

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de Constantine
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'électronique

N° d'ordre :

Série :

Mémoire Présenté
En vue d'obtention d'un Diplôme de Magister
En Electronique

Thème :

Traitement des analyses par sonde ionique
SIMS en régime variant. Applications aux
CMOS ultimes

Présenté Par:
Gouder soraya

Soutenu le: -- / -- / 2008

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA RUGOSITÉ AU FOND DU CRATÈRE SIMS POUR DIFFÉRENTES CONDITIONS D'ANALYSES	
1. INTRODUCTION	3
2. SPECTROMETRIE DE MASSE À IONISATION SECONDAIRE	3
2.1. Définition	3
2.2. Performances de la technique	4
2.3. Limites de la technique	4
2.4. Le mixage collisionnel	5
2.5. Effets de l'oxygène dans l'analyse SIMS	6
2.5.1. La ségrégation	6
2.5.2. Le gonflement de la matrice	6
2.5.3. L'utilisation du soufflage d'oxygène	6
3. RUGOSITES	7
3.1. Définition	7
3.2. Évaluation de la rugosité d'une surface	8
4. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'OCCURRENCE DES RUGOSITES	10
4.1. Incidence normale ou quasi normale, U.H.V	10
4.2. Incidence oblique, U.H.V, haute énergie ($E \geq 3\text{keV}$)	10
4.3. Incidence oblique, U.H.V, basse énergie ($E \leq 2\text{keV}$)	12
4.4. Incidence oblique, soufflage d'oxygène, haute énergie	16
4.5. Incidence oblique, soufflage d'oxygène, basse énergie	16
4.6. Rotation de l'échantillon	18
5. CONSÉQUENCES DE LA RUGOSITÉ SUR L'INTENSITÉ DES IONS SECONDAIRES	21
6. CONCLUSION	21
CHAPITRE 2: MÉTHODE DE CALCUL –HISTOGRAMME-	
1. INTRODUCTION	25
2. HISTOGRAMME	25
2.1. Définition	25
2.2. Construction théorique	26
2.3. Contexte général	27
3. RÉOLUTION EN PROFONDEUR	28
3.1. Définition	28

3.1.1. Traîné exponentielle	28
3.1.2. Largeur à mi hauteur	29
3.1.3. Moment centré d'ordre deux	29
3.2. Forme analytique de la fonction de résolution	30
3.3. relation entre les paramètres de la DRF et les différents phénomènes physiques	31
3.4. Influence de la rugosité sur la DRF	31
3.5. Profil en profondeur	31

4. ETAPES D'EVALUATION DE LA RUGOSITE 33

5. CONCLUSION 34

CHAPITRE 3: ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ SUR LA RÉSOLUTION EN PROFONDEUR: RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1. INTRODUCTION 35

2. CONDITIONS EXPERIMENTALES 35

3.ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ SUR LA RÉSOLUTION EN PROFONDEUR 36

3.1. Étude sans soufflage d'oxygène (UHV)	36
3.1.1. Étude qualitative	36
3.1.1.1. Analyse SIMS	36
3.1.1.2. Analyse AFM	39
3.1.2. Étude quantitative	41
3.1.2.1. Échantillon analysé à 1kev, angle d'incidence 48°, profondeur du cratère 220nm	41
3.1.2.2. Échantillon analysé à 1kev, angle d'incidence 48°, profondeur du cratère 210nm	42
3.1.2.3. Échantillon analysé à 0.5kev, angle d'incidence 54°, profondeur du cratère 101nm	43
3.1.2.4. Échantillon analysé à 0.5kev, angle d'incidence 44°, profondeur du cratère 166nm	44
3.1.3. Évaluation de la résolution en profondeur	45
3.2. Étude sous soufflage d'oxygène	48
3.2.1. Étude qualitative	48
3.2.1.1. Analyse SIMS	48
3.2.1.2. Analyse AFM	50
3.2.2. Étude quantitative	51
3.2.2.1. Échantillon analysé à 1kev, angle d'incidence 48°, profondeur du cratère 220nm	51
3.2.2.2. Échantillon analysé à 0.5kev, angle d'incidence 44°, profondeur du cratère 277nm	52
3.2.2.3. Échantillon analysé à 0.5kev, angle d'incidence 54°, profondeur du cratère 194nm	53
3.2.3. Étude de la résolution en profondeur	54

4. AUTRE MANIÈRE POUR L'ÉVALUATION DE S_R	57
5. MODÈLE MRI	58
6. INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ SUR LA CALIBRATION EN PROFONDEUR	58
7. CONCLUSION	61
CONCLUSION GÉNÉRALE	63

1. INTRODUCTION

La spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS) est une technique d'analyse élémentaire pour caractériser les jonctions, elle permet de détecter des faibles concentrations d'impuretés aussi bien que des dopants et de réaliser des profils de concentration en fonction de la profondeur dans le matériau. Malgré ses performances, elle est limitée par des phénomènes physiques parasites parmi lesquels on trouve la rugosité.

Dans ce chapitre, nous allons faire un bref descriptif de la méthode de caractérisation (SIMS). Puis, nous essayerons de décrire l'origine et la forme de la rugosité, en nous basant sur une étude bibliographique concernant l'apparition de la rugosité dans différentes conditions d'analyse (incidence normale ou oblique, différentes énergies d'impact, angles d'incidence et présence ou non du soufflage d'oxygène).

2. SPECTROMÉTRIE DE MASSE À IONISATION SECONDAIRE

2.1 Définition

Le procédé d'analyse de surface connu sous le nom de SIMS, d'après l'acronyme anglais signifiant **Secondary Ion Mass Spectrometry** consiste à bombarder la surface de l'échantillon à analyser avec un faisceau *d'ions*. L'échantillon est alors pulvérisé, et une partie de la matière pulvérisée est ionisée. Ces ions secondaires sont alors accélérés vers un *spectromètre de masse* qui permettra de mesurer la composition élémentaire ou *isotopique* de la surface de l'échantillon.

La spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS) est un outil puissant pour la détermination des profils de concentration des dopants. Le SIMS est la technique d'analyse de surface la plus sensible, mais présente plus de difficultés dans l'interprétation quantitative précise que d'autres techniques.

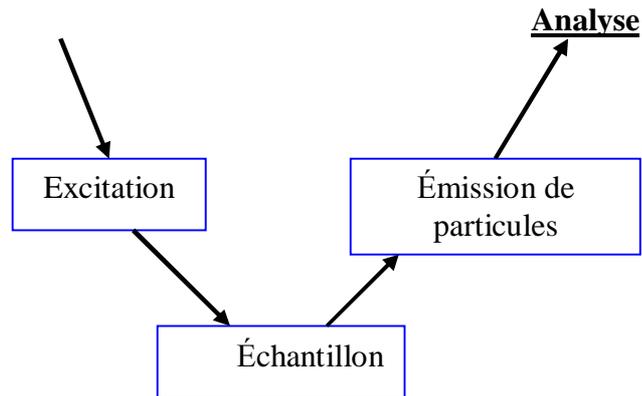


Figure 1.1 : Schéma de principe d'une analyse de surface

2.2. Performances de la technique

L'analyse SIMS permet la détection et la mesure de n'importe quel élément de la classification dans une matrice donnée. La sensibilité est de l'ordre du ppm pour beaucoup d'éléments, et du ppb dans d'autres cas (Bore). C'est donc une technique très bien adaptée aux semi-conducteurs, qui sont maintenant dopés avec des concentrations très faibles ou très fortes sur des distances toujours plus petites.

La résolution est de l'ordre du micromètre (μm) latéralement et du nanomètre (nm) en profondeur et de l'ordre de 10^{-4} ($\Delta M/M$) en masse.

L'analyseur ionique constitue un outil d'analyse extrêmement puissant qui permet trois modes de fonctionnement : l'analyse des ions secondaires, l'analyse en profondeur et l'imagerie, avec une très grande sensibilité et une bonne résolution [1].

2.3. Limites de la technique [1]

Plusieurs limitations découlent du procédé de la mesure. Tout d'abord, l'analyse est destructive, puisque l'échantillon est érodé pratiquement plan atomique par plan atomique, mais jusqu'à des profondeurs de l'ordre du μm . La surface endommagée est à chaque nouvelle mesure d'environ ($500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$) ; il faudra donc tenir compte de la surface disponible à la mesure sur l'échantillon.

De par les dimensions de l'aire analysée, on ne peut obtenir qu'une étude locale de l'échantillon. On ne peut donc pas étudier un échantillon hétérogène ou de structure latérale

complexe avec une mesure unique. On peut cependant accumuler des images à différentes profondeurs.

L'inconvénient majeur de l'analyse SIMS est la quantification des résultats obtenus. En effet, la complexité de chaque processus de la mesure ne permet pas de modéliser totalement l'analyse, et encore moins de la quantifier. On a besoin, pour connaître une concentration exacte, d'une mesure étalon faite sur un échantillon de référence et dans les mêmes conditions expérimentales. C'est une analyse dite « semi quantitative ». En microélectronique, on fait appel à des échantillons standard implantés pour calibrer les mesures.

2.4. Le mixage collisionnel

Lors du bombardement de la cible par les ions primaires, ces derniers transfèrent leurs énergies aux atomes de la cible, ce qui provoque une nouvelle distribution locale des espèces. On peut distinguer deux modes de mixage collisionnel :

- ∅ Le mixage par choc direct : dû essentiellement au premier choc de l'ion incident avec un atome de la cible, le transfert d'énergie est anisotrope et les atomes frappés sont projetés vers l'intérieur du matériau.
- ∅ Le mixage par cascades : c'est une succession de chocs entre atomes de la cible, ces chocs sont moins énergétiques que les chocs directs, mais infiniment plus nombreux. L'énergie d'impact d'un ion primaire est transférée dans le déplacement de nombreux atomes de la cible jusqu'à ce que l'énergie transférable d'un atome à un autre devienne inférieure à l'énergie de déplacement des atomes de la cible qui est d'environ 20eV (figure 1.2).

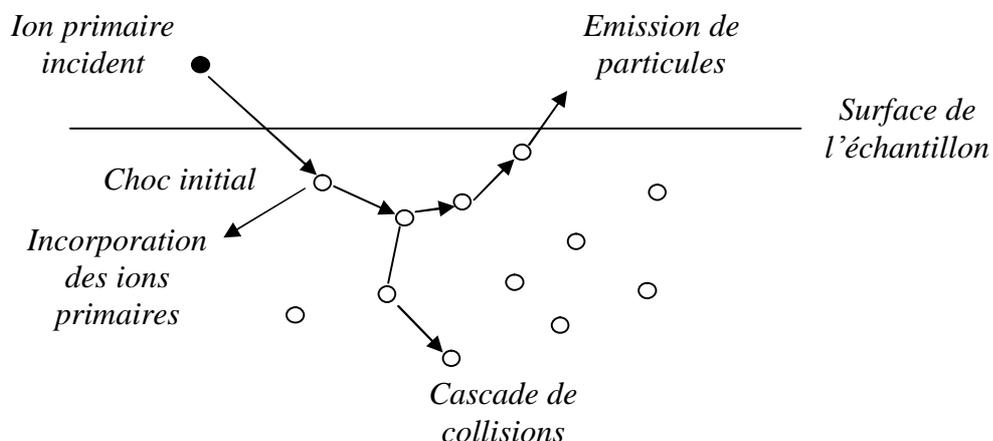


Figure 1.2 : Principe du mixage collisionnel

2.5. Effets de l'oxygène dans l'analyse SIMS

L'utilisation de l'oxygène comme source des ions primaires a des conséquences diverses d'une part sur l'amélioration de la résolution en profondeur et d'autre part sur la diminution du régime transitoire en utilisant le soufflage [2].

2.5.1. La ségrégation

Lors du bombardement du silicium par des ions O_2^+ , il y a une importante incorporation des ions primaires dans la cible, ce qui se traduit par une oxydation des couches atomiques proches de la surface de l'échantillon. On obtient donc une interface dynamique SiO₂/Si qui se déplace vers l'intérieur de l'échantillon au fur et à mesure de l'analyse. Certaines espèces réagissent à ce phénomène et migrent vers l'interface SiO₂/Si, là où il n'y a plus d'oxygène. Ce phénomène est appelé *ségrégation*.

La ségrégation entraîne une dégradation de la résolution en profondeur, car les impuretés ségréguées fuient régulièrement vers l'intérieur.

2.5.2. Le gonflement de la matrice

En l'absence de ségrégation, l'oxydation des premières couches atomiques de la matrice s'accompagne, d'un point de vue géométrique, d'un gonflement de la matrice, appelé *swelling*, lié à l'incorporation des ions primaires. Ce phénomène apparemment transparent pour l'opérateur, va en fait provoquer d'une part une augmentation très importante du taux d'ionisations des espèces à analyser et d'autre part une dilution locale de toutes les espèces par la présence des atomes d'oxygène incorporés [2].

Brice Gautier a montré que le gain de résolution en profondeur lié à ce phénomène peut atteindre 2.35 dans le cas du silicium [3].

2.5.3. L'utilisation du soufflage d'oxygène

Alternativement ou conjointement à l'emploi d'ions primaires d'oxygène, l'échantillon est bombardé sous une certaine pression d'oxygène gazeux ($>2.10^{-6}$ Torr) dans la chambre de l'échantillon, au lieu d'un vide poussé, cette technique est dite « **sous soufflage d'oxygène** ».

Le meilleur avantage du soufflage est sa capacité à diminuer le régime transitoire de la mesure et à augmenter le taux d'ionisation des impuretés électropositives (le Bore). Ces avantages assurent une meilleure reproductibilité des profils [2].

Par contre, il a comme inconvénient une diminution de la vitesse d'érosion par un facteur 2 à 4 (pour le Silicium) et la difficulté de régler le faisceau primaire [2].

Après avoir exposé les différents mécanismes responsables de la dégradation de la résolution en profondeur ainsi qu'une brève description de l'analyse par spectrométrie de masse des ions secondaires (SIMS), nous allons procéder à l'étude de la rugosité qui se développe en fond de cratère SIMS car sa maîtrise est déterminante pour qui veut atteindre les résolutions en profondeur ultimes de la technique.

3. RUGOSITÉS

3-1 Définition

On désignera par « rugosité » le relief ou le phénomène conduisant à l'apparition d'un relief sur la surface d'un matériau initialement plan et soumis à un bombardement ionique [4]. La rugosité est un phénomène mal compris et mal maîtrisé, elle est induite sous deux formes :

- Ø *Une rugosité induite par le faisceau primaire*: où la mauvaise centralisation de ce dernier influe sur la forme finale du cratère.
- Ø *Une rugosité induite à la surface de l'échantillon*: où il y a apparition d'ondulations alignées avec la direction du bombardement pour les incidences faibles et perpendiculaire à cette direction pour des énergies importantes, ainsi que sous la forme de cones et pyramides.

La figure 1.3 tirée de la bibliographie présente des observations de rugosités par la technique de l'AFM obtenue dans le « mode tapping ». Il ressort de cette figure une caractéristique commune, considérée d'ailleurs comme générale : les rugosités induites par bombardement se présentent sous la forme d'ondulations.

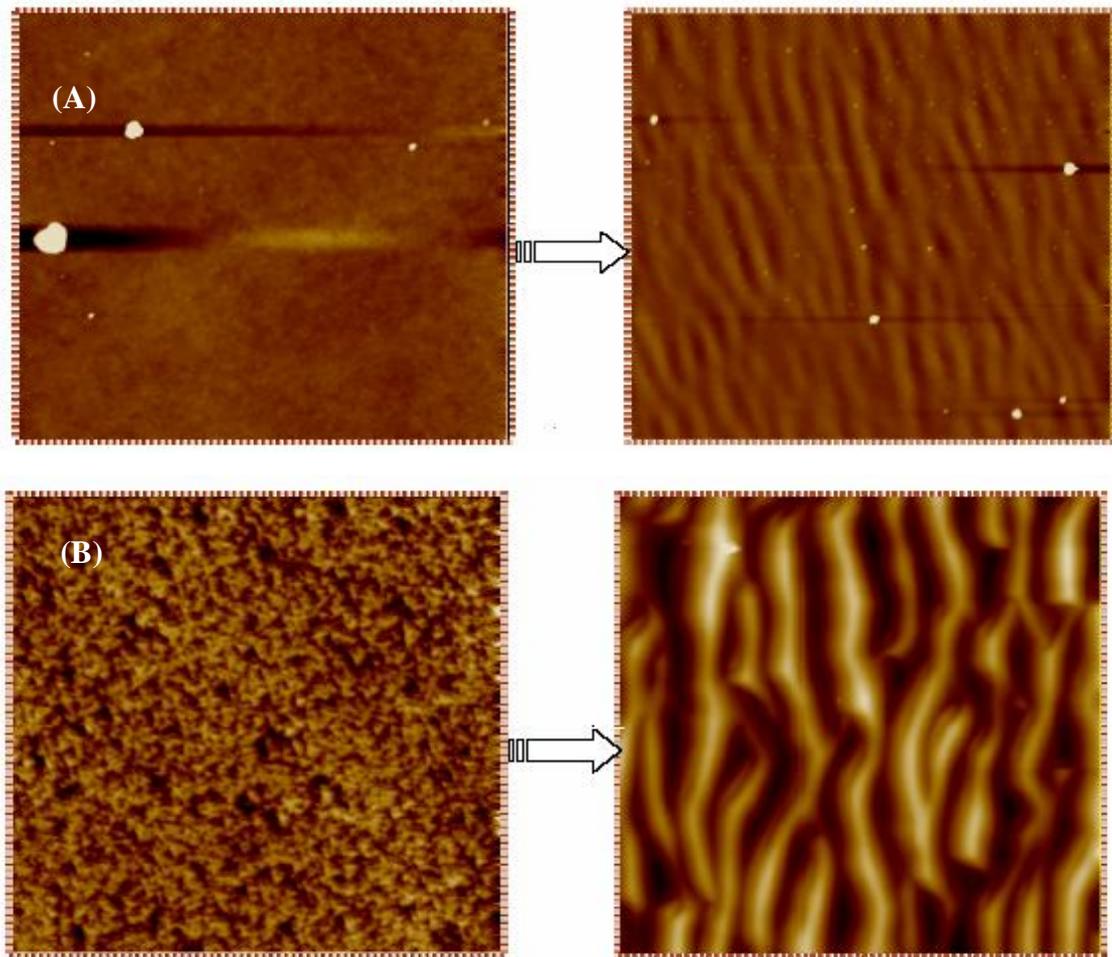


Figure 1.3 : Image AFM (5x5) μm : différence de rugosité pour une surface initiale lisse

(A) et pour une surface initiale rugueuse (B)

(Les échantillons proviennent du laboratoire de Microélectronique de puissance

« Université de TOURS ») [2].

3.2. Évaluation de la rugosité d'une surface

Pour permettre l'évaluation de la rugosité, il faut d'abord répondre à deux questions: quelle définition mathématique peut on donner à la rugosité et comment peut on la mesurer ?

La mesure de la rugosité est une tentative de chiffrer un état de surface, pour cela, on donne la définition de quelques paramètres qui évaluent la rugosité de l'échantillon, à partir de l'image topographique de l'AFM.

▼ **Ra** : moyenne de toutes les hauteurs mesurées :

$$\mathbf{Ra} = \frac{\sum_i z_i}{n}$$

- ✓ **Rmax**: la rugosité maximale est l'écart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité sur la longueur totale d'évaluation L.

$$\mathbf{Rmax} = [\mathit{Max}(z(x, y)) - \mathit{Min}(z(x, y))]$$

- ✓ **RMS** (Root Mean Square) : la moyenne géométrique des hauteurs de tous les points de la surface balayée par le microscope

$$\mathbf{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i z_i^2}{n}}$$

- ✓ Rugosité 10 points **Rz** : c'est la différence moyenne en hauteur entre les 5 plus hauts pics de la section et les 5 plus bas, relativement à la ligne médiane
- ✓ Période spectrale **Lc** : donnée par les pics sur la densité spectrale (transformée de Fourier (FFT)) de la section.

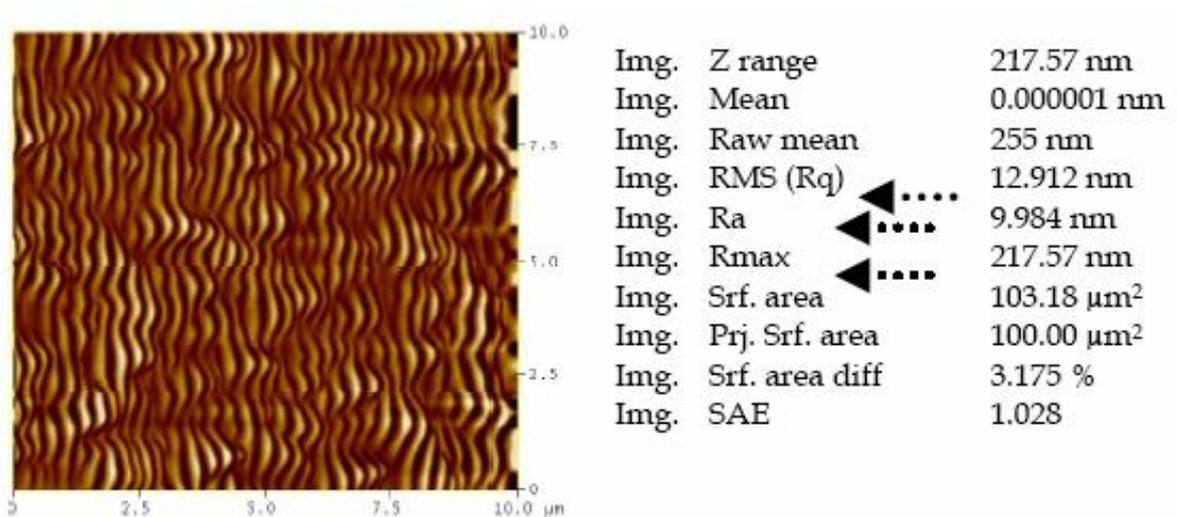


Figure 1.4 : exemple de mesures de paramètres de la rugosité pour un cratère SIMS [2]
 (Conditions expérimentales : Si (100), (10-4.5) keV, 42.4° et 2.8 μm de profondeur)
 Image AFM en « mode tapping ».

La rugosité quadratique moyenne RMS est de loin la plus citée dans la littérature car elle décrit de manière appropriée les surfaces homogènes, cependant ce paramètre ne convient pas aux surfaces contenant des cônes ou des pyramides.

4. TRAITE BIBLIOGRAPHIQUE DES OBSERVATIONS DES RUGOSITÉS

Il est constaté que les rugosités ne se développent pas de façon instantanée dans le cas général. Il est donc intéressant et nécessaire de décrire le plus précisément possible l'évolution de ce relief avec la dose d'ions primaires, à laquelle on peut faire correspondre une profondeur érodée. On définira une dose critique, Φ_{rug} à partir de laquelle les rugosités commencent à se développer. Il y correspond une profondeur d'érosion critique que l'on notera d_c .

Φ_{rug} délimite deux régimes de l'analyse :

- Ø Pour $\Phi < \Phi_{\text{rug}}$, on est en régime permanent plan
- Ø Pour $\Phi > \Phi_{\text{rug}}$, on est en régime des rugosités [4].

Du point de vue de l'analyse SIMS, c'est le paramètre d_c qui est de loin le plus important : il suffit en effet qu'une analyse soit arrêtée avant d_c pour que les rugosités et leurs conséquences puissent être négligées.

