



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° : D02P2120...M

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique des matériaux

Thème

**Effet de charge sur l'évolution des vitesses de propagations
des ondes acoustiques**

Présentée par :

Meriem LITIME

Soutenu le : 04./07/2022..... devant le jury composé de :

S. Boulkessaim	MCB	Université de Skikda	Président
A. Gacem	MCA	Université de Skikda	Rapporteuse
L. Bali	MAA	Université de Skikda	Examinatrice

Année Universitaire : 2021/2022



REMERCIEMENTS

*Le remerciement infini avant tous est à dieu le plus puissant qui nous a comblé
des bienfaits de l'Islam et de la science.*

*Nous exprimons nos profonds remerciements au docteur **Gacem Amel**,
professeur à l'Université de **20 Août 1955 Skikda**, encadreur de ce mémoire,
pour son aide précieuse, sa confiance, ses encouragements, sa patience et son
soutien favorable pour l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons aussi à adresser, nos vifs remerciements les plus respectueux aux
membres du **jury** de ce mémoire, le président docteur **BOULKHESSAIM Salim**
et l'examinatrice docteur **BALI Leila**.*

*Sans oublier de remercier vivement tous les enseignants du département
physique ainsi que tous les étudiants de la **Physique des matériaux**.*

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous.

Nous remercions nos sœurs et frères pour leurs encouragements.

Notre reconnaissance va à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Meriem.....

RÉSUMÉ

Les technologies basées sur l'exploitation des propriétés spécifiques des couches dites minces se sont fortement développées à la fin du 20ème siècle, et sont devenues l'une des voies les plus importantes de progrès tant en ce qui concerne la miniaturisation que le développement de nouveaux capteurs ; dont la réalisation ne pourrait se faire sans cette technologie. Les mécanismes microscopiques, à la base de la relation structure-propriétés physiques des films minces, connues par ses faibles épaisseurs, sont encore très mal identifiées pour un grand nombre de systèmes métal/métal, métal/céramique, métal/semiconducteurs, oxide/semiconducteur ou oxyde/métal. L'approche de ce délicat problème commence par le contrôle de la croissance des films minces, qui nécessite une optimisation de la technique de dépôt et donc une très bonne connaissance de l'influence des paramètres expérimentaux qui sont souvent nombreux et interdépendants. Les nano couches peuvent avoir des propriétés très différentes de celles des matériaux massifs, la compréhension des propriétés de ces systèmes nécessite une caractérisation précise de leur structure et de leur morphologie ainsi que d'étudier les effets dus aux contraintes mécaniques et aux dimensions réduites des épaisseurs. Dans ce contexte et à la différence des travaux déjà consacrés à l'étude de la dispersion des vitesses de propagation des ondes acoustiques (de volumes ou de surface), nous exposons les effets des épaisseurs de couche (d) sur la vitesse de Rayleigh (V_R). Plusieurs structures couches minces (Al, AlN, Cr, Cu, SiC, SiO₂, Si₃N₄ and ZnO) déposées sur différents substrats Al₂O₃ ont été considérées. L'analyse des résultats ont mené à évoluer le comportement dispersif (positive ou négative) de la vitesse de Rayleigh. Ainsi, elles seraient de grande importance dans la prévision et la détermination des paramètres élastiques de plusieurs couches appartenant à divers types de matériaux.

Mots Clés : Couche mince, vitesses de propagation, Ultrasons, Ondes acoustiques de surface (SAW).

ABSTRACT

Thin films and coatings, which are characterized by small thicknesses that could vary from a few atomic layers, could greatly modify the substrate properties over which they are deposited. Significant efforts have been devoted to the development of and characterization of coating thin film systems that could possess distinct properties from their bulk material. Microscopic mechanisms based on the relation structure-physical properties of layers are not well understood for a great number of systems: metal/metal, metal/ceramics, metal/semiconductor, oxide/semiconductor or oxide/metal. Elastic parameters (wave velocities, mechanical constants, etc.) of layers and coatings, which are of great importance in several modern applications, are difficult to investigate by traditional destructive methods. In this work, we report an extensive study of mass density variations with increasing thickness of many films (Al, AlN, Cr, Cu, SiC, SiO₂, Si₃N₄ and ZnO) deposited on two substrates Quartz and Al₂O₃. From the analysis of results, it was found the velocity showed behaviours: increasing layer thickness leads to initial increase (or decrease) of the velocity (according to layer/substrate combination) followed by a saturation region. Thus, they would be of great importance in the determination of elastic films systems.

Keywords: Thin films, Velocity, Ultrasonic, Surface Acoustic Wave (SAW).

ملخص

إن النمو الكبير الذي عرفته تكنولوجيا الطبقات الرقيقة في السنوات الأخيرة سمحت لها بغزو مجالات عديدة كالبيولوجيا والميكرو إلكترونيك، حيث لقيت اهتماما كبيرا من البحث والدراسة من أجل تطوير أساليب جديدة، تمكننا من الانتقال إلى عالم المركبات ذات أبعاد المصغرة للكشف عن جميع خصائصها الكهربائية، الضوئية والميكانيكية. تبقى الآليات المجهرية، التي تتركز على العلاقة بين بنية المادة والخصائص الفيزيائية للطبقات الرقيقة المتميزة بسمك يقارب النانومتر او الميكروميتر، غير معروفة لمجموعة كبيرة من البنيات معدن/ معدن، معدن/نصف ناقل أو أكسيد/ نصف ناقل. من خلال هذه المدكرة قمنا بدراسة تأثير سمك الطبقات (h) على تغيرات سرعة رايلي (V_R) وذلك باستعمال المراقبة الغير هدامة عن طريق الأمواج فوق الصوتية لمجموعة كبيرة من الطبقات الرقيقة ($Al, AlN, Cr, Cu, SiC, SiO_2, Si_3N_4, ZnO$ المترسبة على مسند كوارتز و Al_2O_3). حيث أن الدراسة الكمية والنوعية للنتائج الحصلة عليها سمحت لنا بالكشف عن وجود نوعين من تبدد للسرعة: الموجب والسالب التي تتيح لنا إمكانية حساب ثوابت مرونتها كمعامل يونغ، ثابت القص ومعامل الانضغاطية.

الكلمات المفتاحية: الطبقات الرقيقة، السرعة، الأمواج فوق الصوتية، معاملات المرونة.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I		
Figure I.1	Propagation d'une onde.	04
Figure I.2	Onde transversale.	05
Figure I.3	Onde longitudinale.	06
Figure I.4	Ondes de love.	06
Figure I.5	Les ondes de Lamb : (a) symétriques et (b) antisymétriques.	07
Figure I.6	Méthode acoustique pour la caractérisation des structures couches minces déposées sur substrats.	11

Chapitre II		
Figure II.1	Illustration de loi de Snell.	15
Figure II.2	Signatures acoustiques de structure eau/Al sont calculées à $f = 142$ MHz pour différents ouverture de la lentille : (i) $\theta_{exc} = 50^\circ$, (ii) $\theta_{exc} = 14^\circ$, (iii) $\theta_{exc} = 22^\circ$, (iv) $\theta_{exc} = 28^\circ$ et (v) $\theta_{exc} = 30^\circ$.	17

Chapitre III		
Figure III.1	Schémas montre l'allure des rayons réfléchis dans l'échantillon.	22
Figure III.2	Coefficient de réflexion.	24
Figure III.3	Analyse spectrale par FFT.	26
Figure III.4	Coefficient de réflexion obtenus à 142 MHz pour SiC nu (a) et différentes épaisseurs de Al_2O_3 (b, jusqu'à h).	29
Figure III.5	Signature acoustique obtenu à 142 MHz pour SiC nu (a) et différentes épaisseurs de Al_2O_3 (b, jusqu'à h).	30
Figure III.6	Spectre de FFT des courbes de $V(z)$ pour SiC nu (a) et différentes épaisseurs de Al_2O_3 (b, jusqu'à h).	31
Figure III.7	Dispersion de la vitesse de Rayleigh en fonction de la normale h/λ_T des films (AlN, SiO_2 , Al, ZnO, SiC et Si_3N_4) déposées sur le même substrat en quartz.	33
Figure III.8	Dispersion de vitesse de Rayleigh des films (AlN, Cr, Al, ZnO, Cu et Si_3N_4) déposées sur Al_2O_3 en fonction de la normale h/λ_T .	34
Figure III.9	(a) Dispersion de la vitesse de Rayleigh pour des différentes couches minces déposées sur deux types de substrat (le quartz et le saphir). (b) Variation du rapport des densité ($\rho_{Lay}/\rho_{Sub.}$) en fonction de $\Delta V_R/V_R$.	36

LISTE DES TABLEAUX

<i>Chapitre III</i>		
<i>Tableau III. 1</i>	<i>Caractéristiques et propriétés élastiques des matériaux étudiés.</i>	26
<i>Tableau III.2</i>	<i>Caractéristiques et propriétés élastiques des matériaux étudiés.</i>	28
<i>Tableau III.3</i>	Les propriétés acoustiques des structures couches minces/substrats.	32

LISTE DES SYMBOLES

λ	Longueur d'onde
λ_T	Longueur d'onde transversale
μ	Micron (10^{-6})
ν	Coefficient de Poisson
θ_C	Angle critique
θ_R	Angle critique de Rayleigh
ρ	Densité d'un matériau
$\rho_{\text{Liq.}}$	Densité du liquide
ρ_C	Densité de la couche
ρ_s	Densité du substrat
ρ_C/ρ_s	Rapport des densités
σ	Contrainte
ψ	Fonction d'onde
Å	Angstrom (10^{-10})
E	Module d'Young
FFT	Transformée de Fourier rapide
f	Fréquence
G	Module de cisaillement
h	Épaisseur
h/λ_T	Épaisseur normalisée
K	Module de compression
n	Indice de réfraction

Effet de charge sur l'évolution des vitesses de propagations des ondes acoustiques

$R(\theta)$	Coefficient de réflexion
$V(z)$	Signature acoustique
V_p	Vitesse de phase
V_{PC}	Vitesse de phase de la couche
V_{PS}	Vitesse de phase du substrat
V_L	Vitesse longitudinale
V_{LC}	Vitesse longitudinale de la couche
V_{LS}	Vitesse longitudinale du substrat
V_{Liq}	Vitesse du liquide de couplage
V_R	Vitesse de Rayleigh
V_{RC}	Vitesse de Rayleigh de la couche
V_{RS}	Vitesse de Rayleigh du substrat
V_T	Vitesse transversale
V_{TC}	Vitesse transversale de la couche
V_{TS}	Vitesse transversale du substrat
ΔV	Variation de volume
SAM	Microscope acoustique à balayage
SAW	Onde acoustique de surface
Z	Impédance acoustique
z	Distance de défocalisation
Δz	Périodicité

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GÉNÉRALE1

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES ONDES ACOUSTIQUES.....3

I.1 INTRODUCTION4

I.2 LES ONDES DANS LA MATIERE.4

I.3 ONDES DE VOLUME.....15

I.4 ONDES DE SURFACE.....06

I.4.1 Ondes de love.....06

I.4.2 Ondes de Rayleigh.....07

I.4.3 Ondes de Lamb.....07

I.5 DOMAINES D'APPLICATION DES FILMS MINCES.....08

I.5.1 Application en microélectronique.....08

I.5.2 Application en optique.....08

I.5.3 Application photovoltaïques.....09

I.6 MÉTHODES ULTRASONORES09

I.6.1 Microcaractérisation qualitative10

I.6.2 Microcaractérisation quantitative.....11

I.7 CONCLUSION.....12

CHAPITRE II : RELATIONS FONDAMENTALES DE L'ACOUSTIQUE.....	13
II.1 INTRODUCTION.....	14
II.2 LOIS DE SNELL ET DESCARTES	14
II.3 IMPÉDANCE ACOUSTIQUE.....	15
II.4 COEFFICIENT DE RÉFLEXION ET DE TRANSMISSION.....	16
II.5 ATTENUATION DES ONDES DE SURFACES.....	17
II.6 EFFET DES DIFFERENTS PARAMETRES ACOUSTIQUES.....	18
II.6.1 L'effet de charge	19
II.6.2 L'effet de l'ouverture de la lentille	19
II.6.3 L'effet du substrat.....	19
II.7 CONCLUSION.....	20
CHAPITRE III : VARIATION DES COURBES DE DISPERSIONS DE LA VITESSE DE RAYLEIGH	21
III.1 INTRODUCTION.....	22
III.2 PRINCIPE DE MICRO-CARACTERISATION.....	22
III.3 CHOIX DES CONDITIONS DE SIMULATION.....	23
III.4 MÉTHODOLOGIE.....	23
III.5 INVESTIGATION DE LA STRUCTURE AL₂O₃/SiC.....	26
III.5.1 Coefficient de réflexion.....	27
III.5.2 Signatures acoustiques.....	27
III.5.3 Analyse spectrale des signatures acoustiques.....	28
III.6 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA VITESSE DE PHASE DU MODE RAYLEIGH	32
III.6.1 Structures couches minces/Qz.....	32
III.6.2 Structures couches minces/Al ₂ O ₃	34
III.7 DETERMINATION DES ÉPAISSEURS DES COUCHES MINCES.....	34

III.8 CONCLUSION.....	36
CONCLUSION GÉNÉRALE	37
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	38

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nos jours, il apparaît de plus en plus de structures sous forme de couches minces ou multicouches, utilisées comme revêtements pour la protection des surfaces, ou pour donner aux matériaux de nouvelles propriétés différentes de celles du matériau massif [1-3]. Les dimensions micrométriques ou nanométriques des couches minces, ou dans d'autre terme le dépôt des surfaces sur un volume très grand, implique la naissance des phénomènes physiques liées aux effets de surfaces et interfaces qui introduits des changements sur les propriétés électriques, mécaniques ou optiques des structures couches minces élaborées [4-7]. Ces propriétés on fait l'objet d'un nombre croissant d'études, afin de pouvoir réaliser des nano ou micro structures avec différents degrés de qualité et de coût ainsi que la fabrication de couches minces plus fonctionnelles et de propriétés plus contrôlables.

