ORIGINAL ARTICLE

ETUDE PAR LA DYNAMIQUE MOLECULAIRE DE LA CROISSANCE DE COUCHES DE PLATINE

ETUDE PAR LA DYNAMIQUE MOLÉCULAIRE DE LA CROISSANCE DE COUCHES DE PLATINE

| Dimbimalala, Randrianasoloharisoa [1*] | Heriniaina, Andrianaivontseheno [1] | and | Fils, Lahatra Razafindramisa [1] |

[1.] Université d'Antananarivo | Département de Physique | Laboratoire de Physique de la Matière et du Rayonnement | Antananarivo | Madagascar |

| Received August 10, 2020 | | Accepted August 22, 2020 | | Published September 01, 2020 | | ID Article| Dimbimalala-Ref.1-ajira200820 |

RESUME

Introduction : Le platine est un métal qui trouve des nombreuses applications intéressantes comme en catalyse grâce à ses propriétés électroniques. Malheureusement, c'est une ressource assez rare car il se trouve dans la catégorie des métaux précieux et son utilisation revient chère. **Objectif** : L'objectif de ce travail est de déterminer si l'on peut utiliser un alliage platine-cuivre, au lieu du platine pur, sans altérer les propriétés du platine. **Méthodes** : Dans ce travail, nous avons utilisé la simulation numérique basée sur la Dynamique Moléculaire classique pour déterminer le comportement des atomes du système. Nous avons utilisé le potentiel EAM (Embedded Atom Method) pour modéliser les interactions entre ces atomes. Nous avons commencé par former un substrat constitué soit du Pt soit du Cu. Sur ce substrat est ensuite déposé des atomes de Pt pour former des couches. A la fin, nous avons étudié et comparé les structures des couches ainsi déposées. Ces structures sont caractérisées par les distances inter couches et les distances interatomiques. **Résultats** : Pour le système Pt/Pt, les distances interatomiques varient de 2.38Å pour la 1ère couche déposée sur le substrat à 2.34 Å pour la 4ème couche et pour les distances intercouches nous avons trouvé une valeur de 2.30Å pour la 1ère couche et 2.21Å pour la 4ème couche. En même temps, pour le système Pt/Cu, les distances interatomiques varient de 2.61Å à 2.38Å et les distances intercouches varient de 2.23Å à 2.17Å. On note aussi la coexistence des deux structures CFC (Cubique à Faces Centrées) et HC (Hexagonale Compacte) pour les deux systèmes. **Conclusions** : Dans cette étude, les résultats des deux systèmes Pt/Pt et Pt/Cu présentent quelques différences lors des premiers dépôts (1ère couche déposées sur le substrat) mais ces différences diminuent lorsqu'on s'éloigne du substrat. En effet les atomes déposés sur le substrat cherchent d'abord à accorder leurs paramètres de mailles avec les atomes du substrat. Lorsqu'on s'éloigne de ce substrat, les atomes déposés commencent à adopter leurs propres paramètres de maille.
***Mots-clés**: Couches minces, Platine, Cuivre, Dynamique moléculaire classique, potentiel EAM.*

ABSTRACT

Introduction: Platinum is a metal which finds many interesting applications such as in catalysis thanks to its electronic properties. Unfortunately, this is a fairly scarce resource as it is found in the precious metals category and is expensive to use. **Objective:** The objective of this work is to determine whether we can use a platinum-copper alloy, instead of pure platinum, without altering the properties of platinum. **Method:** In this work, we used numerical simulation based on classical Molecular Dynamics to determine the behavior of atoms in the system. We used the EAM (Embedded Atom Method) potential to model the interactions between these atoms. We started by forming a substrate consisting of either Pt or Cu. Pt atoms are then deposited on this substrate to form layers. At the end, we studied and compared the structures of the layers thus deposited. These structures are characterized by inter-layer distances and interatomic distances. **Results:** For the Pt / Pt system, the interatomic distances vary from 2.38Å for the 1st layer deposited on the substrate to 2.34 Å for the 4th layer and for the interlayer distances we found a value of 2.30Å for the 1st layer and 2.21Å for the 4th layer. At the same time, for the Pt / Cu system, the interatomic distances vary from 2.61Å to 2.38Å and the inter-layer distances vary from 2.23Å to 2.17Å. We also note the coexistence of the two structures FCC (Face Centered Cubic) and HCP (Hexagonal Compact) for the two systems. **Conclusion:** In this study, the results of the two Pt / Pt and Pt / Cu systems show some differences during the first layers (1st layer deposited on the substrate) but these differences decrease when the layers are far from the substrate. In fact, the atoms deposited on the substrate first seek to match their lattice parameters with the atoms of the substrate. When the layers are far from this substrate, the deposited atoms begin to adopt their own lattice parameters.
***Keywords:** Thin films, Platinum, Copper, Classical molecular dynamics, EAM potential.*

