



L'effet Inhibiteur d'Eugénol sur la corrosion du Laiton dans NaCl 3% (The Inhibition effect of Brass corrosion in NaCl 3% by Eugenol)

S. Tazi^{1*}, I. Raissouni¹, F. Chaoukat¹, D. Bouchta¹, A. Dahdouh²,
R. Elkhamlichi¹, H. Douhri¹

¹Laboratoire des Matériaux et Systèmes Interfaciaux. Equipe ERESI. Faculté des Sciences de Tétouan. Maroc

²Laboratoire de Chimie Organique Appliquée. Faculté des sciences de Tétouan. Maroc

Received 27 Oct 2015, Revised 09 Mar 2016, Accepted 18 Mar 2016

*Corresponding author. E-mail: saloua_doc@hotmail.fr

Abstract

In recent decades, Natural substances were intensively studied in order to determine their active compounds that have found its application in food and medical-sciences. The growing interest in such substances diversifies its applications including as anti-corrosion substances. Indeed, interesting results were obtained with essential oils as materials protection for metals, beside these natural inhibitors were recognized as not toxic elements and therefore do not present risks for environmental pollution compared to the organic inhibitors. In this work, we studied the effect of essential oil of clove (recognized in medical field by its analgesic and antiseptic properties) on the corrosion of brass (70%Cu/30%Zn) in NaCl 3%. The results obtained showed a improvement of alloy resistance against salt corrosion. In order to determine the most active component of this essential oil, that plays a key role in inhibiting corrosion of this alloy, the eugenol was extracted from the essential oil of clove. The effect of concentration, temperature and the immersion time were studied to measure the inhibiting capacity of eugenol by using polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

Keywords: corrosion, Brass (Cu-Zn), Inhibition, Eugenol, NaCl 3%.

Résumé

Les substances naturelles ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche en biologie afin de déterminer leurs effets actifs dans le domaine médical. Actuellement, les extraits des substances naturelles trouvent d'autres domaines d'application tel que la corrosion. En effet, d'une part des résultats intéressants ont été obtenus avec des huiles essentielles dans le domaine de protection des matériaux et d'autre part, ces inhibiteurs ont été reconnus comme des substances non toxiques et qui ne présentent pas de risque de pollution de l'environnement à comparer avec les inhibiteurs organiques. Dans un travail antérieur, nous avons étudié l'effet de l'huile essentielle du clou de girofle (reconnu dans le domaine médical par ses propriétés antalgique et antiseptiques) sur la corrosion du laiton (70% Cu / 30% Zn) dans un milieu NaCl 3%. Les résultats obtenus ont montré une très bonne amélioration de la résistance de l'alliage vis à vis de la corrosion saline. Dans l'objectif de déterminer le composant le plus actif des constituants de cette huile et qui contribue le plus à l'inhibition de la corrosion de cet alliage, nous avons procédé à l'extraction de l'Eugénol à partir de l'huile essentielle du clou de girofle. Ainsi, nous avons étudié l'effet de certains paramètres (la concentration, la température et le temps d'immersion) sur le pouvoir inhibiteur de l'Eugénol. Cette étude a été réalisée au moyen des méthodes électrochimiques stationnaires et transitoires. Les résultats obtenus montrent que, l'addition d'Eugénol au milieu corrosif ralentit considérablement le processus de corrosion et que l'efficacité inhibitrice ne fait qu'augmenter avec la concentration.

Mots clés: Corrosion, Laiton (Cu-Zn), inhibiteur, Eugénol, NaCl 3%.

1. Introduction

La corrosion est la détérioration d'un métal par une attaque ou une réaction chimique avec son environnement. C'est un problème constant et continu, souvent difficile à éliminer complètement. La corrosion affecte la plupart des secteurs industriels et peut coûter des milliards de dollars chaque année [1]. L'utilisation des inhibiteurs pour empêcher le processus de dissolution des métaux reste une application inévitable et très répandue. Les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui, lorsqu'elles sont ajoutées à de faibles concentrations dans des milieux corrosifs, diminuent ou empêchent la réaction du métal avec son environnement. Un inhibiteur peut fonctionner par adsorption sur la surface métallique entraînant ainsi la réduction de la vitesse corrosion par: (a) – une augmentation de la cinétique de la réaction anodique et / ou cathodique, (b) - une baisse de la vitesse de diffusion des réactifs à la surface des métaux, (c) – Une diminution de la résistance électrique de la surface métallique. Ce qui permet de définir le type de l'inhibiteur utilisé (anodique, cathodique ou mixte) [2].

Des efforts considérables sont déployés pour trouver les composés appropriés à employer comme inhibiteurs de corrosion dans divers milieux corrosifs afin d'arrêter ou de retarder au maximum l'attaque d'un métal. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les composés organiques azotés et ont démontré que ces inhibiteurs ont une bonne efficacité inhibitrice sur les différents matériaux et dans différents milieux corrosifs [3-6]. Cependant, ces composés présentent des effets toxiques sur l'organisme et empoisonnent l'environnement [7].

