

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عين تموشنت-بلحاج بوشعيب
Université Ain Temouchent - Belhadj Bouchaib



Faculté : Sciences et de la Technologie
Département : Génie Mécanique
Laboratoire : Laboratoire des Structures Intelligentes



THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique

Par : El Fatmi Imad

Intitulé

*ANALYSE NUMERIQUE MULTI- ECHELLE DE LA DEFORMATION D'UN
EMPILEMENT DE COUCHE MINCE DESTINE A DES APPLICATION MICRO
ELECTRONIQUE*

Soutenue publiquement, le 18/09/2025, devant le jury composé de :

Présidente	Bourassia BENSAAD	Pr	Université d'Ain Temouchent
Directeur de thèse	Soufyane BELHENINI	Pr	Université d'Ain Temouchent
Membre	Benali BOUTABOUT	Pr	Université de Sidi Bel Abes
Membre	Ali BENOUIS	Pr	Université de Saïda
Membre	Noureddine DJEBBAR	Pr	Université d'Ain Temouchent

Année Universitaire : 2024/2025

Résumé

La fabrication des composants microélectroniques tend vers une miniaturisation accrue et des performances optimisées pour répondre à des enjeux économiques et stratégiques. Pour atteindre ces objectifs, les industriels utilisent des couches minces de matériaux variés, généralement déposées sur des substrats en silicium.

Cependant, ces méthodes de fabrication, réalisées à des températures différentes, provoquent des gauchissements en raison des différences de coefficients de dilatation thermique entre les couches minces constituant l'empilement.

Ces gauchissements peuvent perturber le processus de fabrication, entraînant des problèmes tels que des défauts lors de la photolithographie, des difficultés de détection des plaquettes par les équipements automatisés, ou encore des risques de casse lors des manipulations. Pour éviter ces complications, il est essentiel de prédire le niveau et la répartition des déformations dans l'empilement. La simulation numérique est couramment utilisée pour étudier ces problèmes, offrant des avantages considérables pour une application industrielle rapide.

Le travail mené dans le cadre de cette thèse repose sur trois points principaux :

1. Déterminer numériquement le gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt en respectant les étapes du processus de fabrication.
2. Introduire et valider des simplifications pour faciliter la modélisation numérique, notamment le remplacement du chargement thermique réel par un chargement équivalent et l'intégration de techniques d'homogénéisation pour obtenir un modèle équivalent.
3. Étudier numériquement l'effet du détournage sur la réduction du gauchissement d'un empilement de couches minces.

Les approches numériques menées dans ce travail ont été validées par des comparaisons avec des résultats expérimentaux. Les résultats ainsi obtenus montrent l'importance de la prise en compte des gauchissements dans les empilements. La contribution à la simplification de l'approche numérique peut être employée par les industriels travaillant dans le secteur pour réduire les temps alloués au développement de nouvelles solutions microélectroniques.

Mots clés : Couches minces, plaquettes de silicium, contraintes résiduelles, gauchissements, éléments finis.

ملخص

تتجه صناعة المكونات الدقيقة الإلكترونية نحو تصغير مترابيد وتحسين الأداء لتلبية التحديات الاقتصادية والاستراتيجية. لتحقيق هذه الأهداف، يستخدم الصناعيون طبقات رقيقة من مواد متنوعة، تُودع عادةً على ركائز من السيليكون. ومع ذلك، تؤدي طرق التصنيع هذه، التي تتم عند درجات حرارة مختلفة، إلى حدوث تشوهات نتيجة الفروق في معاملات التمدد الحراري بين الطبقات الرقيقة التي تشكل التكدس. يمكن أن تؤثر هذه التشوهات سلباً على عملية التصنيع، مما يؤدي إلى مشكلات مثل العيوب أثناء عملية الطباعة الحجرية الضوئية، وصعوبة الكشف عن الرقائق بواسطة المعدات الآلية، أو حتى مخاطر الانكسار أثناء المناولة. لتجنب هذه المضاعفات، من الضروري التنبؤ بمستوى وتوزيع التشوهات في التكدس. تُستخدم المحاكاة الرقمية بشكل شائع لدراسة هذه المشاكل، مما يوفر فوائد كبيرة للتطبيق الصناعي السريع. يستند العمل المنجز في إطار هذه الأطروحة إلى ثلاث نقاط رئيسية:

1. تحديد تشوه تكدس Si/USG/Pt عددياً مع احترام مراحل عملية التصنيع.
2. إدخال وتأكيد التبسيطات لتسهيل النمذجة الرقمية، بما في ذلك تبسيط التحميل الحراري الفعلي إلى تحميل مكافئ ودمج تقنيات التجانس للحصول على نموذج مكافئ.
3. دراسة تأثير التشذيب على تقليل التشوه في تكدس الطبقات الرقيقة.

تم تأكيد النهج الرقمي المتبع في هذا العمل من خلال مقارنات مع النتائج التجريبية. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أهمية مراعاة التشوهات في التكدس. يمكن أن يسهم هذا العمل في تبسيط النهج الرقمي الذي يمكن أن يستخدمه الصناعيون العاملون في القطاع لتقليل الوقت المخصص لتطوير حلول جديدة للصناعة الدقيقة الإلكترونية.

الكلمات المفتاحية: الطبقات الرقيقة، رقائق السيليكون، الإجهادات المتبقية، التشوهات، العناصر المحدودة.

Abstract

The manufacturing of microelectronic components is moving towards increased miniaturization and optimized performance to meet economic and strategic challenges. To achieve these objectives, manufacturers use thin films of various materials, typically deposited on silicon substrates.

However, these manufacturing methods, carried out at different temperatures, cause warping due to differences in the coefficients of thermal expansion between the thin layers making up the stack.

This warping can disrupt the manufacturing process, leading to issues such as defects during photolithography, difficulties in automated equipment detecting wafers, or even risks of breakage during handling. To avoid these complications, it is essential to predict the level and distribution of deformations within the stack. Numerical simulation is commonly used to study these problems, offering significant advantages for rapid industrial application.

The work conducted within the framework of this thesis is based on three main points:

1. Numerically determine the warping of the Si/USG/Pt stack while respecting the steps of the manufacturing process.
2. Introduce and validate simplifications to facilitate numerical modeling, notably replacing the actual thermal loading with an equivalent loading and integrating homogenization techniques to obtain an equivalent model.
3. Numerically study the effect of trimming on reducing the warping of a thin-film stack.

The numerical approaches undertaken in this work were validated by comparisons with experimental results. The results thus obtained highlight the importance of taking warping into account in layer stacks. The contribution to simplifying the numerical approach can be used by industry professionals to reduce the time allocated to developing new microelectronic solutions.

Keywords: Thin layers, silicon wafers, residual stresses, warpage, finite elements.

Remerciements

Cette thèse marque l'aboutissement d'un parcours à la fois exigeant et enrichissant, que je n'aurais jamais pu mener à bien sans le soutien et l'encouragement de nombreuses personnes, que je tiens à remercier ici.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, **Pr Belhenini Soufyane**, pour son encadrement, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ce travail. Ses remarques pertinentes, sa disponibilité et son soutien constant m'ont permis de mener à bien ce projet de recherche.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude aux membres de mon jury, qui ont bien voulu accepter de juger mon travail. Je remercie particulièrement **Pr Bensaad Bourasia**, présidente du jury, pour sa bienveillance et son implication dans l'organisation de cette évaluation. Je souhaite également remercier **Pr Boutabout Benali**, Professeur à l'Université Sidi Bel Abbès, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Un grand merci au **Pr Benouis Ali**, Professeur à l'Université de Saïda, pour sa rigueur scientifique et ses remarques pertinentes. Enfin, je suis reconnaissant envers **Pr Djebbar Noureddine**, Professeur à l'Université d'Aïn Témouchent, pour sa disponibilité et son regard critique.

Leur participation et leur engagement représentent une grande source d'inspiration et m'encouragent à donner le meilleur de moi-même pour cette soutenance.

Un grand merci à l'ensemble de l'équipe du **laboratoire SSL**, pour leur soutien scientifique et humain.

Je remercie du fond du cœur ma femme, pour son soutien, sa patience et sa compréhension qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

Je n'oublie pas ma petite-fille, qui a su, par sa joie et son innocence, me rappeler l'essentiel et illuminer mes journées. Son sourire a été une source de bonheur et de motivation constante.

Je suis également reconnaissant envers mes frères et sœurs, dont l'amour, le soutien moral et financier ont été essentiels pour atteindre cet objectif.

Enfin, merci à mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi les moments de doute et de joie durant cette aventure. Leur présence m'a été précieuse.

Dédicace

À la mémoire de mes chers parents,

Vous qui avez été la source de mon courage, de ma persévérance et de mon ambition. Vos sacrifices, votre amour inconditionnel et vos enseignements continuent de me guider à chaque étape de ma vie.

Cette thèse est dédiée à vous, en reconnaissance de tout ce que vous m'avez donné, et avec l'espoir que, de là où vous êtes, vous serez fiers de moi.

Table des matières

Remerciements	5
Liste de figures	7
Table des matières	13
Introduction Générale	17
Chapitre I : Généralité sur la microélectronique	20
I.1. Introduction	21
I.2. De l'électronique à la microélectronique	21
I.3. Evolution de la microélectronique	22
I.4. Technique de fabrication des microcomposants électronique	24
I.4.1. Le front end regroupe l'ensemble des opérations suivantes	25
I.4.2. Le back-end regroupe les étapes suivantes	27
I.5. Les plaquettes de silicium comme substrat	28
I.5.1. Le silicium monocristallin	28
I.5.2. Le silicium amorphe	30
I.5.3. Le silicium polycristallin ou polysilicium	30
I.6. Les empilements de couches minces sur les substrats	31
I.6.1. Les couches minces conductrices	31
I.6.2. Les couches minces semi-conductrices	32
I.6.3. Les couches minces diélectriques ou isolantes	32
I.7. Les problèmes mécaniques rencontrés lors de l'élaboration des microcomposants électroniques.	32
I.7.1. Contraintes résiduelles	32
I.7.2. Contraintes intrinsèques	32
I.7.3. Contraintes thermiques	33
I.8. Contrôle du niveau des contraintes et des déformations résiduelles des plaquettes de silicium	34
I.9. Techniques de réduction du niveau de gauchissement.	35
I.9.1. Le détournage	35
I.9.2. Utilisation des couches tampons	36
I.9.3. Traitement thermique	37
I.9.4. Utilisation des matériaux appropriés	38

I.10.	Objectif de la thèse	38
Chapitre II	: Quantification du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.....	39
II.1.	Introduction.....	40
II.2.	Origine des gauchissements	40
II.2.1.	Déformations thermiques.....	41
II.2.2.	Déformations intrinsèques	41
II.2.3.	Déformations mécaniques élastiques.....	41
II.3.	Techniques expérimentales adaptées pour la mesure des gauchissements des plaquettes.....	42
II.3.1.	Diffraction par rayons-X (DRX)	42
II.3.2.	La réflectométrie optique.....	44
II.3.3.	Profilométrie mécanique.....	46
II.3.4.	Projection de moiré.....	47
II.3.5.	Elepsometrie	48
II.4.	Modèles analytiques permettant d'estimer les gauchissements.....	50
II.4.1.	Modèle de Stoney	51
II.4.2.	Limites du modèle de Stoney	53
II.4.3.	Modèle de Hutchinson.....	54
II.4.4.	Modèle analytique de Suhir.....	58
II.5.	Approches numériques utilisées pour estimer les gauchissements	59
II.5.1.	Méthode des éléments finis (MEF)	60
II.5.2.	Difficultés de la modélisation des plaquettes avec des motifs	62
II.6.	La méthode d'homogénéisation.....	63
Chapitre III	: Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.....	66
III.1	Introduction.....	67
III.2	Présentation de la plaquette de l'étude.....	68
III.3	Présentation des modèles numériques développés.....	69
III.3.1	Modèles complets	69
III.3.2	Géométries des modèles.....	69
III.3.3	Propriétés mécanique des matériaux	69

III.3.4	Maillage des modèles.	70
III.3.5	Conditions de chargement, aux limites et contact.	71
III.4	Contribution dans la simplification du chargement thermique	72
III.4.1	Simplification du chargement thermique.....	72
III.4.2	Intégration de l'homogénéisation.....	73
III.4.3	Type de l'analyse.....	76
III.5	Résultats recherchés (déplacement à 68 mm).	76
III.6	Effets observés.	77
III.6.1	Effet de l'épaisseur du film Pt.	77
III.6.2	Effet du type de chargement thermique (cycle complet VS dernière étape du cycle) ..	77
III.6.3	Effet de l'homogénéisation	78
III.6.4	Effet du Détourage (effet de la largeur et de l'épaisseur du matériau enlevé). ..	78
III.7	Conclusion.....	79
Chapitre IV : Résultats et discussions.....		81
IV.1.	Introduction	82
IV.2.	Validation de l'approche numérique et effet de l'épaisseur de la couche mince en Pt ..	82
IV.3.	Simplification du chargement thermique imposé.....	84
IV.3.1.	Effet du détourage	86
IV.3.2.	Effet du détourage pour une couche de Pt de 100 nm d'épaisseur	87
IV.3.3.	Effet du détourage pour une couche de Pt de 150 nm d'épaisseur	90
IV.3.4.	Effet du détourage pour une couche de Pt de 300 nm d'épaisseur	93
IV.4.	Apport de l'homogénéisation dans l'estimation numérique de la déflexion	98
IV.5.	Conclusion.....	100
Conclusion générale		102
Annexes.....		105
Production scientifique.....		109
Références		110

Liste de figures

Figure 1. Un siècle d'électronique. _____	22
Figure 2. Evolution du nombre de transistors par circuit[4] _____	23
Figure 3. Croissance du coût de développement reliée à la taille de microcomposants [5]. _____	24
Figure 4. Feuille de route de mise à l'échelle pour circuit intégré [6] _____	24
Figure 5. Les étapes élémentaires de la fabrication des microcomposants électronique[7] _____	25
Figure 6. Principe du dépôt chimique par voie vapeur [9] _____	26
Figure 7. Principe du dépôt physique par voie vapeur [9] _____	26
Figure 8. Le procédé de Sol-Ge [11] _____	27
Figure 9. Plaquette de silicium comportant des milliers de microcomposants [15] _____	28
Figure 10. Maille conventionnelle d'une structure diamant [18] _____	29
Figure 11. Les indices de Miller dans un cristal cubique. Par convention, les directions [100], [010] et [001] sont les axes cartésiens XYZ [17] _____	30
Figure 12. Orientation des cristaux dans des plaquettes de silicium de 100 mm de diamètre. Les axes X et Y naturels sont dans les 110 directions. (a) Orientation d'une plaquette de 100. (b) Directions et axes dans une plaquette de 100[17] _____	30
Figure 13. Les différentes étapes du dépôts de couches minces[24]. _____	31
Figure 14. Origines des contraintes thermiques dans un film mince refroidi[27]. _____	33
Figure 15. Le procédé du détournage (edge trimming)[29]. _____	36
Figure 16. La déflexion de la surface de la plaquette de verre dans une plage de 1 mm à 5 mm du bord[30] _____	36
Figure 17. Tendance de la déformation des plaquettes lors de l'utilisation d'un interposeur en silicium (2,5D) et d'un interposeur en moulage (processus C4 en premier)"[32] _____	37
Figure 18. Diffraction des rayons X par un réseau cristallin et spectre résultant [7],[8] _____	43
Figure 19. Effet d'une contrainte sur l'angle de diffraction des rayons X[9]. _____	43
Figure 20. Repère de mesure côté instrumentation (à gauche) et échantillon (à droite) [9],[10] _____	44
Figure 21. Principe de la réflectométrie optique[9] _____	45
Figure 22. Principe de mesure par réflectométrie optique[9] _____	46
Figure 23. Principe de la profilométrie mécanique [46] _____	46
Figure 24. Le P-17 Profilomètre mécanique pour l'industrie[47]. _____	47
Figure 25. Principe de la technique de projection de moiré[16] _____	48
Figure 26. Configuration conventionnelle d'un ellipsomètre [49] _____	49
Figure 27. La gamme M-2000® d'ellipsométrie[50]. _____	49
Figure 28. Méthodologie de détermination de la courbure avant et après dépôt pour en déduire la contrainte intrinsèque[9] _____	51
Figure 29. Les courbures utilisées dans le modèle de Stoney [11]. _____	52
Figure 30. Flèche B, diamètre D et rayon de courbure R d'une plaque[9] _____	53
Figure 31. (a) Dépôt couche par couche sur un substrat épais. (b) état du multicouche à la température T[54] _____	54
Figure 32. Système bicouche (substrat +film mince) et repère associé[9] _____	55
Figure 33. Empilement multicouches[55]. _____	58
Figure 34. (a) Mesure expérimentale du gauchissement de la plaquette, (b) Gauchissement obtenu numériquement pour la première couche [57] _____	61
Figure 35. Comparaison des résultats du gauchissement obtenus numériquement avec les calculs analytiques utilisant le modèle de Stoney[57] _____	61
Figure 36. Le gauchissement du l'empilement Si/USG/Pt par apport à la séquence du dépôt des films minces[59] _____	62
Figure 37. A) Plaquettes de silicium comportant plusieurs composants, B) discontinuité des couches minces pour la formation des composants[60]. _____	63
Figure 38. Schéma illustratif de la taille de VER[62] _____	64
Figure 39. Les étapes de l'homogénéisation [63] _____	65
Figure 40. Observation MEB d'une vue en coupe transversale de l'empilement Si/USG/Pt[59]. _____	68
Figure 41. Plaquette de siliciums revêtus de couches minces[64] _____	68

Figure 42. Géométrie du modèle étudié.	69
Figure 43. Maillage des couches déposées	71
Figure 44. Éléments d'intégration réduits à 4 nœuds CAX4R[78]	71
Figure 45. Les conditions aux limites appliquées au modèle complet.	72
Figure 46. Les étapes du chargement thermique cycle complet	73
Figure 47. (a) Modèle complet et (b) modèle homogénéisé équivalent	74
Figure 48. Position des points de mesure dans la plaquette[59].	77
Figure 49. Processus du détournage avec une scie circulaire [29].	78
Figure 50. La déflexion de la surface de la plaquette en verre dans la plage de 1 mm à 5 mm du bord[30]	78
Figure 51. Modèle géométrique avec enlèvement de matière	79
Figure 52. Gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt	83
Figure 53. Comparaison entre le gauchissement mesuré expérimentalement[78] et celui estimée numériquement	84
Figure 54. Gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt obtenu avec le cycle thermique complet	85
Figure 55. Gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt obtenu avec la dernière étape du cycle thermique	85
Figure 56. Effet du type sur le gauchissement de chargement thermique des plaquettes.	86
Figure 57. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 1 mm.	87
Figure 58. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 2 mm.	88
Figure 59. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 5 mm.	88
Figure 60. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 7 mm.	89
Figure 61. Evolution de la déflexion en fonction de la longueur et de l'épaisseur du détournage pour une plaquette Pt=100 nm	89
Figure 62. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 1 mm	90
Figure 63. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 2 mm.	91
Figure 64. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 5 mm.	91
Figure 65. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 7 mm.	92
Figure 66. Evolution de la déflexion en fonction de la longueur et de l'épaisseur du détournage pour une plaquette Pt=150 nm	93
Figure 67. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 1 mm.	94
Figure 68. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 2 mm.	94
Figure 69. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 5 mm.	95
Figure 70. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 7 mm.	95
Figure 71. Evolution de la déflexion en fonction de la longueur et de l'épaisseur du détournage pour une plaquette Pt=300 nm	96
Figure 72. Comparaison de la déflexion maximale obtenue pour un détournage avec l=7mm et e=100% de l'épaisseur de Pt pour les trois épaisseurs étudiés	97
Figure 73. Evolution du gain de déflexion en fonction des paramètres géométriques pour les différentes épaisseurs du Pt	98
Figure 74. L'évolution du gauchissement du l'empilement, a) modèle complet, b) modèle équivalent homogénéisé	99
Figure 75. Gauchissement obtenue selon le modèle homogénéisé/hétérogène	100

Liste des tableaux

Tableau 1. Les techniques de contrôle des plaquettes de silicium adaptées à chaque étape du processus de fabrication[28].....	35
Tableau 2. Paramètres géométriques et résultats de gauchissement obtenus numériquement[58].....	62
Tableau 3. Propriétés élastiques du silicium monocristallin	69
Tableau 4. Propriétés élastiques de l'USG	70
Tableau 5. Propriétés élastiques du platine.....	70
Tableau 6. Les propriétés équivalentes du matériau homogénéisé équivalent.	76
Tableau 7. Paramètres géométriques de la partie de Pt enlevée	79

Liste des abréviations et sigles

CVD (chemical vapor deposition) : dépôt chimique en phase vapeur.

PVD (physical vapor deposition) : dépôt physique en phase vapeur.

(CMP) : polissage chimico-mécanique

Å : (Angstrom)

[] : Direction cristallographique

< > : Type de direction cristallographique

() : Plan cristallographique

{ } : Famille de plans cristallographiques

$\sigma_{\text{résiduelle}}$: Contraintes résiduelles

$\sigma_{\text{intrinsèque}}$: Contraintes intrinsèques

$\sigma_{\text{thermique}}$: Contraintes thermiques

PECVD : (Dépôt en phase vapeur assisté par plasma).

α, α_f : Les coefficients de dilatation thermiques du substrat et du film.

E_f : Le module d'Young du film

ν_f : Le coefficient de Poisson du film

T : La température de dépôt

T_0 : La température de référence.

ε_{th} : La déformation thermique

(FTIR) : La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

La MOCVD : (Metal Organic Chemical Vapor Deposition).

La SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) : spectrométrie de masse des ions secondaires.

La SRP (Spreading Resistance Profiling) : profilage de résistance d'étalement.

SEM (Scanning Electron Microscopy) : La microscopie électronique à balayage (SEM) .

AFM (Atomic Force Microscopy) : La microscopie à force atomique (AFM).

La CSL (Coincidence Site Lattice) W : la limite de grain CSL.

Le RDL (Redistribution Layer) : couche de redistribution.

ε_{tot} : Déformation totale.

I : Tenseur identité.

ε_{el} : La déformation élastique

(DRX) : Diffraction par rayons-X

λ_0 : La longueur d'onde des rayons X utilisés.

d : la distance inter réticulaire entre deux plans cristallographiques,

θ : L'angle d'incidence et de réflexion des rayons X.

ψ : est l'angle entre le plan de la surface du cristal et le plan de diffraction.

S_1 et S_2 : sont des constantes radiocristallines.

κ :La courbure

R : Rayon de courbure.

CCD (Charge Coupled Device).

Ψ : l'angle de rotation de l'ellipse

Δ : l'allongement de l'ellipse.

B : le Bow ou la flèche.

D : diamètre de la plaque.

C : Tenseur de rigidité.

VER : Volume Élémentaire Représentatif (RVE)

Méthode des éléments finis (MEF)

(WLCSP): Wafer-Level Chip Scale Package

MHE: Milieu Homogène Équivalent.

USG: undoped silica glass.

2D: Deux dimensions.

Introduction Générale

Face à la demande mondiale croissante pour des dispositifs toujours plus performants et miniaturisés, l'industrie de la microélectronique a connu un développement considérable en matière d'innovation. Ce progrès vise à répondre à ces besoins tout en relevant les défis liés à la compétitivité dans ce secteur stratégique.

La miniaturisation des microcomposants électroniques et l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce sont des réponses essentielles aux défis de la compétitivité dans l'industrie de la microélectronique. Ces innovations permettent de satisfaire les besoins croissants des différents secteurs en améliorant les performances et en réduisant la consommation énergétique.

La fabrication des composants microélectroniques se compose de plusieurs étapes, durant lesquelles des couches sont généralement déposées sur une plaquette de silicium. À la fin de ce processus, les plaquettes sont découpées pour séparer les différents composants. La réalisation des composants électroniques passe par plusieurs étapes de dépôt de couches minces de différentes natures, qu'elles soient semi-conductrices, isolantes ou diélectriques, sur un substrat, créant ainsi un empilement. Face à la demande croissante de microcomposants électroniques, les industriels tendent à choisir des plaquettes de plus en plus grandes et plus minces. Ce choix incontournable entraîne des problèmes de fabrication, car les conditions de dépôt des couches, notamment la température, l'épaisseur et les propriétés mécaniques, engendrent divers défauts au cours du processus. Ainsi, des problèmes de gauchissement et de délamination des plaquettes surviennent fréquemment durant le cycle de production.

L'origine de ces problèmes est principalement due à des contraintes résiduelles d'origine thermique engendrées par les différences entre les coefficients de dilatation thermique des différentes couches minces de l'empilement, ainsi qu'à des contraintes intrinsèques générées lors du dépôt. Ces problèmes peuvent affecter l'efficacité du processus de production, ainsi que la fiabilité et la qualité des composants en service.

L'estimation du gauchissement de l'empilement et sa réduction font partie des recherches présentées dans cette thèse.

L'objectif principal de ce travail est le développement d'une approche numérique permettant d'estimer le gauchissement des plaquettes avant le lancement de la production réelle. Diverses approches simplificatrices dans la modélisation par élément finis de la courbure des plaquettes ont été présentées et discutées. La réduction du gauchissement des empilements en introduisant des modifications géométriques et en adoptant une approche numérique simplifiée, basée sur une méthode d'homogénéisation a également été proposée, analysée et discutée.

Le présent travail se compose, en plus d'une introduction et d'une conclusion générale, de quatre parties :

- La première partie est consacrée aux recherches bibliographiques qui offrent un aperçu global de l'histoire de la fabrication des microcomposants électroniques. Elle présente

les techniques de fabrication, la nature des substrats, ainsi que les couches minces déposées. Les problèmes mécaniques rencontrés lors du processus d'élaboration, ainsi que les méthodes de contrôle et de réduction du gauchissement, y sont également abordés.

- La deuxième partie est consacrée à l'origine du gauchissement ainsi qu'aux techniques expérimentales pour le mesurer. Une attention particulière a été accordée à la présentation du modèle analytique et numérique permettant d'estimer le gauchissement. Enfin, la difficulté de modéliser les plaquettes le rôle simplificateur de la méthode d'homogénéisation sont également abordés.
- La troisième partie couvre l'essentiel du travail numérique, qui constitue l'objet de cette thèse. Les différentes approches simplificatrices ont été présentées. Les effets de l'épaisseur du Pt, du type de chargement.
- La quatrième partie est dédiée à la présentation et à la validation des résultats numériques. Dans un premier temps, les résultats concernant l'effet de la couche de métallisation sont exposés. Ensuite, les résultats liés à l'application de la dernière étape du cycle thermique sont présentés et discutés. Enfin, les résultats obtenus après l'introduction du détournage sont également analysés. Des comparaisons quantitative et qualitative ont été menées pour évaluer l'impact d'un certain nombre de paramètres sur le gauchissement de la plaquette.

En conclusion, ce manuscrit synthétise les principaux résultats obtenus. Les méthodes employées dans cette étude visent à proposer aux industriels dans le secteur de la microélectronique des outils simples et efficace permettant de prédire les problèmes de déformation des plaquettes et de proposer des solutions visant à améliorer le processus de fabrication.

Chapitre I : Généralité sur la microélectronique

I.1. Introduction

L'électronique a révolutionné notre monde depuis l'invention du premier circuit intégré en 1958. En raison de la demande croissante de dispositifs électroniques de plus en plus performants et miniaturisés, les industriels utilisent des techniques innovantes, passant de l'électronique à la microélectronique. L'une de ces techniques est l'intégration 3D, qui permet d'empiler plusieurs couches de films minces sur un substrat. Cette technique augmente le taux d'intégration des composants microélectroniques par circuit intégré. La fabrication des microcomposants se fait en série, avec la production simultanée d'un très grand nombre de composants. Ces microcomposants sont fabriqués sur un support sous forme de plaquettes de silicium, qui sont par la suite découpées pour en extraire les composants élémentaires.

L'empilement de couches minces de matériaux différents et l'exposition du multicouche résultant aux variations de température liées au procédé de fabrication provoquent des contraintes résiduelles et des déformations de type « gauchissement ». Ces contraintes résiduelles, composées de contraintes intrinsèques et de contraintes thermiques, peuvent entraver le bon fonctionnement des microcomposants électroniques. Le contrôle de ces contraintes est essentiel pour éviter les déformations excessives au niveau des empilements. Il est crucial de combiner les moyens de caractérisation intégrés à la fabrication avec des outils analytiques et numériques permettant de prédire l'état de contraintes générées lors du procédé de fabrication. L'identification des paramètres influençant la répartition et l'amplitude des contraintes permet d'optimiser les processus de fabrication et de réduire les pertes, ce qui garantit ainsi des produits fiables et performants.

Dans cette partie de la thèse, un aperçu général de l'évolution de l'électronique vers la microélectronique est présenté. Le procédé typique de fabrication de microcomposants est illustré par des schémas explicatifs simples. L'origine des contraintes résiduelles et des déformations des plaquettes de silicium utilisées pour la fabrication des microcomposants est détaillée. Des techniques innovatrices visant à réduire l'amplitude de ces contraintes et déformations problématiques sont exposées à la fin de ce chapitre.

I.2. De l'électronique à la microélectronique.

Vers la fin du 20ème siècle, le monde commence à utiliser les propriétés des semi-conducteurs tels que la galène et le sélénium. En 1904 l'électronique démarre véritablement par l'invention de la diode à vide, au fil du temps l'électronique a vu une révolution et le monde a découvert le potentiel qu'elle renferme. Le premier circuit imprimé a été inventé en 1958. Il s'agit de l'intégration de plusieurs composants électronique dans un seul support. Cette invention a permis de lancer une croissance fulgurante de l'intégration. En 1971 le premier microprocesseur (4004) a été lancé par Intel. L'ère de la microélectronique est lancée. Le développement des microprocesseurs a révolutionné l'industrie des ordinateurs, de l'automobile et de l'aérospatiale [1]. La figure 1 illustre l'évolution de l'électronique de tubes à vides aux microprocesseurs de dernières générations.

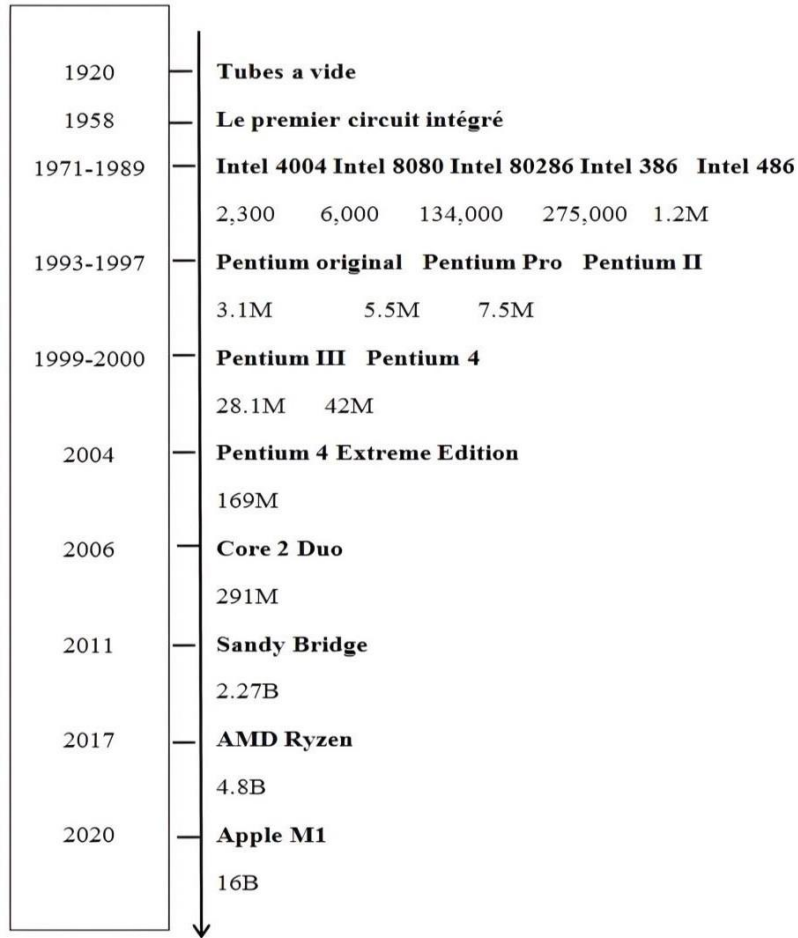


Figure 1. Un siècle d'électronique.

I.3. Evolution de la microélectronique

En 1965, Gordon Moore a prédit que, tous les deux ans, le nombre de transistors présents dans les processeurs doublerait [2]. La figure 2 représente l'évolution du nombre de transistors en fonction des années. La pression exercée par les consommateurs, qui ont tendance à exiger des améliorations de chaque nouvelle génération de produits sortie, pousse les industriels à repousser les limites de la loi de Moore en augmentant la fonctionnalité des puces (microcomposants) tout en réduisant leur taille [3].

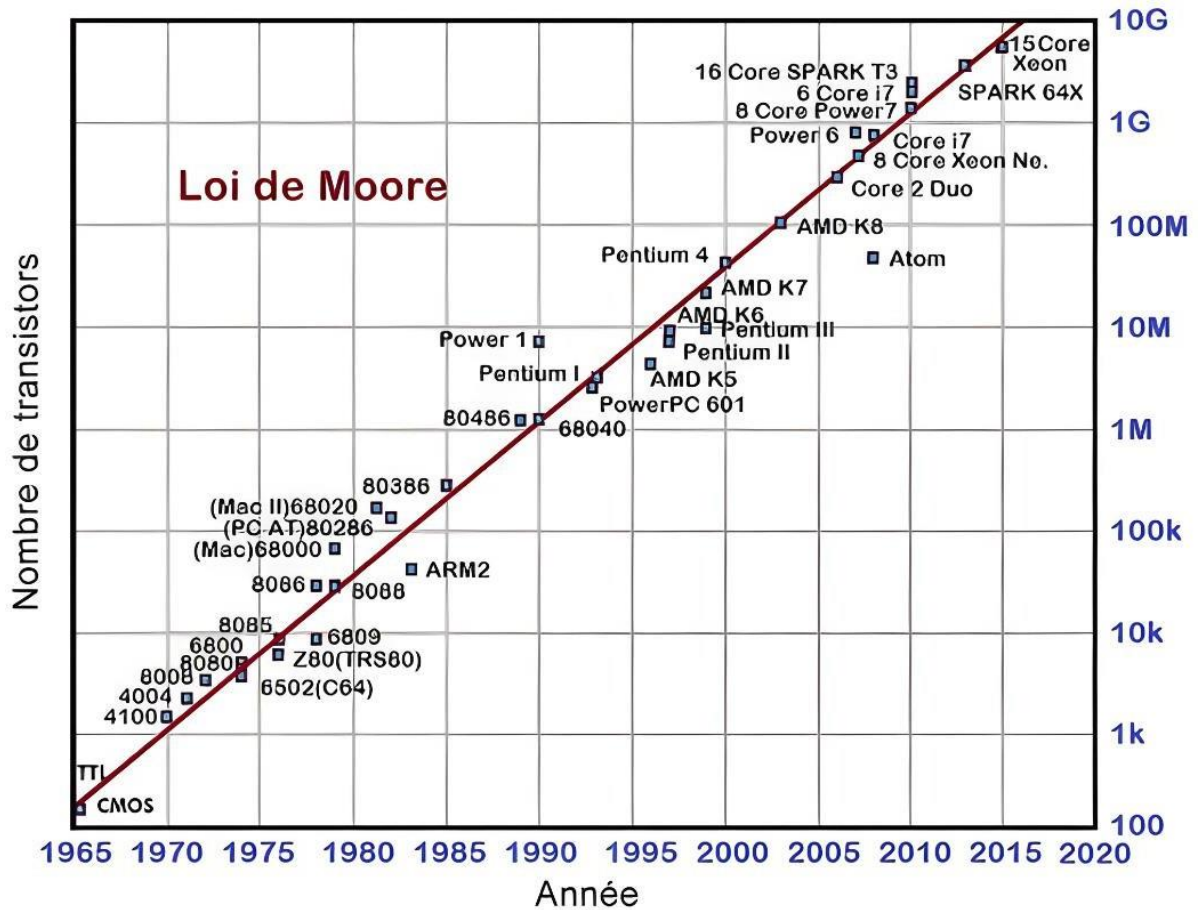


Figure 2. Evolution du nombre de transistors par circuit [4].

Ces dernières années, la miniaturisation des composants électronique est passée de l'échelle micro à l'échelle nanométrique ce qui rend leur développement de plus en plus difficile et s'accompagne d'une augmentation drastique des coûts de développement, comme le montre la figure 3. Des composants de plus en plus petits, intégrant davantage de fonctionnalités sont développés en dépassant la prédiction de Moore pour entrer dans l'ère du « plus que Moore, More Than Moore » comme l'illustre la figure 4.

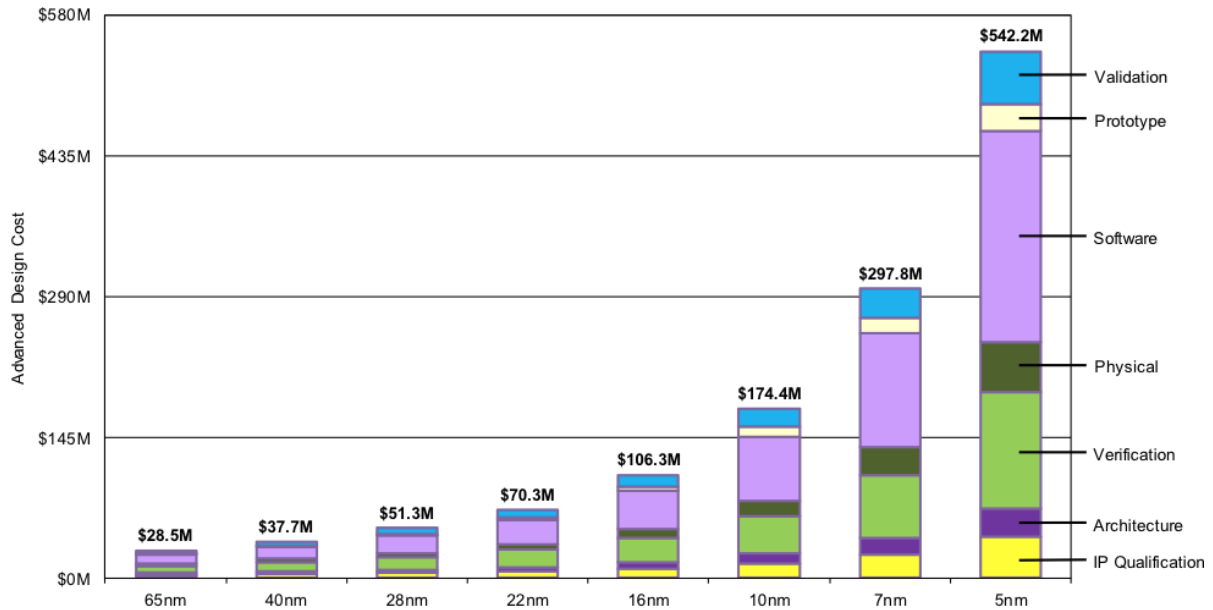


Figure 3. Croissance du coût de développement liée à la taille de microcomposants [5].

