



Revue des Matériaux & Energies Renouvelable

Journal home : <https://www.univ-relizane.dz>

ISSN : 2507-7554

E- ISSN : 2661-7595



Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone en milieu sulfurique par polyéthylène glycol

Open
Access

Tarik Attar^{1,2*}, Amal Benkhaled¹, Abbes Benchadli¹, Esma Choukchou-braham¹

¹ Laboratoire de ToxicMed, Université d'Abou Bekr Belkaid, B.P.119, Tlemcen, 13000, Algérie

² Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, P.O. Boîte 165 RP, Tlemcen, 13000, Algérie

RESUME

L'effet inhibiteur de polyéthylène glycol (PEG) sur la corrosion de l'acier au carbone en milieu H_2SO_4 0,5M a été réalisé par la méthode gravimétrique. L'influence de la concentration, la température, le temps d'immersion et le milieu corrosif sur l'efficacité d'inhibition de l'inhibiteur a été étudiée. L'efficacité inhibitrice du PEG atteint une valeur maximale de 71,38 % à 1×10^{-3} mol/L. L'adsorption de PEG à la surface de l'acier au carbone suit l'isotherme du modèle de Langmuir, et la valeur obtenue de l'énergie libre de Gibbs confirme la nature mixte de l'adsorption (chimique et physique). L'adsorption de cette molécule conduit à la formation d'une couche protectrice sur la surface de l'acier, ces résultats ont été confirmés par la microscopie électronique à balayage (MEB).

Article history:

Received 11 November 2021

Received in revised form 12 November 2021

Accepted 18 October 2021

Keys word: Corrosion ; Inhibition ; Acier au carbone ; Polyéthylène glycol ; Isotherme d'adsorption

Copyright © 2022 - All rights reserved

1. Introduction

L'acier est constitué d'au moins deux éléments, majoritairement le fer puis le carbone. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». En raison de la viabilité de l'acier, son coût élevé de production et d'installations, la plupart des industries ont adopté plusieurs mesures visant à prolonger la durée de vie de ce matériau précieux [1].

La corrosion des alliages et métaux est un phénomène universellement connu qui entraîne chaque année des pertes matérielles considérables pour l'industrie et la collectivité. La corrosion peut provoquer des dommages irréversibles à l'environnement et sur l'industrie pétrolière (les coûts de remplacement et l'arrêt d'installation pendant la réparation des structures et machines corrodées) et même des pertes en vie humaine puisqu'elle est susceptible d'entraîner des problèmes de santé (pollution, contamination,...). L'ampleur de la corrosion du métal dépend de la concentration et la nature de l'environnement agressif, la charge du métal et de sa nature, température du milieu, temps de contact et la présence ou l'absence d'inhibiteurs [2, 3]. L'utilisation des acides trouve une large application dans le domaine industriel, les principaux domaines d'applications étant le décapage ou le nettoyage et l'élimination de dépôts localisés (rouille, dépôts bactériens, tartre non uniformément réparti, etc...). Or, les solutions aqueuses acides constituent généralement des milieux corrosifs pour les matériaux métalliques [4]. Pour pallier ce phénomène indésirable, les inhibiteurs organiques dont le mode d'action résulte généralement de leur adsorption sur la surface du métal sont les plus fréquemment employés dont son action inhibitrice est liée à la formation d'une barrière plus ou moins continue, mais d'épaisseur finie, qui empêche l'accès de la solution au métal [5]. Les inhibiteurs présentent l'originalité d'être le seul moyen d'intervention à partir de l'environnement agressif, ce qui en fait une méthode de contrôle de la corrosion facile à mettre en œuvre et peu onéreuse, pour peu que le ou les produits utilisés soient d'un coût modéré [6]. De plus, il est important de connaître le mode d'action des molécules inhibitrices, leurs coûts, leurs limites d'application, leur toxicité, afin de pouvoir les utiliser avec une marge suffisante de

sécurité [7]. Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu [8, 9].

