâce à un analyseur magnétique, ces faisceaux sont générés à des énergies continues variant de 1 à 3,75 MeV. Le faisceau d'ions pénètre verticalement dans l'accélérateur et en ressort horizontalement avec une précision de 0,3 %, et l'intensité du faisceau sur la cible peut varier de quelques nanoampères à plusieurs microampères.

L'énergie du faisceau de particules émergent est déterminée par la mesure précise du champ magnétique dans l'entrefer de l'aimant de l'analyseur [14]. Pour assurer la stabilité énergétique de l'accélérateur, le faisceau d'ions passe entre des lèvres reliées à un dispositif différentiel, permettant ainsi la correction et la stabilisation de l'énergie pendant l'expérience d'analyse par faisceau d'ions. De plus, des lentilles électrostatiques sont placées dans l'extension pour focaliser le faisceau à l'entrée de la chambre à diffusion, réduisant ainsi sa dispersion angulaire.

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

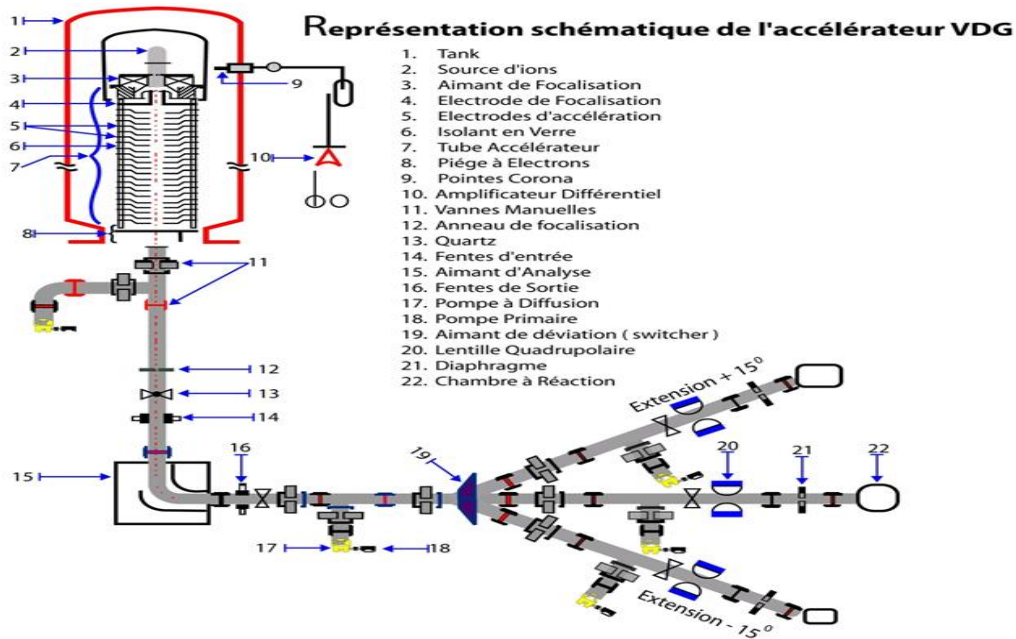


Figure.15 : Représentation schématique de l'accélérateur Van de Graaf de 3.75 MV d'Alger .

On peut mesurer avec précision l'intensité du champ magnétique B et la fréquence correspondante f à l'aide d'un gaussmètre numérique en se basant sur le principe de la résonance magnétique nucléaire. La base de ce principe est la relation de proportionnalité entre la fréquence et l'intensité du champ magnétique, telle qu'elle est représentée par l'équation :

$$f = k \times B \quad (\text{II-1})$$

où f est la fréquence, K est une constante liée à la géométrie de l'aimant d'analyse, est de l'ordre de 4.25759 MHz/Tesla pour l'extension centrale en exploitation au niveau de l'accélérateur V.D.G. B est l'intensité du champ magnétique.

En mesurant la fréquence avec le gaussmètre numérique, on peut déterminer avec précision l'intensité du champ magnétique régnant dans l'entrefer de l'aimant d'analyseur[14]. Le champ magnétique est ajusté et contrôlé grâce à cette méthode de mesure afin d'assurer la stabilité et la précision de l'énergie du faisceau d'ions qui sort de l'accélérateur.

Selon la relation suivante, le faisceau d'ions qui sort de l'aimant d'analyse a une énergie proportionnelle au carré de l'intensité du champ magnétique.

$$E = \frac{(qr)^2}{2m} B^2 \quad (\text{II-2})$$

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

Avec r , q et m sont, respectivement, le rayon de courbure, la charge et la masse de l'ion incident. Une fois les deux équations (II-1) et (II-2) substituées, nous obtenons l'énergie de faisceau en fonction de la fréquence f :

$$E = \frac{(qr)^2}{2mK^2} \times f^2 \quad (\text{II-3})$$

L'étalonnage en énergie de l'accélérateur de particules est une étape fondamentale qui repose sur la mesure précise de la fréquence de résonance magnétique pour établir une relation entre la fréquence et l'énergie du faisceau d'ions. Chaque intervention technique implique l'étalonnage en énergie de l'accélérateur, que ce soit pour l'alimentation de l'aimant d'analyse ou pour le dispositif quadripolaire ou les fentes de focalisation. En général, les réactions largement utilisées pour la calibration de V.D.G CRNA sont les suivantes : $F^{19}(p, \alpha\gamma)^{16}O$, $Al^{27}(p, \gamma)Si^{28}$.

II.2.2 Chambre à diffusion

Il s'agit d'une enceinte cylindrique en acier inoxydable de 63 cm de diamètre, installée sur l'extension centrale de l'accélérateur V.D.G. Cette enceinte est équipée de deux goniomètres permettant de positionner le détecteur et le porte-cible à des angles précis. Il est important de noter que le porte-échantillons peut être manipulé de l'extérieur sans avoir à ouvrir la chambre, ce qui permet de préserver le vide à chaque changement de position. Par ailleurs, la chambre à diffusion est directement connectée à une pompe à palettes qui maintient le vide dans la chambre à environ 10^{-3} Torr. Un second système de pompage fonctionne en continu pendant l'expérience pour stabiliser la pression à environ 10^{-6} Torr. De plus, il est recommandé d'installer un piège à azote liquide autour du porte-échantillons afin de refroidir la cible et de capturer les éventuelles impuretés présentes dans la chambre, telles que le carbone provenant des pompes.

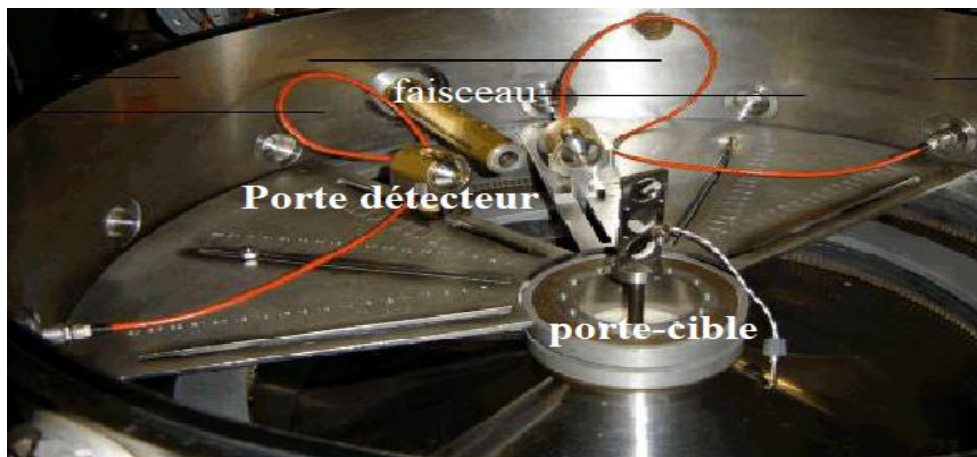


Figure.16 : Une vue intérieure de la chambre à réaction utilisée dans ce travail

II.2.3 Chaîne de détection

On collecte les particules rétrodiffusées en utilisant une chaîne électronique de détection classique installée à la sortie de la chambre à diffusion, comme illustré dans la figure.16. Principalement, cette chaîne de détection comprend un détecteur de silicium à barrière de surface qui est connecté à un préamplificateur de charge (PAC), puis à un amplificateur spectroscopique. Ensuite, il y a un analyseur multicanaux (carte électronique MCB intégrée au micro-ordinateur, avec un logiciel MAESTRO installé pour superviser l'acquisition des données pendant l'analyse. Cette chaîne permet la détection, l'amplification et l'analyse des signaux des particules rétrodiffusées, contribuant ainsi à l'obtention de données précises lors des expériences d'analyse par faisceau d'ions.