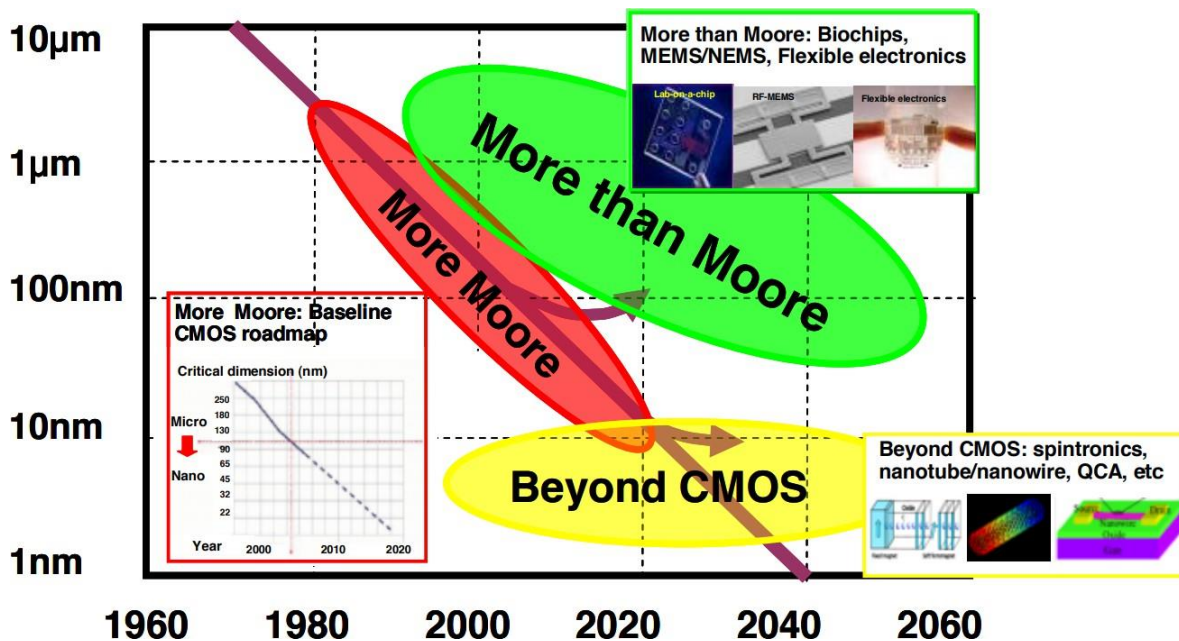


Figure 4. Feuille de route de mise à l'échelle pour circuit intégré [6].

I.4. Technique de fabrication des microcomposants électronique

La production de microcomposants implique l'utilisation de plaquettes de silicium (principalement) qui ont le plus souvent des diamètres de 150 mm et 300 mm et une épaisseur de 750µm. Ces disques de silicium subissent plusieurs opérations de dépôt de couches minces et de gravure pour former un empilement de couches minces possédant des caractéristiques électroniques requis. Les plaquettes, comportant plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de microcomposants, sont soumises à plusieurs traitements qui se déroulent en deux

étapes principales: le front-end (opérations effectuées sur les plaquettes) et le back-end (étapes ultérieures). Une fois ces étapes sont terminées, la plaquette de silicium, qui porte l'ensemble des couches minces, est découpée en microcomposants élémentaires et chacun d'entre eux est monté dans un boîtier (processus d'encapsulation), comme indiqué sur la Figure 5.

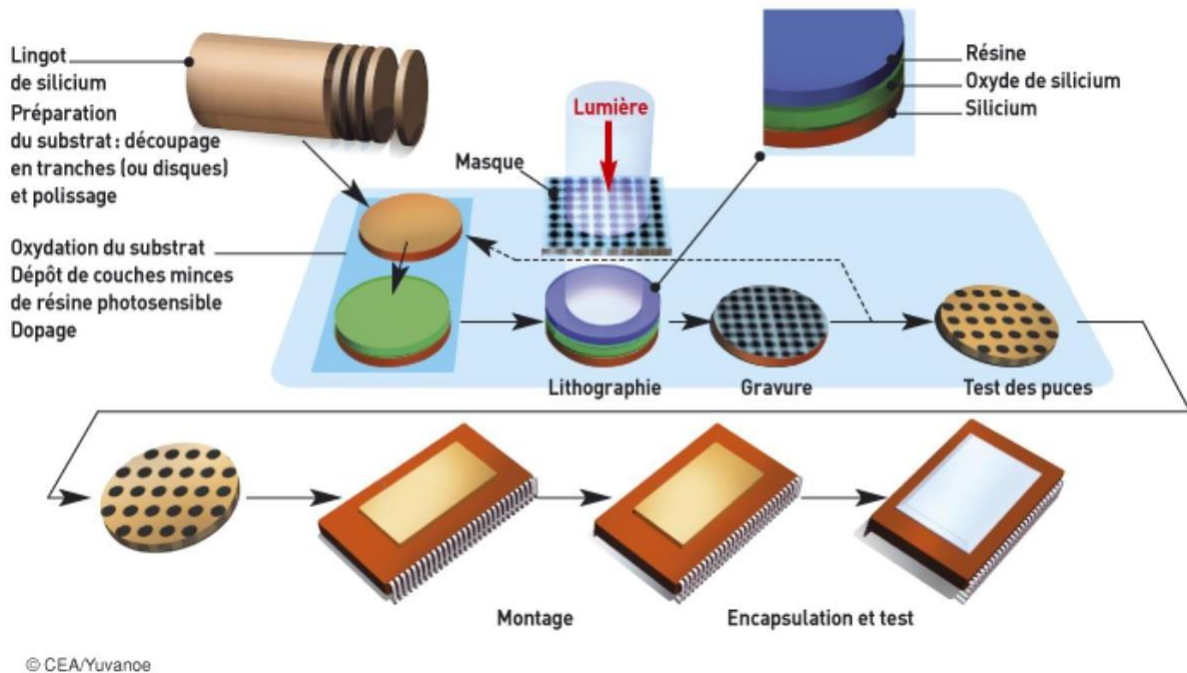


Figure 5. Les étapes élémentaires de la fabrication des microcomposants électronique[7].

I.4.1. Le front end regroupe l'ensemble des opérations suivantes :

Dépôt : cette opération permet de déposer les couches minces constituant l'empilement par un procédé physique ou chimique en phase liquide ou gazeuse.

Les techniques du dépôt couramment utilisées sont :

CVD (chemical vapor deposition) dépôt chimique en phase vapeur: cette méthode consiste à déposer les couches minces par réaction chimique selon les étapes suivantes:

Introduction des précurseurs : les gaz précurseurs contenant les éléments constitutifs de la couche mince sont introduits dans la chambre de réaction.

Réaction chimique : les précurseurs subissent une réaction chimique en phase gazeuse, activée par chauffage du substrat.

Croissance de la couche mince : les espèces réactives se déposent à la surface du substrat et forment une couche mince continue. L'épaisseur peut être contrôlée en ajustant la durée de la réaction chimique.

Refroidissement et retrait des gaz résiduels : les gaz résiduels sont évacués de la chambre de réaction et le substrat est refroidi.

La technique de dépôt par CVD est couramment utilisée pour déposer des couches minces de composés métalliques, qu'ils soient amorphes ou cristallins, avec différentes stœchiométries [8].

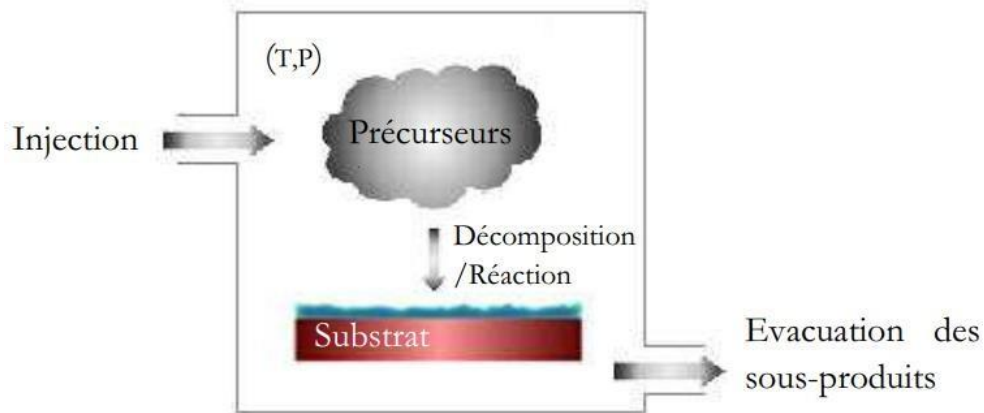


Figure 6. Principe du dépôt chimique par voie vapeur[9].

PVD (physical vapor deposition) dépôt physique en phase vapeur: cette technique consiste à détacher des atomes d'une cible et à les déposer sur un substrat par physisorption comme le montre la figure 7. Les techniques les plus utilisées sont l'évaporation sous vide et la pulvérisation cathodique[9].

L'évaporation sous vide consiste à chauffer la cible par un puissant faisceau d'électrons à haute énergie ou par l'effet Joule d'un filament à basse pression et haute température pour condenser les atomes sur le substrat. Pour la pulvérisation cathodique, des ions d'argon sont accélérés par un champ électrique pour générer un plasma d'ions et d'électrons [8].

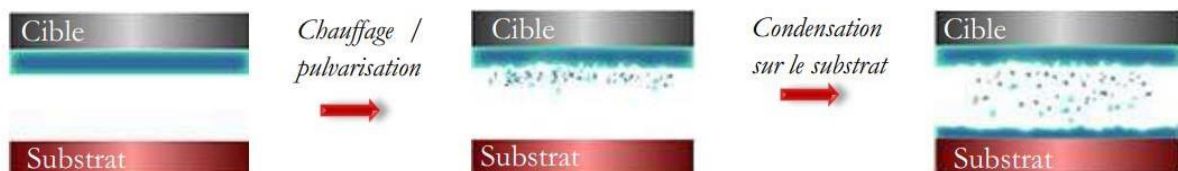


Figure 7. Principe du dépôt physique par voie vapeur[9].

Sol-Gel (solution-gélification) : ce procédé se base sur des précurseurs en phase liquide qui se transforment en phase solide par une réaction chimique, généralement à température ambiante. Cette technique permet d'élaborer une grande variété d'oxydes sous différentes configurations[10].

Il existe deux voies de synthèse de Sol-Gel qui sont:

Voie inorganique ou colloïdale : obtenue à partir de sels métalliques, cette voie est moins chère mais peu utilisée car elle est difficile à contrôler. Cette technique est privilégiée pour obtenir des matériaux céramiques[11].

Voie métallo-organique ou polymérique : obtenue à partir d'alcoxydes métalliques dans des solutions organiques. Cette voie est plus coûteuse mais facile à manipuler [11].



Figure 8. Le procédé de Sol-Gel[11].

Photolithographie : permet, à travers plusieurs opérations, de transférer sur un substrat l'image d'un circuit [12].

Gravure : le but de cette étape est d'enlever du matériau. Il existe deux types de gravures : la gravure sèche qui utilise des réactifs gazeux et la gravure humide qui emploie des réactifs liquides. Elles sont soit isotropes (elle se produit de manière équivalente ou presque dans toutes les directions) ou anisotrope (elle se produit dans des directions bien définies)[13].

Traitement thermique : cette étape consiste à mettre l'empilement dans un four à une température donnée pour une période définie. Les traitements thermiques permettent de relaxer les contraintes induites lors des différentes phases d'élaboration.

Polissage : il permet d'amincir le substrat et de relaxer la contrainte introduit par les procédés précédents.

Implant : implanter des ions dans le silicium pour contrôler sa conductivité.

Test électrique : cette étape consiste à effectuer des tests électriques sur les composants.

I.4.2. Le back-end regroupe les étapes suivantes :

Amincissement : cette étape sert à réduire l'épaisseur de la plaquette en utilisant le meulage mécanique, le polissage chimico-mécanique(CMP), ou gravure chimique.

Découpe : découper les microcomposants de la plaquette par une scie circulaire diamantée ou au laser.

Assemblage : monter les composants sur d'autres supports (circuit imprimé, etc....).

Encapsulation : dans cette étape le microcomposant est encapsulé par une résine qui assure sa protection contre les agressions de l'environnement du fonctionnement.

I.5. Les plaquettes de silicium comme substrat

Les plaquettes de silicium sont utilisées depuis des décennies dans l'industrie des dispositifs microélectroniques en raison de leurs propriétés idéales, notamment leur haute pureté ; leur point de fusion élevé et leur excellente conductivité thermique. De plus, elles forment une couche d'oxyde stable lorsqu'elles sont exposées à l'air ou à d'autres agents oxydants, ce qui les protège contre la contamination ou les dommages pendant la fabrication.

Les plaquettes de silicium utilisées comme substrat sont généralement fabriquées selon le procédé connu sous le nom de méthode de Czochralski [14]. Cette méthode consiste à faire croître un monocristal de silicium à l'aide d'un bain de silicium fondu. Le cristal obtenu passe ensuite par un processus de polissage et de lissage pour obtenir un degré de planéité élevé avant de passer aux étapes suivantes de dépôt de couches minces pour créer le microcomposant souhaité. La figure 9 montre une plaquette de silicium sur laquelle sont réalisés des milliers de microcomposants électroniques.

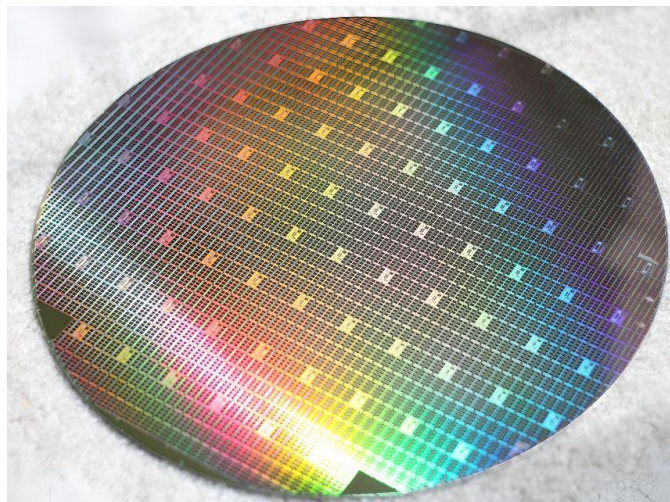


Figure 9. Plaquette de silicium comportant des milliers de microcomposants[15].

Selon la technique d'élaboration, la structure de silicium utilisé dans l'industrie microélectronique peut avoir différentes formes [16]:

- La forme monocristalline.
- La forme amorphe.
- La forme polycristalline.

I.5.1. Le silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est l'un des matériaux les plus utilisés dans la fabrication des microcomposants grâce à sa compatibilité avec les équipements de fabrication [17]. Il présente une pureté importante due à l'arrangement de ses atomes selon la structure diamant [18]. Il est constitué de deux réseaux cubiques à faces centrées avec une distance interatomique de $d=2,35 \text{ \AA}$ (Angstrom) et une liaison covalente entre les atomes.

La figure 10 montre le réseau du silicium qui peut être considéré comme un seul réseau cubique à faces centrées dont la maille élémentaire contient deux atomes de silicium : un atome situé aux nœuds du réseau, l'autre se trouvant dans la direction $\langle 111 \rangle$ et à une distance d'un quart de la diagonale principale du premier atome. Les sites en bleu correspondent à un des deux réseaux cubique a faces centrées qui s'interpénètrent l'un par rapport à l'autre, les quatre voisins les plus proches de chaque point forment les sommets d'un tétraèdre régulier [19]. Le silicium monocristallin est élaboré par le procédé de fusion des zone ou par le procédé de Czochoralski[14] pour obtenir des lingots qui sont ensuite découpés en plaquettes.

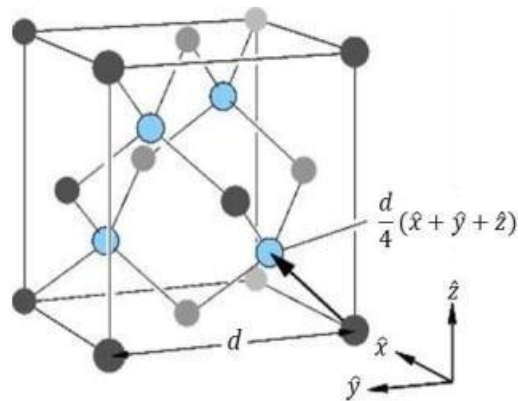


Figure 10. Maille conventionnelle d'une structure diamant [18].

Le silicium monocristallin étant un matériau anisotrope dont ces propriétés élastiques dépendent de l'orientation des directions atomiques. Pour déterminer les propriétés du silicium, il faut tout d'abord connaître l'orientation des cristaux qui sont décrits par les indices de Miller (hkl) correspond à un system de cordonnées (xyz) . Le réseau cristallin du silicium possède une symétrie cubique, ce qui signifie que toutes les directions et tous les plans qui sont tournés de 90 degrés les uns par rapport aux autres sont équivalents. Cette propriété est représentée dans les figures 11 et 12, où chaque flèche ou plan est identique à tous les autres qui sont également tournés de 90 degrés par rapport à eux [17].

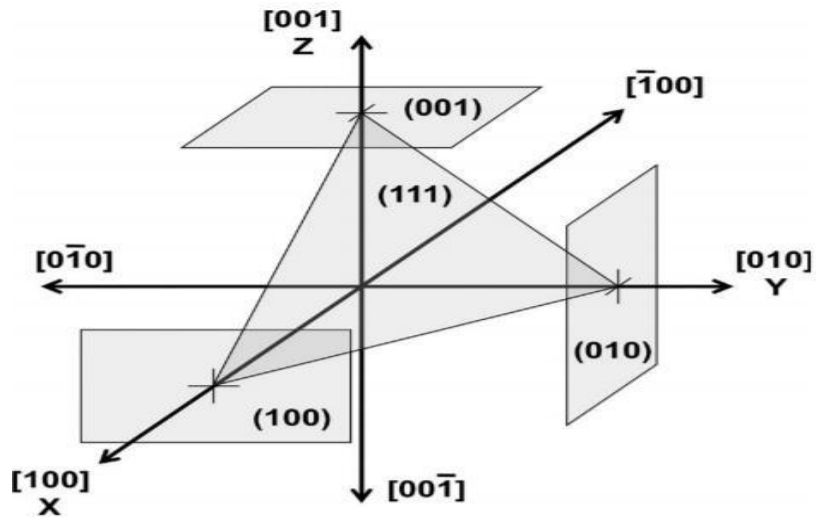


Figure 11. Les indices de Miller dans un cristal cubique. Par convention, les directions $[100]$, $[010]$ et $[001]$ sont les axes cartésiens $XY Z$ [17]

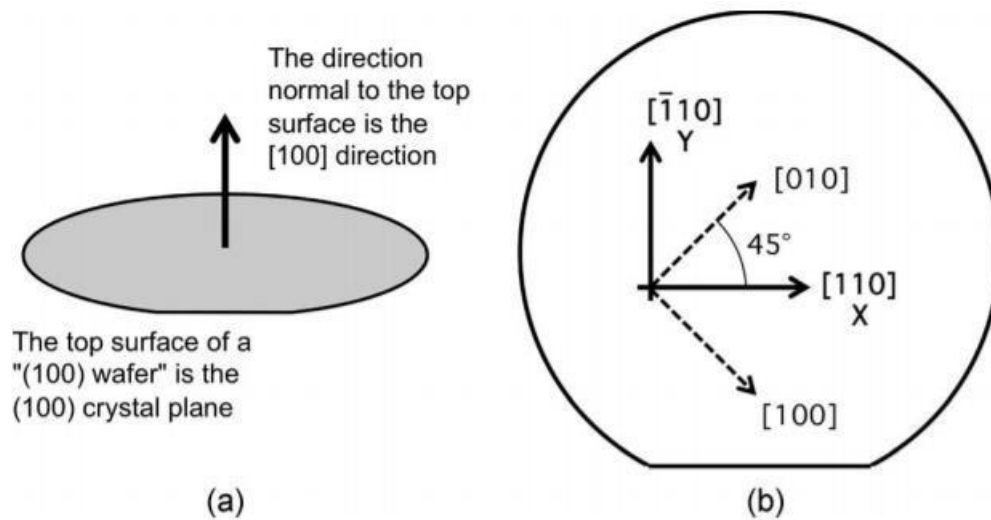


Figure 12. Orientation des cristaux dans des plaquettes de silicium de 100 mm de diamètre. Les axes X et Y naturels sont dans les 110 directions. (a) Orientation d'une plaquette de 100. (b) Directions et axes dans une plaquette de 100 [17].

I.5.2. Le silicium amorphe

Ce type de silicium se caractérise par une structure irrégulière de ses atomes. La distance inter atomique est de l'ordre de 2,35 Å d'après [20] et [21]. Quelques distorsions apparaissent dans le réseau. L'évolution de ces distorsions influence la formation des liaisons pendantes.

Les propriétés du silicium varient en fonction du désordre ce qui donne au silicium des propriétés électroniques différentes dépendent du processus de fabrication [22].

I.5.3. Le silicium polycristallin ou polysilicium

Ce type de silicium est intermédiaire entre le silicium monocristallin et le silicium

amorphe. Il est constitué de grains avec une taille qui varie de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres. Les grains sont séparés par des joints de grains qui sont des zones désordonnées et pleines de défauts. Le désordre induit par ces derniers provoque des distributions d'états électroniques semblables à celles du silicium amorphe.

Le polysilicium présente une pureté réduite par rapport au silicium monocristallin en raison des impuretés tel que le carbone, l'oxygène, qui s'intègrent pendant la phase d'élaboration. D'autres impuretés peuvent apparaître pendant les opérations de dopage.

I.6. Les empilements de couches minces sur les substrats

Les microcomposants électroniques sont constitués d'un substrat sur lequel sont déposés des couches minces conductrices, semi-conductrices et diélectriques. Les films minces dans la microélectronique doivent satisfaire un grand nombre d'exigences chimiques, structurales, mécaniques et électriques. Une excellente adhérence, une faible contrainte résiduelle, une bonne résistance mécanique et une résistance chimique peuvent être requises simultanément [23].

Les couches minces sont des couches de matériaux dont l'épaisseur qui varie de quelques nanomètres jusqu'à quelques micromètres. Elles sont déposées sur un substrat, (le silicium pour la présente étude) par les différentes techniques du dépôt.

Les empilements de couches minces permettent de créer des structures complexes avec des matériaux de propriétés différentes comme l'illustre la figure 13.

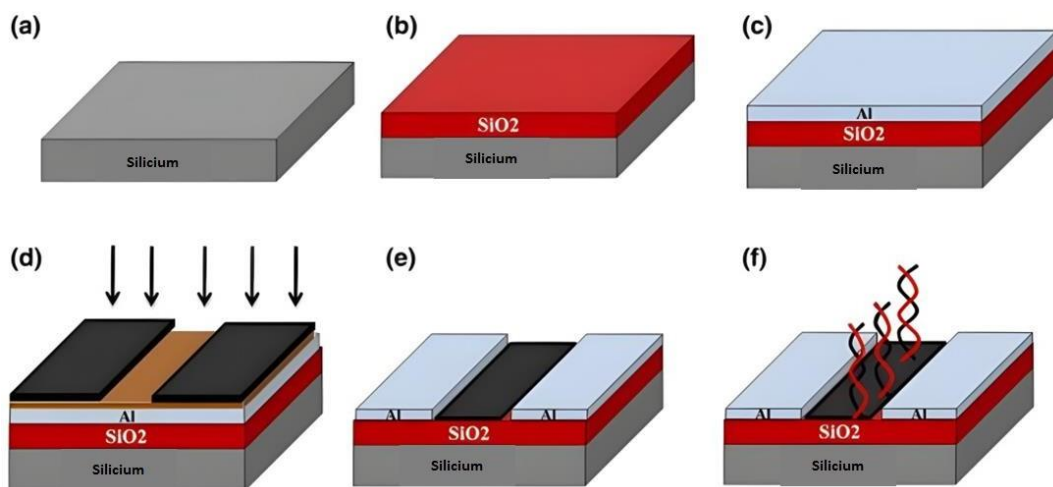


Figure 13. Les différentes étapes du dépôt de couches minces [24].

I.6.1. Les couches minces conductrices

Les couches conductrices sont élaborées à partir de matériaux de grande conductivité électrique et sont essentiellement utilisées pour le transfert de signaux électroniques. Les conducteurs

en général sont les métaux et les alliages métalliques dont les plus utilisés sont le cuivre, le platine, l'étain, l'or, le graphite, l'aluminium etc....

I.6.2. Les couches minces semi-conductrices

Constituées de matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants, ces couches minces sont mises en contact afin de créer des jonctions permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui [traverse](#) l'ensemble. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement grâce à ses propriétés et à sa surabondance naturelle[25]. Il existe d'autres semi-conducteurs utilisés tels que le [germanium](#), l'arséniure de [gallium](#) ou le [carbure de silicium](#).

I.6.3. Les couches minces diélectriques ou isolantes

Un diélectrique, aussi appelé isolant, est un matériau dont la fonction est d'interdire le passage du courant électrique entre deux parties conductrices. Les couches diélectriques utilisées dans la fabrication des microcomposants électroniques sont élaborées à partir des oxydes comme par exemple ; SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, etc.

I.7. Les problèmes mécaniques rencontrés lors de l'élaboration des microcomposants électroniques.

L'élaboration des microcomposants électroniques par le dépôt successif de couches minces engendre des contraintes résiduelles dont les origines peuvent être thermiques et/ou intrinsèques.

I.7.1. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes mécaniques présentes au sein du matériau à la température ambiante sans aucun chargement externe. Elles sont définies comme étant la somme des contraintes intrinsèques et des contraintes thermiques.

$$\sigma_{\text{résiduelle}} = \sigma_{\text{intrinsèque}} + \sigma_{\text{thermique}} \quad (1)$$

I.7.2. Contraintes intrinsèques

Les contraintes intrinsèques se génèrent lors du dépôt des couches minces. Elles dépendent des conditions de dépôt comme la vitesse de dépôt, la température et la pression. Par exemple en PECVD (Dépôt en phase vapeur assisté par plasma) une contrainte en flexion se manifeste sur l'empilement lorsque les produits de réaction ne sont pas évacués correctement durant le processus de croissance des couches déposées [26]. En plus des contraintes induites lors du dépôt, des contraintes se génèrent après le dépôt dû aux réorganisations des atomes qui causent un changement de volume des couches déposées comme par exemple dans le cas d'une épitaxie.

I.7.3. Contraintes thermiques

Ces contraintes apparaissent après le dépôt des couches minces. Elles sont le résultat des différences de propriétés mécaniques entre les matériaux des couches déposées, notamment les coefficients de dilatations thermiques, et le chargement thermique appliqué lors de l'opération de dépôt. Pour un film mince élastique isotrope déposé sur un substrat, la contrainte thermique s'écrit de la manière suivante :

$$\sigma_{th} = \frac{E_f}{1 - \nu_f} \int_{T_0}^T [\alpha_s(T) - \alpha_f(T)] dT \quad (2)$$

Où : α_s (en °K-1) et α_f (en °K-1) sont respectivement les coefficients de dilatation thermiques du substrat et du film ; E_f (en MPa) et ν_f sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du film; T (en °K) la température de dépôt et T_0 (en °K) la température de référence. Si le niveau des contraintes résiduelles dépasse une certaine valeur limite, des déformations dans l'empilement apparaissent. La figure 14 montre un film mince déposé sur un substrat soumis à une déformation due à un chargement thermique imposé.

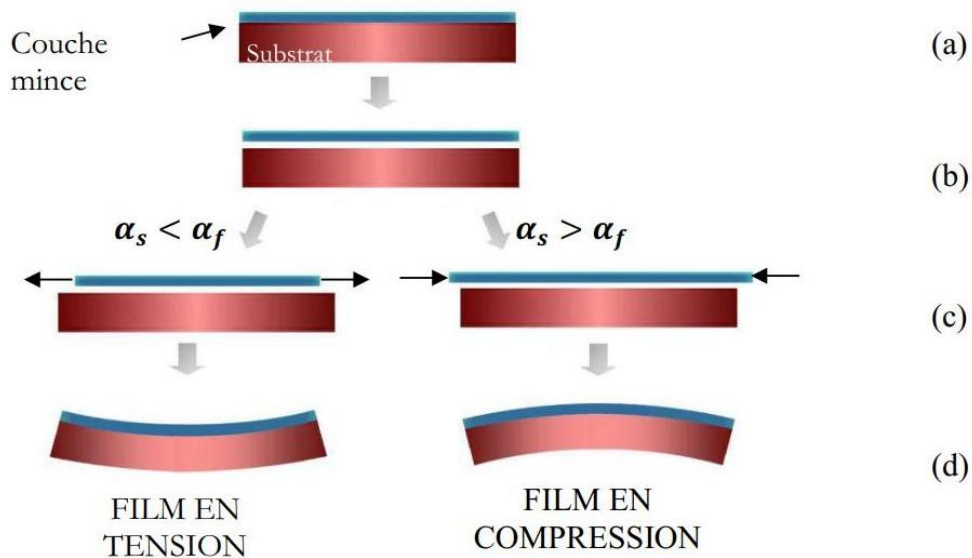


Figure 14. Origines des contraintes thermiques dans un film mince refroidi[27].

On distingue les cas suivants :

- Le film est non contraint à température de dépôt de la couche mince.
- Si le film est libéré du substrat, ses dimensions longitudinales sont identiques.
- Dans son état réel lié au substrat, le film s'étire ou se comprime lors de la descente en température.

- La contrainte résultante génère une courbure du système (gauchissement) {substrat + couche mince}.

La déformation thermique de l'empilement est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon_{th} = \int_{T_0}^T (\alpha_s(T) - \alpha_f(T)) dT \quad (3)$$

Pour des raisons de fiabilité, ces contraintes doivent être évaluées afin d'éviter toute défaillance imprévue et de contrôler le niveau du gauchissement.

I.8. Contrôle du niveau des contraintes et des déformations résiduelles des plaquettes de silicium.

Dans l'industrie microélectronique, le contrôle des contraintes induites et des gauchissements résultants est un indispensable. En effet, un gauchissement trop important peut affecter les performances des microcomposants, réduire leur durées de vie, diminuer la fiabilité et impacter négativement la qualité. De plus, les microcomposants comportent des matériaux coûteux tels que le silicium pur ou l'or ce qui participe à l'augmentation des couts liés aux pertes par gauchissement.

Un contrôle rigoureux doit se faire à la fin de chaque phase de fabrication pour éviter les imperfections, approuver la qualité et gagner en compétitivité. Le tableau 1 illustre les déférentes phases de contrôle des plaquettes de silicium :

Étape du Processus	Attribut Mesuré	Système de Métrologie Utilisé
Fabrication de Si	Résistivité	Sonde à 4 points, courants de Foucault.
Inspection des plaquettes entrantes	Planéité Défauts :(particules, micro-rayures, défauts cristallins, trouble	Testeur de planéité. Système d'inspection des défauts.
Épitaxie de Si	Résistivité d'Épaisseur	Sonde à 4 points, courants de Foucault FTIR.
Dépôt de Conducteur (PVD, MOCVD)	Résistivité Contamination par particules	Sonde à 4 points, courants de Foucault. Système d'inspection des défauts.
Dépôt de Diélectrique (CVD)	Épaisseur, RI Contrainte Contamination par particules Constante diélectrique	Réfectomètre, ellipsomètre. Jauge de contrainte. Système d'inspection des défauts. Testeur C-V.

Procédés de Dopage (implant ionique, diffusion)	Uniformité Profil de profondeur	Sonde à 4 points, onde thermique, FTIR, SIMS, SRP.
Planarisation	Taux et uniformité d'enlèvement Planéité locale/globale Particules de boue Micro-rayures	Réfectomètre. Profilomètre de surface (haute résolution). Système d'inspection des défauts.
Gravure	Taux et uniformité d'enlèvement Sélectivité de gravure Profil de gravure Défauts de motif Contamination par particules	Réfectomètre. Réfectomètre. SEM, AFM. Système d'inspection des défauts.
Lithographie	Dimension critique Superposition Défauts de motif Contamination par particules	SEM. Outil de superposition optique. Système d'inspection des défauts.
Surveillance du rendement	corrélation de la métrologie et résultats d'inspection pour produire le système	gestion des données à l'échelle de l'usine.

Tableau 1. Les techniques de contrôle des plaquettes de silicium adaptées à chaque étape du processus de fabrication[28].

I.9. Techniques de réduction du niveau de gauchissement.

Le gauchissement de l'empilement de couches minces est un facteur critique qui a un impact direct sur la qualité des microcomposants. Ce phénomène se produit généralement pendant le processus de fabrication et peut affecter négativement la précision et la fiabilité des dispositifs électroniques.

Il existe plusieurs méthodes pour réduire le niveau de gauchissement des plaquettes, telles que :

I.9.1. Le détournage

Cette méthode consiste à enlever une partie de la zone qui a tendance de gauchir du l'empilement pour réduire le gauchissement et les endommagements de la plaquette liés au procédé de fabrication. (Figure 15).

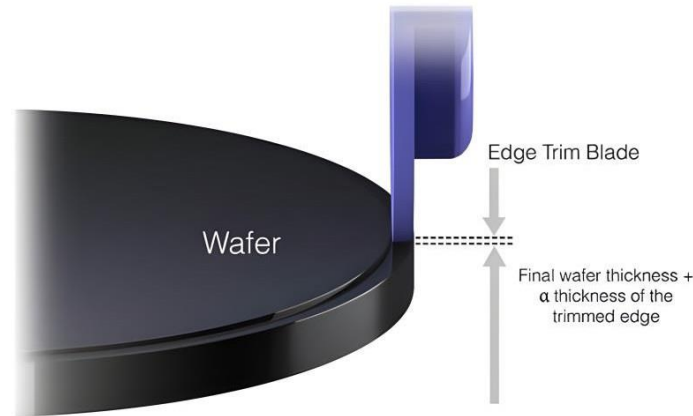


Figure 15. Le procédé du détourage (edge trimming)[29].

Le détourage des bords est traditionnellement effectué pour éviter l'écaillage des bords. Cette technique a été utilisée par K. Yamamoto et al, pour réduire le gauchissement d'une plaquette de verre revêtu de couches minces. Le détourage peut contribuer à la réduction de la déflexion de la plaquette comme l'attestent les mesures présentées dans la figure 16 [30].

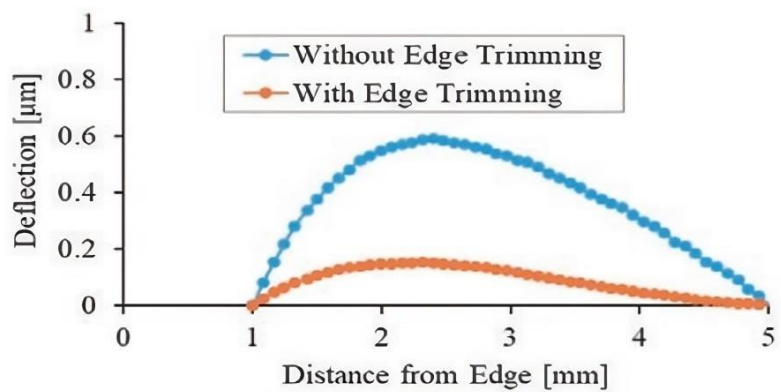


Figure 16. La déflexion de la surface de la plaquette de verre dans une plage de 1 mm à 5 mm du bord [30].

Le détourage peut être associé à d'autres techniques comme par exemple la technique de plaquette porteuse pré-amincie, l'emploi d'une grande plaquette porteuse, et la modification du bord du matériau [31].

I.9.2. Utilisation des couches tampons

Dans cette approche, les industriels utilisent des couches de matériaux intermédiaires pour réduire le gauchissement de l'empilement causé par les différences de propriétés des matériaux constitutifs. Ils bénéficient ainsi de leurs propriétés adaptées pour équilibrer les contraintes et réduire le gauchissement. L'utilisation de ces couches tampons améliore également l'adhérence entre les différentes couches de l'empilement, permettant ainsi une

répartition équitable des contraintes sur la surface. De plus, elle favorise une croissance cristalline régulière lors du dépôt de couches épitaxiales sur la plaquette.