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'inhibition du polyéthylène glycol sur la corrosion de l'acier au carbone dans H_2SO_4 0,5 mol/L. Les effets de la concentration de l'inhibiteur, la nature du milieu agressif, de la température et du temps d'immersion sur la performance de l'inhibiteur ont été étudiés. Les paramètres thermodynamiques d'activation et d'adsorption ont été aussi calculés et discutés.

2. Partie expérimentale

2.1. Matériaux utilisés

Le matériau utilisé est un acier au carbone de composition: 0,37% C; 0,1261% Si; 0,023% Al; 0,016% S; 0,68% Mn; 0,16% Cu; 0,077% Cr; 0,059% Ni; 0,009% Co; 0,011% Ti et Fe le reste de la balance. La solution corrosive est une solution de l'acide sulfurique (H_2SO_4) 1 N, obtenue par dilution de l'acide concentré à 98 %, de marque Sigma-Aldrich, avec de l'eau bi-distillée. Le polyéthylène glycol 20000 testé comme inhibiteur est de marque Sigma-Aldrich.

2.2. Conditions expérimentales

Les essais gravimétriques ont été réalisés dans un bécher de 50 mL. Avant les mesures, les échantillons subissent un polissage au papier abrasif de granulométrie décroissante allant jusqu'au grade 1200 (une succession de papiers abrasif au carbure de silicium de granulométries 300, 400, 600, 800, 1000 et 1200 permettra d'obtenir de bons résultats). Ces échantillons sont ensuite rincés à l'eau bi-distillée, dégraissés par l'acétone et séchés à l'air ambiant avant utilisation. Chaque essai a été répété au moins trois fois afin de vérifier la reproductibilité des résultats.

2.3. Etude gravimétrique

Les mesures de perte en masse sont une première approche de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un métal dans une solution électrolytique. C'est une méthode simple, elle donne des informations très utiles à des prix relativement bas, elle ne nécessite pas un appareillage important et sans perturbation des systèmes. Les échantillons sont immergés dans H_2SO_4 0,5 mol/L, sans et avec addition de PEG à différentes concentrations. La valeur de l'efficacité inhibitrice (EI) trouvée est la moyenne de trois essais effectués dans les mêmes conditions pour chaque concentration. Elle est donnée par la relation (1) [9]:

$$EI (\%) = 100 \times (W_{Cor} - W_{Inh}) / W_{Cor} \quad (1)$$

Où W_{Cor} et W_{Inh} représentent respectivement les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier après immersion en absence et en présence de l'inhibiteur.

Le taux de recouvrement (θ) de la surface par les molécules de l'inhibiteur, peut être déterminé par la relation (2) :

$$\theta = EI (\%) / 100 \quad (2)$$

3. Résultat et discussions

3.1. Effet de la nature de l'acide sur la corrosion de l'acier au carbone

Les solutions acides sont largement utilisées en raison de leur nature fortement corrosive pour la plupart des métaux et des alliages, même à de faibles concentrations. Dans le but d'étudier l'effet de la nature de l'acide sur l'efficacité de l'inhibition de la corrosion, nous avons testé différents acides comme milieu corrosif: l'acide nitrique, l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique et l'acide perchlorique.

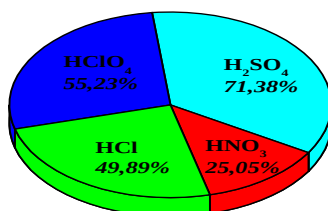


Figure 1. Variation de l'efficacité d'inhibition en fonction des différents milieux acides (1 N) pour l'acier au carbone (PEG 10^{-3} M pendant 2 h et à 293 K).

