



VALORISATION DE L'HUILE ESSENTIELLE DE L'ESPECE *CARUM CARVI L* PAR SON UTILISATION COMME INHIBITEUR CONTRE LA CORROSION DE L'ACIER AU CARBONE EN MILIEU ACIDE CHLORHYDRIQUE 1M

VALORIZATION OF THE ESSENTIAL OIL OF THE SPECIES *CARUM CARVI L* BY ITS USE AS INHIBITOR AGAINST THE CORROSION OF THE CARBON STEEL IN ACID MEDIUM HYDROCHLORIC ACID 1M

| Marieme Nehiri | El Mahjoub Aouane | Driss Hmouni | Mohammed Ouhssine | and | Brahim Bourkhiss * |

· Laboratoire d'Agro-physiologie, Biotechnologies, Environnement et Qualité | Faculté des sciences | Université Ibn Tofail, BP 133 | Kenitra |

| Received | 16 February 2018 |

| Accepted | 26 March 2018 |

| Published 30 March 2018 |

RESUME

Introduction : La corrosion est un problème qui affecte la plupart des secteurs industriels et peut causer des pertes énormes. Dans le cas des procédés industriels, les métaux sont exposés à l'action des acides utilisés dans les procédés pétrochimiques et lors du nettoyage dans plusieurs industries. Ces acides causent la dégradation des métaux, soit par des réactions chimiques soit électrochimiques. La plupart des composés synthétiques anticorrosifs présentent une bonne action anticorrosion, mais la majorité d'entre eux sont hautement toxiques pour les êtres humains et l'environnement. En raison de ces effets néfastes, on s'oriente de plus en plus vers les huiles essentielles et aux extraits de plantes qui sont considérés comme une source d'inhibiteurs de corrosion verts. **Objectif :** Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la protection de l'acier au carbone en milieu acide (HCl) 1M par ajout de l'huile essentielle des graines de carvi (*Carum carvi L*) de la région de Meknès (Maroc), à différentes concentrations : 0,5 g/l, 1g/l, 1,5g/l et 2g /l. **Matériel et Méthodes :** L'influence de la concentration et de la température sur les processus de corrosion en l'absence et en présence de l'inhibiteur a été étudiée par des mesures de la perte de masse. Egalement, une étude électrochimique sur le pouvoir de cet inhibiteur a été réalisée en utilisant les courbes de polarisation potentiodynamiques et la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE). **Résultats :** Les résultats de cette étude montrent que l'huile essentielle des graines de carvi (*Carum carvi L*) peut ralentir, voire freiner par un processus d'inhibition, la corrosion en milieu acide (acide chlorhydrique), de l'acier. Le pourcentage d'inhibition de la corrosion obtenu est compris entre 86% et 94%. Il est à noter que l'inhibition maximale est atteinte avec la concentration 1g /l d'huile essentielle. **Conclusion :** Cette étude confirme le fort potentiel anticorrosif de l'huile essentielle de *Carum Carvi L*. Nous envisageons dans un avenir proche de procéder au fractionnement de cette huile essentielle sur colonne afin d'isoler les molécules à l'origine de cette activité inhibitrice.

Mots-clés : Huile essentielle, *Carum carvi L*. Meknès (Maroc), Corrosion, Inhibiteur, Acide chlorhydrique, Technique électrochimique.

ABSTRACT

Introduction: Corrosion is a problem that affects most industrial sectors and can cause huge losses. In the case of industrial processes, metals are exposed to the action of acids used in petrochemical processes and during cleaning in several industries. These acids cause the degradation of metals, either by chemical or electrochemical reactions. Most synthetic anticorrosive compounds have a good anticorrosion action, but most of them are highly toxic to humans and the environment. Due to these adverse effects, there is a growing focus on essential oils and plant extracts that are considered a source of green corrosion inhibitors. **Objective :** In this work, we are interested in the study of the protection of carbon steel in acid medium (HCl) 1M by adding the essential oil of caraway seeds (*Carum carvi L*) from the region of Meknes (Morocco), at different concentrations: 0.5 g / l, 1 g / l, 1.5 g / l and 2 g / l. **Materials and methods:** The influence of concentration and temperature on corrosion processes in the absence and in the presence of the inhibitor has been studied by mass loss measurements. Also, an electrochemical study on the potency of this inhibitor was performed using potentiodynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). **Results:** The results of this study show that the essential oil of caraway seeds (*Carum carvi L*) can slow or even slow down by a process of inhibition of acid corrosion (hydrochloric acid) of steel. The percentage of corrosion inhibition obtained is between 86% and 94%. It should be noted that the maximum inhibition is reached with the concentration 1 g / l of essential oil. **Conclusion:** This study confirms the strong anticorrosive potential of the *Carum Carvi L* essential oil. In the near future, we plan to fractionate this essential oil on a column in order to isolate the molecules at the origin of the inhibitory activity present in the essential oil of the seeds of *Carum Carvi L*. **Keywords:** Essential oil, *Carum carvi L*. Meknes (Morocco), Corrosion, Inhibitor, Hydrochloric acid, Electrochemical technique.