Dans cette section, nous représentons les principaux résultats rapportés dans la littérature, concernant l'étude de rugosités, ces résultats dépendent:

- ✓ De l'énergie d'impact (haute énergie $E \geq 3\text{keV}$ ou basse énergie $E \leq 2\text{keV}$;
- ✓ De l'angle d'incidence (incidence normale ou oblique) ;
- ✓ De la présence d'un soufflage d'oxygène.

4.1. Incidence normale ou quasi normale, U.H.V

Jusqu'à présent, il n'a pas été mentionné d'occurrence de rugosités pour ces conditions d'analyse, qui correspondent à la formation d'un oxyde stoechiométrique [4], néanmoins, d'après [5] une rugosité faible se manifeste $\text{RMS}=0.1\text{nm}$ pour $E=0.4\text{keV}$.

4.2. Incidence oblique, U.H.V, haute énergie ($E \geq 3\text{keV}$)

Les rugosités commencent à apparaître et ce d'autant plus tôt que l'incidence augmente. Par exemple, pour des ions dont l'énergie varie de 6 à 10keV, d_c passe de $4\mu\text{m}$ pour $q = 35^\circ$ à $0.4\mu\text{m}$ pour $q = 55^\circ$ [6]. Cependant pour des angles supérieurs à 60° , aucune rugosité ne s'est manifestée [4].

D'autres travaux montrent qu'à angle fixe, la profondeur d'apparition d_c change peu avec l'énergie, pour un angle d'impact de 40° , d_c passe lentement de ≈ 5 à $3\mu\text{m}$ pour une énergie allant de 9 à 3keV [7].

De même Stevie et al [8] ont montré que pour un angle fixe de $40^\circ \pm 2^\circ$, la profondeur de transition d_c diminue lentement de 5 à $4.5\mu\text{m}$ pour une énergie allant de 9 à 5keV passant par une valeur de $3\mu\text{m}$ à 3keV, comme ils ont montré que la rugosité se produit à une profondeur de transition de $4\mu\text{m}$ pour une énergie de 8keV et un angle de 39° .

La rugosité évolue avec la profondeur d'érosion, par exemple : pour $E=5.5\text{keV}$, $\text{RMS}=10\text{nm}$ pour $2.8\mu\text{m}$ et 165nm pour $8\mu\text{m}$ [2].

Les rugosités commencent à apparaître quand l'incidence augmente pour une énergie donnée. Cela peut s'expliquer par la quantité faible d'oxygène incorporée [9].

Le tableau 1 regroupe quelques résultats des travaux menés par plusieurs auteurs.

	Energie d'impact (keV)	Angle d'incidence ($^\circ$)	Profondeur de transition (μm)	Instrument
Stevie et Al	6	41	3.2	IMS-3f PHI-6300 PHI-6300
	6	30	2.9	
	6	45	2.3	
	IMS-3f	5.5	42	2.9
		5.5	42	1.2
		5.5	42	0.3
K. Wittmaack	6-10	35	4	Atomica-6500
		55	0.4	
J. Vajo et Al	3	40	3.4	PHI-3500
	5		5.3	
	9		5.6	
Boubker Fares	3.5	49	1.71	IMS-3f
	5.5	42.4	2.5	
	8.5	38.7	3	

Tableau 1 : étude bibliographique de la dépendance de la profondeur de transition avec l'énergie d'impact et l'angle d'incidence dans Si [2]

4.3. Incidence oblique, U.H.V, basse énergie ($E \leq 2\text{keV}$)

À basse énergie, certains résultats ont montré une absence de la rugosité, par exemple, d'après les travaux dirigés par Vajo et al [8], aucun développement de rugosité n'est observé à 1keV et 40° par rapport à 1.5keV, où la rugosité se manifeste trop tôt ($d_c = 0.16\mu\text{m}$).

Par ailleurs, les travaux menés par Jiang montrent que la rugosité se développe plus tôt qu'à haute énergie [10]. Par exemple : $d_c = 50\text{nm}$ pour 1keV à 48° , et 15nm pour 0.6keV à 58° .

Ces résultats ainsi que d'autres sont regroupés dans le tableau 2.

	Energie (keV)	Angle d'incidence ($^\circ$)	Profondeur de transition (nm)
Vajo.J, Doty R et Cirlin [7]	1.5	40	100
Jiang [10]	1 0.6	48 58	50 15
Barlow et Dow set [11]	2	45	250
Liu R, Ng C.M et Wee A.T.S[12]	0.5	46 56	15 60

Tableau 2 : Étude bibliographique de la dépendance de la profondeur de transition avec l'énergie d'impact et l'angle d'incidence

D'après ce tableau l'apparition de la rugosité est extrêmement sensible à l'angle d'incidence et apparaît plutôt pour des faibles angles : par exemple, $d_c = 15\text{nm}$ pour 46° et 60nm pour 56° à une énergie d'impact de 0.5keV [12].

Cependant, RMS vaut 1.15nm à 60° et 0.24nm à 50° pour une énergie fixe de 0.5keV [5].

Au dessous de 1keV, la rugosité RMS varie d'une façon importante avec l'angle d'incidence et prend une valeur minimale à 60° , par contre à 2keV la rugosité RMS est faible et vaut 0.3nm (voir figure 1.5)

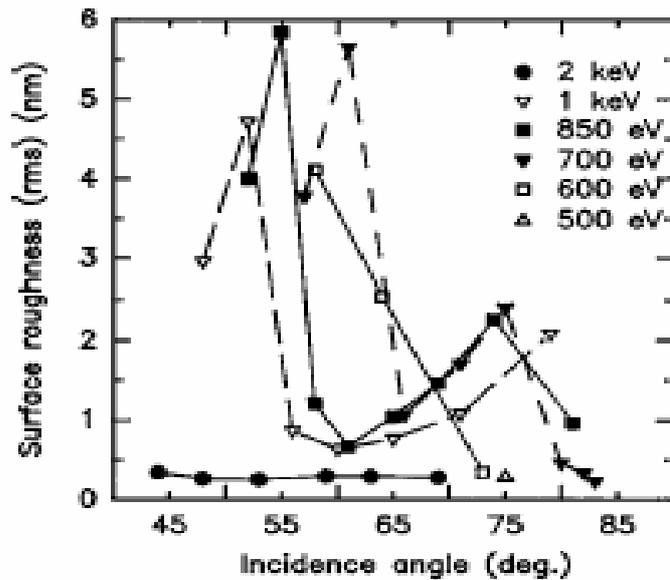


Figure 1.5 : la rugosité RMS en fonction de l'angle d'incidence pour différentes énergies d'après [10]

La figure 1.6 vient renforcer les résultats de la figure 1.5. Pour une énergie de 1keV et des différents angles d'incidence elle présente une observation de la rugosité en fond du cratère par l'AFM, nous observons une topographie de la surface de l'échantillon Si qui prend une forme d'ondulation sinusoïdale pour les différents angles d'incidence utilisés, où $RMS=0.6nm$ à 60° .

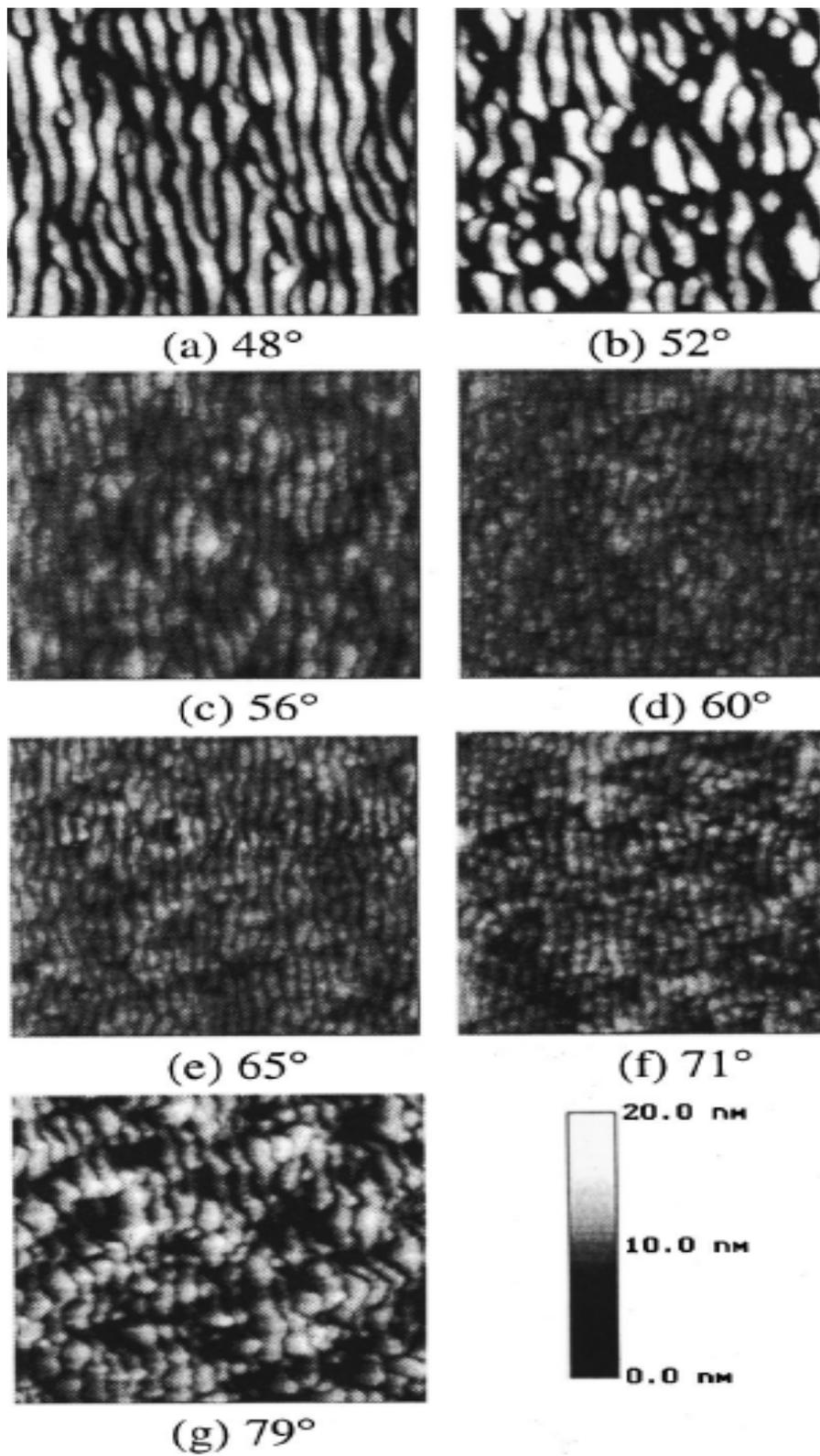


Figure 1.6 : images AFM ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) pour $E=1\text{keV}$, O_2^+ et différents angles d'incidences d'après [10]

Dans ce domaine de la basse énergie, la variation de la profondeur de transition n'est plus monotone et décroissante, par exemple à 1kev, on a l'évolution suivante [13] :40nm à 39°,15nm à 42°, 25nm à 49°, 30nm à 52°, 40nm à 57° et 50nm à 62°. (Figure 1.7) On remarquera que les résultats des références [13] et [10] ne sont pas en accord.

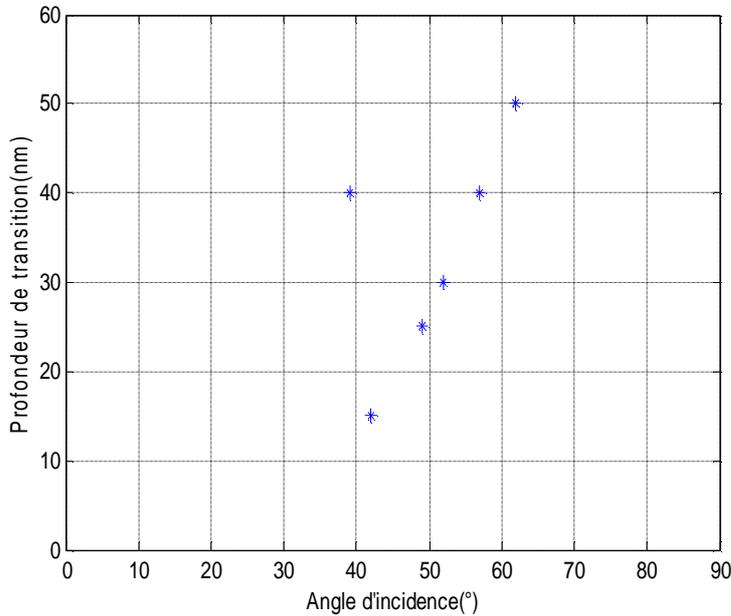


Figure 1.7: variation de la profondeur de transition avec l'angle d'incidence d'après [13]

Une autre étude menée par le groupe analytique «EVANS» [14] incluant même l'incidence normale pour des énergies qui varient entre 0.25kev et 1.5kev montre que, la rugosité RMS varie d'une façon importante avec l'angle d'incidence et prend des valeurs minimales à des angles faibles. Par exemple, à 1kev : RMS \approx 0.12nm (valeur minimale) pour un angle de 25° et elle vaut 0.35nm pour 35° (valeur maximale) (voir figure 1.8).

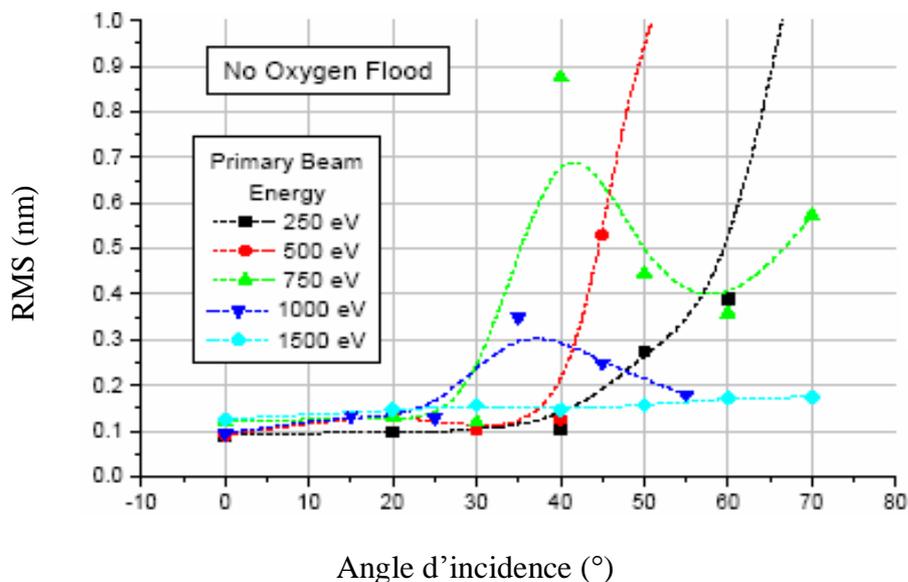


Figure 1.8: Variation de la rugosité RMS avec l'angle d'incidence d'après [14]

Le tableau 3 montre une importante variation de la rugosité RMS avec l'énergie d'impact et sous un angle constant $\theta=46^\circ$, la rugosité augmente d'autant plus que l'énergie diminue et atteint une valeur critique pour $E=0.5\text{keV}$.

Angle d'incidence ($^\circ$)	Énergie (keV)	Rugosité RMS (nm)
$\Theta=46^\circ$	0.5	4.32
	1.5	0.54
	2	0.21

Tableau 3 : Étude bibliographique de la dépendance de la rugosité RMS avec l'énergie d'impact et l'angle d'incidence d'après [15]

4.4. Incidence oblique, soufflage d'oxygène, haute énergie

Aucun développement de la rugosité n'est observé dans ces conditions d'analyses où il a été montré que la profondeur de transition diminue avec la pression d'oxygène (d'un facteur 10 ou 20) et disparaît d'une manière absolue au soufflage jusqu'à saturation ($\approx 2 \times 10^{-5}$ torr) (les travaux des références [2-8-9-16]).

4.5. Incidence oblique, soufflage d'oxygène, basse énergie

D'une part certains travaux ont montré que le soufflage intermédiaire aggrave la situation par rapport à l'ultravide (travaux des références [17-18-19]). Par ailleurs au soufflage jusqu'à saturation, des résultats assez opposés ont été publiés : d'une part, plusieurs travaux ont montré une apparition avancée des rugosité aux alentours de $55-60^\circ$ d'incidence pour des énergies de 1.9keV [18] et de 1keV [13-17]. Leurs auteurs ont conclu qu'il n'était pas possible d'effectuer d'analyses correctes en incidence oblique avec soufflage. La figure (1.9) montre que la rugosité RMS accroît avec le soufflage d'oxygène.

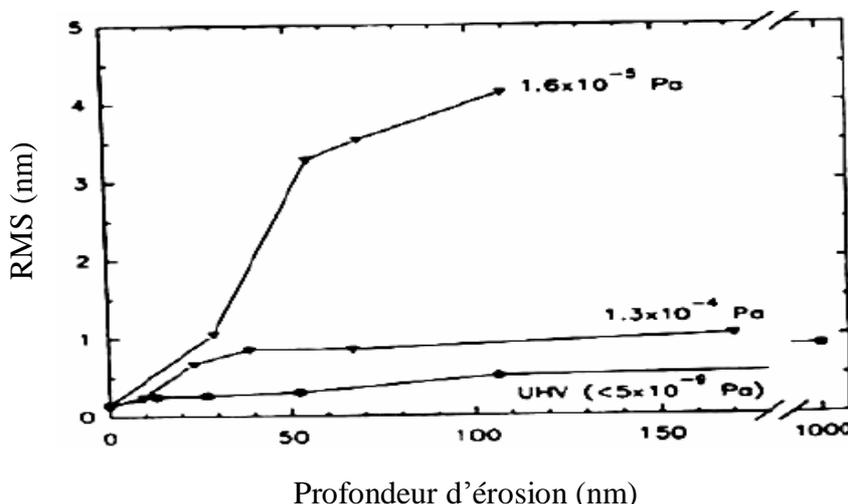


Figure 1.9 : L'évolution de rugosités RMS avec la pression d'oxygène à 1keV et 60° [17]

Par ailleurs, d'autres travaux ont montré qu'en diminuant l'angle d'incidence, aucune manifestation de rugosité n'était considérée (travaux des références [20-21]).

Cependant, plusieurs travaux ont montré que la rugosité RMS diminue avec le soufflage jusqu'à saturation par rapport à l'ultra vide : par exemple : À 0.5keV, 56°, RMS=1.4nm sans soufflage et 0.1nm avec soufflage [22] aussi à 2.1keV, 48.8°, RMS=2.7nm sans soufflage et 0.4nm avec soufflage [23] et à 0.5keV, 50°, RMS=0.24nm sans soufflage et 0.17nm avec soufflage [5], ce que peut être accordé à la formation de SiO₂ homogène au fond du cratère.

La figure 1.10 montre la variation de la rugosité RMS avec l'angle d'incidence toujours au sein du groupe EVANS [18], une diminution de RMS par rapport aux valeurs obtenues en (figure 1.8) est remarquable. Aussi, il est à noter que l'angle de 60° peut être considéré comme « un angle critique » car la rugosité RMS prend la valeur maximale.

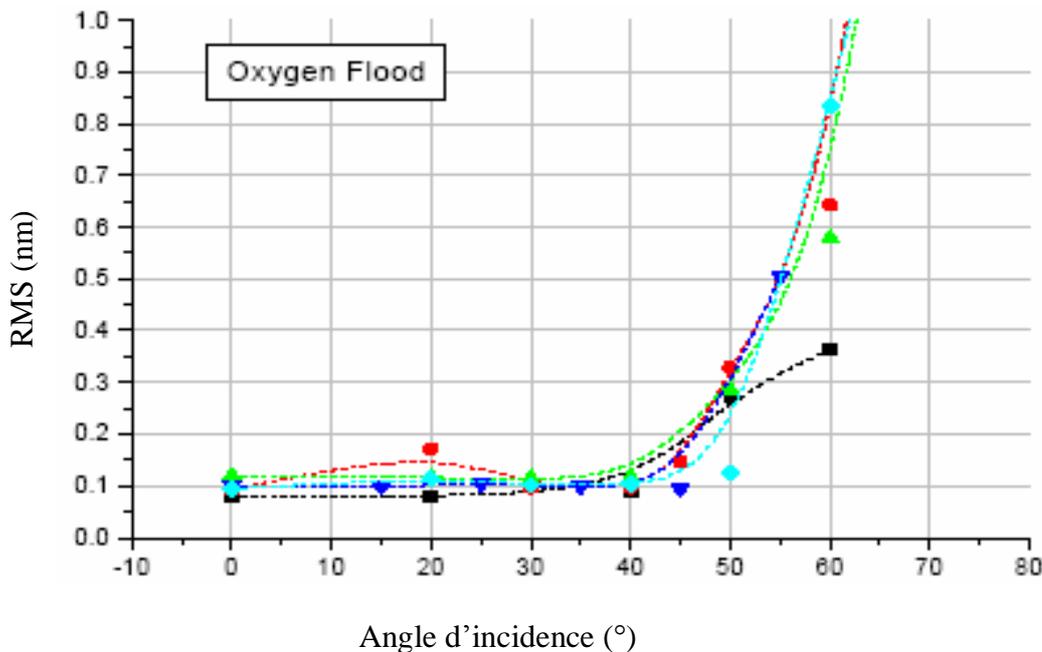


Figure 1.10 : Variation de la rugosité RMS avec l'angle d'incidence d'après [14]

Bilan :

Ce tour d'horizon des différentes conditions qui influent sur la rugosité (la rugosité RMS et la profondeur de transition d_c) nous permet de réaliser que les conditions dans lesquelles la rugosité soit minimale ne sont pas universelles. Il est clair que le développement des rugosités est loin d'être compris et maîtrisé. En particulier, en ultra vide et d'après la littérature, l'évolution énergétique et angulaire se complique grandement lorsque l'énergie d'impact baisse.

la tendance générale est d'utiliser une certaine pression d'oxygène gazeux dans la chambre de l'échantillon, au lieu d'un vide poussé (*soufflage d'oxygène*), de baisser l'énergie des ions primaires et de baisser leur angle d'incidence. Toutefois, il ne faut pas négliger les travaux qui ont montré l'apparition précoce de rugosité, leurs auteurs ont conclu qu'il n'était pas possible d'effectuer d'analyses correctes en incidence oblique avec soufflage (travaux des références [13-17-18]). Les solutions sont souvent spécifiques à un type d'élément dans un type de matrice, dans le cas d'oxygène c'est la rotation de l'échantillon.

4.6. La technique de rotation de l'échantillon

Afin de minimiser l'effet de la rugosité au fond du cratère SIMS, plusieurs auteurs ont présenté la technique de rotation de l'échantillon pendant l'analyse, où ils ont montré que la résolution en profondeur a été améliorée et que les ondulations dues au bombardement sont moins prononcées.

Par exemple, à 500eV à 56° , on obtient : RMS=1.4nm sans rotation et 0.2nm avec rotation (figure 1.11).