Par conséquent, en raison des préoccupations environnementales, les huiles et les extraits de plantes sont considérés de plus en plus comme une source d'inhibiteurs verts de corrosion [8-11]. Ils sont utilisés pour la protection des métaux dans l'environnement, afin de remplacer les produits chimiques toxiques utilisés actuellement [12].

Chaieb et al. ont examiné l'inhibition de la corrosion des extraits d'huile essentielle des clous de giroflier (L'eugénol et l'acétyl'eugénol), dans HCL 1M [12]. De tels résultats positifs ont inspiré notre équipe à examiner l'utilisation de L'eugénol comme inhibiteur de corrosion du laiton dans un milieu chloruré NaCl 3%. L'eugénol appartient à une classe des composés appelés les vanilloïdes, il est connu par ses propriétés antioxydants et les régimes contenant ces antioxydants peuvent réduire le risque des maladies telles que le cancer, la malaria cardiovasculaire, les effets de SIDA et de vieillissement [13,14].

La structure moléculaire de l'eugénol est donnée par la figure 1:

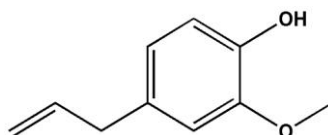


Figure 1: Structure moléculaire de l'eugénol

L'objectif de ce travail est d'étudier par polarisation électrochimique et méthodes de spectroscopie d'impédance électrochimie (EIS), l'effet de l'eugénol sur la corrosion de laiton dans la solution NaCl 3%. Ainsi, l'effet de la concentration, temps d'immersion et de la température ont été également étudiés.

2. Partie expérimentale

2.1. Hydrodistillation et procédé de l'extraction

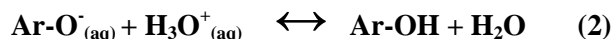
L'huile essentielle des clous de girofle contient principalement de l'eugénol (75 à 85 %), de l'acétate d'eugénol ou acétyl'eugénol (4 à 10 %), un peu d'hydrocarbures et de petites quantités de dérivés cétoniques et d'esters. Ainsi, pour préparer l'huile d'eugénol, on a procédé d'abord par l'extraction de l'huile des clous de girofles par hydrodistillation. Ensuite, l'huile est séchée par le sulfate de sodium anhydre et elle est stockée dans une fiole en verre à 4°C.

L'eugénol est un phénol qui se transforme en ion eugénolate sous l'action de la solution de soude. L'équation de la réaction entre l'eugénol et la soude est :



Avec $\text{Ar}=\text{C}_{10}\text{H}_{11}\text{O}$;

Ainsi, on a ajouté la soude NaOH à l'huile des clous de girofle pour récupérer l'eugénolate. L'eugénol est ensuite régénéré par action de la solution d'acide chlorhydrique concentré selon la réaction :



Pour vérifier la pureté de l'extrait obtenu nous avons fait l'analyse par chromatographie en phase gazeuse, le résultat obtenu est présenté dans la figure 2.

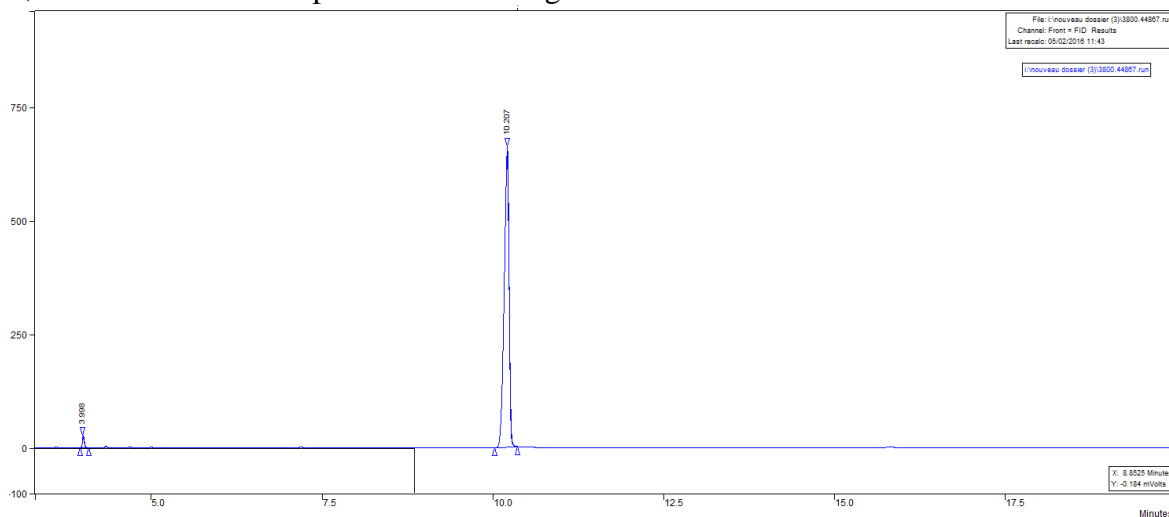


Figure 2 : chromatogramme de l'extrait d'eugénol

Le chromatogramme obtenu montre qu'il s'agit bien de l'eugénol pur.