1. INTRODUCTION

Par principe, une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm"à quelques "µm" [1]. Cette très faible valeur de l'épaisseur fait émerger des propriétés qui ne sont pas visibles lorsque le matériau se trouve à l'état massif. Ces propriétés ont attiré l'intérêt des nombreux chercheurs dans les milieux scientifiques et industriels et les systèmes se présentant sous forme de couches minces ont fait l'objet d'un grand nombre d'études [2,3,4,5]. Les couches minces présentent un intérêt particulier dans la résolution des problèmes de l'occupation de l'espace où elles favorisent une grande économie de matière et d'encombrement. Elles remplissent en effet des fonctions essentielles dans des éléments aussi variés que les microprocesseurs, les prothèses médicales, les verres optiques, les écrans de télévision, les diodes laser, les pots catalytiques des voitures.

***Corresponding author Author & Copyright Author © 2020: | Dimbimalala, Randrianasoloharisoa * |**. All Rights Reserved. All articles published in *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences* are the property of Atlantic Center Research Sciences, and is protected by copyright laws CC-BY. See: http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/.

Dans ces composants se présentant sous forme de couches minces, le platine occupe une place de choix compte tenu de ses propriétés mécaniques et électroniques. Néanmoins, le platine est un élément rare. En effet, il fait partie de la famille des métaux précieux donc cher et on doit rationaliser son utilisation sans pour autant modifier ses propriétés intrinsèques que l'on veut exploiter.

Le but de notre étude est de savoir si l'on peut diminuer le taux de platine dans un objet donné en utilisant de l'alliage, comme le Pt/Cu mais sans modifier la structure cristallographique du platine, ses propriétés étant étroitement liées à cette structure.

2. MATERIELS ET METHODES

Dans cette étude, nous avons utilisé la simulation numérique par la Dynamique Moléculaire classique basée sur l'algorithme de Verlet.

2.1 Systèmes étudiés

Nous avons étudié deux systèmes à savoir le système formé de platine déposé sur un substrat de platine et le système formé du platine déposé sur un substrat de cuivre.

Chaque substrat est constitué de 5 couches, orientées (111), dont les 2 inférieures sont figées pour garder l'orientation et la structure des couches tandis que les 3 supérieures sont mobiles pour tenir compte de l'effet de la température. Chaque couche du substrat est constituée de 400 atomes (Pt ou Cu) soit 2000 atomes au total pour les 5 couches.

Les couches déposées sont formées de 2000 atomes de platine. La déposition des couches consiste à lancer un à un sur le substrat les atomes qui vont s'étaler pour former les couches.

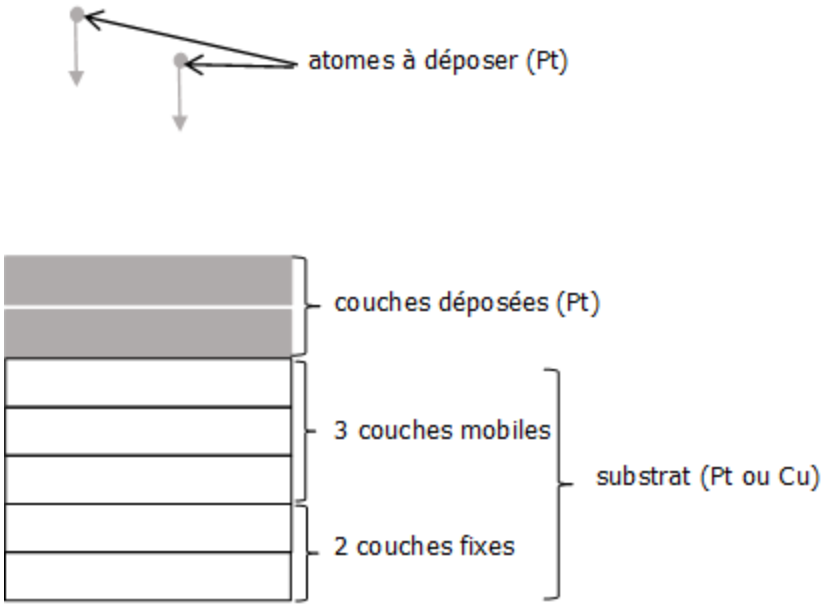

Figure 1 : La figure montre schématiquement le système étudié

2.2 Dynamique Moléculaire, algorithme de Verlet [6] :

La méthode de Dynamique Moléculaire consiste à suivre le déplacement de chaque atome constituant le système en résolvant les équations du mouvement de Newton.