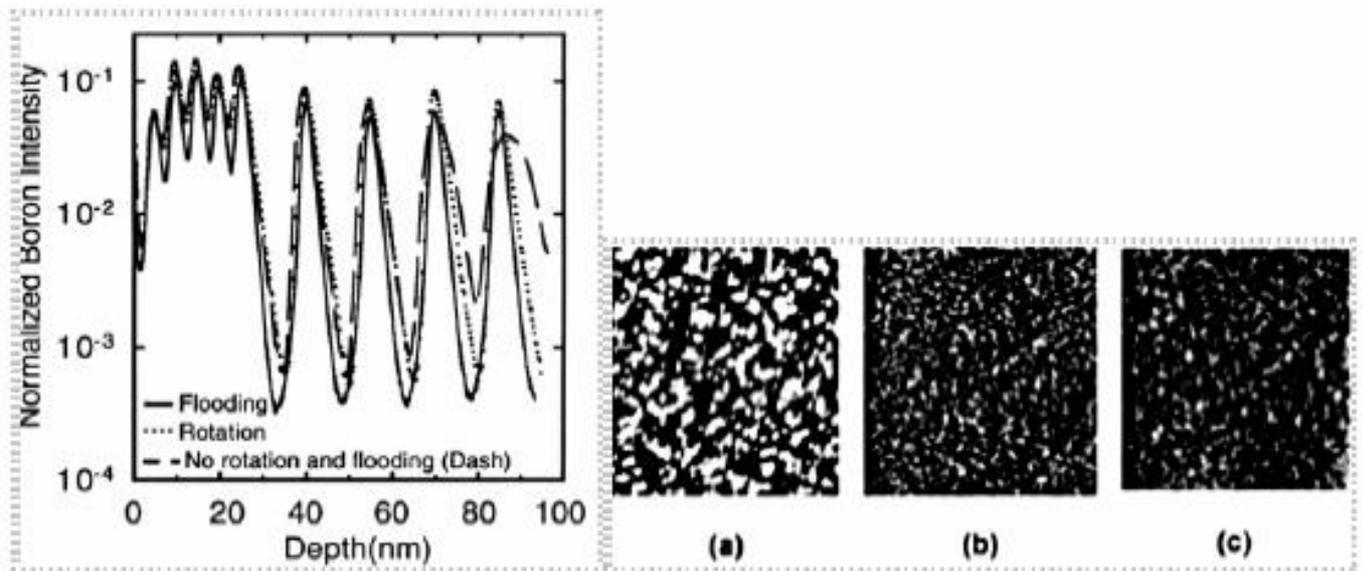


Figure 1.11 : profondeur de Bore dans Si et images AFM $(2 \times 2) \mu m^2$ à 500eV, 56°

(a) sans soufflage, (b) rotation et (c) avec soufflage [22]

De même, d'après [26], un échantillon de Si a été bombardé avec une énergie de 0.5keV, sous un angle d'incidence de 68° et cela sous différentes conditions d'analyse (figure 1.12). Il est à remarquer que la rugosité de surface se manifeste sous forme de cercles dont le diamètre diffère

d'une condition d'analyse à une autre. L'image topographique représentant l'échantillon bombardé sous soufflage d'oxygène avec rotation présente une rugosité minimale (RMS=0.4nm). (Voir tableau 4).

Méthode	RMS (nm)
(A) UHV, sans rotation	RMS=5.3
(B) UHV, avec rotation	RMS=1.8
(C) Soufflage, sans rotation	RMS=1.1
(D) Soufflage avec rotation	RMS=0.4

Tableau 4: valeurs de RMS selon les 4 méthodes d'analyses

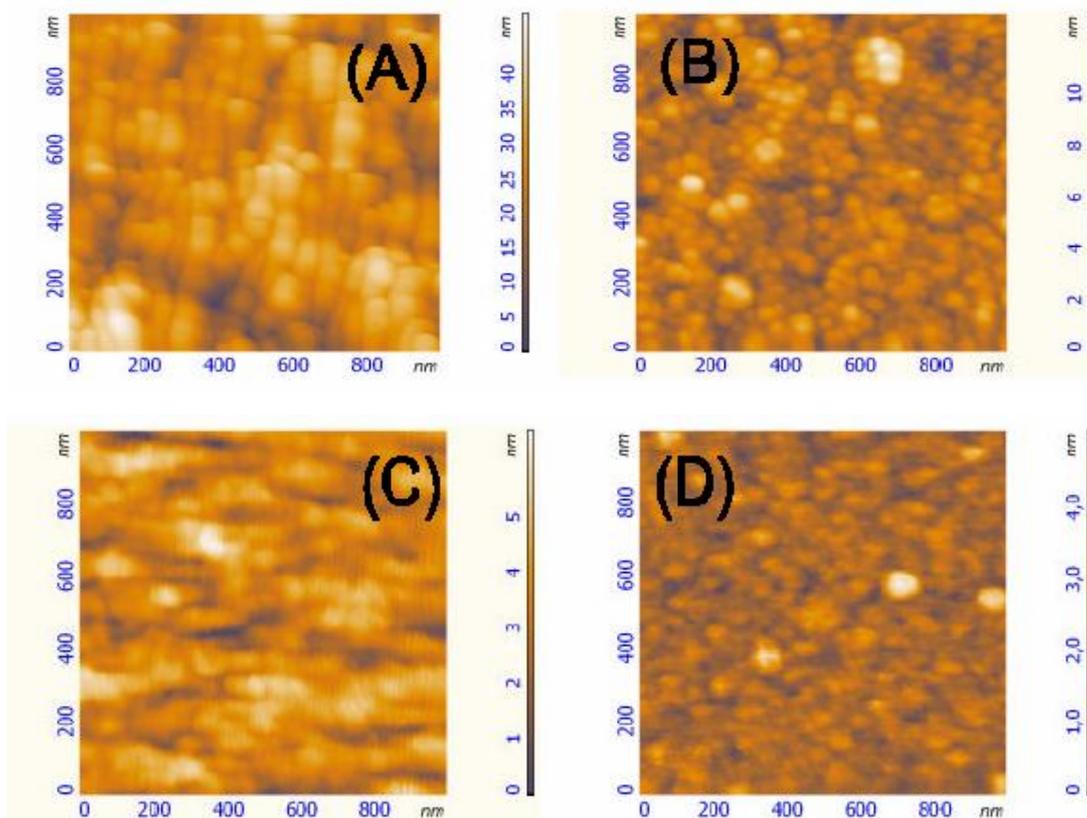


Figure 1.12 : Images AFM ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) pour $E=0.5\text{keV}$, O_2^+ et 68° dans les conditions suivantes d'après [26]:
a) UHV, sans rotation, b) UHV, avec rotation, c) Soufflage, sans rotation
d) Soufflage, avec rotation

La figure 1.13 représente la variation de la rugosité RMS en fonction de la profondeur d'érosion.

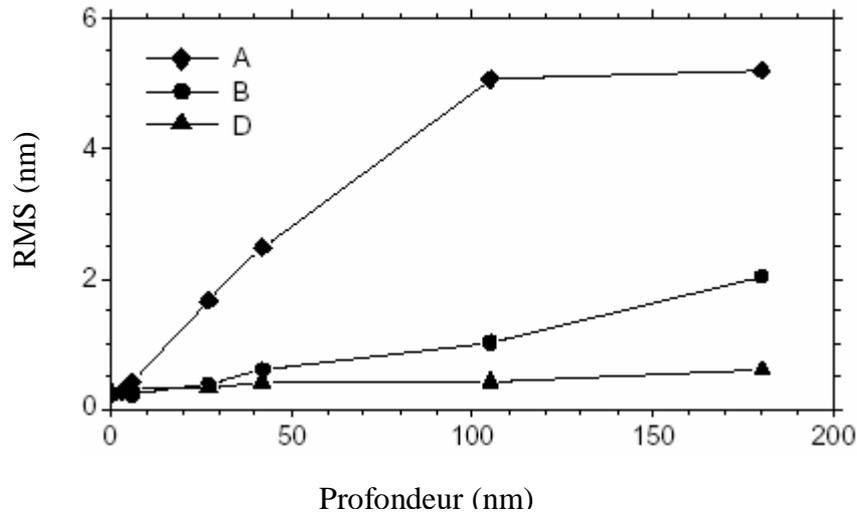


Figure 1.13 : variation de la rugosité RMS avec la profondeur d'érosion d'après [26]

5. EFFETS DE LA RUGOSITÉ SUR L'INTENSITÉ DES IONS SECONDAIRES

Les travaux menés par Stevie [8] ont présenté des variations de rendements ioniques des signaux de matrice liées au changement de la topographie de la surface bombardée sous un faisceau d'ions d'oxygène, ces résultats ont montré une augmentation de 70% du rendement ionique de Si^+ à 6keV d'énergie d'impact et une profondeur d'érosion entre 2.5 et 3.5 μm . (figure 1.14).

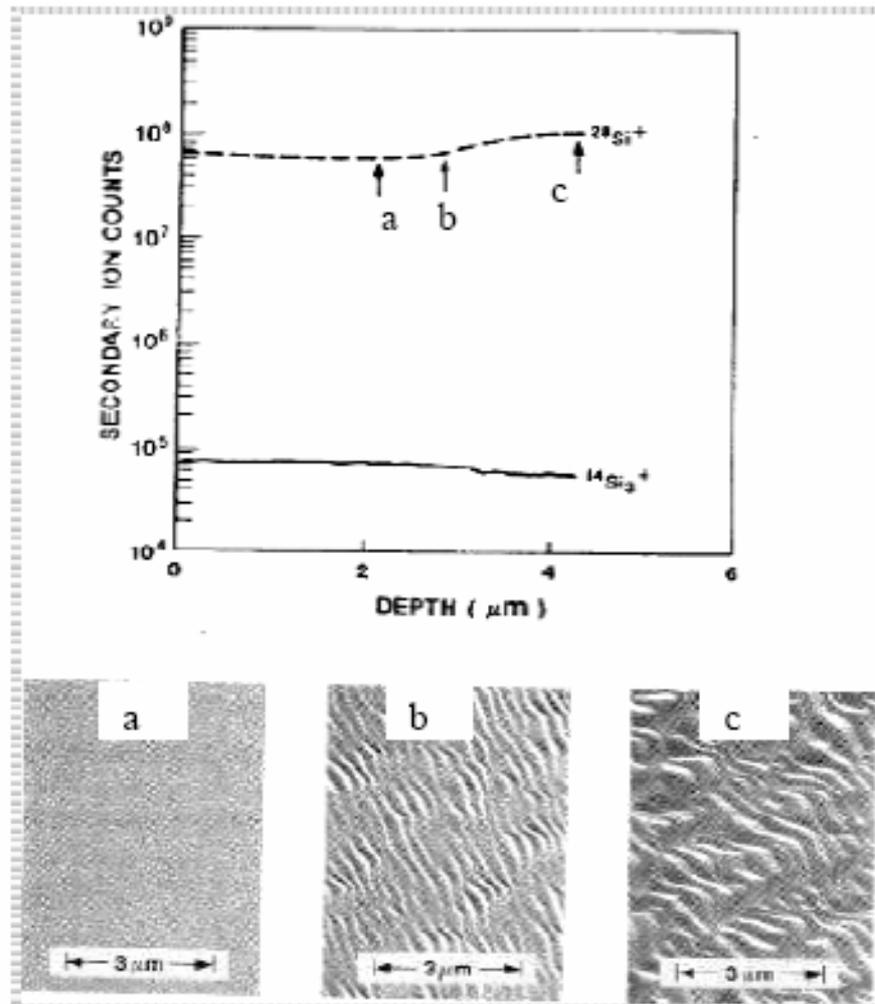


Figure 1.14: changement de topographie SEM (Scanning Electron Micrograph) en fonction de l'intensité des signaux de matrice ($Si\ 100$) après $6\text{keV } O_2^+$ pour différentes profondeurs de cratère : (a) 2.1 , (b) 2.8 , (c) $4.3\mu\text{m}$ [8].

La rugosité se manifeste lorsque entre autre les signaux de matrice subissent une variation.

Par exemple pour $1\text{keV } 48^\circ$, UHV, les signaux de matrice Si commencent à varier (croissance pour $^{28}Si^{16}O^+$, $^{30}Si^+$ et décroissance pour $^{28}Si_2^{16}O$) (figure 1.15). Après cette phase de transition (d_c) les signaux se stabilisent. Cette variation indique le début de développement de la rugosité.

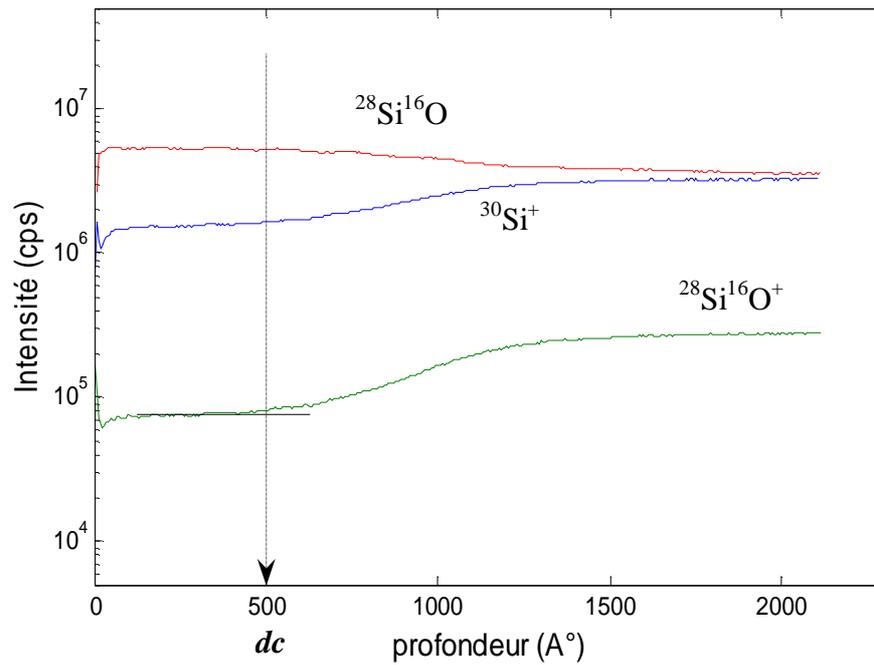


Figure 1.15 : Variation des signaux de matrice en fonction de la profondeur
Conditions d'analyse : 1keV, UHV et 48° d'angle incidence [28]

Une étude similaire a été faite par Zalm [27] montre que la topographie de la surface est associée au changement de l'intensité des signaux de matrice ce qui indique l'importance de suivre ces signaux pour évoluer la rugosité (figure 1.16)

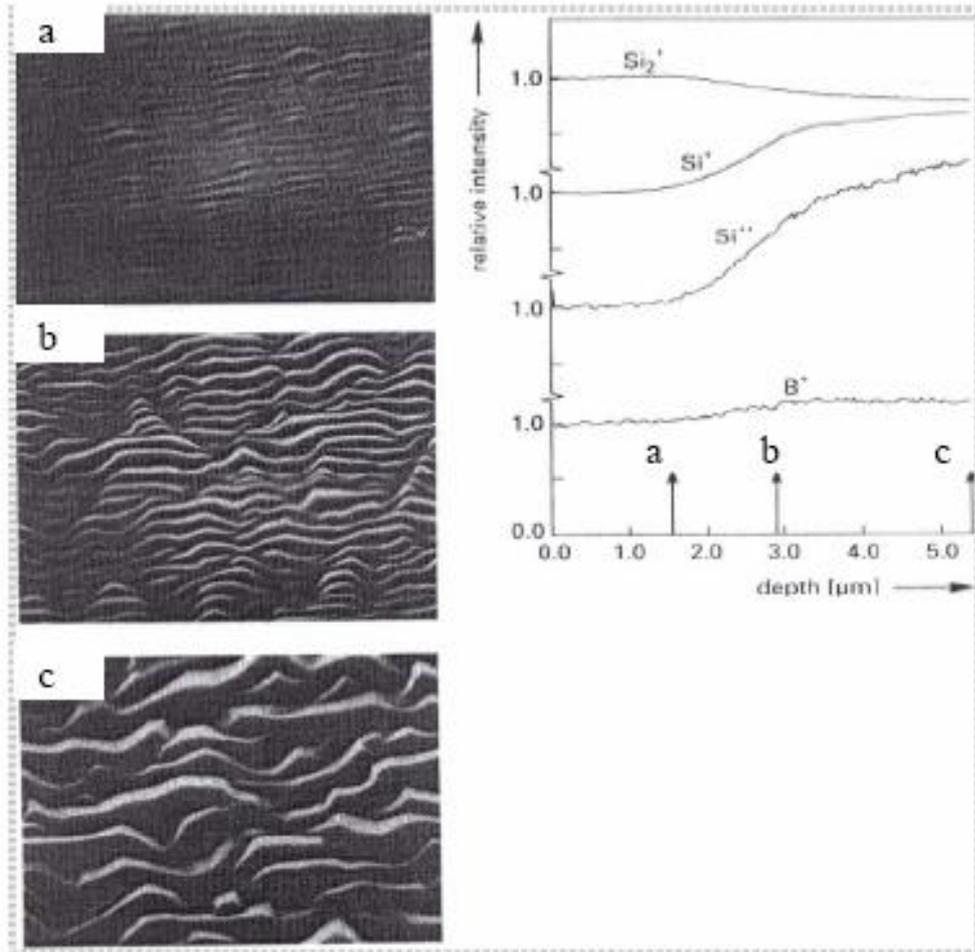


Figure 1.16: images SEM montrant la topographie de la surface (Si100) après 5.5keV O_2^+
 Pour différentes profondeurs de cratère : (a) 1.55, (b) 2.9, (c) 5.4 μm [27].

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, après une rapide description de la méthode d'analyse SIMS, nous avons essayé de faire une description aussi complète que possible des mécanismes responsables de la dégradation de la résolution en profondeur. Nous avons en particulier insisté sur l'effet de l'oxygène en analyse SIMS, en décrivant la ségrégation responsable de la dégradation de la résolution en profondeur et le phénomène de swelling, responsable d'une amélioration de la résolution en profondeur. Nous avons également exposé :

- des principes à propos du phénomène de la rugosité ainsi que les deux formes sous lesquelles il est présenté: une rugosité induite par le faisceau primaire et une rugosité induite à la surface de l'échantillon. La morphologie de la rugosité change en fonction de la profondeur d'érosion, de l'énergie d'impact et de l'angle d'incidence

- § un traité bibliographique de l'occurrence des rugosités. Nous avons présenté les principaux résultats ramenés dans la littérature pour différentes conditions d'analyse. (ions primaires O_2^+ , haute ou basse énergie, incidence oblique ou normale, avec ou sans soufflage).
- § les conséquences de la rotation de l'échantillon pendant l'analyse SIMS sur la formation des ondulations, il a été montré qu'à 500eV et 56° , RMS=1.4nm sans rotation et 0.2nm avec rotation. Comme, nous avons montré l'importance de suivre les signaux de matrice pour mettre en évidence l'évolution de la rugosité.

1. INTRODUCTION

Pour pouvoir procéder à l'amélioration de la résolution en profondeur, il est intéressant d'étudier les phénomènes mis en jeu lors de l'analyse afin d'en maîtriser les aspects. L'étude de la rugosité qui se développe en fond de cratère et sa maîtrise s'avère cruciale pour qui veut atteindre les résolutions en profondeur ultimes de la technique (étude SIMS +AFM).

Pour atteindre l'objectif mentionné, nous nous attacherons dans ce chapitre en première partie au développement d'une nouvelle méthode de calcul basée sur l'utilisation d'histogramme, que nous allons appliquer aux profils AFM.

La deuxième section sera consacrée à la forme analytique de la fonction de résolution DRF (depth resolution function). Ce sera l'occasion d'aborder les différents phénomènes physiques censés régir ses paramètres.

2. HISTOGRAMME

L'histogramme est un outil fondamental qui s'est révélé au cours du temps plus ou moins incontournable que ce soit d'un point de vue pratique ou théorique tout comme : la convolution, la transformée de Fourier...Il reste un moyen simple et rapide pour représenter la distribution d'un paramètre obtenu lors de n'importe quelle opération. C'est un outil « visuel » qui permet de détecter certaines particularités avant d'engager une démarche d'amélioration pour la résolution. Utilisé dans ce cadre, l'histogramme est un outil « quantitatif ».

2.1. Définition

Même s'il est considéré comme une représentation graphique, et qu'il a donc plus sa place dans une description des méthodes de *visualisation de données*, l'histogramme est un chaînon naturel entre une représentation exhaustive des données et la description par comparaison à des lois de calcul connues.

Plus simplement, l'histogramme est le graphe permettant de représenter l'impact de diverses variables continues.

2.2. Construction théorique

Une représentation un peu élémentaire pour construire un histogramme consiste à considérer un boulier sur lequel sont placées des valeurs discrétisées d'une variable et dont les tiges sont horizontales. Plus les tiges sont rapprochées, plus la discrétisation sera fine. On fait tourner ensuite le boulier de 90° pour placer les tiges à la verticale. Les billes vont glisser le long des fils et on pourra ainsi lire le nombre de bille sur chaque tige (figure 2.1).

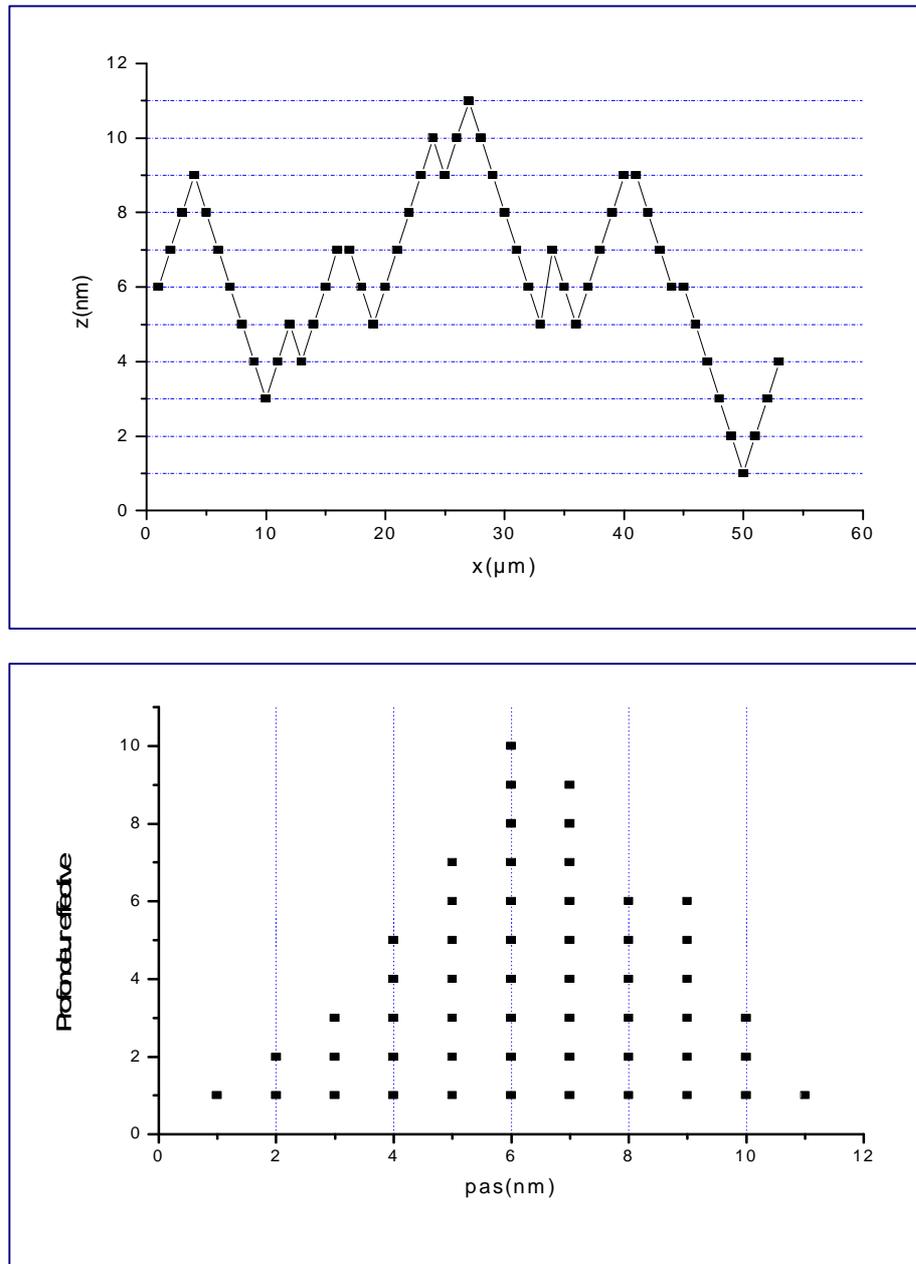


Figure 2.1: construction théorique d'un histogramme

2.3. Contexte général

Quand la rugosité se développe, la sonde ionique dégrade plusieurs couches en même temps, indépendamment du mixage collisionnel, dont l'effet est à additionner à celui de la rugosité.