Les résultats expérimentaux de l'efficacité d'inhibition de la corrosion par rapport des milieux corrosifs ont été représentés graphiquement sur la figure 1. D'après ces résultats, la valeur obtenue montre clairement que l'efficacité inhibitrice de

l'acier au carbone en milieu d'acide sulfurique est plus importante par rapport aux autres acides. Les molécules inhibitrices interagissent fortement avec la surface du métal en présence d'ions sulfates en raison de sa faible capacité de coordination. Cependant, les ions chlorure, perchlorate et nitrate, se coordonnent avec la surface du métal, ce qui le rend plus faible pour adsorber les molécules inhibitrices. L'acide sulfurique qui a donné la meilleure efficacité sera utilisé comme un milieu agressif pour cette étude.

3.2. Effet de la température et la concentration du PEG

La température constitue en effet l'un des facteurs qui peuvent modifier simultanément le comportement des inhibiteurs et des substrats dans un milieu agressif donné [5]. L'augmentation de la température favoriserait ainsi la désorption de l'inhibiteur ainsi qu'une rapide dissolution des composés organiques ou des complexes formés, provoquant ainsi un affaiblissement de la résistance à la corrosion de l'acier [10]. Compte tenu de l'importance de ce facteur, nous avons effectué des tests de perte de masse de l'acier dans H_2SO_4 0,5M sans et avec addition de différente concentration de PEG allant de 1×10^{-5} à 5×10^{-3} mol/L, à différentes températures comprises entre 293 et 333 K. Les valeurs de l'efficacité inhibitrice du PEG, sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier en milieu H_2SO_4 0,5 M avec addition de PEG à différentes température.

C (mol/L)	Température (K)				
	293	303	313	323	333
1×10^{-5}	45,64	36,91	29,45	21,07	15,97
5×10^{-5}	51,87	47,77	36,12	29,57	24,07
5×10^{-4}	64,17	53,26	44,31	35,78	33,41
1×10^{-3}	71,38	65,44	57,79	48,61	40,11
5×10^{-3}	71,97	66,03	58,05	48,99	40,53

L'analyse des résultats trouvés, nous montre clairement que le polyéthylène glycol possède d'excellente propriété inhibitrice de la corrosion de l'acier en milieu H_2SO_4 . Nous remarquons aussi, que l'efficacité de la protection croît avec la concentration de l'inhibiteur et elle diminue avec l'augmentation de la température du milieu, et atteint une valeur maximale de 71,97 % à une concentration de 5×10^{-3} mol/L et à 293 K.

3.3. Effet de temps d'immersion

Le temps d'immersion est un autre paramètre important qui permet de vérifier l'effet inhibiteur sur les surfaces métalliques. Le suivi de l'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier à différents temps d'immersion dans le milieu agressif sans et avec addition de l'inhibiteur permet d'avoir des notions importantes sur la stabilité du film ainsi formé lors du phénomène d'inhibition [11]. Le tableau 2 regroupe les valeurs de la vitesse de corrosion (W) et du pourcentage de l'efficacité inhibitrice calculées par gravimétrie pour différents temps d'immersion et à une concentration de 1×10^{-3} mol/L en PEG.

Tableau 2. Effet du temps d'immersion sur la vitesse de corrosion de l'acier au carbone dans H_2SO_4 0,5 M sans et avec addition du PEG à 1×10^{-3} M et à 303 K

t (heures)	$W_{corr}(mg/h.cm^2)$	$W_{inh}(mg/h.cm^2)$	EI (%)
1	0,01010	0,00893	11,59
2	0,01858	0,00642	65,44
3	0,03574	0,01429	60,03
4	0,06659	0,02972	55,37
6	0,08741	0,04359	50,13
24	0,10057	0,05239	47,91

D'après le tableau 2, on peut conclure que l'efficacité d'inhibition augmente avec l'augmentation du temps d'immersion en raison de la stabilité de la couche adsorbée sur la surface de l'acier au carbone jusqu'à 2 heures. Cette augmentation est due à l'augmentation de la couverture de surface avec le temps jusqu'à deux heures d'immersion puis elle diminue après ce temps. La diminution de l'inhibition peut être attribuée à l'épuisement des molécules inhibitrices disponibles dans la solution en raison de la formation de la couche entre le métal et l'inhibiteur.