Si le système constitué de N particules est soumis à un potentiel $U(\vec{r}_{ij})$, alors chaque particule i sera soumise à une force $\vec{f}_i$ telle que :

$$\vec{f}_i = -\sum_{j\neq i}^{N} \vec{\nabla} U(\vec{r}_{ij}) \qquad (1)$$

$\vec{r}_{ij}$ est la distance entre deux particules i et j.

Et pour une particule i soumise à une force $\vec{f}_i$ son mouvement au cours du temps est donné par la relation de Newton :

$$\vec{f}_i = m_i \vec{a}_i(t) \qquad (2)$$

Soit $\vec{f}_i = m_i \frac{d^2\vec{r}_i(t)}{dt^2}$ (3)

Ou encore $\frac{\vec{f}_i}{m_i} = \frac{d^2\vec{r}_i(t)}{dt^2}$ (4)

m_i est la masse de la particule, $\vec{a}_i(t)$ son accélération et $\vec{r}_i(t)$ sa position à l'instant t.

La résolution de l'équation (4) donne les différentes positions $\vec{r}_i(t)$ de la particule i en fonction du temps. Pour cela, on a utilisé l'algorithme de Verlet qui consiste à faire le développement en série de Taylor d'ordre 4 de $\vec{r}_i(t+\delta t)$ au voisinage de t :

$$\vec{r}_i(t+\delta t) = \vec{r}_i(t) + \frac{d\vec{r}_i(t)}{dt}\delta t + \frac{1}{2!}\frac{d^2\vec{r}_i(t)}{dt^2}\delta t^2 + \frac{1}{3!}\frac{d^3\vec{r}_i(t)}{dt^3}\delta t^3 + O(\delta t^4) \quad (5)$$

$$\text{Soit } \vec{r}_i(t+\delta t) = \vec{r}_i(t) + \frac{d\vec{r}_i(t)}{dt}\delta t + \frac{1}{2}\frac{\vec{f}_i(t)}{m_i}\delta t^2 + \frac{1}{6}\frac{d^3\vec{r}_i(t)}{dt^3}\delta t^3 + O(\delta t^4) \quad (6)$$

De même, le développement de $\vec{r}_i(t-\delta t)$ donne :

$$\vec{r}_i(t-\delta t) = \vec{r}_i(t) - \frac{d\vec{r}_i(t)}{dt}\delta t + \frac{1}{2}\frac{\vec{f}_i(t)}{m_i}\delta t^2 - \frac{1}{6}\frac{d^3\vec{r}_i(t)}{dt^3}\delta t^3 + O(\delta t^4) \quad (7)$$

La somme des équations (6) et (7) donne :

$$\vec{r}_i(t+\delta t) + \vec{r}_i(t-\delta t) = 2\vec{r}_i(t) + \frac{\vec{f}_i(t)}{m_i}\delta t^2 + O(\delta t^4) \quad (8)$$

$$\text{Soit } \vec{r}_i(t+\delta t) = 2\vec{r}_i(t) - \vec{r}_i(t-\delta t) + \frac{\vec{f}_i(t)}{m_i}\delta t^2 + O(\delta t^4) \quad (9)$$

L'équation (9) constitue l'algorithme de Verlet pour une particule i. Cet algorithme permet de déterminer la position de chaque particule i à l'instant (t+δt). Son application nécessite de connaître les positions de la particule i aux instants t et (t-δt) et la force appliquée sur elle à l'instant t.

2.3 Conditions aux limites périodiques

Dans les simulations de Dynamique Moléculaire, on utilise des cellules ou boites fictives dans lesquelles sont placées les particules à étudier. Ces boites sont de taille finie et les effets de bord sont très importants. Pour limiter ces effets de bords, on applique les conditions aux limites périodiques : chaque cellule est répliquée dans les trois (ou deux) dimensions, en gardant la même position relative pour chaque particule, pour avoir un système de taille infinie ou de surface infinie dans le cas où les répliques sont faites à deux dimensions. La figure 2, tirée de la référence [7], illustre le principe de cette méthode.

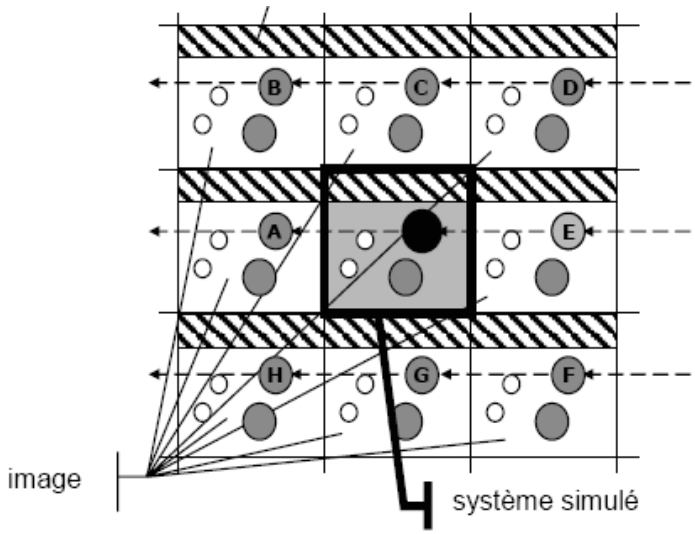

Figure 2 : la figure montre l'utilisation de la méthode de conditions aux limites périodiques