Pour expliquer l'étude de l'influence de la rugosité sur les profils en profondeurs, nous avons considéré que les ions collectés proviennent de la couche superficielle et que la contribution des autres couches est infime. La surface rugueuse telle qu'elle est montrée dans la figure ci-dessous, est érodée couche par couche.

Les points constituant chaque ligne présentent la profondeur effective vue par la sonde.

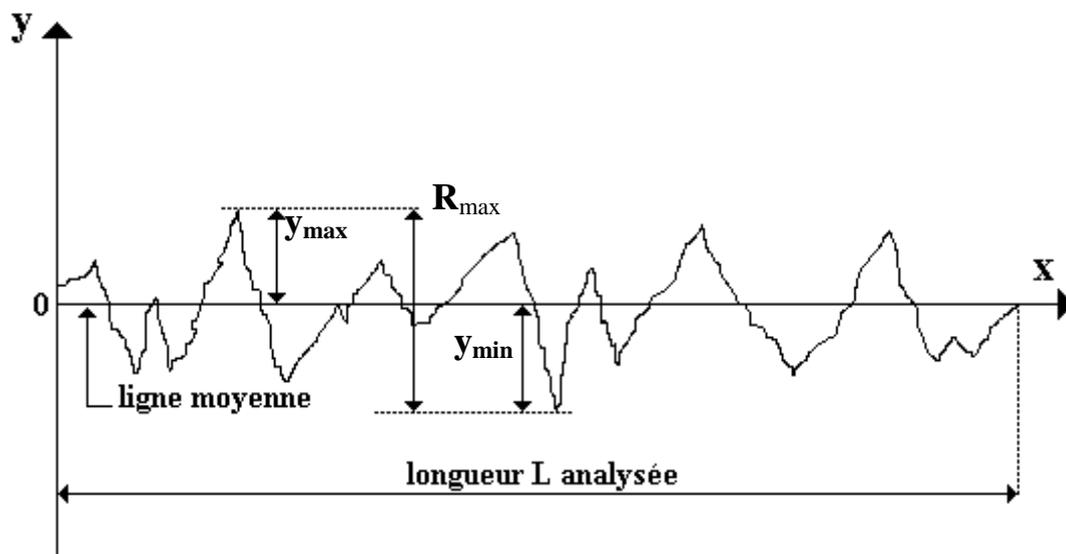


Figure 2.2: section transversale d'une surface rugueuse, exemple général

Où y_{\max} est la hauteur du pic maximal

et y_{\min} est la profondeur du creux maximal

Ainsi, pour montrer la distribution des différents points de cette surface, on construit l'histogramme recueillant les différentes profondeurs effectives attribuées à chaque cas d'analyse.

Si l'on considère le fait qu'une partie importante de ce travail est fondée sur l'application de la forme analytique de la fonction de résolution en parallèle avec la méthode d'histogramme déjà mentionnée, il apparaît essentiel d'en faire un aperçu aussi complet que possible, afin que le travail global soit cohérent et compréhensible dans sa totalité.

3. RÉOLUTION EN PROFONDEUR

3.1. Définition

La résolution en profondeur est essentiellement une clef de voûte de toute méthode d'analyse en profondeur, y compris de l'analyse SIMS.

Elle est nécessaire pour quantifier l'aspect fidélité de la reproduction au profil réel. Elle peut être mesurée selon le type de l'échantillon analysé à partir d'une interface, d'un delta dopage ou de couches minces [2].

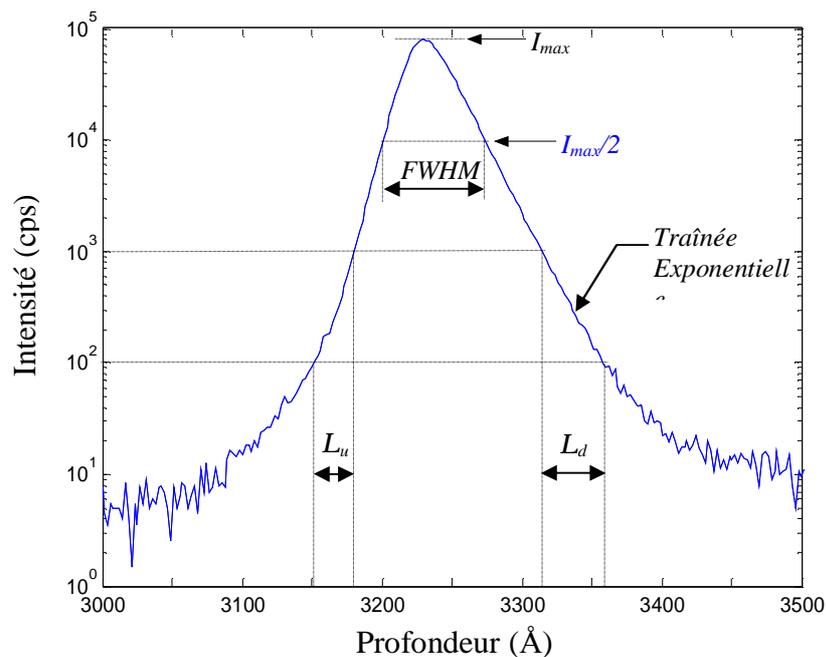


Figure 2.3 : Evaluation de la résolution en profondeur à partir du profil mesuré d'un delta dopage

3.1.1. Traînée exponentielle [2]

un delta dopage (couche idéalement fine) est représenté après l'analyse SIMS par une courbe asymétrique possédant un front montant de montée rapide et une traînée décroissante beaucoup moins rapide. Les parties montantes et descendantes peuvent être caractérisées par les

constantes I_u et I_d qui se définissent comme étant la distance nécessaire pour que le signal croisse et décroisse d'un facteur e . on utilise aussi les paramètres A tels que :

$I_u = A_u / 2.3$ Et $I_d = A_d / 2.3$, A_u ou A_d représentent la profondeur nécessaire pour que le signal respectivement croisse ou décroisse d'une décade (figure 2.3).

Le paramètre λ_d reflète en grande partie la perte de la résolution en profondeur due au mixage collisionnel, de plus λ_d augmente avec R_p (profondeur de pénétration des ions primaires dans la cible) et est directement lié à l'épaisseur de la zone mixée, donc à l'énergie primaire et à l'angle d'incidence (λ_d est proportionnelle à $E_p \cos q$). Lorsque ce dernier n'est pas prépondérant par exemple lors d'une analyse à basse énergie, la mesure de I_d devient insuffisante pour caractériser la résolution.

3.1.2. Largeur à mi hauteur

Une autre caractéristique du profil est la largeur à mi-hauteur FWHM (Full Width at Half Maximum). il faut l'utiliser avec précaution étant donnée la nature de la réponse impulsionnelle. Dans le cas d'une gaussienne, elle est donnée par la relation :

$$FWHM = 2.335.s \quad (2.1)$$

Où s représente l'écart type de la gaussienne.

Mais la largeur à mi-hauteur n'est pas un paramètre rigoureux pour caractériser une courbe en cloche, même s'il est le plus facile à mesurer.

3.1.3. Moment centré d'ordre deux

Une autre manière plus élégante et précise d'évaluer la résolution en profondeur est de calculer le moment centré d'ordre deux, c'est à dire la dispersion de la fonction autour de sa valeur moyenne. Son avantage réside dans son objectivité car il prend en compte la totalité de la courbe, ce qui n'est pas le cas ni pour la FWHM, ni pour les paramètres exponentiels. Il est défini comme suit :

$$m_c^{(2)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (z - \bar{z})^2 f(z) dz \quad (2.2)$$

Où \bar{z} est la valeur moyenne de $f(z)$

Dans le cas d'une fonction de résolution parfaitement gaussienne. $[m_c^{(2)}]^{1/2} = s$.

3.2. Forme analytique de la fonction de résolution

La résolution en profondeur sera donnée par la mesure d'un « Dirac » ou delta dopage. La réponse à ce « Dirac » est assimilée à la vraie réponse impulsionnelle SIMS appelé fonction de résolution, ou DRF (depth resolution function) [2].

La fonction de la résolution est le résultat de la convolution d'une double exponentielle par une gaussienne centrée d'écart type σ . Elle est décrite par trois paramètres λ_u , λ_d et σ . Son expression analytique détaillée est :

$$h(z) = D \exp(z) \otimes \text{Gauss}(z) \quad (2.3)$$

$$\text{Gauss}(z) = \frac{B}{\sqrt{2pS_{\text{gauss}}}} \exp\left(\frac{-z^2}{2S_{\text{gauss}}^2}\right), \quad D \exp(z) = A \begin{cases} \exp\left(\frac{z-z_0}{I_u}\right) & z < z_0 \\ \exp\left(\frac{-(z-z_0)}{I_d}\right) & z > z_0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Comme toute réponse impulsionnelle d'un système, la DRF doit être normalisée. Les amplitudes relatives A et B sont donc éliminées. En rappelant que : $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$, le résultat final est:

$$h(z) = \frac{1}{2(I_u + I_d)} \left\{ \exp\left(\frac{z-z_0}{I_u} + \frac{S^2}{2I_u^2}\right) \times \left[1 + \text{erf}\left(\frac{-(z-z_0)}{S} - \frac{S}{I_u}\right) \frac{1}{\sqrt{2}} \right] + \exp\left(\frac{-(z-z_0)}{I_d} - \frac{S^2}{2I_d^2}\right) \times \left[1 + \text{erf}\left(\frac{z-z_0}{S} - \frac{S}{I_d}\right) \frac{1}{\sqrt{2}} \right] \right\}$$

Les trois paramètres de la DRF ont de manière générale un comportement linéaire en fonction de la profondeur de pénétration des ions primaires et peuvent être estimés assez précisément pour les plus hautes énergies. Dans les très faibles énergies d'impact, il est préférable de fitter directement la DRF à partir de la mesure d'un delta dopage [2].

L'écart type S_{tot}^2 nous donne une estimation de la résolution en profondeur, il est tout simplement la somme des carrés des paramètres de la DRF :

$$m_2^c = S_{\text{tot}}^2 = I_u^2 + I_d^2 + S^2$$

3.3. Relation entre les paramètres de la DRF et les différents phénomènes physiques

La dépendance énergétique des paramètres de la DRF peut nous permettre de faire quelques hypothèses sur leur nature physique

- ∅ le paramètre λ_d augmente avec la profondeur d'érosions des ions primaires dans la cible, qui elle-même augmente avec l'énergie d'impact des ions primaires, mais diminue avec leur angle d'incidence. Ceci est compatible avec le modèle du mixage collisionnel [3].
- ∅ Le paramètre λ_u est insensible à l'énergie des ions primaires, il est principalement relié à la rugosité microscopique de la surface pulvérisée [3].
- ∅ Le paramètre σ augmente avec l'énergie des ions primaires [3], il est relié aux cascades de collisions isotropes qui se tiennent à l'intérieur du matériau, et augmente avec l'étendue de celle-ci. Ce paramètre est aussi relié aux phénomènes de rugosité induite par le faisceau primaire: manque de planéité, apparition d'un motif de fond de cratère...

3.4. Influence de la rugosité sur la DRF

La perte de la résolution engendrée par la rugosité peut être expliquée comme suit, avant la profondeur de transition d_c on a un régime permanent (paramètres de la DRF sont constants). Au delà de d_c nous sommes dans le régime de rugosité, synonyme de variation des paramètres de la DRF.

3.5. Profil en profondeur [1]

Lors d'un profil en profondeur, on collecte l'intensité ionique d'un élément donné en fonction du temps. Si la vitesse d'érosion est constante, l'échelle des temps pourra être convertie facilement en échelle des profondeurs à partir de la mesure de la profondeur du cratère final. Dans le cas contraire (par exemple : le cas de développement de rugosités) l'échelle des profondeurs exprimée de la manière ci-dessus devient inacceptable et il est nécessaire de la corriger.

On obtient ainsi la distribution en profondeur de la concentration d'un élément donné, (figure 2.4). Ce mode d'analyse est très largement utilisé en microélectronique où la distribution en profondeur des dopants ou des éléments majeurs est une information très importante.

Néanmoins, la quantification des mesures reste tributaire de l'analyse d'un échantillon étalon pulvérisé dans les mêmes conditions que l'échantillon à analyser.

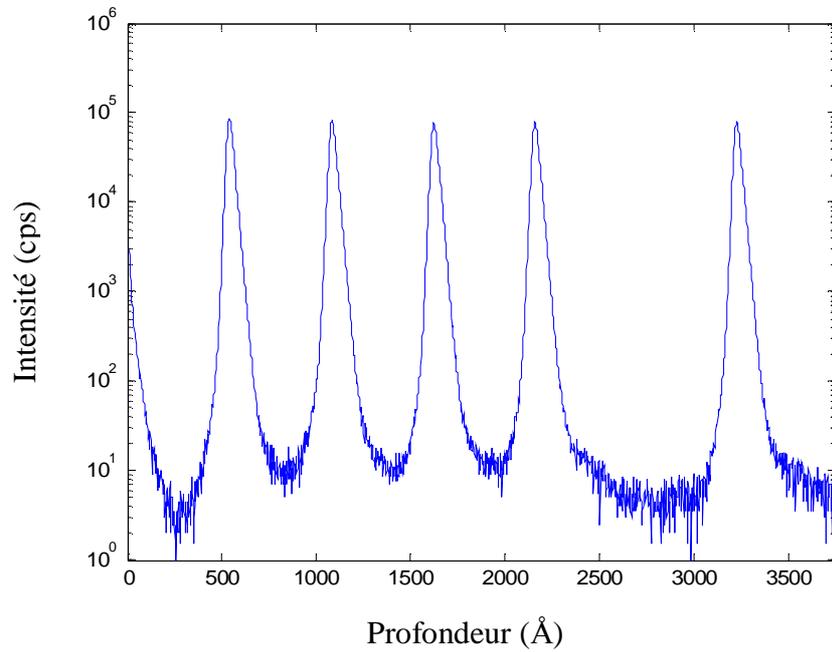
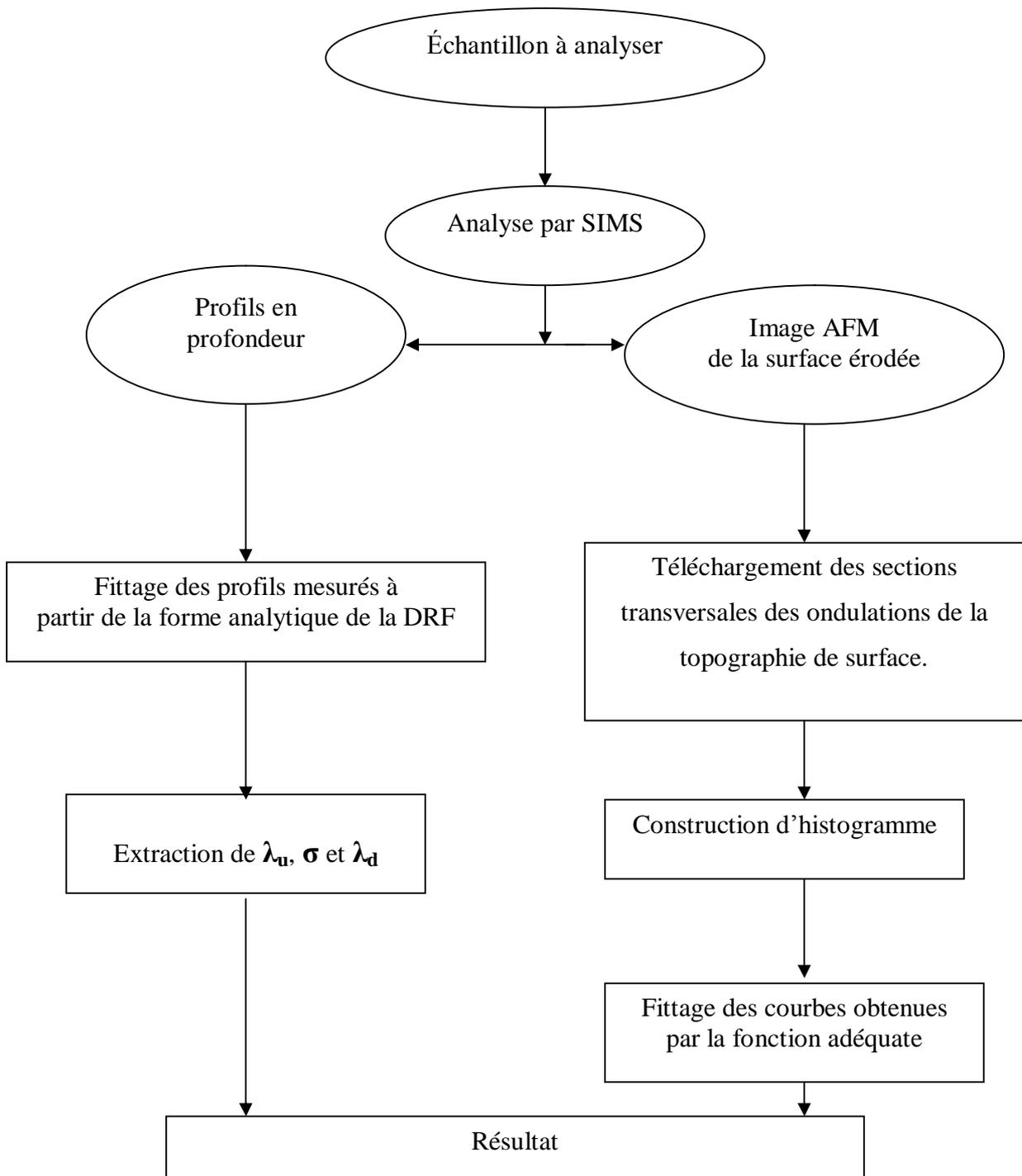


Figure 2.4: Exemple de profil en profondeur de Bore dans le Silicium analysé à 2keV/O₂⁺.

On a aussi le facteur de sensibilité relative (RSF), qui est en quelque sorte une constante qui permet de transformer le signal collecté en concentration, le signal d'un élément étant comparé à un élément de référence de la matrice.

4. ÉTAPES D'ÉVALUATION DE LA RUGOSITÉ

La méthode utilisée pour évaluer la rugosité des surfaces ainsi que les procédures suivies pour cette mise en œuvre est présentée en détail dans l'organigramme suivant



Organigramme : les différentes étapes de travail pour évaluer la rugosité

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, en première partie, nous avons essayé de donner une représentation claire de l'outil utilisé, où nous avons donné une idée générale sur la notion d'histogramme que nous allons appliquer sur l'échantillon mis à notre disposition.

Dans une seconde partie, nous avons donné la forme analytique de la fonction de résolution DRF, nous avons insisté sur la relation entre ses différents paramètres et les phénomènes physiques gouvernant la résolution en profondeur.

Enfin, nous avons terminé par donner l'organigramme général résumant les différentes étapes d'évaluation de la rugosité.

1. INTRODUCTION

Ce chapitre a deux objectifs principaux. D'une part, il présente l'effet de la rugosité en fond de cratère SIMS sur la résolution en profondeur à basse énergie. En particulier, nous allons essayer de définir la relation entre la présence de cette rugosité et l'allure des profils en profondeur qui en résulte.

Afin de répondre à l'objectif mentionné, nous appliquons *la méthode numérique* basée sur l'utilisation d'**histogramme**, que nous avons développé dans le chapitre 2 sur des profils AFM obtenus dans les différentes conditions d'analyse, en incidence oblique, avec ou sans soufflage d'oxygène. Comme, nous allons essayer de montrer l'effet de la rugosité sur la calibration en profondeur.

2. CONDITIONS EXPERIMENTALES

Les profils en profondeur SIMS présentés dans ce chapitre sont réalisés à l'aide de l'instrument Cameca IMS 5f au LETI en utilisant O_2^+ comme source d'ions primaires. Le courant primaire est compris entre 18.4nA et 19nA. En soufflage d'oxygène, la pression d'oxygène utilisée est de l'ordre de 2×10^{-6} Torr. Les couples d'énergies utilisés sont : (2.5-1.5) kev 48° d'incidence, (1.5-1) kev 54° et (1.1-0.6) kev 44° [2].

▼ Description de l'échantillon

L'échantillon utilisé est réalisé au LETI par RP-CVD (Reduced pressure-chemical vapor deposition) [35]. C'est un multi delta- dopage de Bore dans le Silicium. Il comporte 5 double delta dopages (2 couches séparées de 1, 2, 3, 5, 8 nm) encadrés par 2 mono delta dopages, l'espace entre chaque couche étant de 20 nm (figure3.1). La topographie de la surface au fond du cratère est visualisée par le microscope à force atomique en mode « tapping » [2].

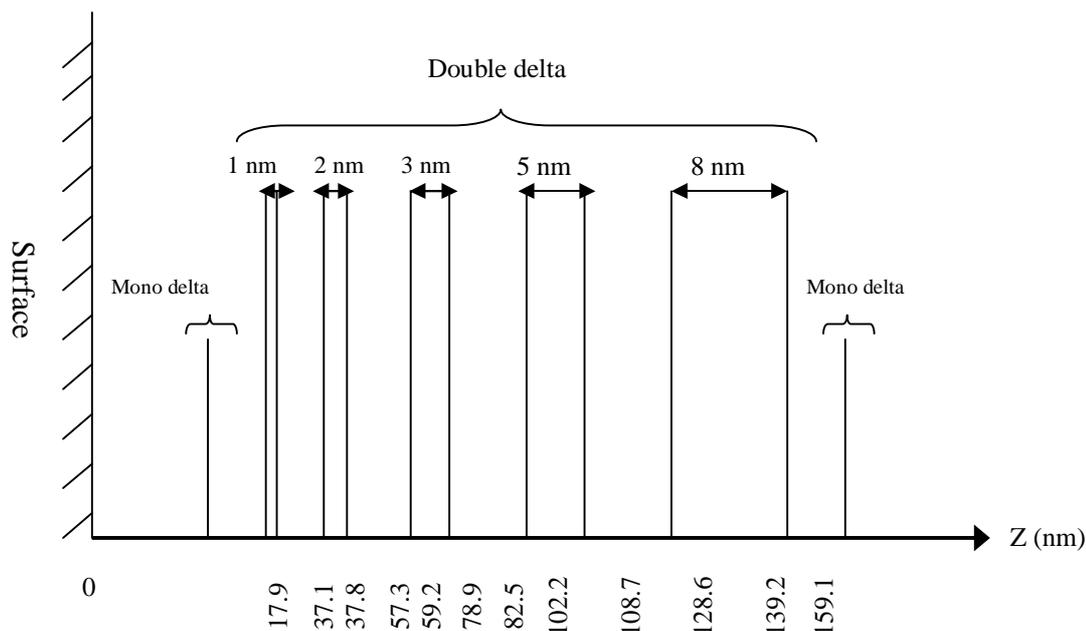


Figure 3.1 : structure de multi delta dopages de bore dans Si.

3. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ SUR LA RÉOLUTION EN PROFONDEUR

3.1. Étude sans soufflage d'oxygène (UHV)

En premier lieu, nous avons procédé à une étude qualitative par l'occurrence des variations des signaux SIMS, puis, à un traité quantitatif.