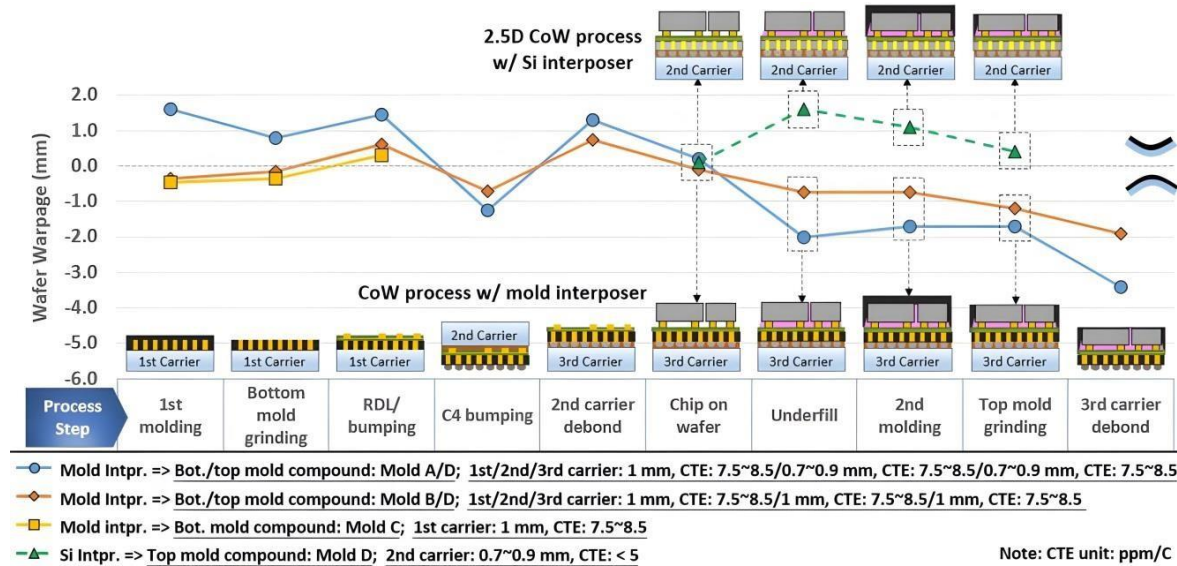


Figure 17. Tendence de la déformation des plaquettes lors de l'utilisation d'un interposeur en silicium (2,5D) et d'un interposeur en moulage (processus C4 en premier)"[32].

La déformation côté avant d'une plaquette de 300 mm a été réduite de 230 μm à 105 μm par la mise en œuvre d'un des quatre matériaux de passivation sur le véhicule d'essai de l'interposeur en cuivre. Le gauchissement de l'interposeur d'une épaisseur de 200 μm a été réduit de 50 μm avec la technologie côté avant et de 15 μm avec la technologie côté arrière[33].

Le dépôt d'une couche de silice contrôlé avec une épaisseur nominale de 7,5 μm a été utilisée pour corriger la déformation résultant d'un revêtement hautement réfléchissant d'une épaisseur de 3,3 μm . Le gauchissement d'un substrat en silice fondue de 100 mm de diamètre et 3 mm d'épaisseur a été réduit d'environ 90% grâce au dépôt d'une couche de compensation en silice[34].

I.9.3. Traitement thermique

Les traitements thermiques de type recuit sont largement utilisés pour relaxer les contraintes résiduelles et diminuer les gauchissements des plaquettes de silicium.

Barrera et al [35] ont procédé à une étude de l'effet de la température et du temps de recuit sur le gauchissement des plaquettes de silicium. Ils ont démontré que l'approche numérique peut être utilisée pour optimiser les paramètres du traitement thermique visant à relaxer les contraintes de réduire les gauchissements. Une réduction de 50% de la valeur du gauchissement a pu être observée en ajustant un certain nombre de paramètres comme la température, le temps et le gaz utilisé dans le four.

L'introduction de nouveaux matériaux dans la fabrication des microcomposants peut entraîner des déformations. Le tungstène de ligne source commune (CSL W) est fréquemment utilisé dans la fabrication de semi-conducteurs pour les interconnexions des circuits intégrés. La déformation d'une plaquette de silicium revêtue d'un film CSL W est directement

Influencée par les conditions de recuit appliquées après le dépôt. L'ampleur de la déformation diminue de manière exponentielle avec l'augmentation de la température de recuit. De plus, à mesure que la durée du recuit s'allonge, la déformation décroît de manière linéaire. Par conséquent, la technique de recuit par pointe avec un faible budget thermique est proposée pour obtenir une réduction souhaitée de la déformation, pourvu que la température de recuit soit appropriée [36].

I.9.4. Utilisation des matériaux appropriés

L'utilisation des matériaux avec une faible différence de coefficients de dilatation thermiques dans la fabrication de l'empilement permet de diminuer considérablement les déformations et les gauchissements des plaquettes.

Le polyimide aliphatique terminé par maléimide présente des avantages clés en termes de traitement et de performances par rapport aux matériaux conventionnels de revêtement de plaquettes, tout en conservant la stabilité thermique élevée et l'excellente résistance chimique des matériaux classiques. Il constitue une alternative idéale aux matériaux diélectriques conventionnels pour résoudre à la fois les problèmes de déformation des plaquettes et les fissures lors des cycles de température de la liaison de distribution (RDL)[37].

I.10. Objectif de la thèse.

La recherche bibliographique présentée dans ce chapitre permet de situer ce travail dans le domaine de la fabrication de la microélectronique.

En raison de la diversité des procédés utilisés et des matériaux déposés en couches minces, plusieurs enjeux mécaniques doivent être pris en compte lors de la fabrication des composants microélectroniques.

Dans ce travail nous focalisons sur la réduction du gauchissement de l'empilement en utilisant des modifications géométriques et adoptant une approche numérique simplificatrice allant d'une méthode d'homogénéisation en considérant uniquement la dernière étape du cycle thermique imposé. La détermination de l'origine des gauchissements et les simulations par éléments finis ainsi les approches numériques utilisées seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre II : Quantification du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

II.1. Introduction.

La maîtrise des gauchissements qui peuvent survenir lors de la fabrication des empilements de couches minces est l'une des préoccupations principales des industriels. Dans ce chapitre, nous nous penchons sur les différentes techniques utilisées pour évaluer le gauchissement de ces empilements.

Dans un premier temps, nous présentons les origines des gauchissements en mettant l'accent sur les contraintes intrinsèques, les contraintes thermiques et les contraintes résiduelles qui sont responsables des déformations des plaquettes de silicium revêtues de couches minces. Ces contraintes résultent de l'accumulation des multiples sollicitations liées à des gradients de température, à des contraintes mécaniques ou d'autres influences.

Dans un second temps, nous donnons un résumé d'une recherche bibliographique sur les techniques expérimentales utilisées pour mesurer le gauchissement des empilements de couches minces. Ainsi, les techniques utilisant la diffraction des rayons X, la réflectométrie optique, la profilométrie mécanique et la projection de moiré sont présentées.

Ensuite, nous donnons un aperçu des modèles analytiques permettant d'évaluer les déformations de type « gauchissement » des plaquettes de silicium.

Enfin, nous consacrons une partie de ce chapitre à présenter une illustration des différentes approches numériques utilisées pour évaluer le gauchissement des empilements de couches minces. Cela inclut l'analyse numérique par éléments finis, qui permet de modéliser le comportement mécanique des empilements, ainsi que l'homogénéisation, qui simplifie la représentation du comportement global de la microstructure modélisée.

Il est important de noter que chacune de ces approches, qu'elle soit expérimentale, analytique ou numérique, présente des avantages et des limites. Une compréhension approfondie de ces techniques et de leurs limites contribuera à une estimation précise des gauchissements.

II.2. Origine des gauchissements

Comme décrit dans le premier chapitre, des contraintes de natures différentes apparaissent lors de l'intégration des couches minces. Ces contraintes souvent importantes et dépassant les limites élastiques des matériaux constituant les empilements, provoquent des déformations de type gauchissements. La déformation totale comprend une déformation élastique, une déformation intrinsèque ainsi qu'une déformation thermique [38],[39],[40],[41],[42]

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{int} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{el} \quad (1)$$

Avec :

ε_{tot} : Déformation totale.

ε_{int} : Déformation intrinsèque.

ε_{th} : Déformation thermique.

ε_{el} : Déformation élastique.

II.2.1. Déformations thermiques

En raison des sollicitations thermiques (connues dans le jargon des industriels en microélectronique par budget thermique) subies par l'empilement, des déformations thermiques se manifestent. Ces déformations sont principalement dues à la différence des propriétés mécaniques entre les matériaux de l'empilement, notamment les coefficients de dilatation thermiques.

La déformation thermique ε_{th} s'exprime en fonction du coefficient de dilatation thermique α et des températures du dépôt T_i initial et T_f final d'une couche mince comme suit :

$$\varepsilon_{th} = \int_{T_i}^{T_f} (\alpha) dt * I \quad (2)$$

Ou :

ε_{th} : Déformation thermique.

I : Tenseur identité.

α : Coefficient de dilatation thermique.

T_i, T_f : Température de dépôt initial et final respectivement.

II.2.2. Déformations intrinsèques

Les déformations intrinsèques se génèrent lors du procédé du dépôt. Ces déformations dépendent des conditions de dépôts comme la pression, la température la nature des mélanges gazeux utilisés et bien d'autre paramètres. La complexité des origines des déformations intrinsèques rend difficile la proposition d'une expression permettant de les évaluer.

Les contraintes intrinsèques peuvent se manifester lors du dépôt de couches minces sur un substrat. Par exemple, dans le cadre de la méthode PVD, les ions ou atomes vaporisés ou pulvérisés peuvent occuper des sites qui seraient normalement plus restreints en raison du champ électrique créé entre la couche et le substrat [43].

Ces contraintes intrinsèques deviennent significatives en fonction de la différence de potentiel, étant liées à l'interaction élastique atomique entre la couche et le substrat. Après le dépôt, les réorganisations atomiques peuvent entraîner un changement de volume de la couche, ce qui engendre également l'apparition de contraintes. D'un autre côté, les couches déposées peuvent être en épitaxie avec le substrat, ce qui signifie que les rangées d'atomes du substrat s'alignent exactement avec les rangées atomiques de la couche [19].

II.2.3. Déformations mécaniques élastiques

La déformation élastique se manifeste lors du dépôt de couches minces et elle est fortement liée aux propriétés du matériau, à son épaisseur, ainsi qu'à la technique de dépôt employée.

Dans le cas d'un matériau isotrope, les déformations élastiques sont liées aux contraintes isotropes $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$ par une relation qui dépend du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν du matériau. Cette relation s'applique dans le plan d'une plaque isotrope élastique et linéaire [9].

$$\varepsilon_{el} = \frac{(1 - \nu)}{E} \sigma \quad (3)$$

II.3. Techniques expérimentales adaptées pour la mesure des gauchissements des plaquettes.

Plusieurs techniques ont été développées pour quantifier les contraintes induites durant l'élaboration des microcomposants et les gauchissements résultants. Ces techniques, non destructives utilisent des rayons X, des fuseaux laser, de la profilométrie mécanique et des réflexions optiques.

II.3.1. Diffraction par rayons-X (DRX)

La méthode de diffraction par rayons X est parmi les méthodes les plus utilisées pour estimer le niveau des contraintes résiduelles et de déterminer par la suite la déformation résultante. Comme son nom l'indique, cette méthode consiste à projeter un faisceau de rayon X monochromatiques sur la surface du matériau à étudier sachant que les atomes soient arrangés selon un réseau cristallin bien défini. Cette méthode est très précise mais elle est limitée par sa profondeur de pénétration [44], qui nécessite des échantillons de taille micrométrique pour avoir des signaux de diffractions détectables afin d'obtenir des résultats significatifs. Cependant, dans certaines applications, la taille des échantillons peut atteindre l'échelle nanométrique. La figure 1 représente le principe de fonctionnement de cette méthode qui est régie par la loi de Bragg donnant la condition d'obtention d'interférences constructives :

$$\lambda_0 = 2d \sin \theta \quad (4)$$

Ou :

λ_0 : La longueur d'onde des rayons X utilisés.

d : la distance inter réticulaire entre deux plans cristallographiques, et l'angle d'incidence et de réflexion des rayons X.

Cette méthode permis de mesurer la distance entre les plans cristallins représentés par des pics de diffraction en fonction de 2θ .

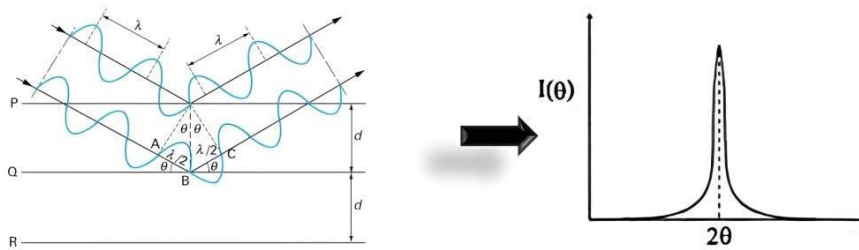


Figure 18. Diffraction des rayons X par un réseau cristallin et spectre résultant [7],[8].

Lorsqu'un matériau est soumis à un champ de contraintes, cela entraîne une déformation qui se manifeste par des variations de distance entre les plans atomiques comme la montre la figure 2 :

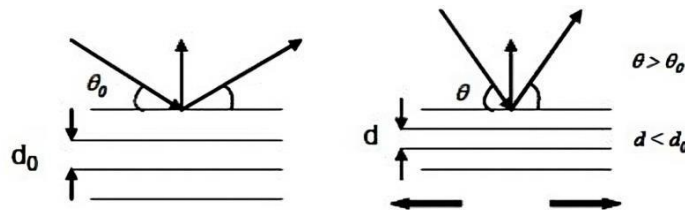


Figure 19. Effet d'une contrainte sur l'angle de diffraction des rayons X [9].

La déformation cristalline mesurée par diffraction des rayons X (DRX) est le résultat de la contrainte exercée sur la couche mince pendant la mesure. Cette déformation cristalline est exprimée en termes de variation par rapport à la distance interatomique libre de contrainte d_0 en présence de la charge d :

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (5)$$

D'après l'expression précédente, pour déterminer la déformation il faut connaître la distance interatomique au préalable de référence d_0 . Il existe des méthodes expérimentales pour la déterminer dans des configurations particulières [45].

Afin de déterminer les contraintes à partir d'un champ de déformations, il est essentiel d'utiliser un modèle mécanique qui intègre les propriétés élastiques des matériaux.

Pour la DRX, les contraintes sont calculables par la méthode dite « $\sin^2 \psi$ ». Elle permet de calculer la déformation en fonction de l'angle d'inclinaison de l'échantillon suivant le repère représenté par la figure 3 par les relations suivantes :

$$\varepsilon = S_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2} S_2 \sigma_{\phi} \sin^2 \psi, \text{ avec} \quad (6)$$

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi + \sigma_{12} \sin^2 \phi \quad (7)$$

Ou :

ψ : est l'angle entre le plan de la surface du cristal et le plan de diffraction.

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$: sont les composants du tenseur des contraintes de l'échantillon.

S_1 et $\frac{1}{2}S_2$: sont des constantes radiocristallines dépendent des propriétés élastique du matériau de l'échantillon.

Elles sont reliées aux propriétés élastiques du film mince par les relations suivantes :

$S_1 = \frac{-\nu_f}{E_f} \text{ et } \frac{1}{2}S_2 = \frac{1+\nu_f}{E_f}$	(8)
---	-----

Avec :

S_1 et S_2 : sont des constantes radiocristallines.

ν_f et E_f : sont le coefficient de poisson et le module de Young du film mince respectivement.

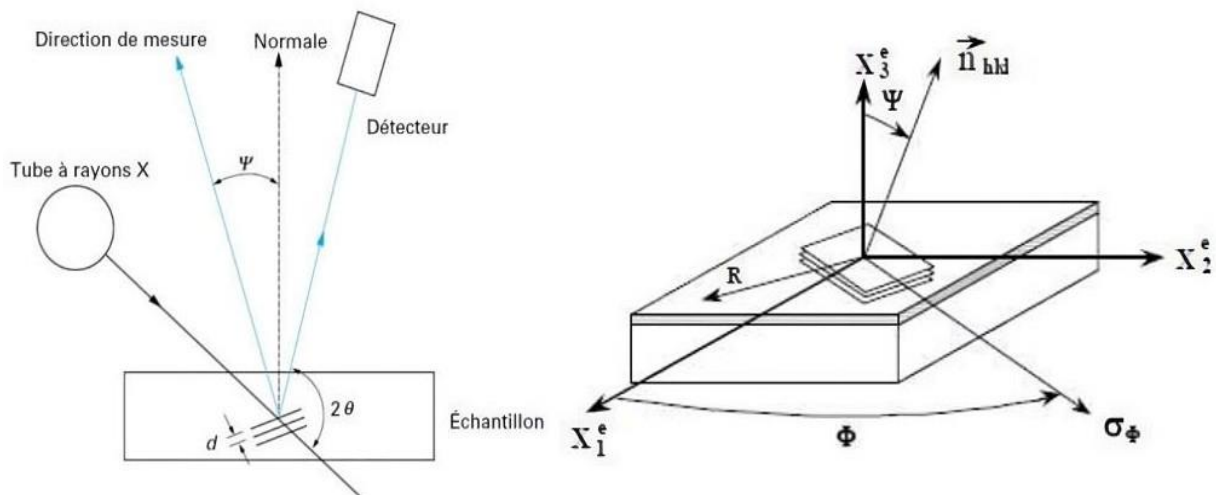


Figure 20. Repère de mesure côté instrumentation (à gauche) et échantillon (à droite) [9], [10].

La détermination de la contrainte dans le plan de l'échantillon σ_ϕ se fait en calculant la pente de la courbe $\varepsilon = (\sin^2 \phi)$, étant donné que les propriétés élastiques du matériau sont connues.

II.3.2. La réflectométrie optique

Cette technique consiste à projeter un rayon laser sur un miroir balayant la surface d'un échantillon. Le faisceau laser réfléchi est capté par un capteur photodiode, ce qui permet de mesurer la courbure en chaque point de la surface de l'échantillon en fonction de sa position. Cette configuration est illustrée par la Figure 21.

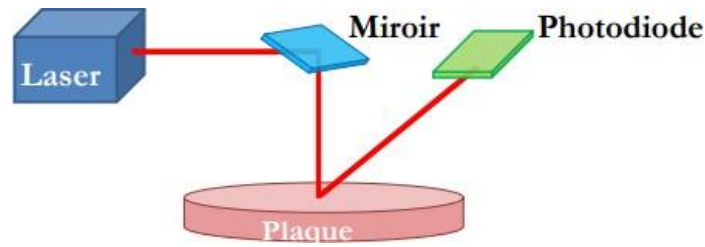


Figure 21. Principe de la réflectométrie optique [9].

Cette technique permet de mesurer le rayon de courbure de l'échantillon. En effet, les différentes mesures ($e, dx, d\theta, dR$) qui sont illustrées par la figure 22, permettent de déduire le rayon de courbure par les relations suivantes :

$e = \sqrt{dx^2 \left(1 + \frac{dR^2}{dx^2}\right)} = dx + o(dx)$	(9)
---	-----

$e = -R \sin d\theta = -Rd\theta + (dx)$	(10)
--	------

Avec :

$e, dx, d\theta, dR$: sont des distances.

Pour $\frac{dR^2}{dx^2} \leq 1$ et $d\theta$ très faible, les équations 9 et 10 donnent l'expression de la courbure κ mesurée comme suit :

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{d\theta}{dx} \tag{11}$$

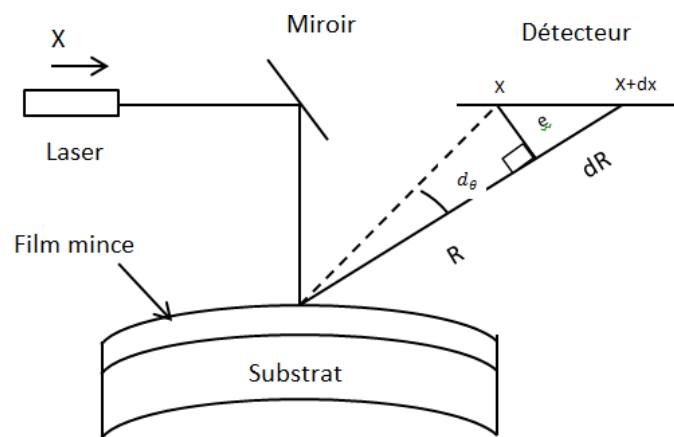


Figure 22. Principe de mesure par réflectométrie optique [9].

II.3.3. Profilométrie mécanique

Cette méthode consiste à mesurer la topologie d'une surface à l'aide d'une pointe en contact avec celle-ci. La pointe est maintenue par un bras mécanique contrôlé par un système électromécanique, assurant ainsi une précision dans l'application de la force. La courbure de la surface peut être déduite en comparant les variations de la hauteur de la pointe par rapport à un point fixe. Les données obtenues sont analysées pour reconstruire le profil de la courbure de la surface. Le principe d'un profilomètre est assez simple comme l'illustre la figure 23. Une pointe microscopique, en contact avec la surface, est déplacée le long de l'axe X. Le mouvement vertical de la pointe, dû au relief, est capté et amplifié. Le profilomètre est en général installé sur une colonne Z, permettant de positionner la pointe au-dessus d'une pièce à mesurer. L'unité d'avance déplace le stylet le long de l'axe X, perpendiculaire à Z. Le marbre sert de plan de référence et de support aux pièces à mesurer.

Plus précisément, le capteur glisse sur un barreau de référence, grâce à une vis sans fin, animée par un moteur. Le barreau sert de référence interne de rectitude. C'est un élément rectifié avec une grande précision. Il permet au stylet d'enregistrer tout l'état de surface, que ce soit la rugosité, l'ondulation et les écarts de forme, voire la forme elle-même [46]. La comparaison de la surface réelle avec une surface parfaite de référence permet d'évaluer le gauchissement.

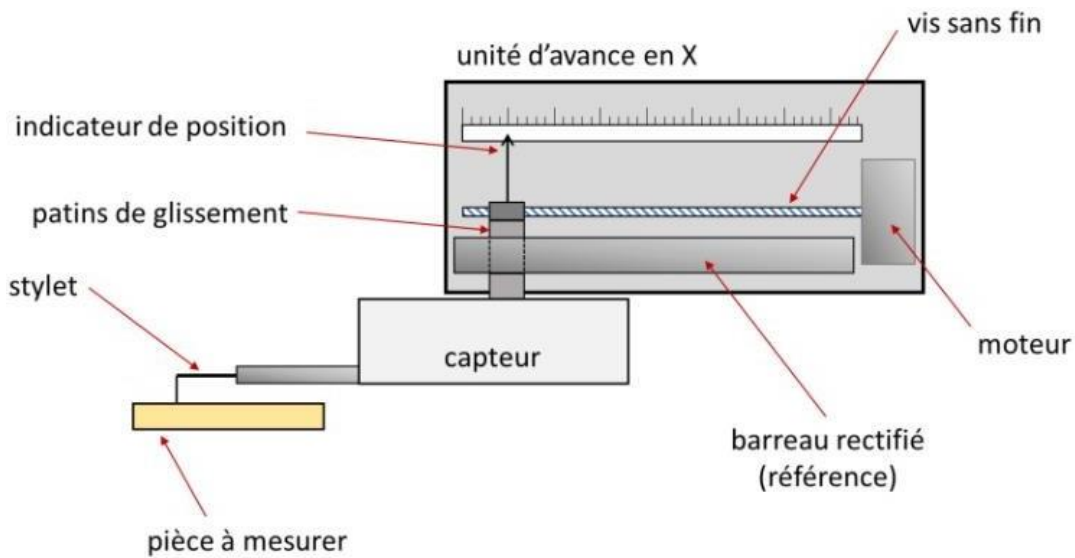


Figure 23. Principe de la profilométrie mécanique [46].



Figure 24. Le P-17 Profilomètre mécanique pour l'industrie[47].

La figure 24 illustre le profilomètre P-17 qui est capable de mesurer des marches de quelques nanomètres à un millimètre [47].

Ce modèle, destiné aux chaînes de fabrication de microcomposants en salle blanche, peut contrôler plusieurs plaquettes (wafers) simultanément.

II.3.4. Projection de moiré

La technique de projection de Moiré, également connue sous le nom de "shadow moiré", permet de mesurer le gauchissement des plaquettes par la mesure du rayon de la courbure. Dans cette méthode, un motif de Moiré composé de rayures équidistantes est projeté sur la surface de l'échantillon avec un angle de 45° . Une source lumineuse traverse le motif de Moiré représentant un motif spécifique, et l'ombre de ce motif est visualisée sur l'échantillon. L'image résultante du motif réfléchi par la surface de l'échantillon est capturée par un capteur photographique CCD (Charge Coupled Device) comme l'illustre la figure 25. En utilisant un traitement numérique des données provenant du capteur graphique, il est possible de reconstruire les déplacements des points sur la surface de l'échantillon et de déterminer ainsi le rayon de la courbure et le gauchissement de la plaquette.

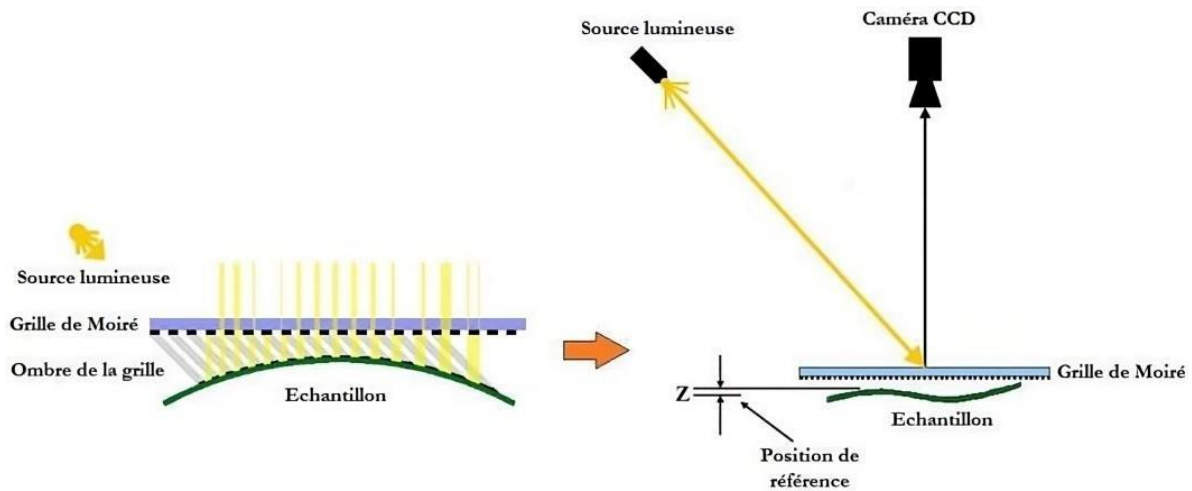


Figure 25. Principe de la technique de projection de moiré [16].

II.3.5. Elepsometrie

L'ellipsométrie est une technique optique qui mesure la polarisation du rayon de lumière réfléchi par une couche mince. Cette technique, principalement employée pour analyser l'état de surface et déterminer les propriétés optiques et géométriques d'une couche mince, est adaptée pour mesurer la courbure d'un empilement de couches minces.

La quantité de lumière réfléchie est appelée ellipsoïde de polarisation. Il est caractérisé par l'angle de rotation de l'ellipse Ψ et l'allongement de l'ellipse Δ . Les valeurs de Ψ et Δ dépendent des propriétés optiques de la surface, telles que l'indice de n_1 et n_2 réfraction, l'épaisseur et l'état de surface [48].

Les paramètres ellipsométriques Ψ , Δ sont alors liés aux coefficients de réflexion par l'équation fondamentale de l'ellipsométrie [48] :

$$\rho = \tan \psi e^{i\Delta} = \frac{r^p}{r^s} \quad (12)$$

Sachant que ψ et Δ peuvent être exprimés par ρ (polarisation) pour des raisons de simplification.

r^p Et r^s sont les coefficients de réflexion complexes de Fresnel.

Les indices de réfraction peuvent être exprimés en fonction de Ψ et Δ par l'équation suivant [48]:

$$n_2 = n_1 \tan \theta_1 \sqrt{1 - \frac{\rho \sin 2\theta_1}{(\rho+1)^2}} \quad (13)$$

Avec :

n_2 et n_1 : Les indices complexes de réfraction pour l'échantillon et l'environnement.

θ_1 : L'angle d'incidence.

Cette équation n'est valable que dans le cas où il n'y a pas de film déposé sur le substrat [48].

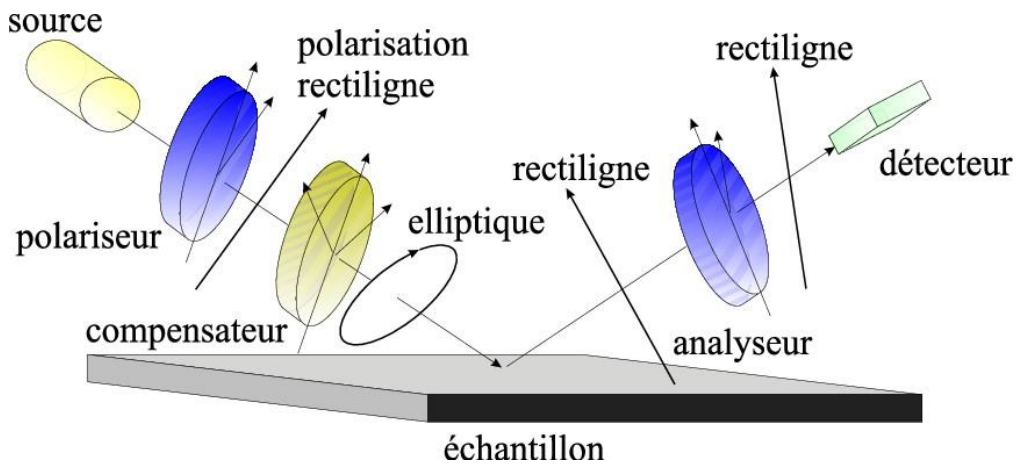


Figure 26. Configuration conventionnelle d'un ellipsomètre [49].

La Figure 27 ci-dessus présente la gamme d'ellipsomètres spectroscopiques M-2000®, conçue pour répondre aux différentes exigences de caractérisation des couches minces. Une conception optique avancée, une large plage spectrale et une acquisition rapide des données se combinent dans un outil extrêmement puissant et polyvalent.



Figure 27. La gamme M-2000® d'ellipsométrie[50].

L'épaisseur d'un film mince peut être déterminée à partir de la détermination de la fonction périodique du coefficient de réflexion d_p exprimé en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente (λ), comme illustré par l'équation suivante [48] :

$$d_p = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \quad (14)$$

Avec :

λ : La longueur d'onde de la lumière incidente.

θ_1 : L'angle d'incidence.

La variation de ces deux paramètres joue un rôle primordial sur l'exactitude de l'épaisseur à déterminer, ce qui affecte par la suite la déflexion de l'empilement à calculer. En raison des caractéristiques du film mince et des angles d'incidence, le coefficient de réflexion total devient une fonction qui varie périodiquement en fonction de l'épaisseur du film (d). Cette périodicité doit avoir la même échelle de grandeur que la longueur d'onde utilisée [48]. Par exemple, si l'on souhaite déterminer une épaisseur dans la plage des micromètres, la longueur d'onde ne doit pas dépasser cette échelle.

Lorsque l'on travaille avec un multicouches, il devient complexe de calculer les indices et les épaisseurs de chaque couche à chaque longueur d'onde. Dans de tels cas, des hypothèses sur la variation des indices optiques en fonction de la longueur d'onde peuvent être nécessaires. Plutôt que de calculer directement les indices et les épaisseurs, on peut se baser sur des mesures expérimentales des paramètres ellipsométriques, tels que $\tan(\Psi)$ et $\cos(\Delta)$, en fonction de la longueur d'onde[51].

II.4. Modèles analytiques permettant d'estimer les gauchissements.

L'approche analytique demeure l'une des approches les plus utilisées pour calculer les courbures des empilements de couches minces quand le nombre des couches est faible.

H. Isselé [9] a proposé une approche qui consiste à estimer la déformation intrinsèque en mesurant l'écart entre les déformations avant et après le dépôt. La méthode peut être adaptée pour calculer les courbures. La figure 28 ci-dessous résume les étapes du dépôt d'une couche minces sur un substrat.

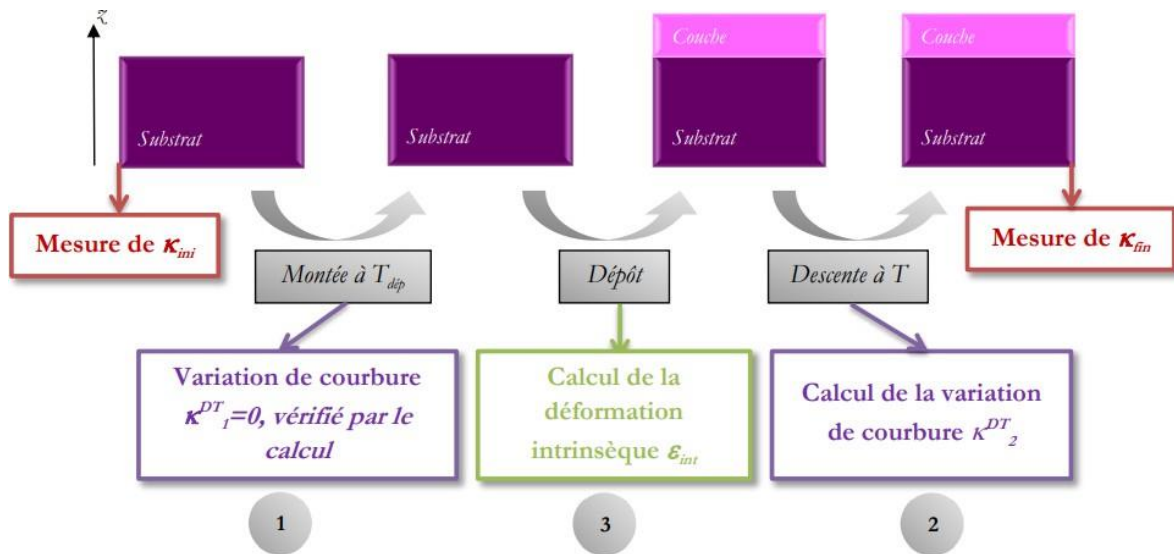


Figure 28. Méthodologie de détermination de la courbure avant et après dépôt pour en déduire la contrainte intrinsèque [9].

Comme la montre la figure 11 la méthodologie proposée par H. Isselé [9] comporte 3 étapes :

La variation de température de T à T_{dep} du substrat n'apporte aucune déformation intrinsèque donc la courbure dans cette étape $\kappa_1^{DT} = 0$, la déformation $\varepsilon_{01}^{DT} = 0$ est déterminé par la résolution du système d'équations.

La variation de température de T_{dep} à T de l'empilement n'apporte aucune déformation intrinsèque donc la courbure dans cette étape κ_2^{DT} et ε_{02}^{DT} , sont déterminés par la résolution du système d'équations.

La formation de la couche sur le substrat à T_{dep} . Les inconnues dans cette étape est ε_0^{dep} , κ^{dep} , ε_{int} . La courbure κ^{dep} peut s'écrire comme suit :

$$\kappa^{dep} = (\kappa_{inf} - \kappa_2^{DT}) - (\kappa_2^{DT} + \kappa_{INT}) = \kappa_{fin} - \kappa_2^{DT} - \kappa_{int} \quad (15)$$

La méthode utilisée permet de calculer la déformation intrinsèque dans chaque point de l'empilement en se basant sur des mesures expérimentales.

II.4.1. Modèle de Stoney

Dans le cas d'un empilement bicouches, le modèle de Stoney [52] permet de déterminer la contrainte dans le film mince déposé à partir de la courbure engendré ainsi la déformation du film mince. À partir de cette contrainte, nous pouvons déduire la déformation du film mince. La contrainte dans le film déposé est donnée par :

$$\sigma_f = \frac{E_s}{1 - \nu_s} \frac{t_s^2}{6t_f} \left(\frac{1}{R_{av}} - \frac{1}{R_{ap}} \right) \quad (16)$$

La déformation du film mince est donnée par :

$$\varepsilon_f = \frac{t_s^2}{6t_f} \left(\frac{1}{R_{av}} - \frac{1}{R_{ap}} \right) (1 - \nu_s) \quad (17)$$

Avec (E_s, ν_s) sont respectivement le module d'Young et coefficient de Poisson du substrat, t_s et t_f les épaisseurs du substrat et film mince, et (R_{av}, R_{ap}) les rayons de courbure avant et après dépôt de la couche mince, ε_f la déformation du film mince.

La formule ci-dessus n'est valide que lorsque les hypothèses suivantes sont toutes satisfaites : L'épaisseur t_f de la couche déposée est faible par rapport à celle du substrat t_s .

Le film mince est déposé de manière homogène sur le substrat.

Le substrat et le film mince sont élastiques isotropes.

La courbure $\kappa = 1/R$ résultante de la contrainte est uniforme (déformation sphérique).

Les dimensions longitudinales du système {film mince+ substrat} sont négligeables devant les autres dimensions.

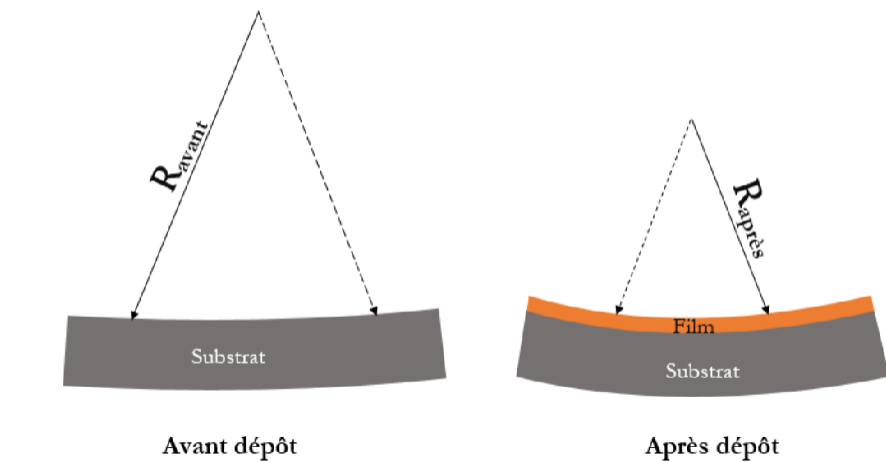


Figure 29. Les courbures utilisées dans le modèle de Stoney [11].

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle ne dépend pas des propriétés du film déposé. Elle est applicable juste pour des structure simple avec des petites déformations.

Le modèle de Stoney permet d'obtenir le rayon de courbure (R) ou la flèche par la relation [9]:

$$R = - \left(\frac{D^2}{8B} + \frac{B}{2} \right) \approx - \frac{D^2}{8B}$$

Avec :

B : le Bow ou la flèche.

D : diamètre de la plaque.

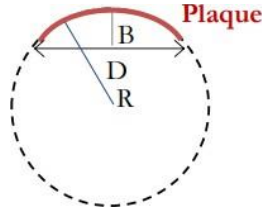


Figure 30. Flèche B, diamètre D et rayon de courbure R d'une plaque [9].