Dans la figure 2, le carré central en gras représente le système étudié et les huit carrés autour sont ses images. De même, les cercles notés par A jusqu'à H sont les images du cercle noir du carré central. Au cours de la simulation, lorsqu'une particule se déplace dans la boite originale, ses images dans chaque boite avoisinante se déplacent exactement de la même manière. Ainsi, si l'un des mouvements aura pour effet de déplacer l'une des particules en dehors de la boite centrale, celui-ci aura pour effet secondaire de déplacer l'une de ses images à l'intérieur de la cellule centrale, le nombre total de particules reste ainsi inchangé.

2.4 Potentiel interatomique EAM (Embedded Atom Method)

L'utilisation de la méthode Monte Carlo ou la Dynamique Moléculaire nécessite l'emploi d'un potentiel pour modéliser les interactions entre les particules. Le choix de ce potentiel est primordial pour la qualité des résultats de la simulation.
Le potentiel EAM (Embedded Atom Method) a été introduit dans les années 80 par Daw *et al.,* (1984) [8]. Le principe de cette méthode consiste à traiter chaque atome comme étant une impureté vis à vis des autres atomes du système. Ce potentiel a été développé pour traiter les systèmes métalliques. Dans ce formalisme, l'énergie d'un atome i est donnée par [9]:

$$E_i = \frac{1}{2}\sum_{j\neq i}\Phi_{ij}(\vec{r}_{ij}) + F(\rho_i(\vec{r}_{ij})) \quad (10)$$

Dans l'équation (10), le terme $\sum_{j\neq i}\Phi_{ij}(\vec{r}_{ij})$ représente les énergies d'interaction de pair de l'atome i avec ses voisins j séparés d'une distance $\vec{r}_{ij}$ et $F(\rho_i(\vec{r}_{ij}))$ est l'énergie nécessaire pour insérer cet atome i dans le milieu où règne une densité électronique $\rho_i(\vec{r}_{ij})$ créée par les autres atomes de ce milieu.

L'énergie totale du cristal est obtenue en sommant l'énergie de chaque atome, soit :

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i,j(i\neq j)}\Phi_{ij}(\vec{r}_{ij}) + \sum_i F_i(\rho_i) \qquad (11)$$

3. RESULTATS

3.1 Système Pt/Pt

Dans ce système, on a déposé des atomes de platine sur un substrat en platine.
Les courbes de remplissage dans la figure 3 représentent les taux de couverture des cinq premières couches d'adatomes sur le substrat en fonction du nombre de monocouches déposées. Les courbes violette, verte, bleu, jaune et rouge correspondent respectivement aux remplissages de la première, deuxième, troisième, quatrième et cinquième couche d'adatomes.

Le mode de remplissage ou mode de croissance des couches est défini par la pente et l'écart entre deux courbes consécutives. Le mode Frank-Van der Merve (2D) est caractérisé par un écart élevé et une forte pente. Ce mode 2D correspond à une croissance couche par couche : le remplissage d'une couche ne commence que lorsque la couche en dessous est complètement remplie. Le mode de type Volmer-Weber (3D) est caractérisé par un faible écart entre deux courbes: le remplissage de la première couche n'est pas encore achevé alors que la deuxième commence déjà.

La figure 3 représente le taux de couverture des couches dans le cas où le platine est à la fois le substrat et l'élément à déposer. Les valeurs en abscisse, notées par MC, représentent le nombre de monocouches, et les valeurs en ordonnée représentent le taux de couverture en %.

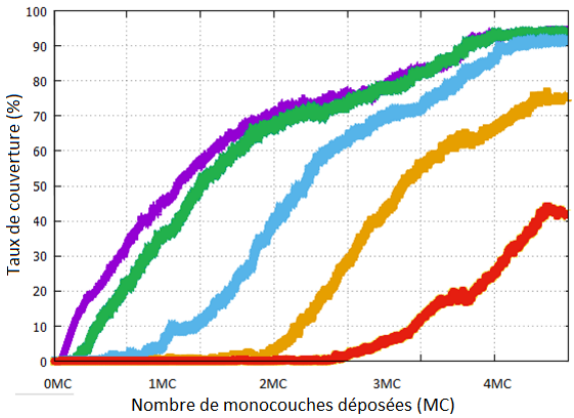

Figure 3 : la figure montre le taux de couverture des cinq premières couches d'adatomes (en %) en fonction du nombre de monocouches déposées pour le système Pt/Pt.