1. INTRODUCTION

Selon la norme ISO 8044 [1], la corrosion peut être définie comme un ensemble d'interactions entre un métal et son environnement conduisant à des changements dans les propriétés du métal aboutissant à une altération significative de la fonction du métal. La corrosion affecte la plupart des secteurs industriels et peut coûter des milliards de dollars

chaque année [2]; par exemple dans le cas des procédés industriels les métaux sont exposés à l'action des acides qui agissent comme agents corrosifs. Ces acides jouent un rôle important dans l'industrie, surtout dans le raffinage du pétrole brut, le décapage à l'acide, le nettoyage industriel, le détartrage acide et aussi dans les procédés pétrochimiques [3,4].

L'acide chlorhydrique est l'un des agents les plus largement utilisés dans le secteur industriel. Cet acide cause la dégradation des métaux, soit par des réactions chimiques ou électrochimiques. Il existe plusieurs méthodes pour protéger les métaux de la corrosion en milieu, comme l'utilisation d'une barrière de protection, la galvanisation, la protection cathodique, l'utilisation des solutions antirouilles ou des inhibiteurs de corrosion. Ces derniers 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 [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

La plupart des composés synthétiques présentent une bonne action anticorrosion, mais la majorité d'entre eux sont hautement toxiques pour les êtres humains et l'environnement. En effet, ces inhibiteurs peuvent causer des dommages temporaires ou permanents pour certains organes tels que les reins ou le foie et peuvent même perturber le système enzymatique dans le corps [13].

Par conséquent, depuis quelques années un intérêt tout particulier a été apporté à l'activité anticorrosive des huiles essentielles du fait de leur caractère non toxique et de leur bonne biodégradabilité. Les pouvoirs inhibiteurs de ces huiles essentielles ont été très souvent déterminés en présence d'acide chlorhydrique comme solution corrosive [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

A notre connaissance, peu de travaux se sont intéressés à l'étude de l'activité anticorrosive de l'huile essentielle extraite des graines de l'espèce *carum carvi L* [22, 23]. Ainsi, l'objectif de ce travail est d'étudier par polarisation électrochimique et méthodes de spectroscopie d'impédance électrochimie (EIS), l'effet inhibiteur de l'huile essentielle de cette essence contre la corrosion de l'acier au carbone en milieu acide Chlorhydrique 1M. Ainsi, l'effet de la concentration et de la température ont été également étudiés.

2. MATERIELS AND METHODES

2.1 Matériau

Le matériau testé dans cette étude est un acier ordinaire dont la composition chimique est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Teneur en masse des impuretés présentes dans l'acier ordinaire étudié.

Eléments	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	V	W	Fe
Teneur %	0.11	0.24	0.47	0.12	0.02	0.1	0.03	<0.0012	0.14	<0.003	0.06	98.7

Les teneurs en élément normaux d'élaboration Mn, Si, Cr, Mo, Ni, Al, Cu et W sont relativement faibles (< 5 %). Il s'agit d'un acier non allié.

Le matériau a été découpé en plaques de dimensions 4 cm x 1 cm x 0.25 cm. Pour obtenir des résultats fiables et reproductibles, chaque plaque subit avant chaque essai un polissage de la surface au papier abrasif de granulométrie de plus en plus fines : 1200 / 800 / 600 / 360 / 220 / 120 et avant d'être trempée dans la solution corrosive, elle est rincée à l'eau distillée, dégraissée dans l'acétone et enfin séchée à l'air pulsé.