II.4.2. Limites du modèle de Stoney

Le modèle de Stoney consiste à déterminer les contraintes dans un bi matériau isotopique. Pour un empilement anisotrope avec plusieurs couches minces le modèle de Stoney se heurte au non validation des hypothèses d'isotropie des épaisseurs des matériaux et de la courbure.

Afin de contourner ces limites, il faut prendre en compte l'anisotropie des couches constituant l'empilement dans le modèle de Stoney par l'introduction du module d'élasticité E_s , dépendant des constantes d'élasticité C_{ij} du substrat [27]. L'expression (16) devient alors :

$$\sigma_f = E_s \frac{t_s^2}{6t_f} \left(\frac{1}{R_{\alpha v}} - \frac{1}{R_{\alpha p}} \right) \quad (19)$$

Ce module introduit par Nix et al [53] dépend des orientations du silicium et il est calculé en fonction de l'orientation du silicium.

Dans le cas d'un silicium orienté [100] :

$E_s = C_{11} + C_{12} - \frac{C_{12}(C_{11} + 3C_{12} - 2C_{44})}{C_{11} + C_{12} + 2C_{44}}$	(20)
--	------

Avec :

Le tenseur d'élasticité anisotropique :

$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}$	(21)
--	------

$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{\nu_{zx}+\nu_{yx}\nu_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xy}+\nu_{xz}\nu_{zy}}{E_z E_x \Delta} & \frac{1-\nu_{zx}\nu_{xz}}{E_z E_x \Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{zx}\nu_{xy}}{E_z E_x \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xz}+\nu_{xy}\nu_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{\nu_{yz}+\nu_{xz}\nu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}$	(22)
---	------

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{zx}\nu_{xz} - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx}}{E_x E_y E_z} \quad (23)$$

II.4.3. Modèle de Hutchinson

Dans le cas d'un multicouche, le modèle de Hutchinson[54] peut être utilisé pour déterminer la contrainte dans chaque film mince déposé et de déterminer par la suite la courbure de l'empilement.

Les hypothèses à satisfaire sont:

- Les matériaux sont supposés élastiques isotropes.
- La courbure est uniforme.
- Les dimensions longitudinales sont grandes devant les épaisseurs caractéristiques.
- Les contraintes sont situées dans le plan (cas des couches minces).

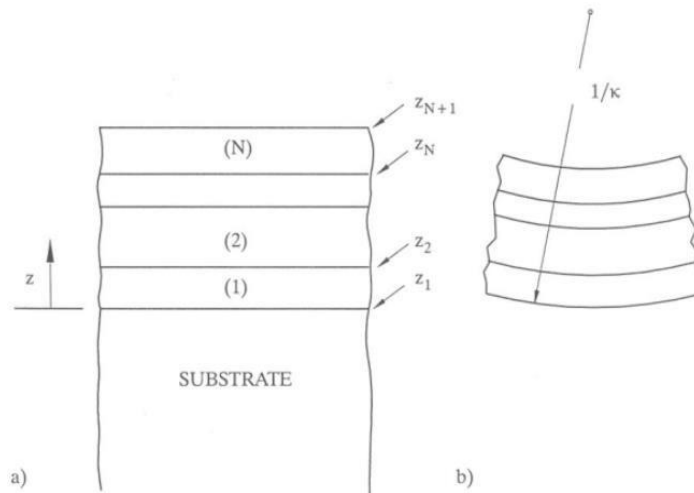


Figure 31. (a) Dépôt couche par couche sur un substrat épais. (b) état du multicouche à la température T[54].

La déformation totale peut être exprimée en fonction de la déformation d'un plan spécifique généralement choisi comme la surface inférieure du substrat, ainsi que la courbure du système bicouche (substrat +couche mince). La déformation totale est donnée par :

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_0 - z\kappa \quad (24)$$

Avec :

ε_0 Et κ sont respectivement la déformation du plan défini par $z = 0$ et la courbure résultante à l'équilibre.

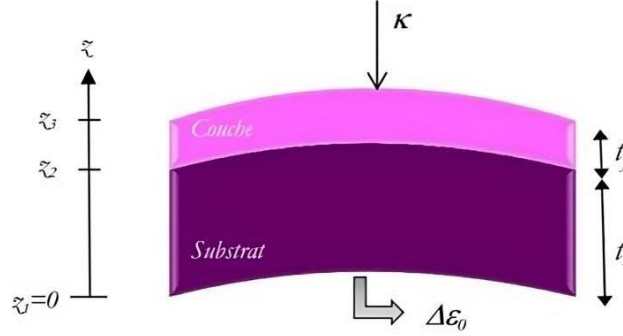


Figure 32. Système bicouche (substrat +film mince) et repère associé[9].

Dans le cas des films minces le système est supposé en état plan de contraintes ($\sigma_{13} = \sigma_{23} = \sigma_{33} = 0$). De plus, les plaques sont de forme disque et en supposant que le matériau est isotrope, nous pouvons écrire:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma \quad (25)$$

Est ε_{el} s'exprime comme suit :

$$\varepsilon_{el} = \frac{(1-\nu)}{E} \sigma \quad (26)$$

La contrainte dans chaque couche « i » à la température T est donnée par :

$$\sigma_i(T) = \frac{E_i(T)}{(1-\nu_i)} \left[\left((\varepsilon_0(T) - \kappa(T)) - \varepsilon_{th}(T) \right) - \sigma_i^{int} \right] \quad (27)$$

Avec :

ε_0 : est la déformation à la base du système substrat ($z = 0$) et κ la courbure.

$\sigma_i(T)$: La contrainte dans chaque couche « i » à la température T est donnée par :

(E_i, ν_i) : étant le module d'Young et le coefficient de Poisson de la couche « i ».

ε_{th} : Déformation thermique a la température T.

σ_i^{int} : La contrainte intrinsèque.

Le processus de dépôt d'une couche sur un substrat peut être divisé en trois étapes distinctes :

- La montée en température du substrat seul à la température de dépôt T_{dep}
- Le dépôt de la couche à T_{dep} sur le substrat.
- Le refroidissement du système bicouche (couche + substrat) jusqu'à la température ambiante T_{amb}

Au cours de ces étapes, il est possible de séparer les déformations thermiques des déformations intrinsèques dans la couche mince, permettant ainsi d'évaluer leur contribution respective [9].

(E_i, ν_i) Étant le module d'Young et le coefficient de Poisson de la couche « ν_i ».

La déformation totale peut s'exprimer comme suit :

$$\varepsilon_{tot} = \frac{(1 - \nu)}{E} \sigma + \int_{T_{dep}}^T (T) dt + \varepsilon_{int} \quad (28)$$

Lors du dépôt de la couche mince sur le substrat, un état d'équilibre mécanique s'établit donc l'ensemble des forces extérieures F et les moments M du système sont nulles

$$\sum_i F = \int_0^{z_3} \sigma_i(z) z = 0 \quad (29)$$

$$\sum_i M = \int_0^{z_3} \sigma_i(z) \cdot z \cdot dz = 0 \quad (30)$$

Lors du dépôt de la couche mince, aucune variation de température n'a lieu et aucune déformation thermique ne se produit. Les seules déformations inélastiques observées sont liées à la déformation intrinsèque $\varepsilon_{int f}$ de la couche, causée par les conditions de dépôt.

Dans ce qui suit nous utilisons le terme E^* pour exprimer le module réduit d'un matériau défini par $E^* = \frac{E}{(1-\nu)}$. La contrainte induite par le dépôt dans le substrat, notée $\Delta\sigma_s$, et dans la couche, notée $\Delta\sigma_f$, peut être exprimée en utilisant l'équation 24 de la manière suivante :

$$\Delta\sigma_s^{de}(z) = E^*_s(\varepsilon_0 - z\kappa), \text{ pour le substrat} \quad (31)$$

$$\Delta\sigma_f^{de}(z) = E^*_f[(\varepsilon_0 - z\kappa) - \varepsilon_{int f}], \text{ pour le film mince} \quad (32)$$

Avec :

ε_0 et κ sont respectivement la déformation du plan défini par $z = 0$ et la courbure résultante à l'équilibre.

E^*_s et E^*_f sont les modules réduits du substrat et du film mince.

La combinaison des équations (27) et (28) en obtient le système d'équations (substrat film mince) suivant :

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ -C_{12} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (33)$$

Avec :

$$C_{11} = E^*_s t_s + E^*_f t_f$$

$$C_{12} = -\frac{1}{2}(E^*_s t_s^2 + E^*_f (z_3^2 - z_2^2)).$$

$$C_{22} = -\frac{1}{3}E^*_s t_s^3 + E^*_f (z_3^2 - z_2^2).$$

Et :

$$A_1 = E^*_f t_f \varepsilon_{int f}.$$

$$A_2 = \frac{1}{2}E^*_f (z_3^2 - z_2^2) \varepsilon_{int f}.$$

La résolution de ce système d'équations permet d'obtenir répartition de la contrainte dans le substrat une fois le film mince est déposé.

Après le dépôt le matériau à T_{dep} le système est refroidi jusqu'à la température ambiante T . Dans ce cas aucune déformation intrinsèque n'apparut. Cependant une déformation thermique ε_{th} ce manifeste dans le substrat et le film mince à la fois la déformation $\Delta\sigma_s$ et $\Delta\sigma_f$ peut s'exprimé comme suit :

$$\Delta\sigma_s^d(z) = E_s^*[(\varepsilon_0 - z\kappa) - \varepsilon_{th s}], \text{ pour le substrat} \quad (34)$$

$$\Delta\sigma_f^d(z) = E_f^*[(\varepsilon_0 - z\kappa) - \varepsilon_{th f}], \text{ pour le film mince} \quad (35)$$

La déformation thermique du substrat et du film mince se calculent par :

$$\varepsilon_{th s} = \int_{T_{dep}}^T \alpha_{s,f}(T) dt \quad (36)$$

ε_0 Et κ sont respectivement la déformation du plan défini par $z = 0$ et la courbure résultante a l'équilibre.

α_s : Coefficient de dilatation thermique du film et du substrat.

De la même façon que le dépôt, l'équilibre mécanique atteint par le système (substrat+film mince) à la température T conduit aux égalités suivantes :

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ -C_{12} & C_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = 0 \quad (37)$$

Avec :

$$A_1 = E_s^* t_s \varepsilon_{th s} + E_f^* t_f \varepsilon_{th f} \quad 38$$

$$A_2 = \frac{1}{2} (E_s^* t_s^2 \varepsilon_{th s} + E_f^* (z_3^2 - z_2^2) \varepsilon_{th f}) \quad 39$$

La résolution de ce système d'équation permet d'obtenir répartition de la contrainte dans le substrat et le film mince lié à la température du dépôt.

En fin on peut écrire l'expression de la contrainte engendrée par le procédé du dépôt qui est la somme de chaque étape de calcul

$\sigma_s = \Delta\sigma_{s,f}^{dt}(z) + \Delta\sigma_{s,f}^{dep}(z)$	(40)
---	------

Après la résolution on obtient :

$\Delta\kappa(T) = \frac{C_{12}(T)A_1(T) + C_{11}(T)A_2(T)}{C_{12}^2(T) + C_{11}(T)C_{22}(T)}$	(41)
--	------

$\Delta\varepsilon_0(T) = \frac{C_{22}(T)A_1(T) - C_{12}(T)A_2(T)}{C_{12}^2(T) + C_{11}(T)C_{22}(T)}$	(42)
---	------

Grace à ce modèle de Hutchinson on peut calculer la courbure et la déformation qui nous permettrons de déterminer les contraintes dans chaque une des couches et en tout point de l'empilement et à chaque étape de calcul.

II.4.4. Modèle analytique de Suhir

Pour prédire la déformation d'un empilement multicouche, Suhir [55] a suggéré un modèle analytique basé sur les équations de compatibilité des déformations plutôt que sur les équations de compatibilité des déplacements.

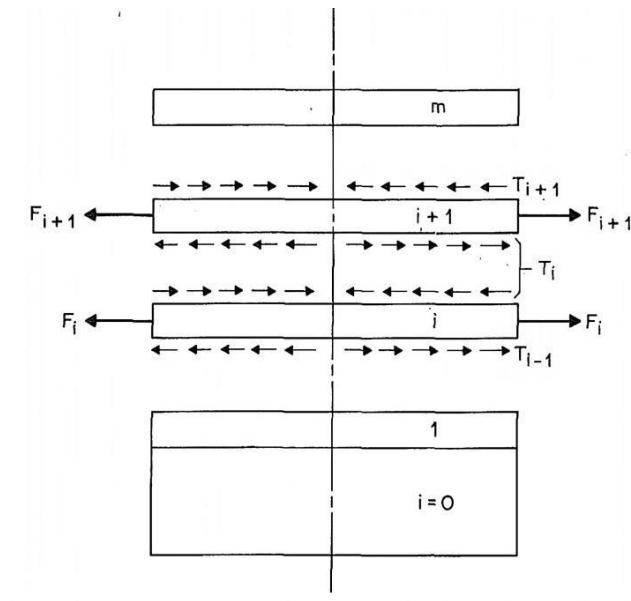


Figure 33. Empilement multicouches [55].

Les déformations longitudinales e_{i-1}^+ et e_i^- de la fibre extrême supérieure de la (i- 1)-ème couche et de la fibre extrême inférieure de la (i)-ème couche, respectivement, peuvent être exprimées comme suit :

$$e_{i-1}^+ = \alpha_{i-1}\Delta t - \lambda_{i-1}F_{i-1} + \frac{h_{i-1}}{2\rho} \quad , \quad e_i^- = \alpha_i\Delta t - \lambda_iF_i - \frac{h_i}{2\rho} \quad (43)$$

$$i = 0,1,2, \dots \dots \dots, m$$

Avec :

α_i : Coefficient de dilatation thermique pour la (i)-ème couche.

$\lambda_i = (E_i^0 h_i)^{-1}$: La compliance axiale de cette couche.

F_i : La force agissant dans la (i)-ème couche.

ρ : Rayon de courbure.

Δt : La différence de température.

En utilisant la condition $e_{i-1}^+ = e_i^-$ de la compatibilité des déformations on obtient :

$$\lambda_i F_i - \lambda_{i-1} F_{i-1} + \frac{n_i + n_{i-1}}{2\rho} = (\alpha_i - \alpha_{i-1}) \Delta t \quad (44)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, m$$

Après avoir sommairement ces équations de $i = 0$ à i , nous obtenons :

$$F_i = \frac{1}{\lambda_i} \left(\lambda_0 F_0 + \Delta \alpha_i \Delta t - \frac{a_i}{\rho} \right) \quad (45)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, m$$

Avec :

$\Delta \alpha_i = (\alpha_i - \alpha_0)$: La différence du coefficient de dilation thermique entre le substrat et la (i)-ème couche.

Et :

$$\alpha_i = \sum_{j=0}^i h_j - \frac{h_0 + h_i}{2} \quad (46)$$

Avec :

h_i : Épaisseur du film de la ième couche.

Les contraintes correspondantes dans les couches du film sont les suivantes :

$$\sigma_i h_i = F_i = \frac{1}{\lambda_i} \left(\lambda_0 F_0 + \Delta \alpha_i \Delta t - \frac{a_i}{\rho} \right) \quad (47)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, m$$

La courbure maximale peut être calculée à l'aide de la formule :

$$w_0 = \frac{3}{E_s^0} \left(\frac{\rho}{h_s} \right)^2 \sum_{i=1}^m \sigma_i h_i \quad (48)$$

Avec :

$E_s^0 = \frac{E_s}{1-\nu_s}$: Le module d'Young généralisé pour le matériau du substrat, E_s et ν_s sont des

constantes élastiques de ce matériau.

h_s : Épaisseur du substrat et ℓ : longueur du film.

II.5. Approches numériques utilisées pour estimer les gauchissements

Les approches numériques sont largement utilisées dans divers domaines et trouvent une place importante dans l'étude et le développement des microcomposants électroniques. L'avantage principal offert par l'utilisation des méthodes numériques dans le développement des nouveaux microcomposants électroniques réside dans le gain de temps et la réduction des coûts de développement. En effet, les méthodes numériques permettent de simuler et d'analyser le comportement des structures et des systèmes de manière virtuelle, ce qui évite le besoin de réaliser de nombreux essais nécessitant la fabrication de plusieurs prototypes physiques coûteux. Parmi ces techniques numériques, on se focalise dans notre étude sur la méthode des éléments finis.

II.5.1. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est une technique numérique très utilisée pour résoudre les problèmes d'analyse structurale. Le concept de la méthode des éléments finis remonte effectivement au début des années 1940. Elle a été employée pour l'analyse et la résolution de structures et de problèmes simples à l'origine [56]. Elle permet de modéliser et de discrétiser une structure en de petits éléments finis interconnectés, qui génère des équations algébriques pour les valeurs de la quantité de champ aux nœuds [56].

Les déformations, les contraintes et les gauchissements dans chaque élément sont calculés en fonction des conditions aux limites et des propriétés matérielles, puis les résultats des éléments individuels sont assemblés pour obtenir le résultat global de la structure.

La matrice symbolique de cet ensemble d'équations est représentée par l'équation $KD = R$.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Ici, D est un vecteur contenant les valeurs inconnues du champ à différents nœuds, R est un vecteur de charges dont les valeurs sont connues, et K est une matrice de constantes également connues. Dans l'analyse des contraintes k est connu sous le nom de Matrice de rigidité[56].

Cao et al [57] ont élaboré un modèle numérique à l'aide du logiciel ANSYS workbench 18.2 pour une plaquette de 8 pouces et de 0,13 μm d'épaisseur. L'objectif était de déterminer les contraintes résiduelles résultantes du dépôt de 7 couches minces sur le substrat et de déterminer le gauchissement Résultant.

Les résultats obtenus par l'approche numérique ont été comparés aux résultats issus de l'approche expérimentale (mesure) et une erreur moyenne de 15% a été évaluée (figure 34).

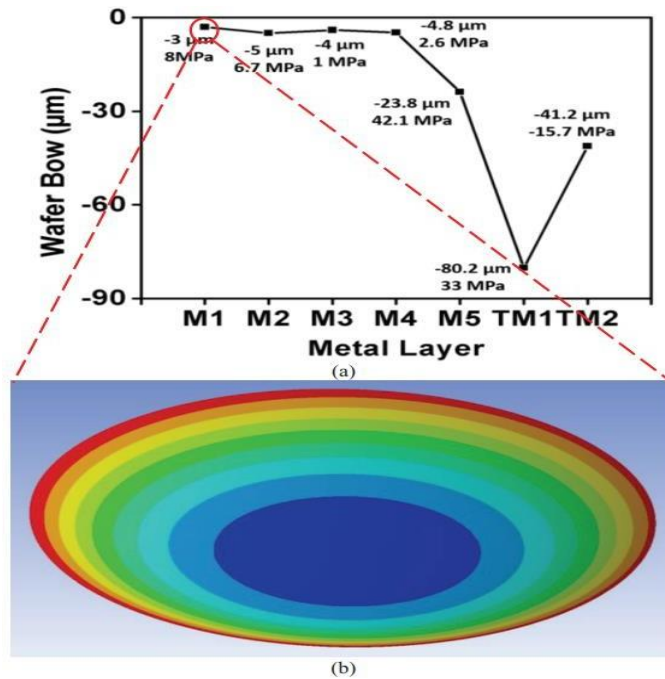


Figure 34. (a) Mesure expérimentale du gauchissement de la plaquette, (b) Gauchissement obtenu numériquement pour la première couche [57].

Cao et al [57] ont également comparé leurs résultats numériques avec les calculs analytiques utilisant le modèle de Stoney. Les valeurs obtenues par les deux approches sont comparables comme le montre la figure 35.

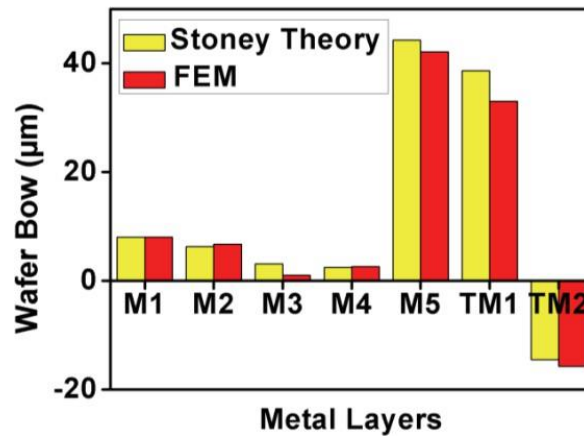


Figure 35. Comparaison des résultats du gauchissement obtenus numériquement avec les calculs analytiques utilisant le modèle de Stoney [57].

Qin Fei et al[58], ont développé sur Abaqus, un modèle tridimensionnel d'une plaquette comportant des composant de type « Wafer-Level Chip Scale Package » (WLCSP) pour simuler le processus de moulage de la plaquette de silicium et de déterminer le gauchissement résultant.

Les résultats numériques obtenus montrent que les différences entre les coefficients de dilatation thermique des matériaux et l'épaisseur du moulage influencent fortement le gauchissement de la plaquette de silicium. Les matériaux de moulage avec un faible coefficient de dilatation thermique et une épaisseur de moulage plus fine peuvent réduire efficacement le gauchissement. Une épaisseur de silicium plus importante, une taille de puce plus grande et une largeur de ligne de découpe plus importante ont également des effets non négligeables sur la réduction du gauchissement [58].

Structure WL CSP	Dimensions (mm)		
	Moulage côté supérieur	Rectification côté opposé	Moulage côté opposé
Épaisseur du silicium (mm)	0.74	0.19	0.19
Épaisseur du PI (mm)	0.02	0.02	0.02
Épaisseur du moulage (mm)	0.1	0.1	0.06
Gauchissement	1.2	18	8

Tableau 2. Paramètres géométriques et résultats de gauchissement obtenus numériquement[58].

Yao et al [59], ont créés un modèle axisymétrique 2D à l'aide de ANSYS R 17.2 pour simuler le gauchissement global d'une plaquette de silicium revêtues de deux couches minces, une couche diélectrique (USG) et une couche conductrice (Pt). Ils ont étudié l'effet de l'épaisseur de la couche métallique sur les gauchissements de la plaquette. Les résultats obtenus numériquement sont semblables à ceux issus des mesures expérimentales ce qui leur a permis de valider l'approche numérique 2D axisymétrique (figure 36).

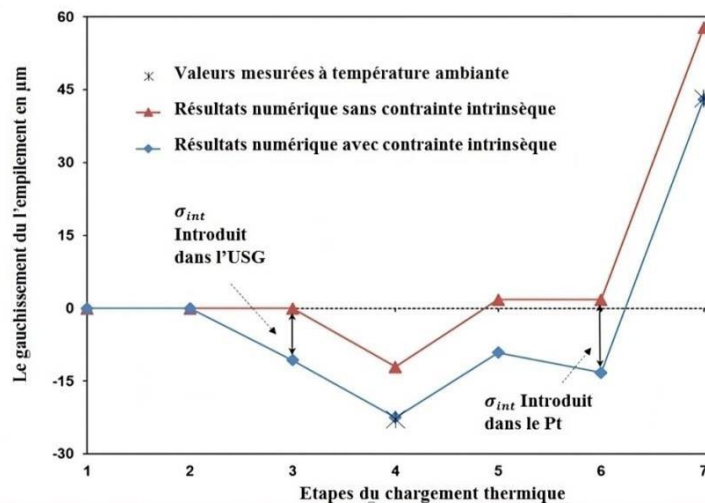


Figure 36. Le gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt par rapport à la séquence du dépôt des films minces[59].

II.5.2. Difficultés de la modélisation des plaquettes avec des motifs

En réalité, les plaquettes de silicium sont revêtues avec des couches minces discontinues pour former des microcomposants. La figure 37 montre un exemple d'une plaquette comportant plusieurs composants. La modélisation des plaquettes avec des motifs complexes nécessite des moyens de calcul colossaux en raison de la nécessité d'augmenter le nombre d'éléments finis. Des approches d'homogénéisation ont été développées pour réduire les tailles des modèles numériques et de réduire ainsi les coûts des calculs.

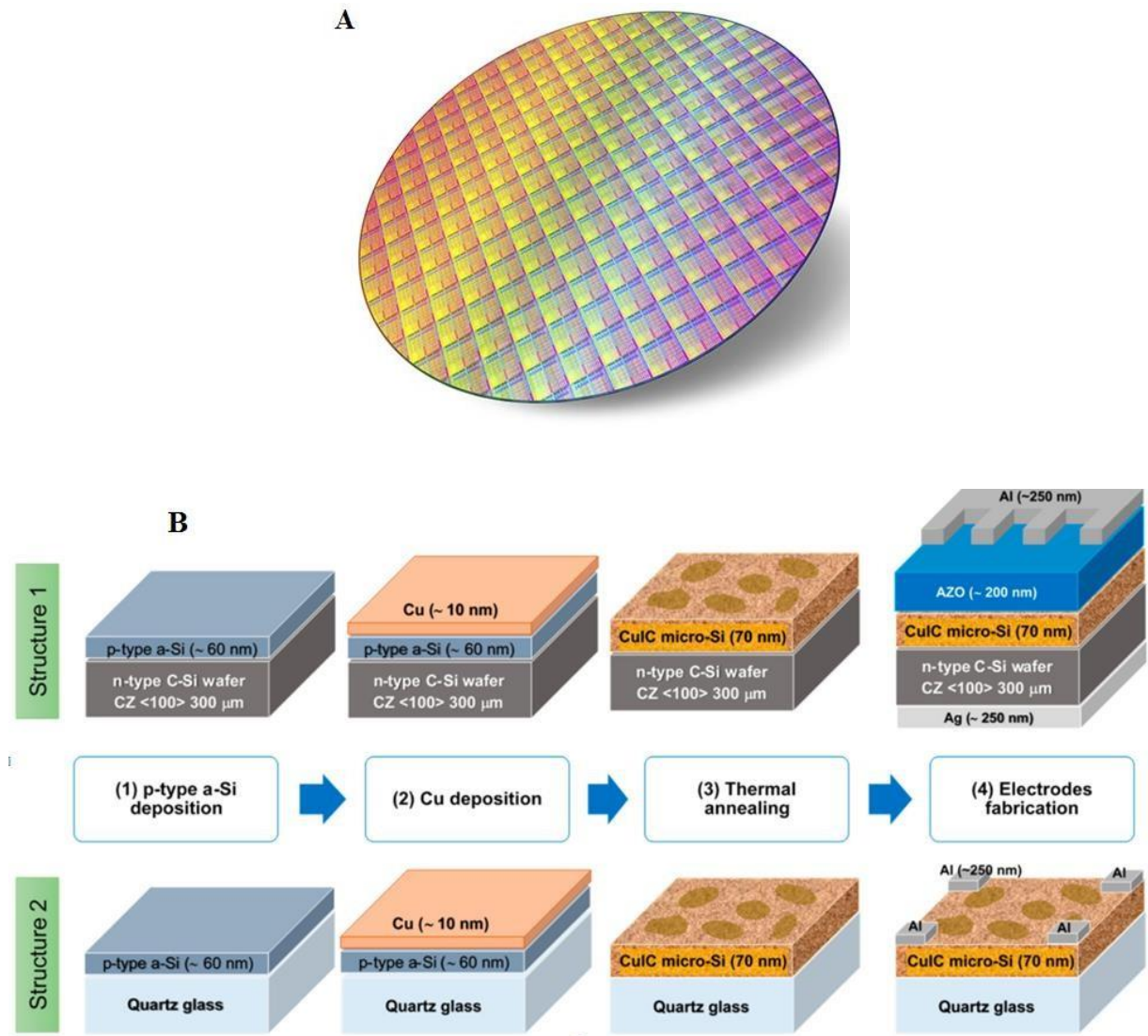


Figure 37. A) Plaquettes de silicium comportant plusieurs composants, B) discontinuité des couches minces pour la formation des composants[60].

II.6. La méthode d'homogénéisation

C'est une technique développée pour faciliter la modélisation du comportement mécanique des matériaux et des structures hétérogènes. Elle consiste à représenter la structure hétérogène comportant plusieurs matériaux comme un milieu homogène équivalent avec des propriétés effectives calculées à partir des propriétés des matériaux constitutifs. Elle peut également être utilisée pour estimer les gauchissements des revêtements de couches discontinues manière plus facile.

Cette technique consiste à déterminer un volume élémentaire représentatif (VER) pour ensuite déterminer ses propriétés équivalentes. Ce concept a été introduit dans la première fois par Hill[61] pour l'étude des matériaux hétérogènes.

La figure 38 représente un volume élémentaire représentatif (VER),

Le VER est défini par Hill comme un échantillon d'un matériau hétérogène qui doit satisfaire les deux conditions suivantes :

Englobent tous les éléments représentant la microstructure du matériau hétérogène à étudier. Comprennent un nombre adéquat de ces composants de manière à garantir que les propriétés moyennes correspondant au VER soient indépendantes des conditions aux limites appliquées, à condition que les produits restent homogènes macroscopiquement.

En résumé, il doit satisfaire à la relation $L_1 \gg L_2 \gg L_3$.

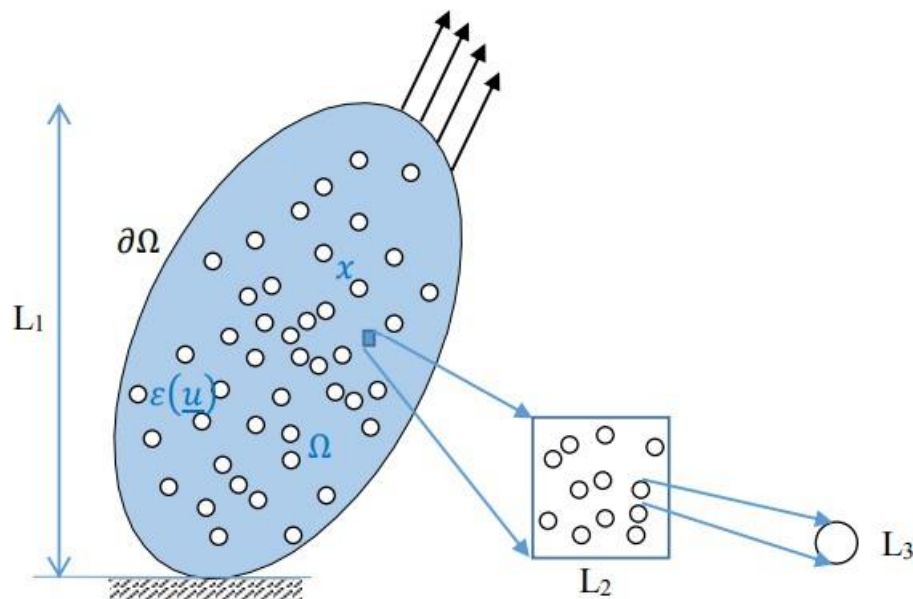


Figure 38. Schéma illustratif de la taille de VER[62].

La plupart des modélisations d'homogénéisation respectent les trois étapes suivantes :

- L'étape de représentation qui consiste à définir les phases constituant le matériau ou la structure, ainsi que leur distribution spatiale. Il est également important de décrire le comportement mécanique de chaque phase.
- L'étape de localisation qui consiste à modéliser le comportement mécanique du matériau ou de la structure à l'échelle microscopique. Cela permet de déterminer les relations entre les champs locaux, tels que les contraintes et les déformations, et les

grandeurs macroscopiques, telles que les modules d'élasticité et la conductivité thermique.

- L'étape d'homogénéisation qui consiste à appliquer des opérations de moyenne aux champs locaux afin d'obtenir les propriétés macroscopiques du matériau ou de la structure[70].

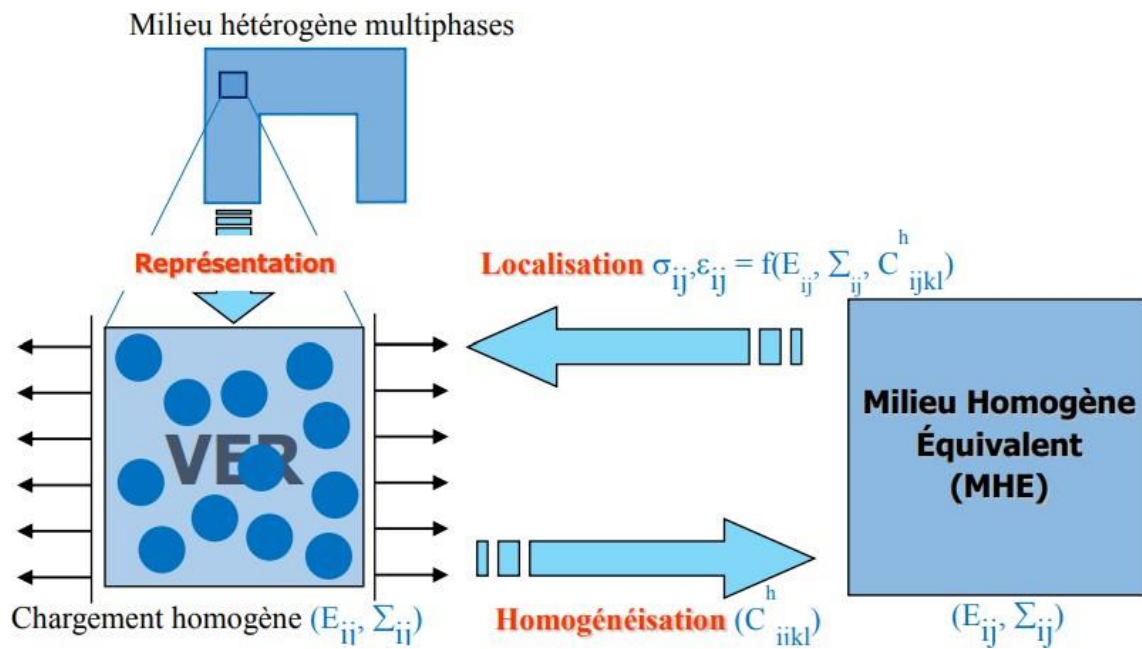


Figure 39. Les étapes de l'homogénéisation [63].

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique
du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de
couches minces.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

III.1 Introduction.

Les modélisations numériques constituent actuellement un outil fiable, rapide et peu onéreux mis à disposition des développeurs des nouveaux microcomposants électroniques. La modélisation par éléments finis (MEF) est largement employée dans les projets de développement des microcomposants électroniques.

La modélisation par éléments finis (MEF) permet l'analyse structurale sous différentes conditions. Elle facilite une optimisation rapide de la conception en adaptant la géométrie et en aidant au choix des matériaux.

La MEF est également utilisée pour simuler le processus de fabrication, anticiper les déformations et analyser la distribution des contraintes thermomécaniques dans les microcomposants. En contribuant à évaluer la fiabilité tout au long du cycle de vie, la MEF aide à identifier les potentielles zones de défaillance.

La modélisation numérique favorise également l'innovation en offrant un moyen efficace pour tester des idées novatrices et de personnaliser les conceptions sans nécessiter la fabrication de prototypes physiques fréquents, ce qui réduit les coûts des projets.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail les modèles numériques développés pour notre analyse. Cette section est cruciale pour comprendre les fondements de notre démarche et les outils que nous avons utilisés pour mener à bien cette étude.

Nous décrivons les différents modèles numériques que nous avons développés via le logiciel Abaqus afin de prédire le gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt utilisé comme base dans la fabrication d'une large gamme de microcomposants électroniques. Notre approche numérique peut se décomposer en deux parties :

Une première partie est consacrée à la présentation des modèles numériques visant à simuler le dépôt des couches minces sur le substrat. Les modèles présentés dans cette partie sont qualifiés de « Modèles Complets ». Ainsi, nous présentons notre contribution à la simplification de l'estimation numérique du gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt en étudiant l'effet des conditions thermiques de chargement. En effet, nous présentons une comparaison entre deux types de chargements, à savoir un chargement thermique complet reproduisant le plus fidèlement possible les conditions expérimentales, et un chargement équivalent représentant la dernière phase du chargement thermique réel. Des comparaisons avec des mesures expérimentales sont menées afin de valider notre approche numérique. Dans cette partie de l'étude, les effets de l'épaisseur de la couche métallique de Pt et les paramètres géométriques du détournement sont étudiés.

Dans une deuxième partie, nous présentons notre seconde contribution dans la simplification de l'estimation numérique du gauchissement d'un empilement Si/USG/Pt avec l'intégration des techniques d'homogénéisations dans les calculs numériques. Les modèles présentés dans cette partie sont qualifiés de « Modèles Homogénéisés ».

Pour chacun des modèles numériques développés, la nature de l'analyse sera détaillée, en spécifiant le type d'analyse que nous avons réalisé et en expliquant les résultats que nous cherchons à obtenir.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

Ce chapitre vise à fournir une base solide pour la compréhension de notre approche numérique, en exposant de manière exhaustive les éléments essentiels de notre démarche d'analyse.

III.2 Présentation de la plaquette de l'étude.

De nos jours, les systèmes multicouches de films minces sont largement utilisés dans l'industrie des microcomposants électroniques. L'empilement de l'étude se compose d'un substrat en Si sur lequel deux couches minces sont déposées. Une couche diélectrique en USG (Undoped silica glass) et une couche conductrice en Pt. La figure 40 montre une vue en coupe de l'empilement de l'étude.

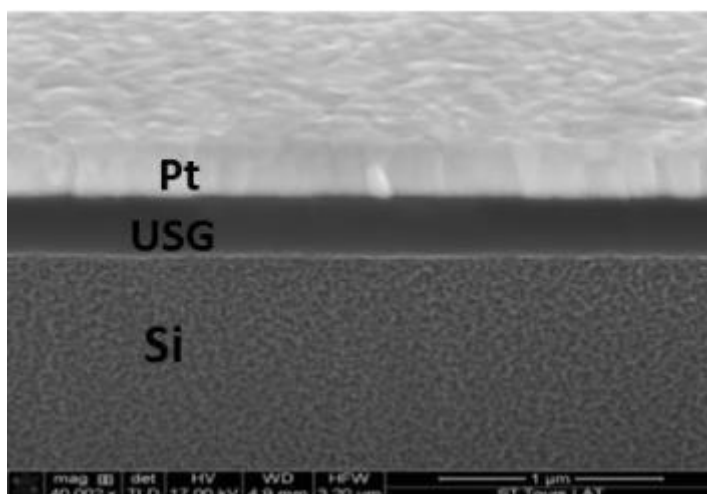


Figure 40. Observation MEB d'une vue en coupe transverse de l'empilement Si/USG/Pt [59].