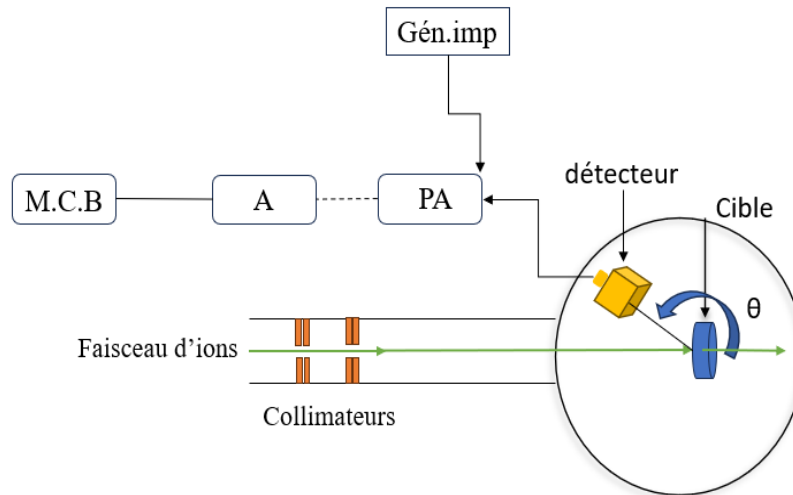


Figure.17 : Schéma de l'ensemble expérimental (électronique)

II.3 Mode opératoire pour l'analyse par faisceau d'ions

II.3.1. Analyse RBS

La méthode RBS est optimale pour caractériser les couches d'éléments lourds sur un substrat d'éléments plus légers, dont elle permet de déterminer la composition, l'épaisseur et l'ordre, ainsi que les profils aux interfaces. Le mode opératoire pour la technique RBS implique plusieurs étapes clés pour mener à bien l'expérience. On commence par l'introduction de nos échantillons dans la chambre à diffusion en les fixant sur un porte-échantillon situé au centre de la chambre à diffusion, de sorte que la distance entre le détecteur et la cible soit d'environ 11 cm sur l'un des deux plateaux coulissants. Les particules alpha rétrodiffusées à un angle $\theta_d = 160^\circ$ par rapport à la direction initiale sont détectées par la surface des échantillons, qui est perpendiculaire au faisceau d'ion incident (L'angle d'incidence $\theta_i = 0$) par rapport à la direction initial du faisceau en utilisant un pompage primaire suivi d'un pompage secondaire dans la chambre à diffusion, un vide de l'ordre de 10^{-6} Torr est établi et maintenu

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

tout au long de l'expérience. Le détecteur est graduellement polarisé à une valeur de tension de 60 volts. Ce processus de polarisation lente permet de garantir une stabilisation adéquate du détecteur et de surveiller attentivement le signal détecté lors de l'expérience. Et pour gérer et observer l'évolution du signal émis par le détecteur, il est nécessaire de manipuler le générateur d'impulsion, puis de régler le gain de l'amplification afin d'obtenir une pente avec une étendue adéquate du spectre RBS de rétrodiffusion des particules alpha. Enfin, l'énergie du faisceau d'ions est fixée à environ 2 MeV. Le faisceau a environ 2 mm de diamètre. Afin d'éviter la détérioration du détecteur, on maintient l'intensité du courant faisceau entre 30 et 40 nA.

II.3.2. Analyse NRA

Dans l'Analyse par Réactions Nucléaires (NRA), les réactions nucléaires sont utilisées pour doser les éléments légers. Le dispositif expérimental utilisé pour la NRA est similaire à celui de la technique RBS, avec quelques modifications concernant le faisceau d'ions, l'énergie incidente et les caractéristiques du détecteur. Pour augmenter le nombre d'événements détectés, le détecteur PIPS est parfois remplacé par un autre type de détecteur, tel que le détecteur de silicium de type ENERTEC, qui possède des propriétés spécifiques adaptées à l'analyse par NRA ; il est avec une surface et une épaisseur plus grande de 50 mm² et 450 µm, respectivement, et une tension de polarisation de 80 volts, en raison du faible rendement des particules émises lors des réactions nucléaires. Par ailleurs, on a employé un faisceau de deutons d'énergie de 950 keV afin de répondre à la condition de stabilité de la section efficace de réaction dans cette plage d'énergie.

II.3.3. L'étalonnage de la chaîne de détection :

Lors de l'expérience RBS ou NRA, la chaîne de détection comprend un préamplificateur, un amplificateur et une carte MCB (Multichannel Analyzer). Cette chaîne de détection est essentielle pour amplifier, mettre en forme et stocker les informations provenant du détecteur utilisé dans les spectres RBS ou NRA sous forme de canaux. L'étalonnage en énergie de la chaîne de détection est relié au numéro de canal C par une fonction linéaire de type :

$$E(\text{keV}) = a \times C + b \quad (\text{II-4})$$

Où a (keV/canal) et b (keV) sont des paramètres d'ajustement. Ces paramètres a et b jouent un rôle important dans la conversion canal-énergie lors du calcul de l'épaisseur de la cible par la cinématique de collisions et dans la simulation par le code SIMNRA. L'étalonnage en énergie est essentiel pour assurer un ajustement optimal entre les spectres expérimentaux et les spectres simulés, permettant

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

ainsi une analyse précise des échantillons étudiés. Les conditions de l'expérience RBS sont résumées dans le tableau (II.1) ci-dessous :

Faisceau incident	${}^2_4H^+$
Energie de faisceau incident	$E = 2 \text{ MeV}$
L'angle d'incidence	$\alpha = 0^\circ$
L'angle de détection	$\theta = 160^\circ$
Distance détecteur-cible	$d = 11 \text{ cm}$
Résolution du détecteur	$\delta E_{\text{det.}} = 20 \text{ keV}$
Intensité du courant	$I = 30\text{-}40 \text{ nA}$
Tension de polarisation du détecteur	$V_{\text{pol}} = 40 \text{ V}$
Droite de calibration	$E(\text{KeV}) = 1.90515 \times C + 25.381$

Tableau II-1 Récapitulatif des conditions expérimentales utilisées lors de l'analyse RBS

Elément de la cible	Au	Si	O
Masse	196.967	27.977	15.995
$K_{\text{cin}}(\theta_d=160^\circ)$	0.92418	0.571804	0.37066
$E(\text{keV}) = K_{\text{cin}} \times E_0$	1848.36	1143.61	741.33
Canal C_0	969	399	254
Canal C_x	858	380	227
Angle de rétrodiffusion	$\theta_d = 160^\circ$		

Tableau. II-2 Valeurs des facteurs cinématiques et des énergies de rétrodiffusion calculées à partir de la relation (I-2)

Pour tracer la courbe d'étalonnage, il est nécessaire de calculer le facteur cinématique en utilisant la relation donnée dans le chapitre I (I-4), ou en utilisant la fenêtre (calculate/kinematic) disponible dans le logiciel de simulation SIMNRA. Les résultats obtenus de ce calcul sont présentés dans le tableau II-2. En se basant sur ces résultats, et faire la correspondance entre le numéro de canal C_0 et $E_1 = K_{\text{cin}} \times E_0$ correspondant (voir figure.II.6 et figure.II.7).

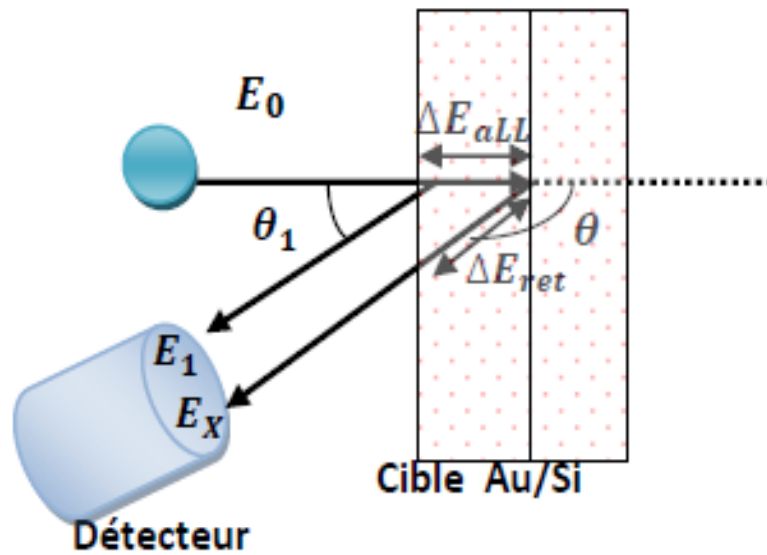


Figure II-6 : Schéma descriptif du processus de rétrodiffusion des ions sur une couche mince.

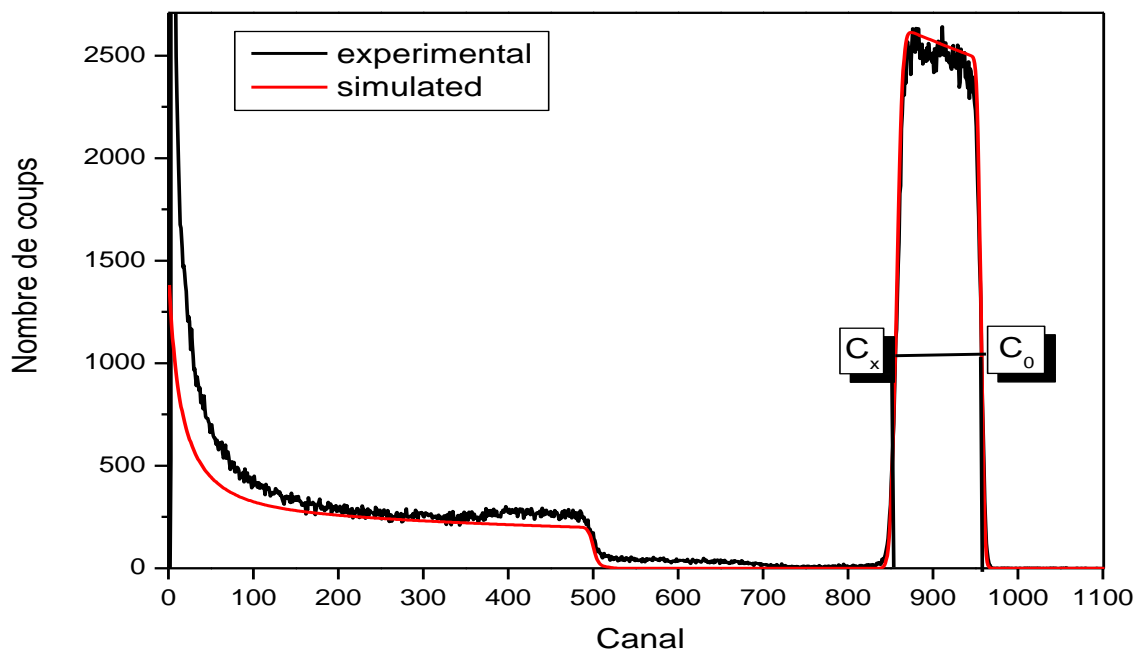


Figure II-6. Exemple d'un spectre RBS obtenu pour une cible de Au/Si en montrant la position des numéros de canal C_0 et C_x sur le spectre.