2.2. Matériau utilisé

Le laiton est un alliage (Cu–Zn) utilisé généralement dans presque toutes les industries pour des buts fonctionnels ou esthétiques. C'est un alliage qui présente une bonne résistance à la corrosion notamment dans un milieu chloruré. Il existe plusieurs variétés du laiton (90Cu-10Zn, 70Cu-30Zn, 60Cu-40Zn). Lors de ce travail, on a utilisé le laiton 70Cu-30Zn. Pour enlever toutes contraintes induites dans le matériau lors de la préparation des pièces métalliques, on a fait subir aux échantillons un traitement thermique.

2.3. Cellule et électrodes utilisés

Les essais électrochimiques ont été effectués au moyen d'une cellule thermostatée à trois électrodes : l'électrode de travail est un disque, de l'alliage étudié (laiton), dont la surface est de l'ordre de 1,7 cm². L'électrode de référence est une électrode au calomel saturé. La contre électrode est un anneau de platine.

Avant chaque expérience, l'électrode de travail subit un polissage sur papier abrasif 600 suivi de 1000, pour avoir une surface lisse et brillante. Ensuite, elle est rincée par l'acétone et nettoyée par l'eau distillée.

2.4. Méthodes électrochimiques d'analyse

Les essais électrochimiques ont été effectués, en utilisant un potentiostat/galvanostat PGZ301 piloté par un ordinateur, muni du logiciel voltamaster.

2.4.1. Courbe de polarisation

L'électrode de travail a été immergée dans la solution pendant 30 minutes jusqu'à atteindre un potentiel d'équilibre. La courbe de polarisation a été enregistrée par polarisation de l'électrode de -400 mV à 100 mV dans

des conditions potentiodynamiques correspondant à une vitesse de balayage de 0.5mV/s. Cette vitesse permet de s'approcher, le plus possible, des conditions de l'état stationnaire du système étudié.

2.4.2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

La Spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode non-stationnaire (transitoire) qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui constituent le processus électrochimique global. Elle présente plusieurs avantages. Elle permet la détermination précise de la vitesse de corrosion même dans le cas où le métal est recouvert d'une couche protectrice. Elle permet aussi l'évaluation du taux d'inhibition, la caractérisation des différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation, piqûration,...) et l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique.

La représentation graphique d'une impédance $Z = Z_{Re} + jZ_{Im}$ dans le plan complexe pour différentes fréquences est appelée diagramme de Nyquist, en plaçant les valeurs Z_{Re} en abscisse et $-Z_{Im}$ en ordonnée. Pour cette représentation, il est nécessaire d'utiliser des repères orthonormés. Dans ce cas la fréquence n'apparaît qu'indirectement sur le diagramme. L'analyse en fréquence de l'impédance électrochimique permettra de différencier les divers phénomènes élémentaires en fonction de leur fréquence caractéristique.

Les phénomènes électrochimiques rapides (transfert de charge) sont sollicités dans le domaine des hautes fréquences, tandis que les phénomènes lents (diffusion, adsorption) se manifestent à basses fréquences [15].

3. Résultats et discussion

3.1. Effet de concentration

3.1.1. Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation cathodiques et anodiques du laiton dans NaCl 3% aérée, en absence et en présence d'eugénol à différentes concentrations sont présentées dans la figure 3.

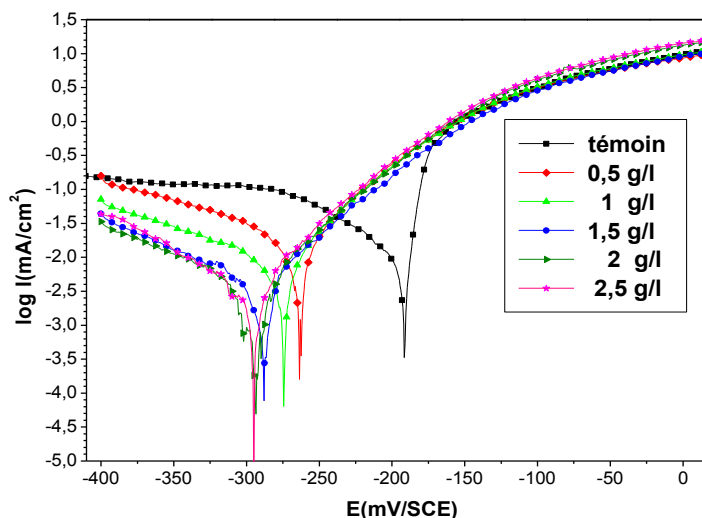


Figure3: Courbes de polarisation de laiton dans NaCl 3% à différentes concentrations d'eugénol.

Le tableau 1 regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation précédemment obtenues, la densité de courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), la pente de Tafel cathodique (bc), la pente de Tafel anodique (ba) ainsi que l'efficacité d'inhibition (E %) qui est définie par :

$$E(\%) = 1 - I_{\text{corr}} / I_{\text{corr}}^{\circ} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

I_{corr}° et I_{corr} sont les valeurs de densité de courant de corrosion avec et sans inhibiteur respectivement, déterminé par l'extrapolation des droites cathodiques de Tafel au potentiel de corrosion.