Les remplissages de la première couche et de la seconde se font pratiquement en même temps mais l'écart augmente au fur et à mesure que l'on remplisse des couches de plus en plus éloignées du substrat.

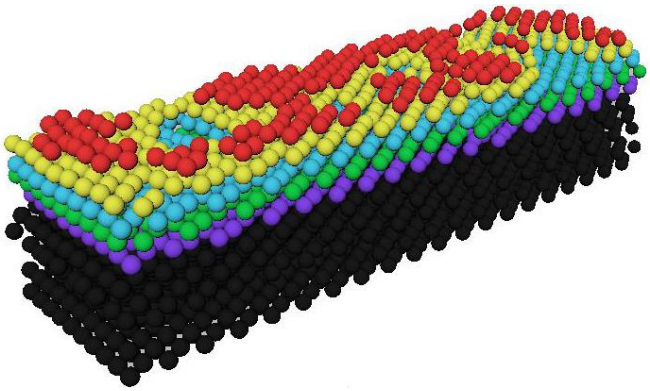

Figure 4 : la figure montre la croissance des couches de Platine sur le Platine en 3D.

La figure 4 illustre la croissance dans une image à trois dimensions. Les boules noires représentent les atomes du substrat et les boules violettes, vertes, bleues, jaunes et rouges sont respectivement ceux de la première jusqu'à la dernière couche à déposer.

Comme il ne s'agit pas d'un mode de croissance parfaitement 2D, on peut remarquer la présence des lacunes. Les couches inférieures sont visibles. Le tableau 1 donne le taux de remplissage de chaque couche à la fin de la simulation.

Tableau 1: Taux de remplissage (en %) des couches déposées du système Pt/Pt

Couches	**Pt/Pt**
5ème couche	41.75
4ème couche	75.50
3ème couche	91.75
2ème couche	94.00
1ère couche	94.25

La distance intercouche du Platine à l'état massif est de 2.26Å, c'est-à-dire la distance entre les deux premières couches du substrat. D'après les résultats, présentés dans le tableau 2, cette distance varie beaucoup. Nous pouvons dire alors qu'il y a une déformation au niveau des couches d'adatomes déposées. Il y a d'abord une augmentation de la distance intercouche (2.27 à 2.33Å) puis vers la formation de la dernière couche, il y a une compression (2.21Å). Pour la distance interatomique, elle diminue au fur et à mesure que l'on monte vers les couches supérieures.

Tableau 2: Distances intercouches et distances interatomiques pour le système Pt/Pt

Couches	**Distances intercouches [Å]**	**Distances interatomiques [Å]**
4ème couche	2.21	2.34
3ème couche	2.33	2.37
2ème couche	2.28	2.43
1ère couche	2.30	2.38
Substrat	2.27	2.52

La figure 5 illustre la structure de trois premières couches de Platine sur le substrat. Nous pouvons observer sur cette figure la coexistence de deux structures cristallines qui sont alternés : cubique face centrée (CFC) et hexagonale compact (HCP).