3.4. Paramètre thermodynamique d'activation

Nous avons procédé au tracé de la variation du logarithme de la vitesse de corrosion de l'acier dans H_2SO_4 sans et avec addition du PEG à différentes concentrations, en fonction de l'inverse de la température (fig. 2). Ceci nous a permis de calculer la valeur de l'énergie d'activation du processus de corrosion (E_a), à différentes températures, en l'absence et en présence de l'inhibiteur, selon la relation (3) d'Arrhenius [12, 13] :

$$W = k \times \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

où W est la vitesse de corrosion ($mg/cm^2.h$) ; k une constante (facteur préexponentiel) ; E_a l'énergie d'activation (kJ/mol) ; R la constante des gaz parfaits ($J/mol.K$) et T la température absolue (K).

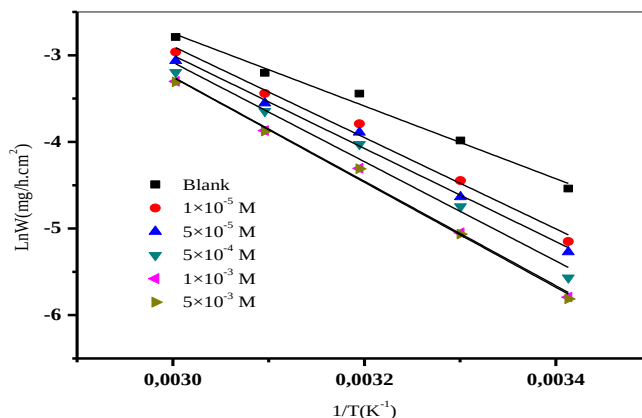


Figure 2. Variation de $\ln(W)$ en fonction de l'inverse de la température pour l'acier au carbone dans H_2SO_4 en l'absence et en présence de différentes concentrations du PEG.

Cette courbe montre que la variation $\ln(W) = f(1/T)$ est sensiblement linéaire et suit la loi d'Arrhénius aussi bien en l'absence qu'en présence de l'inhibiteur (les coefficients de corrélation sont supérieurs de 0,978). Les enthalpies d'activation ΔH_a et les entropies d'activation ΔS_a ont été obtenues en se servant de l'équation (4) [14] :

$$\ln(W/T) = [\ln(R/Nh) + \Delta S_a/R] - (\Delta H_a/RT) \quad (4)$$

où W est la vitesse de corrosion ($mg/cm^2.h$) ; T la température absolue (K) ; h la constante de Planck ; N le nombre d'avogadro ; ΔS_a l'entropie d'activation ; ΔH_a l'enthalpie d'activation (kJ/mol) et R la constante des gaz parfaits ($J/mol.K$).

La figure 3 illustre la variation de $\ln(W/T)$ en fonction de l'inverse de la température absolue, pour l'acier au carbone sans et avec addition du PEG à différente concentration. Les valeurs de l'enthalpie d'activation obtenues à partir de la pente des droites ($\Delta H_a/R$) sont reportées dans le tableau 3.

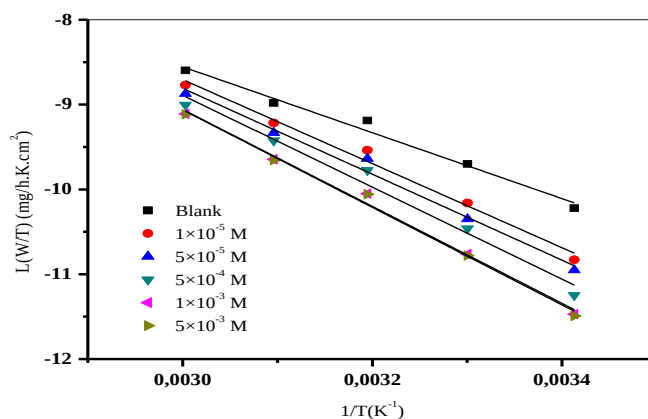


Figure 3. Variation de $\ln(W/T)$ en fonction de l'inverse de la température pour l'acier au carbone dans H_2SO_4 0,5M en l'absence et en présence du PEG à 1×10^{-3} mol/L.