L'examen de la figure 3 montre que pour la courbe de témoin, le potentiel plus négatif que -300 mV présente un palier de diffusion. Ceci indique l'influence de transport de masse sur le processus cathodique. La réduction de l'oxygène dans la zone cathodique est sous contrôle d'un processus mixte (diffusion /activation) [16].

La densité de courant est obtenue par extrapolation de la courbe intensité-potentiel après correction de diffusion, à l'aide de relation suivante [17,18]:

$$1/I = 1/I^* + 1/I_L$$

I : Le courant mesuré, correspondant au processus mixte ;

I^* : Le courant corrigé de la diffusion ;

I_L : Le courant de palier de diffusion.

L'addition de l'eugénol déplace les courbes de polarisation vers des potentiels cathodiques. De plus on note que, l'augmentation de la concentration de ce dernier dans le milieu corrosif diminue la densité de courant cathodique, et que la forme globale des courbes cathodiques n'est presque modifiée. Ce qui indique que le processus cathodique ne change pas en fonction de la concentration de l'inhibiteur [19].

Le processus anodique est approximativement constant donc on peut dire que la présence d'eugénol n'a pas d'effet sur la branche anodique correspondant à la dissolution du métal. Ces résultats indiquent que l'eugénol agit essentiellement comme un inhibiteur cathodique.

Les résultats du tableau 1, montrent que la densité de courant de corrosion I_{corr} diminue considérablement avec l'augmentation de la concentration de l'eugénol, le potentiel de corrosion E_{corr} se déplace vers des valeurs plus négatives. Par conséquent, l'efficacité d'inhibition $E(\%)$ augmenté avec la concentration d'eugénol pour atteindre une valeur maximale de 82,47 % à 2,5 g/l. On peut constater qu'à partir de 2 g/l c'est l'efficacité reste presque constante due à un problème de miscibilité de l'eugénol dans NaCl 3%.

Tableau 1 : Paramètres électrochimiques de laiton à différentes concentrations d'eugénol dans NaCl 3% et l'efficacité correspondante d'inhibition .

Concentration (g/l)	E_{corr} (mV/SCE)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	b_a (mV/dec)	$-b_c$ (mV/dec)	$E(\%)$
témoin	-191	17,80	50	200	-
0,5	-263	12,10	55,55	178	32,02
1	-272	7,94	57,14	120	55,40
1,5	-287	3,98	58,33	116	77,60
2	-295	3,16	57,14	80	82,24
2,5	-293,3	3,12	57,14	100	82,47

3.1.2. La spectroscopie d'impédance électrochimique(SIE)

Les diagrammes d'impédance électrochimique tracés à un potentiel E égale à E_{corr} pour différentes concentrations, ont pour but de compléter la compréhension des mécanismes de corrosion et d'inhibition du laiton dans NaCl 3%.

Le diagramme de Nyquist du laiton immergé dans la solution NaCl 3% en l'absence et en présence de différentes concentrations d'eugénol après 30 minutes d'immersion sont présentés sur la figure 4.

Les valeurs des paramètres électrochimiques et l'efficacité d'inhibition $E_{\text{Ri}}(\%)$ pour différentes concentrations de l'eugénol obtenues par spectroscopie d'impédance électrochimique sont réunies dans le tableau 2. L'efficacité d'inhibition est calculée à partir des valeurs de la résistance de transfert de charge R_t selon la relation :

$$E_{Rt}(\%) = (R_t - R_t^0) / R_t \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

Où R_t et R_t^0 sont respectivement les valeurs de la résistance de transfert de charges de laiton avec et sans addition d'inhibiteur. La résistance de transfert de charge est calculée à partir de diamètre de la boucle capacitive. Les valeurs de la capacité de la double couche C_{dl} sont déterminées à partir de la relation suivante :

$$C_{dl} = 1 / (2\pi f_{max} R_t) \quad (\text{Eq.3})$$

Avec C_{dl} est la capacité de la double couche en ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$), f_{max} est la fréquence maximale (Hz) et R_t est la résistance de transfert de charge ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$).

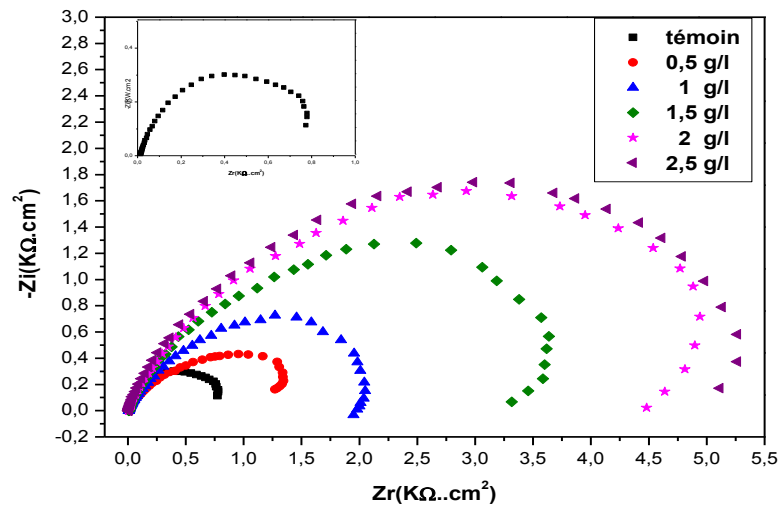


Figure 4 : Diagrammes de Nyquist obtenus pour le laiton dans NaCl 3% à différentes concentrations en eugénol.