L'empilement de l'étude se présente sous forme de plaquette de 150 mm de diamètre comme l'illustre la figure 41.



Figure 41. Plaquette de silicium revêtue de couches minces [64].

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

III.3 Présentation des modèles numériques développés

III.3.1 Modèles complets

Le processus de dépôt des couches minces sur un substrat en Si de 150 mm de diamètre a été simulé par la méthode éléments finis (EF) avec le logiciel ABAQUS. Dans ce modèle, nous cherchons à reproduire le plus fidèlement possible les conditions expérimentales afin de valider notre approche numérique via une comparaison de nos résultats numériques avec ceux obtenus expérimentalement. Les modèles complets comportent les trois couches Si/USG/Pt comme présentée par la figure 40.

III.3.2 Géométries des modèles.

L'empilement de l'étude se compose d'un substrat en Si (silicium) d'une épaisseur de 500 μ m, d'un film diélectrique en USG (Undopped silica glass) d'une épaisseur de 400nm et un film métallique en Pt (platine) d'une épaisseur qui varie entre 100nm à 300nm. La figure 42 montre une vue en coupe de l'empilement avec les dimensions des différentes couches.

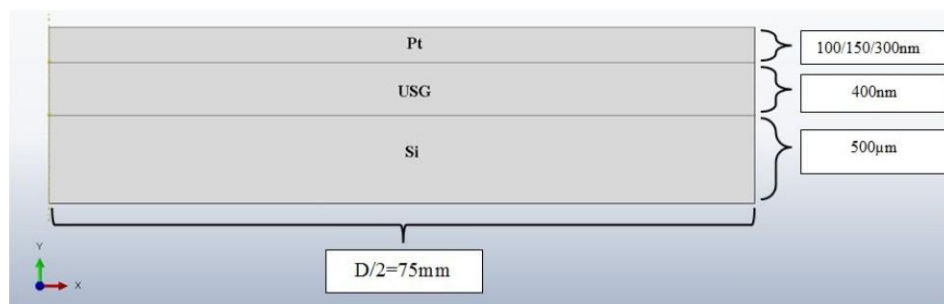


Figure 42. Géométrie du modèle étudié.

III.3.3 Propriétés mécanique des matériaux

Pour le substrat, le silicium monocristallin est largement employé dans l'industrie microélectronique grâce à ses multiples atouts. Il répond parfaitement aux exigences croissantes de la technologie moderne tout en offrant une rentabilité satisfaisante. Le Si présente d'excellentes propriétés thermiques et constitue un support mécanique optimal pour l'application de couches minces. Dans la littérature, le silicium monocristallin est généralement considéré comme un matériau isotrope, doté de propriétés indépendantes de la température. Le tableau 3 donne une compilation des propriétés élastiques du Si issue de la littérature.

Matériau	E(GPa)	ν	α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	références
Si (isotrope)	130	0.28	2.6	[65]
	131	0.28	2.8	[66],
	160	0.22	2.8	[67],[68],[69]
	169	0.063	2.8	[70],[59]
	169	0.28	2.3	[71]

Tableau 3. Propriétés élastiques du silicium monocristallin.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

Dans le cadre de cette thèse les propriétés du silicium et les films minces déposés sont considérées indépendantes de la température imposée par le chargement thermique. Ce choix s'est effectué dans une logique de simplification des modèles numériques visant ainsi à réduire les temps de calcul. Les propriétés élastiques utilisées dans nos simulations numériques sont celles qui ont été utilisées dans les travaux de thèse de Yao et al [70] à savoir 169GPa pour le module de Young, 0,063 pour le coefficient de Poisson et $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour le coefficient de dilatation thermique.

L'USG est utilisée comme une couche de passivation pour isoler les parties conductrice.

Le tableau 4 donne des propriétés de l'USG tirées de la littérature. Les propriétés élastiques utilisées dans la présente étude sont celle de Yao et al[70].

Matériau	E(GPa)	ν	$\alpha (10^{-6}/^\circ\text{C})$	références
USG	60±0.2	0.25±0.01	2.67	[72]
	75/79	0.25	1.57	[73]
	94	0.17	0.5	[59]
	79,06±5,56	-	-	[74]
	86-102	-	-	[75]
	71.3	0.17	0.5	[70]

Tableau 4. Propriétés élastiques de l'USG.

Le film mince en platine est couramment utilisé dans l'industrie des microcomposants électroniques comme conducteur pour ces excellentes propriétés mécaniques et thermiques. Dans le tableau 5, les propriétés du platine issues de la littérature sont présentées. Les propriétés élastiques de Pt utilisée dans la présente étude sont celle de Yao et al[70].

Matériau	E(GPa)	ν	$\alpha (10^{-6}/^\circ\text{C})$	références
Pt	171	0.39	6	[76]
	173	-	-	[77]
	160	-	-	[68]
	177	0.39	9	[70],[59]

Tableau 5. Propriétés élastiques du platine.

III.3.4 Maillage des modèles.

Le principe fondamental de la simulation par éléments finis repose sur la création d'un maillage. Le choix du maillage revêt une importance cruciale car la précision de la solution dépend en grande partie de lui.

Dans notre modèle, nous avons testé un maillage par défaut mais ce type de maillage provoque des problèmes au niveau des surfaces de contact, ce qui peut entraîner des problèmes de divergences durant les calculs. Nous avons donc opté pour un maillage ciblé et raffiné au niveau des zones de contact (figure 43).

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

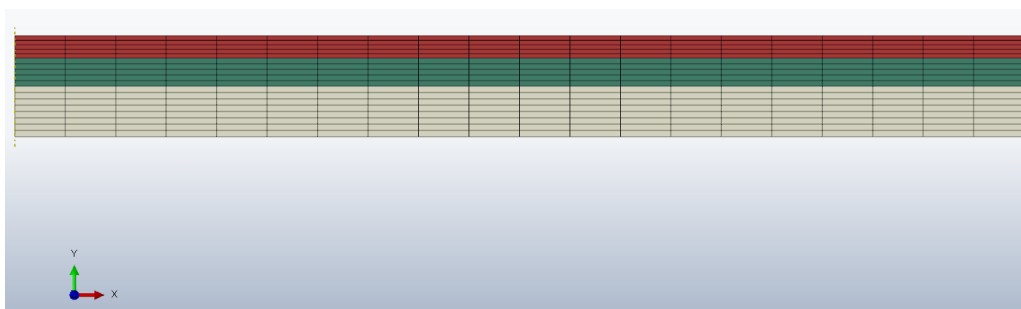


Figure 43. Maillage des couches déposées.

Nous avons choisi d'utiliser un maillage structuré avec des éléments quadratiques de type CAX4R pour l'ensemble de la géométrie afin de maintenir une cohérence appropriée entre les dimensions des éléments de maillage des couches déposées.

Ces éléments rectangulaires à quatre nœuds intègrent la symétrie cylindrique (AX) et utilisent un unique point de Gauss (R).

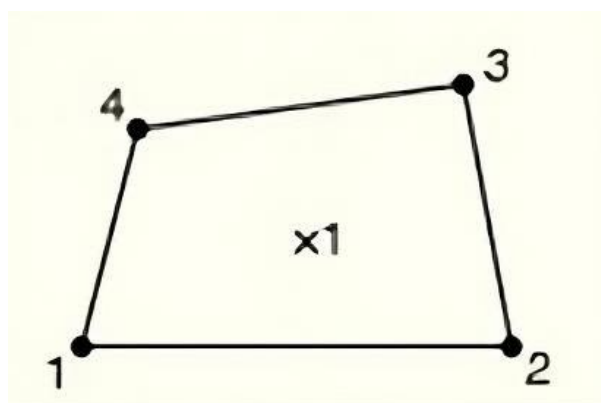


Figure 44. Éléments d'intégration réduits à 4 nœuds CAX4R[78].

Après une étude de sensibilité au maillage, le nombre d'éléments dans les trois modèles (Si/USG/Pt100nm ; Si/USG/Pt150nm ; Si/USG/Pt300nm) est fixé à 22500 éléments pour un total de nœuds de 26271.

III.3.5 Conditions de chargement, aux limites et contact.

Pour modéliser les étapes de dépôt des différentes couches minces de l'empilement, une analyse 2D axisymétrique a été choisie. Les contraintes et les déformations intrinsèques sont supposées nulles, la seule déformation considérée c'est la déformation thermique. Le contact entre les surfaces des couches empilées est considéré comme étant parfait (Tie constraint). Ce choix est utilisé pour empêcher le délaminage des couches déposées. Les conditions aux limites consistent à bloquer le déplacement de l'empilement suivant l'axe Y et la rotation autour de l'axe X, comme l'illustre la Figure 45.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

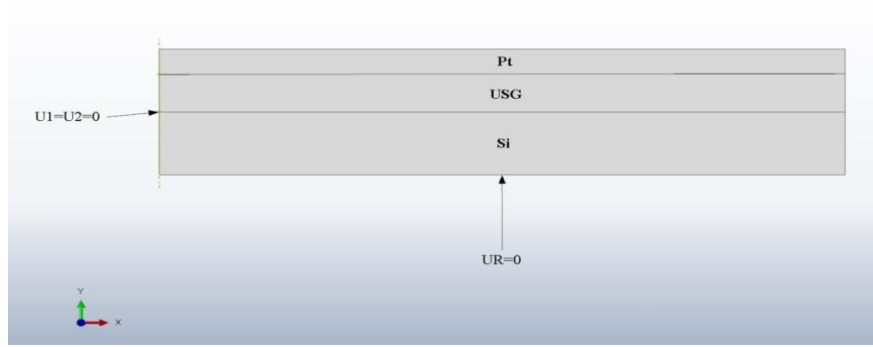


Figure 45. Les conditions aux limites appliquées au modèle complet.

III.4 Contribution dans la simplification du chargement thermique

III.4.1 Simplification du chargement thermique.

Le processus de dépôt des deux couches minces (USG et Pt) sur le substrat en silicium (Si) se fait en plusieurs étapes. Chacune des étapes est caractérisée par une température de dépôt et un refroidissement comme l'illustre la figure 46. Nous appliquons sur notre premier modèle éléments finis le chargement complet qui reflète les conditions réelles de fabrication. Nous relevons à des instants définis le gauchissement de la plaquette en suivant l'ordre suivant :

- Le substrat en silicium à 22 °C est chauffé jusqu'à atteindre une température de 400 °C. A la fin de cette phase de chargement, nous relevons le gauchissement du substrat, qui sera utilisé comme état initial pour la phase de dépôt de la couche d'USG.
- Une fois que le substrat atteint la température de 400 °C, nous procédons à l'activation de la couche USG pour simuler le dépôt. Ensuite, nous simulons un refroidissement de l'ensemble jusqu'à la température ambiante de 22 °C. A la fin de cette phase de chargement thermique, le gauchissement de la bicouche Si/USG est relevé et utilisé comme condition initiale de la phase suivante qui consiste à simuler le dépôt de la couche de platine.
- La bicouche Si/USG est chauffée de la température ambiante de 22 °C jusqu'à la température de dépôt de la couche de métallisation en Pt de 450 °C. Une fois que la bicouche atteint les 450 °C, la couche de platine est activée pour simuler son dépôt
- Un refroidissement de l'empilement Si/USG/Pt est simulé passant de la température de 450 °C à la température ambiante de 22 °C. Le gauchissement final est relevé à la fin de ce cycle de chargement.

Cette approche numérique, très proche des conditions expérimentales, nous permet de déterminer le gauchissement de l'empilement à chaque étape du processus de dépôt de manière précise. Cependant, il est important de noter que cette approche est très coûteuse en termes de temps de calcul. Pour remédier à ces difficultés, nous avons développé une approche simplificatrice pour réduire les coûts de calculs. Cette approche simplificatrice consiste à simuler la dernière phase du cycle thermique) savoir le dernier refroidissement de l'ensemble Si/USG/Pt de 450 °C jusqu'à la température ambiante de 22 °C. Cette proposition de simplification se base sur le fait que chaque échauffement de l'empilement conduit à une

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

relaxation des contraintes et c'est plutôt le refroidissement qui est responsable du gauchissement de l'empilement. Des comparaisons entre les résultats obtenus par les deux chargements (cycle complet/dernier refroidissement) sont présentées dans le quatrième chapitre et valident notre proposition de simplification.

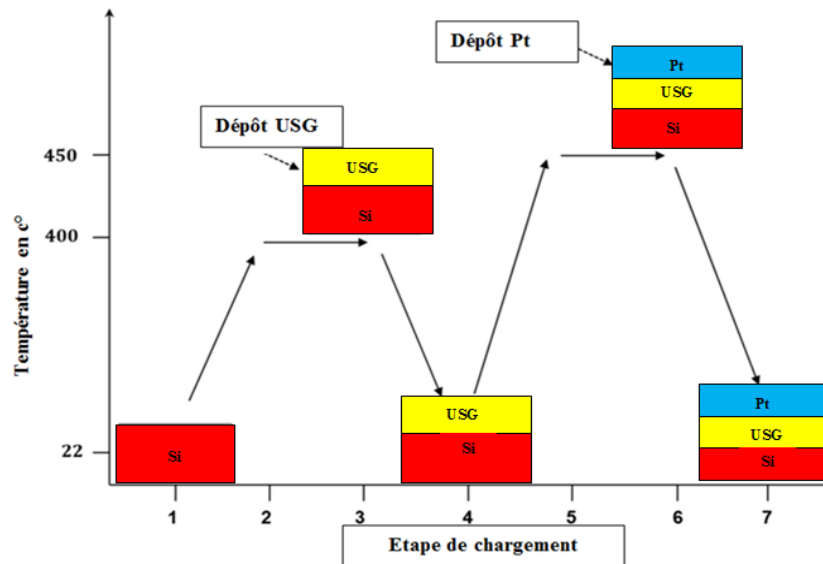


Figure 46. Les étapes du chargement thermique cycle complet.

III.4.2 Intégration de l'homogénéisation

La modélisation par éléments finis des empilements, qui incluent des couches de différentes épaisseurs, généralement de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, constitue un défi majeur pour les développeurs de nouveaux microcomposants en raison des coûts et des temps réservés aux calculs. Cependant, pour relever ce défi, les développeurs se tournent vers des approches simplificatrices dont la technique d'homogénéisation. L'homogénéisation consiste à remplacer un milieu hétérogène par un milieu homogène équivalent, permettant ainsi de dériver les lois de comportement des microstructures à partir des données à l'échelle des microstructures.

L'homogénéisation de l'empilement composé de plusieurs couches minces a pour but de déterminer le gauchissement de la plaquette lors d'un chargement thermique. Le choix de cette technique de prédiction est basé sur l'hypothèse selon laquelle les matériaux sont purement élastiques et isotropes. Les propriétés équivalentes sont supposées transversalement isotropes.

L'empilement de l'étude, Si/USG/Pt a été employé pour décrire la méthodologie de l'homogénéisation par EF. Les matériaux homogénéisés sont l'USG et le Pt. Le choix de ces deux matériaux est dicté par leurs épaisseurs relativement comparables et largement inférieures à celui du Silicium. La figure 47 illustre le modèle complet et le modèle homogénéisé équivalent.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

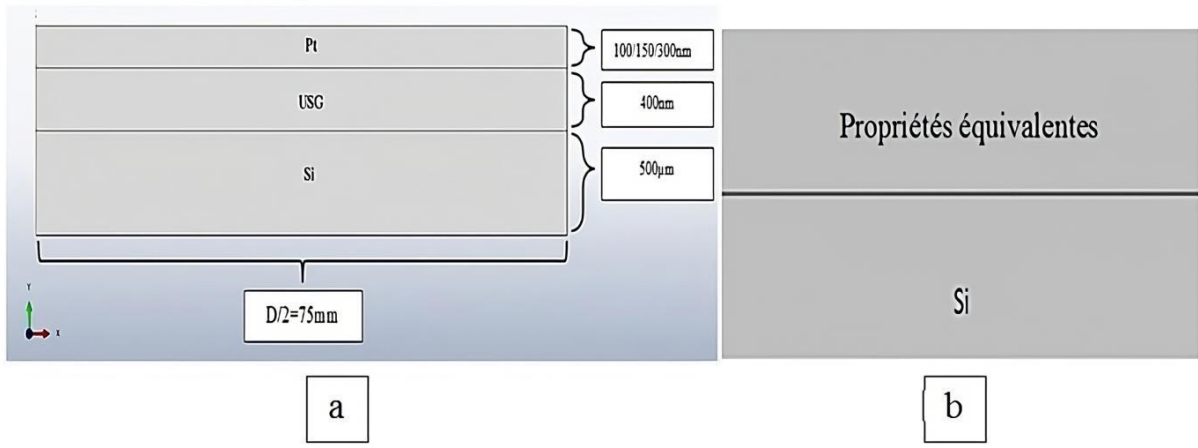


Figure 47. (a) Modèle complet et (b) modèle homogénéisé équivalent.

Dans son étude, Yao [70] a utilisé la modélisation par éléments finis pour déterminer les propriétés mécanique équivalentes du modèle homogénéisé. Ce choix, nécessite encore une fois de réaliser des simulations numérique et d'y passer du temps. Pour plus de simplification, nous avons opté pour une homogénéisation basée sur les lois des mélanges [79]. Les calculs par les lois des mélanges, très largement employées dans l'homogénéisation des structures composites, nous ont permis de déterminer les propriétés équivalentes des deux couches déposées (USG+Pt) sur le substrat en silicium.

Le module de Young longitudinal [80]:

$$E_{1,2} = (E_{Pt} * V_{Pt}) + (E_{USG} * V_{USG}) \quad (1)$$

Avec :

E_{Pt} Module de Young du Platinium.

E_{USG} Module de Young de l'USG.

V_{Pt} La fraction volumique du Pt.

V_{USG} La fraction surfacique de l'USG.

Le module de Young transversale [80]:

$$\frac{1}{E_3} = \frac{V_{Pt}}{E_{Pt}} + \frac{V_{USG}}{E_{USG}} \quad (2)$$

Les coefficients de Poisson équivalents :

$$\nu_{12} = (V_{Pt} * \nu_{Pt}) + (V_{USG} * \nu_{USG}) \quad (3)$$

$$\frac{E_3}{\nu_{23}} = \frac{E_1}{\nu_{12}} \quad (4)$$

Avec :

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

V_{Pt} : fraction volumique du Pt.

V_{USG} : fraction volumique de l'USG.

ν_{Pt} , ν_{USG} : coefficients de Poisson du Pt et USG.

Les modules de cisaillements longitudinaux :

$$G_{12} = \frac{E_1}{2 * (1 + \nu_{12})} \quad (5)$$

Avec :

E_1 : module de Young équivalent.

ν_{12} : coefficient de Poisson.

Les modules de cisaillements transversaux :

$$G_{13}, G_{23} = \frac{E_3}{2 * (1 + \nu_{23})} \quad (6)$$

Avec :

E_3 : module de Young équivalent.

ν_{13} : coefficient de Poisson.

Les coefficients de dilatations thermiques

Nous avons utilisé l'expression proposée par Shapery et al[81], pour calculer le coefficient de dilatation thermique longitudinal de notre modèle. Il est important de noter que cette expression est applicable uniquement lorsque les matériaux présentent un comportement élastique linéaire.

Le coefficient de dilation thermique longitudinal selon shapery et al [81] s'écrit comme suit :

$$\alpha_{1,2} = \frac{E_{Pt}\alpha_{Pt}V_{Pt} + E_{USG}\alpha_{USG}V_{USG}}{E_{Pt}V_{Pt} + E_{USG}V_{USG}} \quad (7)$$

Avec :

$\alpha_{1,2}$ Coefficient de dilatation thermique longitudinal.

E_{Pt} E_{USG} Module de young du Pt et USG.

α_{Pt} α_{USG} Coefficient de dilatation thermique du P et USG.

V_{Pt} V_{USG} Fraction volumique du Pt et USG.

Pour la détermination du coefficient de dilatation thermique transversal nous avons utilisé l'expression suivante [82]:

$$\alpha_3 = (\alpha_{USG}\sqrt{V_{USG}} + (1 - \sqrt{V_{USG}}) + (1 + \frac{V_{USG}\nu_{Pt}E_{USG}}{E_{12}}) \alpha_{Pt}) \quad (8)$$

Avec :

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

$$E_{12} = E_{Pt}V_1 + E_{USG}V_{USG}$$

Les propriétés équivalentes obtenues par le processus d'homogénéisation sont présentées dans le Tableau 6.

	Pt (100 nm)	Pt (150nm)	Pt (300nm)
$E_1, E_2(\text{GPa})$	110.600	116.660	129.430
$E_3(\text{GPa})$	103.740	107.800	117.924
ν_{12}, ν_{13}	0.214	0.23	0.26
ν_{23}	0.2	0.212	0.23
$G_{12}, G_{13}(\text{GPa})$	45.551	47.430	51.360
$G_{23}(\text{GPa})$	43.225	44.472	47.930
$\alpha_1, \alpha_2 (10^{-6}/^\circ\text{C})$	3.22	4.02	5.47
$\alpha_3 (10^{-6}/^\circ\text{C})$	4.31	4.96	6.08

Tableau 6. Les propriétés équivalentes du matériau homogénéisé équivalent.

III.4.3 Type de l'analyse.

Pour des raisons de simplicité, nous avons fait le choix d'une approche statique. Ce type d'analyse permet de prédire les contraintes, les déformations et les déplacements thermomécaniques d'une manière simple et efficace.

III.5 Résultats recherchés (déplacement à 68 mm).

Le déplacement maximal obtenu par les différents modèles est la principale grandeur recherchée. En effet, le gauchissement des plaquettes se manifeste par une déflexion de la plaquette le long de l'épaisseur de l'empilement. Le déplacement maximal sera comparé avec des mesures expérimentales afin de valider notre approche numérique. Les mesures expérimentales menées par Yao et al [59] sont faites sur une machine sans contact de type MX 203, E + H Metrology Inc. Cet instrument est composé de deux têtes de sonde, l'une supérieure et l'autre inférieure, qui sont reliées par un bras oscillant. Les deux têtes de sonde sont équipées de 33 capteurs de distance capacitifs disposés en cercle autour du bord de la plaquette. Le capteur le plus proche du bord de la plaquette est situé à 68 mm du centre de la plaquette comme illustre la figure 48 [59]. Pour une meilleure comparaison avec l'expérimentation, nous relevons notre déplacement obtenu numériquement à 68 mm du centre de la plaquette.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

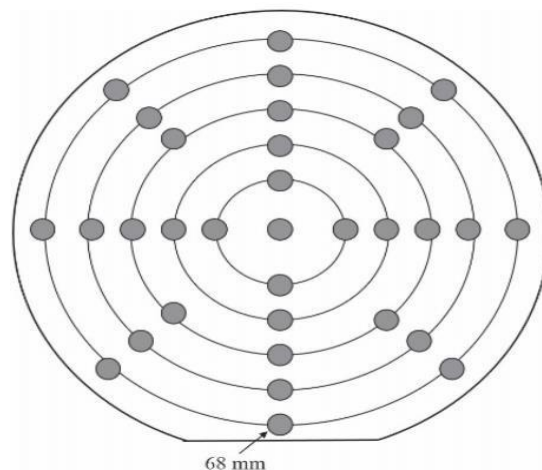


Figure 48. Position des points de mesure dans la plaquette [59].

La distribution des contraintes et des déformations dans les différentes couches sera également présentée afin d'identifier les zones à haut risque de rupture.

III.6 Effets observés.

III.6.1 Effet de l'épaisseur du film Pt.

Les mesures expérimentales du gauchissement des plaquettes de silicium montrent une sensibilité non négligeable de l'épaisseur de Pt sur la déflexion maximale.

Ainsi, nous avons analysé l'effet de la variation de l'épaisseur de platine sur le gauchissement total. Pour une meilleure comparaison avec l'expérimentation, nous avons modélisé le platine avec trois épaisseurs différentes, 100 nm, 150 nm et 300 nm.

III.6.2 Effet du type de chargement thermique (cycle complet VS dernière étape du cycle)

Notre première contribution dans la simplification de l'approche numérique utilisée dans l'estimation du gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt réside dans la simplification du chargement thermique. En effet, au lieu d'appliquer le cycle complet de chargement thermique, nous nous contentons d'appliquer la dernière phase de ce dernier. Cette simplification est basée sur le fait que chaque échauffement conduit à une relaxation des contraintes et par conséquent une diminution du gauchissement. Nous estimons que le dernier refroidissement est le principal responsable du gauchissement final. Notre hypothèse simplificatrice sera validée par la comparaison des résultats obtenus via les deux approches à savoir un chargement complet et un chargement représentant la dernière phase de refroidissement. Cette approche permet de réduire considérablement le temps de calcul ainsi que les difficultés de la modélisation.

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

III.6.3 Effet de l'homogénéisation

Après avoir adopté l'approche d'homogénéisation dans notre étude, nous avons constaté l'effet simplificateur de cette approche, ce qui rend la modélisation de nos modèles numériques plus facile et moins coûteuse en termes de matériel et de temps de calcul. Cela la rend prometteuse pour le développement de l'industrie de fabrication des microcomposants électroniques. Une comparaison entre les gauchissements obtenus par le modèle complet et le modèle homogénéisé équivalent est présentée dans le quatrième chapitre.

III.6.4 Effet du Détourage (effet de la largeur et de l'épaisseur du matériau enlevé).

Le détourage des empilements est un processus consistant à retirer une petite quantité de matière du bord d'une couche mince à l'aide d'une scie circulaire, comme illustré par la figure 49.

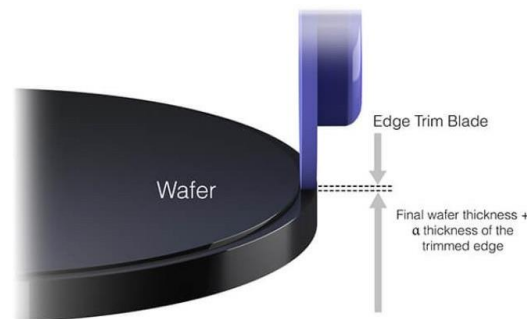


Figure 49. Processus du détourage avec une scie circulaire [29].

Pour optimiser les paramètres de détourage, Yamamoto et al[30] ont évalué la hauteur du bourrelet de bord et la largeur de la couche adhésive appliquée sur la plaquette de dispositif. En mesurant la forme de surface de la plaquette en verre au niveau du bord, ils ont constaté que la plaquette sans détourage présentait une déflexion plus importante que celle avec détourage. La figure 50 montre un pic de déflexion environ 2.3 mm du bord de la plaquette.

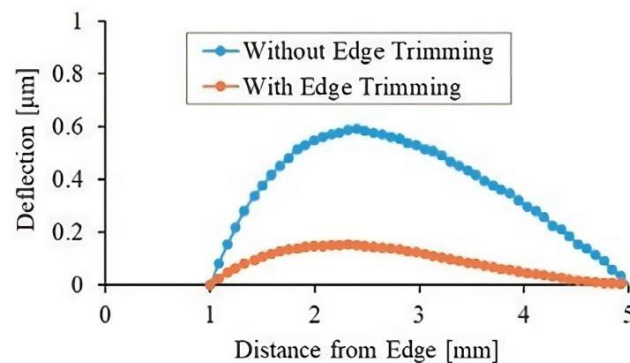


Figure 50. La déflexion de la surface de la plaquette en verre dans la plage de 1 mm à 5 mm du bord [30].

Chapitre III : Contribution dans l'estimation numérique du gauchissement des plaquettes de silicium revêtues de couches minces.

Pour étudier l'effet de détournage sur le gauchissement de notre empilement Si/USG/Pt nous avons modélisé un détournage pour la dernière couche de notre empilement comme l'illustre la figure 51.

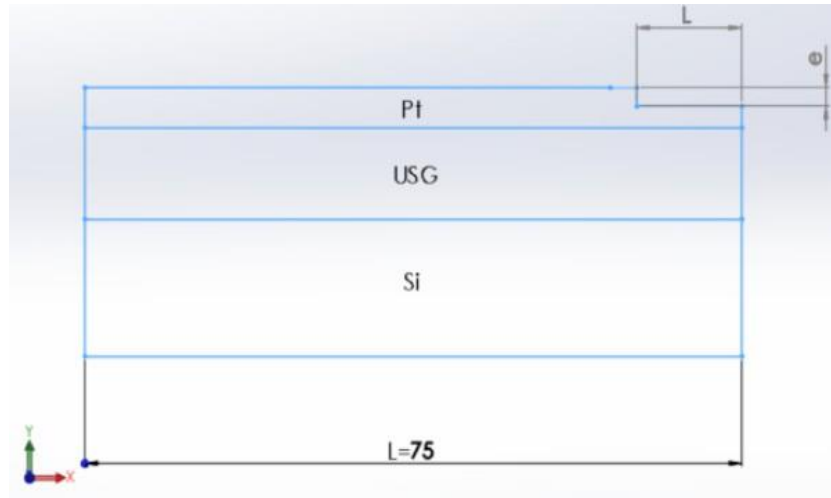


Figure 51. Modèle géométrique avec enlèvement de matière.

Nous avons fait varier deux paramètres, la longueur (l) et l'épaisseur (e), comme indiqué dans le tableau 7. Pour chaque longueur du matériau retiré, nous avons modifié l'épaisseur. Il est à noter que, dans un souci d'uniformité des modèles, la variation de l'épaisseur du matériau retiré est exprimée en pourcentage de l'épaisseur de la couche de Pt. Il convient de rappeler que nous avons simulé trois épaisseurs de Pt (100, 150 et 300 nm).

Longueur du matériau enlevé L (mm)	1	2	5	7
e1 [% de l'épaisseur du Pt]	0			
e2 [% de l'épaisseur du Pt]	25			
e3 [% de l'épaisseur du Pt]	50			
e4 [% de l'épaisseur du Pt]	75			
e5 [% de l'épaisseur du Pt]	100			

Tableau 7. Paramètres géométriques de la partie de Pt enlevée.

Nous avons réalisé une étude comparative entre le gauchissement avec et sans modifications géométriques. Pour chaque épaisseur de Pt (100, 150 et 300 nm), nous avons fait varier la longueur et l'épaisseur du matériau retiré. Le gauchissement obtenu par le modèle sans enlèvement de matière a servi de référence pour les comparaisons.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents aspects liés à la modélisation et à l'analyse thermomécanique de la plaquette.

Après avoir présenté l'empilement de l'étude Si/USG/Pt et les modèles numériques développés sous le logiciel Abaqus, nous avons discuté notre contribution à la simplification de l'approche numérique. Ainsi, notre contribution dans la simplification de l'approche

numérique s'est faite à deux niveaux. Le premier niveau consistait à simplifier le chargement thermique en remplaçant le cycle thermique complet par la dernière phase de refroidissement. La deuxième contribution consistait à introduire la méthode d'homogénéisation afin de remplacer les deux couches minces USG/Pt par une seule couche fictive équivalente. Les propriétés élastiques de ce matériau équivalent sont calculées par les lois de mélanges très largement employées pour modéliser les matériaux composites. Nous avons également modélisé l'opération de détournage afin d'évaluer son impact sur le gauchissement.

Chapitre IV : Résultats et discussions.

Chapitre IV : Résultats et discussions.

IV.1. Introduction

Cette partie de l'étude consiste à présenter les différents résultats numériques obtenus. Le déplacement vertical de la plaquette, également qualifié de déflexion ou de gauchissement dans le présent rapport est le principal paramètre présenté et discuté. Utile de noter que d'autres résultats concernant la répartition des contraintes équivalentes dans l'empilement de l'étude sont présentés dans la partie annexe.

Les résultats résumés dans cette partie sont devisés en quatre parties:

- Une première partie qui consiste à valider l'approche numérique par des comparaisons avec l'expérimentation. L'effet de l'épaisseur de la couche mince en Pt sur la déflexion de la plaquette est également présenté.
- Notre contribution dans la simplification du chargement thermique pour alléger les modèles numériques est présentée dans la deuxième partie. Des comparaisons des résultats obtenus par le chargement thermique complet et le chargement simplifié sont présentées et discutées.
- L'effet de détournage sur la réduction de la déflexion des plaquettes est présenté et commenté dans la troisième partie.
- Une dernière partie consiste à présenter une deuxième simplification basée sur l'homogénéisation. Dans cette partie, les résultats obtenus par le modèle complet et son équivalent homogénéisé sont discutés.

IV.2. Validation de l'approche numérique et effet de l'épaisseur de la couche mince en Pt

Les résultats présentés dans cette partie sont utilisés pour deux fins :

- La validation de notre approche numérique par la comparaison des résultats obtenus numériquement avec ceux issus de l'expérimentation.
- L'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche de métallisation sur le gauchissement de la plaquette.

Pour la validation de notre approche numérique, nous avons modélisé une plaquette de silicium revêtues de deux couches minces (USG et Pt) dont la géométrie et les dimensions sont identiques à celles de l'échantillon utilisé pour l'expérimentation menée par Yao, et al[59].

La figure 52 montre la déflexion de la plaquette de silicium pour les trois épaisseurs de la couche mince en Pt. On constate que les trois modèles présentent les mêmes répartitions du déplacement. Le déplacement maximal est enregistré sur le périmètre extérieur de la plaquette.

La figure 53 présente une comparaison entre le gauchissement mesuré et celui obtenu numériquement pour trois épaisseurs différentes de la couche mince en Pt. On peut constater que les deux courbes présentent la même allure. Les valeurs numériques du gauchissement sont légèrement supérieures à celles mesurées expérimentalement. Cette différence est principalement due au fait que nos modèles numériques ne prennent pas en compte les

contraintes intrinsèques induites pendant le processus de dépôt de film mince. Ces contraintes de compression ont tendance à s'opposer à la déflexion des plaquettes. En plus de cette première cause, nous pouvons ajouter l'effet des propriétés mécaniques introduites dans les simulations. Des simplifications ont été choisies pour alléger les modèles numériques, ainsi, le silicium monocristallin anisotrope réellement est modélisé comme étant un matériau isotrope. Nous considérons qu'une légère différence entre les résultats estimée à une moyenne relative de 16,40 % demeure acceptable pour valider notre modèle numérique d'autant plus que notre objectif consiste à comparer des modèles qui introduisent des modifications géométriques à la plaquette.

Pour l'effet de l'augmentation de l'épaisseur de la métallisation en Pt sur le gauchissement de la plaquette, on constate sur la même figure que plus la couche de métallisation est épaisse plus le gauchissement est important. Ainsi, par rapport à une plaquette sans couche de Pt on constate qu'une plaquette avec une couche de Pt de 100 nm provoque une augmentation de la déflexion de 10%, une plaquette de 150 nm de Pt provoque une augmentation de 22% de la déflexion tandis qu'une plaquette de 300 nm de Pt provoque une augmentation de la déflexion de 57%. Il est utile de souligner que la valeur la plus importante de la déflexion est de 57,5 μm et elle est obtenue avec une couche de Pt de 300 nm. A l'échelle des microcomposants électroniques, cette valeur visiblement faible, peut provoquer de gros dégâts lors de la fabrication, notamment les difficultés pour les robots de manipuler les plaquettes et la distribution non régulières des couches minces qui seront déposées sur l'empilement de l'étude.

Il est également important de signaler que le gauchissement maximal (sur les légendes de la figure 52) est légèrement supérieur à celui présenté par les courbes de la figure 55. En effet, les valeurs numériques présentées par la figure 53 concernent le déplacement mesuré à 68 mm du centre de la plaquette car c'est dans cet endroit que des sondes sont utilisées pour relever le déplacement dans les mesures expérimentales (paragraphe III.5 chapitre III).

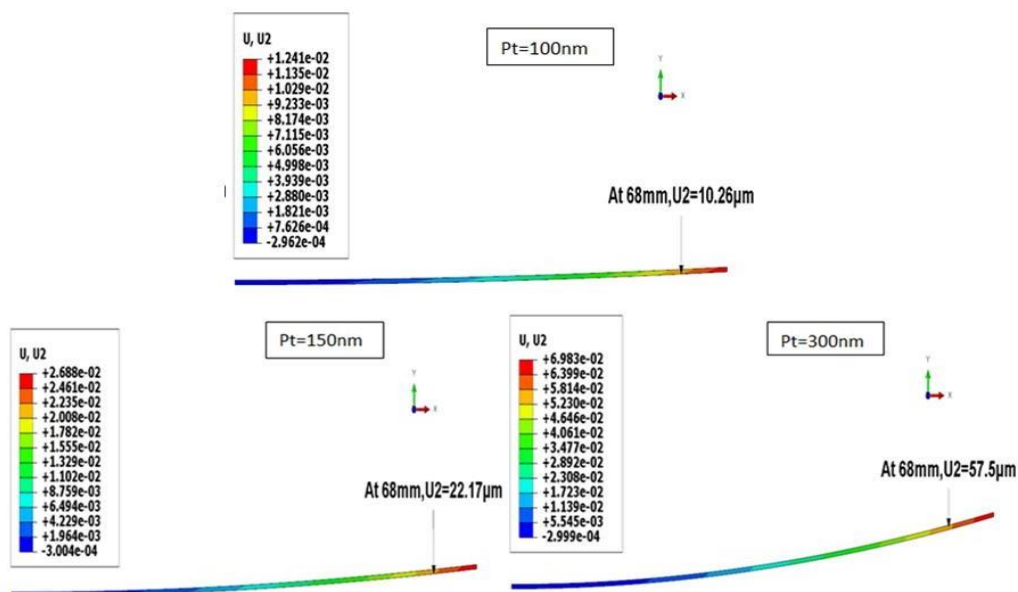


Figure 52. Gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt.