La droite de calibration est établie en traçant la variation d'énergie $E(\text{keV}) = K.E_0$ en fonction de numéro de canal C_0 , comme illustré sur la figure (II.7) ci-dessous.

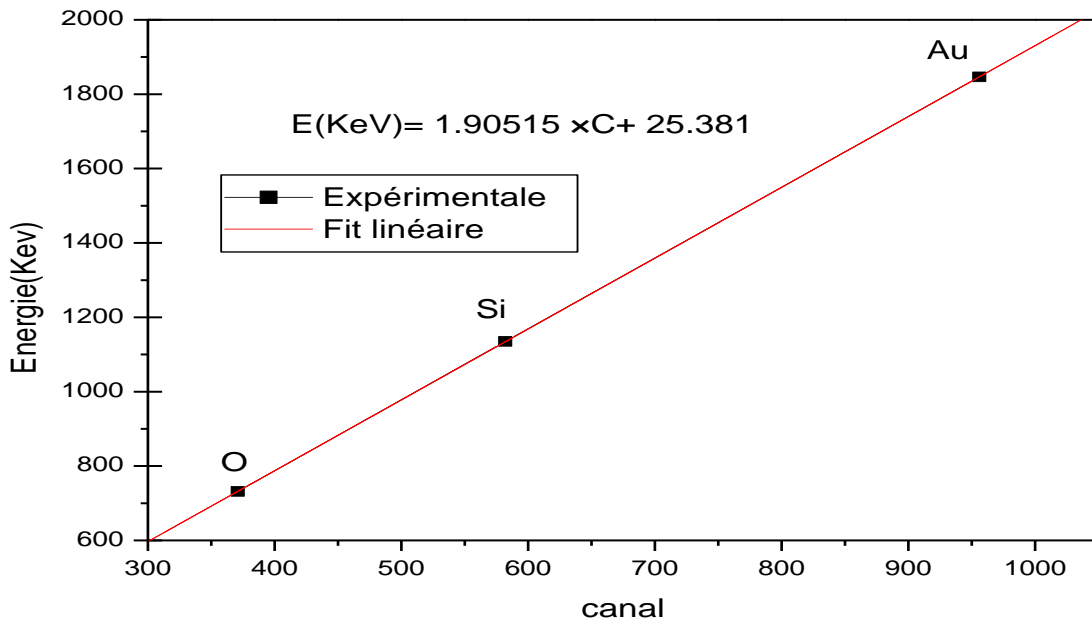


Figure II-7 : droite d'étalonnage de la chaîne de détection de la technique RBS.

II.4 Détermination de l'épaisseur via la cinématique de collisions

Afin de simuler les spectres RBS, l'épaisseur des cibles Au/Si et SiO₂ /Si peut être calculé par une relation analytique via la cinématique de collisions. L'épaisseur des cibles des cibles Au/Si et SiO₂ /Si peut être calculée par une relation analytique via la cinématique de collisions pour simuler les spectres de rétrodiffusion de Rutherford (RBS). D'après la figure II-6 qui montre le schéma de rétrodiffusion dans une cible sous forme de couche mince. Un faisceau d'ions incidents (alpha dans ce cas) de masse M_1 et d'énergie $E_0=2$ MeV est dirigé vers la cible. Lorsque ces ions incidents interagissent avec les atomes de la cible, les ions rétrodiffusés sont détectés à un angle spécifique, généralement à 160° dans ce contexte leur énergie à la surface de la cible est donnée par la relation suivante :

$$E = E_0 \times K_{cin} \quad (II-5)$$

Où K_{cin} est le facteur cinématique mentionné précédemment. À la sortie de la cible, les ions qui entrent dans la cible à une distance ΔX seront repérés avec une énergie E_X . La relation pour calculer l'énergie des ions rétrodiffusés à la sortie de la cible à une distance ΔX seront repérés avec une énergie E_X :

À la sortie de la cible, les ions qui entrent dans la cible à une distance ΔX seront repérés avec une énergie E_X :

$$E_X = (E_0 - \Delta E_{all}) K - \Delta E_{ret}, \quad (II-6)$$

**Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires
d'analyse par faisceau d'ions.**

Ou ΔE_{all} et $-\Delta E_{\text{ret}}$ sont les pertes d'énergie à l'aller et au retour dans la cible.

Le pouvoir d'arrêt total $S(E) = -\frac{\Delta E}{N\Delta X}$ est donnée par la relation suivante :

$$S(E) = S_{\text{all}}(E_0) + S_{\text{ret}}(K_{\text{cin}} E_0) = \frac{\Delta E_{\text{all}}}{\Delta X} + \frac{\Delta E_{\text{ret}}}{\Delta X} \cos \theta \quad (\text{II-7})$$

La relation (II-6) devient donc après substitution de l'équation. (II-7), soit :

$$E_x = K_{\text{cin}} \times E_0 - \Delta x \times \left(K_{\text{cin}} S_{\text{all}}(E_0) + \frac{S_{\text{ret}}(K_{\text{cin}} E_0)}{\cos \theta_1} \right)$$

D'où la relation finale suivante donne l'épaisseur de la couche traversée :

$$\Delta X = \frac{K_{\text{cin}} \times E_0 - E_x}{K_{\text{cin}} \times S_{\text{all}}(E_0) + \frac{S_{\text{ret}}(K_{\text{cin}} E_0)}{\cos \theta_1}} \quad (\text{II-8})$$

On peut déterminer l'épaisseur de la couche d'or en mesurant les pouvoirs d'arrêt à l'aller et au retour en calculant les valeurs de E_0 et E_x à partir du canal de surface (voir Figure II-6) du front de montée et de décente, respectivement, ainsi que la droite de calibration de la chaîne de détection correspondante. Le code SRIM-20013 est utilisé pour déterminer les pouvoirs d'arrêt à l'aller et au retour (voir tableau II.3). Les valeurs d'épaisseur obtenues par la cinématique de collisions sont également résumées dans ce même tableau (II.3) et comparées à celles déduites à l'aide du code de simulation SIMNRA pour les deux cibles (Au/Si et SiO₂/Si).

Cible	$S_{\text{all}}(E_0)$ (eV/Å)	$S_{\text{ret}}(K_{\text{cin}} \times E_0)$ (eV/Å)	E_x (keV)	Epaisseur (Å)	
				Calcul théorique	Code SIMNRA
Au/Si	65.67	67.60	1659.25	144.56	142.24
SiO ₂ /Si	30.56	37.51	739.02	120	109.72

Tableau. II-3 : Tableau présentatif des valeurs de pouvoir d'arrêt, d'énergie de rétrodiffusion et les épaisseurs déterminées via un calcul théorique et via SIMNRA pour les deux cibles (Au/Si et

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

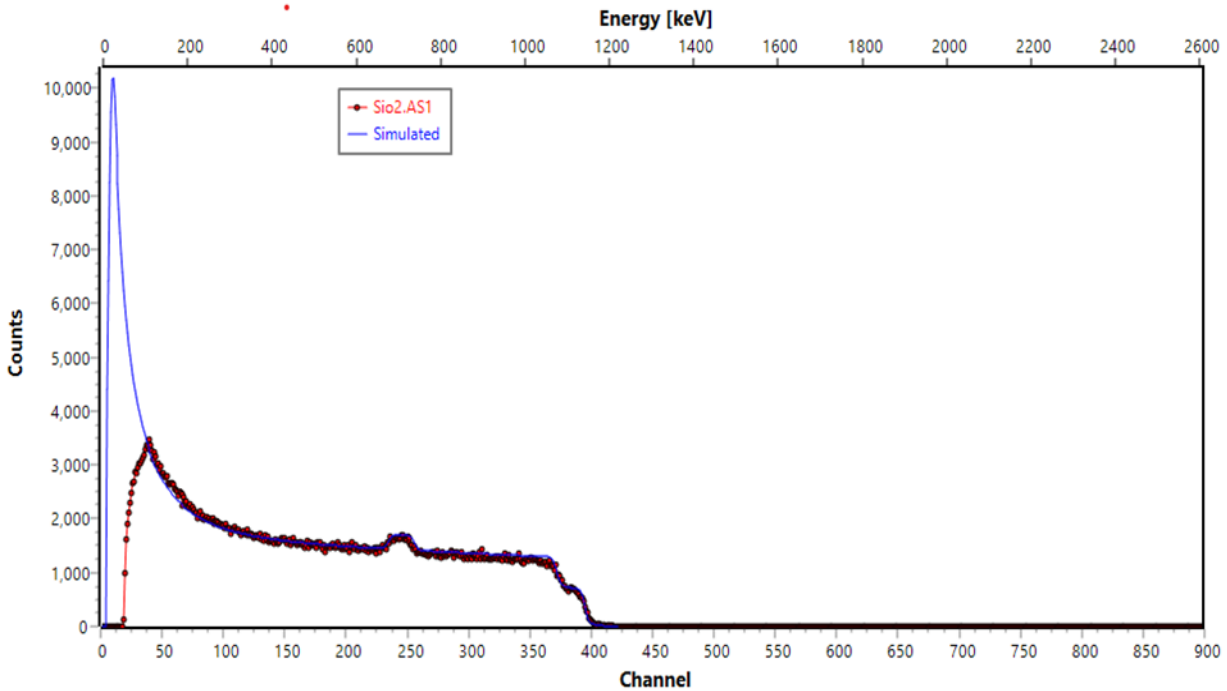
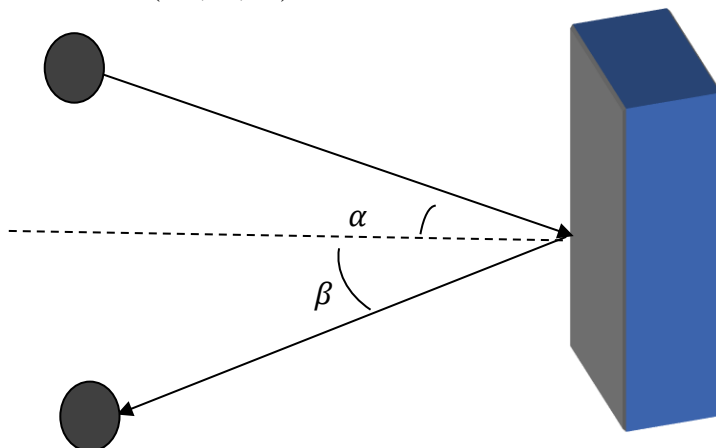