3.1.1. Étude qualitative

3.1.1.1. Analyse SIMS

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'étude de la rugosité en fond du cratère SIMS à basse énergie et sans soufflage d'oxygène. Les couples d'énergie utilisés sont respectivement (1keV, 48°) avec deux profondeurs d'érosion différentes (220nm et 210nm), (0.5keV, 44°) avec une profondeur de 166nm et (0.5keV, 54°) avec une profondeur d'érosion de 101nm.

L'analyse sans soufflage d'oxygène présente une rugosité évidente qui se manifeste, à la fois d'après la variation des signaux secondaires de matrice et d'après la perte de résolution en

profondeur sur le profil de bore. L'intensité de cette rugosité dépend des conditions d'analyse utilisées et de la profondeur du cratère érodé. Les différents signaux secondaires sont représentés dans la figure 3.2 en échelle semi logarithmique.

Pour 1kev 48°, la rugosité commence à se développer à une profondeur critique $d_c \approx 50nm$ pour une profondeur de 220nm et $d_c \approx 70nm$ pour une profondeur de 210nm, à partir de cette profondeur d'érosion critique, les signaux de matrice commencent à varier (croissance pour $Si^{28}O^{16}$ et Si^{30} , décroissance pour $Si^{30}O^{16}$), après cette phase de transition les signaux se stabilisent. Cependant, dans la dynamique du signal du bore, on trouve que le 4^{ème} double delta dopage n'est pas résolu pour l'analyse effectuée à la profondeur de 220nm.

Pour 0.5kev 44°, aucune rugosité ne s'est manifestée et la variation des signaux secondaires tout au début avant de se stabiliser définitivement peut être attribuée à une rugosité initiale de la surface.

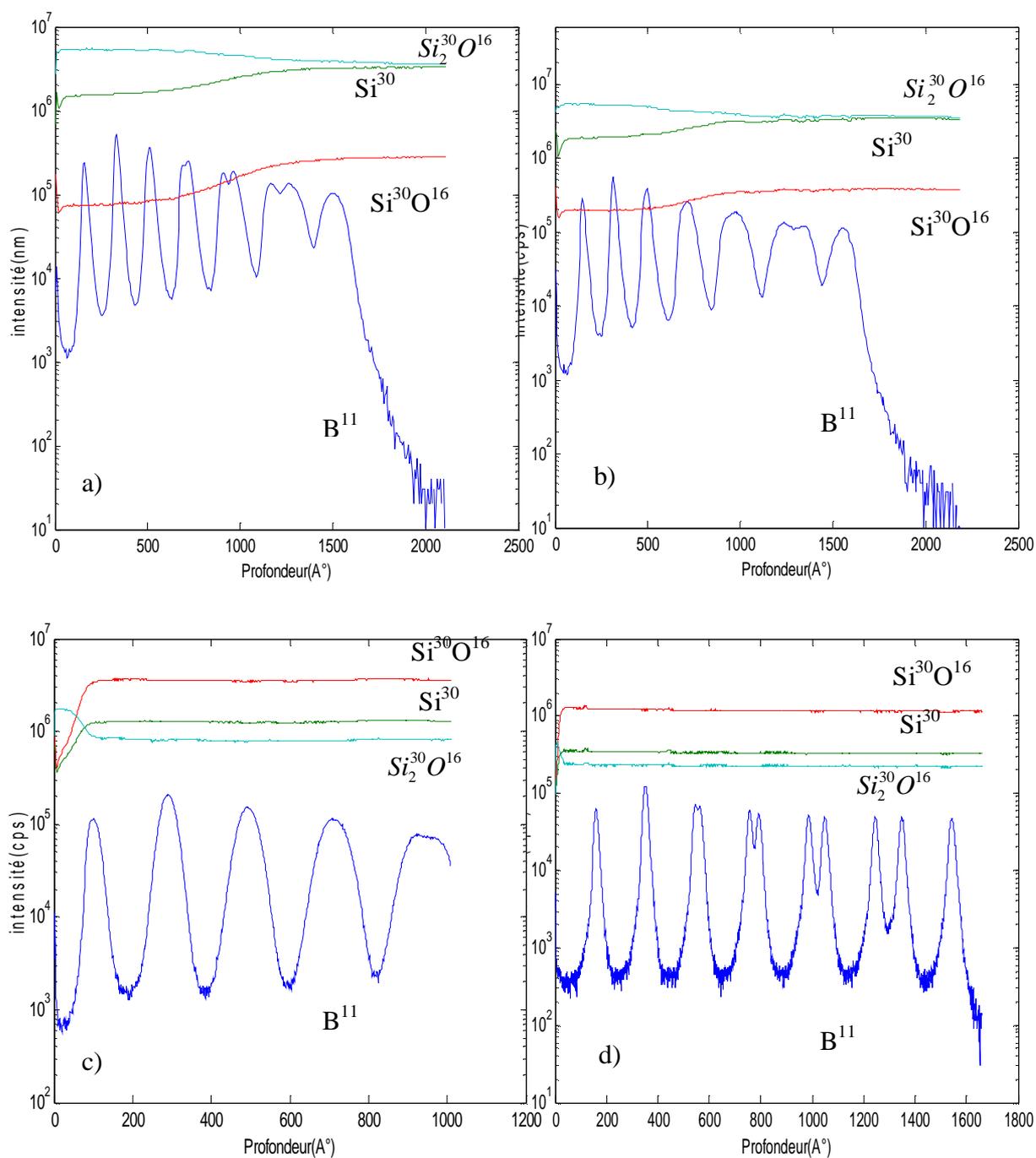


Figure 3.2: profils SIMS des ions secondaires de l'échantillon delta dopage Si pour différentes énergies d'impacts et angles d'incidence sans soufflage d'oxygène:

- a) 1kev 48° avec un cratère de 210nm, b) 1kev 48° avec un cratère de 220nm
- c) 0.5kev 54° avec un cratère de 101nm, d) 0.5kev 44° avec un cratère de 166nm

En fin, pour 0.5keV 54°, la variation des signaux est moins remarquable que pour le cas de 1keV 48° (croissance pour $Si_2^{28}O^{16}$ et Si^{30} , décroissance pour $Si^{30}O^{16}$). Cependant, on distingue une mauvaise résolution par rapport à celle de 1keV 48°.

Dans tous les cas, les signaux secondaires passent par un minimum puis croissent, cette variation est due *à la pénétration successive des ions primaires d'oxygène et à l'augmentation de l'épaisseur de la couche altérée (les ions sont exaltés par la présence de l'oxygène)*.

Cependant, la variation dans la dynamique du signal de bore est accordée *à la homogénéité de la surface érodée qui est la source des ions secondaires collectés*.

3.1.1.2. Analyse AFM

L'analyse AFM permet d'étudier l'état de surface après l'analyse SIMS. La figure 3.3 montre, à droite les images topographiques ($1 \times 1 \mu m^2$) en fond de cratère pour différentes énergies et angles d'incidence, à gauche, les sections transversales des ondulations de la topographie de surface

Même s'il y a une disparité des conditions de bombardement, les dimensions déduites de toutes les images ne diffèrent pas. Il en ressort une caractéristique commune que l'on a déjà exprimée dans le premier chapitre, les rugosités induites par bombardement se présentent sous forme d'ondulations ou de vagues régulières.

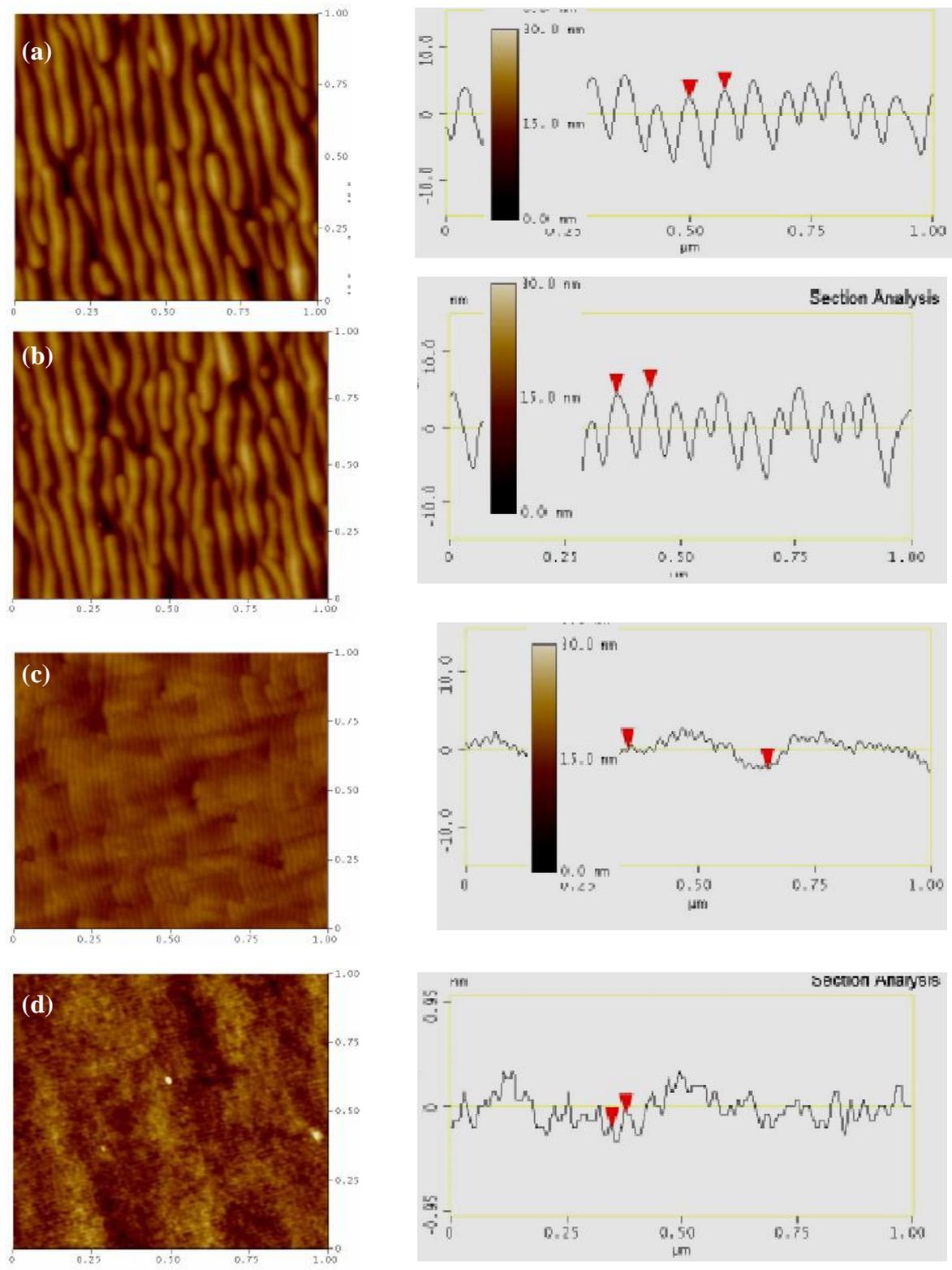


Figure 3.3: à gauche, les images AFM ($1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$) en fond de cratère SIMS et à droite l'analyse de section de chaque image d'après [2]:

a) 1keV 48° avec un cratère de 210nm, b) 1keV 48° avec un cratère de 220nm, c) 0.5keV 54° avec un cratère de 101nm, d) 0.5keV 44° avec un cratère de 166nm

3.1.2. Étude quantitative

La revue de documentation a montré que plusieurs projets ont porté sur l'étude et la modélisation de la rugosité. Toutefois, plusieurs de ces projets ont été en mesure d'évaluer l'importance de l'étude de la rugosité du substrat [travaux des références 4, 6, 9, 12]. Cette section a pour objectif d'évaluer quantitativement l'effet de la rugosité sur la résolution en profondeur DRF, en appliquant les différentes étapes mentionnées dans l'organigramme à notre échantillon analysé dans différentes conditions.

3.1.2.1 Échantillon analysé à 1keV, angle d'incidence 48°, profondeur du cratère 220nm

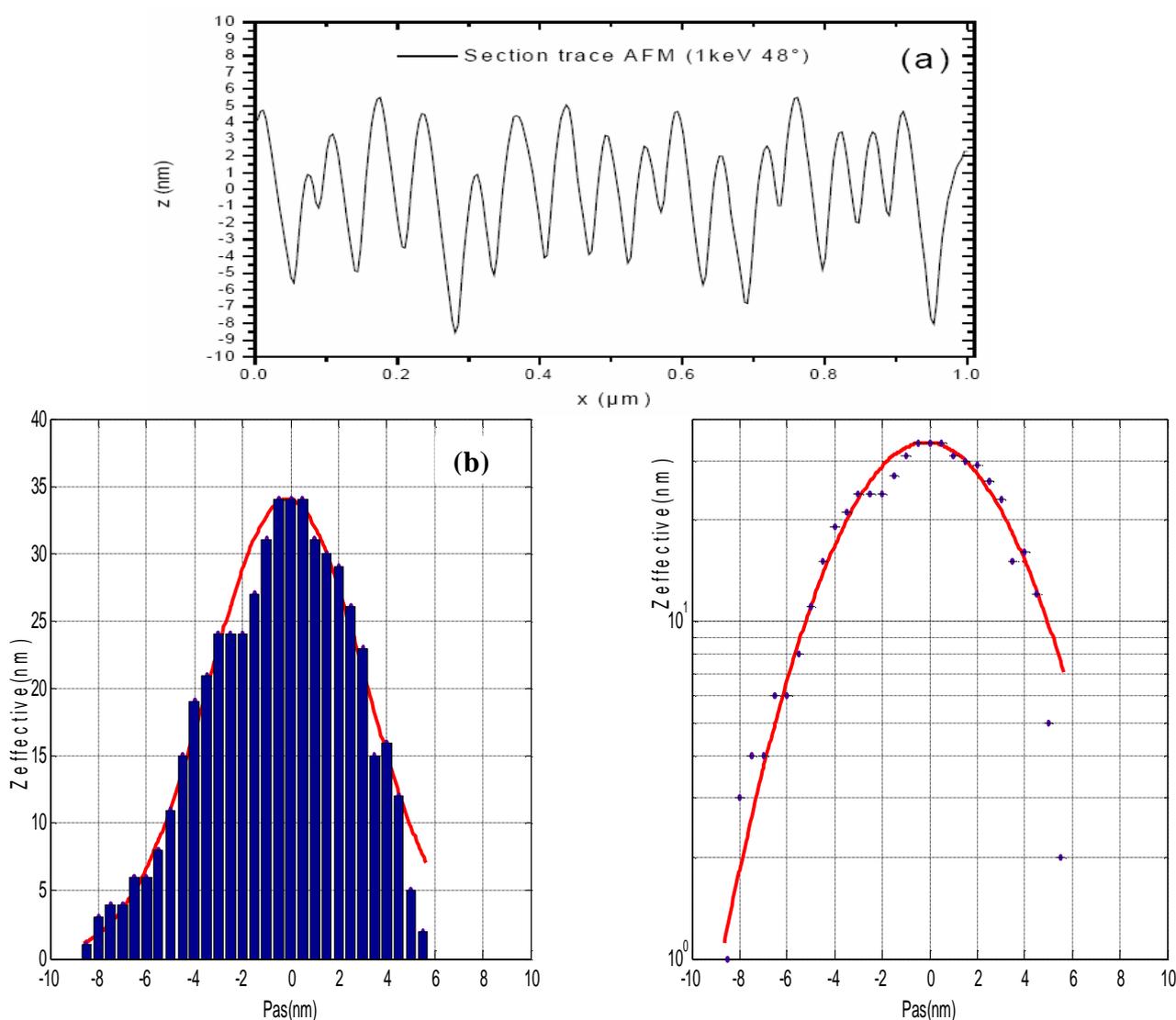


Figure 3.4: a) Une coupe transversale des ondulations pour l'énergie 1keV 48° [2], b) Variation de la profondeur effective en fonction du pas

Représentation linéaire et logarithmique

Dans un premier temps, nous avons employé la section transversale des ondulations de la topographie, selon la table 3.1 la valeur de la rugosité est de 3.9nm. Puis nous avons tracé un histogramme recueillant les différentes profondeurs effectives avec un pas de 0.5nm. Cette courbe est fittée par une fonction gaussienne:

$$f(x) = \frac{1}{s r \sqrt{2 p}} \exp \left[- \frac{(x - x_c)^2}{2 s r^2} \right] \quad (3.1)$$

Le meilleur ajustement est obtenu avec une valeur de S_r d'environ 3,347nm.

- **Choix d'une forme analytique pour fitter l'historgramme**

Le fittage de la courbe obtenue via la construction d'historgramme par une forme analytique s'avère très important, pour qui veut aboutir à des résultats sérieux. Le problème inhérent est de choisir une forme susceptible de coller aux données.

Dans notre cas, le choix de la forme analytique doit décrire les différents phénomènes agissant sur la rugosité.

L'observation de la forme de l'historgramme suggère la forme gaussienne où le nombre de paramètres est limité et la grandeur la plus importante est l'écart type σ_r (voir annexe 2).

3.1.2.2. Échantillon analysé à 1kev, angle d'incidence 48°, profondeur du cratère 210nm

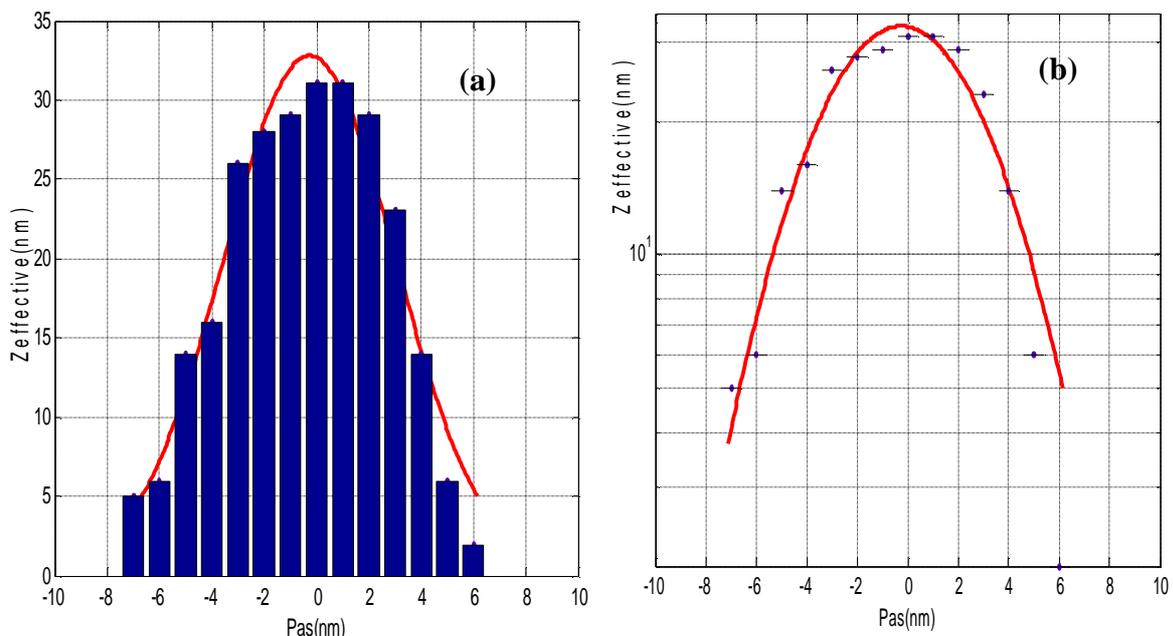


Figure 3.5: Variation de la profondeur effective en fonction du pas a),b) Représentation linéaire et logarithmique

3.1.2.3. Échantillon analysé à 0.5keV, angle d'incidence 54°, profondeur du cratère 101nm

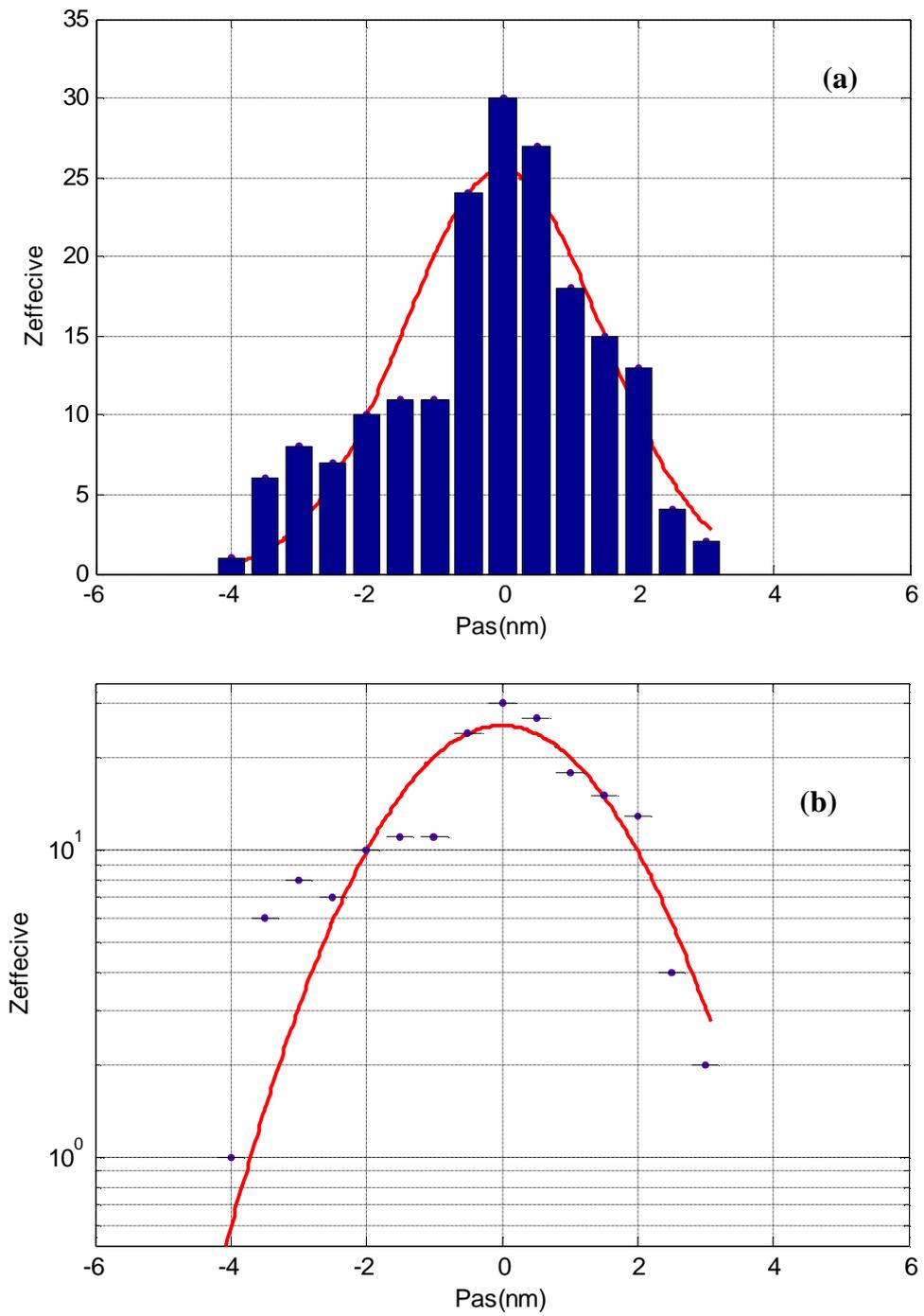


Figure 3.6: Variation de la profondeur effective en fonction du pas

a),b) Représentation linéaire et logarithmique

3.1.2.4. Échantillon analysé à 0.5keV, angle d'incidence 44°, profondeur du cratère 166nm