La présence d'un substrat conduit généralement à des interférences complémentaires du type orientation préférentielle des grains, macro et micro contraintes, liées au processus de préparation ; ainsi qu'à la qualité d'adhésion à l'interface de deux milieux couche-substrat. Les propriétés physiques des couches minces sont très fortement dépendantes de l'épaisseur puisqu'elle représente la caractéristique essentielle d'une couche, il importera donc de connaître cette interdépendance avec la plus grande précision possible [8].

Cependant, il existe plusieurs techniques microscopiques (électronique, optique ou acoustique), adaptée pour l'analyse des films minces à plusieurs échelles [9]. La résolution de ces instruments dépende de la proximité de la source et de l'objet. Vue la grande importance de la microscopie acoustique, qui présente des avantages comparables à celle des meilleurs appareils optiques, nous nous sommes intéressés à étudier le comportement dispersif de la propagation des ondes ultrasonores qui interagissent avec les structures composées de couches minces déposées sur différents substrats.

Nous commencerons notre travail (chapitre I) par une présentation des bases bibliographiques nécessaires, conduisant à la compréhension de l'interaction onde acoustique et la matière.

Nous présenterons ensuite dans le chapitre II, les différents lois et formules appliquées dans le control non destructif des structures (couches minces, multicouches matériaux massifs,...) par les ondes ultrasonores.

Au chapitre III, nous présenterons une étude sur l'influence des épaisseurs des films minces sur la variation de la vitesse de Rayleigh. Nous exposerons les principales étapes de calcul ayant conduit au développement des courbes de dispersions, qui nous ont permis d'étudier la variation épaisseur-vitesse dont de nombreuses propriétés physiques dépendent. Également, nous avons pu déduire une formule semi empirique permettant de calculer les épaisseurs des couches minces en connaissant leurs vitesses de Rayleigh.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ONDES ACOUSTIQUES

I.1 INTRODUCTION

C'est dernière année la micro caractérisation acoustique s'est imposée en tant qu'une nouvelle méthode non destructive et non contaminant, elle dévoile les détails importants de la structure des matériaux à différente profondeurs permettant ainsi, de visualiser les défauts éventuels de la technologie de préparation [1-4]. Cette technique permet d'examiner et de révéler avec une très grande précision le comportement mécanique des objets étudiées (couches minces, circuits intégrés, composants à semiconducteurs,...). L'utilisation des ondes élastiques s'étend régulièrement dans des domaines aussi divers que la métallurgie [5], la médecine [6] (échographie [7]) ou les télécommunications (traitement du signal), la production de filtres à ondes de surface pour téléphones mobiles. Dans ce chapitre, on décrit brièvement la définition des ondes élastiques, les différents modes qui se propagent dans les solides ainsi que la présentation de ses propriétés physiques.

I.2 LES ONDES DANS LA MATIERE.

Chaque onde électromagnétique est définie par sa longueur d'onde λ qui représente la périodicité spatiale des oscillations (distance entre deux oscillations maximales par exemple, figure (I.1)). La longueur d'onde, qui est aussi la distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation, est inversement proportionnelle à la fréquence et s'exprime en mètres. Plus la longueur d'onde est courte, plus l'intensité de l'onde est importante et donc plus elle est énergétique.

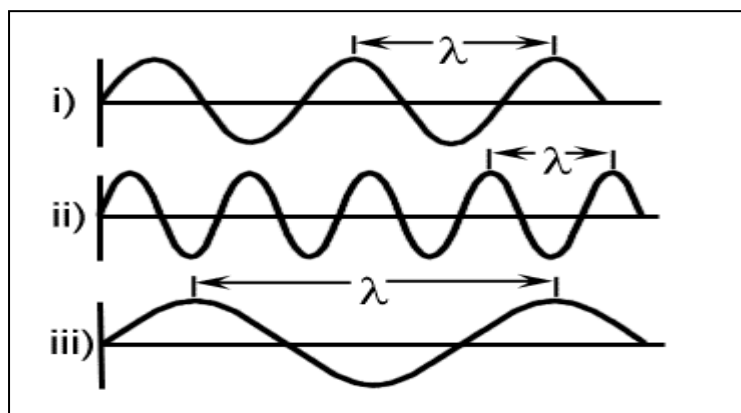


Figure I.1 : Propagation d'une onde

L'onde ultrasonore [8] est une onde de pression se propageant dans un milieu élastique : variation de pression qui se déplace. Il s'agit de la propagation d'une énergie mécanique dans un milieu matériel : ce déplacement ne peut se faire dans le vide (à la différence des ondes électromagnétiques). Ces ondes acoustiques font intervenir les paramètres fondamentaux de la matière : densité, vitesse, vecteur d'onde, élasticité, viscosité, structure (matériau massif, couches minces, empilement de couches...). Les ondes élastiques se propagent dans tout milieu matériel : fluides, solides homogènes ou inhomogènes, isotropes ou anisotropes, d'où on distingue la propagation de différents types d'ondes, elles peuvent être de nature de volume ou de surfaces et seront bien décrites ci-dessous.

I.3 ONDES DE VOLUME

Les ondes de volumes se propagent à l'intérieure du matériau, leurs vitesses de propagation dépendent du matériau utilisé, et d'une manière générale, elles augmentent avec la profondeur car le matériau qu'elles traversent est plus dense [9]. Le scientifique S. O. Poisson qui, en 1830, a montré qu'un corps homogène et isotrope de dimensions illimitées, peut transmettre des ondes de deux vitesses différentes et que, à une grande distance de la source de perturbation, le mouvement transmis par l'onde la plus rapide et longitudinal, le mouvement transmis par l'onde transversale. Une onde est transversale (figure I.2) lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.

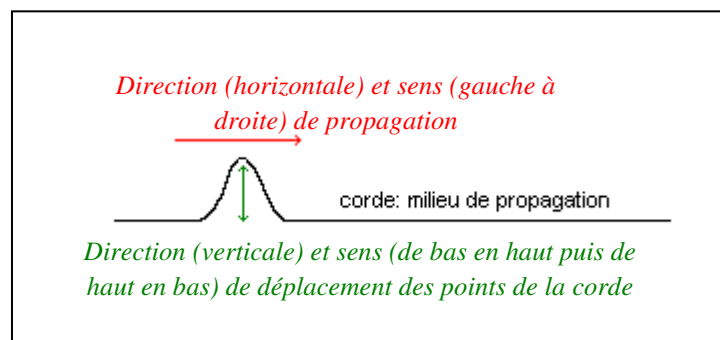


Figure I.2: Onde transversale [11].

Une onde est longitudinale (figure I.3) lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue dans la même direction que celle de la propagation.

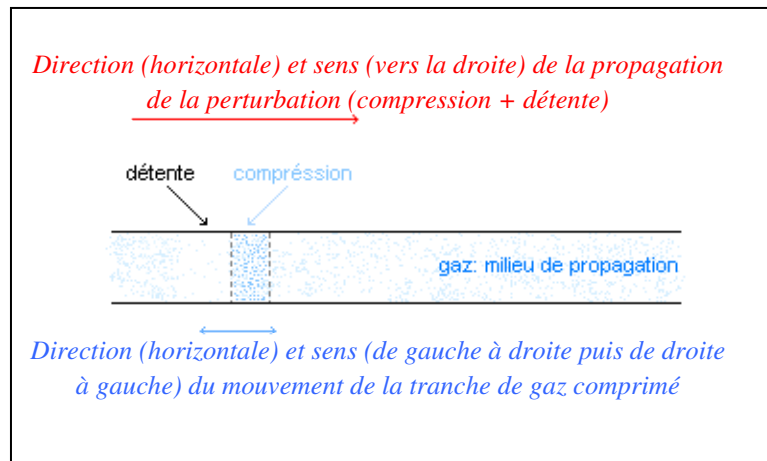


Figure I. 3 : Onde longitudinale [11].

I.4 ONDES DE SURFACE

Les ondes de surfaces sont des ondes guidées par la surface du matériau, leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte [11], ces ondes s'appliquent à toute déformation qui se propage en n'ébranlant qu'une faible épaisseur de la matière près de la surface. L'épaisseur s'évalue de l'ordre de la longueur d'onde [12], on peut distinguer plusieurs modes d'excitations tels que :

I.4.1 Ondes de love

Ce sont des ondes transversales dispersives qui se propagent dans un milieu constitué d'une couche et un substrat semi-infini dont les propriétés élastiques sont différentes [13] (figure I.4).

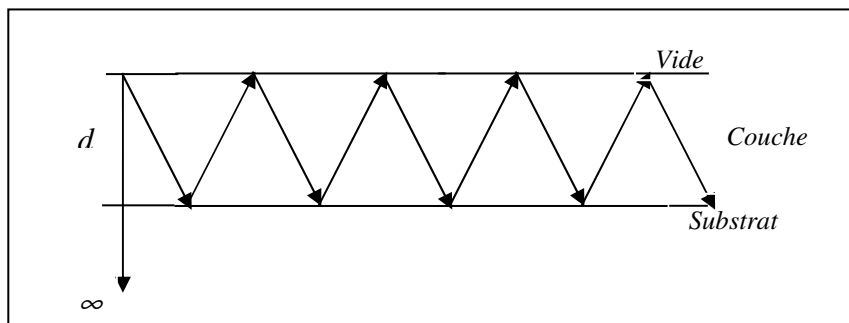


Figure I.4: Ondes de love.

I.4.2 Ondes de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh ont été découvertes par John William Rayleigh en 1885, ce sont des ondes constituées d'une composante longitudinale et d'une composante transversale [14]. Comme toutes les ondes de surfaces, l'onde de Rayleigh décroît exponentiellement en profondeur et se propage parallèlement à la surface. En suivant l'approximation de Viktorov on peut établir l'expression de la vitesse de Rayleigh, V_R , de la forme [15] :

$$V_R = V_T \left[\frac{0.718 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2}{0.75 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2} \right] \quad (I.1)$$

Avec :

V_R , V_T et V_L sont des vitesses de Rayleigh, transversale et longitudinale

I.4.3 Ondes de Lamb

Les ondes qui correspondent aux vibrations propres d'une couche élastique infinie d'une épaisseur finie, d , dans le vide sont des ondes de Lamb. Il existe deux types d'ondes de Lamb symétriques ou antisymétriques [16]. Quand les composantes longitudinales sont égales et les composantes transversales sont opposées (figure I.5a) de part et d'autre du plan médian, on des ondes de Lamb symétriques. Par contre, lorsque la composante longitudinale change de signe mais pas la composante transversale, on trouve les ondes de Lamb antisymétriques (figure I.5b).

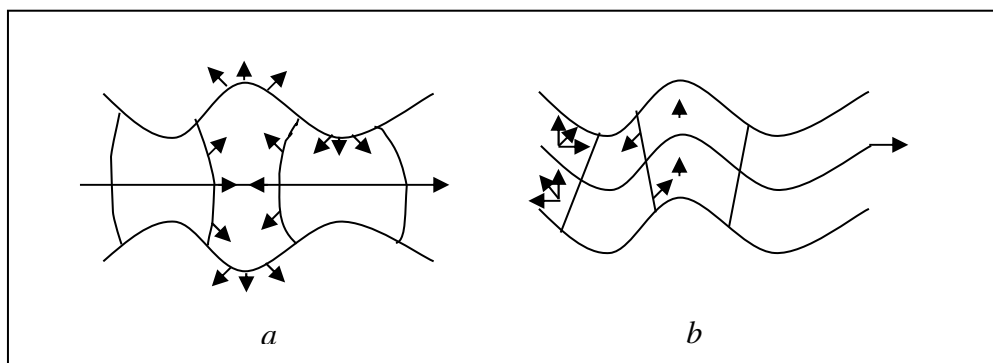


Figure I.5: Les ondes de Lamb : (a) symétriques et (b) antisymétriques

I.5 DOMAINES D'APPLICATION DES FILMS MINCES

De nos jours, les micro et nanotechnologies sont de plus en plus présentes dans la recherche universitaire et les applications industrielles. Les films minces possèdent un vaste champ d'applications très diverses dont certaines sont déjà bien établies (la microélectronique, l'optique, la mécanique, la chimie) et d'autres en pleine expansion (biologie, micro et nanotechnologies).

I.5.1 Application en microélectronique

La miniaturisation et la complexification des dispositifs microélectroniques contraignent les fabricants à inventer sans cesse des solutions technologiques nouvelles, pour remplacer les matériaux et procédés qui atteignent leurs limites. De nos jours, les circuits électroniques se retrouvent dans presque tous les objets qui nous entourent. Pour cela des nombreuses recherches ont été consacré à l'élaboration de composants microélectroniques constituées de couches minces, ainsi que la caractérisation des différentes étapes de fabrication de composant pour pouvoir contribuer aux développements et aux conceptions de nouveaux procédés technologique [16, 17]. L'industrie de la microélectronique est contrainte non seulement à produire des composants selon des normes très élevés de propreté et de fiabilité, puisqu'un composant défectueux ou une contamination peut sérieusement compromettre le fonctionnement d'un circuit intégré, mais également à améliorer l'adhésion de composants électroniques sur les cartes. La conception des instruments microélectroniques de haute précision sont fortement liées aux différents paramètres physico-chimiques tels que : méthode de dépôt des films, l'adhérence du système film-substrat fabriqué et la détermination des propriétés mécaniques (mesure d'élasticité, détermination de la résistance à l'usure ou bien encore la mesure de la solidité).