Figure II-8 : un spectre RBS relatif à la cible (SiO_2/Si).

II.5. Simulation des spectres expérimentaux via le code simulation SIMNRA :

La simulation des spectres expérimentaux via le code de simulation SIMNRA est une étape essentielle dans l'analyse par Réactions Nucléaires (NRA) et Rétrodiffusion Rutherford (RBS). Ce code permet de générer des spectres théoriques en se basant sur les conditions expérimentales et les bases de données des sections efficaces.

La particule incident (M_1, E_0, V_0)



La particule rétrodiffusée (M_1, E_0, V_1)

Figure. II-9 : Schéma descriptif de la géométrie de détection utilisée par

Chapitre II : Méthode expérimentale et dispositif d'analyse des techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions.

En ajustant le spectre théorique au spectre expérimental, on peut obtenir des informations qualitatives sur la cible étudiée, telles que son épaisseur, les concentrations des éléments présents et leur répartition en profondeur dans le matériau. L'utilisation du code SIMNRA implique plusieurs étapes, notamment l'introduction des paramètres expérimentaux tels que l'énergie et la nature du faisceau incident, les éléments constituant la cible, l'épaisseur supposée de la couche à analyser, etc. En se basant sur la bibliothèque de données des sections efficaces de Rutherford et de la cinématique de collisions, le code SIMNRA permet de simuler des spectres qui peuvent être comparés aux données expérimentales pour une analyse approfondie des échantillons.

II.5.1 Introductions des conditions de l'expérience :

Les conditions expérimentales de l'analyse comprennent plusieurs paramètres essentiels qui influent sur la qualité des mesures et tels que l'énergie et la nature du faisceau incidente, les éléments qui composent la cible et les constantes de calibration, l'angle d'incidence et de détection, ainsi que la résolution du système de détection, les sections efficaces de Rutherford et non Rutherford, ainsi que les réactions nucléaires doivent être introduits à bord.

Ajustement au spectre expérimental : En introduisant des valeurs initiales d'épaisseurs et de concentrations, nous effectuons plusieurs itérations. Lorsque les deux spectres théoriques et expérimentaux se superposent, nous obtenons la meilleure estimation des valeurs d'épaisseur et de concentration des éléments présents dans la cible.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur l'interprétation des données obtenues à partir des mesures effectuées lors des expériences d'analyse par faisceau d'ions (RBS et NRA). Nous utiliserons le code de simulation SIMNRA pour obtenir des informations sur nos échantillons cibles, telles que l'épaisseur de chaque couche et l'identification des éléments constitutifs et leurs concentrations.

Les trois étapes de ce travail expérimental sont les suivantes :

➤ **La première étape implique de :**

- Évaluer le coefficient cinématique des éléments concernés ;
- Déterminer le numéro de canal correspondant aux positions de front de montée de ces éléments sur les spectres expérimentaux ;
 - Tracer la droite de calibration de l'énergie en fonction des canaux spécifiques.

➤ **La deuxième étape consiste à :**

Simuler les spectres expérimentaux collectés à l'aide du code SIMNRA. Pour cela, il est nécessaire d'introduire un spectre expérimental RBS ou NRA dans le code SIMNRA, en utilisant un format « fichier. Dat ». Tous les paramètres initiaux nécessaires tels que l'énergie, l'intensité du faisceau ($^4\text{He}^+$ pour RBS et deuton $^2\text{H}^+$ pour NRA), les constantes de calibration, l'angle solide, la résolution en énergie du détecteur et l'angle de détection doivent être enregistrés dans le code. En général, l'analyse est réalisée de manière itérative en prenant une épaisseur initiale et une composition connue (ou supposée) de l'échantillon, puis en ajustant le spectre simulé au spectre expérimental. Le meilleur ajustement entre les deux spectres expérimental et théorique permet de déterminer à la fin l'épaisseur précise de l'échantillon analysé ainsi que la concentration des éléments qui le composent, comme l'exemple de la cible (Au/Si) illustré sur les deux figures (III.1 et III.2) ci-dessous.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

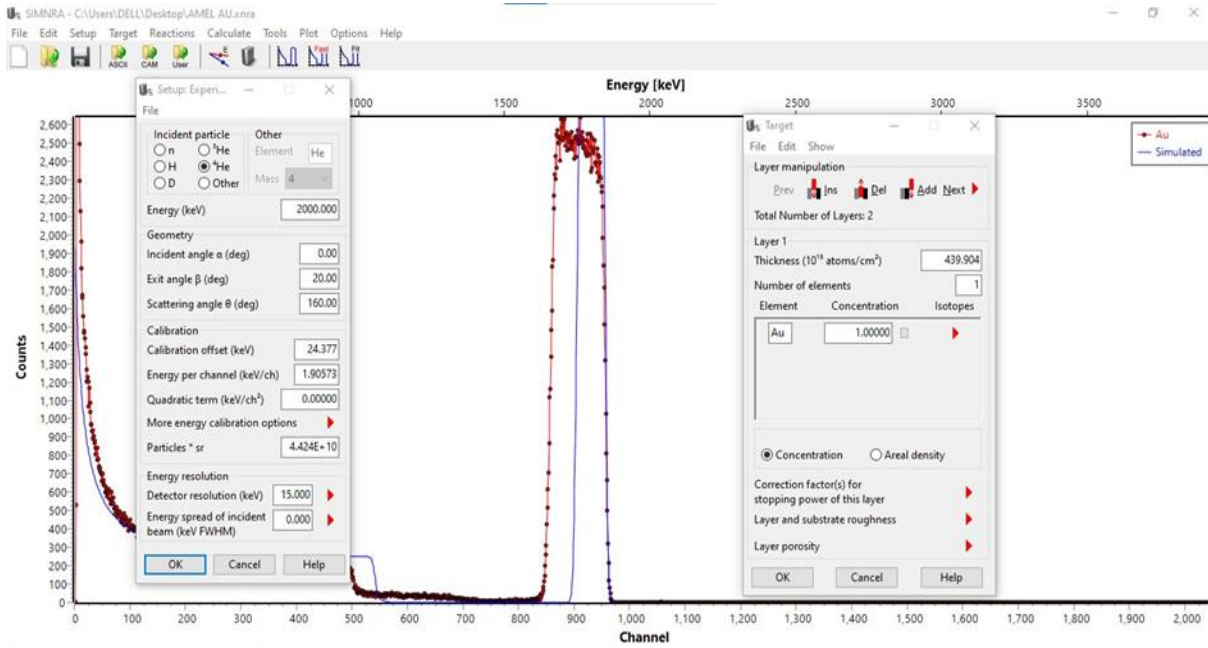


Figure III-1 : Une prise d'écran du logiciel SIMNRA montrant la manière comment introduire les conditions expérimentales et la procédure de simulation d'un spectre RBS avant l'ajustement.