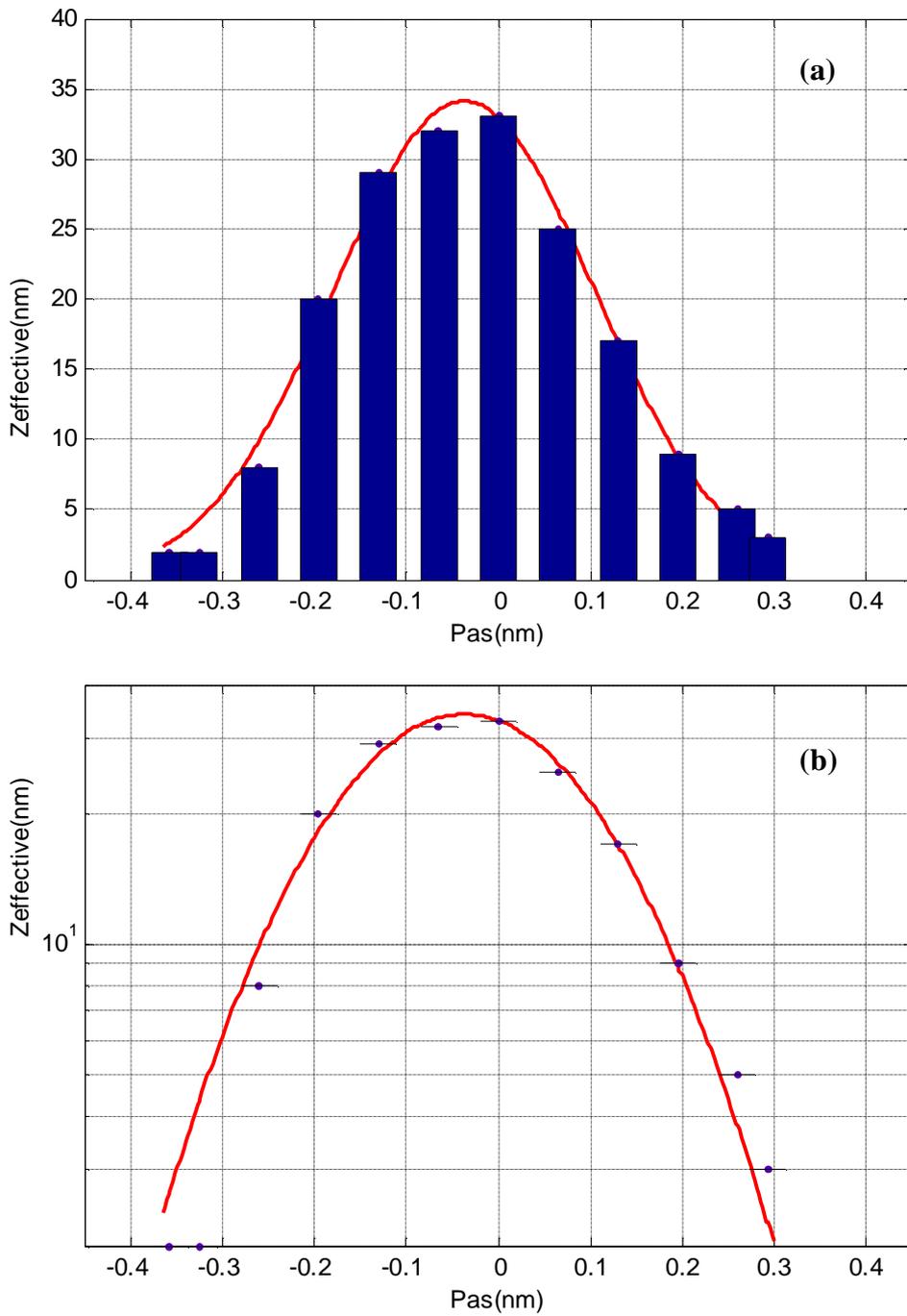


Figure 3.7: Variation de la profondeur effective en fonction du pas

a),b) Représentation linéaire et logarithmique

Le tableau 3.1 rassemble les valeurs de S_r calculées par fittage des histogrammes

Échantillon analysé à			RMS (nm) [2]	S_r (nm)
Énergie d'impact (kev)	Angle d'incidence (°)	Profondeur du cratère (nm)		
0.5	44	166	0.2	0.14
0.5	54	101	1.5	1.458
1	48	220	3.9	3.347
1	48	210	3.7	3.295

Tableau 3.1: valeurs de σ_r obtenues par fittage des histogrammes

è Interprétations

- ♣ La première remarque à faire est l'évolution de S_r avec la rugosité RMS sous les différentes conditions d'analyse.
- ♣ L'évolution du paramètre de la gaussienne représentant les courbes fittées représente la rugosité qui se manifeste au fond du cratère SIMS cela se traduit par sa croissance avec la profondeur d'érosion pour les mêmes conditions d'analyse (1kev, 48°).

3.1.3. Évaluation de la résolution en profondeur

Un moyen incontestable pour mettre en évidence l'amélioration de la résolution en profondeur est le calcul des paramètres de la fonction de résolution (I_u , I_d et S). Pour cela nous avons fitté le dernier pic des différents signaux secondaires mesurés sous différentes conditions d'analyse par la forme analytique de la DRF.

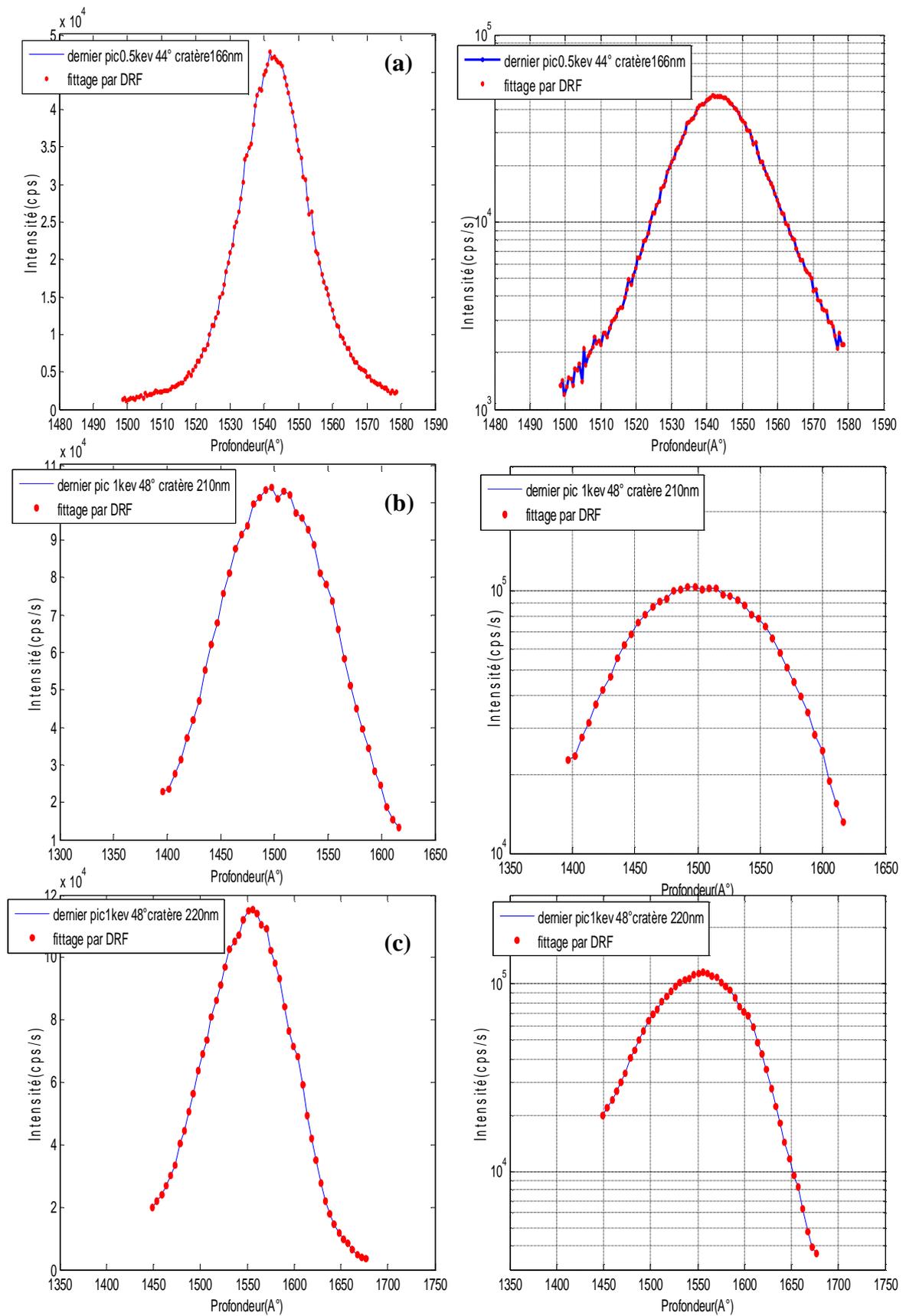


Figure 3.8: fit du dernier pic par DRF, a) 0.5keV44° 166nm, b) 1keV 48°210nm, c) 1keV 48° 220nm
Représentation linéaire et logarithmique

Le tableau 3.2 regroupe les différentes valeurs obtenues.

Echantillon analysé à	Pic	l_u (nm)	l_d (nm)	s (nm)
0.5keV 44°, avec un cratère de 166nm	1 ^{er} pic	0.6	0.75	0.35
	Dernier pic	0.95	1.2	0.75
1keV 48°, avec un cratère de 210nm	1 ^{er} pic	0.95	1.45	1
	Dernier pic	1	1.75	4.2
1keV 48°, avec un cratère 220nm	1 ^{er} pic	0.75	1	0.75
	Dernier pic	0.95	1.35	4.5

Tableau 3.2: Mesures de σ , λ_d et λ_u pour différentes Énergies d'impact (0.5-1) keV et angles d'incidence (44°,48°)

è Interprétations

- ⊙ Les paramètres l_u et l_d varient peu du premier pic au dernier pic, par comparaison avec s qui change de façon importante.
- ⊙ Le paramètre l_u qui semble insensible à l'énergie des ions primaires, est principalement relié à la rugosité microscopique de la surface pulvérisée. Il est possible qu'il soit également lié à la profondeur d'échappement des ions secondaires. Dans tous les cas, la contribution du mixage collisionnel semble minime. Cette hypothèse est associable aux résultats obtenus par Brice [3].
- ⊙ L'écart type s augmente avec la profondeur d'érosion pour les mêmes conditions d'analyse (1keV 48°).

- © s augmente avec l'énergie des ions primaires ce qui indique que ce paramètre est relié aux cascades des collisions isotropes qui se tiennent à l'intérieur du matériau et augmente avec l'étendue de celles-ci, cette hypothèse est compatible avec les résultats obtenus par "Littmarck"[29] et "Brice"[3]. Il semble aussi être relié aux phénomènes de rugosité induite par le faisceau primaire: manque de planéité, apparition d'un motif de fond de cratère...

3.2. Étude sous soufflage d'oxygène

3.2.1. Étude qualitative

3.2.1.1 Analyse SIMS

La figure 3.9 présente le cas des rugosités sous soufflage d'oxygène. Les conditions d'analyse sont 1kev 48° avec une profondeur de cratère de 220nm, 0.5kev 44° avec un cratère de 277nm de profondeur et enfin pour une profondeur de 194nm les conditions d'analyse sont 0.5kev 54°.

Les signaux de matrice présentent une légère variation peu marquée comparativement au cas précédent (UHV) et atteignent l'équilibre très rapidement au début de la pulvérisation.

Cette variation est due *principalement à l'oxydation de la couche superficielle induite par le soufflage.*

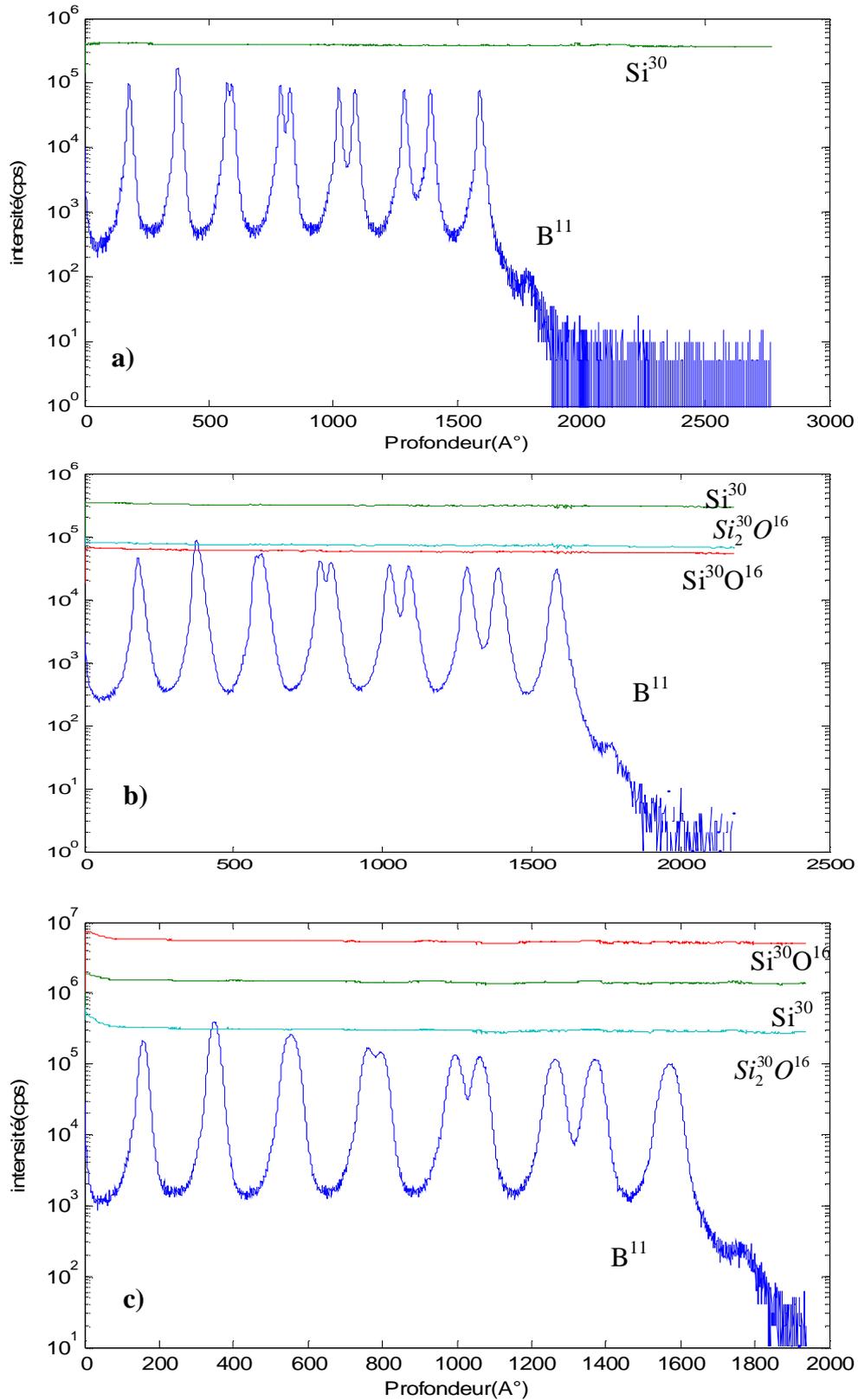


Figure 3.9: profils SIMS des ions secondaires de l'échantillon delta dopage Si pour différentes énergies d'impacts et angles d'incidence sous soufflage d'oxygène: a) 0.5keV44° avec un cratère de 277nm, b) 1keV48° avec un cratère de 220nm, c) 0.5keV 54° avec un cratère de 194nm

3.2.1.2. Analyse AFM

La figure 3.10 montre les images topographiques en fond de cratère SIMS.

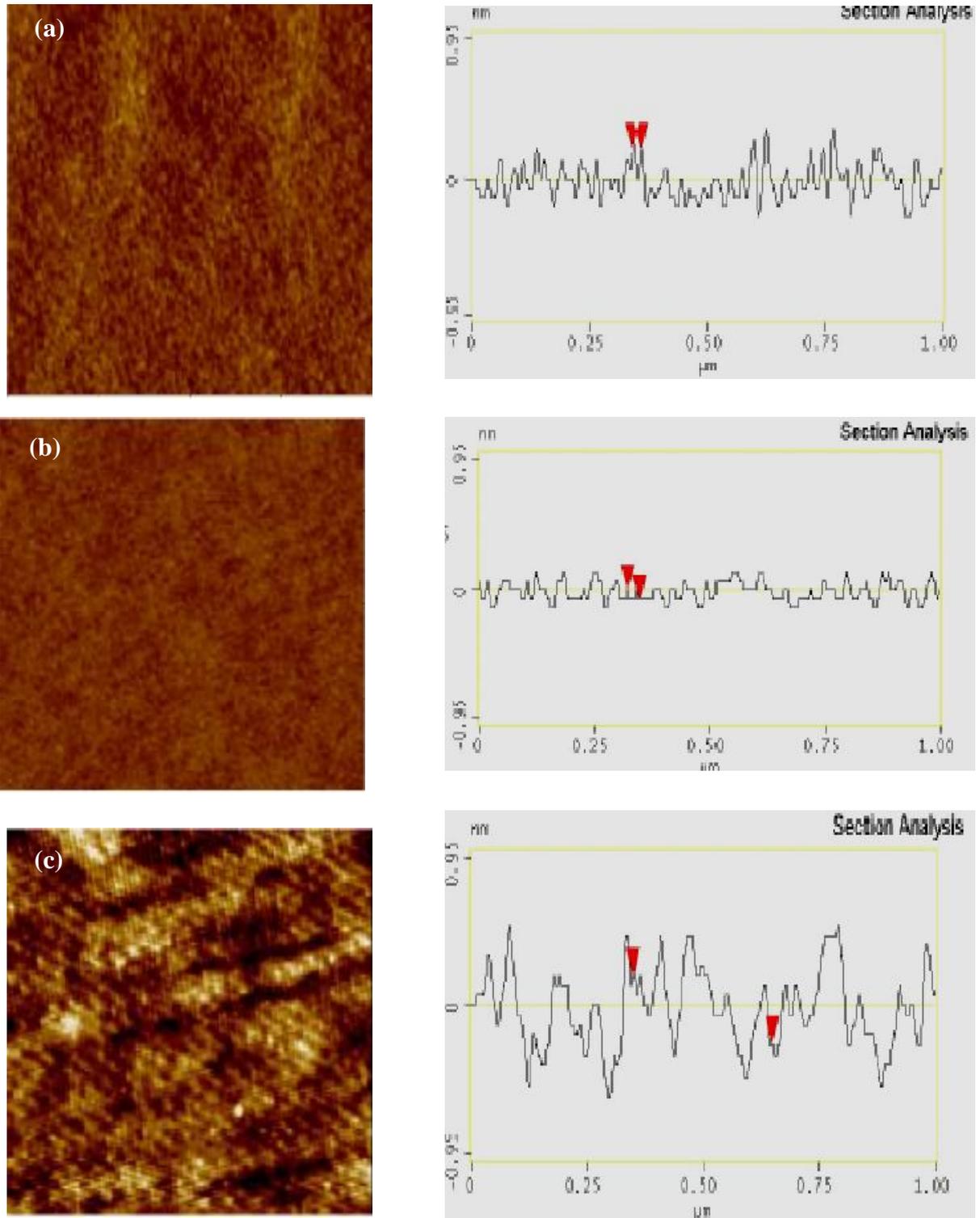


Figure 3.10: à gauche, les images AFM ($1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$) en fond de cratère SIMS et à droite l'analyse de section de chaque image d'après [2]; a) 1keV 48° avec un cratère de 220nm, b) 0.5keV 44° profondeur de cratère 277nm, c) 0.5keV 54° profondeur de cratère 194nm

Les ondulations présentant les rugosités ne sont pas très prononcées comme dans de le cas de l'ultravide. La question qui se pose est : quelles sont les suites des rugosités sous soufflage d'oxygène?

Pour répondre à cette question, nous avons procédé comme antérieurement: nous avons construit les histogrammes recueillant les différentes profondeurs effectives des sections transversales des images AFM.