I.5.2 Application en optique

Actuellement, les technologies de l'optique visent à la mise en forme et la fonctionnalisation de films minces et de nanostructures de matériaux à propriétés d'usage spécifiques, permettant l'émission, la modulation, l'amplification ou la détection de signaux optiques [18, 19]. Les matériaux envisagés sont généralement des matériaux complexes ou

composites et il s'avère nécessaire d'établir un lien univoque entre leur microstructure et leurs propriétés optiques, via des études fondamentales qui font appel au contrôle de la production des films et aux lois fondamentales modélisant la propagation de la lumière dans la matière, dans un domaine spectral qui s'étend du proche UV à l'infrarouge. L'industrie de l'optique se caractérise par un degré de précision très élevé, autant pour l'épaisseur des revêtements optiques que pour la pureté des matériaux entrant dans la fabrication de ses composants. Elle offre toute une gamme de services spécialement adaptés à produire des dispositifs performant par la mesure de différentes propriétés physiques et chimiques telles que : la détermination de l'indice de réfraction ou de l'épaisseur de revêtements optiques, l'analyse chimique de surface et la mesure de rugosité d'une lentille. Les couches minces à propriétés optiques se retrouvent aujourd'hui utilisées dans de très nombreux dispositifs optiques, afin de manipuler la lumière en jouant sur les propriétés de réfraction et de réflexion des matériaux.

I.5.3 Application photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposée à la lumière génère de l'électricité, ainsi un courant continu est produit d'une intensité dépendante du rayonnement solaire incident [20]. Cependant, la demande pour les sources d'énergies renouvelables croît à une vitesse exponentielle, puisque le soleil demeure notre plus grande source d'énergie propre, facilement accessible et virtuellement inépuisable. Il existe de nombreuses raisons de penser que les technologies photovoltaïques en couches minces "TFPV" (Thin Film Photovoltaïques) auront un avenir prospère devant elles. Pour cela, d'énormes ressources sont dédiées à l'optimisation des couches minces photovoltaïques pour accroître le rendement global des panneaux solaires : c'est là où les techniques d'analyse de surface peuvent fournir de précieux renseignements sur la provenance d'impuretés ou la présence de défauts. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement avec d'autres semi-conducteurs tels qu'arséniure de gallium (GaAs), tellure de cadmium (CdTe).

I.6 MÉTHODES ULTRASONORES POUR LE CONTRÔLE DES INTERFACES

Par définition, une interface est une surface due à l'assemblage des matériaux et des pièces formant ainsi des structures de couche mince ou de multicouches. Selon les domaines d'application, il existe plusieurs techniques pour l'assemblage des matériaux (citons par exemple : le soudage, le collage, le dépôt sous vide,). Notons que, la technologie de dépôt des films minces permet une liberté de choix des matériaux (métaux, céramiques, isolants) en tant que constituants de couche afin de produire des échantillons présentant des propriétés physiques différentes à l'échelle nanométrique. Depuis plusieurs dizaines d'années, les spécialistes cherchent à mettre au point des dispositifs permettant la visualisation et le control des interfaces dans différentes structures, constituées de film ou multicouches [21, 22] ; parmi ses techniques on peut citer la radiographie et la microscopie acoustique. La première est à l'origine d'absorption des rayons X, elle est utilisée seulement pour la caractérisation des couches de quelques micromètres d'épaisseur [23]. Tandis que, la microscopie acoustique représente une méthode non destructive, utilisée pour le control et la caractérisation des interfaces en se basant sur l'interprétation des phénomènes d'interférence, engendrés durant l'interaction onde ultrasonore et l'échantillon étudiée.

En jouant sur les fréquences (f) des ondes ultrasonores, on peut avoir des informations structurales concernant des couches avec des résolutions allant de quelques micromètres, pour des fréquences allant de 100 à 500 MHz. Si on utilise des hautes fréquences, qui peut dépasser quelque GHz, dans ce cas la résolution est de quelques nanomètres, et par conséquent de nombreuses propriétés concernant les nanocouches peuvent être déduites (vitesses de propagations, constantes élastiques, épaisseurs, ...).

I.6.1 Microcaractérisation qualitative

La formation des images en acoustique représente le changement des vitesses de propagation des ondes acoustiques à l'interface séparant deux milieux de matériaux différents, cette variation est due aux inhomogénéités des propriétés acoustiques entre deux milieux de matériaux distincts (figure II.17). L'imagerie acoustique s'effectue grâce un balayage bidimensionnel (x, y) dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation des ultrasons, permettant de mesurer et de localiser en surface (ou en volume) des défauts éventuels dans un échantillon (fissures, porosités...). La présence de ses défauts engendre une variation du

coefficient de réflexion (ou de transmission) traduite par l'apparition des contrastes sur des images acquises durant l'analyse.

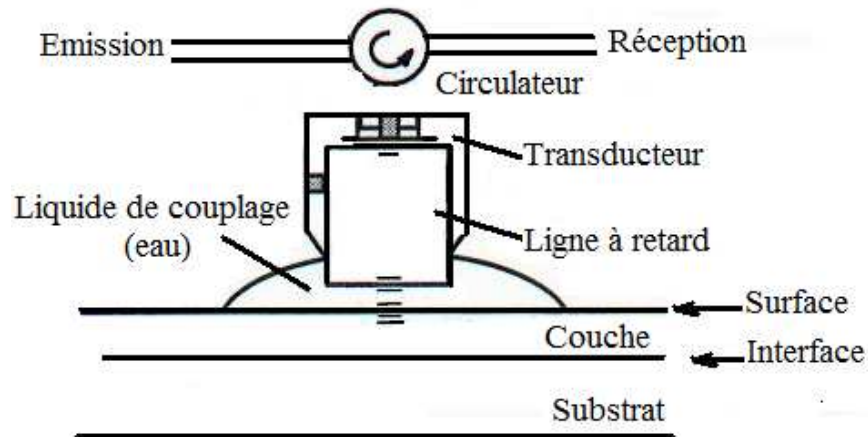


Figure I.6 Méthode acoustique pour la caractérisation des structures couches minces déposées sur substrats.

À noter que, l'imagerie acoustique des structures plus complexes (nanocouches ou multicouches nanostructurées) se heurte aux problèmes de l'inhomogénéité des impédances acoustiques (Z), entraînant des réflexions de l'énergie importante aux surfaces et interfaces des objets. Cela empêche, d'une part, la pénétration de l'onde au plus profond de la structure et d'autre part, engendre des réflexions multiples qui compliquent le diagramme du spectre obtenu.

I.6.2 Microcaractérisation quantitative

Il a été montré que le microscope acoustique peut fournir d'excellent contraste sur les images, ces contrastes varient aussi selon la distance de délocalisation (z) entre la lentille et l'échantillon [25]. Si on déplace l'échantillon vers la lentille, les phénomènes d'interférences dues à l'interaction onde et la matière, donnent lieu aux courbes, appelées signature acoustique, représentant la variation de la tension électrique V aux bornes du transducteur en fonction de la distance z . L'évolution des courbes de la signature acoustique $V(z)$, dépend des propriétés élastiques des matériaux (impédance acoustique, vitesse de propagation, module d'Young...). La méthode $V(z)$ est utilisée non seulement pour expliquer les contrastes observés en imagerie, mais également pour mesurer quantitativement les paramètres

acoustiques caractéristique des surfaces et interfaces, qui sont fortement liées aux fréquences utilisées et aux épaisseurs des films minces étudiées [26]. La caractérisation ultrasonore des interfaces, des structures couches déposées sur substrats, repose sur l'analyse quantitative de la réflexion (ou de la transmission) des ondes acoustiques à la traversée de la surface ou l'interface séparatif. Ainsi, cette analyse nous permet la détermination des vitesses des ondes de surface (ou de volume) le long de l'interface, à partir desquelles plusieurs paramètres élastiques, caractérisant les surfaces et l'interfaces des structures, seront déduits.

I.7 CONCLUSION

La microscopie acoustique permet la caractérisation qualitative et quantitatives des matériaux (massifs, couches ou multicouches) avec une résolution proche du micron ; permettant ainsi la mesure des paramètres mécaniques de façon locale et non destructive. Dans ce chapitre, nous avons évoqué en premier lieu la définition des différents types d'ondes élastiques. Ensuite, les modes acoustiques qui peuvent être exciter dans l'interaction onde acoustique et la matière (couche mince ou matériau massif). Finalement, on a cité les multiples domaines d'application des films minces dans l'industrie actuelle.

CHAPITRE II

RELATIONS FONDAMENTALES DE L'ACOUSTIQUE

II.1 INTRODUCTION

Les ondes élastiques sont des ondes de la matière, résultant des déplacements de particules, elles n'existent que dans les milieux fluides ou solides contrairement aux ondes électromagnétiques qui se propagent aussi dans le vide. Les ondes de Rayleigh ont reçu un intérêt [1-3] considérable grâce à leur utilité pour la détection des défauts de surface dans le teste ultrasonique non destructive des matériaux [4-6]. Ces méthodes d'analyse permettent d'apporter des informations sur le comportement mécanique des surfaces et interfaces, on se basant sur les lois de la physique des solides.

II.2 LOIS DE SNELL ET DESCARTES

Les lois de Snell-Descartes vont exprimer mathématiquement la valeur de l'angle correspondant au changement de direction, les lois de propagation d'un faisceau ultrasonore sont les mêmes que les lois de propagation en optique. En électromagnétisme, les directions de propagation des ondes planes sont données par la loi de Snell et l'amplitude de ces ondes par les équations de Fresnel. Des relations analogues, existent aussi pour les ondes acoustiques dans les solides, quand un faisceau ultrasonore rencontre une interface entre deux milieux (figure II.1), une partie de son énergie est transmise, l'autre est réfléchi. Les faisceaux réfléchi et transmis (ou réfracté) ont des directions déterminées par les lois de Snell-Descartes:

- Les faisceaux réfléchi et réfracté sont contenus dans le plan d'incidence formé par le faisceau incident.
- Les angles de réflexion et de réfraction sont déterminés par la relation [6, 7]:

$$\frac{\sin \theta_i}{V_1} = \frac{\sin \theta_R}{V_1} = \frac{\sin \theta_d}{V_2} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

θ_i , θ_R et θ_d sont respectivement notées des angle d'incident, réfléchi et réfracté.

V_1 et V_2 sont des vitesses de milieu 1 et 2.

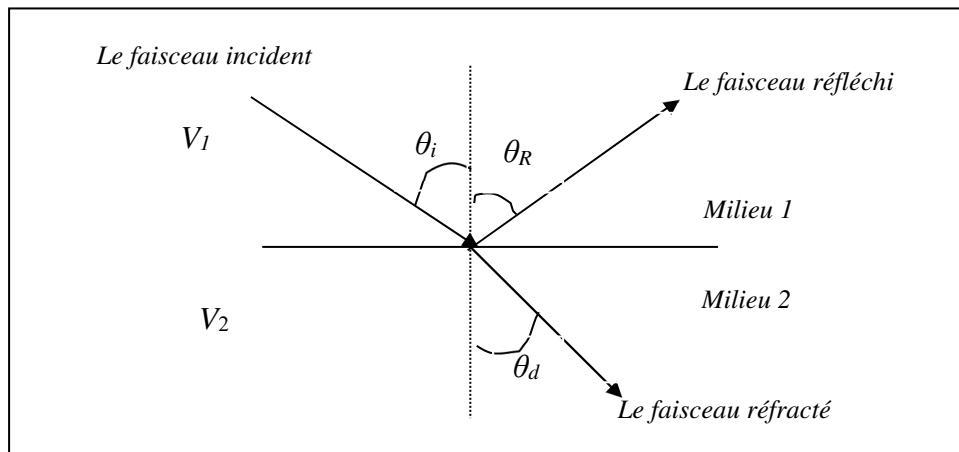


Figure II.1 : Illustration de loi de Snell.

II.3 IMPÉDANCE ACOUSTIQUE

L'impédance acoustique Z , représente le rapport de l'amplitude de la pression (P_0) sur l'amplitude de la vitesse particulaire V_p :

$$Z = \frac{P_0}{V_p} \quad (\text{II.2})$$

En acoustique, l'impédance caractéristique ou spécifique, Z , est définie [7] par :

$$Z = -\sigma_r \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) \quad (\text{II.3})$$

Où σ_r est un vecteur de force par unité de surface et $\frac{\partial U}{\partial t}$ est la vitesse du déplacement de la particule.

Lorsqu'une onde acoustique est incidente sur une surface plane avec un angle θ , par rapport à la normale à la surface, chaque rayon réfracté obéit à la loi de Snell : $\frac{\sin \theta}{V} =$ constante. Cette loi peut être alternativement exprimée par la continuité de la composante

tangentielle (parallèle à la frontière) du vecteur d'onde, k , à l'interface autrement dit $k \sin \theta = \text{constante}$. par conséquent, l'impédance acoustique, dans un milieu de densité, ρ , à un angle d'incidence θ (par rapport à normale à l'interface) est donnée par: $Z = \frac{\rho V}{\cos \theta}$.

En incidence normale cette impédance devient :

$$Z = \rho V \quad (\text{II.4})$$

L'unité de l'impédance acoustique est le rayl, avec $1 \text{ rayl} = 1 \text{ Kg/m}^2\text{s}$.