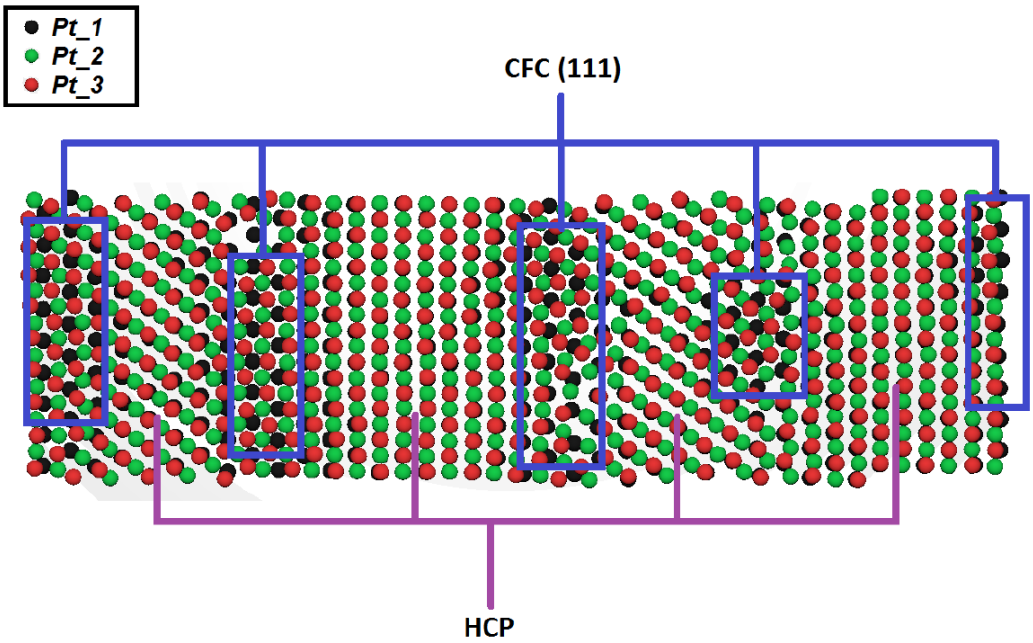

Figure 5 : la figure montre une vue de dessus des trois premières couches de Platine
Pt_1 : Atome de Platine dans la 1ère couche d'adatomes
Pt_2 : Atome de Platine dans la 2ème couche d'adatomes
Pt_3 : Atome de Platine dans la 3ème couche d'adatomes

3.2 Système Pt/Cu :

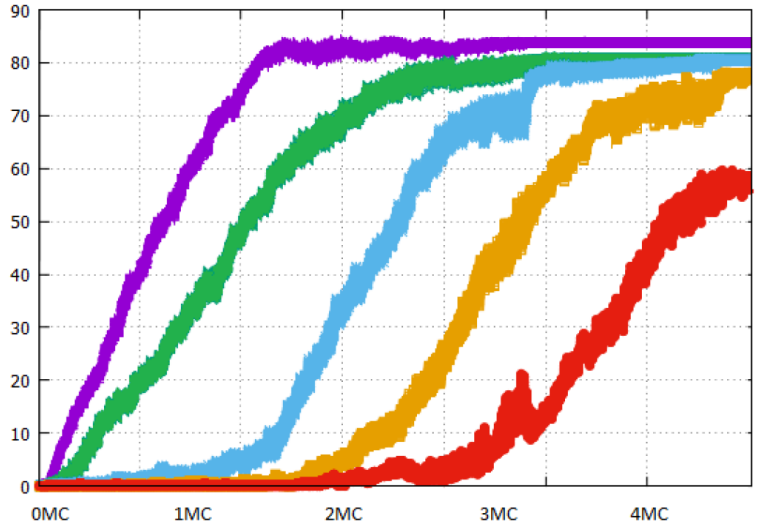

Figure 6 : la figure représente le taux de couverture des cinq premières couches d'adatomes (en %) en fonction du nombre de monocouches déposées du système Pt/Cu.

Les pentes des courbes de la figure 6 montrent une grande vitesse de croissance surtout pour la première couche. Néanmoins, la figure 7 montre des lacunes qui laissent apparaitre les couches inférieures. La croissance est donc de type Volmer-Weber qui tend vers celle de Frank-Van der Merve comme pour le système Pt/Pt.

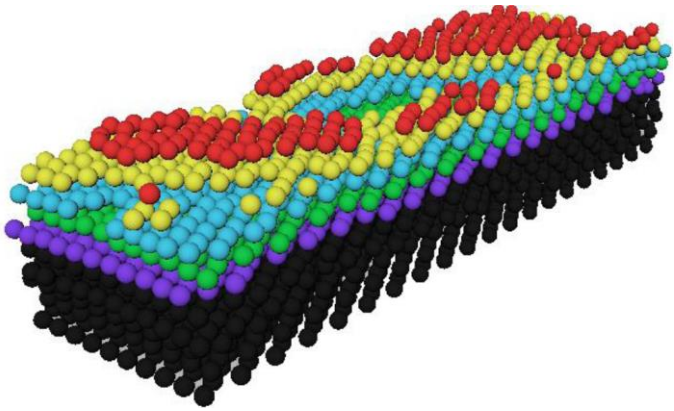

Figure 7 : la figure représente la croissance des couches de platine sur le cuivre en 3D

Tableau 3: Taux de remplissage (en %) des couches déposées du système Pt/Cu

Couches	Pt/Cu
5ème couche	58.25
4ème couche	77.25
3ème couche	80.50
2ème couche	80.75
1ère couche	83.75

Le tableau 3 montre le taux de remplissage de chaque couche de platine déposée sur le substrat de cuivre.

Tableau 4: Distances intercouches et distances interatomiques pour le système Pt/Cu

Couches	Distances intercouches [Å]	Distances interatomiques [Å]
4ème couche	2.17	2.38
3ème couche	2.21	2.46
2ème couche	2.24	2.50
1ère couche	2.23	2.61
Substrat	2.19	2.38

Dans le tableau 4, la distance intercouche du substrat en Cu est de l'ordre de 2.19Å. Pour les couches déposées, la distance intercouche diminue en allant vers la surface. Cette diminution est de 2.24Å à 2.17Å. Pour la distance interatomique des couches déposées, on aussi une diminution de 2.61Å à 2.38Å. Pour le substrat, elle est de 2.38Å.