3.2.2. Étude quantitative

3.2.2.1. Échantillon analysé à 1key, angle d'incidence 48°, profondeur du cratère 220nm

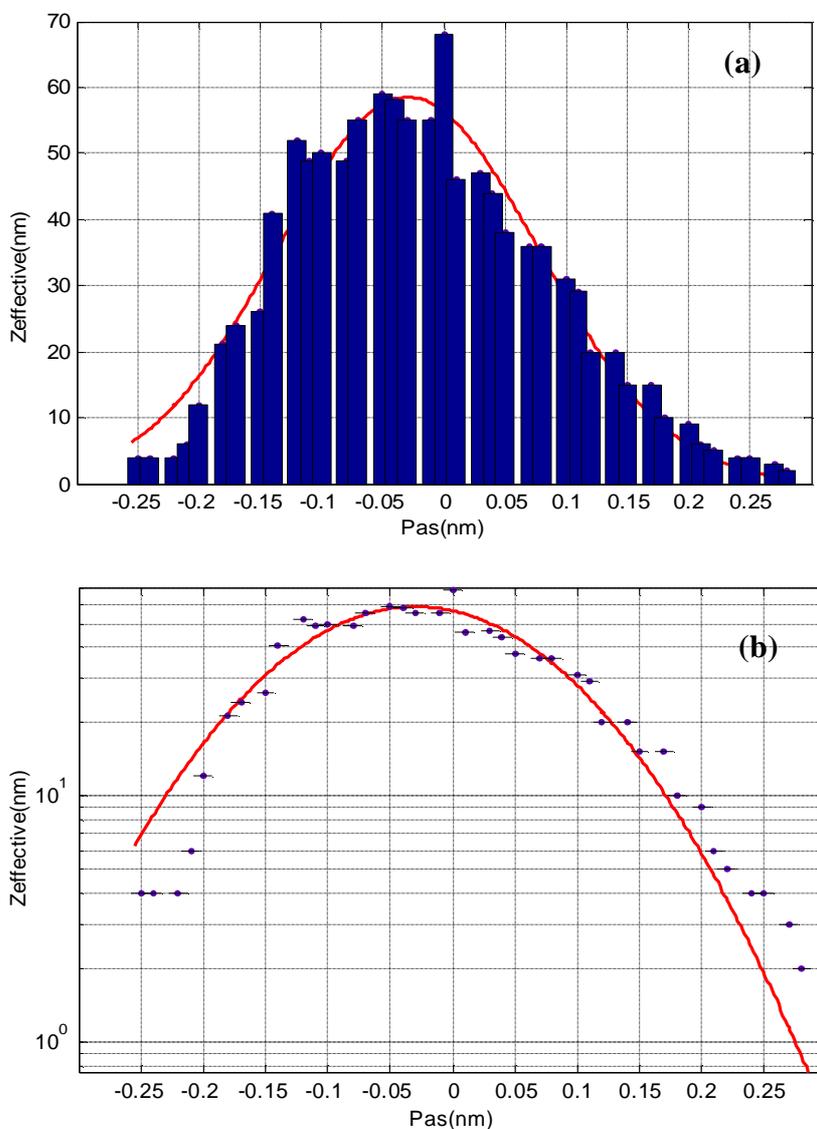


Figure 3.11: variation de la profondeur effective en fonction du pas : a), b) Représentation linéaire et logarithmique

3.2.2.2. Échantillon analysé à 0.5keV, angle d'incidence 44°, profondeur de cratère 277nm

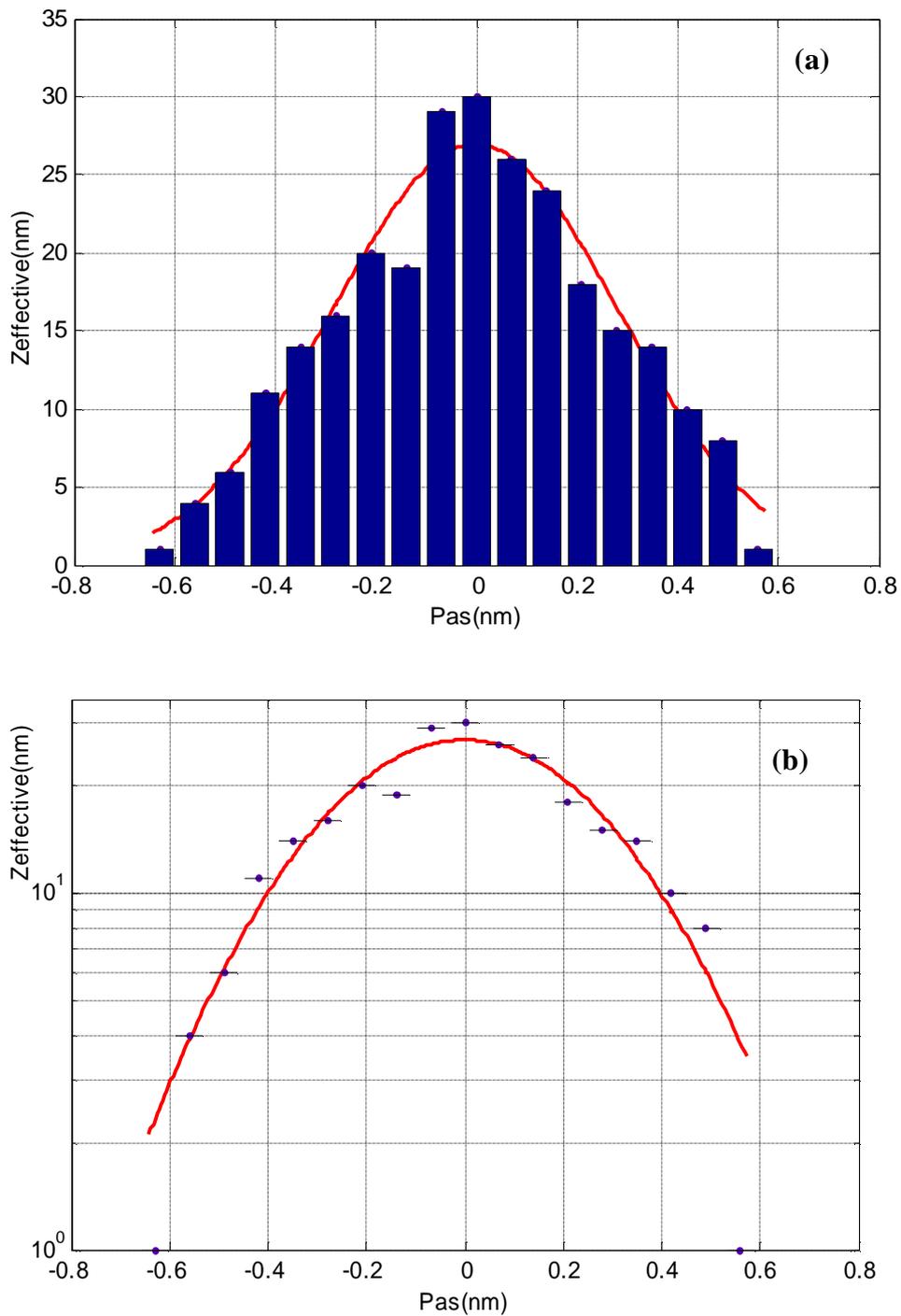


Figure 3.12: variation de la profondeur effective en fonction du pas
 a), b) Représentation linéaire et logarithmique

3.2.2.3. Échantillon analysé à 0.5keV, angle d'incidence 54°, profondeur de cratère 194nm

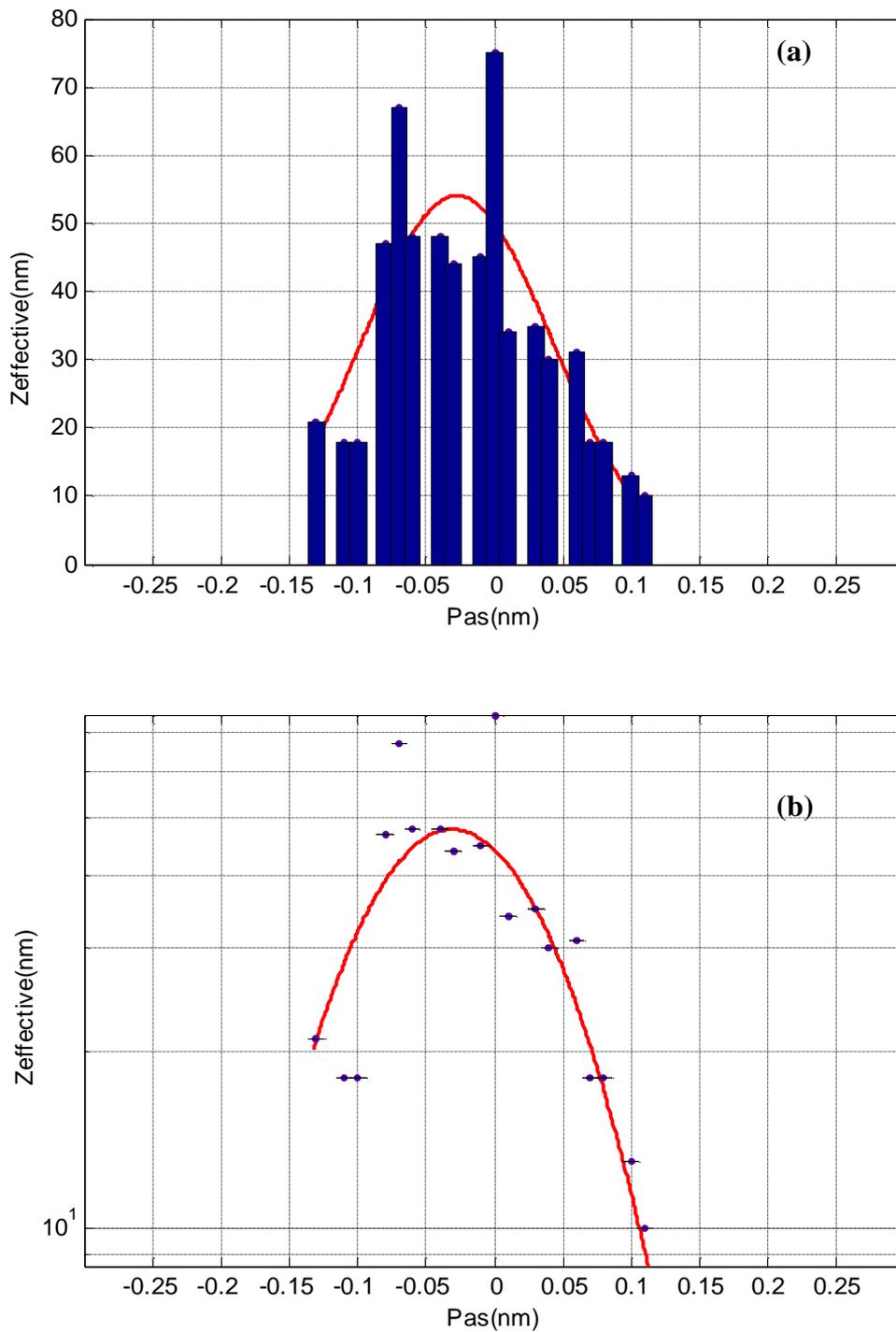


Figure 3.13: variation de la profondeur effective en fonction du pas
 a), b) Représentation linéaire et logarithmique

Le tableau 3.3 réunit les différentes valeurs de l'écart type σ_r obtenues lors du fittage des histogrammes construits

Echantillon analysé à			σ_r (nm)	RMS (nm) [2]
Energie d'impact (kev)	Angle d'incidence (°)	Profondeur du cratère (nm)		
0.5	44	277	0.078	0.14
0.5	54	194	0.3	0.4
1	48	220	0.12	0.17

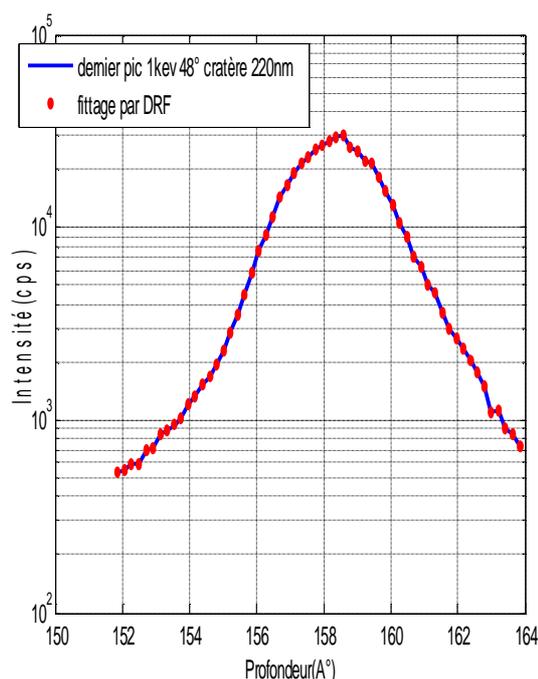
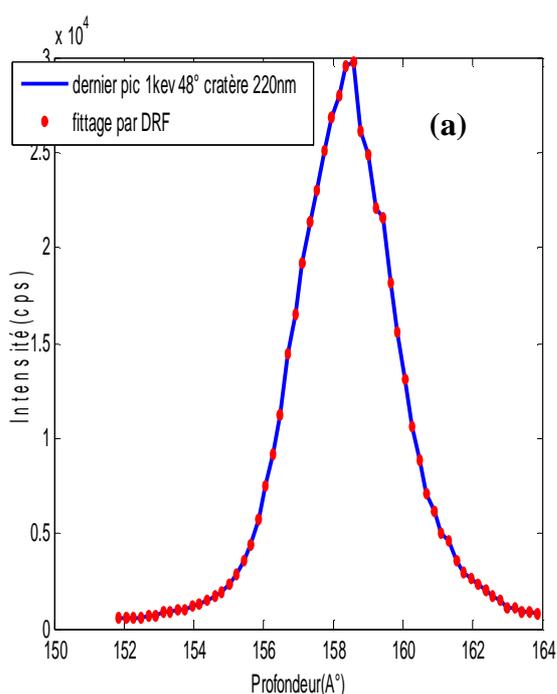
Tableau 3.3: valeurs de σ_r calculées par fittage des histogrammes

Interprétations

La plus importante remarque à faire est que les valeurs de σ_r sont plus faibles que celles obtenues dans le cas d'analyse sans soufflage d'oxygène, ceci est associable aux résultats obtenus dans le chapitre 1 d'après l'étude bibliographique menée. L'évolution de ce paramètre suit toujours celle de la rugosité RMS.

3.2.3. Étude de la résolution en profondeur

Dans cette section, nous allons étudier l'effet de la rugosité sur la résolution en profondeur pour les différentes conditions d'analyse, en fittant toujours le dernier pic des signaux secondaires.



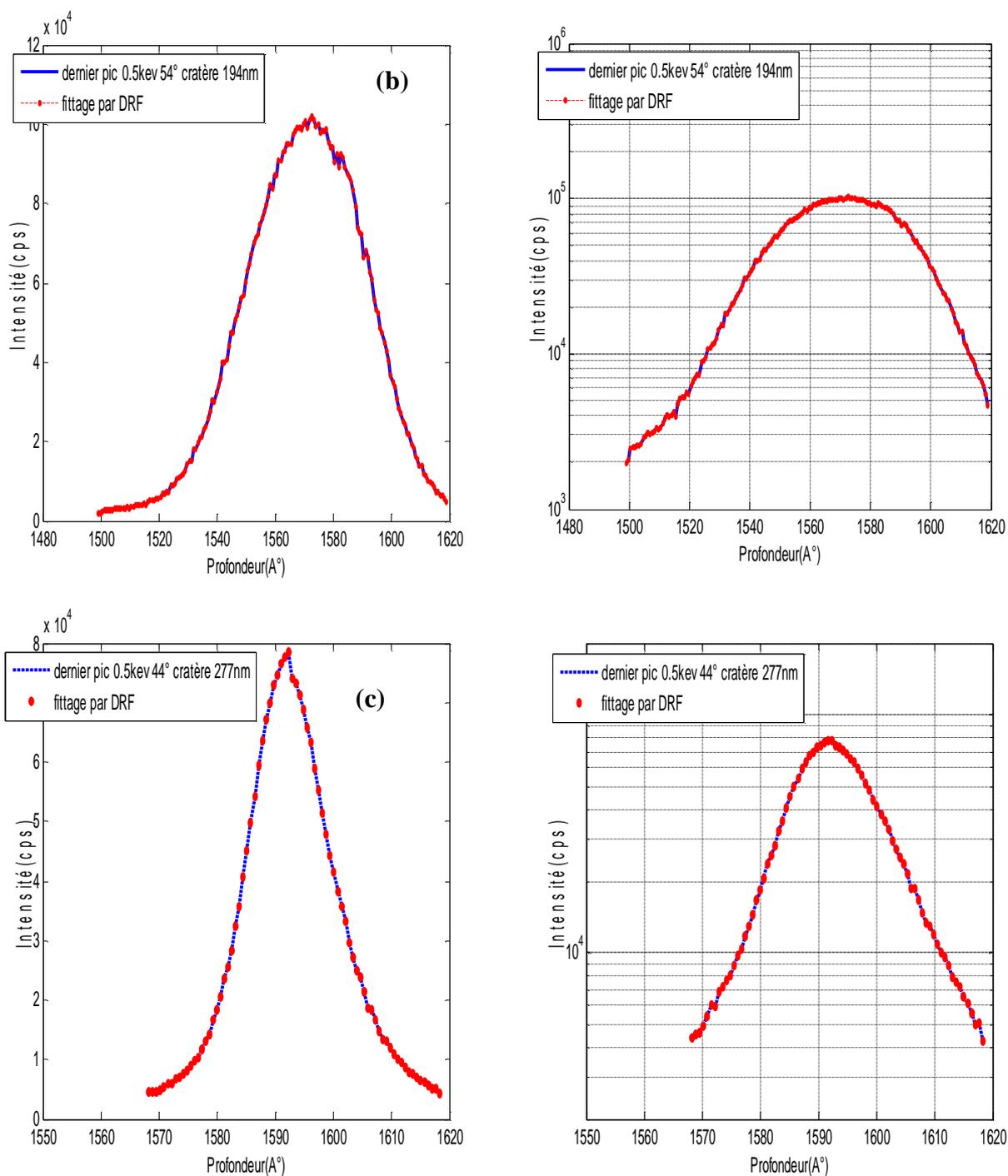


Figure 3.14: fit du dernier pic par DRF, a) 1keV 48° 220nm, b) 0.5keV 54° 194nm, c) 0.5keV 44° profondeur de cratère 277nm
Représentation linéaire et logarithmique

Le tableau 3.4 regroupe les différentes valeurs de s , l_d et l_u calculées par fittage du premier et dernier pic de l'échantillon étudié dans différentes conditions d'analyses.

Echantillon analysé à	Pic	l_u (nm)	l_d (nm)	s (nm)
1keV 48°, avec un cratère de 220nm	1 ^{er} pic	1	1.2	0.6
	Dernier pic	1.2	1.45	1.3
0.5keV 44°, avec un cratère de 277nm	1 ^{er} pic	1.25	1	0.25
	Dernier pic	1.35	1.3	0.47
0.5keV 54°, avec un cratère 194nm	1 ^{er} pic	1.45	1.2	1.2
	Dernier pic	1.3	1.35	2.1

Tableau 3.4: Mesures de σ , λ_d et λ_u pour différentes Énergies d'impact (0.5-1) keV et angles d'incidence (44°, 48°, 54°)

➤ Interprétations

On constate que la résolution avec soufflage est nettement meilleure que sans soufflage, ceci se traduit par la diminution des valeurs de s . Cette réduction dérive à priori de la transformation du silicium superficiel en oxyde, qui dilate l'épaisseur de la couche analysée et améliore la résolution en profondeur.

4. AUTRE MANIÈRE POUR L'EVALUATION DE S_r

De toutes les grandeurs qui caractérisent la résolution en profondeur, l'écart type σ est le paramètre le plus sensible à l'apparition de la rugosité, cela se traduit par les valeurs obtenues durant le fittage des différents pics et sous différentes conditions.

N. Baboux [4] propose d'évaluer le paramètre σ_r en disposant d'un profil acquis à la même énergie mais avec une incidence n'occasionnant pas de rugosité.

Quand la rugosité apparaît, nous avons additivité des carrés des moments centrés d'ordre deux qui prennent la forme suivante :

$$S^2 = S_r^2 + S_p^2$$

Où S_p est la largeur globale du profil sans rugosité

Et S_r est la largeur de la fonction DRF quand la rugosité apparaît.

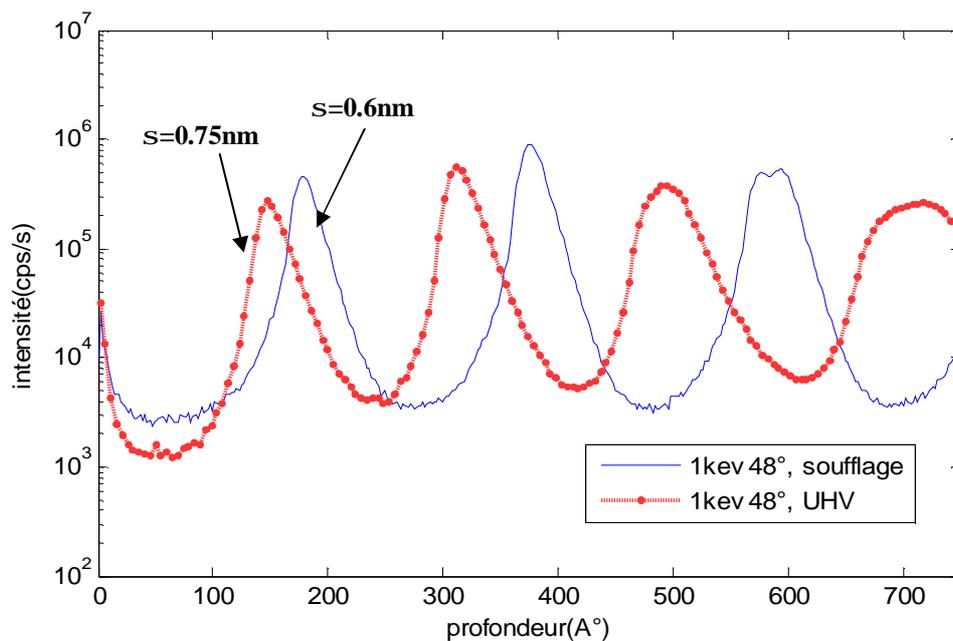


Figure 3.15: exemple de perte de résolution en profondeur due à l'apparition de rugosités pour une énergie de 1keV 48°

Un calcul de l'élargissement donne: $S_r=0.45\text{nm}$

Pour le dernier pic σ vaut 1.3nm dans le cas du soufflage d'oxygène et 4.5nm pour l'UHV, un calcul simple donne $S_r=4.3\text{nm}$.

5. Modèle MRI

S.Hofmann propose un modèle MRI (Mixing-Roughness-Information depth) qui prend en compte l'apparition de la rugosité, basé sur trois paramètres (le mixage collisionnel caractérisée par une zone de mixage de longueur w , décrit par une fonction exponentielle g_w), la rugosité décrite par un terme gaussien g_σ avec une déviation standard σ enfin la profondeur d'échappement décrite par une autre fonction exponentielle g_λ de paramètre λ). La DRF contient des paramètres physiques qui déterminent la réponse impulsionnelle du système en terme de profil mesuré.

Ces paramètres peuvent être divisés en trois catégories

- changement de la surface topographique (rugosité) et la profondeur d'échappement
- changement de la composition de la surface (mixage collisionnel, pulvérisation...).

Chaque couche nano atomique à un endroit z_0 donne une contribution à une profondeur pulvérisée z qui est décrite comme suit:

$$g_w = \frac{1}{w} \exp[-(z - z_0 + w) / w]$$

$$g_l = \frac{1}{l} \exp[-(z - z_0) / l]$$

$$g_s = \frac{1}{\sqrt{2ps}} \exp[-(z - z_0)^2 / 2s]$$

Cette dernière expression qui représente la rugosité dans le modèle MRI concorde bien avec la relation que nous avons utilisé pour évaluer la rugosité de la surface. Cela vient renforcer le résultat que nous avons obtenu.

6. INFLUENCE DE LA RUGOSITÉ SUR LA CALIBRATION EN PROFONDEUR

Nous allons analyser l'influence de la rugosité de la surface sur la calibration en profondeur. Une étude similaire a été menée par Wittmaack [6-30] en incidence normale et F. boubker [2], N.Baboux [4] en incidence oblique.

Comme, nous l'avons déjà mentionné dans le chapitre 1, les rugosités commencent à se développer à partir d'une dose d'ions primaires que nous avons appelé F_{rug} délimitant ainsi deux régimes de l'analyse :

Ø Pour $F < F_{rug}$ on est en régime permanent plan

Ø Pour $F > F_{rug}$ on est en régime des rugosités

L'incorporation des ions primaires conduit à une variation de la vitesse d'érosion qui prend dans un premier temps une valeur v_t qui correspond au début du régime transitoire, cela quand,

$$F < F_{inc} \quad \text{où } F_{inc} \text{ est la dose nécessaire pour atteindre le régime permanent.}$$

Au fur et à mesure que l'érosion progresse, la vitesse d'érosion diminue progressivement pour se stabiliser à une valeur v_p qui correspond au régime permanent plan.

Dans le cas où la rugosité apparaît, cette vitesse varie un second temps à F_{rug} et se stabilise à une valeur v_{rug} quand la rugosité devient stationnaire.

À l'intérieur des deux régimes permanents, la profondeur d'érosion varie de façon affine avec la dose primaire:

$$z = Dz_{inc} + v_p F \quad (3.2) \quad \text{pour } F_{inc} < F < F_{rug}$$

et
$$z = Dz_{tot} + v_r F \quad (3.3) \quad \text{pour } F_{rug} \ll F$$

$$Dz_{tot} = Dz_{inc} + Dz_{rug} \quad (3.4)$$

Où : Dz_{rug} est le décalage induit seulement par les rugosités

Dz_{inc} est le décalage induit par l'incorporation des ions primaires .

La procédure de calibration conventionnelle suppose que la vitesse d'érosion est constante durant toute l'analyse et ne donne qu'une profondeur apparente telle que:

$$z_{app} = v_{app} F \quad (3.5) \quad \text{avec } v_{app} \text{ la vitesse d'érosion apparente}$$

En réalité, la vitesse n'est pas constante, cela conduit à un décalage d'échelle défini comme l'écart entre la profondeur réelle z (d'un delta dopage) et sa profondeur apparente z_{app} :

$$z_{dec} = z_{app} - z$$

D'une manière générale, nous aurons:

$$F_{\text{rug}} \ll F$$

La vitesse d'érosion est définie comme suit: $z = v_p F$

Nous aurons:

$$z = -Dz_{\text{inc}} + (v_{\text{app}} - v_p) F \quad (3.6) \quad \text{pour } F_{\text{inc}} < F < F_{\text{rug}}$$

et $z = -Dz_{\text{tot}} + (v_{\text{app}} - v_{\text{rug}}) F \quad (3.7) \quad \text{pour } F_{\text{rug}} \ll F$

Nous allons essayer de déterminer le décalage d'échelle pour chacun des profils (sans et avec soufflage).