II.4 COEFFICIENT DE RÉFLEXION ET DE TRANSMISSION

Lorsqu'une onde est incidente sur une interface, les conditions de continuité du déplacement, à travers l'interface, et de la force d'attraction doivent être vérifiées. Ainsi. Si l'amplitude d'une onde en incidence normale est égale à l'unité et les amplitudes des ondes réfléchi et transmise sont respectivement R et T , les deux conditions de continuité doivent être vérifiées pour [8] :

$$\text{Continuité de la force :} \quad R + T = 1 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Continuité de la vitesse :} \quad \frac{(1-R)}{Z_1} = \frac{T}{Z_2} \quad (\text{II.6})$$

Où Z_1 et Z_2 sont les impédances de deux milieux ; notons que le signal moins est dû au changement de la direction de la propagation de l'onde réfléchi. La combinaison de la relation (6) et (7) donne :

$$\text{Le coefficient de réflexion :} \quad R = \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Le coefficient de transmission :} \quad T = \frac{2Z_2}{(Z_2 + Z_1)} \quad (\text{II.8})$$

II.5 ATTENUATION DES ONDES DE SURFACE

L'atténuation des ondes acoustiques de surface se produit quand une onde perd un peu de son énergie quand elle se propage à travers un liquide ou un solide. Les sources de cette dissipation peuvent être le résultat des pertes dans ou le moyen ou ses limites qui peuvent être dues à combinaison de réflexion, réfraction, diffraction et dispersion. Le coefficient d'atténuation de SAWs de structure liquide/solide est caractérisé par les propriétés élastiques des matériaux aussi bien que l'état de la surface du substrat, variation topographique, dimension du grain et distribution. Donc, l'atténuation du SAW est un moyen sensible de caractérisation de la surface, par conséquent, l'analyse technique de la microscopie acoustique [9-13], basée sur l'émission et la réflexion des ondes ultrasoniques, qui serait un moyen très utile et promoteur pour l'investigation d'atténuation. Le coefficient d'atténuation des ondes acoustiques est dû à plusieurs paramètres tels que : l'ouverture de la lentille du microscope acoustique (θ_{exc}), la fréquence de travail (f) et la vitesse de Rayleigh (V_R) des matériaux étudiés. La figure II.2 montre quelques courbes de $V(z)$ d'un même matériau, Al, calculées à la même fréquence égale à 142 MHz et pour plusieurs valeurs de l'angle d'ouverture de la lentille : 14° , 22° , 28° et 30° .

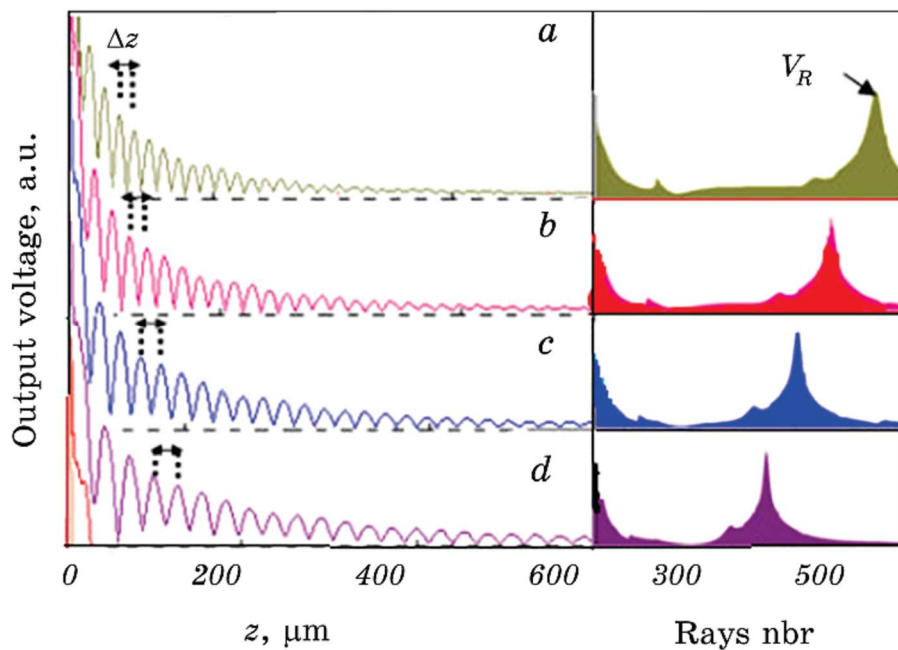


Figure II. 2: Signatures acoustiques de structure eau/Al sont calculées à $f = 142$ MHz pour différents ouverture de la lentille: (a) $\theta_{exc} = 14^\circ$, (b) $\theta_{exc} = 22^\circ$, (c) $\theta_{exc} = 28^\circ$ et (d) $\theta_{exc} = 30^\circ$.

On remarque clairement que la courbe initiale de la signature $V(z)$ (figure 1.7 i) est caractérisée par un comportement oscillatoire qui comporte une série de maximum et minimum, séparés par un espacement périodique, Δz , dû aux phénomènes d'interférences constructive et destructive entre les modes excités.

L'expression de la période Δz est décrite par la relation suivante [7] :

$$\Delta z = \frac{V_{liq}}{2f(1 - \cos \theta_R)} \quad (II.9)$$

Où θ_R est l'angle critique du mode de Rayleigh excité.

Donc, les signatures acoustiques prennent une simple courbe de forme exponentielle en décadence qui décrit la décroissance de l'amplitude des matériaux.

L'expression du signal acoustique y compris l'effet de l'absorption peut s'écrire comme :

$$V(z) = V_0 e^{-\alpha z} \quad (II.10)$$

Où V_0 est l'intensité du signal acoustique à $z = 0$ et α représente la dégradation exponentielle.

II.6 EFFET DES DIFFERENTS PARAMETRES ACOUSTIQUES

Malgré l'existence de plusieurs types des ondes acoustiques de surface, seul le mode de Rayleigh a été étudié avec un grand intérêt. Ceci est dû à leurs diverses utilisations, non seulement dans la détection des défauts de surfaces et dans le test non destructif, mais également dans la fabrication des composants électrochimiques [14-17]. Cependant, très peu d'investigations ont été menées sur le phénomène de réflexion près de l'angle critique longitudinale [18-20]. Ces ondes de surface de compression appelées également "Skimming",

malgré leur faible amplitude et leur vitesse assez élevée (deux fois plus grand que celle de Rayleigh), sont d'une importance capitale dans la détermination des propriétés élastiques des matériaux et ne doivent pas être négligées. Pour cela, nous proposons dans ce paragraphe comment choisir les conditions pour observer ces ondes (Rayleigh et Skimming).

II.6.1 L'effet de charge

Comme les ultrasons se propagent difficilement dans l'air, toute application de la microscopie acoustique nécessite l'introduction d'un liquide de couplage, souvent l'eau, entre la lentille et l'échantillon. L'utilisation du mercure, malgré sa réactivité chimique avec certains matériaux, devient de plus en plus fréquente [18-22]. La vitesse de propagation des ondes dans ce liquide est égale à 1450 m/s, similaire à celle de l'eau (1500 m/s). Par contre sa densité est 13.6 fois plus grande, ceci lui permet d'avoir une impédance acoustique comparable à celle de plusieurs matériaux. Par conséquent, la transmission des ondes est beaucoup meilleure. En plus le mercure a l'avantage d'être quatre fois moins absorbant que l'eau. L'effet de la densité du liquide de couplage apparaît directement sur le coefficient de réflexion $R(\theta)$.

II.6.2 L'effet de l'ouverture de la lentille

La seconde approche, que nous adoptons, pour faire apparaître le mode de Skimming avec plus d'efficacité, consiste à utiliser une lentille de différentes ouvertures. Rappelons que le mode longitudinal, pour le saphir (par exemple) est excité respectivement à 8.7° . Alors l'utilisation d'une lentille ouverte à 9° permettra l'obtention de ce mode avec une grande efficacité. Donc, le mode longitudinal peut être mis en évidence, avec le maximum d'efficacité, en utilisant une lentille à faible angle d'ouverture de telle sorte que :

$$\theta_{Lens} = (\theta_L)_{sol} + 1 \quad (II.11)$$

II.6.3 L'effet du substrat

La caractéristique essentielle d'une couche mince est que, quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, elle est toujours solidaire d'un support sur lequel elle est

élaborée. En conséquence, il sera impératif de tenir compte de ce fait majeur dans leurs conceptions, à savoir que le support influence très fortement leurs propriétés structurales [23]. La présence d'un substrat conduit généralement à des interférences complémentaires du type orientation préférentielle des grains, macro et micro contraintes liées au processus de préparation. Il faudra donc prendre des précautions particulières sur le choix du substrat de dépôt. En pratique, les substrats peuvent être de plusieurs natures, les plus courants sont en matériaux semi-conducteurs (silicium, GaAs,..) ; mais on les trouve également sous forme de céramiques, des métaux ou des verres et qui sont choisis selon les applications technologiques souhaitées [24]. Ces supports de couches doivent posséder : un coefficient de dilatation choisi en fonction de l'utilisation du circuit intégré, un état de surface parfait et une résistivité très élevée [25].

II.7 CONCLUSION

Vue l'importance de la microscopie acoustique, qui s'impose comme une nouvelle technique non destructive, qui consiste à émettre des ondes ultrasonores par un transducteur piézoélectrique, puis la réception de ces ondes qui reviennent riches en information concernant le matériau qu'elles ont balayé ou traversé. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à mettre en évidence quelques lois fondamentales de l'acoustique (loi de Snell-Descartes, impédance acoustique, Z , les propriétés élastiques des matériaux...). Ensuite, nous avons démontré le phénomène d'atténuation acoustique. Enfin, nous avons évoqué les paramètres importants qui influent sur la génération du mode de surface.

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DES ÉPAISSEURS DES COUCHES MINCES

III.1 INTRODUCTION

La microscopie acoustique s'est développée comme technique, non destructive et non contaminante [1], de caractérisation des propriétés élastiques des matériaux aussi bien pour le qualitatif par imagerie que pour le quantitatif [2, 3] via l'étude de la signature acoustique, $V(z)$. Ce signal est caractérisé par une série d'oscillations périodiques, dues aux interférences constructives et destructives du faisceau réfléchi. La nature des ondes ultrasonores fait intervenir les paramètres fondamentaux de la matière tels que la densité, la vitesse, la structure...etc. Par conséquent, elles sont particulièrement utilisées dans la microanalyse des propriétés élastiques des matériaux massifs et des couches minces. Plus récemment, on s'est intéressé particulièrement, [4, 5], à étudier les propriétés mécaniques des couches minces et la détermination de leurs épaisseurs de manière plus précise.

III.2 PRINCIPE DE MICRO-CARACTERISATION

La méthode de la micro-caractérisation acoustique [6] consiste à émettre des ondes ultrasonores par un transducteur piézoélectrique, puis la réception de ces ondes qui reviennent riches en information concernant le matériau qu'elles ont balayé ou traversé. En microanalyse quantitative [7, 8], l'échantillon est déplacé verticalement (figure III.1) vers la lentille (selon l'axe, z), pour étudier l'effet de la distance de défocalisation, z , sur l'intensité du signal récupéré, V .

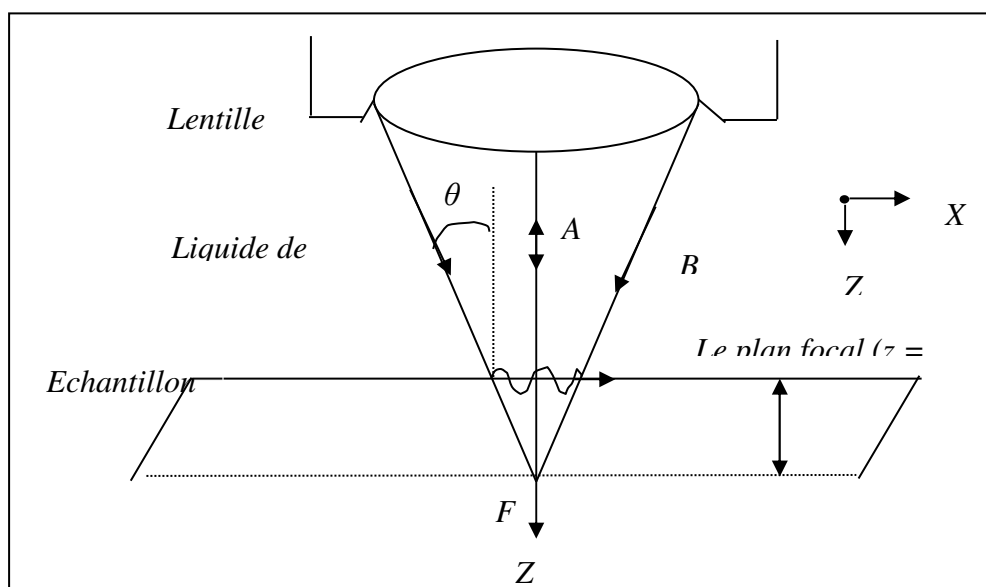


Figure III.1: Schémas montre l'allure des rayons réfléchis dans l'échantillon.

Cette réponse $V(z)$, connus comme la signature acoustique des matériaux, est caractérisée par une série d'oscillations périodiques dues aux interférences constructives et destructives du faisceau réfléchi. L'interprétation des résultats est basée sur la variation de l'intensité de la signature acoustique qui est directement liée au coefficient de réflexion $R(\theta)$. Ce dernier dépend des conditions aux limites à l'interface liquide de couplage/solide (impédance, densité ρ , angles d'incidences θ_i et les vitesses des différents modes de propagation). Par conséquent, les signatures acoustiques permettent d'obtenir des informations fort intéressantes sur les vitesses de propagation des ondes acoustiques de surfaces et par conséquent sur les propriétés élastiques des matériaux et des couches minces.