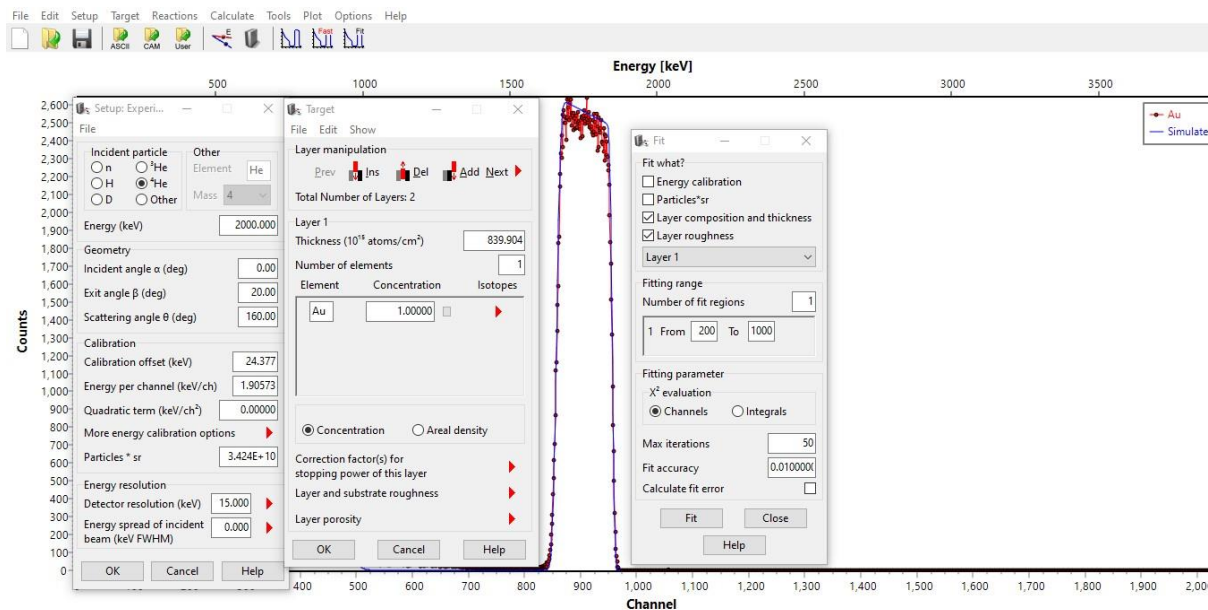


Figure III-2 : Une prise d'écran du logiciel SIMNRA de simulation du spectre RBS si dessus après l'ajustement

- la troisième étape, évaluation de l'épaisseur de la cible ou la concentration de ses composantes en utilisant une méthode de calcul basée sur la cinématique de collision et les pouvoirs d'arrêt ou de sections efficaces de Rutherford..

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

III.1. Analyse RBS :

L'analyse du spectre expérimental relatif à l'échantillon qui est un film composé de deux couches ; la première couche est le Dioxyde d'étain (SnO₂) et la deuxième est le Bismuth (Bi) Déposées sur un substrat de Silicium (Si) a permis de déterminer épaisseur des deux couches, la concentration et la nature de chaque élément présent dans l'échantillon. Cette analyse a été réalisée en simulant le spectre expérimental via le code de simulation SIMNRA, en introduisant toutes les conditions expérimentales nécessaires et en effectuant des itérations pour obtenir un ajustement optimal entre le spectre simulé et le spectre expérimental. Les paramètres expérimentaux tels que la nature et l'énergie du faisceau d'ion incident, ainsi que la géométrie de l'expérience, ont été pris en compte pour cette analyse.

La simulation par le code SIMNRA [16] a permis de déduire des informations précises sur l'épaisseur de la couche le Dioxyde d'étain (SnO₂) et la couche du Bismuth (Bi), ainsi que sur la stœchiométrie des éléments présents en profondeur de la cible. Cette approche a également permis de détecter des éléments légers présents sous forme de traces à la surface de l'échantillon, tels que l'oxygène et le carbone. Les résultats obtenus ont confirmé la validité des analyses RBS et NRA pour la mesure de l'épaisseur d'un dépôt en couche mince et la caractérisation des éléments constitutifs des échantillons

Faisceau incident	${}^2_4\text{H}^+$
Energie de faisceau incident	E = 2 MeV
L'angle d'incidence	$\alpha = 0^\circ$
L'angle de détection	$\Theta = 170^\circ$
Distance détecteur-cible	d = 11 cm
Résolution du détecteur	$\delta E_{\text{det.}} = 20 \text{ keV}$
Intensité du courant	I = 30- 40 nA
Tension de polarisation du détecteur	V _{pol} = 40 V
Droite de calibration	E(KeV)= 2.8714× C + 4.91693

Tableau. III-1 : Tableau récapitulatif des conditions expérimentales utilisées lors de l'analyse RBS.

III.1.1 L'étalonnage de la chaîne de détection pour l'analyse RBS :

L'étalonnage en énergie de la chaîne de détection est essentiel pour convertir les signaux détectés sous forme de canaux. en énergie correspondante. Cette étape est caractérisée par une droite de calibration, qui permet de relier les canaux de mesure aux énergies des particules détectées. La droite de calibration est généralement représentée par une équation de la forme :

$$E(\text{KeV}) = a \times C + b, \quad (\text{III-3})$$

Où :

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

- E est l'énergie de la particule détectée en keV,
- C est le numéro de canal correspondant dans le spectre,
- a est le coefficient de calibration en keV/canal,
- b est le terme constant en keV.

En traçant cette droite de calibration à l'aide des données expérimentales, il est possible d'obtenir les coefficients a et b qui permettent de convertir les canaux de mesure en énergies réelles. Les différents paramètres de la calibration sont exposés dans le tableau (III-2) ci-dessous :

Elément de la cible	Si	Sn	Bi
Masse(g)	27.977	119.902	208.98
K $C_{in}(\theta d=160^\circ)$	0.5718	0.87753	0.92838
$E(\text{keV})=K_{cin}E_0$	1143.608	1755.065	1856.765
Canal	396	615	640

Tableau. III-2 : descriptif du facteur cinématique, l'énergie de rétrodiffusion et le canal de Surface pour chaque élément présent dans les cibles étudiées

En se basant sur ces résultats, nous avons établi la droite d'étalonnage de la chaîne de détection employée.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

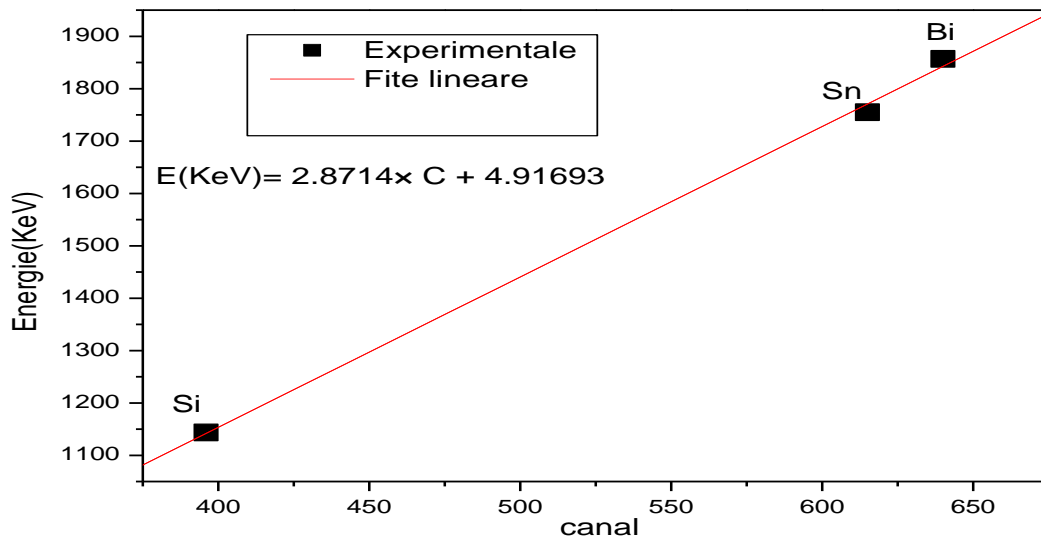


Figure. III-3 : étalonnage de la chaîne de détection de la technique RBS.

La droite de calibration de la chaîne de détection est illustrée dans la figure (III-3). Elle comprend trois points qui correspondent à la surface des pics des éléments en surface à étudier (Si, Sn et Bi) qui sont calculés en fonction du numéro de canal. Les coefficients d'étalonnage a et b sont donc, respectivement, ($a = 2.8714 \text{ keV/Canal}$ et $b = 4.91693 \text{ keV}$).

La simulation des spectres RBS est une étape importante dans l'analyse par faisceau d'ions, permettant de comparer les résultats expérimentaux avec des simulations pour valider les modèles utilisés et interpréter les données obtenues comme nous l'avons mentionné précédemment. Elle implique d'introduire les divers paramètres expérimentaux tels que l'énergie, la nature et l'intensité du faisceau d'ion incident (He^+), la géométrie de détection, la nature et l'épaisseur de la cible à analyser. Nous effectuons plusieurs itérations jusqu'à ce que nous puissions obtenir un meilleur ajustement du spectre simulé au spectre expérimental. Le code de simulation SIMNRA est utilisé pour simuler le spectre en introduisant les conditions initiales dans le tableau (III-1), en utilisant la bibliothèque de données des sections efficaces de Rutherford et la cinématique de collisions associée aux tabulations du pouvoir d'arrêt générées par la compilation ZBL du code SRIM.