Les diamètres des demi-boucles capacitives augmentent avec la concentration d'eugénol, indiquant que l'efficacité d'inhibition est fonction de la concentration de l'inhibiteur. Ces graphes sont constitués d'une seule boucle capacitive. Ce type de diagramme indique généralement que la réaction de corrosion est contrôlée par un processus de transfert de charges sur une électrode solide de surface hétérogène et irrégulière. La forme générale des diagrammes est très semblable pour tous les essais. Ceci indique que presque aucun changement du mécanisme de corrosion ne s'est produit en raison de l'addition d'inhibiteur [20,21].

Les valeurs des paramètres électrochimiques et de l'efficacité d'inhibition ($E\%$) pour différentes concentrations en inhibiteur obtenues par la spectroscopie d'impédance électrochimique sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Paramètres électrochimiques et efficacité d'inhibition de la corrosion de laiton dans NaCl 3% sans et avec addition de différentes concentrations en eugénol.

Concentration (g/l)	$R_t(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$F_{max}(\text{Hz})$	$C_{dl}(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E_{Rt}(\%)$
témoin	0,87	2,5	73,17	-
0,5	1,32	0,32	37,67	34,0
1	2,01	0,25	31,83	56,7
1,5	3,73	0,16	27,00	76,6
2	4,94	0,16	20,39	82,1
2,5	5,11	0,158	19,71	82,9

A partir des résultats d'impédance données dans le tableau 2, on conclut que les valeurs de la résistance de transfert de charge R_t augmente avec l'augmentation de la concentration de l'eugénol. Ce comportement est dû à l'adsorption d'inhibiteur sur l'alliage [22]. D'autre part, on note une augmentation de l'efficacité d'inhibition de **34%** pour 0,5g/l à **82,9%**, pour 2,5g/l. Les valeurs de la capacité de la double couche sont également réduites en présence de l'inhibiteur. Les résultats de l'effet de la concentration obtenus à partir de la technique de polarisation sont en bon accord avec ceux de la SIE avec une faible variation.

3.1. Effet de temps d'immersion

➤ Courbes de polarisation

l'effet de la durée d'immersion sur l'efficacité d'inhibition d'eugénol a été étudiée. Les courbes de polarisations du laiton obtenues dans NaCl 3% avec et sans addition de 2g/l de l'inhibiteur pour différents temps d'immersion allant de 1h jusqu'à 24 h sont présentées dans la figure 5. Les paramètres caractéristiques de ces courbes sont présentés dans le tableau 3.

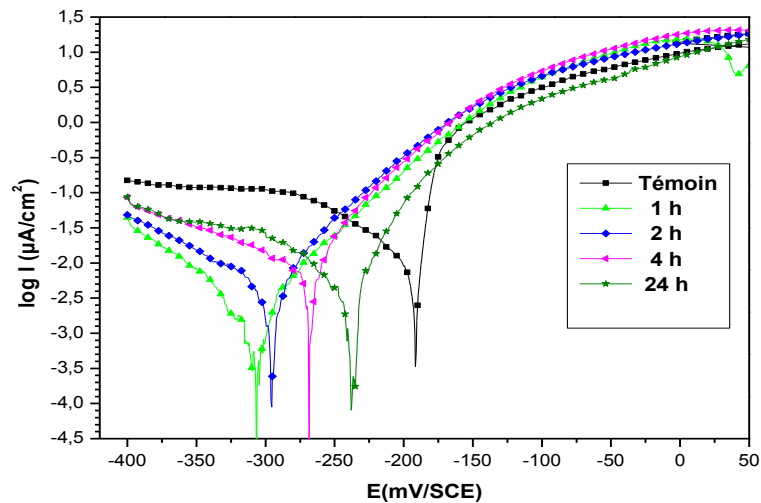


Figure 5: Courbes de polarisation de laiton dans NaCl 3% en absence et en présence de 2g/l d'eugénol à différents temps d'immersion.

Tableau 3 : Paramètres électrochimiques de laiton dans NaCl 3% +2g/l d'eugenol en fonction du temps d'immersion.