La figure 8 montre les différentes structures cristallines qui apparaissent au niveau des trois premières couches de Platine.

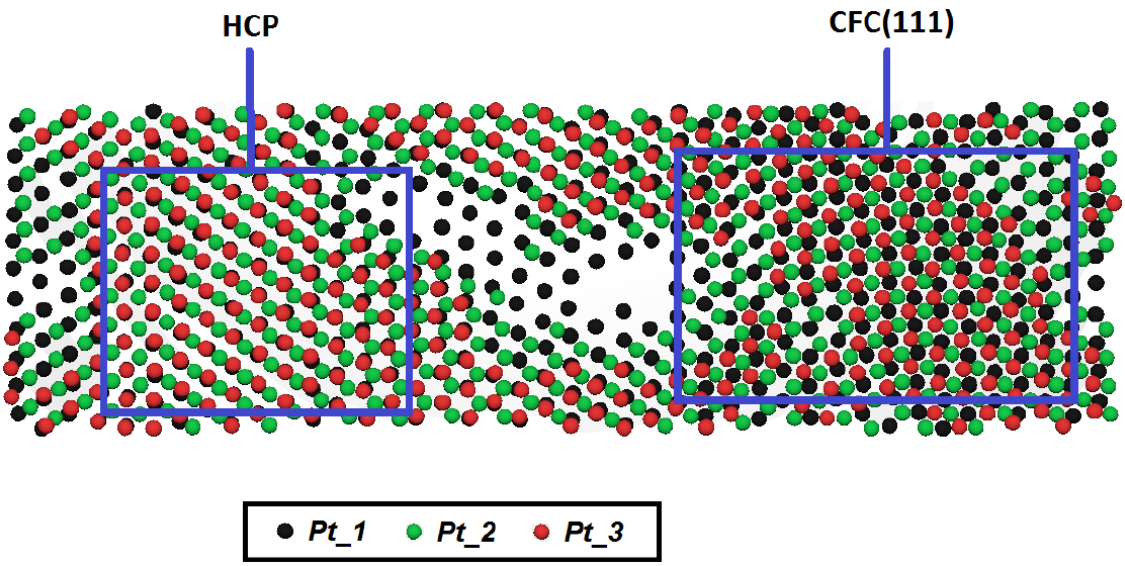

Figure 8 : la figure montre une vue de dessus des trois premières couches de Platine. Pt_1 : Atome de Platine dans la 1ère couche d'adatomes ; Pt_2 : Atome de Platine dans la 2ème couche d'adatomes ; Pt_3 : Atome de Platine dans la 3ème couche d'adatomes.

Nous pouvons constater que le taux de pourcentage des deux structures sont à peu près les mêmes. Malgré ce fait, les atomes ont toujours tendance à adopter une structure HCP.

4. DISCUSSION

D'après nos résultats, présentés par les courbes de croissance dans les figures 3 et 6, les deux systèmes Pt/Pt et Pt/Cu ont le même mode croissance : d'abord un mode Volmer-Weber (3D) suivi d'un mode Frank-Van der Merve (2D). En effet, au voisinage du substrat, les atomes qui viennent se déposer préfèrent les sites qui se trouvent sur des îlots déjà formés plutôt que directement sur le substrat : c'est une croissance proche du mode Volmer-Weber. Quand on s'éloigne du substrat, les adatomes commencent à adopter une croissance Frank-Van der Merve (2D) mais comme ils croissent sur des îlots, une couche ne peut pas être complètement remplie avant de remplir la couche en dessous.

Néanmoins, il existe une différence entre les deux systèmes en ce qui concerne le remplissage des couches. D'après les figures 4 et 7, on remarque que les lacunes sont beaucoup plus profondes pour le système Pt/Cu. En effet, pour le système Pt/Pt, les trois premières couches d'adatomes sont presque remplies entièrement alors qu'on avait un mode de croissance de Volmer-Weber au début du remplissage. Ceci dit que des atomes arrivent à atteindre les couches inférieures. En terme d'énergie, les atomes avec les moindres énergies se forment sur les îlots mais ceux avec des énergies plus élevées sont beaucoup plus mobiles et atteignent les sites encore vides sur les surfaces. Par contre pour le système Pt/Cu, la croissance 3D a pris un temps beaucoup plus large avant que celle de Frank-Van der Merve commence, ce qui a donné des lacunes plus grandes.

Les tableaux 1 et 3 montrent que le taux de recouvrement du système Pt/Cu est inférieur de 10% à celui du Pt/Pt pour les trois premières couches déposées. Ceci s'explique par la présence des plus grandes lacunes pour le Pt/Cu et aussi la différence des paramètres de maille entre atomes du substrat (Cu) et ceux des couches déposées (Pt). Le paramètre de maille du Cu étant de 3.61Å et celui du Pt de 3.92Å, alors les nombres d'atomes de platine qui remplissent entièrement une couche sont inférieurs à ceux du cuivre. Par conséquent, le taux de remplissage n'atteindra pas 100% même si la couche est entièrement remplie.