2.2 Milieu corrosif :

Le milieu corrosif est une solution acide HCl 1M préparée par dilution avec de l'eau distillée d'une solution commerciale d'acide chlorhydrique concentrée de densité 1.19, de masse molaire 36.46 g/mol et de pourcentage massique 37 %.

2.3 Extraction des huiles essentielles :

L'huile essentielle a été extraite des graines de *Carum carvi L* de la région du Meknès, par hydro distillation à l'aide d'un appareil de type Clevenger au Laboratoire d'Agro-physiologie, Biotechnologie, Environnement et Qualité, Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail (Kénitra).

2.4. Tests électrochimiques :

Les expériences électrochimiques (par la méthode stationnaire ou transitoire) ont été effectuées dans une cellule à 3 électrodes liée à un Potentiostat, Radiometer Analytical type PGZ 100 associé au logiciel (Volta Master 4), les conditions expérimentales adoptées dans cette étude sont les suivantes :

- L'électrode de travail est une électrode en acier au carbone de surface 1cm² ;
- L'électrode de référence est une électrode au calomel saturé (ESC), la contre électrode en platine de grande surface.

Les courbes Intensité-Potentiel sont obtenues en mode potentiodynamique en utilisant la méthode de Tafel, à faible vitesse de balayage : 1mV/s. Cette valeur de la vitesse de balayage permet d'une part d'avoir une approche valable de l'état stationnaire et d'autre part elle épargne la modification du milieu corrosif et l'éventuelle détérioration de la surface de l'électrode de travail. Le domaine du potentiel exploré est de -750mV à -100mV pour que la branche cathodique corresponde au comportement du métal non oxydé. Tous les potentiels sont mesurés par rapport à l'électrode au calomel saturé (E.C.S).

Tous les essais ont été effectués à température ambiante et sous agitation mécanique douce avec une vitesse de balayage de 1mV/s. Les mesures d'impédance sont effectuées après une demi-heure d'immersion au milieu corrosif, l'amplitude de la tension sinusoïdale appliquée au potentiel d'abandon est de 1mV à des fréquences comprises entre 100KHz et 10mHz.

Dans le cadre de cette étude, l'inhibiteur est ajouté dans une gamme de concentration comprise entre 0.5 g/l et 2g/l en milieu acide chlorhydrique (HCl 1M). Tous les essais ont été effectués à la température ambiante. Pour pouvoir mener une étude comparative fiable, toutes les solutions ont été préparées dans les mêmes conditions.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Effet de la concentration

3.1.1 Courbes de polarisation (méthode électrochimique stationnaire) : L'efficacité inhibitrice a été déterminée à l'aide d'une méthode électrochimique basée sur l'exploitation des courbes courant-tension stationnaire en mode potentiodynamique dans le domaine anodique et cathodique.

La figure 1 ci-dessous représente les courbes de polarisation cathodique et anodique de l'acier au carbone, dans un milieu HCl 1M, sans et avec inhibiteur à différentes concentrations, les paramètres électrochimiques tirés de ces courbes sont donnés dans le tableau 3.