Durée d'immersion (h)	E_{corr} (mV/SCE)	I_{corr} (μ A/cm ²)	b_a (mV/dec)	$-b_c$ (mV/dec)	E (%)
témoin	-191	17,8	50	200	-
1	-299,7	2,51	58	87	85,90
2	-296,3	3,54	57	100	80,11
4	-268,4	6,30	57	120	64,60
24	-238,9	8,91	62	166	50,00

L'analyse de ces résultats, montre :

- Une légère augmentation du courant de corrosion I_{corr} en fonction du temps d'immersion. Cependant, il reste inférieur au courant de corrosion de témoin.

- Un déplacement du potentiel de corrosion E_{corr} vers les valeurs anodique quand le temps d'immersion passe de 1h à 24h.
- Une diminution de l'efficacité d'inhibition d'eugénol de 85,9% pour 1h d'immersion à 50% pour 24h d'immersion dans NaCl 3% en présence de 2 g/l d'eugénol.

L'ensemble de ces résultats confirment que, l'augmentation du temps d'immersion ne fait que réduire l'efficacité d'inhibition de l'eugénol.

➤ *La spectroscopie d'impédance électrochimique(SIE)*

La figure 6 illustre l'allure des diagrammes d'impédance électrochimique de laiton en présence de 2 g/l d'eugénol à différent temps d'immersion (représentation Nyquist).

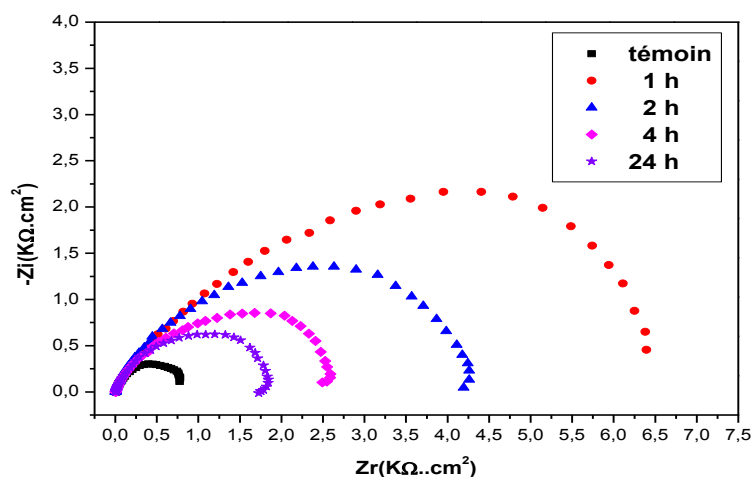


Figure 6 : Diagramme de Nyquist obtenus à différents temps d'immersion du laiton dans NaCl 3% en présence de 2 g/l d'eugénol.

On remarque que, quel que soit le temps d'immersion, les diagrammes d'impédance sont constitués d'une seule boucle capacitive. Ceci indique que la réaction de corrosion est contrôlée par un processus de transfert de charges. La figure 6 illustre clairement la diminution de la résistance de transfert de charge (R_t) en fonction de l'augmentation du temps d'immersion. Le tableau 4 regroupe les valeurs de la résistance de transfert de charge, de la capacité de la double couche du laiton et de l'efficacité d'inhibition à différents temps d'immersion.

Après analyse de ces résultats, on remarque que les valeurs de R_t diminuent en fonction du temps d'immersion. Cette évolution de R_t est due à l'augmentation de la vitesse de réaction de dissolution du métal et les valeurs de C_{dl} augmentent en fonction du temps d'immersion, ceci peut être expliqué par la désorption des molécules de la surface d'alliage [23].

Tableau 4 : Paramètres électrochimiques obtenus par S.I.E de laiton dans NaCl 3% + 2g/L d'eugénol en fonction du temps d'immersion.

Temps d'immersion (h)	$R_t(k\Omega.cm^2)$	$F_{\text{max}}(\text{Hz})$	$C_{dl}(\mu F.cm^{-2})$	$E_{R_t}(\%)$
témoin	0,87	2,5	73,17	-
1	6,39	0,20	12,45	86,39
2	4,26	0,25	14,94	79,57
4	2,55	0,31	19,75	65,88
24	1,84	0,40	21,62	52,71

3.3. Effet de la température :

➤ Étude de polarisation

L'influence de la température sur l'efficacité d'inhibition d'eugénol a également été étudiée par potentiométrie. Les courbes de polarisation obtenues dans NaCl 3% avec et sans addition de 2g/l d'eugénol pendant une heure d'immersion dans la gamme de température (5-35°C) sont présentées dans la figure 7 :

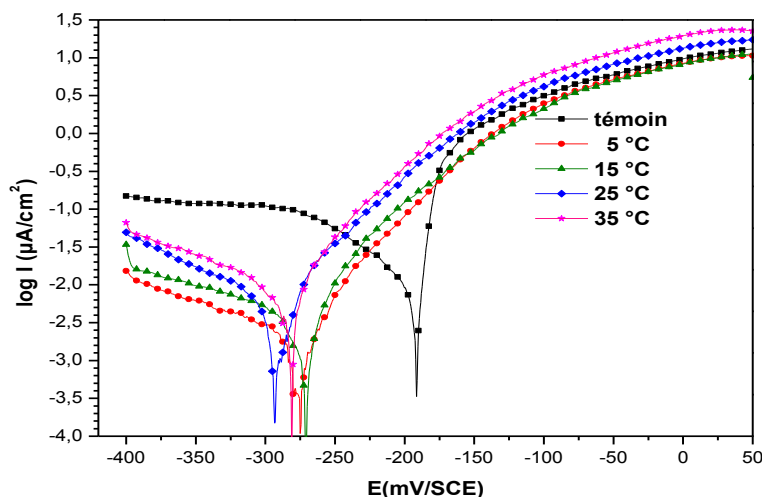


Figure 7 : Courbes de polarisation de laiton dans NaCl 3% en absence et en présence de 2g/l d'eugénol à différentes températures.