De plus, les énergies libres d'activation peuvent également être calculées à partir de la relation (5) [15] :

$$\Delta G_a = \Delta H_a - T \Delta S_a \quad (5)$$

Le tableau 3 a révélé que les valeurs de E_a et ΔH_a augmentent en présence du PEG, ce qui indique une plus grande efficacité de protection. La différence entre la valeur moyenne de l'énergie et l'enthalpie d'activation ($E_a - \Delta H_a = RT$) était de 2,60 kJ/mol pour toutes les concentrations, ce qui était la valeur exacte du produit de la constante des gaz et de la température moyenne de l'expérience (313 K) [16]. Ce résultat a indiqué que le processus de corrosion était une réaction unimoléculaire avec l'évolution de l'hydrogène gazeux [16]. La plus faible valeur de l'énergie d'activation apparente du processus de corrosion en présence de l'inhibiteur par rapport à celle en absence d'inhibiteur est attribuée à son adsorption par chimisorption, sa physisorption est prononcée dans le cas contraire [5].

Tableau 3. Valeurs de E_a , ΔH_a , ΔS_a et ΔG_a de l'acier dans H_2SO_4 en l'absence et en présence du PEG à différentes concentrations.

C(mol/L)	R ²	E _a (kJ/mol)	R ²	ΔH _a (kJ/mol)	ΔS (J/K.mol)	ΔG _a (313K) (kJ/mol)
-	0,983	34,88	0,980	32,28	-171,79	86,05
1×10 ⁻⁵	0,987	43,80	0,985	41,20	-146,27	86,98
5×10 ⁻⁵	0,986	44,71	0,984	42,11	-144,40	87,31
5×10 ⁻⁴	0,978	47,65	0,975	45,05	-136,27	87,70
1×10 ⁻³	0,993	50,11	0,992	47,51	-130,29	88,29
5×10 ⁻³	0,992	50,41	0,991	47,81	-129,45	88,33

Dans cette étude, E_a des solutions inhibées est supérieure à celle de la solution non inhibée indiquant un mode d'adsorption physique. Les valeurs positives de ΔH_a indiquent que la formation du complexe activé est un processus endothermique. L'entropie d'activation en l'absence et en présence du PEG était importante et négative. ΔS_a < 0 implique que le complexe activé est l'étape déterminant de la vitesse, plutôt que l'étape de dissociation. Alors qu'en présence de l'inhibiteur, la valeur de l'entropie augmente, cela s'explique généralement par une augmentation du désordre lorsque les réactifs sont convertis en complexes activés. La valeur positive de l'énergie libre d'activation, signifie une réaction de corrosion non spontanée qui augmente avec la concentration croissante de l'inhibiteur.

3.5. Isotherme d'adsorption

Les isothermes d'adsorption permettent d'obtenir des informations sur l'interaction de l'inhibiteur avec la surface de l'électrode. D'autre part, l'adsorption des inhibiteurs sur l'interface métal/solution dépend de la charge du métal, de sa nature, de la structure chimique de l'inhibiteur et du type d'électrolyte [2, 17].

Deux types d'interaction sont principalement responsables de la liaison inhibiteur/surface métallique, il s'agit de la physisorption (formation de liaisons faibles) et la chimisorption. Le processus d'adsorption chimique met en jeu un transfert ou un partage d'électrons entre les molécules de l'inhibiteur et les orbitales "d" insaturées de la surface du métal permettant de former, respectivement, des liaisons datives et des liaisons covalentes. L'adsorption physique exige la présence d'une surface métallique électriquement chargée et des espèces chargées dans la solution. Généralement, les valeurs de ΔG_{ads} jusqu'à -20 kJ/mol sont cohérentes avec l'adsorption physique tandis que celles inférieures à -40 kJ/mol sont corrélées avec la chimisorption [18]. L'exploitation des résultats obtenus précédemment nous permet de déterminer, l'isotherme d'adsorption qui décrit le mieux les phénomènes d'adsorption impliqués dans le processus d'inhibition de la corrosion par le PEG.