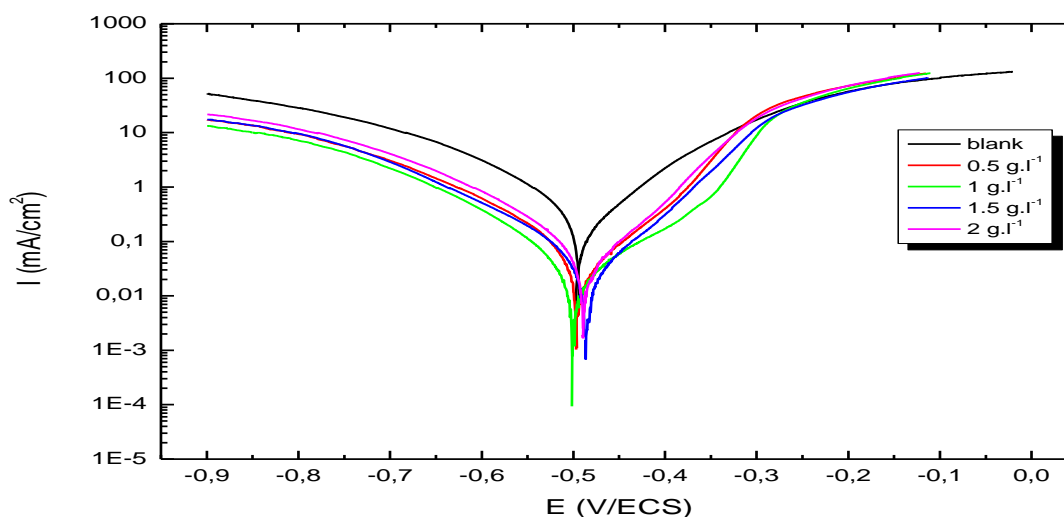


Figure 1 : Courbes de de polarisation obtenues pour l'acier ordinaire immergé dans la solution corrosive aux différentes concentrations en inhibiteur.

L'efficacité inhibitrice E_I est alors évaluée par la relation ;

$$E_I \% = \frac{i_{corr} - i_{corr/inh}}{i_{corr}} \times 100 \quad (1)$$

Avec i_{corr} et $i_{corr/inh}$ sont respectivement les valeurs des densités de courant de corrosion sans et avec inhibiteur.

Tableau 2 : Les paramètres obtenus à partir des courbes courant-tension à différentes concentrations en inhibiteur.

[C](g/l)	E_{corr} (mV/Esc)	I_{corr} (μ A/cm ²)	b_c (mv/dec)
Témoin	-483	467	-92
0.5	-485.3	59	-86
1	-488.9	25	-87
1.5	-471.48	42	-80

L'analyse de ces résultats permet de faire les remarques suivantes :

- Les deux réactions anodique et cathodique de la corrosion ont été inhibées par l'ajout de l'inhibiteur HE en milieu HCl 1M. Le ralentissement de la réaction cathodique est plus marqué que celui de la réaction anodique.

Ce qui suggère que l'addition de l'inhibiteur réduit la dissolution anodique ainsi que la réaction de décharge cathodique du proton H+.

- L'ajout de l'inhibiteur HE à différentes concentrations ne modifie pas les valeurs du potentiel de corrosion (E_{corr}).
- Au voisinage d' E_{corr} , une diminution sensible de la densité de courant est observée au-delà de 0,5 g/l. Ce phénomène suggère la formation d'un film protecteur à la surface de l'électrode.
- L'examen des branches cathodiques des courbes de polarisation montre qu'elles se présentent sous forme de droites de Tafel indiquant que la réaction de décharge du proton H+ est contrôlée par une cinétique d'activation pure.
- L'examen des branches anodiques des courbes de polarisation montre que le mode d'inhibition dépend du potentiel de l'électrode. En effet, pour une surtension supérieure à -0,3 V/AgCl, la présence de l'inhibiteur ne modifie pas les courbes I-E anodique, ce qui suggère la désorption de l'inhibiteur P et par suite la dissolution domine la réaction anodique.
- L'inhibiteur est plus efficace à la concentration 1 g/l.

3.1.2 Mesures de spectroscopie d'impédance électrochimique (méthode transitoire) : Pour mieux comprendre le mécanisme d'interaction entre la surface de l'électrode et l'inhibiteur, nous avons utilisé les mesures spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE). Ces mesures ont été réalisées en mode potentiodynamique au potentiel de corrosion E_{corr} en milieu HCl 1M à différents concentrations d'HE après 30 min d'immersion. La figure 2 montre les diagrammes de Nyquist à différentes concentrations. Les paramètres électrochimiques issus des diagrammes de la figure 2 sont consignés dans le tableau 3.