La figure 7 montre que la température a un grand effet sur la branche cathodique. De même on note que E_{corr} se déplace vers les valeurs cathodiques.

Les paramètres électrochimiques obtenus par exploitation de ces figures sont indiqués dans le tableau 5.

Tableau 5 : paramètres électrochimiques de laiton à différentes Température en présence et en absence d'eugénol dans NaCl 3%

Température (°C)	E_{corr} (mV/SCE)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	b_a (mV/dec)	$-b_c$ (mV/dec)	E (%)
Témoin	-191	17,8	50	200	-
5	-273,1	1,73	53	166	88,82
15	-270,5	2,89	60	133	83,76
25	-292,2	4,26	58	100	76,06
35	-280,2	7,07	56	125	60,28

L'analyse du tableau 5 montre que, dans la gamme de température 25-35°C la densité de courant de corrosion I_{corr} augmente et l'efficacité d'inhibition correspondante diminue de 76,06 % à 60,28%. Cette diminution peut être due à une désorption d'eugénol de la surface du laiton à 35°C [24,25]. Dans la gamme de température allant de 15°C à 5°C la densité du courant I_{corr} diminue et l'efficacité d'inhibition augmente de 83,76 % à 88,82% pour 5°C. Cependant, on remarque que I_{corr} reste relativement plus faible en présence de l'inhibiteur quelque soit la température. Ces résultats confirment que l'eugénol inhibe la corrosion dans l'intervalle de température étudié.

➤ La spectroscopie d'impédance électrochimique(SIE)

La figure 8 présente, à titre d'exemple les diagrammes de Nyquist obtenus après 1h d'immersion à différentes températures dans une solution NaCl 3% avec et sans addition de 2 g/l d'eugénol. Les diagrammes ont la même allure pour les différentes températures. On remarque la diminution de la température est accompagnée par une

augmentation de la taille de la boucle avec un écart plus notable entre 15°C et 5°C. Les différents paramètres obtenus à partir de ces boucles capacitives sont donnés dans le tableau 6.

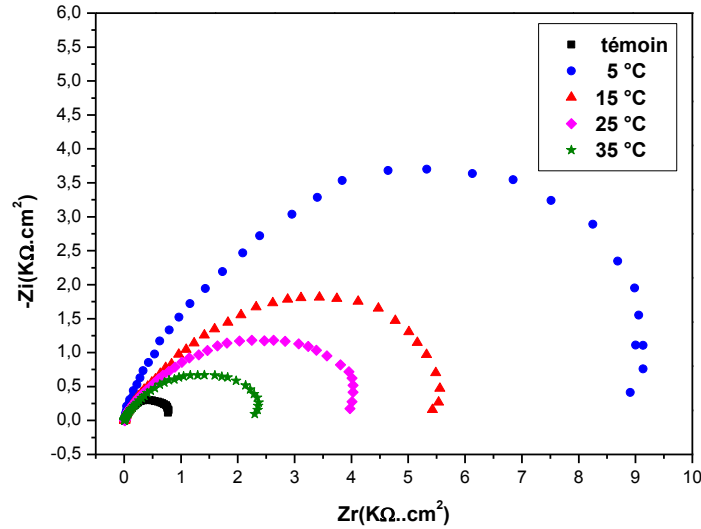


Figure 8 : Diagrammes de Nyquist obtenus pour le laiton dans NaCl 3% avec 2 g/L d'eugénol à différentes températures.

Tableau 6 : Paramètres électrochimiques obtenus pour le laiton dans NaCl 3% avec et sans addition de 2 g/l d'eugénol à différentes températures.

Température(°C)	$R_t(k\Omega.cm^2)$	$F_{max}(Hz)$	$C_{dl}(\mu F.cm^2)$	$E_{Rt}(\%)$
témoin	0,87	2,5	73,17	-
5	9,47	0,25	6,72	90,80
15	5,52	0,25	11,53	84,23
25	4,04	0,31	12,46	78,46
35	2,35	0,40	16,93	62,9

L'analyse des résultats, montre que :

- L'efficacité d'inhibition de l'eugénol diminue avec l'augmentation de la température.