Une fois la simulation est effectuée, les spectres simulés sont comparés aux spectres expérimentaux pour évaluer la concordance entre les deux. Des ajustements peuvent être réalisés en fonction des écarts observés comme montre les figures ci-dessous.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

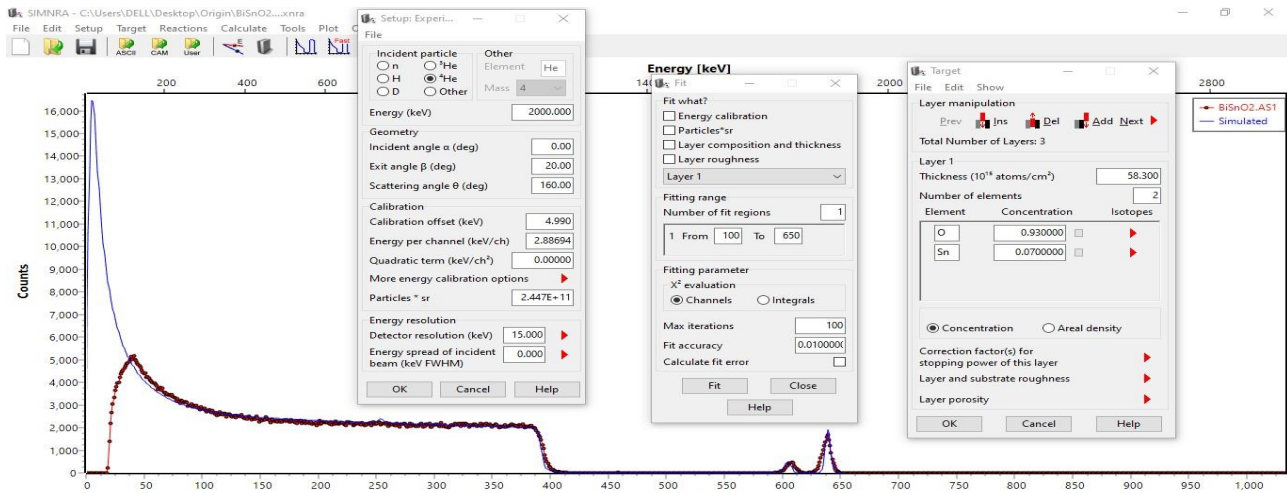


Figure III-4: Une prise d'écran du logiciel SIMNRA montrant la procédure de simulation du spectre RBS de la cible Bi/SnO₂/Si

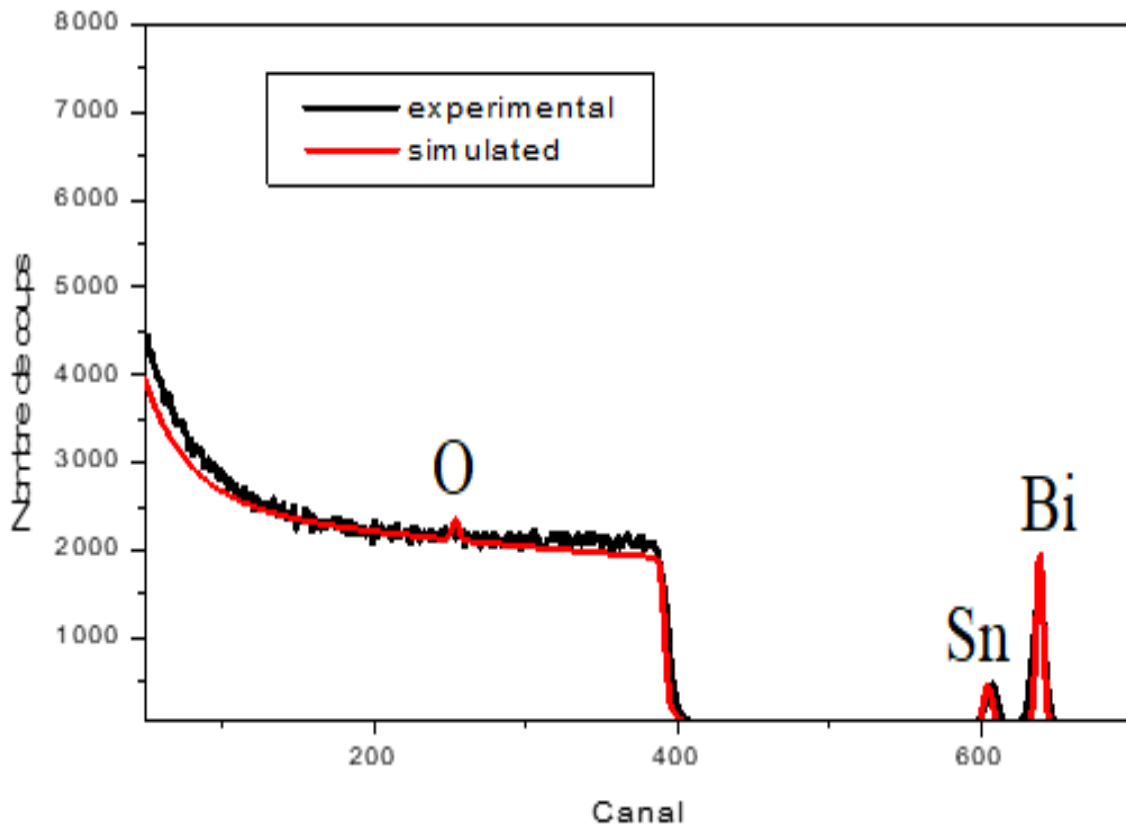


Figure III-6. Un spectre RBS expérimental simulé par le code SMINRA de la cible Bi/SnO₂/Si.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

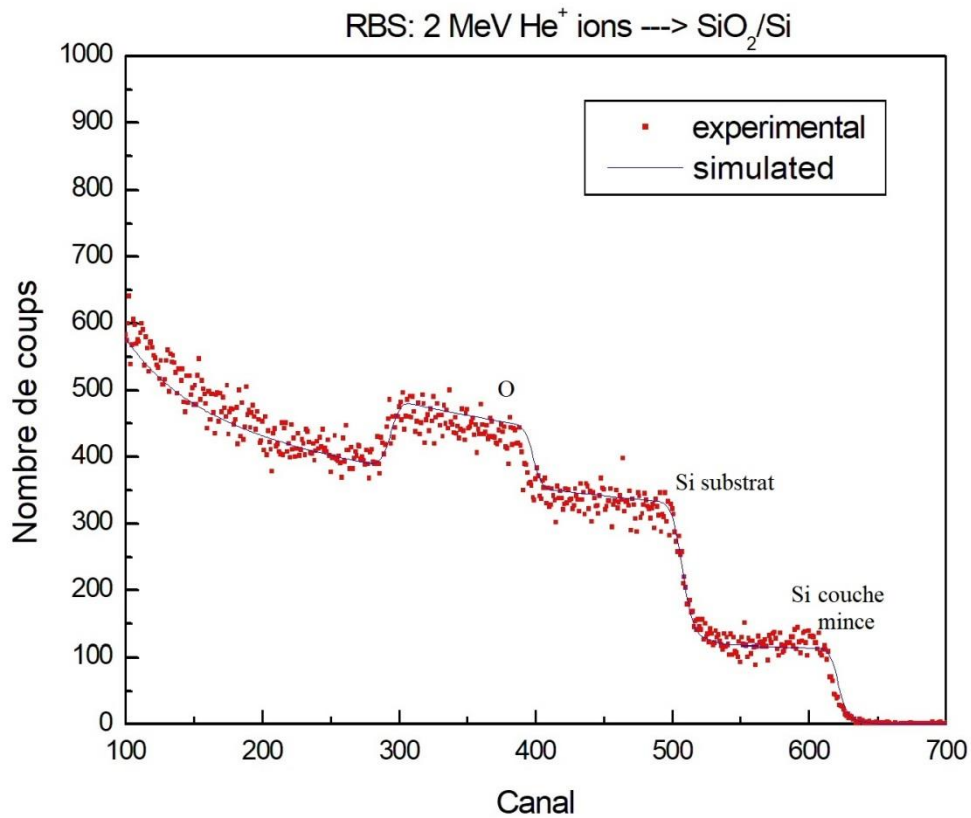


Figure III-7 : Un spectre RBS expérimental simulé par le code SMINRA dans le cas de la cible SiO₂/Si.

Les tableaux (III- 3et III-4) ci-dessous résume les résultats de la simulation (les concentrations des éléments et l'épaisseur de la cible Bi/SnO₂/Si et SiO₂/Si).

Couche	Densités surfaciques (10 ¹⁵ /cm ²)	Concentration des éléments (%)	Epaisseur (nm)
Bi	4.881	100	1.73
SnO ₂	58.921	Sn (17.36) O (82.64)	7.07

Tableau. III-3 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (Bi/SnO₂/Si) via la simulation par le code SIMNRA.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

Couche	Densités surfaciques ($10^{15}/\text{cm}^2$)	Concentration des éléments (%)	Épaisseur (Å)
SiO ₂	2869.710	Si (28.46) O (71.54)	137.1

Tableau. III-4 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (SiO₂/Si) via la simulation par le code SIMNRA.

III.2. L'analyse NRA :

La sensibilité à l'élément léger dans des matrices contenant des éléments lourds est limitée par la technique de RBS, comme nous l'avons vu précédemment. La technique d'analyse par réactions nucléaires (NRA) permet de surmonter cette difficulté, car elle est plus appropriée pour détecter les éléments légers en surface.

La NRA est une technique complémentaire à la RBS qui permet de détecter et de quantifier les éléments légers tels que le carbone, l'oxygène et l'azote, même en présence de matrices contenant des éléments plus lourds. En utilisant des réactions nucléaires spécifiques, la NRA offre une sensibilité accrue aux éléments légers et permet une analyse plus précise de leur concentration et de leur distribution dans les échantillons.

Les couches	Bi/SnO ₂	Si
Faisceaux	Deuton $^2\text{H}^+$	
Energie	$E = (950) \text{ keV}$	
Angle d'incidence	$\theta_i = 0^\circ$	
Angle de détection	$\theta_D = 150^\circ$	
Distance détecteur-cible	d = 3,5 cm	
Résolution du détecteur	$\delta E_{det} = 15 \text{ keV}$	
Intensité du courant	I = 30-40 Na	
Polarisation du détecteur	V _{pol} = 50 V	
Droite de calibration	$E(\text{keV}) = 5.137 + 3.87841 \times C$	

Tableau. III-5 : Les conditions expérimentales pour l'analyse NRA.