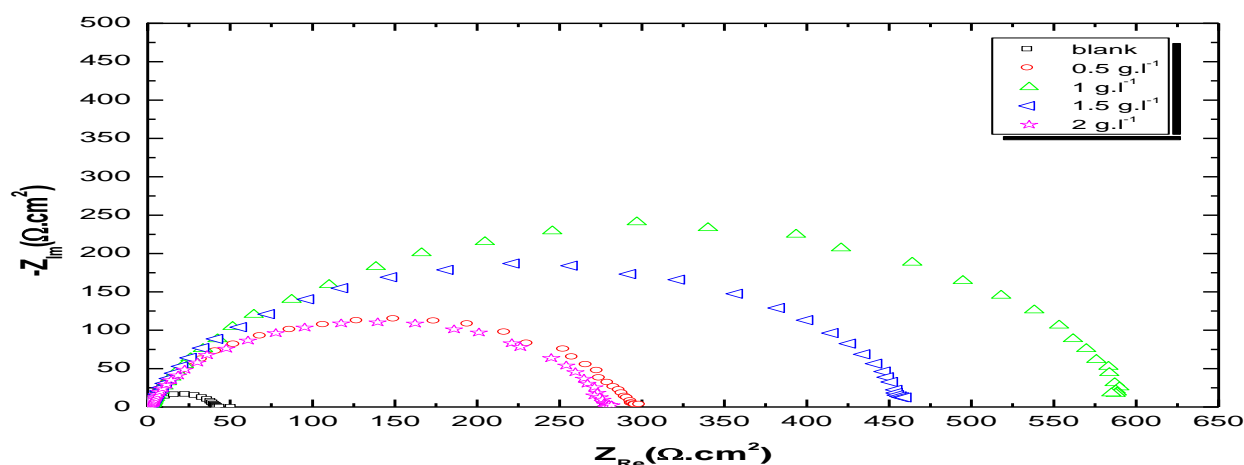


Figure 2 : Diagrammes d'impédance électrochimique à circuit ouvert après 30 min d'immersion de l'acier au carbone dans HCl 1 M à différentes concentrations de HE à une T = 298°K.

L'efficacité inhibitrice est calculée à partir de la résistance de transfert de charge selon la relation suivante :

$$E_{R_i} \% = \frac{R_{t/inh} - R_t}{R_{t/inh}} \times 100 \quad (2)$$

Avec R_t et $R_{t/inh}$ sont respectivement les valeurs de la résistance de transfert de charge avec et sans inhibiteur.

Tableau 3 : Paramètres d'impédance électrochimique de l'acier au carbone dans milieu HCl 1M en absence et en présence de l'inhibiteur à différents concentration à T ambiante.

[C](ppm)	R_{ct} (Ω.cm ²)	C_d (μF/cm ²)	E(%)
Témoin	40	294	
0.5	300	43.3	87
1	598	33	93.3
1.5	459	38	91.3
2	277	46	85,6

D'après les résultats ci-dessus on remarque que :

- La présence d'une seule boucle capacitive pour tous les diagrammes d'impédance indique la formation d'une couche protectrice à la surface du métal conduisant à l'inhibition de la corrosion. Cette boucle capacitive est généralement attribuée au processus de transfert de charge électronique sur une surface inhomogène [24, 25].
- Les valeurs de la résistance de transfert de charge deviennent plus importantes avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur, parallèlement Le diamètre de la boucle capacitive dans le plan de Nyquist

augmente avec l'augmentation de la concentration d'HE. L'efficacité inhibitrice augmente et atteint une valeur maximale de 93.3 % à 1 g/l.

- La capacité de la double couche diminue avec l'augmentation de la concentration de HE est atteint une valeur minimale. Cette diminution peut être interprétée par une diminution de la surface active du métal qui est due à l'adsorption des molécules organiques d'HE à la surface de l'acier ce qui conduit à une augmentation de l'efficacité.
- La capacité C_{dc} est donnée par :

$$C_{dc} = \epsilon_r \epsilon_o S / \delta \tag{3}$$

Avec ϵ_o : permittivité électrique du vide ($\epsilon_o = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F. m⁻¹)

ϵ_r : permittivité électrique relative du film.

S : la surface de l'électrode.

δ : l'épaisseur de la couche de protection.

La diminution de C_{dc} résulte donc d'une diminution de la constante diélectrique ϵ_r et / ou une augmentation de l'épaisseur δ de la double couche électrique et suggère que HE agit par adsorption à la surface de l'acier doux à l'interface métal/solution.

3.2 Effet de la température

3.2.1 Courbes de polarisation : En général, la température a un effet important sur les phénomènes de corrosion : la vitesse de corrosion augmente lorsque la température augmente, et cette augmentation de température induit, de fait, des changements sur l'action des inhibiteurs [26].