- Les valeurs de R_t diminuent et les valeurs de C_{dl} augmentent avec la température. Toutefois les valeurs de R_t en présence d'inhibiteur restent toujours plus élevées que celles obtenues avec le témoin. L'eugénol reste donc un bon inhibiteur même à une température 35 °C ;

La diminution de l'efficacité d'inhibition E_{Rt} avec la température a été expliquée comme le résultat des interactions physiques de type Van Der Waals entre la surface métallique et l'inhibiteur [25]. Ces interactions sont très sensibles à l'agitation thermique et sont très faciles à rompre dès que celle-ci augmente. L'élévation de la température induit donc une désorption d'eugénol.

Conclusion

D'après les résultats expérimentaux des courbes de polarisation et de spectroscopie d'impédance électrochimique, on déduit que :

1. L'efficacité d'inhibition augmente avec l'augmentation de la concentration de l'eugénol pour atteindre une valeur maximale de 82,1%.
2. L'eugénol agit comme un inhibiteur purement cathodique.
3. L'étude de l'effet du temps d'immersion effectuée pour une concentration de 2 g/l a permis d'avoir des informations sur la stabilité de la couche protectrice formée sur la surface métallique. D'après ces résultats, l'efficacité d'inhibition de l'eugénol diminue avec l'augmentation du temps d'immersion.

4. Les essais concernant l'effet de la température ont été menés dans l'intervalle 5°C -35 °C. Ils ont montré que l'augmentation de la température affecte le pouvoir inhibiteur d'eugénol. En effet, l'efficacité de l'inhibiteur qui était de 90,8% à 5 °C devient 62,9% à 35 °C.

Références

1. Hussin M. H., Kassim M. J., *Mater. Chem. Phys.* 125 (2011) 461.
2. Ostovari A., Hoseinie S.M., Peikari M., Shadzadeh S.R., Hashemi S.J., *Corros. Sci.* 51 (2009) 1935.
3. Elouafi A., Hammouti B., Oudda H., Kertit S., Touzani R., Ramdani A., *Anti Corros. Meth. Mater.* 49 (2002) 199.
4. Dafali A., Hammouti B., Touzani R., Kertit S., Ramdani A., Elkacemi K., *Anti Corros. Meth. Mater.* 49 (2002) 96.
5. Salghi R., Bazzi L., Hammouti B., Zine E., Kertit S., El Issami S., Ait Eddi E., *Bull. Electrochem.* 17 (2001) 429.
6. Tourabi M., Nohair K., Nyassi A., Hammouti B., Chetouani A., Bentiss F., *Mor. J. Chem.* 1 (2013) 33.
7. Eddy N.O., Ebenso E.E., *Pure Appl. Chem.* 2 (2008) 46.
8. Gualdrón A.F., Becerra E.N., Peña D.Y., Gutiérrez J.C., Becerra H.Q., *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (2013) 143.
9. Zarrok H., Zarrouk A., Salghi R., Hammouti B., Chahboun N., Ben Hmamou D., Hammouchi R., Lakhlifi T., Rochdi A., El Assyry A., *Mor. J. Chem.* 2 (2014) 10.
10. El bribri A., El attari H., SINIT M., Tabyaoui M., *Mor. J. Chem.* 3 (2015) 286.
11. Lotfi N., Lgaz H., Belkhaouda M., Larouj M., Salghi R., Jodeh S., Oudda H., Hammouti B., *Arab. J. Chem. Envir. Res.* 1 (2014) 13.
12. Chaieb E., Bouyanzer A., Hammouti B., Benkaddour M., *Appl. Surf. Sci.* 246 (2005) 199.
13. Fujisawa S., Atsumi T., Kadoma Y., Sakagami H., *Toxicology* 177 (2002) 39.
14. Wadell L.W., Crooks H.N., Carmichael P.L., *Toxicological Sci.* 79 (2004) 38.
15. Kertit S., Hammouti B., *Appl. Surf. Sci.* 93 (1996) 59.
16. Mountassir Z., Srhiri A., *Corros. Sci.* 49, 1350–1361.
17. Dupart M., Dabosi F., Moran F., Rocher S., *Corrosion NACE*, 37 (1981) 262.
18. Bonnel A., Dabosi F., Deslouis C., Duprat M., Keddou M., Tribollet B., *J. Electrochem. Soc.* 130 (1983) 753.
19. Keleş H., Akça, S. *Arab. J. Chem* (2015).
20. Afia L., Salghi R., Bammou L., Bazzi Lh., Hammouti B., Bazzi L., *Acta Metall. Sin.* 25 (2012) 10.
21. Yurt A., Balaban A., UstÄun Kandemir S., Bereket G., Erk B., *Mater. Chem. Phys.* 85 (2004) 420.
22. Li X., Deng S., Fu H., *Prog. Org. Coat.* 67 (2010) 420.
23. Faustin M., Maciuk A., Salvin P., Roos C., Lebrini M., *Corros. Sci.* 92 (2015) 287-300.
24. Obot I.B., Obi-Egbedi N.O., *Curr. Appl. Phys.* 11 (2011) 382.
25. Ammar I.A., El Khorafi F.M., *Werkst. Korros.* 24 (1973) 702.

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>