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

III.2.1. Etalonnage de la chaîne de détection pour l'analyse NRA :

L'étalonnage en énergie de notre chaîne de détection pour l'expérience NRA a été réalisé de la même manière que l'analyse par RBS, en prenant en compte les énergies des produits des réactions lors de l'interaction des deutons avec l'oxygène et le carbone. Dans le spectre du graphite, cette réaction se manifeste avec $E_{p1}=1608.64$ keV pour la réaction $^{16}\text{O} (d, p_1)^{17}\text{O}$, $E_{p0}=2396.09$ keV pour la réaction $^{16}\text{O} (d, p_0)^{17}\text{O}$, $E_{\alpha_0}=2620.34$ keV pour la réaction $^{16}\text{O} (d, \alpha_0)^{14}\text{N}$, $E_{p0}=2975.27$ keV pour la réaction $^{12}\text{C} (d, p_0)^{13}\text{C}$ et $E_p=3065.6$ keV pour la réaction $^{12}\text{C} (d, p) ^{13}\text{C}$ (voir tableau III-6).

En utilisant le logiciel Micro cal (Origin), nous avons tracé la droite d'étalonnage (Figure III-3) en établissant les constantes de calibration a et b, qui sont respectivement de 3.87841keV/Canal et 5.137keV

Réaction nucléaire	Energie (keV)	Section efficace (mb/sr)
$^{16}\text{O} (d, p_1)^{17}\text{O}$	1608.64	8.719
$^{16}\text{O} (d, p_0)^{17}\text{O}$	2394.55	1.06
$^{16}\text{O} (d, \alpha_0)^{14}\text{N}$	2621.06	6.918
$^{12}\text{C} (d, p_0)^{13}\text{C}$	2975.04	30.5

Tableau III-6 : Tableau récapitulatif de différentes réactions nucléaires observées lors de l'analyse par NRA pour la couche SiO_2/Si à une énergie de deutons de 950 keV et à un angle de diffusion de 150° .

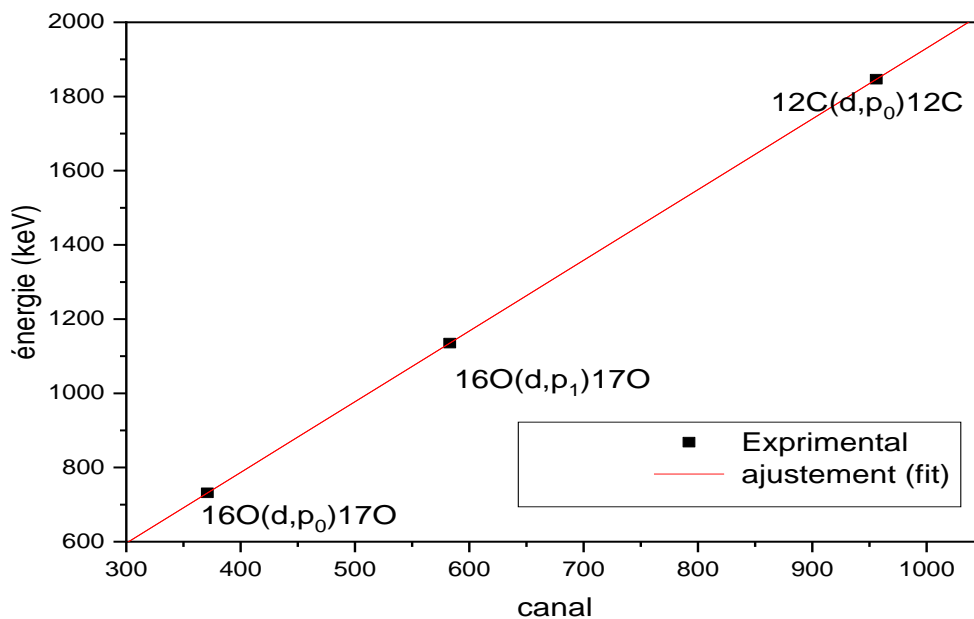


Figure. III-3 : Droite d'étalonnage de la chaîne de détection dans le cas de l'analyse NRA.

III.2.2. Simulation des spectres par SIMNRA :

Nous avons utilisé un faisceau de $^2\text{H}^+$ à une énergie incidente $E_0 = 950 \text{ keV}$ pour cet échantillon, le spectre NRA généré est relatif à deux couches ; Dioxyde d'étain (SnO_2) et le Bismuth (Bi) sur un substrat de silicium et une cible de SiO_2/Si , la simulation via le code SIMNRA implique l'introduction des sections efficaces des réactions nucléaires observées sur le spectre expérimental, en plus des paramètres initiaux de l'expérience.

Les résultats de cette simulation figurent (III-4 et III-5) sont représentés dans les tableaux (III-7) et (III-8). Il est intéressant de noter que dans cette situation, nous avons seulement examiné les résultats des différentes réactions impliquées dans l'interaction des deutons avec l'oxygène et le carbone. À la différence de l'analyse RBS où le pic d'oxygène était dissimulé par celui du substrat de silicium, nous avons observé, en plus du spectre de rétrodiffusion des deutons, des pics (4 pics) distincts et clairement visibles, avec chaque pic présentant une réaction nucléaire qui le caractérise. Ainsi, il est possible d'estimer de manière adéquate la structure de la couche Bi/ SnO_2/Si et SiO_2/Si . Les tableaux (III-7 et III-8) résume les principaux résultats obtenus par les analyses des spectres NRA.

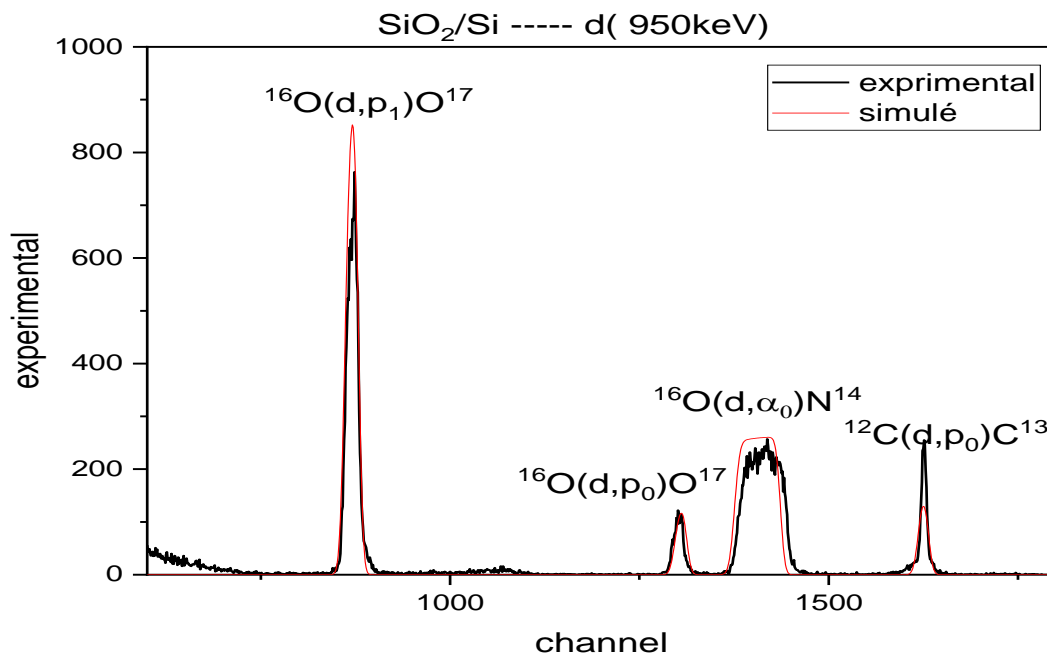


Figure. III-4 : Spectre expérimentale NRA obtenu à un angle $\theta = 150^\circ$ par rapport à la direction initiale d'un faisceau $^2\text{H}^+$ d'énergie 950 keV SiO_2/Si .

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

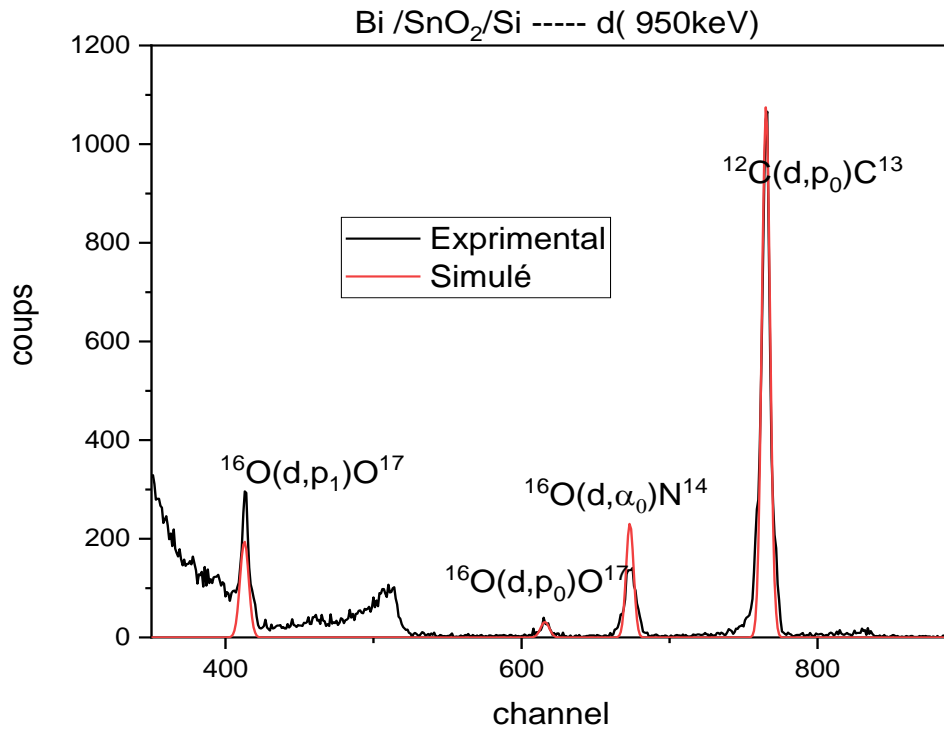


Figure. III-5 : Spectre expérimentale NRA obtenu à un angle $\theta=150^\circ$ par rapport à la direction initiale d'un faisceau $^2\text{H}^+$ d'énergie 950 keV pour un cible Bi/SiO₂/Si.