III.3 CHOIX DES CONDITIONS DE SIMULATION

Afin de surmonter le phénomène d'atténuation des ultrasons dans l'air, l'introduction d'un liquide de couplage entre la lentille et l'échantillon est nécessaire pour toute application de la microscopie acoustique. L'eau est choisie pour sa disponibilité, sa compatibilité avec la structure, le mode de micro-caractérisation et surtout son faible coefficient d'absorption à comparer avec beaucoup d'autres liquides. L'intensité du champ d'éclairage est également un paramètre très important, pour la détermination des vitesses de propagation des ondes acoustiques de surfaces (SAW : *Surface Acoustic Waves*). Elle dépend du demi-angle d'ouverture de la lentille acoustique, de la longueur de la ligne à retard et de la fréquence de vibration du capteur, f . Afin d'assurer une distribution de champ de forme gaussienne et faciliter ainsi l'utilisation de la technique, la longueur de la ligne à retard, l , est de l'ordre de celle de Fresnel, l_0 , la largeur de la distribution est limitée par un demi-angle d'ouverture de la lentille choisi de 50° et une fréquence de travail de 142 MHz.

III.4 MÉTHODOLOGIE

Contrairement aux matériaux massifs, la vitesse de propagation du mode de Rayleigh dans les couches minces est dispersive, elle dépend aussi bien de la fréquence de travail que de l'épaisseur de la couche, h . Afin de pondérer l'effet de ces deux paramètres, il est utile de représenter les variations de la vitesse en fonction de l'épaisseur normalisée à la longueur

d'onde transversale de la couche ($V_R = f(h/\lambda_T)$). Les courbes de dispersions qui représentent la variation de la vitesse des ondes acoustiques en fonction de l'épaisseur de la couche, h , sont déterminées à partir d'une méthode théorique, basée sur l'émission et la réception des ondes ultrasonores. Elle consiste à calculer successivement le coefficient de réflexion $R(\theta)$ de la structure couche mince/substrat considérée, puis la signature acoustique, $V(z)$, de la structure et celle de la lentille. Ensuite, le traitement par transformée de Fourier rapide, FFT, des courbes de $V(z)$, pour pouvoir déterminer enfin la vitesse de phase. Le calcul est répété pour chaque épaisseur normalisée h/λ_T passant de 0 à 2. Le calcul des vitesses de propagation de l'onde de Rayleigh peut être résumé selon les étapes suivantes :

➡ **Coefficient de réflexion**

Le calcul du coefficient de réflexion de chaque structure a été fait à l'aide de la relation suivante :

$$R(\theta) = \frac{Z_{sol} - Z_{liq}}{Z_{sol} + Z_{liq}} \quad (III.1)$$

Où : $Z_{sol} = Z_L \cos^2 2\theta_T + Z_T \sin^2 2\theta_T$

Avec $Z_i = \rho_i V_i / \cos\theta_i$

L'indice, i , qui présente le mode transversale (T) ou longitudinale (L), ainsi V_i , θ_i et Z_i sont respectivement les vitesses, les angles et les impédances acoustiques du mode considéré. La fonction de réflexion, $R(\theta)$, est une fonction complexe, elle tient compte de la génération des différents modes de surface qui se propagent dans la structure. L'étude et la détermination du coefficient de réflexion $R(\theta)$, (figure III.2), nécessite la connaissance des vitesses longitudinales et transversales.

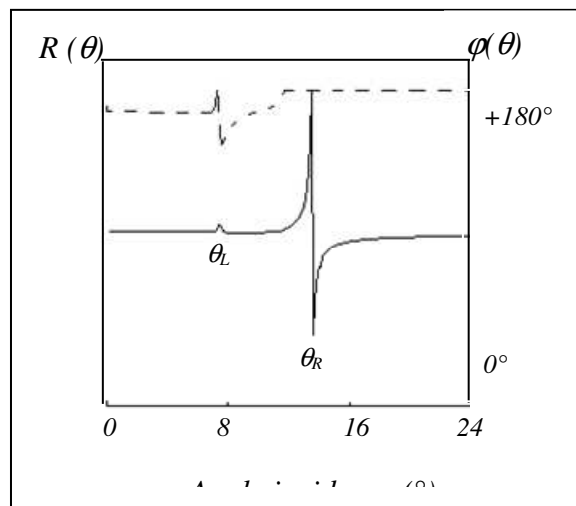


Figure III.2: Coefficient de réflexion.

Le calcul de $R(\theta)$ permet alors de déterminer les angles de réfraction, en effet, il existe des valeurs critiques de θ_L et qui correspondent à l'angle d'incidence à partir duquel il n'y a plus d'ondes réfractées dans le solide. C'est-à-dire, lorsque l'angle d'incidence devient supérieur à cette valeur critique, il y a réflexion totale et le coefficient de réflexion $R(\theta)$ devient alors complexe dont on peut représenter son amplitude et sa phase [9-13].

➡ **Signature acoustique**

Le signal acoustique qui provient de l'échantillon est le résultat de la superposition de plusieurs types d'ondes qui interfèrent au niveau du transducteur. Il est possible, en effet, suivant l'ouverture θ_{Lens} de la lentille, de générer un ou plusieurs ondes qui se propagent, avec leurs vitesses spécifiques, simultanément dans l'échantillon [9-12]. L'investigation de la tension de sortie $V(z)$ délivrée par le capteur présente des pseudos oscillations qui constitue la signature acoustique du matériau. Le modèle théorique de ce phénomène a été fait par Sheppard et Wilson [13]. Ce modèle permet de calculer l'amplitude de cette signature, à partir de la connaissance théorique du coefficient de réflexion. En effet, d'après ce modèle, nous avons :

$$V(z) = \int P^2(\theta) R(\theta) \exp(2jk_0 z \cos\theta) \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (III.2)$$

Où $P(\theta)$ représente la fonction pupille qui dépend de la géométrie et du matériaux de conception de la lentille utilisée. k_0 est le nombre d'onde. Les courbes de la signature acoustique $V(z)$, (figure II.7a) simulée, peut être considérées comme la somme de la réponse de la lentille $V_{Lens}(z)$, et la réponse caractéristique du matériaux $V_u(z)$ [14] :

$$V(z) = V_{Lens}(z) + V_u(z) \quad (III.3)$$

➡ **Calcul des vitesses**

Le traitement de la signature du matériau $V_u(z)$ par la transformée de Fourier rapide, FFT, permet d'obtenir un spectre de raies, à partir duquel on peut déterminer la période Δz entre deux pics successifs principaux. Les vitesses de propagation des ondes de surface déterminée à partir des pics principaux de la FFT, (figure III.3), via la relation suivante :

$$V = V_{liq} / \{1 - [1 - V_{liq} / 2 f \Delta Z]^2\}^{1/2} \quad (III.4)$$

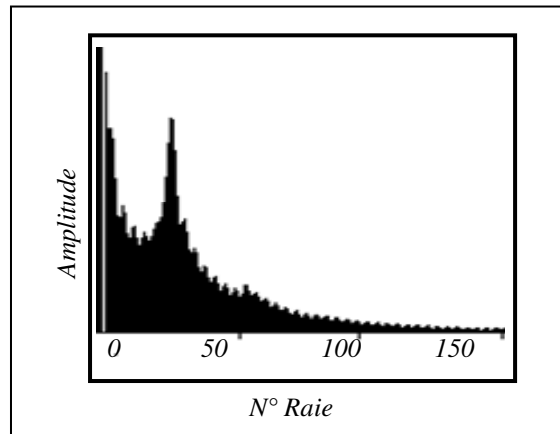


Figure III.3: Analyse spectrale par FFT.

III.5 INVESTIGATION DE LA STRUCTURE Al_2O_3/SiC

Tous les résultats obtenus de $R(\theta)$ et $V(z)$ ont été simulés à partir des conditions suivantes: une fréquence de vibration du capteur $f = 142$ MHz, un demi angle d'ouverture de la lentille $\theta_{Lens} = 50^\circ$ et l'eau comme liquide de couplage dont la vitesse de propagation des ondes longitudinales $V_{liq} = 1500$ m/s, et dont la densité volumique ρ_{liq} égale à 1000 Kg/m³. Notons que le choix de ce θ_{Lens} est détecté par le fait que, pour la plupart des matériaux, le mode de Rayleigh est généré à un angle critique inférieur à 50° ; l'eau est choisie pour sa disponibilité et sa compatibilité avec la structure. Le tableau III.1 regroupe les propriétés élastiques du saphir (Al_2O_3) constituant la couche mince et le carbure de silicium (SiC) représentant le substrat. Notons qu'aussi bien l' Al_2O_3 que SiC sont classés parmi les matériaux rapides, autrement dit les ondes élastiques s'y propagent avec des vitesses relativement élevées [15, 16].

Tableau III.1 : Caractéristiques et propriétés élastiques des matériaux étudiés.

Matériaux	ρ (Kg/m ³)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	θ_L (°)	θ_T (°)	λ_T (μm)
Al ₂ O ₃	3980	11150	6036	7.73	14.38	38.69
SiC	3210	12099	7485	7.12	11.56	48.62

III.5.1 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion, $R(\theta)$ est une fonction complexe qui admet une amplitude et une phase. La réflexion totale sera obtenue pour $|R(\theta)| = 1$. La figure III.4 montre l'influence de l'épaisseur, h , des couches minces en Al₂O₃ sur le module (-----) et la phase () du coefficient de réflexion, en fonction de l'angle d'incidence θ pour le substrat en SiC (courbe III.4a) et également pour des épaisseurs de Al₂O₃ de 6 μm (courbe III.4b), 12 μm (courbe III.4c), 24 μm (courbe III.4d), 30 μm (courbe III.4e), 40 μm (courbe III.4f), 60 μm (courbe III.4g), et 78 μm (courbe III.4h). On remarque qu'au fur et à mesure que l'épaisseur de la couche augmente, l'angle critique correspondant à l'excitation du mode de Rayleigh se déplace vers les grands angles d'incidence. De plus, on constate l'apparition de plusieurs d'autres fluctuations (courbe III.4c et III.4h) indicatives de la génération de nouveaux modes de propagation caractéristiques de la structure.

III.5.2 Signatures acoustiques

Les signatures acoustiques $V(z)$ sont caractérisées par une série d'oscillations périodiques dues aux interférences constructives et destructives entre l'onde axiale et les différents faisceaux réfléchis. Ces signatures sont déterminées à partir coefficient de réflexion et sont fortement influencées par la nature du matériau, le type de la structure et même la forme de l'objet. La figure III.5 illustre les réponses $V(z)$ calculées à partir de la relation de Sheppard et Wilson [16]. La courbe (III.5a) présente la signature acoustique du substrat en SiC et les courbes (III.5b jusqu'à III.5h) celles de la structure Al₂O₃/SiC pour différentes épaisseurs de la couche mince. On remarque que la forme oscillatoire est différente d'une courbe à une autre.

De plus, la période Δz qui représente la différence entre deux minimum ou maximum successifs varie d'une épaisseur à l'autre en présence de modulation secondaires (III.5c

jusqu'à III.5h). Ces variations des signatures acoustiques qui sont typiques pour une telle structure, elles sont d'une grande importance pour la détermination et la compréhension de plusieurs phénomènes d'élasticité.

III.5.3 Analyse spectrale des signatures acoustiques

Pour mieux étudier l'influence de l'épaisseur sur les signatures acoustiques, nous avons effectué le traitement des courbes périodiques des signatures par la transformée de Fourier rapide, FFT. Les résultats obtenus sont mieux illustrés par la figure III.6, qui représente les courbes de FFT, pour le substrat en SiC (courbe III.6a) et différentes autres épaisseurs de la couche Al₂O₃ (courbe III.6b jusqu'à III.6h). La raie principale de ce pic permet d'obtenir la période des oscillations du signal de sortie et par conséquent la vitesse de propagation du mode considérée.

Pour les faibles épaisseurs, c'est à dire h variant entre zéro et 24 μm , on observe un seul pic principal qui représente le mode le plus lent qui est souvent celui de Rayleigh. Pour les autres épaisseurs, $30 \mu\text{m} < h < 78 \mu\text{m}$, on remarque : i) L'apparition d'autres pics aux grandes périodes spatiales avec une efficacité (hauteur du pic principal) relativement faible. ii) Un décalage du pic principal du mode de Rayleigh vers les faibles périodes spatiales. À partir de ces spectres, le décalage influe directement sur la vitesse de phase et sont illustrés dans le tableau III.2.