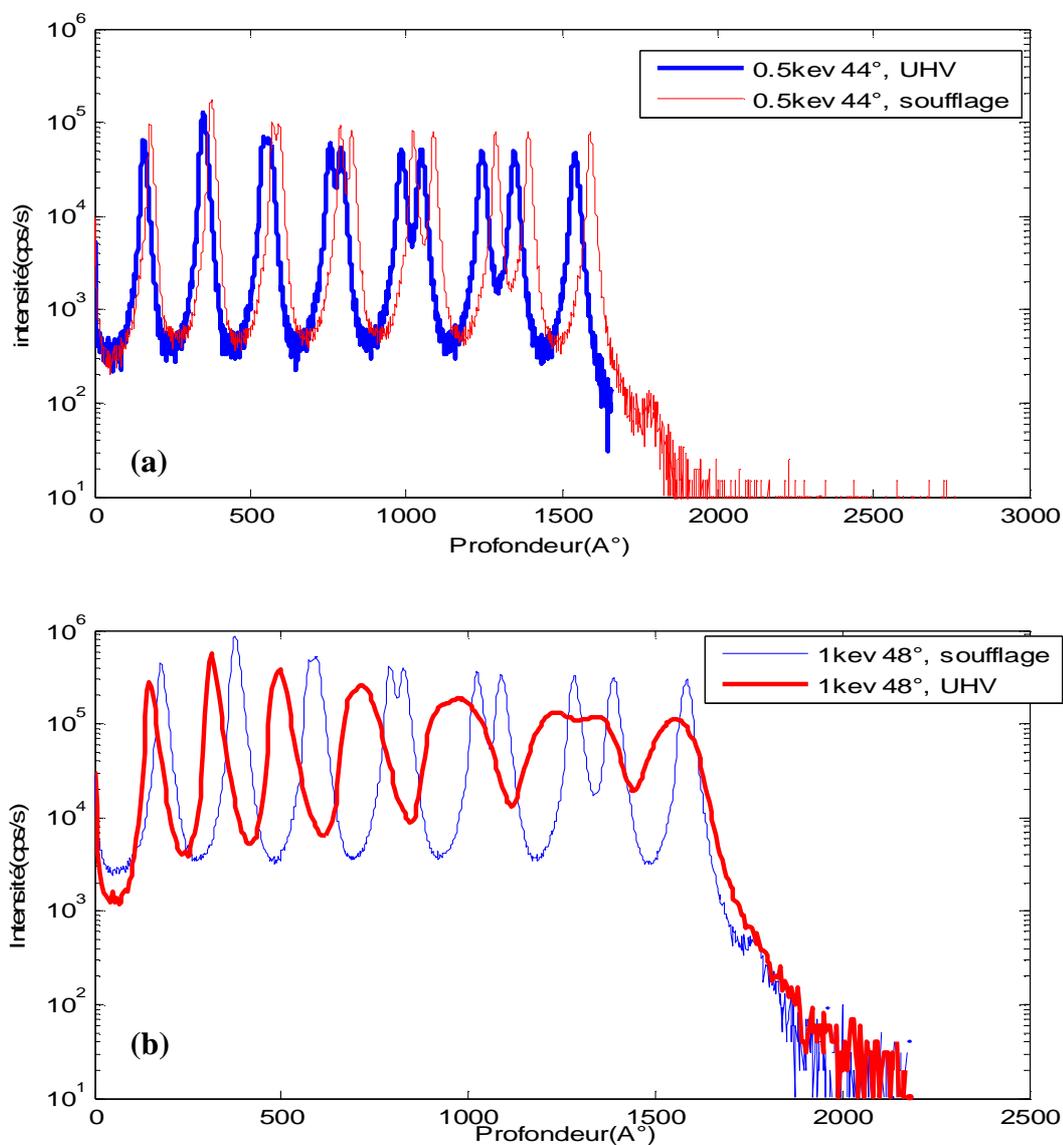


Figure 3.16: décalage de l'échelle des profondeurs

Pour: a) 0.5keV 44°, b) 1keV 48°

Le décalage d'échelle pour l'échantillon analysé à (0.5keV 44°) est d'environ 2nm (figure 3.16-a). Cependant, le décalage mesuré sur le premier pic est à peu près de 8nm pour l'échantillon analysé à (1keV 48°) (figure 3.16-b).

7. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'étude de l'effet de la rugosité en fond de cratère SIMS sur la résolution en profondeur à basse énergie. Nous avons développé une méthode de calcul basée sur l'utilisation d'histogramme joignant les différentes profondeurs effectives des profils AFM obtenus dans les différentes conditions d'analyse.

Nous avons entrepris notre étude par une analyse qualitative des signaux SIMS où nous avons trouvé que:

- i) les signaux de matrice subissent une variation quand la rugosité apparaît. Cette variation indique le début du développement de la rugosité (d_c). Comme, nous avons constaté que cette variation n'apparaît pas pour les analyses acquises sous soufflage d'oxygène.
- ii) Une brève analyse des symptômes SIMS des rugosités montre un décalage de l'échelle des profondeurs pour l'analyse du même échantillon sous soufflage et sans soufflage d'oxygène.

En ce qui concerne l'influence de la rugosité sur la résolution en profondeur, nos résultats montrent que:

- i) L'élargissement des profils s augmente du premier pic au dernier pic. Cette augmentation est due à l'apparition de la rugosité, ce qui rend ce paramètre le plus sensible pour la distinction de la rugosité par rapport aux deux autres paramètres I_u et I_d qui ne sont pas suffisants pour caractériser la résolution en profondeur
- ii) La valeur de s diminue dans l'analyse avec soufflage où il en ressort une bonne résolution en profondeur.

Enfin, il résulte de l'application de la méthode d'histogramme que:

- i) La valeur de s_r des courbes fittant les histogrammes construits varie avec la valeur de la rugosité RMS et peut correspondre à la valeur de RMS pour une profondeur d'érosion faible (RMS=1.5nm, $s_r=1.458$ nm pour l'échantillon analysé à 0.5keV 54° profondeur du cratère=101nm)

- ii) la rugosité peut être représentée par une loi gaussienne.

Résumé

La spectroscopie de masse des ions secondaires (SIMS) est une méthode de choix pour la caractérisation élémentaire des matériaux de la microélectronique. Cependant, la réduction rapide et continue des dimensions des dispositifs avancés de cette filière impose un cahier de charge de plus en plus exigeant. La recherche des conditions d'analyse optimales en terme de résolution en profondeur peut être compromise par l'apparition de rugosité à la surface de l'échantillon dont les conséquences sur l'analyse peuvent être dramatiques.

L'étude de la rugosité qui se manifeste au fond du cratère SIMS et sa maîtrise s'avère crucial pour qui veut atteindre les résolutions en profondeurs ultimes de l'analyse. Ce travail est consacré à l'étude de l'effet de la rugosité sur la résolution en profondeur à basse énergie où l'apparition de la rugosité est inévitable et plus fréquente que pour des conditions d'analyses plus communes. Pour cela, nous avons débuté ce mémoire par une étude bibliographique de l'occurrence de rugosité et son développement avec les différentes conditions d'analyses (incidence normale ou oblique, énergie d'impact et soufflage d'oxygène). Ensuite, nous avons développé une méthode de calcul basée sur l'utilisation d'histogramme, que nous avons appliqué sur les profils AFM mesurés à des différentes conditions d'analyse.

Les résultats obtenus montrent que la rugosité peut être représentée par une loi normale, dont l'écart type correspond à σ_r . Comme, ils montrent une nette amélioration des résolutions en profondeurs des échantillons mesurés sous soufflage d'oxygène.

Abstract:

Analysis by secondary ion mass spectroscopy (SIMS) is limited by parasitic physical phenomena among which is included the development of roughness in the crater bottom. When the roughness appears, important parameters are affected. Moreover, the quantification of the SIMS analysis is not precise and the depth resolution is degraded.

In this work, we have studied the surface roughening effect in depth resolution. That why, we have started this study with the occurrence of roughness in the SIMS crater bottom when different experimental conditions are used (impact energy, angle of incidence, with and without oxygen flooding). In second part, we have developed a method using histogram which, we have applied to the cross-section of the ripple topography showed by AFM (atomic force microscopy).

It is found that, the roughness can be described by a Gaussian law with a standard deviation σ_r ; also, the results showed a net improvement at depth resolution measured with oxygen flooding.

ملخص

إن التطور المستمر و السريع للأجهزة المصنوعة من أنصاف الناقل لا توأكبه تطور أجهزة التحليل ذات حساسية و جودة عالية في القياس، مع أن استعمالها أصبح ضرورة ملحة في خ م هذا التطور خاصة في مجال دراسة التحلل في العمق (SIMS). أدي ذلك للجوء إلي أساس تقنية معالجة الإشارات -التشكل العكسي- و تطبيقها علي النتائج المقاساة.

غير انه عند استعمال الطاقة المنخفضة تظهر عوامل تؤدي إلي إفساد نتائج القياس و أهم هذه العوامل نجد الخشونة. إن التحكم في الخشونة التي تظهر بعد نهاية التحلل في العمق (SIMS) لابد منه إذا أردنا التحصل علي نتائج ايجابية.

دراستنا الحاضرة تعتمد علي دراسة الخشونة و تأثيرها علي القياس في العمق (résolution en profondeur) في مجال استعمال الطاقة المنخفضة. هذا ما جعلنا نبدأ هذه الدراسة بجمع مختلف النتائج المتحصل عليها في تطور الخشونة مع مختلف شروط القياس(استعمال الأكسجين في غرفة القياس، زاوية القصف، جهد القصف). بعد ذلك قمنا بتطوير طريقة حسابية تعتمد علي استعمال المدرجات (histogramme) و التي قمنا بتطبيقها علي الصور النهائية المقاساة بالميكروسكوب (AFM).

النتائج المتحصل عليها تظهر أن الخشونة يمكن تمثيلها بقانون قوسي (loi gaussienne) .

a Références b

- [1] **Boulsina .F.**, « *Contribution à l'amélioration de la résolution en profondeur lors de l'analyse SIMS par déconvolution* », Mémoire de magister, Université de mentouri constantine, .2003
- [2] **Boubker. F.**, « *Caractérisation par spectrométrie de masse des ions secondaires des zones actives du CMOS ultime : étude de la rugosité en fond du cratère et ses conséquences sur la vitesse d'érosion et sur la résolution en profondeur* ».Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2004.
- [3] **Gautier. B.**,« *Etude de la résolution en profondeur lors de l'analyse par SIMS. Détermination de la fonction de résolution pour le bore dans le silicium, mis au point d'une procédure de déconvolution et applications* », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 1997.
- [4] **Baboux. N.**, « *Analyse ultime par Spectrométrie de Masses des Ions Secondaires des martiaux de la microélectronique avancée : Contribution à l'interprétation des profils de bore dans le silicium* ». Thèse de Doctorat, INSA de LYON, 2001.
- [5] **Gary. Mount.**, « *Ultra shallow depth profiling*»,
<http://www.uwo.ca/ssw/archives/1998/jul98/0041.html>
- [6] **Wittmaack. K.**, « *Effect of surface roughening on secondary ion yields and erosion rates of Silicon subject to oblique oxygen bombardment*, .J.VAc. Sci. Techno .8(3), (1990), pp 2246 -2250.
- [7] **Vajo J., Doty R. et Cirlin R.H.**,« *Influence of O_2^+ energy, flux and fluence on the formation And growth of sputtering-induced ripples topography on silicon*», J.Vac. Sci. Techno. A .4(5): (1996), pp.2709-2720.
- [8] **Stevie F.A., et Kahora P. M.**,«*Secondary ion yield changes in Si and GaAs due to topography changes during O_2^+ or Cs^+ ion bombardment*», J.VAc .Sci. Techno. A.6 (1), (1988), pp.76-79.
- [9] **Elst K., Vandervost W. Et Alay J.**, «*Influence of oxygen on the formation of ripples on Si* », J. Vac .Sci. Techno. B, 11(6): (1993), pp.1968-1993.
- [10] **Jiang Z.X. et Alkemade P.F.A.**,« *The complex formations of ripples during depth profiling of Si with low energy, grazing oxygen beams* » J. Applied physics Letters 73(3): (1998), pp.315-317.
- [11] **Barlow R.D., Dowsett M.G., Fox H.S.,Kubiak R.A.A. et new stead S.M.**, « *SIMS response functions for MBE grown delta layers in silicon*» Nucl. Instr. and Meth, B72: (1992),pp.442-446.
- [12] **Liu R, Ng C.M et Wee A.T.S.**,« *Surface roughening effect in sub-kev SIMS depth profiling*», Applied surf Sci.9246: (2002), pp.1-4.

- [13] **Wittmaack. K.**, «*Artifacts in low-energy depth profiling using oxygen primary ion beams: Dependence on impact angle and oxygen flooding conditions*» *J.V.Sci. Techno. B*, 16(5): (1998), pp.2776-2785.
- [14] **Gary.r.mount.Charles W.Magee and Ihab M Abdelrehim.**, «*Accuracy of determining ion implanted B doses as confirmed by Nuclear reaction analysis*»: *Ion Implantation Technology Proceedings, 1998 International Conference on Volume 1*, (1999), pp.42 – 45.
- [15] **R.liu. C.M.Ng and A.T.S.We.**, «*Ultra shallow secondary ion mass spectrometry depth profiling: Limitation of sample rotation in improving depth resolution*», department of physics, national university of Singapore lower Kent ridge road, *Surf,Scien,Appl* vol. 179, September 2001, pp 557-560.
- [16] **Elst K., Vandervost W.**, «*Influence of composition of altered on the ripple formation*», *J.Vac .Sci. Techno. A*, 12(6): (1994), pp.3205-3216.
- [17] **Jiang Z.X. et Alkemade P.F.A.**,«*Secondary ion mass spectrometry and atomic force Spectroscopy studies of surface roughening, erosion rate change and depth resolution in Si during 1kev 60° O₂⁺ bombardment with oxygen flooding* *Secondary ion mass Spectrometry*» *J.Vac .Sci. Techno. B*, 16(4): (1998), pp.1971-1982.
- [18] **Wittmaack K., et Corcoran S.F.**,«*Sources of error in quantitative depth profiling of shallow Doping distributions by secondary ion mass spectrometry in combination with oxygen Flooding*», *J.Vac .Sci. Techno. B*, 16(1): (1998), pp. 272-279.
- [19] **Wittmaack K.**, «*Concentration depth calibration and bombardment induced impurity Relocation in SIMS depth profiling of shallow through oxide Interface implantation distributions: A procedure for eliminating the matrix effect*» *Surf. Anal.*, 26: (1998), pp.290- 305.
- [20] **Magee C.W., Mount G.R., Smith S.P Herner B et Grossman H.J.**, «*Sputtering rate change and surface roughening during oblique incidence and normal incidence O₂⁺ bombardment of silicon, with and without oxygen flooding*» *J.Vac .Sci. Techno. B*, 16(6): (1998), pp.3099-3104.
- [21] **Canry J.C et Brown A.**, «*ultra-shallow depth profiling of implants and multilayer samples using a modified Cameca IMS 4f*» dans: *Benninghoven et al. [18]*, pp55-58.
- [22] **Ng C.M., Wee A.T.S., Huan C.H.A. et See A.**, «*ultra-shallow secondary ion mass Spectrometry depth profiling: limitation of sample rotation in improving depth*» *Nucl, Instru and methods. B* 179: (2001), pp.557-560.
- [23] **Jahnel F.et Criegern Von**, «*Investigating oxygen flooding at oblique 2 and 1kev oxygen sputtering for microelectronics support application*» *Surf, Scien, Appl*.9270 :(2002), pp.1-4.

- [24] **Ng C.M., Wee A.T.S., Huan C.H.A. et See A.**, «Effect oxygen flooding on Crater surface composition and surface roughening in ultra shallow depth profiling» in: *Benninghoven et al*, (1999), pp.93-96
- [25] **Van berkum J.G.M.**, «improving SIMS depth profiling by sample rotation» in: *Benninghoven et al*, (1999), pp.55-58
- [26] **M.Bersani, D.Giubertoni,E.Lacob.**,«Boron ultra low energy SIMS depth profiling improved by rotating stage». *Surf, Scien, Appl* ,vol. 252, july 2006, pp 7315-7317.
- [27] **Zalm P.C.**, «Ultra shallow doping profiling with SIMS» *Rep of Progress in Physics*.58: (1995), pp.1321-1374
- [28] **Hamdi.F.**, «déconvolution des profils SIMS obtenus en régime variant», *Mémoire de magister, Université de mentouri Constantine*.2006
- [29] **littmarck U., Hofer W, O.**, «the theory of recoil mixing in solids» , In: *Topics in current physics*, 1984, Berlin: Springer-veralg,pp,159-200
- [30] **wittmaack k.**, « influence of the depth calibration procedure, the apparent shift of impurity depth profiles measured under conditions of long term changes in erosion rate», *T.Vac. Sci. technol.B*,18(1): (2000), pp.1-6
- [31] **Binning G, Quate C.F. et Gerber C.H.**, « Atomic force microscopy », *Phy.Rev.Lett*, 56(9): (1986), pp 930-933.
- [32] **P. Marcoux.**, « Réactivité et manipulation de nano tubes de carbone monocouches : fonctionnalisation de surface par greffage covalent et mise en œuvre comme agent structurant ».Thèse de doctorat, institut des Matériaux de Nantes. juin 2002.
- [33] **Sandrine Four.**, « Élaboration et caractérisation de films minces de Ta2o5 pour la réalisation de structures capacitives intégrées sur Silicium », *Thèse de Doctorat, INSA de Lyon*, 2000.
- [34] **Tremani/ Molecular Biophysics Group/ Delft University of Technology.**« les microscopies à sonde locale contact et manipulation », www.cea.fr/var/plain/storage/original/application/579f432c42444f0f197efc6e3ff39e1.pdf
- [35] **Baboux N., Dupuy J.C., Prudon G., Holliger P., Laugier F., Papon A.M., et Hartman J.M.**, « Ultra low energy SIMS analysis of boron deltas in silicon», *journal of crystal growth*.,245: (2002),pp.1-8.

La microscopie à force atomique est devenue actuellement une technique de référence pour la caractérisation des propriétés physico-chimiques de surface dans des différentes disciplines (physique, chimie, biologie) tant par sa simplicité et sa souplesse d'utilisation que par la large gamme de ses applications (topographie, élasticité, électrochimie, organisation moléculaire....).

La microscopie à force atomique AFM (atomique force microscopy) a été inventé par G.Binnig_et al. [2, 5, 31]. Elle concerne tous les types de matériaux, qu'ils soient isolants, conducteurs ou semi-conducteurs. Son intérêt repose sur sa résolution extrême mais également sur son utilisation possible dans le vide, l'air ou en milieu liquide.

Instrumentation :

Les microscopes à sonde locale possèdent tous un certain nombre de caractéristiques communes. L'appareillage est typiquement constitué :

- Ø d'une **pointe** très fine permettant une mesure locale,
- Ø d'un ressort de faible constante de raideur (**levier**) sur lequel est accroché la pointe,
- Ø d'une méthode de détection de la **déflexion du ressort**,
- Ø d'un système mécanique permettant de **déplacer l'échantillon par rapport à la pointe**. Ce sont en fait des éléments piézo-électriques de haute précision qui assurent le mouvement en z et le balayage en x et y de l'échantillon.
- Ø D'un système de rétroaction, soit pour maintenir la force d'interaction constante ou bien pour fixer la position de l'échantillon en z. c'est **une boucle d'asservissement**.
- Ø D'une **isolation de vibrations extérieures**. L'appareillage peut être suspendu par des ressorts ou posé sur un socle en caoutchouc. Un autre moyen d'isoler le microscope des vibrations du bâtiment est de le placer sur une table montée sur coussins d'air
- Ø D'un ordinateur pour acquérir les mesures et les convertir en images [32].

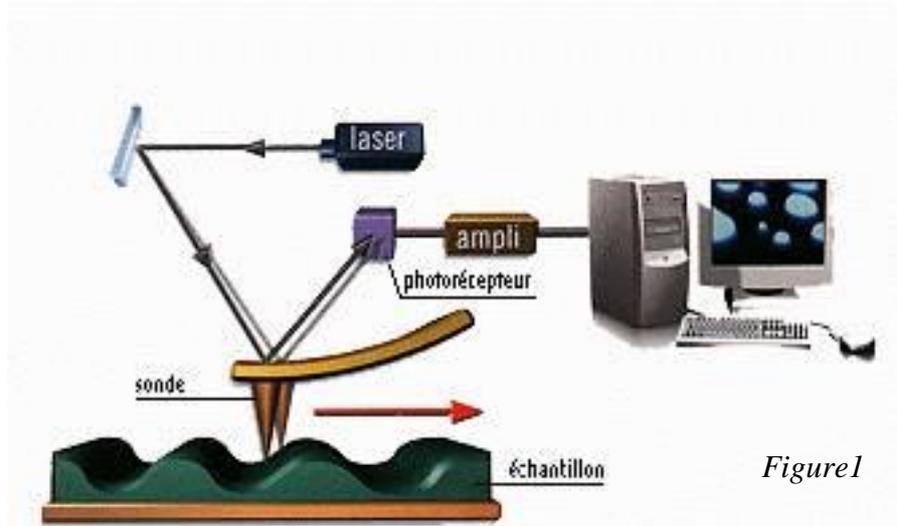


Figure 1

Les limites de l'AFM :

Les mesures d'AFM sont très sensibles aux vibrations externes. Il est donc important de déterminer l'ordre de grandeur de ce bruit qui constitue la principale erreur de mesure. Pour cela, une mesure a été réalisée en gardant le faisceau fixe sur l'échantillon, la rugosité doit être nulle car la hauteur z mesurée est constante. Or la rugosité mesurée est de 0.06nm. Ceci correspond donc à la limite de mesure de l'appareillage [33].

Une autre limite de l'AFM réside dans le fait que les forces se développant entre pointe et surface varient de façon non monotone avec la distance, cette variation rend difficile la régulation de la position de la sonde par rapport à la surface puisque certaines intensités de forces correspondent à deux distances d'équilibre. Une autre difficulté résulte du fait que des forces interagissent à longue distance : le flanc de la pointe sonde contribue aux forces détectées par le ressort. C'est l'une des raisons pour lesquelles il est plus difficile d'obtenir la résolution atomique avec un AFM [34].

Loi normale ou gaussienne :

Une loi est dite gaussienne si elle est de la forme suivante :

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2}{2s^2}\right]$$

Elle passe par son maximum pour, $x = x_c$ et a ses points d'inflexions en $x_c + s$ et $x_c - s$.

Cette loi présente plusieurs caractéristiques, les plus importantes sont :

- ✓ Elle permet des développements mathématiques efficaces, en particulier en ce qui concerne les variables indépendantes parce qu'elle s'exprime comme l'exponentielle d'une forme quadratique
- ✓ Toute l'information est donnée directement par les paramètres x_c et s qui caractérisent respectivement la valeur moyenne et la dispersion autour de cette valeur moyenne, le paramètre le plus important dans l'analyse SIMS est s particularité de la DRF.
- ✓ Enfin, elle représente bien un grand nombre de phénomènes physiques.