Couche	Densités surfaciques ($10^{15}/\text{cm}^2$)	Concentration des éléments (%)	Epaisseur (nm)
SiO ₂	2539.4	Si (30.3) O (67.6) C (1.9)	121

Tableau. III-7 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (SiO₂/Si) via la simulation par le code SIMNRA des spectre NRA

D'après la figure.III.4, nous observons dans la gamme de canaux entre 1500 et 1600 un pic dû au carbone présent en surface de notre échantillon. Ce carbone est généré par les pompes à diffusion qui assurent le vide permanent dans la chambre à réaction durant toute la période d'expérience. En outre, le pic de la réaction $^{16}\text{O}(d, \alpha_0)^{14}\text{N}$ est plus épais que le reste des pics, car cette interaction a une section efficace relativement grande (0.7 mb/sr) ce qui augmente la probabilité d'occurrence par rapport au reste des interactions. A partir des résultats obtenus par les deux analyses RBS (voir tableau III-3) et NRA (tableau III-6), nous observons que les valeurs des épaisseurs et de la stœchiométrie de la couche SiO₂ sont très proches. Par comparaison, les résultats des tableaux

Chapitre III : Présentation et analyse des résultats expérimentaux, analyse des données et discussion

(III-3), (III-7) et (III-8), nous observons que les deux analyses RBS et NRA donnent pratiquement des résultats similaires de l'épaisseur mais avec des concentrations (stœchiométrie) un peu différente de la couche SiO₂/Si, due à la détection du carbone par l'analyse NRA. Ceci démontre la fiabilité de l'analyse NRA pour l'identification des éléments légers contenus sur une matrice d'éléments lourds

Couche	Densités surfaciques (10 ¹⁵ /cm ²)	Concentration des éléments (%)	Epaisseur (nm)
Bi	5.883	Bi (100)	2.08
SnO ₂	63.108	Sn (16.66370) O (78.8323) C (4.5040)	7.57

Tableau. III-8 : Tableau récapitulatif des valeurs de densités surfaciques et des concentrations et les épaisseurs de la cible (BiSnO₂/Si) via la simulation par le code SIMNRA des spectre NRA.

En comparant les résultats des tableaux (III-3), et (III-8), qui présentent les données obtenues à partir des analyses RBS et NRA de la couche (Bi/SnO₂/Si), il est observé que les deux techniques fournissent des résultats similaires en termes d'épaisseur de la couche. Cependant, des différences sont notées au niveau des concentrations (stœchiométrie) des éléments présents dans la couche.

D'après la figure.III.5, nous observons dans la gamme de canaux entre 750 et 771 un pic dû au carbone présent en surface l'échantillon

Cette observation met en évidence la fiabilité de l'analyse par réactions nucléaires (NRA) pour l'identification des éléments légers présents dans une matrice composée d'éléments plus lourds. La NRA est particulièrement adaptée pour détecter et quantifier les éléments légers, tels que l'oxygène et le carbone, qui peuvent être présents en faibles concentrations dans des échantillons solides.

Conclusion générale

Au terme de cette étude, nous avons analysé les résultats obtenus à partir des spectres RBS et NRA des cibles SiO_2/Si et $\text{Bi}/\text{SnO}_2/\text{Si}$, ce qui nous a permis de tirer des conclusions importantes sur les performances et les spécificités de ces deux techniques d'analyse.

Dans le cadre de ce travail, nous avons approfondi nos connaissances sur les techniques nucléaires d'analyse par faisceau d'ions, notamment autour d'un accélérateur de particules. Ensuite, une recherche bibliographique actualisée sur les techniques d'analyse par faisceaux d'ions, en particulier la rétrodiffusion de Rutherford (RBS) et l'analyse par réaction nucléaire (NRA), a été effectuée.

La tâche principale de notre étude a consisté à analyser les spectres expérimentaux obtenus par les techniques RBS et NRA sur différents échantillons, y compris des couches minces de dioxyde de silicium (SiO_2) déposées sur du silicium (Si) et des couches de bismuth (Bi) sur du dioxyde d'étain (SnO_2) lui-même sur du silicium (Si). Les échantillons ont été bombardés avec divers types de faisceaux d'ions ($^2\text{H}^+$ et $^4\text{He}^+$) à des énergies de l'ordre du MeV délivrées par l'accélérateur Van de Graaff 3.75 MV du CRNA.

Grâce à l'utilisation du code de simulation SIMNRA, nous avons pu réaliser une caractérisation qualitative et quantitative de nos échantillons cibles. Cette analyse a permis de déterminer l'épaisseur et la stœchiométrie des matériaux, de détecter les éléments légers présents, et de doser les constituants à l'état de traces. Les résultats expérimentaux déduits de l'analyse RBS se sont révélés en bon accord avec ceux de l'analyse NRA, malgré les différences inhérentes aux deux techniques.

Les valeurs obtenues confirment que la RBS offre une excellente précision pour la mesure de l'épaisseur des couches minces, mais elle est limitée par son incapacité à détecter des impuretés légères telles que le carbone. En revanche, la NRA, bien qu'elle donne des résultats légèrement décalés pour les épaisseurs, a démontré sa capacité à identifier et quantifier les impuretés légères, y compris le carbone, avec une grande sensibilité.

Finalement, l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail valide l'utilisation des analyses RBS et NRA pour la mesure de l'épaisseur des dépôts de couches minces et la stœchiométrie des éléments présents en profondeur. De plus, la NRA se distingue par sa capacité à détecter et quantifier les éléments légers présents à l'état de traces. Cette étude a non seulement approfondi notre compréhension des techniques RBS et NRA, mais elle a également renforcé nos compétences pratiques d'utilisation des outils de simulation, constituant ainsi une étape significative dans notre parcours académique et professionnel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

References BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. R. Verma, *Atomic and Nuclear Analytical Methods* ., 2007.
- [2] E. N. Physique, “Étude de la pulvérisation induite par des ions de gaz rares (Ar^+ , Kr^+) de basses énergies ($E < 200$ keV) dans des cibles solides d’aluminium, d’or et de bismuth.,” 2010.
- [3] M. Nastasi, J. W. Mayer, and Y. Wang, *Ion beam analysis: Fundamentals and applications*. 2014. doi: 10.1201/b17310.
- [4] K. Fouad, “Elaboration et étude physico-chimique de siliciures de fer.,” 2007.
- [5] G. Terwagne, “Méthodes nucléaires d’analyses,” 2002.
- [6] R. L. Thompson, 2.27 - *Ion Beam Analysis*, vol. 1–10. Elsevier B.V., 2012. doi: 10.1016/B978-0-444-53349-4.00051-0.
- [7] P. E. D. Ondes *et al.*, “Dépôts de TaN x par pulvérisation cathodique magnétron à fort taux d’ionisation de la vapeur pulvérisée .,” 2011.
- [8] M. T. Batchelor, “The Bethe ansatz after 75 years,” *Phys. Today*, vol. 60, no. 1, pp. 36–40, 2007, doi: 10.1063/1.2709557.
- [9] T. Brahim, “Spécialité : Physique des ions moléculaires légers dans les solides .,” 2021.
- [10] J.F. Ziegler, J.P Biersack and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Matter : Data Plots, Citations of Stopping of Ions in Matter*, (2008), and SRIM computer code available in <http://www.srim.org>.
- [11] R. Amina and L. Imane, “Option : Physique des Rayonnements Détermination expérimentale des concentrations d’éléments légers (C, N et O) à l’état de trace dans différentes cibles solides via la technique d’analyse par réactions nucléaires .,” 2018.
- [12] P. Calmon, D. D. E. Technologie, D. E. S. Matériaux, C. D. E. S. Rapports, N. Et, and B. Cea, “CONTRIBUTION DE L’ANALYSE RBS A L’ETUDE DES EFFETS D’IRRADIATION SUR LA DIFFUSION DANS LES VERRES D’OXYDES par Centre d’Etudes Nucléaires de Saclay Rapport SERVICE DE DOCUMENTATION”.
- [13] T. Dupuis, “Développement d’un dispositif d’analyses par faisceaux d’ions de haute énergie et applications en archéométrie,” 2012.
- [14] F. Hinterberger, “Electrostatic accelerators,” *CAS 2005 - Cern Accel. Sch. Small Accel. Proc.*, no. October, pp. 95–112, 2006, doi: 10.1142/9789814417204_0001.
- [15] https://microcal-origin.software.informer.com/6.0/#google_vignette
- [16] M. Mayer, *SIMNRA User's Guide*, Report IPP 9/113, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany, 1997.