Tableau III.2: *Caractéristiques et propriétés élastiques des matériaux étudiés.*

Épaisseur de la couche Al₂O₃	Vitesse de phase
0 μm	6806 m/s
6 μm	6503 m/s
12 μm	6071 m/s
24 μm	5691 m/s
30 μm	5633 m/s
40 μm	5620 m/s

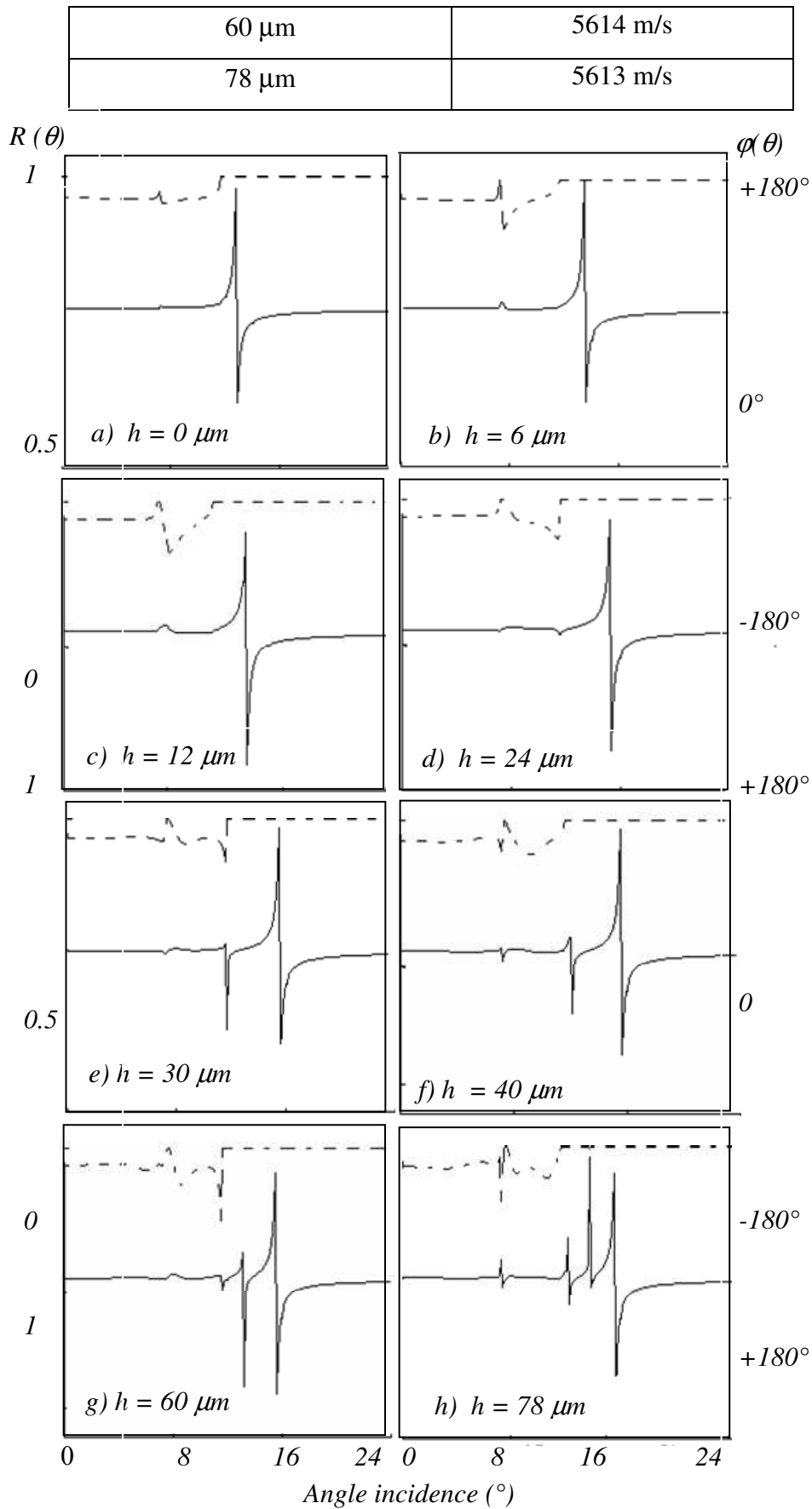


Figure III.4: Coefficient de réflexion obtenus à 142 MHz pour SiC nu (a) et différentes épaisseurs de Al_2O_3 (b, jusqu'à h)

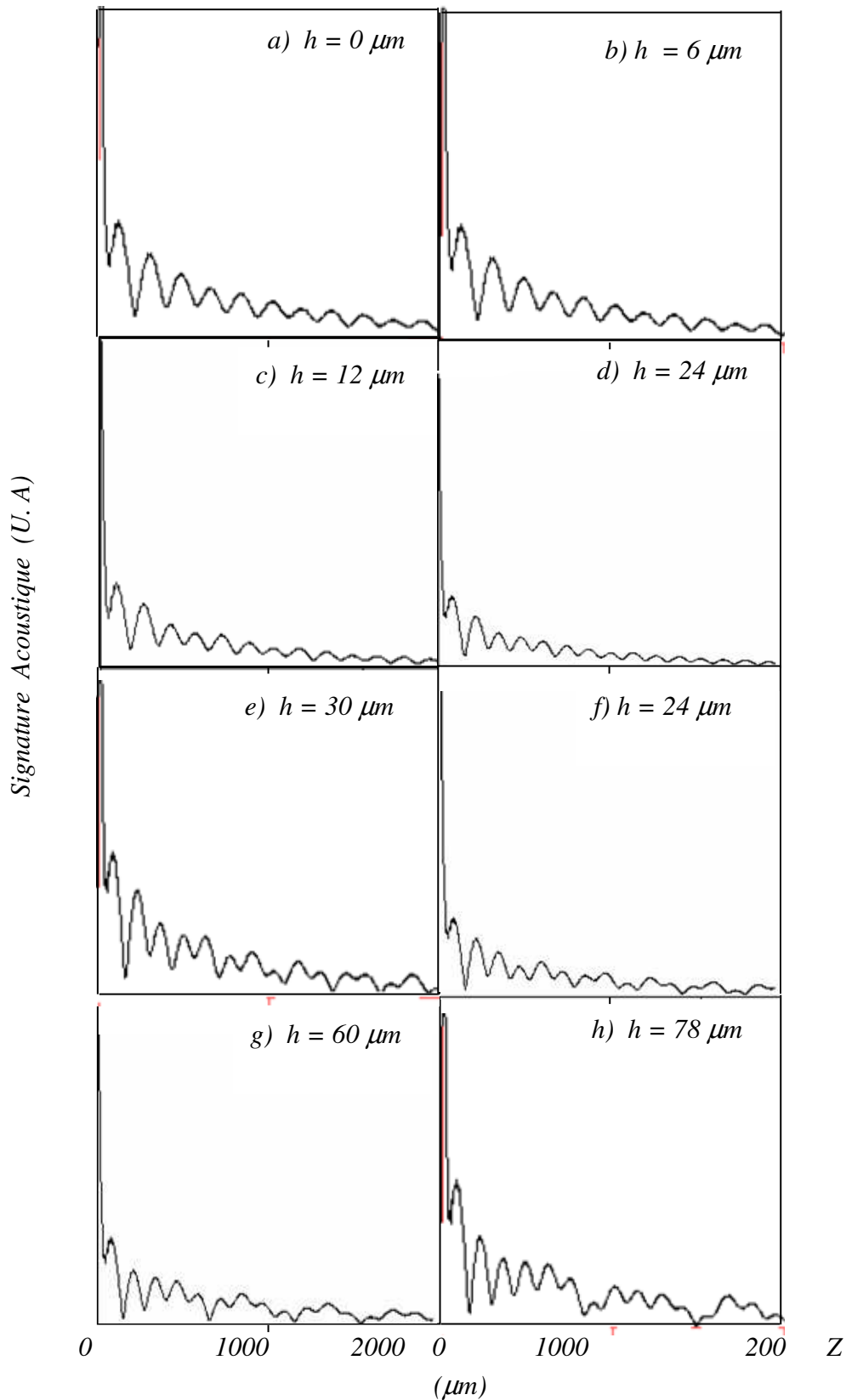


Figure III.5 : Signature acoustique obtenu à 142 MHz pour SIC nu (a) et différentes épaisseurs de Al_2O_3 (b, jusqu'à h)

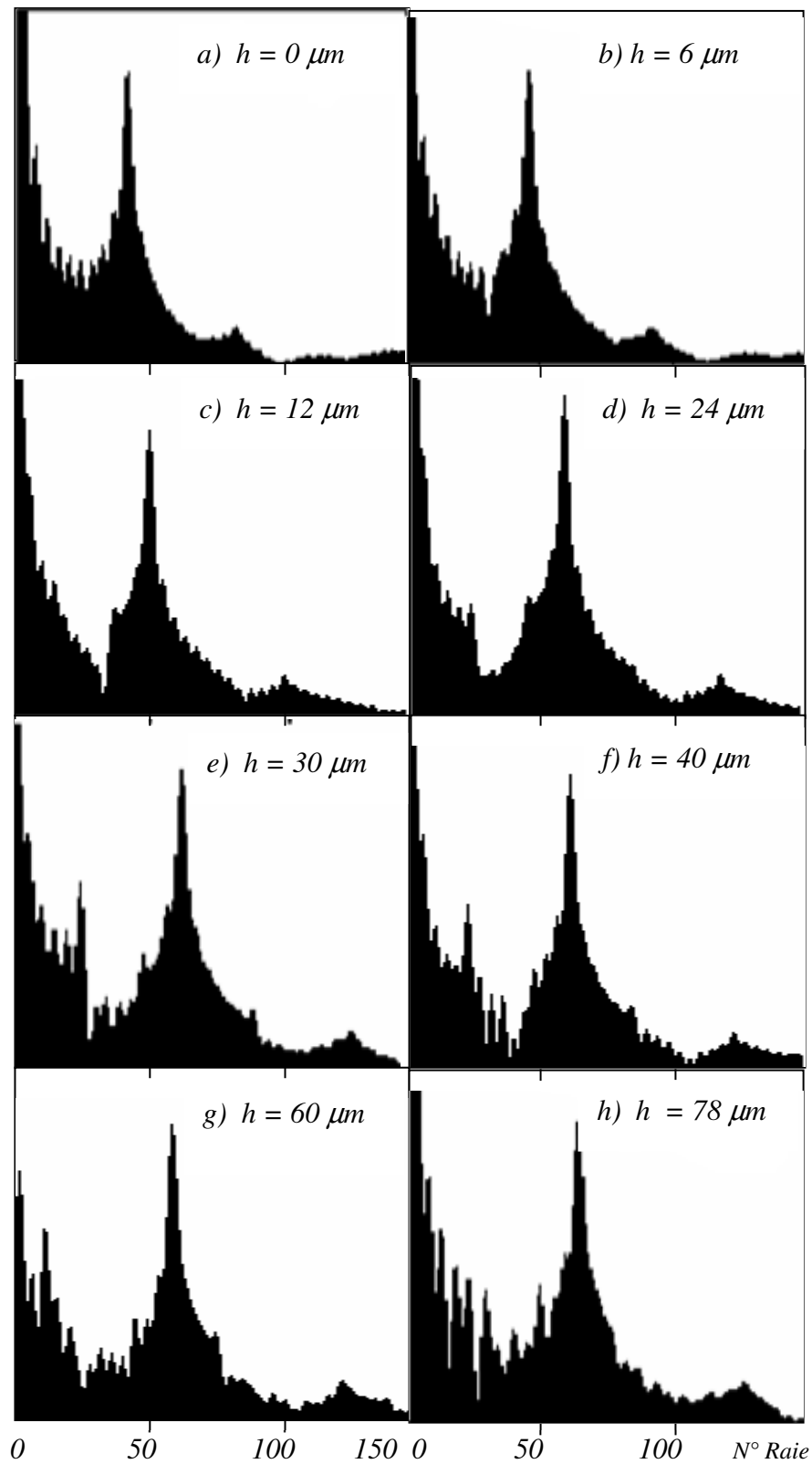


Figure III.6: Spectre de FFT des courbes de $V(z)$ pour SIC nu (a) et différentes épaisseurs de Al_2O_3 (b, jusqu'à h)

III.6 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR SUR LA VITESSE DE PHASE DU MODE RAYLEIGH

Les échantillons choisis sont des structures couches minces déposées sur substrats, ces revêtements possèdent des épaisseurs variant de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres (selon la fréquence de vibration utilisée). Pour cela, nous avons choisis cinq substrats de matières complètement distinctes : Silice, silicium, saphir, de densité volumique ρ_s ; sur lesquels une large variété de couches minces (Al, AlN, Cr, Cu, SiC, SiO₂, Si₃N₄, et ZnO), caractérisées par des densités ρ_c , et des épaisseur h (variantes de 0 à $2\lambda_T$), ont été déposées sur deux substrats consécutifs le Quartz et le Saphir. Sur ceux, on obtient deux familles typiques caractérisées par les deux substrats cités ci-dessus, leurs propriétés physiques sont fortement dépendantes des épaisseurs des films minces. Le tableau III.3 regroupe les paramètres acoustiques tels que la vitesse transversale V_T , celle de Rayleigh V_R et la densité ρ , des matériaux aux états massif utilisés durant notre étude [17].

Tableau III.3 Les propriétés acoustiques des structures couches minces/substrats.

<i>Matériaux</i>	<i>V_T(m/s)</i>	<i>V_R(m/s)</i>	<i>ρ(kg/m³)</i>
Al₂O₃	6036	5596	3980
Si	5085	4712	2300
Cu	2260	2118	8900
Quartz	3765	3410	2200
Cr	4005	3661	7194
ZnO	2950	2765	5606
Al	3080	2999	2700
SiO₂	3700	3397	2600
Cu	2260	2118	8900
AlN	7647	6412	3210
Si₃N₄	6204	5704	3185
SiC	7485	6841	3210

III.6.1 Structures couches minces/Quartz

Nous avons choisi des couches minces (AlN, SiO₂, Al, ZnO, SiC et Si₃N₄) déposées sur un substrat en quartz, caractérisé par une vitesse de Rayleigh égale à 3410 m/s. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III.7.