Les valeurs obtenues du taux de recouvrement θ ont été utilisées pour tester différentes isothermes telles que l'isotherme d'adsorption de Langmuir, Frumkin ou Temkin. Les valeurs des paramètres thermodynamiques ont été calculées à partir du modèle de Langmuir [19] :

$$C/\theta = 1/K_{ads} + C \quad (6)$$

Les valeurs des constantes d'adsorption (K_{ads}) sont déterminées par extrapolation des droites obtenues à l'axe C/θ (figure 4).

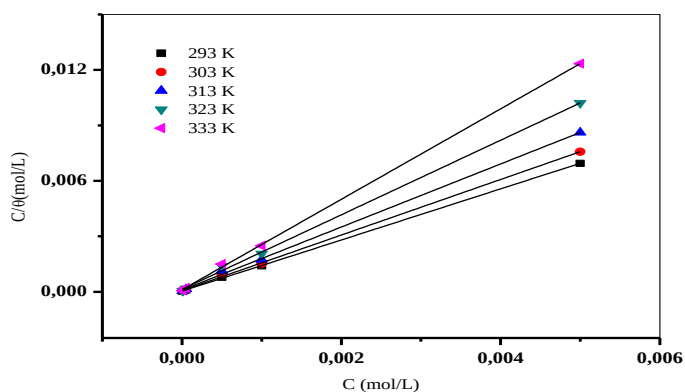


Figure 4. Modèles de l'isotherme d'adsorption de Langmuir

Les résultats obtenus montrent que seules les variations de C/θ en fonction de la concentration de l'inhibiteur C, sont linéaires (figure 4). Ces valeurs nous ont ensuite permis d'accéder aux valeurs de l'énergie libre standard d'adsorption (ΔG_{ads}) à partir de la relation (7) [20]:

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (7)$$

où R est la constante des gaz parfaits en J/mol.K et T la température en K. la valeur 55,5 est la concentration de l'eau en solution (mol.L⁻¹).

Le tableau 4 regroupe les valeurs des paramètres thermodynamiques d'adsorption, obtenues pour le PEG en utilisant les différentes isothermes d'adsorption. L'adsorption du PEG sur la surface de l'acier au carbone obéit donc à l'isotherme

d'adsorption de Langmuir. Les coefficients de corrélation (R^2) sont tous proches de 1 ($>0,998$), confirmant la validité du modèle choisi (Tableau 4). La valeur élevée de la constante d'équilibre à basse température reflète la grande capacité d'adsorption du PEG sur la surface de l'acier au carbone [17].

Tableau 4. Coefficients d'adsorption et paramètres thermodynamiques d'adsorption du PEG sur l'acier au carbone

T (K)	R^2	$K_{ads}(m^3/mol)$	$\Delta G_{ads}(kJ/mol)$
293	0,999	28,71	-34,78
303	0,999	16,03	-34,50
313	0,999	10,91	-34,64
323	0,998	7,73	-34,82
333	0,999	9,07	-36,34

Les valeurs négatives de l'énergie libre du PEG sont comprises entre -34,78 et -36,34 kJ/mol, ces signes négatifs indiquent la stabilité de la couche adsorbée sur la surface de l'acier au carbone et la spontanéité du processus d'adsorption. Les résultats obtenus de l'énergie libre se trouve entre -20 et -40 kJ/mol ce qui indique que le processus d'adsorption de cet inhibiteur implique à la fois des mécanismes de physisorption et de chimisorption.