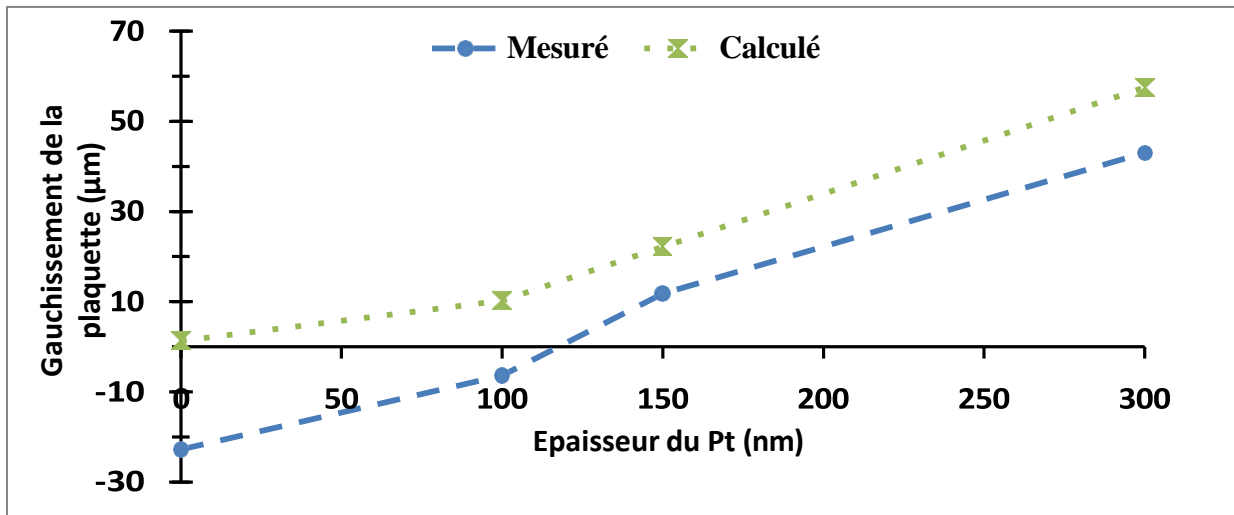


Figure 53. Comparaison entre le gauchissement mesuré expérimentalement [78] et celui estimée numériquement.

Cette première partie des résultats est très intéressante sur plusieurs plans :

- Elle permet de valider notre approche numérique par des comparaisons « numériques expérimentales ».
- Elle montre l'effet non négligeable du dépôt de couches minces métalliques sur la courbure (gauchissement) des plaquettes.
- Elle met en évidence la sensibilité de la courbure des plaquettes à l'épaisseur de la couche métallique en Pt.

Notre modèle numérique étant validé, nous allons l'utiliser pour étudier les effets de la simplification du chargement thermique, du détournage ainsi que la simplification numérique basée sur l'homogénéisation.

IV.3. Simplification du chargement thermique imposé

Dans une logique de simplification, nous avons étudié l'effet de la simplification du chargement thermique complet qui comporte plusieurs phases de chauffe et de refroidissement en un chargement simple qui ne prend en considération que la dernière phase de refroidissement (paragraphe III.4.1). Pour rappel, le cycle complet utilisé dans le modèle complet consiste à reproduire rigoureusement les phases de chauffe et de refroidissement utilisées dans la réalisation de l'empilement. Cette approche est très lourde en termes de modélisation et consomme beaucoup de temps en calcul puisqu'elle nécessite l'activation des couches durant le calcul (Figure 46). La simplification du type de chargement permet de passer de sept étapes de calcul à une seule étape. Nous avons étudié l'effet de simplification du chargement pour les trois épaisseurs de Pt. Les figures 54 et 55 montrent la distribution de la déflexion dans les plaquettes de silicium pour les trois épaisseurs de Pt avec les deux chargements thermiques. Nous pouvons constater que la distribution du déplacement est la même quel que soit le chargement thermique utilisé. Cette remarque demeure constante quel que soit l'épaisseur de Pt modélisé. Les valeurs maximales de déflexion sont obtenues sur le

périphérique extérieur des plaquettes pour l'ensemble des cas présentés. Nous pouvons donc conclure que la simplification du chargement thermique complet en un chargement simplifié ne comportant que la dernière phase de refroidissement ne présente aucun effet sur les zones de fortes valeurs de déplacement.

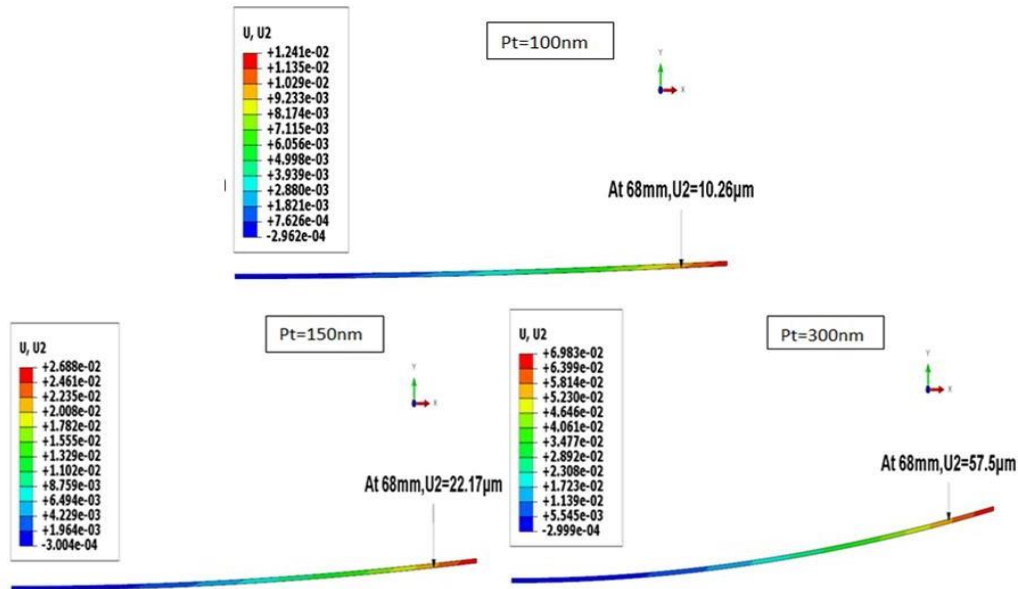


Figure 54. Gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt obtenu avec le cycle thermique complet.

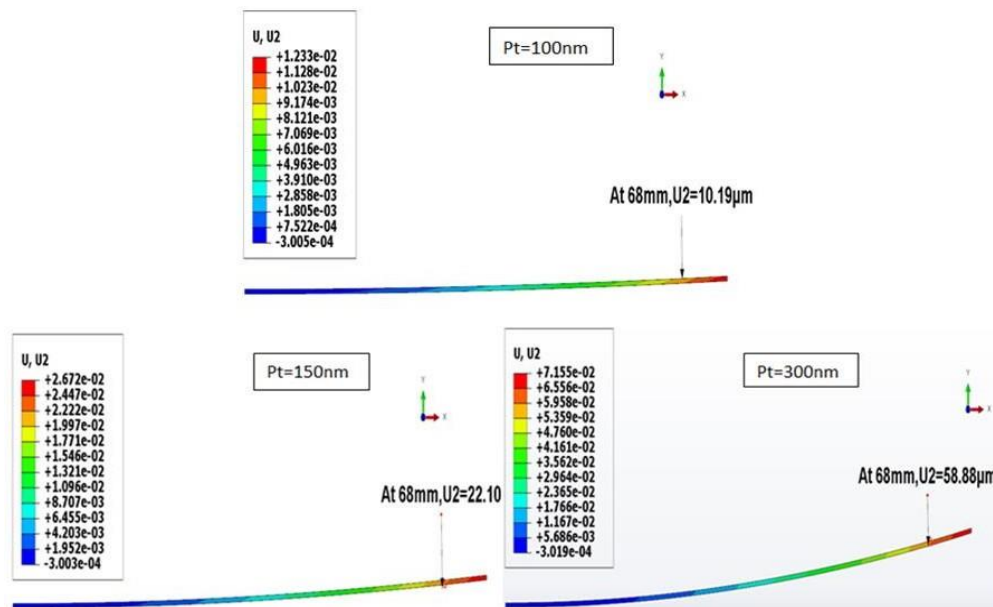


Figure 55. Gauchissement de l'empilement Si/USG/Pt obtenu avec la dernière étape du cycle thermique.

Pour une meilleure lecture des résultats obtenus, et après la comparaison qualitative donnée par les figures 54 et 55 nous avons tracé l'évolution du déplacement à 68 mm du centre de la plaquette en fonction de l'épaisseur de la couche métallique pour les deux

chargements thermiques (complet et simplifié). Les résultats expérimentaux sont donnés à titre indicatif. La figure 56 montre une quasi-superposition des deux courbes numériques ce qui veut dire que les chargements complet et simplifié donne les mêmes résultats. Les erreurs relatives entre les résultats numériques sont estimées à 0,68% pour un Pt de 100 nm, de 0,31% pour un Pt de 150 nm et de 2,4% pour un Pt de 300 nm d'épaisseur. L'erreur relative moyenne étant de 1,13% nous pouvons conclure que la modélisation avec le chargement simplifié donne pratiquement les mêmes résultats que celle avec le chargement complet. Ce résultat très intéressant permet de réduire considérablement les temps de calcul.

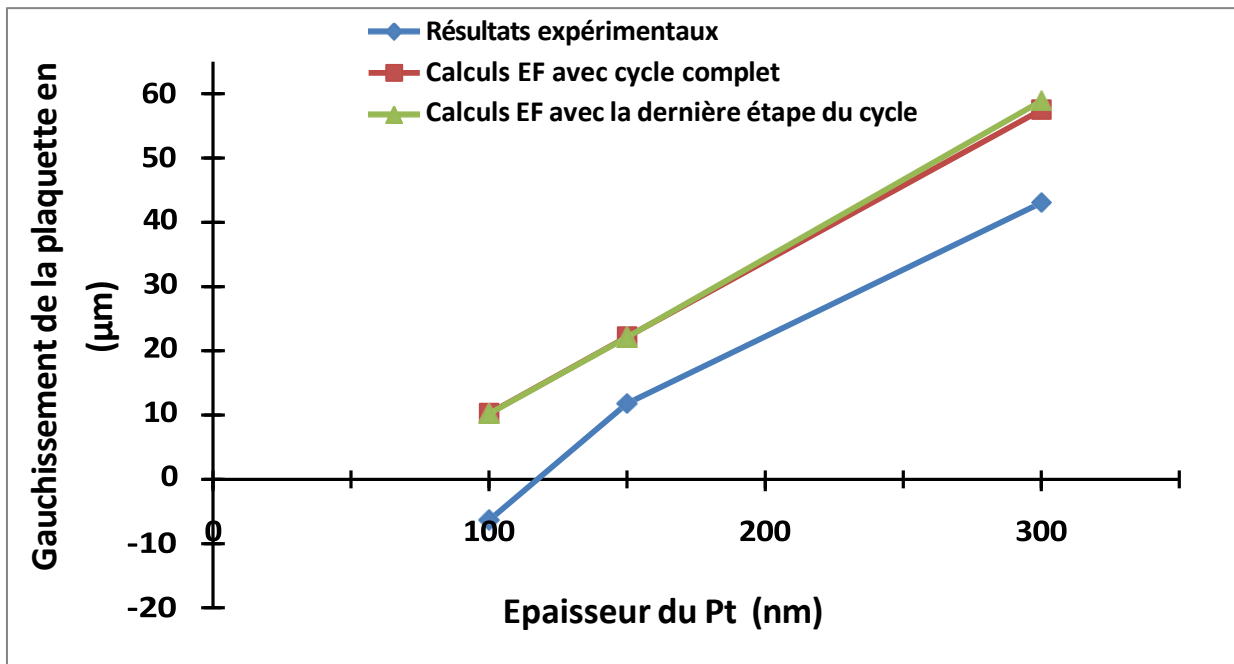


Figure 56. Effet du type sur le gauchissement de chargement thermique des plaquettes.

IV.3.1. Effet du détournement

Le détournement consiste à enlever une partie de la couche de métallisation sur le périphérique extérieur de la plaquette, là où la déflexion est la plus importante. En utilisant le modèle numérique validé expérimentalement ainsi que la simplification du type de chargement thermique, validée également, nous avons introduit des modifications géométriques sur l'empilement pour réduire son gauchissement. Notre contribution consiste à enlever une petite quantité de matériau de la dernière couche (Pt). La figure 51 dans le chapitre 3 illustre cette modification géométrique. Nous avons varié deux paramètres, la longueur « l » et l'épaisseur « e », comme indiqué dans le Tableau 8 dans le chapitre 3. Pour chaque longueur du « l », nous avons varié l'épaisseur « e ». Notez que pour des raisons de standardisation du modèle, la variation de l'épaisseur du matériau enlevé est liée à l'épaisseur de la couche Pt. Par conséquent, nous présentons cela comme un pourcentage de l'épaisseur de Pt. Nous avons simulé trois épaisseurs de Pt (100, 150 et 300 nm).

Nous avons réalisé une étude comparative entre les valeurs du gauchissement avec et sans modifications géométriques. Le gauchissement obtenu par le modèle sans enlèvement de matière a été utilisé comme référence pour les comparaisons.

IV.3.2. Effet du détournage pour une couche de Pt de 100 nm d'épaisseur

Les figures 57, 58, 59 et 60 donnent la déflexion (gauchissement) de la plaquette avec un détournage allant de 1 à 7 mm de longueur et pour des épaisseurs de la matière enlevée variant de 25% à 100% de l'épaisseur de la couche mince métallique PT. Nous remarquons que la zone enregistrant la déflexion la plus importante demeure inchangée et se localise au niveau de l'extrémité extérieure de la plaquette. De ces figures, nous pouvons conclure que ni la longueur du détournage « l » ni l'épaisseur de ce dernier « e » n'ont un effet significatif sur la localisation de la zone enregistrant la plus importante déflexion.

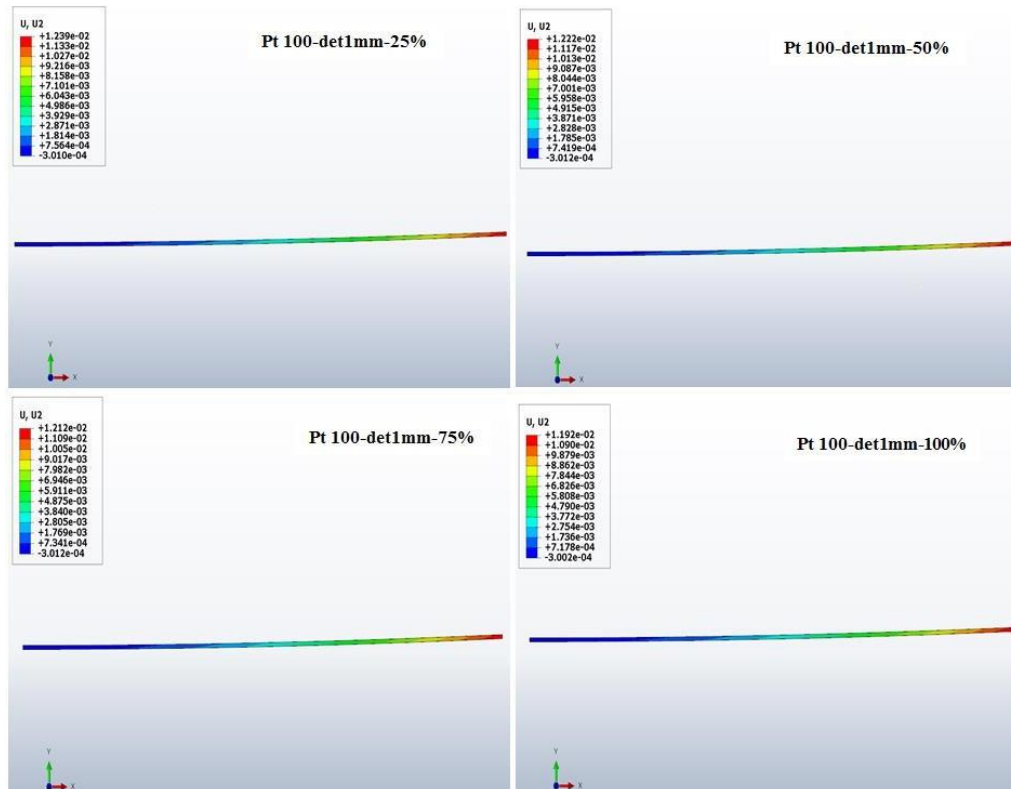


Figure 57. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 1 mm.

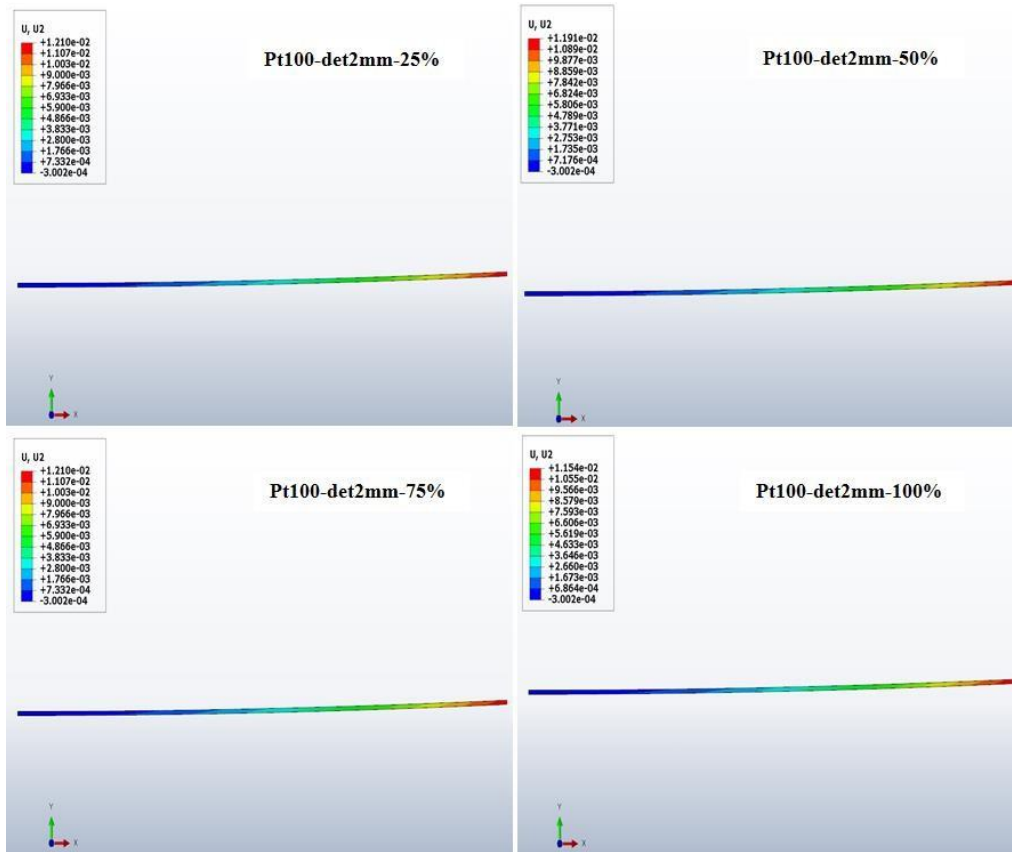


Figure 58. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 2 mm.

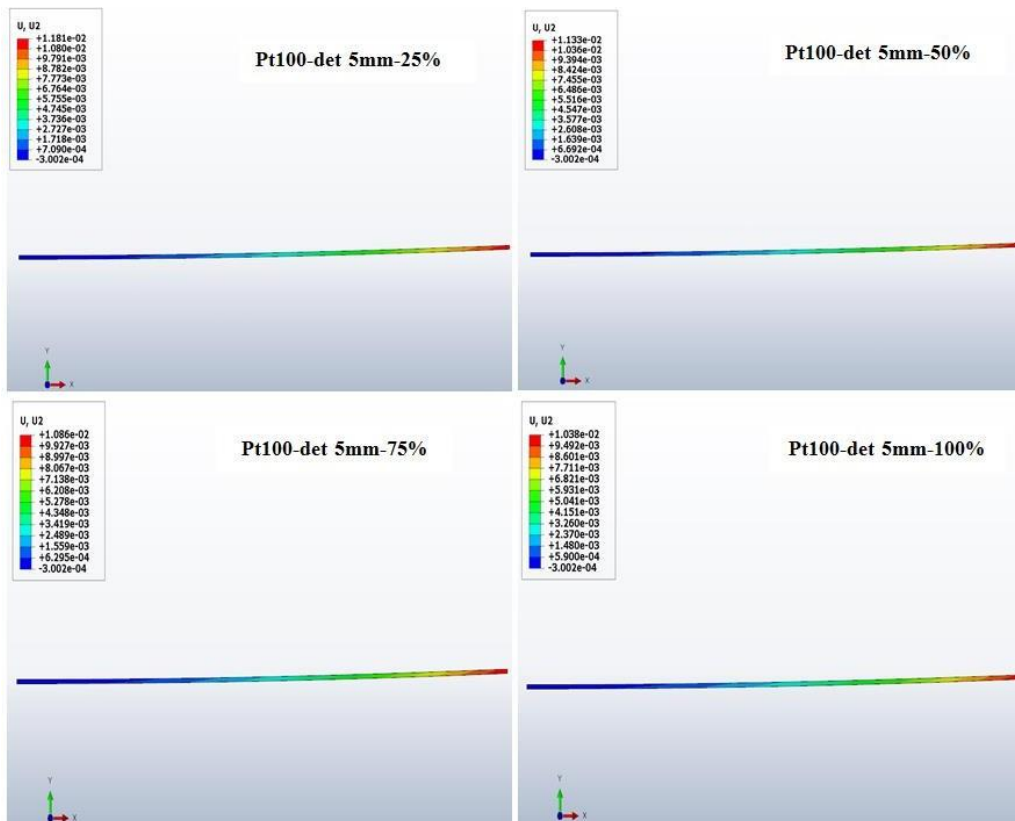


Figure 59. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 5 mm.

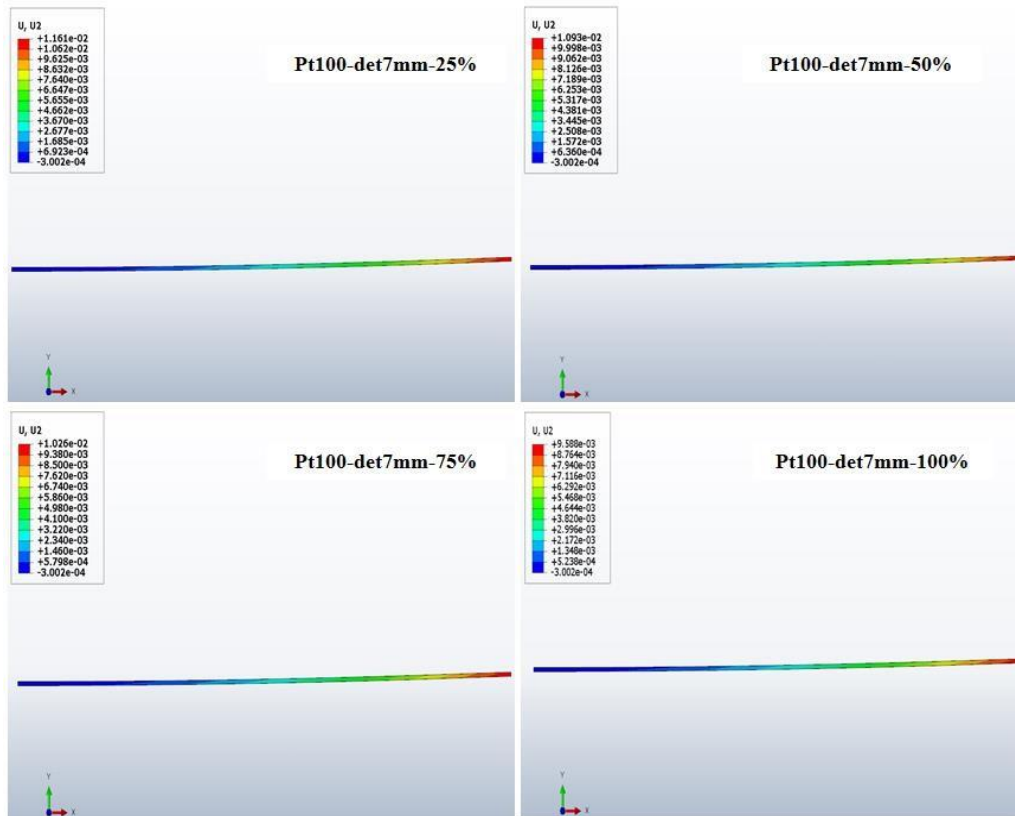


Figure 60. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 7 mm.

Etant donné que la comparaison qualitative des résultats n'a donné aucun effet significatif de la longueur et de l'épaisseur du détournage sur la localisation des zones à forte déflexion, nous avons opté pour une comparaison quantitative. Ainsi, les valeurs maximales des déplacements enregistrés avec un détournage dont « l » varie de 1 à 7 mm et dont « e » varie de 25 à 100% sont comparées. La figure 61 montre l'évolution de la déflexion d'une plaquette de silicium revêtue d'une couche de Pt de 100 nm.

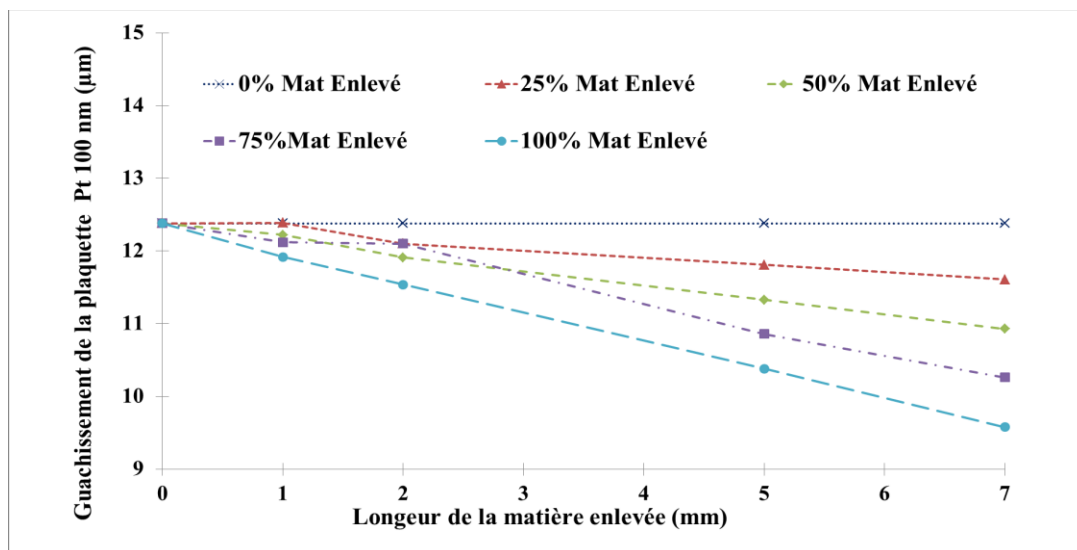


Figure 61. Evolution de la déflexion en fonction de la longueur et de l'épaisseur du détournage pour une plaquette Pt=100 nm.

La figure 61 est très riche en résultats que nous pouvons les résumer dans les points suivants :

- Le détournage permet de réduire la déflexion de la plaquette quel que soit la longueur « l » et l'épaisseur « e ». Toutes les valeurs maximales de la déflexion obtenues avec détournage se trouvent en dessous de la valeur de la référence (sans détournage).
- La déflexion diminue avec l'augmentation de la longueur « l » du détournage pour l'ensemble des épaisseurs « e ».
- La déflexion diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de détournage représentée en pourcentage de l'épaisseur.
- Le cas le plus optimale est un détournage de 7mm de longueur avec une épaisseur « e » égale à l'épaisseur de la couche de Pt (100% de la matière enlevée). Cette solution permet de réduire de 22.61% le détournage qui passe de 12.38 μm dans le cas sans détournage à 9.58 μm pour le cas avec détournage.
- Pour les autres points on enregistre une réduction du détournage de 3.71% pour un détournage de 1mm de longueur, de 6.78% pour un détournage de 2mm de longueur et de 16.15% pour un détournage de 5mm de longueur.

IV.3.3.Effet du détournage pour une couche de Pt de 150 nm d'épaisseur

Les figure 62, 63, 64 et 65 montrent la répartition du déplacement vertical (déflexion) pour l'ensemble des cas simulé (« l » varie de 1 à 7mm, et « e » varie de 25 à 100% de l'épaisseur de ma couche métallique Pt.

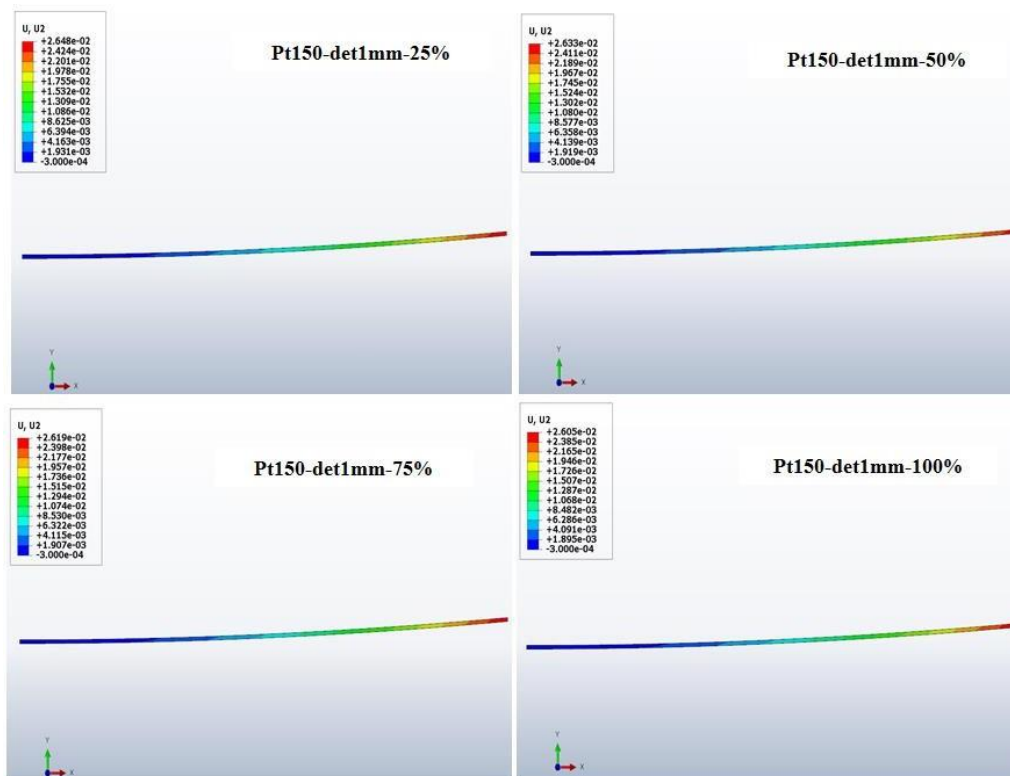


Figure 62. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 1 mm.

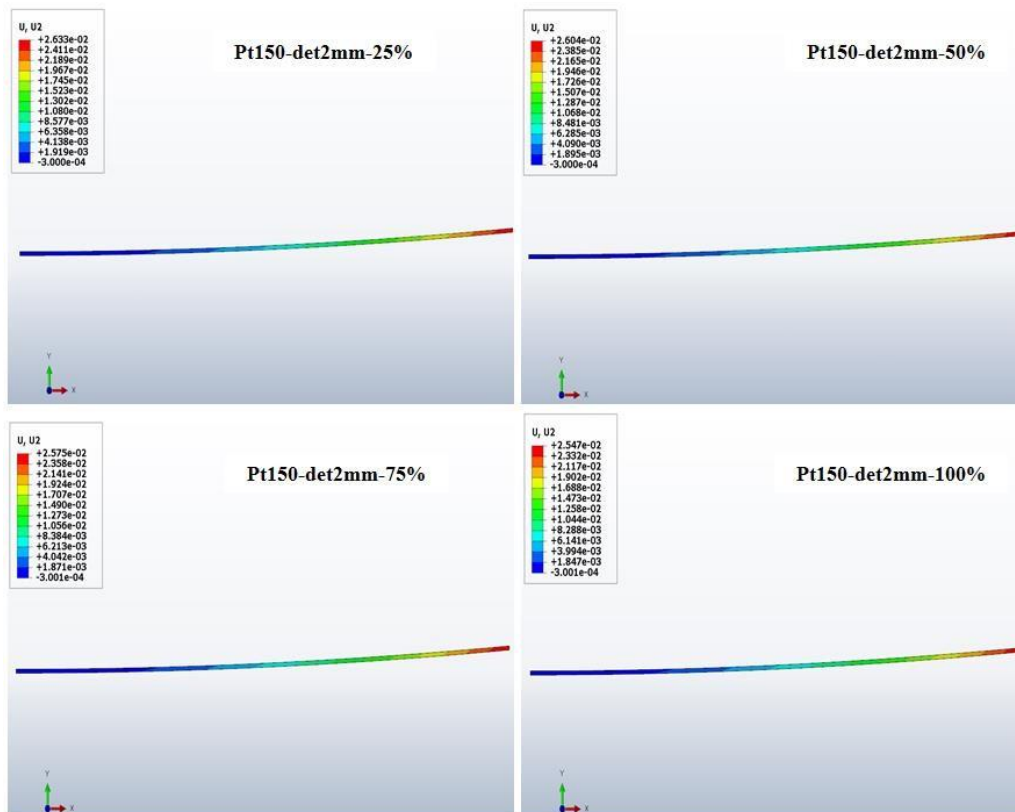


Figure 63. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 2 mm.

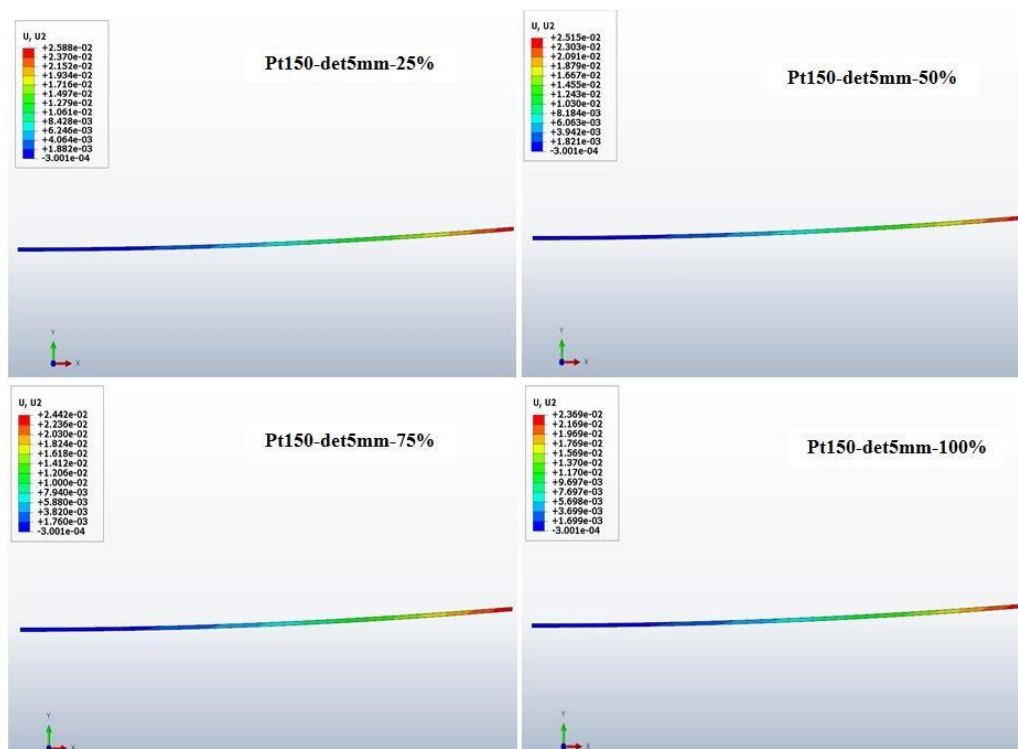


Figure 64. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 5 mm.

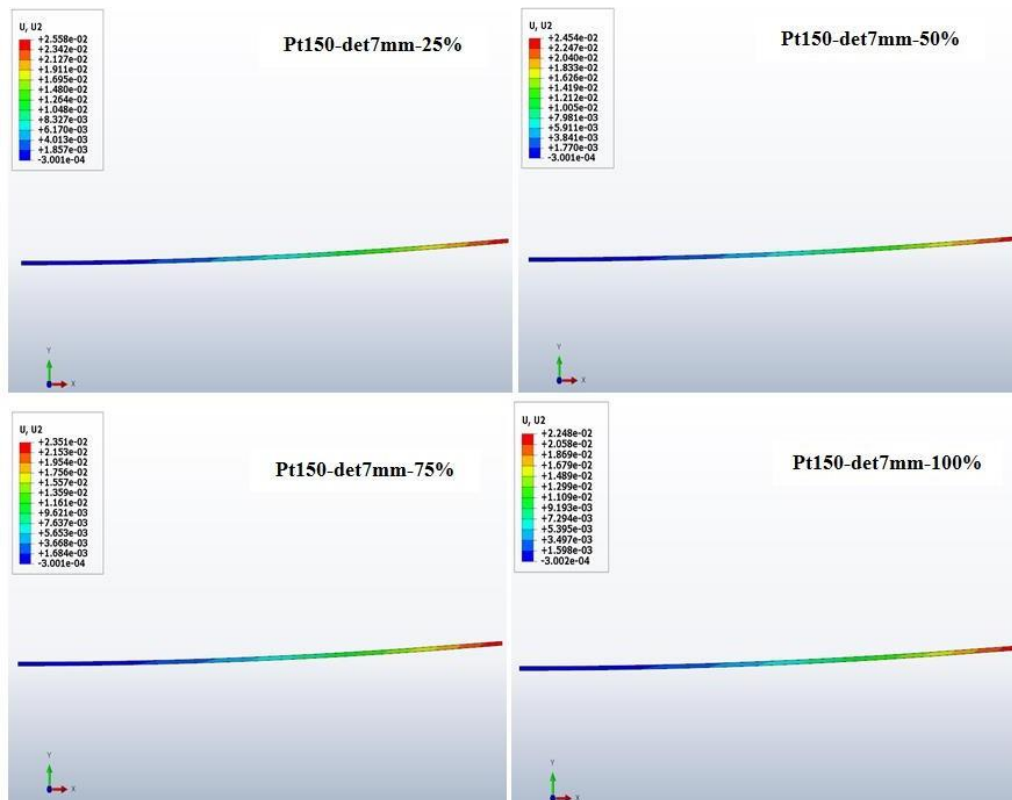


Figure 65. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 7 mm.