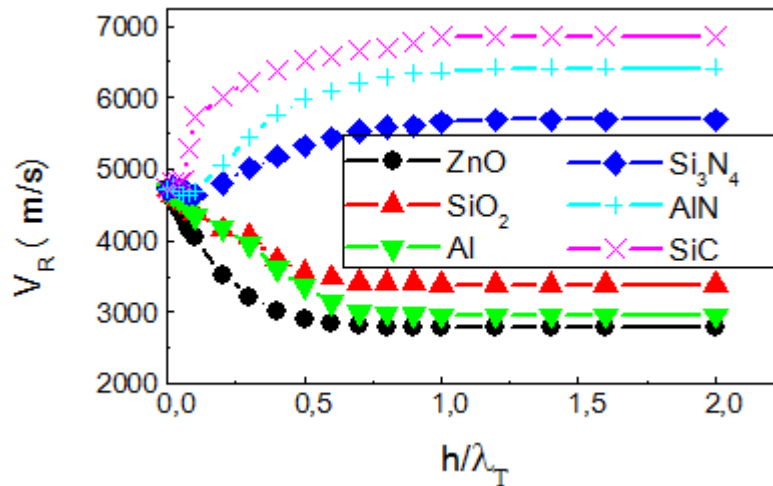


Figure III. 7 : Dispersion de la vitesse de Rayleigh en fonction de la normale h/λ_T des films (AlN, SiO₂, Al, ZnO, SiC et Si₃N₄) déposées sur le même substrat en quartz.

On constate, que la vitesse de Rayleigh décroît de la valeur du substrat, Si, jusqu'à celle de la couche étudiée. D'une manière générale, les courbes de dispersion de la fonction $V_R(h/\lambda_T)$ suivent les variations suivantes :

- ➡ Quand $h/\lambda_T = 0$, la surface étudiée est celle du substrat nu. Sur ceux, toutes les valeurs initiales des vitesses de Rayleigh correspondent à celle du substrat V_{RS} .
- ➡ Lorsque $h/\lambda_T > 0.4$, la vitesse V_R prend des valeurs constantes égales à son homologue de la couche V_{RC} , ce qui implique l'apparition d'une zone de saturation.
- ➡ Dans cet intervalle des épaisseurs, la couche prend les caractéristiques d'un matériau massif où on perd pratiquement la notion d'une couche mince.
- ➡ La croissance (ou la décroissance) de la vitesse au fur à mesure que l'épaisseur augmente ($0 < h/\lambda_T < 0.4$), varie selon la couche considérée. Cette variation est due au fait que, la majorité des propriétés intrinsèques représentent celle de la structure couche/substrat analysée, et varient par conséquent selon, l'effet combiné de la couche et du substrat. Cet effet

pourrait jouer un rôle très important dans les modifications introduites dans les propriétés élastiques des films minces, comme les vitesses de propagation ainsi que les densités volumiques de masse [18-21].

III.6.2 Structures couches minces/ Al_2O_3

L'alumine (Al_2O_3) est l'une des céramiques les plus employées. Elle présente une haute résistance à l'abrasion et à la corrosion, une excellente dureté, une résistance mécanique élevée ainsi qu'une bonne stabilité dimensionnelle. Ce matériau est disponible pour fabriquer des plaques, tubes, pièces usinées sur plan et une Possibilité de métallisation [22, 23]. La figure III.8 représente les courbes de dispersions des couches minces (AlN , Cr , Al , ZnO , Cu et Si_3N_4) déposées sur un substrat en Al_2O_3 .

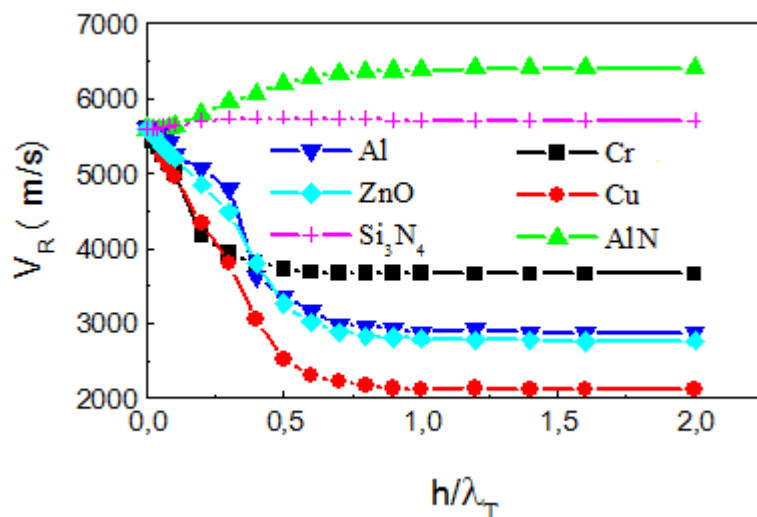


Figure III. 8 : Dispersion de vitesse de Rayleigh des films (AlN , Cr , Al , ZnO , Cu et Si_3N_4) déposées sur Al_2O_3 en fonction de la normale h/λ_T .

Il est clair que toutes les courbes possèdent un comportement similaire. Elles commencent au même point, à $h/\lambda_T = 0$, correspondant à la vitesse de Rayleigh du substrat, $V_{RS} = 5613$ m/s, puis subissent une décroissance de pente différente selon la combinaison de la structure pour atteindre une valeur constante égale à celle de la couche considérée.

III.7 DETERMINATION DES ÉPAISSEURS DES COUCHES MINCES

C'est dernière année la micro caractérisation acoustique s'est imposée en tant qu'une nouvelle méthode non destructive et non contaminant [22], elle dévoile les détails importants de la structure des matériaux à différentes profondeurs permettant ainsi, de visualiser les défauts éventuels de la technologie de préparation. Cette technique permet d'examiner et de révéler avec une très grande précision le comportement mécanique des objets étudiés (couches minces, circuits intégrés, composants à semiconducteurs,...). Parmi les paramètres importants qui conditionnent les couches minces est la détermination de leurs épaisseurs qui peuvent être, dans certaines applications, de l'ordre de quelques distances interatomiques. Cette procédure est basée sur l'émission et la réception des ondes ultrasonores, qui se propagent dans un matériau et interagissent directement avec ses propriétés élastiques [23]. Le calcul des épaisseurs (h) des couches minces s'effectue grâce à la détermination des vitesses de propagation (V_R) du mode de Rayleigh (mode le plus lent, le plus dominant et le plus facile à détecter). Ces vitesses sont calculées à partir de l'analyse de la signature acoustique des matériaux $V(z)$, représentant la variation de la tension de sortie (V) en fonction de la distance de défocalisation (z), qui sépare le point focal de la lentille et la surface de l'échantillon préparé.

Notons que, cette signature est très sensible aux évolutions des épaisseurs des couches minces qui se traduisent par des variations remarquables de ces courbes. Par conséquent, les vitesses de propagation adoptent nécessairement un comportement dispersif représentant le changement des vitesses en fonction des épaisseurs (figure III.10a). L'étude de l'influence de l'effet de charge modélisé par le rapport densité des couches/densité des substrats ($\rho_{\text{Layer}}/\rho_{\text{Sub.}}$), sur les propriétés élastiques des couches minces (figure III.10b) caractérisées par des vitesses de propagation V_{RC} inférieures aux vitesses du substrat V_{RS} ; a permis d'aboutir à la détermination d'une relation universelle à partir de laquelle les épaisseurs des couches peuvent être facilement déduites. Cette expression est mise sous la forme suivante :

$$h = -1.72 \lambda_T (\Delta V_R / V_{RS}) \left(\rho_{\text{Sub.}} / \rho_{\text{Layer.}} \right) \quad (\text{III.5})$$

Avec

$$\Delta V_R = V_R - V_{RS} \quad (\text{III.6})$$

La longueur d'onde λ_T représente la longueur d'onde transversale de la couche.

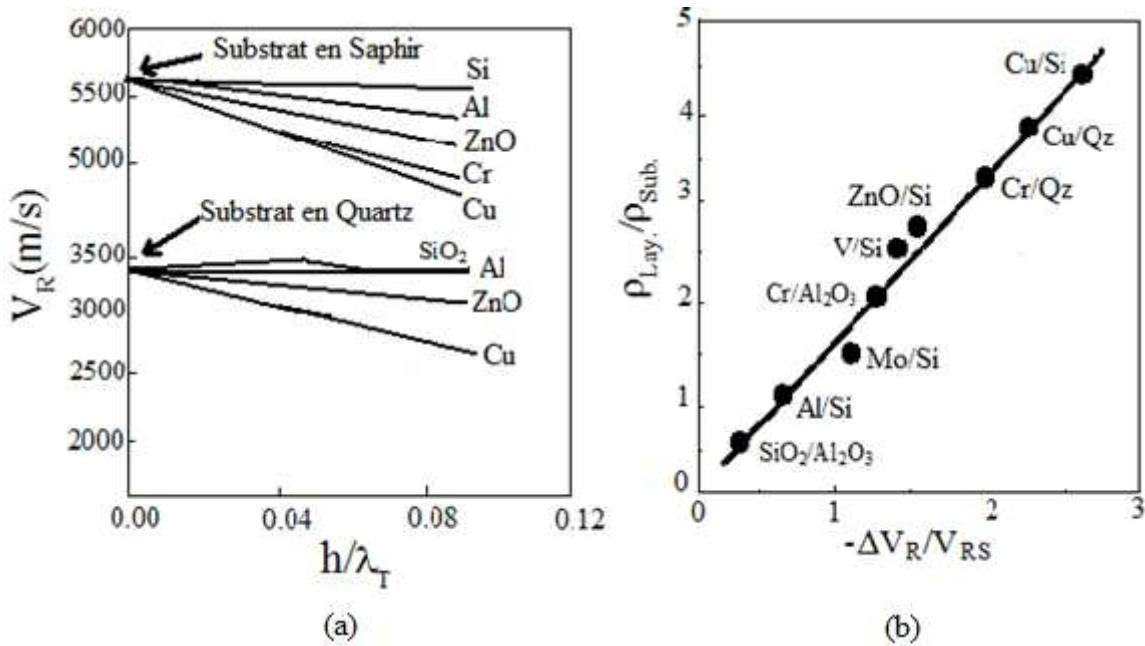


Figure III.9 (a) Dispersion de la vitesse de Rayleigh pour des différentes couches minces déposées sur deux types de substrat (le quartz et le saphir).
(b) Variation du rapport des densité ($\rho_{Lay.}/\rho_{Sub.}$) en fonction de $\Delta V_R/V_{RS}$.

III.8 CONCLUSION

L'intérêt croissant porté aux structures couches minces/substrat ainsi que leurs multiples applications, dans la technologie moderne, nécessite de plus en plus la maîtrise aussi bien des méthodes de préparation que celle de control. Dans ce contexte nous avons présenté une étude, qualitative et quantitative, détaillée sur l'influence de l'épaisseur des couches minces sur l'évolution de la vitesse de Rayleigh de plusieurs structures couches minces (Cr, Al, SiO₂, ZnO, Cu, AlN, Si₃N₄, Cr et SiC) déposées sur différents substrats (Quartz et Saphir). Cette microanalyse a révélé des informations très intéressantes sur l'interdépendance entre l'épaisseur h et la variation de la vitesse de Rayleigh V_R des films minces. Ainsi, ce travail serait de grande importance dans la prévision et la détermination des paramètres élastiques de plusieurs couches appartenant à divers types de matériaux, qui représentent l'intérêt majeur de la croissance de la technologie actuelle.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La compréhension des propriétés des films minces nécessite une caractérisation précise de leur structure et de leur morphologie, ainsi que d'étudier les effets dus aux contraintes mécaniques et aux dimensions réduites des épaisseurs. Les techniques les mieux adaptées pour l'exploration des propriétés élastiques des matériaux reposent sur la propagation d'ondes ultrasonores. Pour de telles études, la longueur d'onde acoustique doit être du même ordre de grandeur qu'une longueur caractéristique de la structure étudiée, ce qui pose un problème particulier lorsqu'il s'agit de couches minces. Dans ce cas, cette longueur caractéristique, pour certaines applications, peut être aussi petite que quelques nm. Ceci suppose la mise en œuvre d'onde ultrasonore dont la fréquence doit être de plusieurs dizaines de GHz, voire d'une centaine de GHz, ce qui rend impossible l'utilisation des techniques habituels. En effet, ces techniques reposent sur l'utilisation de transducteurs piézoélectriques, ce qui restreint le domaine des fréquences accessibles à quelques GHz. Compte tenu de ces limites, la longueur d'onde est toujours supérieure à quelques μm , ce qui constitue l'épaisseur minimale des échantillons et l'utilisation d'une fréquence égale à 142 MHz. Dans ce contexte, en modélisant l'interaction ultrason-matière, nous avons présenté des résultats de simulation théorique permettant l'acquisition des signatures acoustiques $V(z)$. À partir des quelles, nous avons obtenus des courbes décrivant l'évolution des vitesses de phase des ondes acoustiques en fonction des épaisseurs normalisées h/λ_T . Les résultats obtenus, sur les structures (Al, SiO₂, ZnO, Cu, AlN, SiC et Cr)/(Al₂O₃, quartz), ont montré que la vitesse de l'onde de Rayleigh adapte un comportement dispersive. Il est bien connu, que la vitesse de propagation de cette onde dépend en partie des caractéristiques de la couche ; ainsi sa mesure permet, par méthode inverse, de remonter aux paramètres élastiques des films minces tels que leurs épaisseurs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- [1] F. Flory, L. Escoubas, "Optical properties of Nanostructured Thin Films", Prog. in Quantum Electr., 28, pp. 89, (2004).
- [2] P. Rouard, "Propriétés Optiques des Lames Minces Solides", Ed. Gauthier & Villars, (1952).
- [3] J.P. Boilot, M. Canva, C. Sanchez, B. Lebeau, F. Chaput, Y. Lévy, J. Zyss, "Applications des Matériaux Hybrides dans le Domaine de l'Optique, Matériaux Hybrides", Série Arago, Observatoire français des techniques avancées, Masson, 17, pp. 181, (1996).
- [4] S.R. Fleeman, "Electronic Devices Discrete and Integrated", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, (1990).
- [5] H. S. Nalwa, "Nanomaterials and Magnetic Thin Films", Handbook of Thin Film Materials, Vol. 5, Ed. Academic Press, (2002).
- [6] C. M. Mate, G.M. McClelland, R. Erlandsson, and S. Chiang, "Atomic-Scale Friction of a Tungsten tip on a Graphite Surface", Phys. Rev. Lett. 59, pp. 1942, (1987).
- [7] A. Gaudon, A. Dauger, A. Lecomte, B. Soulestin, , R. Guinebretière, "Phase Separation in Sol-Gel Derived ZrO₂-SiO₂ Nanostructured Materials", J. Eur. Ceram. Soc. 25, pp. 283, (2016).
- [8] P. V. Zinin, " in Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases", Ed. M. Levy, H. E. Bass and R. R. Stern, Academic Press, New York, pp. 187, (2001).
- [9] A. Briggs "Advances in Acoustic microscopy" Ed. Plenum Press, Oxford, Vol. 1, (1995).