3.6. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage a été utilisée pour étudier la morphologie de la surface des échantillons d'acier au carbone. La surface polie de l'électrode en acier au carbone avant immersion était uniforme (Figure 5.a). L'image de la surface de l'acier après 24 h d'immersion dans le H_2SO_4 seul est fortement endommagée par l'apparition de quelques piqûres et crevasses, ceci montre clairement que l'acier a subi une corrosion en absence des inhibiteurs (Figure 5.b). Cependant, les micrographies de l'échantillon d'acier au carbone inhibé (Figure 5.c) pour la même période d'intervalle de temps étaient relativement recouvertes d'un produit traduisant la présence d'une couche protectrice adsorbée sur la surface de l'acier au carbone qui est responsable de l'inhibition de la corrosion. On peut conclure que la morphologie de la surface de l'acier carbone est remarquablement améliorée en présence du PEG.

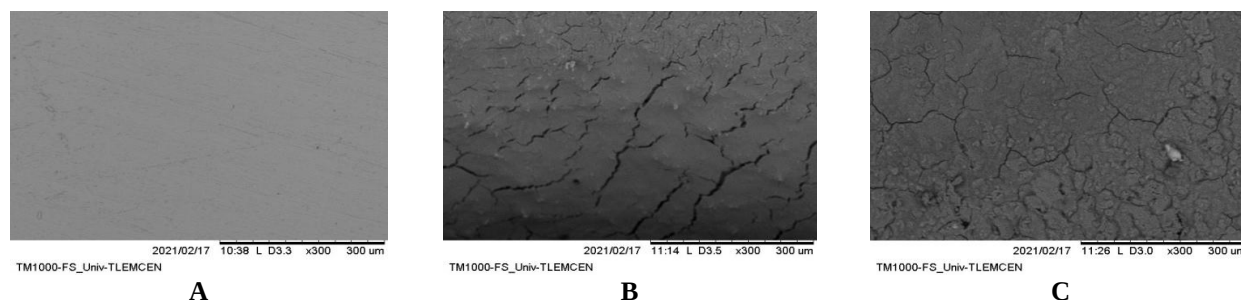


Figure 5. Images MEB des échantillons d'acier au carbone. (a) : avant l'immersion, (b) : après l'immersion dans H_2SO_4 0,5 mol/L, (c) : (b) avec l'ajout de 1×10^{-3} mol/L du PEG.

4. Conclusion

L'efficacité inhibitrice augmente avec la concentration du PEG et elle diminue avec l'augmentation de la température de l'électrolyte de 293 à 333 K. L'énergie d'activation apparente, déterminée à partir de la relation d'Arrhenius, est plus grande en présence du PEG. Cette augmentation peut être attribuée à une physisorption du PEG à la surface de l'acier et à un changement du mécanisme de dissolution de l'acier en présence d'inhibiteur. L'étude thermodynamique a montré que l'adsorption d'inhibiteur à la surface de l'acier est spontanée et suit le modèle de l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Cet inhibiteur présente un caractère d'inhibition mixte et agit par simple adsorption en bloquant les sites actifs de la surface de l'acier. Les analyses de surface effectuées par microscopie électronique à balayage montrent la présence d'une couche protectrice qui conduit à la diminution de la vitesse de corrosion.

REFERENCES

- [1]- Abeng F E, Ikpi M E, Anadebe V C and Emori W, 2020, Metolazone compound as corrosion inhibitor for api 5lx52 steel in hydrochloric acid solution, Bull. Chem. Soc. Ethiop, 34, 407
- [2]- Bouraoui M.M, Chettouh S, Chouchane T, Khellaf N, 2019, Inhibition Efficiency of cinnamon oil as a green corrosion inhibitor, Journal of Bio and Tribo-Corrosion, 5, 1–9
- [3]- Attar T, Larabi, 2014, The Inhibition effect of potassium iodide on the corrosion of pure iron in sulfuric acid, Adv. Chem, 2014, 1–5
- [4]- Rasheeda K, Vijaya D.P.A, Krishnaprasad P.A, Samshuddin S, 2018, Pyrimidine derivatives as potential corrosion

inhibitors for steel in acid medium—An overview, *Int. J. Corros. Scale Inhib*, 7, 48–61