Comme pour le cas d'une plaquette revêtue avec une couche de Pt de 100 nm, le cas avec une couche de Pt de 150 nm d'épaisseur présente les mêmes résultats qualitatifs. Les figures 62, 63, 64 et 65 montrent une déflexion maximale de l'empilement sur les bordures extérieures des plaquettes quel que soit « l » et « e ». Une meilleure lecture des résultats nécessitent une comparaison quantitative des valeurs maximales de la déflexion pour l'ensemble des cas simulés.

La figure 66 illustre l'évolution de la déflexion maximale en fonction des paramètres géométriques « l » et « e ». Sur ce graphique on peut extraire les informations suivantes :

- Le détourage permet de réduire la déflexion de la plaquette quel que soit la longueur « l » et l'épaisseur « e ». Toutes les valeurs maximales de la déflexion obtenues avec détourage se trouvent en dessous de la valeur de la référence (sans détourage).
- La déflexion diminue avec l'augmentation de la longueur « l » du détourage pour l'ensemble des épaisseurs « e ».
- La déflexion diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de détourage.
- Le cas le plus optimale est un détourage de 7mm de longueur avec une épaisseur « e » égale à l'épaisseur de la couche de Pt (100% de la matière enlevée). Cette solution permet de réduire de 16.36% le détourage qui passe de 26.88 μm dans le cas sans détourage à 22.48 μm pour le cas avec détourage.
- Pour les autres points on enregistre une réduction du détourage de 3% pour un détourage de 1mm de longueur, de 5.2% pour un détourage de 2mm de longueur et de 11.86% pour un détourage de 5mm de longueur.

- Le gain obtenu avec détourage pour une couche de Pt de 150 nm est légèrement inférieur à celui obtenu pour une couche de Pt de 100 nm.

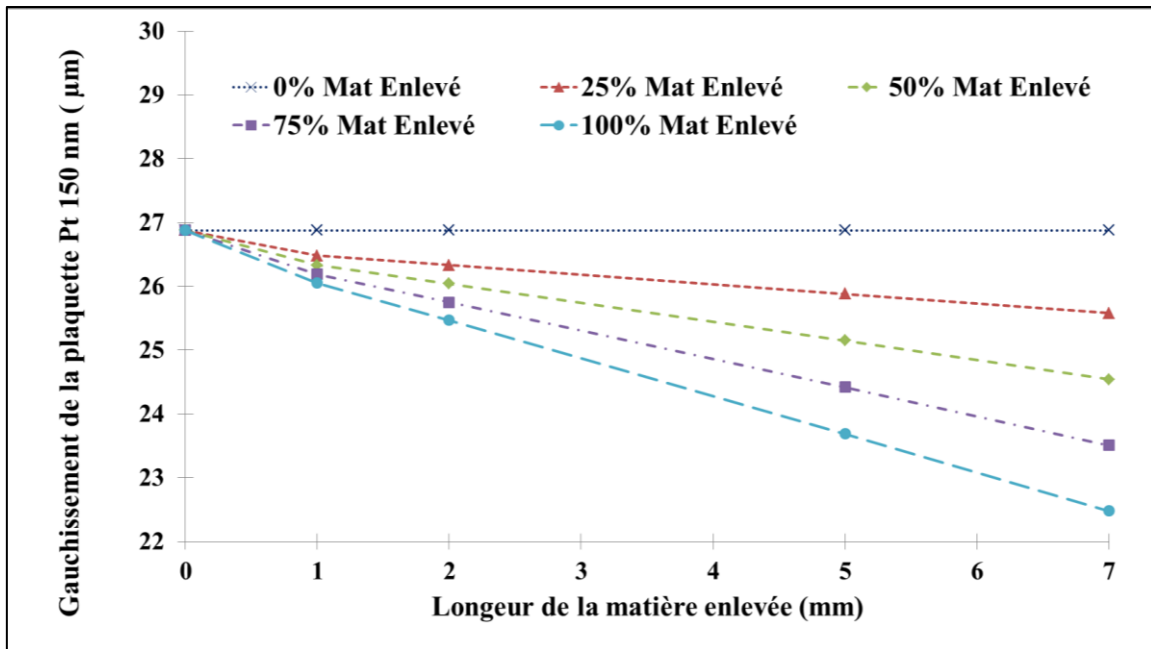


Figure 66. Evolution de la déflexion en fonction de la longueur et de l'épaisseur du détourage pour une plaquette Pt=150 nm.

IV.3.4. Effet du détourage pour une couche de Pt de 300 nm d'épaisseur

La déflexion de la plaquette de l'empilement Si/USG/Pt dont l'épaisseur de la couche mince de Pt est de 300 nm est donnée par les figures 67, 68, 69 et 70. Le déplacement est donné pour les différents cas étudiés dont « l » et « e » varient. Comme le cas d'une couche de Pt de 100 et de 150 nm, on constate la même forme de déformation quel que soit la modification géométrique apportée. Ainsi, le déplacement maximal est enregistré au niveau du périphérique extérieur de la plaquette.

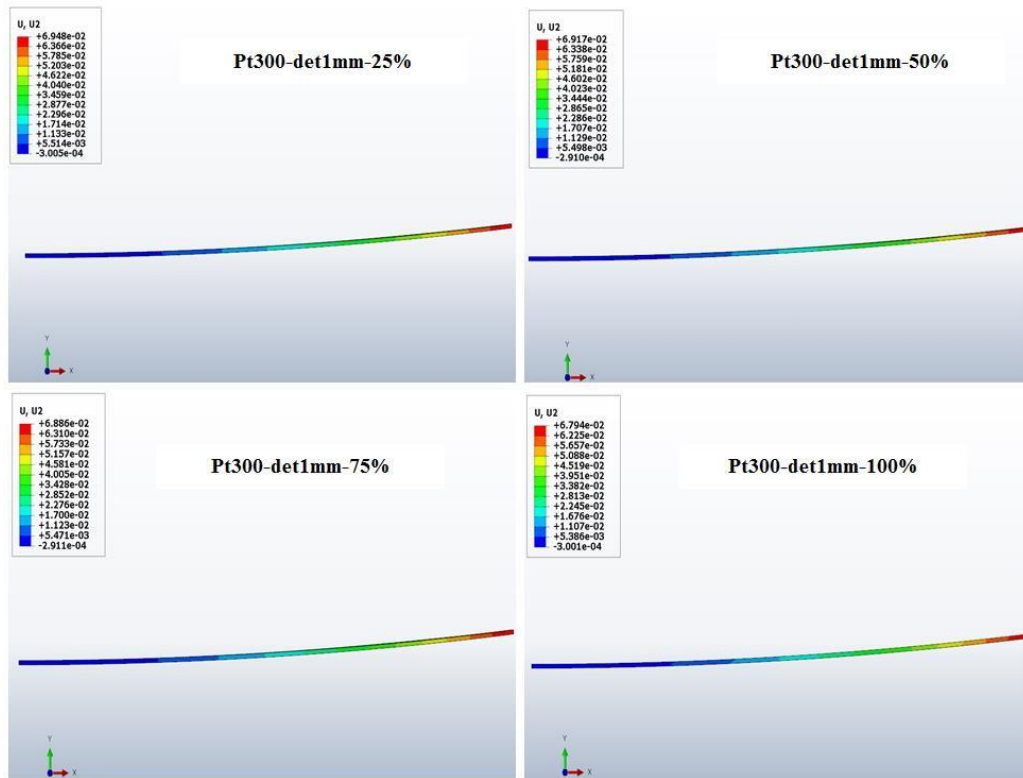


Figure 67. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 1 mm.

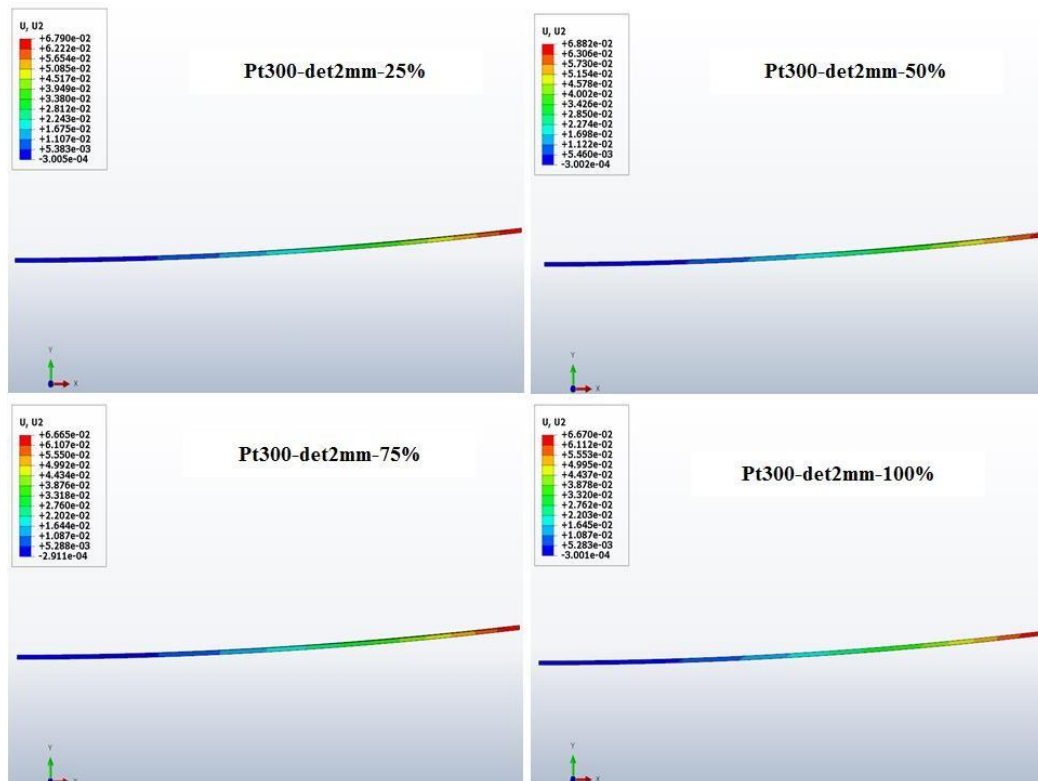


Figure 68. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 2 mm.

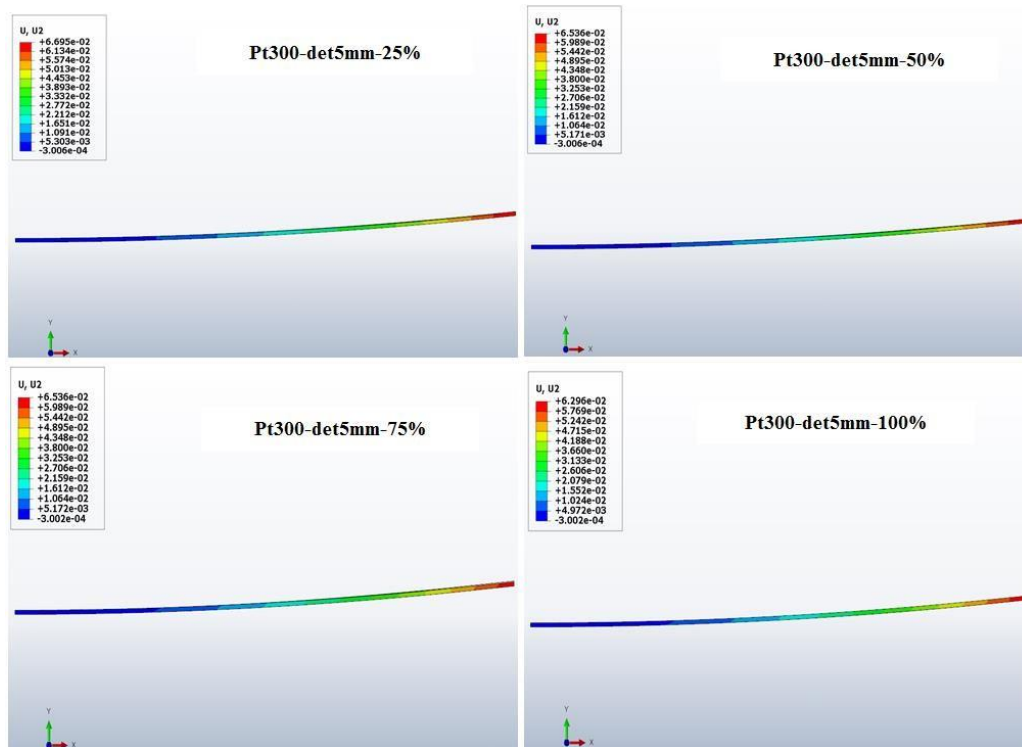


Figure 69. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 5 mm.

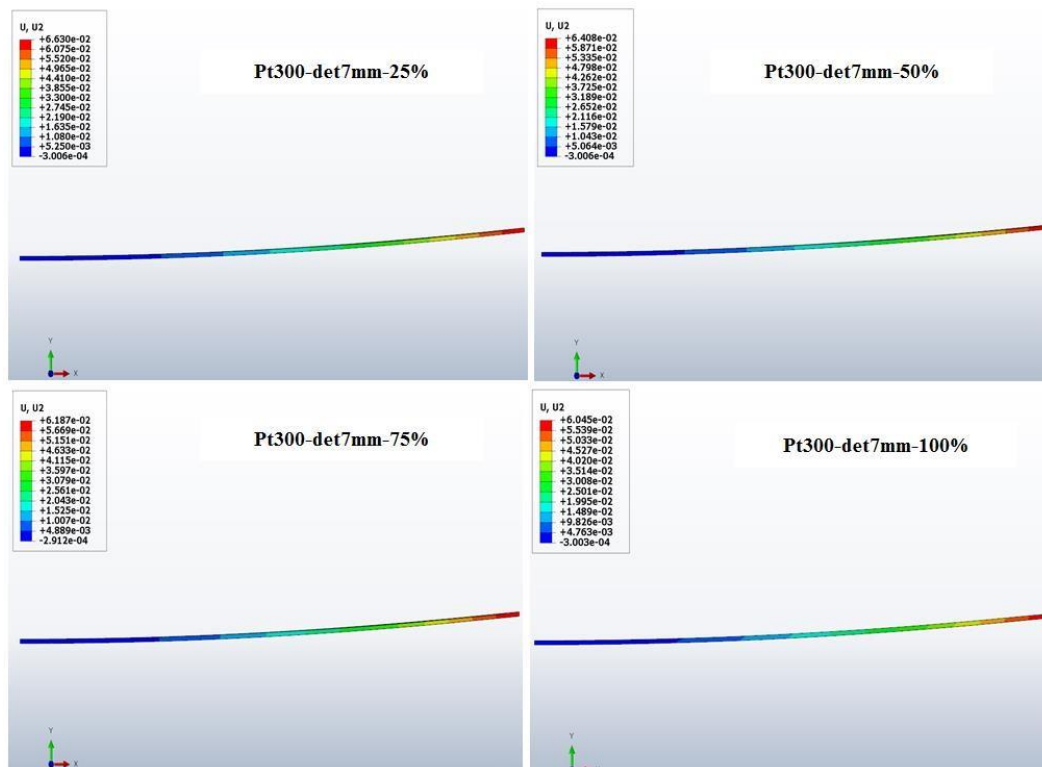


Figure 70. Répartition du déplacement (déflexion) pour une longueur « l » de 7 mm.

Une meilleure lecture des résultats nécessite une comparaison quantitative entre les valeurs maximales des déplacements pour les différents cas étudiés. La figure 71 illustre l'évolution de la déflexion en fonction de la longueur du détournement « l » et de son épaisseur donnée en

pourcentage de l'épaisseur de la couche de Pt. La déflexion sans détourage est présentée comme cas de référence. De cette figure on peut tirer les informations suivantes :

- Le détourage permet de réduire la déflexion de la plaquette quel que soit la longueur « l » et l'épaisseur « e ». Toutes les valeurs maximales de la déflexion obtenues avec détourage se trouvent en dessous de la valeur de la référence (sans détourage).
- La déflexion diminue avec l'augmentation de la longueur « l » du détourage pour l'ensemble des épaisseurs « e ».
- La déflexion diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de détourage.
- Le cas le plus optimale est un détourage de 7mm de longueur avec une épaisseur « e » égale à l'épaisseur de la couche de Pt (100% de la matière enlevée). Cette solution permet de réduire de 13.43% le détourage qui passe de 69.83 μm dans le cas sans détourage à 60.45 μm pour le cas avec détourage.
- Pour les autres points on enregistre une réduction du détourage de 2.7 % pour un détourage de 1mm de longueur, de 4.55% pour un détourage de 2mm de longueur et de 9.83% pour un détourage de 5mm de longueur.
- Le gain obtenu avec détourage pour une couche de Pt de 300 nm est légèrement inférieur à celui obtenu pour une couche de Pt de 150 nm et celui obtenu avec une couche de Pt de 150 nm.

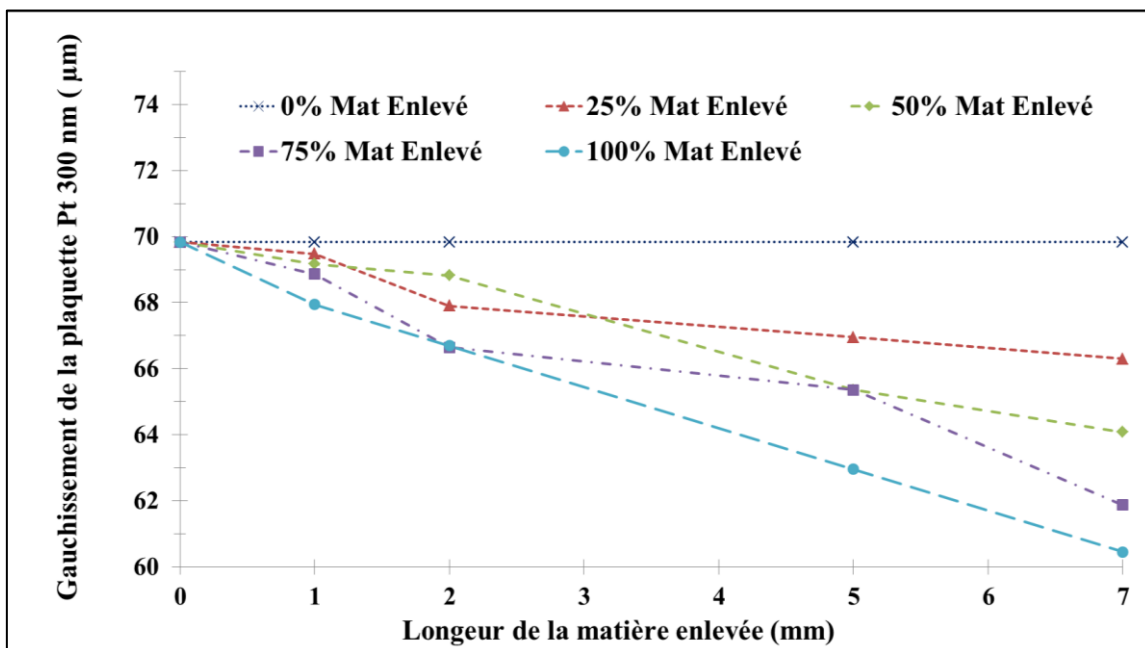


Figure 71. Evolution de la déflexion en fonction de la longueur et de l'épaisseur du détourage pour une plaquette Pt=300 nm.

La comparaison entre les résultats obtenus avec les trois épaisseurs est donnée pour le cas l=7 mm avec 100% de l'épaisseur car c'est ce cas qui présente l'impact le plus significatif du détourage sur la déflexion. La figure 72 donne cette comparaison et elle permet de tirer les points suivants :

- L'ajout d'une couche de Pt provoque une augmentation considérable de la déflexion.

- L'augmentation de l'épaisseur de la couche de Pt provoque une augmentation de la déflexion.
- Le détourage permet de réduire légèrement la déflexion.

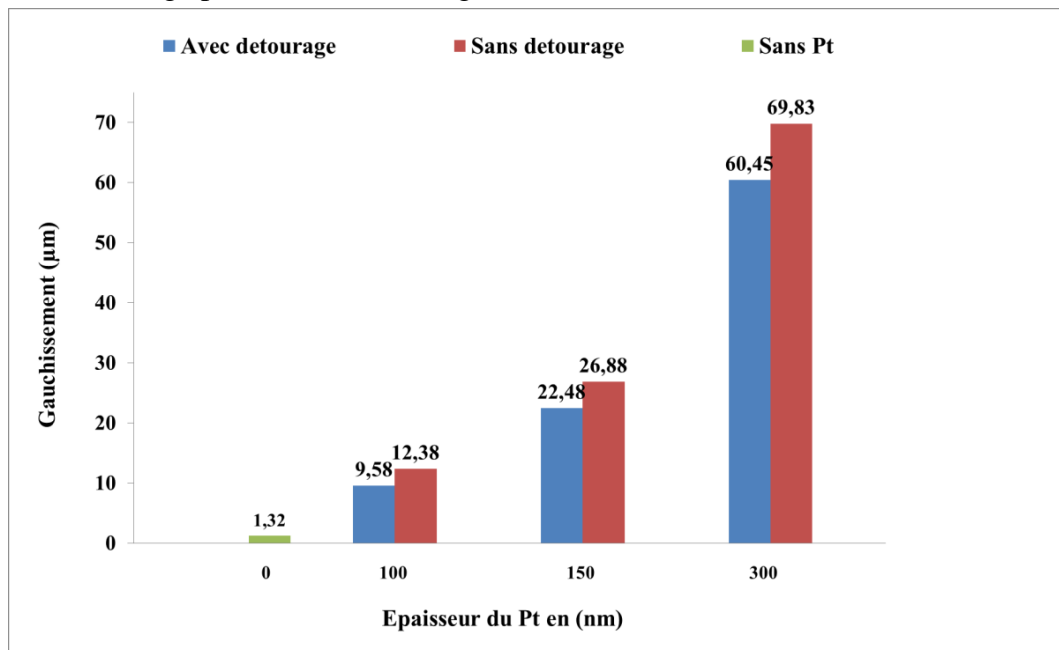


Figure 72. Comparaison de la déflexion maximale obtenue pour un détourage avec $l=7\text{mm}$ et $\epsilon=100\%$ de l'épaisseur de Pt pour les trois épaisseurs étudiés.

Pour une meilleure lecture des résultats, nous avons choisi de faire une comparaison entre le gain en déflexion en pourcentage pour les cas les plus favorables en épaisseur à savoir une épaisseur qui représente 100 % de l'épaisseur de la couche métallique en Pt. La figure 73 présente cette comparaison pour les trois épaisseurs simulées 100, 150 et 300 nm. On peut tirer les constatations suivantes :

- Le gain en déflexion avec détourage diminue avec l'augmentation de l'épaisseur enlevée de la couche métallique Pt.
- Le détourage peut être considéré comme étant un moyen fiable dans la réduction de la déflexion pour les couches minces de faible épaisseur.
- Les gains en détourage augmente avec l'augmentation de la longueur « l ».

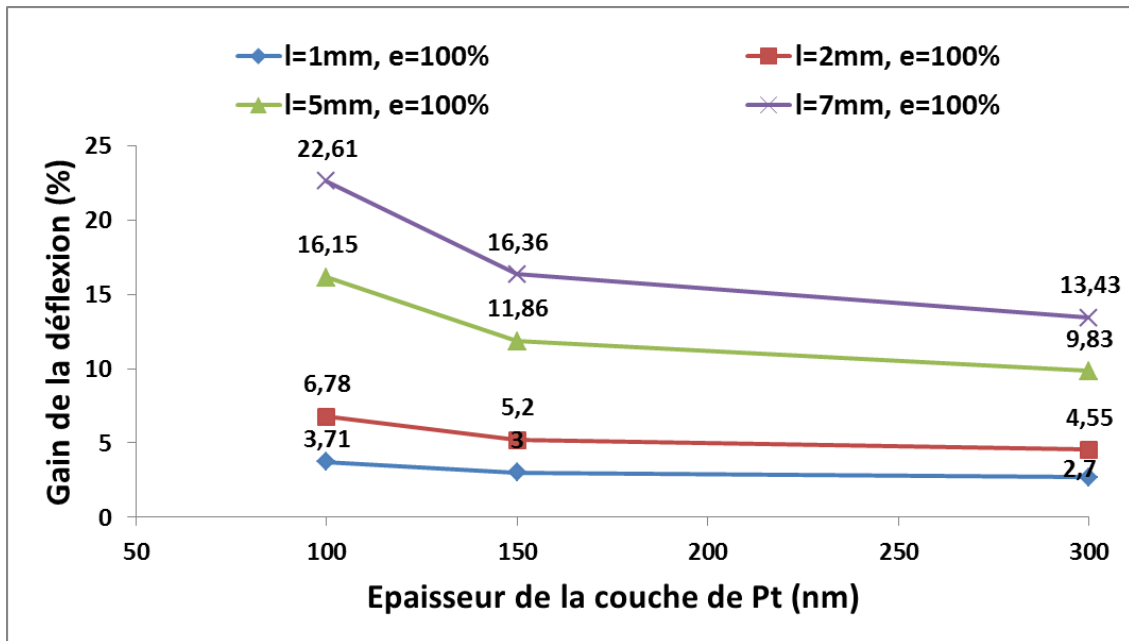


Figure 73. Evolution du gain de déflexion en fonction des paramètres géométriques pour les différentes épaisseurs du Pt.

IV.4. Apport de l'homogénéisation dans l'estimation numérique de la déflexion

Nous avons développé un modèle 2D axisymétrique qui consiste en un substrat de Si de 500 μm sur lequel est déposé un film homogène équivalent, représentant les deux films minces (USG + Pt) avec les propriétés équivalentes calculées et répertoriées dans le Tableau 7 du chapitre 3. La charge thermique imposée représente la dernière étape du cycle thermique complet (refroidissement de 450 à 22 °C). Les résultats qualitatifs obtenus à l'aide du modèle homogénéisé sont comparés à ceux obtenus avec le modèle complet (Figure 74). Les deux modèles enregistrent une déflexion maximale au niveau du périphérique extérieure de la plaquette. On peut conclure que le modèle simplifié équivalent (homogénéisé) donne des résultats comparables en termes de déflexion que le modèle complet. Cependant, le modèle homogénéisé permet de réduire considérablement les temps de calculs.

Pour la comparaison quantitative, l'évolution du gauchissement en fonction de l'épaisseur de la couche de Pt obtenue par le modèle homogénéisé a été comparée à celle obtenue par le modèle complet (Figure 75). On peut observer que les deux courbes ont des formes similaires. Un écart de 5 % a été trouvé entre le gauchissement obtenu par le modèle homogénéisé et celui du modèle hétérogène pour une couche de Pt de 100 nm. Pour une couche de Pt de 150 nm, la différence entre les deux modèles est d'environ 11,53 %, qui augmentent à 19,63 % pour les modèles avec une couche de Pt de 300 nm. On peut voir que la différence entre le gauchissement obtenu par les deux modèles augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de Pt. La différence moyenne entre les résultats du modèle homogénéisé et ceux du modèle hétérogène avoisine les 12,05 %. On peut en conclure que l'approche homogénéisée présentée dans cette étude est fiable pour les petites épaisseurs de la couche métallique.

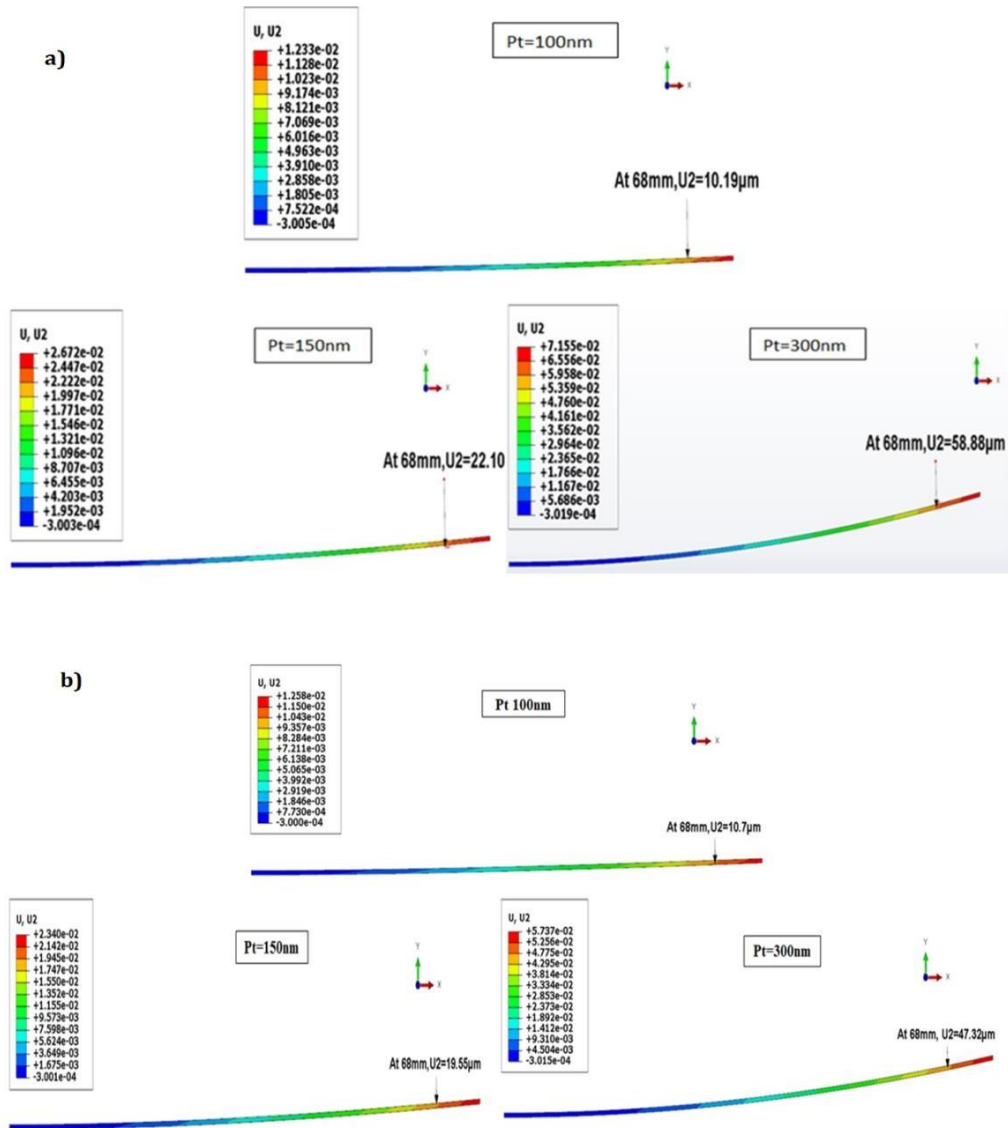


Figure 74. L'évolution du gauchissement de l'empilement, a) modèle complet, b) modèle équivalent homogénéisé.

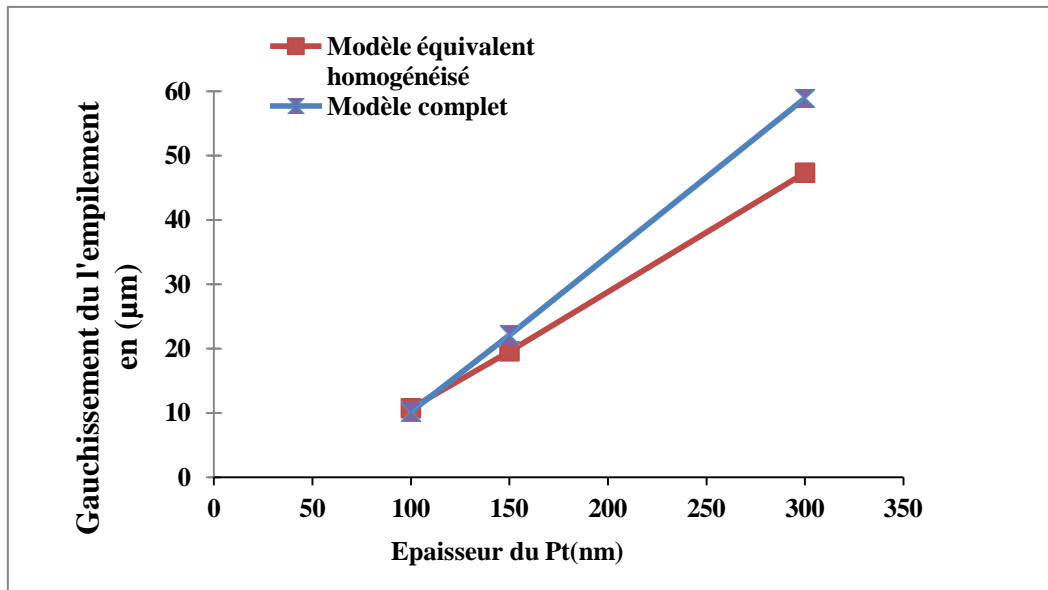


Figure 75. Gauchissement obtenue selon le modèle homogénéisé/hétérogène.

IV.5. Conclusion

Les simulations numériques par éléments finis constituent une alternative prometteuse dans la prédiction de la déformation des plaquettes de silicium revêtues de couches minces. L'utilisation de cette méthode numérique dans la présente étude a permis de prédire le gauchissement d'une plaquette en Si revêtues de deux couches minces ; une diélectrique et l'autre conductrice. Les modèles numériques développés dans ce rapport ont été validés par des comparaisons avec l'expérimentation. Ainsi, les déflexions mesurées expérimentalement sont proches de celles obtenues par simulations numériques. Dans cette phase de l'étude, l'effet de l'épaisseur de la couche métallique en Pt a été étudié. Les résultats numériques, tout comme les valeurs expérimentales montrent que la déflexion augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du Pt.

Des simplifications dans les modèles numériques ont été proposées et validé par des comparaisons entre résultats obtenus par le modèle complet (reproduisant les conditions réelles d'élaboration) et ceux issus des modèles simplifiés. Deux types de simplification ont été étudiés :

Une simplification du chargement thermique qui consiste de remplacer le chargement complet par un chargement thermique équivalent ; Une simplification géométrique qui consiste à remplacer les deux couches minces par une couche mince équivalente dont les propriétés mécaniques sont déterminées par les lois des mélanges utilisées dans les approches d'homogénéisation.

Pour la simplification du chargement thermique, les comparaisons montrent que la modélisation avec le chargement simplifié donne pratiquement les mêmes résultats que celle avec le chargement complet. L'erreur relative moyenne entre les résultats issus des deux approches est de 1,13%.

Pour la simplification basée sur la méthode d'homogénéisation, les résultats obtenus donnent des valeurs comparables. Il est à noter que la méthode d'homogénéisation est plus

fiable pour les faibles épaisseurs de Pt. L'écart entre les résultats issus du modèle complet et ceux du modèle équivalent augmente avec l'augmentation de la couche de Pt.

En fin, nous avons présenté une technique permettant de réduire la déflexion des plaquettes. Cette technique qualifiée de détournage, consiste à enlever une partie de la couche métallique pour réduire la déflexion. L'effet de la longueur et de l'épaisseur de la partie enlevée a été étudié. Ainsi, nous avons obtenus des résultats intéressants que l'on peut les résumer dans les points suivants :

- Le détournage permet de réduire la déflexion de la plaquette quel que soit la longueur « l » et l'épaisseur « e ». Toutes les valeurs maximales de la déflexion obtenues avec détournage se trouvent en dessous de la valeur de la référence (sans détournage).
- La déflexion diminue avec l'augmentation de la longueur « l » du détournage pour l'ensemble des épaisseurs « e ».
- La déflexion diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de détournage.
- Le cas le plus optimale est un détournage de 7mm de longueur avec une épaisseur « e » égale à l'épaisseur de la couche de Pt (100% de la matière enlevée).
- Le détournage peut être considéré comme étant un moyen fiable dans la réduction de la déflexion pour les couches minces de faible épaisseur.

Conclusion générale

Conclusion générale

En raison de la demande mondiale croissante de microcomposants électroniques, les industriels doivent rester à jour avec les évolutions du marché des semi-conducteurs en introduisant des solutions toujours plus innovantes. La miniaturisation représente l'un des défis majeurs de ce domaine, car elle offre la possibilité de satisfaire deux contraintes essentielles : créer des éléments aussi petits que possible tout en maintenant des performances élevées. Pour y parvenir, les industriels optent pour l'utilisation de nouveaux matériaux, impliquant l'intégration d'un nombre croissant de couches minces, afin de répondre aux exigences du marché tout en garantissant la fiabilité et les performances des dispositifs.

Dans ce travail, nous avons réalisé des simulations thermomécaniques pour prédire le gauchissement induit par le dépôt de différentes couches minces ayant des coefficients de dilatation thermique distincts. L'objectif de cette étude est de proposer et de valider des approches simplificatrices pour alléger la modélisation numériques, ainsi que de proposer des approches permettant de réduire l'apparition du gauchissement au sein des empilements.

Après un premier chapitre riche en informations issues de la littérature et relative à la fabrication des microcomposants électroniques, nous nous sommes concentrés, dans le deuxième chapitre, à la présentation des modèles analytiques et numériques servant à déterminer le gauchissement. Le modèle de Stoney, à titre d'exemple, montre une limitation concernant le nombre de couches de l'empilement à considérer. En effet, il n'est valable que dans le cas d'un empilement bicouche isotrope, ce qui nous incite à présenter le modèle de Hutchinson. Ce dernier permet de déterminer la contrainte dans un multicouche et, par la suite, de calculer la courbure de l'empilement. Le modèle de Suhir, quant à lui, permet également de déterminer la courbure, ce qui permet finalement de calculer le gauchissement par la méthode inverse.

Afin de modéliser le gauchissement des plaquettes, différents modèles ont été présentés. Étant donné la complexité des plaquettes, composées de plusieurs couches, une méthode d'homogénéisation similaire à celle employée pour modéliser les matériaux composites, est proposée pour faciliter la modélisation numérique. L'estimation des propriétés mécaniques équivalentes des deux couches USG/Pt se base sur la loi des mélanges. Les propriétés équivalentes obtenues sont validées par une comparaison entre le modèle homogénéisé et le modèle hétérogène. Ensuite, le gauchissement de l'empilement est calculé en remplaçant les deux couches USG/Pt par une couche équivalente.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté nos modèles numériques.

Le quatrième chapitre regroupe l'essentiel des résultats obtenus. Ainsi, pour la simplification du chargement thermique, les comparaisons montrent que la modélisation avec le chargement simplifié donne pratiquement les mêmes résultats que celle avec le chargement

complet. L'erreur relative moyenne entre les résultats issus des deux approches est de 1,13%.