CHAPITRE I

- [1] G. Zhang, D. M. Harvey, Derek R. Bradenb, "Microelectronic package characterisation using scanning acoustic microscopy", *NDT&E International* 40, pp 609–617, (2007)
- [2] J. Attal, "L'âge Adulte du Microscope Acoustique", *recherche*, N°. 121, pp 478-481, (1981).
- [3] F. Augereau, G. Despaux, "Microstructure des Matériaux par Microscopie Acoustique Mesure Locale non Destructive de Paramètres Mécaniques (Application A L'étude de L'endommagement de L'acier Inoxydable 304L)", *Matériaux & Techniques* N° 3-4, (2000).
- [4] Y. C. Lee, J. O. Kim, J. D. Achenbach, *J. Acoust. Soc. Am.* 94, (1993).
- [5] T. Aomura, E. Gold, M. P. Powers, "Micromechanics/ Structure Relationships in Human Mandible", Elsevier, *Dental Materials*, 19 (2003).
- [6] GR. Roman Maev, Lyudmila A. Denisova, Elena YU. Maeva and Alexey A. Denissov, 28, Issue 1, (2002).
- [7] Echographie, Wikipédia, l'encyclopédie libre, (2003).
- [8] R. T Beyer. and Letcher, S. V., *Physical Ultrasonics*, Academic Press New York, (1969).
- [9] Encyclopédie-onde Sismique-Wikipédia, (2004).
- [10] M. Djeddi, H. Shout, "Bases Physiques des Méthodes Sismiques", Algérie, (1995).
- [11] Ondes longitudinales et transversales -Mécanismes Failles et ondes, (2003).
- [12] D. Royer, "Ondes Elastiques dans les Solides", Tome II, Masson, Paris, (1999).
- [13] Les Ondes sismiques, Strasbourg, (2014).
- [14] E. Dielesaint et Royer, "Ondes Elastique dans les Solides", Masson, et Cie, Paris, (1974).
- [15] H. L. Bertoni, T. Tamir, "Unified Theory of Rayleigh angle Phenoma for acoustic Beam and Liquid-Solid interfaces", *App, Physics*, n°2, pp 157-172, (1973).
- [16] J.A. Kleppe, "Engineering Aplication of Acoustic", Artech House (1989).
- [17] A. Briggs, "Acoustic Microscopy", Clarendon Press, Oxford (1992).
- [18] H. S. Nalwa, "Nanomaterials and Magnetic Thin Films", *Handbook of Thin Film Materials*, Vol. 5, Ed. Academic Press, (2002).
- [19] B. H. Flowers and E. Mendoza, "Properties of Matter", John Wiley & Sons, New York, (1970)

- [20] J. Attal, "Acoustic Microscopy: Imaging Microelectronic Circuits With Liquid Metals", in Scanned Image Microscopy (ed. ASH, E. A), Academic Press New-York, pp 97-118, (1980).
- [21] R. Levy, Contrôle d'Épaisseur, Technique de l'ingénieur, Traité Mesures et Control, R 1370, pp. 1-16.
- [22] S. Schmitt, "la Microélectronique Hybride : la Couche Épaisse", Ed. Hermès, (1990).
- [23] D. A. Skoog, F. J. Holler, T. A. Nieman, "Principes d'analyse instrumentale", de Boeck Université, (2003).
- [24] M. Wautelet, "Sciences, Technologies et Société : Questions et Réponses", Boeck Université, (2005).
- [25] Apex BP Solar, "Informations Générales sur le Photovoltaïque", (2000).
- [26] D. Sakami, "Contribution à l'Étude des Propriétés Thermiques des Couches Minces Métalliques : Effets de la Microstructure", s.n., (2001).

CHAPITRE II

- [1] A. Cornet, J. P Deville, "Physique et Ingénierie des Surfaces, Monographie de Matérialogie", Vol. 3, Ed. EDP Sciences, 1998.
- [2] T. Reïs, "Introduction à la Chimie-Physique des Surfaces", Vol. 1, Ed. Dunod, (1952).
- [3] F. Levy, "Physique et Technologie des Semiconducteurs, Traité des matériaux", Vol. 18, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Ed. Lausanne, (1995).
- [4] C. Kittel, "Physique de l'État Solide", 5^{ème} éd., Ed. Dunod, (1990).
- [5] D. C. Giancoli, "Physique Générale 1, Mécanique et thermodynamique", Vol. 1, De Boeck Université, Montréal, (1997).
- [6] H. J. Mathieu, E. Bergmann, R. Gras, "Analyse et Technologie des Surfaces : Couches Minces et Tribologie, Traité des Matériaux", Vol. 4, Ed. PPUR Presses Polytechniques, (2003).
- [7] J. P. Eberhart, "Analyse structural et Chimique des Matériaux", Ed. Dunod, Paris, (1989).
- [8] A. Benninghoven, F. G. Rudenauer and H. W. Werner, "Secondary Ion Mass Spectroscopy Basic Concepts, Instrumental Aspect, applications and Trends", Ed. John & Sons, New York, (1987).
- [9] P. Sigmund, Sputter Theory I, Phys. Rev., **184**, pp. 383, (1969).

- [10] J. Rivière, "Surface Analytical Techniques", Ed. Clarendon Press, Oxford, (1990).
- [11] H. S. Nalwa, "Nanomaterials and Magnetic Thin Films", Handbook of Thin Film Materials, Vol. **5**, Ed. Academic Press, (2002).
- [12] F. Rosei, "Nanostructured Surfaces: Challenges and Frontiers in Nanotechnology", J. Phys. Condens. Matter, **16**, pp. 1373, (2004).
- [13] S. Andrieu, P. Müller, "Les Surfaces Solides : Concepts et Méthodes", Ed. EDP Sciences, (2005).
- [14] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, "Mécanique Quantique I", Ed. Hermann.
- [15] R. Holm, B. Kirschstein, Z. Tech. Physiq., **16**, pp. 488, (1935).
- [16] J. G. Simmons, J. Appl. Phys. **34**, pp. 1793, (1963).
- [17] A. Davies, J. A. Stroschio, D.T. Pierce, and R.J. Celotta, Phys. Rev. Lett. **76**, pp. 4175, (1996).
- [18] L. J. Whitman, J. A. Stroschio, R.A. Dragoset, and R.J. Celotta, Phys. Rev. Lett. **66**, pp. 1338, (1991).
- [19] G. Binnig, C.F. Quate, and Ch. Gerber, "Atomic Force Microscope", Phys. Rev. Lett., **56**, pp. 930-933, (1986).
- [20] D. Tabor and F.R.S. Winterton, "The Direct Measurement of Normal and Retarded Van der Waals Forces", Proc. R. Soc., **312**, pp. 435, (1969).
- [21] S. I. Rokhlin and W. Huang, "Ultrasonic Wave Interaction with a Thin Anisotropic Layer between Two Anisotropic Solids", J. Acoust. Soc. Am., **92**, pp. 1729-1742, (1992).
- [22] D. Royer, "Ondes Elastiques dans les Solides", Tome II, Masson, Paris, (1999).
- [23] J. M. Haussonne and C. Carry, Céramiques et Verres : Principes et Techniques d'élaboration, PPUR presses polytechniques", (2005).
- [24] A. Houssam, "Room Temperature Tensile and Flexural Strength of Ceramics in AlN-SiC System", J. of the Eur. Cer. Soc., Vol. 15, pp. 425-434, (1995).
- [25] M. Boiret, "Réduction du Tribromure de Bore par l'Hydrogène sur Substrat Métallique : Structure des Dépôts de Bore et Phénomènes de Diffusion dans le Substrat", Ed. s. n., (1969).

CHAPITRE III

- [1] A. Briggs "Advances in Acoustic microscopy" Ed. Plenum Press, Oxford, vol 1, (1995).
- [2] Jan D. Achenbach, "Modeling for Quantitative nondestructive evaluation". Ultrasonics 40, pp 1-10, (2014).

- [3] P. V. Zinin, in "Handbook of Elastic properties of Solids, Liquids and Gases" vol.1, Ed. Levy, Bass and Stern (Academic Press, N. Y.) 187, (2001).
- [4] H. Uberal, "Physical Acoustics", Warren P. Masson, New-york et London. (1973).
- [5] Fang Shena, Wenchang Tana, Yaohua Zhaoc, Takashi Masuokad, "The Rayleigh–Stokes problem for a heated generalized second grade fluid with fractional derivative model", *Nonlinear Analysis: RealWorld Applications* 7, 1072 – 1080, (2016)
- [6] Chai Wah Wu, "On Rayleigh–Ritz ratios of a generalized Laplacian matrix of directed graphs", *Linear Algebra and its Applications* 402, 207–227, (2005).
- [7] J. O. Kim and J. D. Achenbach, "Thin Solid Films", 214, (1992).
- [8] Tomasz Błachowicz , Zygmunt Kleszczewski , Andrzej Skumiel, "Elastic constants of the SrLaAlO₄ and SrLaGaO₄ crystals measured at ultrasonic and hypersonic acoustic frequencies", *Ultrasonics* 39, 611–615, (2002).
- [9] M. Lematre, Y. Benmehrez, G. Bourse, J. W. XU, M. Ourak, *NDT & E International* 35 P 279-286 (2002)
- [10] V. Mohanavel, K. Rajan, and M. Ravichandran, "Synthesis, characterization and properties of stir cast AA6351- aluminium nitride (AlN) composites," *Journal of Materials Research*, vol. 31, no. 24, pp. 3824–3831, 2016.
- [11] M. L. Bharathi, S. Adarsh Rag, L. Chitra et al., "Investigation on wear characteristics of AZ91D/nanoalumina composites," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2022, Article ID 2158516, 9 pages, 2022.
- [12] M. Meignanamoorthy and M. Ravichandran, "Synthesis, properties and microstructure of sintered and hot extruded boron carbide reinforced AA8079 (Al-Cu-Fe-Si-Zn) matrix composites," *Materials Research Express*, vol. 5, no. 11, p. 116508, 2018.
- [13] R. Guan, Y. Wang, S. Zheng et al., "Fabrication of aluminum matrix composites reinforced with Ni-coated graphene nanosheets," *Materials Science and Engineering A*, vol. 754, pp. 437–446, 2019.
- [14] B. Chen, J. Shen, X. Ye et al., "Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites," *Acta Materialia*, vol. 140, pp. 317–325, 2017.
- [15] M. Ravichandran, V. Mohanavel, T. Sathish, P. Ganeshan, S. S. Kumar, and R. Subbiah, "Mechanical properties of AlN and molybdenum disulfide reinforced aluminium alloy matrix composites," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2027, p. 012010, 2021.
- [16] A. Alizadeh and M. J. Abdollahi Aand Radfar, "Processing, characterization, room temperature mechanical properties and fracture behavior of hot extruded multi-scale B₄C reinforced 5083 aluminum alloy based composites," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 27, no. 6, pp. 1233–1247, 2017.
- [17] A. Sivkov, I. Rakhmatullin, I. Shanenkov, and Y. Shanenkova, "Boron carbide B₄C ceramics with enhanced physicomechanical properties sintered from multimodal

- powder of plasma dynamic synthesis,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 78, pp. 85–91, 2019.
- [18] A. Briggs, “*Acoustic Microscopy*” (Clarendon Press, Oxford, 1992)
- [19] F. Kubat a, W. Ruile, C. Eberl, T. Hesjedal, L.M. Reindl, "Modeling Qualitative and quantitative analysis of acoustomigration effects in SAW-devices", *Microelectronic Engineering* 82, 655–659, (2005)
- [20] V. Umasankar, M. Anthony Xavier, and S. Karthikeyan, “Experimental evaluation of the influence of processing parameters on the mechanical properties of SiC particle reinforced AA6061 aluminium alloy matrix composite by powder processing,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 582, pp. 380–386, 2014.
- [21] R. U. Din, Q. A. Shafqat, Z. G. H. ZahidAsghara et al., “Microstructural evolution, powder characteristics, compaction behavior and sinterability of Al 6061–B4C composites as a function of reinforcement content and milling times,” *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, vol. 59, no. 2, pp. 207–222, 2018.
- [22] O. Joo Won, S. K. Ryu, W. S. Lee, and S. J. Park, “Analysis of compaction and sintering behavior of 316L stainless steel nano/micro bimodal powder,” *Powder Technology*, vol. 322, pp. 1–8, 2017.
- [23] V. V. Vani and S. K. Chak, “The effect of process parameters in aluminum metal matrix composites with powder metallurgy,” *Manufacturing Review*, vol. 5, pp. 1–13, 2018.