- [5]- Attar T, Benchadli A, Messaoudi B, Benhadria N, Choukchou-Braham E, 2020, Experimental and Theoretical Studies of Eosin Y Dye as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Perchloric Acid Solution, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 15, 454-464
- [6]- Rahal HT, Abdel-Gaber AM, Younes G O, 2016, Inhibition of steel corrosion in nitric acid by sulfur containing compounds, *Chem. Eng. Commun*, 203, 435–445.
- [7]- Benchadli A, Attar T, Messaoudi B, Choukchou-Braham E, 2021, Polyvinylpyrrolidone as a corrosion inhibitor for carbon steel in a perchloric acid solution: effect of structural size, *Hung. J. Ind. Chem*, 49, 1-11
- [8]- Attar T, Larabi L, Harek Y, 2014, Inhibition effect of potassium iodide on the corrosion of carbon steel (XC 38) in acidic medium. *International Journal of Advanced Chemistry*, 2, 139-142
- [9]- Attar T, Benchadli A, Choukchou-Braham E, 2019, Corrosion inhibition of carbon steel in perchloric acid by potassium iodide, *Inter. J. Adv. Chem*, 7, 35-41
- [10]- Noor EA, Al-Moubaraki AH, 2008, Thermodynamic study of metal corrosion and inhibitor adsorption processes in mild steel/1-methyl-4[4'(-X)-styryl pyridinium iodides/hydrochloric acid systems. *Chem. Phys*, 110, 145-154
- [11]- Attar T, Larabi L, Harek Y, 2014, Corrosion inhibition of cold rolled steel in 0.5M H₂SO₄ by potassium iodide, *Der Pharma Chemica*, 6, 181-186
- [12]- Singh A, Ahamad I, Yadav D K, Singh V K, Quraishi M A, 2012, The effect of environmentally benign fruit extract of shahjan (*moringa oleifera*) on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution, *Chemical Engineering Communications*, 199, 63-77
- [13]- Benchadli A, Attar T, Choukchou-Braham E, 2018, Corrosion inhibition of carbon steel (XC 38) in hydrochloric acid by potassium iodide, *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, 5, 834-844
- [14]- Chakravarthy MP, Mohana KN, Pradeep Kumar CB, 2014, Corrosion inhibition effect and adsorption behaviour of nicotinamide derivatives on mild steel in hydrochloric acid solution, *Int. J. Ind. Chem*, 5, 1–21
- [15]- Khouri SJ, 2015, Titrimetric study of the solubility and dissociation of benzoic acid in water: effect of ionic strength and temperature, *Am. J. Analyt. Chem*, 6, 429–436
- [16]- Attar T, Benchadli A, Mellal T, Dali Youcef B and Choukchou-Braham E, 2021, Use of Experimental Designs to Evaluate the Influence of Methyl Green Dye as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Perchloric Acid. *M J Chem*, 23, 60-69.
- [17]- Benchadli A, Attar T, Choukchou-Braham E, 2019, Inhibition of Carbon Steel Corrosion in Perchloric Acid Solution by Povidone Iodine, *Journal of Physical Chemistry Research*, 7, 837-848.
- [18]- Doner A, Solmaz R, Ozcan M, Kardas G, 2011, Experimental and Theoretical Studies of Thiazoles as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Sulphuric Acid Solution, *Corros. Sci*, 53, 2902–2913
- [19]- Dagdag O, Safi Z, Hsissou R, Erramli H, ElBouchti M, Wazzan N, Guo L, Verma C, Ebenso E E and El Harfi A, 2019, Epoxy pre-polymers as new and effective materials for corrosion inhibition of carbon steel in acidic medium: computational and experimental studies, *Sci. Rep*, 9, 1-14
- [20]- Anyiam CK, Ogbobe O, Oguzie EE, 2020, Corrosion inhibition of galvanized steel in hydrochloric acid medium by a physically modified starch, *Sn. Appl. Sci*, 2, 520- 527.