D'après les tableaux 2 et 4, pour la 1ère couche, la distance interatomique est de 2.38Å pour le Pt/Pt et 2.61Å pour le Pt/Cu : l'écart est donc de 0.23Å. Pour la 4ème couche, la distance interatomique est de 2.34Å pour le Pt/Pt et 2.38Å pour le Pt/Cu : l'écart est donc de 0.04Å. On constate que les écarts des valeurs des distances interatomiques, entre les deux systèmes diminuent lorsqu'on remonte vers la surface. La nature du substrat apporte des modifications sur les couches de platine. Mais au fur et à mesure que les couches augmentent, l'influence du substrat diminue.

Les figures 5 et 8 montre la présence des structures cubique à faces centrées (CFC) et hexagonale compacte (HCP) pour les deux systèmes. Ce fait est dû par le phénomène de reconstruction de surface. Les structures CFC(111) et HCP figurant parmi celles qui possèdent l'énergie de surface minimale.

5. CONCLUSION

Par la méthode de simulation de la Dynamique Moléculaire, nous avons pu étudier la croissance et les structures des couches de Platine sur les substrats de platine et cuivre orientés dans un plan (111). Le but était de comparer les résultats obtenus afin de déterminer si l'on peut utiliser un alliage du cuivre avec le platine plutôt que d'utiliser un objet en platine pur vu le prix de ce dernier.

Lors de cette étude, nous avons pu constater une différence entre les deux systèmes pour les premières couches déposées mais cette différence diminue après quelques dépôts de plus pour les mêmes paramètres initiaux. En d'autres termes, la simulation a montré que les atomes déposés sur le substrat cherchent d'abord à accorder leurs paramètres de mailles avec les atomes du substrat. Lorsqu'on s'éloigne de ce substrat, les atomes déposés commencent à adopter leurs propres paramètres de maille donc leurs propres structures. Ces couches platine sur un substrat en cuivre devraient alors avoir les mêmes propriétés de surface que leurs homologues sur un substrat en platine.

6. REFERENCES

1. Hariech S. Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD). *Mémoire de Magister en Physique. Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes, Université de Mentouri-Constantine, Algérie*. 2009 Mar ; p1 (Chap 1). Available on : http://archives.umc.edu.dz/bitstream/handle/123456789/10180/HAR5315.pdf?sequence=1
2. Jung W., Kim J.J., et Tuller H.L. Investigation of nanoporous platinum thin films fabricated by reactive sputtering: Application as micro-SOFC electrode. *Journal of Power Sources*. 2015 Feb; 275: 860-865.
3. Vaz A.R., Mira da Silva M., Leon J., Moshkalev S.A., et Swart J.W. Platinum thin films deposited on silicon oxide by focused ion beam: characterization and application. *Journal of materials science*. 2008 May; 43(10): 3429-3434.
4. Valet O., Doppelt P., Baumann P.K., Schumacher M., Balnois E., Bonnet F., et Guillon H. Study of platinum thin films deposited by MOCVD as electrodes for oxide applications. *Microelectronic engineering*. 2002 Oct; 64 (1-4): 457-463.
5. Aaltonen T., Ritala M., Sajavaara T., Keinonen J., et Leskelä M. Atomic layer deposition of platinum thin films. *Chemistry of Materials*. 2003 Apr; 15(9):1924-1928.
6. Viot P. Simulation numérique en physique statistique. *Cours de Master 2ème année « Physique théorique des systèmes complexes » et « Modélisation, statistique et algorithme des systèmes hors d'équilibre »*. 2016. p33 – 45 (Chap 3). Available on : disponible sur : https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00092945
7. Hadj-Kali M.K. Application de la simulation moléculaire pour le calcul des équilibres liquide-vapeur des nitriles et pour la prédiction des azéotropes. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France*. 2004. Available on : http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000122/
8. Daw M.S., Baskes M.I. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces and other defects in metals. *Physical Review B*. 1984 Jun; 29: 6443.
9. Zou W., Wadley H.N.G., Zhou X.W., Johnson R.A., and Brownell D. Surfactant-mediated growth of giant magnetoresistance multilayers. *Physical Review B*. 2001 Oct; 64: 174418.

Citer cet article: Dimbimalala, Randrianasoloharisoa, Heriniaina, Andrianaivontseheno, Fils, Lahatra Razafindramisa ETUDE PAR LA DYNAMIQUE MOLECULAIRE DE LA CROISSANCE DE COUCHES DE PLATINE. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences. 2020; 11(3): 165*-172.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/