Pour la simplification basée sur la méthode d'homogénéisation, les résultats obtenus donnent des valeurs comparables. L'écart entre les résultats issus du modèle complet et ceux du modèle équivalent augmente avec l'augmentation de la couche de Pt.

En fin, nous avons présenté une technique permettant de réduire la déflexion des plaquettes. Cette technique qualifiée de détournage, consiste à enlever une partie de la couche métallique pour réduire la déflexion. L'effet de la longueur et de l'épaisseur de la partie enlevée a été étudié. Ainsi, nous avons obtenus des résultats intéressants que l'on peut les résumer dans les points suivants :

- Le détournage permet de réduire la déflexion de la plaquette quel que soit la longueur « l » et l'épaisseur « e ». Toutes les valeurs maximales de la déflexion obtenues avec détournage se trouvent en dessous de la valeur de la référence (sans détournage).
- La déflexion diminue avec l'augmentation de la longueur « l » du détournage pour l'ensemble des épaisseurs « e ».
- La déflexion diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de détournage.
- Le cas le plus optimale est un détournage de 7mm de longueur avec une épaisseur « e » égale à l'épaisseur de la couche de Pt (100% de la matière enlevée).
- Le détournage peut être considéré comme étant un moyen fiable dans la réduction de la déflexion pour les couches minces de faible épaisseur.

Notre étude et les intéressants résultats obtenus ouvrent de nombreuses perspectives. Nous préconisons de :

- Reprendre les approches numériques de la présente étude et les adapter pour un multicouche Si/USG/AlCu/UBM également utilisé dans la fabrication des microcomposants électroniques.
- Etudier les effets de dépôt d'une couche non uniforme (discontinuité de la matière) sur le gauchissement.
- Etudier l'effet de substart en remplaçant le silicium par le germanium.
- Proposer des méthodes inverses permettant de remonter à la courbure en conjuguant les approches numériques et semi-empiriques (modèle de Hutchinson, modèle de Suhir).

Annexes

Les contraintes dans l'empilement sont des paramètres à surveiller. Même si on estime que le gauchissement de l'empilement est considéré comme une cause de défaillance La figure 1 présente les états de contraintes équivalentes maximales dans l'empilement pour les trois épaisseurs de Pt (100, 150, 300 nm).

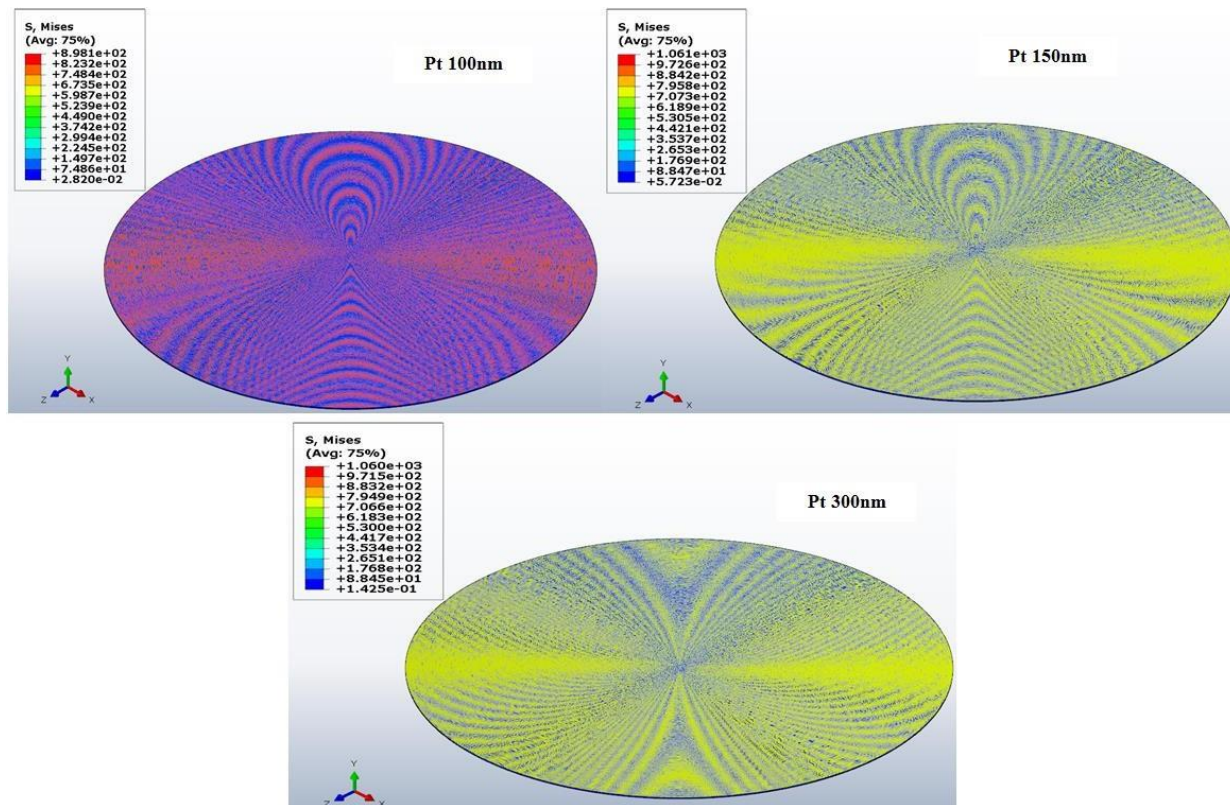


Figure1 .Contrainte équivalente maximale dans les trois épaisseurs avec cycle complet.

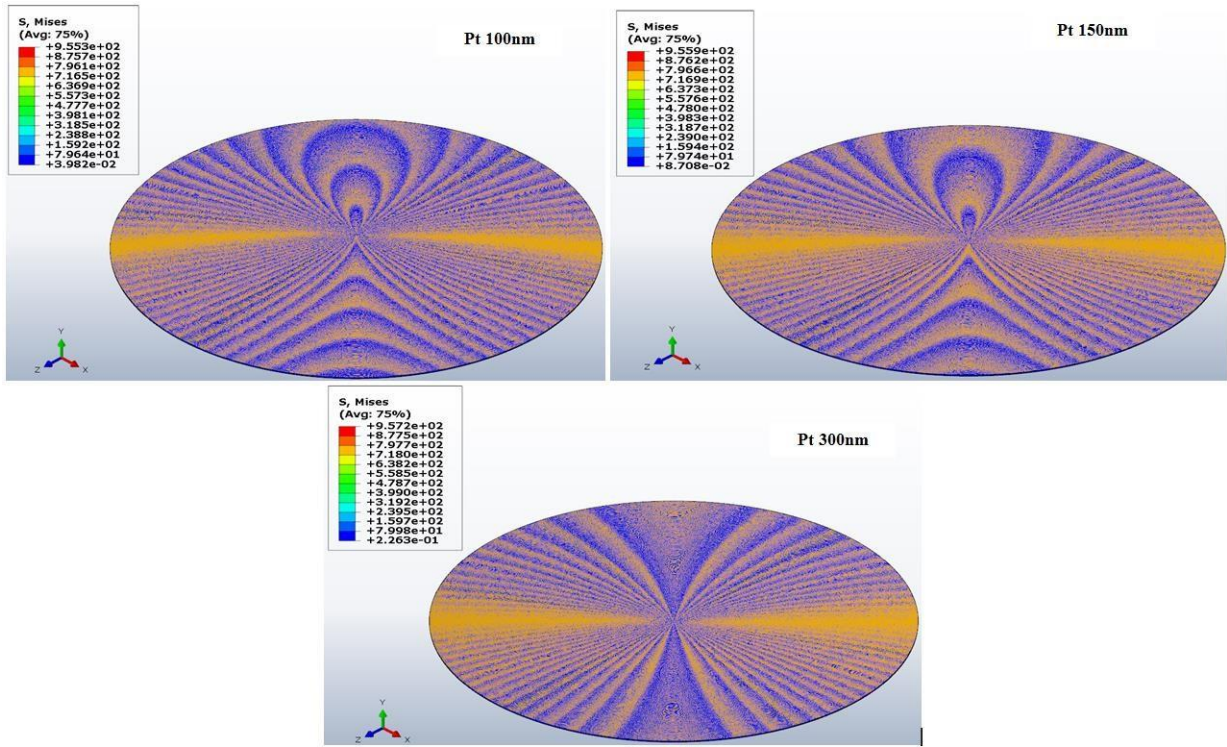


Figure 2. Contrainte équivalente maximale dans les trois épaisseurs avec la dernière étape du cycle thermique.

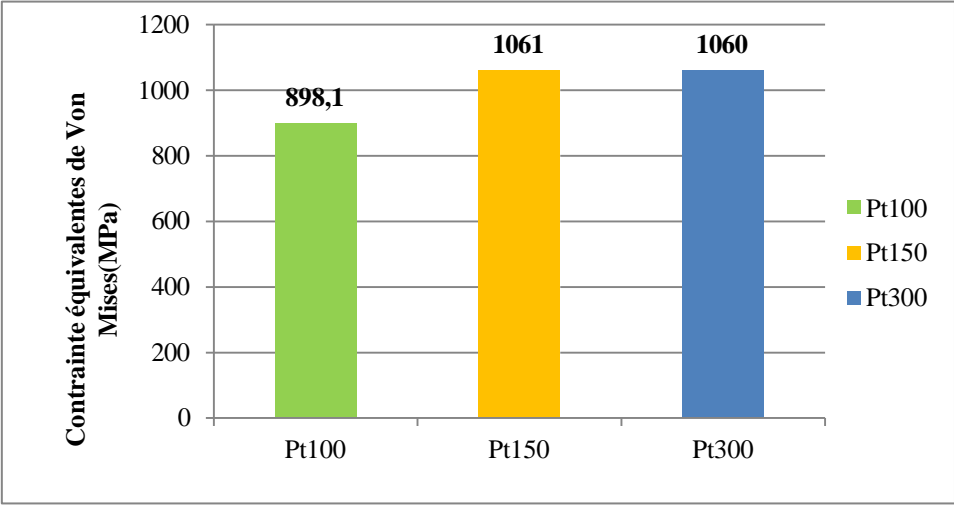


Figure 3. Contraintes équivalentes dans les trois l'empilement avec cycle complet.

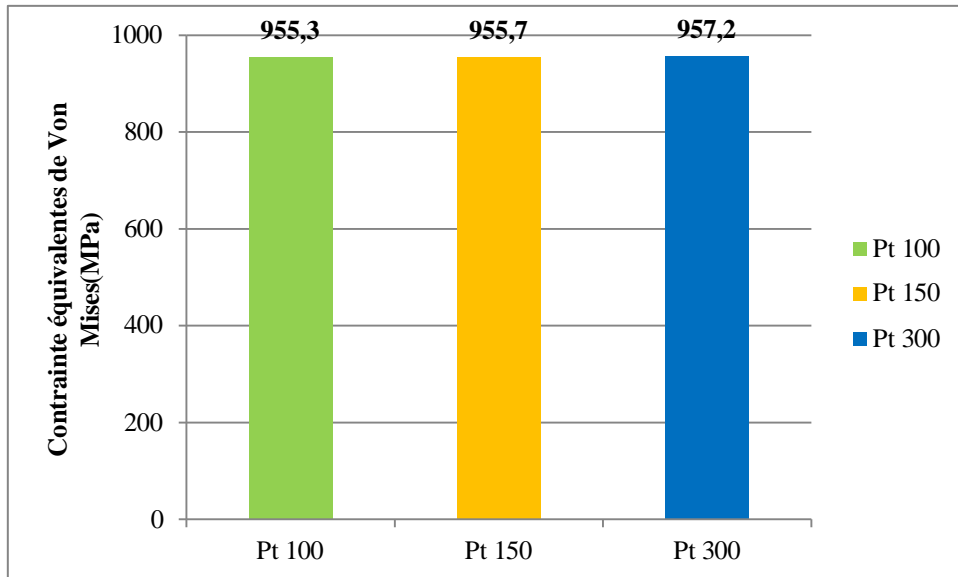


Figure 4. Contraintes équivalentes dans les trois l'empilement avec la dernière étape du cycle thermique.

Le gain en déflexion en pourcentage pour les épaisseurs de 25%,50% et 75% respectivement de la couche de métallisation.

Les figures ci-dessous illustrent le gain en déflexion pour trois épaisseurs de matière enlevée.

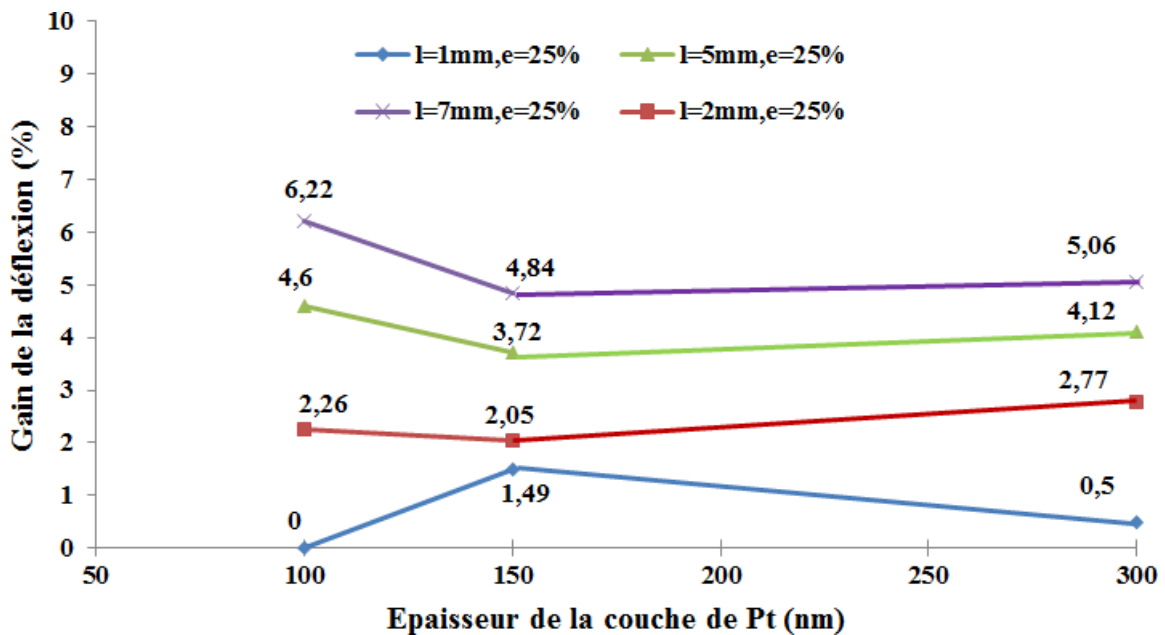


Figure 5. Evolution du gain déflexion en fonction des paramètres géométriques pour les différentes épaisseurs du Pt.

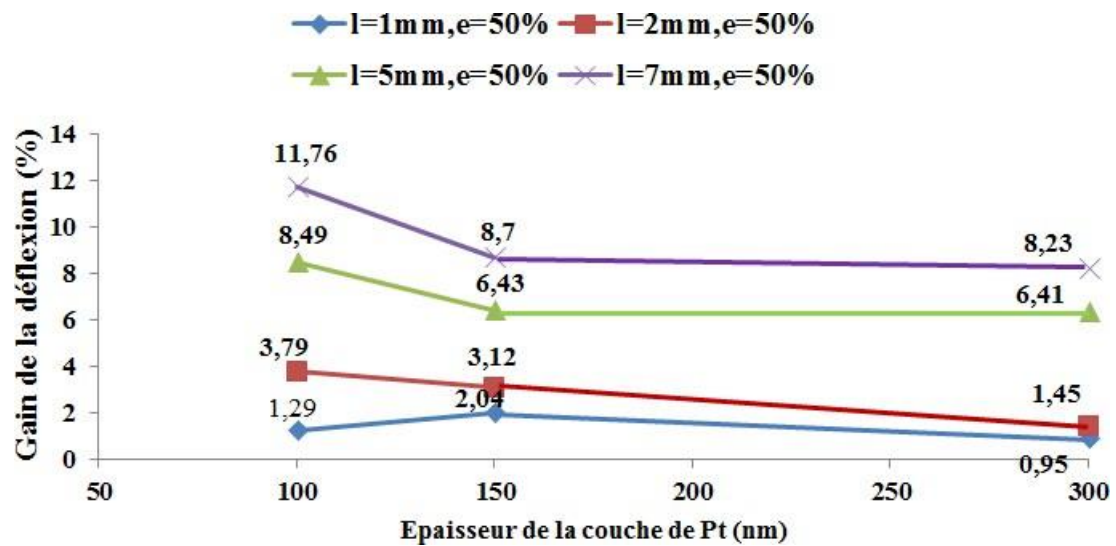


Figure 6. Evolution du gain déflexion en fonction des paramètres géométriques pour les différentes épaisseurs du Pt.

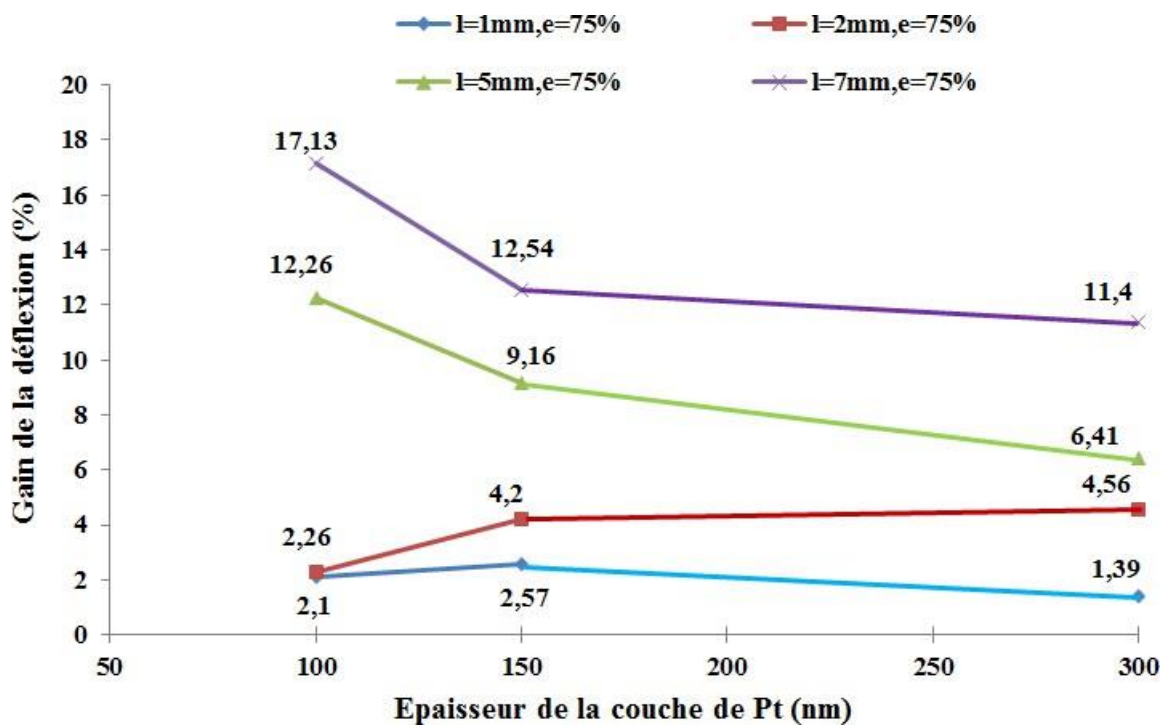


Figure 7. Evolution du gain déflexion en fonction des paramètres géométriques pour les différentes épaisseurs du Pt.

Articles scientifiques de rang A

1. Reduction of the warping of a silicon wafer coated with two thin layers by minimal geometric modifications.

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/mi-02-2022-0025/full/html>

2. Introduction of non-linear fracture mechanics in the modelling of a flip-chip component under drop impact.

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ssmt-12-2022-0063/full/html>

3. Implementation of the Homogenization Method in the Numerical Estimation of Wafer Warpage

<https://www.mdpi.com/2079-6412/13/2/318>

- [1] « Histoire de l'électronique », studylibfr.com. Consulté le: 26 novembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://studylibfr.com/doc/4528628/histoire-de-l-électronique>
- [2] A. Morard, « Miniaturisation et fiabilité des interconnexions copper pillar sur desassemblages de type « System In Package » (sip) pour le domaine aéronautique », These de doctorat, Université Grenoble Alpes (ComUE), 2019. Consulté le: 12 décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019GREAT068>
- [3] *Three Dimensional System Integration - IC Stacking Process and Design* | Antonis Papanikolaou | Springer. Consulté le: 12 décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://sci-hub.ee/https://www.springer.com/gp/book/9781441909619>
- [4] Wael, « Intel prépare une nouvelle architecture », Pause Hardware. Consulté le: 5 décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://pausehardware.com/intel-prepare-une-nouvelle-architecture/>
- [5] « As Chip Design Costs Skyrocket, 3nm Process Node Is in Jeopardy | Extremetech ». Consulté le: 17 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.extremetech.com/computing/272096-3nm-process-node>
- [6] K. Roy, B. Jung, et A. R. Than, « Integrated Systems in the More-than-Moore Era: Designing Low-Cost Energy-Efficient Systems Using Heterogeneous Components », *2010 23rd International Conference on VLSI Design*, p. 464-469, janv. 2010, doi: 10.1109/VLSI.Design.2010.84.
- [7] « La fabrication d'une puce - Ressources pour les enseignants - Ressources élémentaire ». Consulté le: 17 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/cea071>
- [8] L. B. Freund et S. Suresh, *Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution*. Cambridge University Press, 2004.
- [9] H. Isselé, « Caractérisation et modélisation mécaniques de couches minces pour la fabrication de dispositifs microélectroniques-application au domaine de l'intégration 3D », *UNIVERSITÉ DE GRENOBLE*, p. 196, 2006.
- [10] B. Abdelmadjid, « ELABORATION PAR SOL-GEL ET CARACTERISATION D'OXYDE METALLIQUE (TYPE : α -Fe₂O₃) AUX PROPRIETES PHOTOCATALYTIQUES », p. 87.
- [11] « dossier-technique-sol-gel-blog-rescoll1.pdf ». Consulté le: 29 décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://rescoll.fr/wp-content/uploads/2009/04/dossier-technique-sol-gel-blog-rescoll1.pdf>
- [12] « Tout savoir sur la photolithographie : définition et propriétés | Techniques de l'Ingénieur ». Consulté le: 29 décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/photolithographie>
- [13] « Introduction à la Micro-Optique - Techniques et procédés de fabrication ». Consulté le: 27 décembre 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M09_C01/co/Contenu_05.html
- [14] J. Czochralski, « Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle », *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, vol. 92U, n° 1, p. 219-221, nov. 1918, doi: 10.1515/zpch-1918-9212.
- [15] « Tesla chooses TSMC over Samsung, places huge 4nm chip order - PhoneArena ». Consulté le: 17 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.phonearena.com/news/tesla-tsmc-4nm-chip-order_id144416
- [16] Z. Said-Bacar, « Elaboration et caractérisations de silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du silicium amorphe », p. 157.

- [17] « Hopcroft_Youngs_Modulus_Silicon.pdf ». Consulté le: 19 février 2021. [En ligne]. Disponible sur: http://mems.stanford.edu/~hopcroft/Publications/Hopcroft_Youngs_Modulus_Silicon.pdf
- [18] N. W. Ashcroft et N. D. Mermin, *Solid state physics*, vol. 2005. holt, rinehart and winston, new york London, 1976.
- [19] K. A. Ewuame, « Analyse Expérimentale et Numérique des Contraintes Thermomécaniques Induites lors des Procédés Émergents de Fabrication de Puces Électroniques au moyen des Capteurs Embarqués », phdthesis, Université Paris sciences et lettres, 2016. Consulté le: 5 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.hal.science/tel-01405347>
- [20] R. Bisaro, J. Magariño, N. Proust, et K. Zellama, « Structure and crystal growth of atmospheric and low-pressure chemical-vapor-deposited silicon films », *Journal of Applied Physics*, vol. 59, n° 4, p. 1167-1178, févr. 1986, doi: 10.1063/1.336554.
- [21] M. H. Brodsky, R. S. Title, K. Weiser, et G. D. Pettit, « Structural, Optical, and Electrical Properties of Amorphous Silicon Films », *Phys. Rev. B*, vol. 1, n° 6, p. 2632-2641, mars 1970, doi: 10.1103/PhysRevB.1.2632.
- [22] C.-Y. Lu, N. C.-C. Lu, et C.-S. Wang, « Effects of grain-boundary trapping-state energy distribution on the activation energy of resistivity of polycrystalline-silicon films », *Solid State Electronics*, vol. 27, p. 463-466, mai 1984, doi: 10.1016/0038-1101(84)90154-0.
- [23] M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, Second Edition*, 2nd edition. CRC Press, 2002.
- [24] S. Ba Hashwan, A. R. Ruslinda, F. Mohd Faudzi, M. K. Md A, et U. Hashim, « Reduced graphene oxide–multiwalled carbon nanotubes composites as sensing membrane electrodes for DNA detection », *Microsystem Technologies*, vol. 23, août 2017, doi: 10.1007/s00542-016-3121-y.
- [25] « Semi-conducteur - Définition et Explications », Techno-Science.net. Consulté le: 17 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Semi-conducteur.html>
- [26] « Mechanical Stress of CVD-Dielectrics - IOPscience ». Consulté le: 7 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2069141/meta>
- [27] K. Assigbe, « Caractérisation et modélisation des propriétés mécaniques des couches minces pour l'intégration 3D - Application aux matériaux plastiques et aux grandes déformations », phdthesis, Université Grenoble Alpes, 2019. Consulté le: 10 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02169747>
- [28] M. Keefer, R. Pinto, C. Dennison, et J. Turlo, « 6 - The Role Of Metrology And Inspection In Semiconductor Processing », in *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques (Second Edition)*, K. Seshan, Éd., Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2001, p. 241-286. doi: 10.1016/B978-081551442-8.50011-0.
- [29] DISCO HI-TEC EUROPE GMBH, Éd., « Wafer Dicing by diamond blade - dicing-grinding service ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dicing-grinding.com/services/dicing/>
- [30] K. Yamamoto, T. Suyama, et N. Fujimori, « Optimization of Wafer Thinning Process by Reducing Thickness Variation of Temporary Adhesive Layer for Medical Device », in *2019 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, avr. 2019, p. 268-272. doi: 10.23919/ICEP.2019.8733598.
- [31] D. Bai *et al.*, « Edge Protection of Temporarily Bonded Wafers during Backgrinding », *ECS Trans.*, vol. 18, n° 1, p. 757-762, mars 2009, doi: 10.1149/1.3096533.
- [32] C.-Y. Huang, D. Ng, H.-H. Lee, V. Lin, C.-F. Lin, et C. K. Chung, « Process Induced Wafer Warpage Optimization for Multi-chip Integration on Wafer Level Molded Wafer »,

- in *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Las Vegas, NV, USA: IEEE, mai 2019, p. 1287-1293. doi: 10.1109/ECTC.2019.00199.
- [33] C. Ferrandon *et al.*, « Warpage reduction using dielectric layers stress tuning: From analytical model to 3D integration of large die on ceramic substrate », in *2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, sept. 2016, p. 1-6. doi: 10.1109/ESTC.2016.7764485.
- [34] J. B. Oliver, J. Spaulding, et B. Charles, « Stress compensation by deposition of a nonuniform corrective coating », *Appl. Opt., AO*, vol. 59, n° 5, p. A54-A57, févr. 2020, doi: 10.1364/AO.59.000A54.
- [35] M. M. Barrera, G. Kamian, E. J. McInerney, et C. L. Stevens, « Method of semiconductor wafer heating to prevent bowing », US6561796B1, 13 mai 2003 Consulté le: 16 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US6561796B1/en>
- [36] Q. Li *et al.*, « Influence of rapid thermal annealing on the wafer warpage in 3D NAND flash memory », *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 34, n° 2, p. 02LT01, janv. 2019, doi: 10.1088/1361-6641/aafccd.
- [37] C. Perabo, « Low Stress Dielectric Layers for Wafer Level Packages to Reduce Wafer Warpage and Improve Board-Level Temperature-Cycle Reliability », CAPLINQ BLOG. Consulté le: 23 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.caplinq.com/blog/low-stress-dielectric-layers-for-wafer-level-packages-to-reduce-wafer-warpage-and-improve-board-level-temperature-cycle-reliability_2540/
- [38] L. I. Maissel et R. Glang, *Handbook of Thin Film Technology*. McGraw-Hill, 1970.
- [39] K. Kinoshita, « Recent developments in the study of mechanical properties of thin films », *Thin Solid Films*, vol. 12, n° 1, p. 17-28, sept. 1972, doi: 10.1016/0040-6090(72)90387-2.
- [40] R. W. Hoffman, « Mechanical Properties of Non-Metallic Thin Films », in *Physics of Nonmetallic Thin Films*, C. H. S. Dupuy et A. Cachard, Éd., in NATO Advanced Study Institutes Series. , Boston, MA: Springer US, 1976, p. 273-353. doi: 10.1007/978-1-4684-0847-8_12.
- [41] H. R. W, « Physics of Thin Films », *Phys. Thin Films*, vol. 3, p. 211-273, 1966.
- [42] C. B. Masters, N. J. Salamon, et D. E. Fahnline, « Deflection Shapes Due to Intrinsic Stress in Thin Films », *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, vol. 188, p. 21, ed 1990, doi: 10.1557/PROC-188-21.
- [43] O. Knotek, R. Elsing, G. Krämer, et F. Jungblut, « On the origin of compressive stress in PVD coatings — an explicative model », *Surface and Coatings Technology*, vol. 46, n° 3, p. 265-274, sept. 1991, doi: 10.1016/0257-8972(91)90169-W.
- [44] H. Li, L. Z. Sun, J. B. Li, et Z. G. Wang, « X-ray stress measurement and FEM analysis of residual stress distribution near interface in bonded ceramic/metal compounds », *Scripta Materialia*, vol. 34, n° 9, p. 1503-1508, mai 1996, doi: 10.1016/1359-6462(95)00683-4.
- [45] L. B. Freund et S. Suresh, *Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. doi: 10.1017/CBO9780511754715.
- [46] « Introduction aux profilomètres à contact - Guide de métrologie - Digital Surf ». Consulté le: 26 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://guide.digitalsurf.com/fr/guide-profilometres-a-contact.html>
- [47] « Profilomètre mécanique pour l'industrie », Scientec. Consulté le: 26 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scientec.fr/produit/profilometre-mecanique-industrie/>
- [48] *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry: A User's Guide* / Wiley.

- [49] C. Mickaël, « Caractérisation de couches minces nanostructurées par ellipsométrie spectroscopique : application aux propriétés optiques isotropes et anisotropes de nanoparticules sphériques et ovoïdes de cobalt », phdthesis, Université Paul Verlaine - Metz, 2006. Consulté le: 5 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752448>
- [50] « M-2000 Ellipsometer », J.A. Woollam. Consulté le: 26 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.jawoollam.com/products/m-2000-ellipsometer>
- [51] F. Bernoux *et al.*, « Ellipsométrie - Théorie », *Mesures mécaniques et dimensionnelles*, juin 2003, doi: 10.51257/a-v1-r6490.
- [52] « The tension of metallic films deposited by electrolysis », *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 82, n° 553, p. 172-175, mai 1909, doi: 10.1098/rspa.1909.0021.
- [53] W. D. Nix, « Mechanical properties of thin films », *Metall Mater Trans A*, vol. 20, n° 11, p. 2217-2245, nov. 1989, doi: 10.1007/BF02666659.
- [54] *Stresses and failure modes in thin films and multilayers*.
- [55] E. Suhir, « An Approximate Analysis of Stresses in Multilayered Elastic Thin Films », *Journal of Applied Mechanics*, vol. 55, n° 1, p. 143-148, mars 1988, doi: 10.1115/1.3173620.
- [56] *Finite Element Modeling for Stress Analysis / Wiley*.
- [57] Z. Cao, A. Goritz, M. Wietstruck, S. T. Wipf, A. Trusch, et M. Kaynak, « Finite-element modelling of stress induced wafer warpage for a full BiCMOS process », *2019 IEEE 19th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*, p. 1-4, janv. 2019, doi: 10.1109/SIRF.2019.8709125.
- [58] Y. Mengke, Q. Fei, et Y. Daquan, « Numerical simulation on wafer warpage during molding process of WLCSP », in *2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, août 2018, p. 886-890. doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480570.
- [59] W.-Z. Yao, F. Roqueta, J. Craveur, S. Belhenini, P. Gardes, et A. Tougui, « Modelling and analysis of the stress distribution in a multi-thin film system Pt/USG/Si », *Materials Research Express*, vol. 5, n° 4, p. 046405, avr. 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aaba4b.
- [60] O. Shekoofa, J. Wang, D. Li, et Y. Luo, « Investigation of Microcrystalline Silicon Thin Film Fabricated by Magnetron Sputtering and Copper-Induced Crystallization for Photovoltaic Applications », *Applied Sciences*, vol. 10, n° 18, p. 6320, sept. 2020, doi: 10.3390/app10186320.
- [61] R. Hill, « Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles », *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 11, n° 5, p. 357-372, sept. 1963, doi: 10.1016/0022-5096(63)90036-X.
- [62] T. Zohdi et P. Wriggers, *An Introduction to Computational Micromechanics*, vol. 20. 2005. doi: 10.1007/978-3-540-32360-0.
- [63] O. Toufik, « Détermination du volume élémentaire représentatif (VER) et les propriétés macroscopiques d'un matériau hétérogène à microstructure aléatoire ».
- [64] « Silicon Wafer Fz 8 Inch N Type », [indiamart.com](https://www.indiamart.com/proddetail/silicon-wafer-fz-8-inch-n-type-20549276733.html). Consulté le: 26 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.indiamart.com/proddetail/silicon-wafer-fz-8-inch-n-type-20549276733.html>
- [65] C. Jang, S. Han, H. Kim, et S. Kang, « A numerical failure analysis on lead breakage issues of ultra fine pitch flip chip-on-flex and tape carrier packages during chip/film assembly process », *Microelectronics Reliability*, vol. 46, n° 2, p. 487-495, févr. 2006, doi: 10.1016/j.microrel.2005.06.013.
- [66] H. Watanabe, N. Yamada, et M. Okaji, « Linear Thermal Expansion Coefficient of Silicon from 293 to 1000 K », *International Journal of Thermophysics*, vol. 25, n° 1, p. 221-236, janv. 2004, doi: 10.1023/B:IJOT.0000022336.83719.43.

- [67] J.-H. Chae, J.-Y. Lee, et S.-W. Kang, « Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 75, n° 3, p. 222-229, juin 1999, doi: 10.1016/S0924-4247(98)00279-9.
- [68] M. V. Swain et J. Menčík, « Mechanical property characterization of thin films using spherical tipped indenters », *Thin Solid Films*, vol. 253, n° 1, p. 204-211, déc. 1994, doi: 10.1016/0040-6090(94)90321-2.
- [69] W. N. Sharpe, Jr., B. Yuan, R. Vaidyanathan, et R. L. Edwards, « New test structures and techniques for measurement of mechanical properties of MEMS materials », présenté à Micromachining and Microfabrication '96, M. T. Postek, Jr. et C. R. Friedrich, Éd., Austin, TX, sept. 1996, p. 78. doi: 10.1117/12.250969.
- [70] W.-Z. Yao, « Analyses thermomécaniques multi-échelles expérimentale et numérique pour des empilements de couches minces en microélectronique », These de doctorat, Tours, 2018. Consulté le: 14 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2018TOUR4023>
- [71] M. Y. Tsai *et al.*, « An investigation into warpages, stresses and keep-out zone in 3D through-silicon-via DRAM packages », *Microelectronics Reliability*, vol. 54, n° 12, p. 2898-2904, déc. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.08.017.
- [72] G. Carlotti, L. Doucet, et M. Dupeux, « Comparative study of the elastic properties of silicate glass films grown by plasma enhanced chemical vapor deposition », *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 14, n° 6, p. 3460-3464, nov. 1996, doi: 10.1116/1.588780.
- [73] F. Chen *et al.*, « Influence of underlying interlevel dielectric films on extrusion formation in aluminum interconnects », *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 18, n° 6, p. 2826-2834, nov. 2000, doi: 10.1116/1.1319691.
- [74] L. Shen, K. Zeng, Y. Wang, B. Narayanan, et R. Kumar, « Determination of the hardness and elastic modulus of low-k thin films and their barrier layer for microelectronic applications », *Microelectronic Engineering*, vol. 70, n° 1, p. 115-124, oct. 2003, doi: 10.1016/S0167-9317(03)00413-1.
- [75] C. Le Coq, « Prédiction de la fiabilité de composants électroniques de type WL-CSP soumis à des sollicitations mécaniques », These de doctorat, Tours, 2010. Consulté le: 14 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2010TOUR4025>
- [76] S. Hyun, O. Kraft, et R. P. Vinci, « Mechanical behavior of Pt and Pt-Ru solid solution alloy thin films », *Acta Materialia*, vol. 52, n° 14, p. 4199-4211, août 2004, doi: 10.1016/j.actamat.2004.05.034.
- [77] H. Lee, R. A. Coutu, S. Mall, et K. D. Leedy, « Characterization of metal and metal alloy films as contact materials in MEMS switches », *J. Micromech. Microeng.*, vol. 16, n° 3, p. 557, févr. 2006, doi: 10.1088/0960-1317/16/3/011.
- [78] M. Nascimento, *Abaqus Analysis Users Guide*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.academia.edu/28334906/Abaqus_Analysis_Users_Guide
- [79] P. Kanouté, D. Boso, J. Chaboche, et B. Schrefler, « Multiscale Methods for Composites: A Review », *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 16, p. 31-75, mars 2009, doi: 10.1007/s11831-008-9028-8.
- [80] J.-M. Berthelot, *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. in Mechanical engineering series. New York ; Springer, 1999.
- [81] R. A. Schapery, « Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials Based on Energy Principles », *Journal of Composite Materials*, vol. 2, n° 3, p. 380-404, juill. 1968, doi: 10.1177/002199836800200308.

- [82] G. M. Gladysz et K. K. Chawla, « Coefficients of thermal expansion of some laminated ceramic composites », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, n° 2, p. 173-178, févr. 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00144-5.