Etant donné l'importance de ce facteur, nous avons effectué des essais de tracé des courbes de polarisation pour l'interface d'acier ordinaire / HCl 1M sans (témoin) et avec ajout de l'inhibiteur HE à la concentration 1g/l aux températures 25°C, 35 °C, 45°C et 55°C. Nous avons choisi la concentration 1g/l des inhibiteurs car la valeur de l'efficacité est maximale à cette concentration.

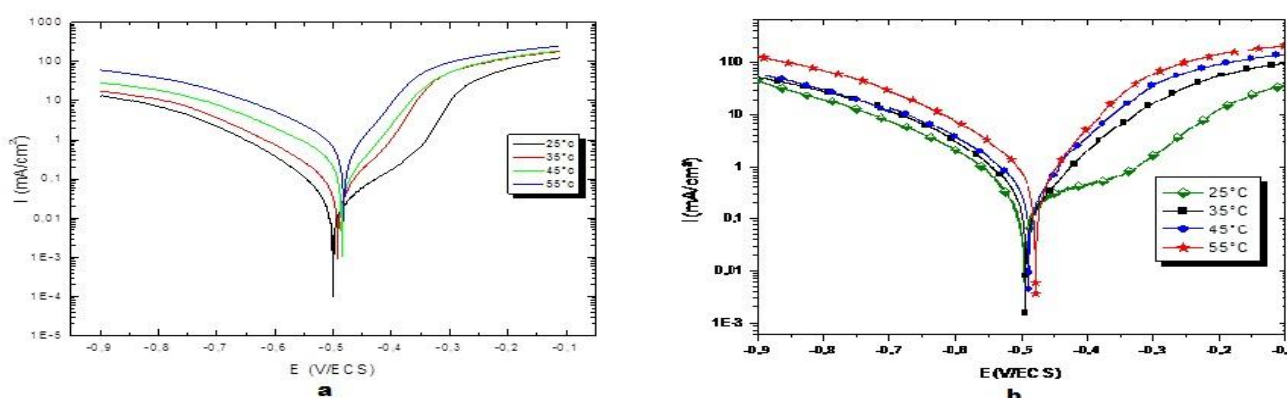


Figure 3 : Courbes de polarisation stationnaire à différentes températures relatives au comportement de l'acier dans HCl 1M avec 1g/l d'inhibiteur (a) et sans inhibiteur (b).

Les paramètres électrochimiques et les efficacités inhibitrices correspondants sont rassemblés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Evolution des paramètres électrochimiques de l'acier ordinaire dans HCl 1M en fonction de la température en absence et en présence de l'inhibiteur à la concentration de 1g/l.

T(K)	E_{corr} (mv/AgCl)		I_{corr} (mA/cm ²)		E%
	Témoin	inhibiteur	Témoin	Inhibiteur	
298	-498	-488.9	0.467	0.025	94
308	-491	-475.02	0.961	0.085	91
318	-475	-480.64	2.42	0.227	88
328	-465	-479.15	3.1	0.577	81

L'analyse de la figure 3 et du tableau 4 permet de relever les constatations suivantes :

- En présence de l'inhibiteur HE, l'efficacité inhibitrice diminue légèrement avec l'augmentation de la température ;
- Les densités de courant augmentent avec l'accroissement de la température de 25 à 55°C, les courbes dans la partie cathodique sont parallèles, indiquant que la réduction des ions H⁺ à la surface de l'acier se fait selon le même mécanisme d'activation pure dans tout le domaine de température.

3.2.2 Les paramètres thermodynamiques : Les variations de $\ln(I_{corr})$ dans HCl 1 M contenant différentes concentrations *Carum carvi L* utilisé avec l'inverse de la température absolue sont présentées dans la figure 4. Les lignes

droites avec des coefficients de corrélation proches de 1 sont obtenues. Cependant, le phénomène d'adsorption a été expliqué avec succès par le paramètre thermodynamique. Le modèle cinétique est un autre outil utile pour expliquer le mécanisme d'inhibition de la corrosion de l'inhibiteur. Les paramètres d'activation du processus de corrosion ont été calculés à partir de l'équation d'Arrhenius :

$$\frac{1}{R_{ct}} = \frac{RT}{Nh} \exp\left(\frac{\Delta S_a^*}{R}\right) \exp\left(\frac{\Delta H_a^*}{RT}\right) \tag{4}$$

Avec :

h : La constante de Planck.

N : Le nombre d'Avogadro.

R : La constante universelle des gaz.

ΔH_a^* : L'enthalpie de l'activation.

ΔS_a^* : L'entropie d'activation.

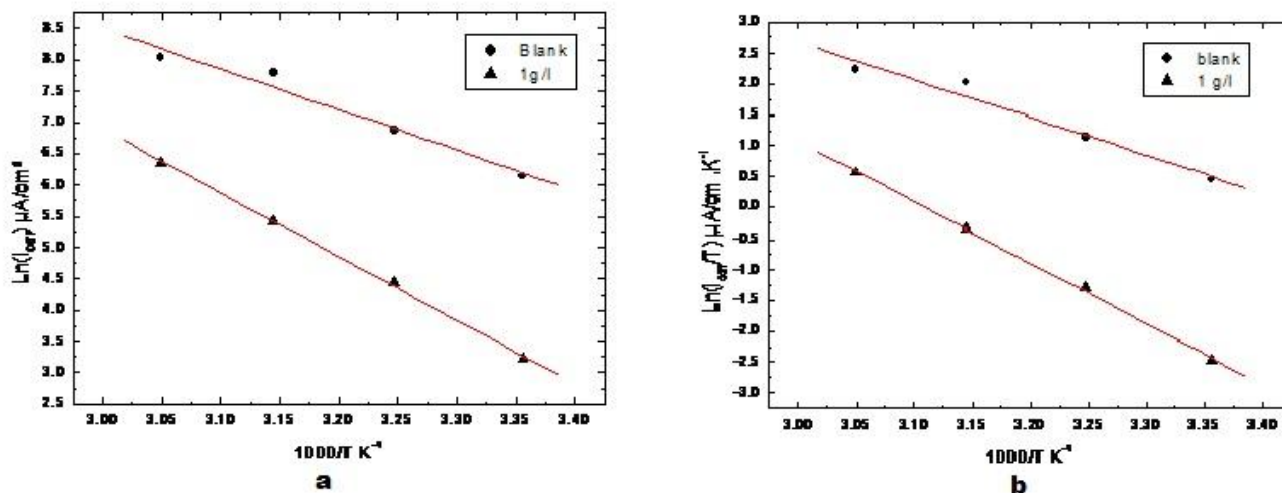


Figure 4 : Courbes d'Arrhenius de l'acier au carbone dans 1 M HCl avec (a) et sans(b) 1g /l d'huile essentielle des graines de *Carum carvi L.*

Notons que l'étude de l'effet de température nous renseigne sur le type d'adsorption de l'inhibiteur à la surface du métal (chimisorption ou physisorption) et permet aussi la détermination de l'énergie d'activation E_a , de l'enthalpie d'activation ΔH^* et de l'entropie d'activation ΔS^* du processus de corrosion.

Tableau 5 : Valeurs des paramètres d'activation E_a , ΔH^*_a et ΔS^*_a de l'acier au carbone dans 1M HCl en absence et en présence de 1g /l de l'huile essentielle de *Carum carvi L.*

	E_a(kJ mol⁻¹)	ΔH^*(kJ mol⁻¹)	ΔS^*(J K⁻¹ mol⁻¹)
Blank	31	51.2	90.3
1g/l	84.5	80.5	169.2

La comparaison des énergies d'activation en présence de l'inhibiteur E_a^{inh} ou en son absence E_a permet de remonter à la nature d'adsorption de l'inhibiteur :

- $E_a^{inh} > E_a$: Adsorption par des liaisons de nature électrostatique (liaisons faibles) sensibles à la température, il s'agit d'une physisorption ;
- $E_a^{inh} < E_a$: Adsorption par des liaisons fortes, les inhibiteurs présentent un pouvoir protecteur élevé et sont donc plus efficaces, il s'agit d'une chimisorption ;
- $E_a^{inh} = E_a$: L'inhibiteur ne présente pas d'évolution du pouvoir protecteur avec la température.

D'autre part, les signes positifs de ΔH^*_a reflètent la nature endothermique du processus de dissolution de l'acier au carbone. La valeur de ΔS^*_a est plus élevée pour la solution inhibée que celle de la solution non inhibée. Ce phénomène suggère que la diminution de caractère aléatoire est produite en cours à partir de réactifs au complexe activé. Cela pourrait être le résultat de l'adsorption des molécules inhibitrices organiques provenant de la solution acide qui pourrait être considérée comme un processus quasi-substitution entre le composé organique dans la phase d'eau et les molécules aqueuses à la surface de l'électrode.

4. CONCLUSION

Le présent travail a été consacré à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans l'acide chlorhydrique 1M par les huiles essentielles issues des graines de l'essence *Carum Carvi L.* Pour ce faire, l'influence de la concentration et de la température sur les processus de corrosion en l'absence et en présence de l'inhibiteur a été étudiée par des mesures de la perte de masse. L'ensemble des résultats portant sur l'influence de la concentration montre qu'un maximum d'efficacité est obtenu pour une concentration de 1g/l, avec un pourcentage de 94%. Ces résultats révèlent que l'huile essentielle de la plante étudiée agit comme excellent inhibiteur de la corrosion de l'acier dans le milieu HCl 1M. Afin d'obtenir une bonne compréhension du mécanisme de protection de l'huile essentielle de *Carum Carvi L.* contre la corrosion de l'acier doux en milieu HCl 1M, une étude électrochimique sur le pouvoir de cet inhibiteur a été réalisée en utilisant les courbes de polarisation potentiodynamiques et la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE). Cette étude confirme le fort potentiel anticorrosif de l'huile essentielle de *Carum Carvi L.*

Par ailleurs, il est important d'approfondir les résultats de cette étude par le fractionnement de cette huile essentielle sur colonne afin d'isoler les molécules à l'origine de l'activité inhibitrice de l'huile essentielle des graines de *Carum Carvi L.*

5. REFERENCES

1. International Organization for Standardization (ISO) 1999. ISO 8044 Corrosion of Metals and Alloys-Basic Terms and Definitions, Trilingual version.
2. Hussin, M. H., Kassim, M. J. 2011. *Materials Chemistry and Physics*. 2011; (125): 461-468.
3. Abiola, O.K. and James, A.O. The Effects of Aloe vera Extract on Corrosion and Kinetics of Corrosion Process of Zinc in HCl Solution. *Corrosion Science*. 2010; 52, 661-664.
4. Hussin, M.H., Kassim, M.J., Razali, N.N., Dahon, N.H., Nasshorudin, D. *Arabian Journal of Chemistry*. 2011. doi:10.1016/j.arabjc.2011.07.002.
5. Znini M., Majidi L., Bouyanzer A., Paolini J., Desjobert J-M., Costa J., Hammouti B. 2010. Essential oil of *Salvia aucheri* mesatlantica as a green inhibitor for the corrosion of steel in 0.5 M H₂SO₄. *Arabian Journal of Chemistry*.
6. El Hosary A. A., Saleh R.M. 1993. In: Progress in Understanding and Prevention of Corrosion, the Institute of Materials, London, 2: 911.
7. Avwiri G. O., Igho F. O.. Inhibitive action of Vernonia amygdalina on the corrosion of aluminium alloys in acidic media. *Mater Lett*. 2003; 57: 3705-3711.
8. Gunasekaran G., Chauhan L.R. 2004. Eco friendly inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in phosphoric acid medium. *Electrochim. Acta*, 49: 4387-4395.
9. El-Etre A. Y. Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. i. Copper in neutral aqueous solution. *Corros Sci*. 1998; 40: 1845-1850.
10. Abdel-Gaber A. M., Abd-El-Nabey B. A., Sidahmed I. M., El-Zayady A. M., Saadawy M. 2006. Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corros Sci*. 48: 2765-2779.
11. Singh A., Ahamad I., Quraishi M. A. Piper longum extract as green corrosion inhibitor for aluminium in NaOH solution. *Arabian Journal of Chemistry*. 2012 (in press).
12. Oguzie E. E. 2007. Corrosion inhibition of aluminium in acidic and alkaline media by *Sansevieria trifasciata* extract. *Corros Sci*. 49: 1527-1539.
13. Ostovari, A., Hoseinih, S.M., Peikari, M., Shadizadeh, S.R., Hashemi, S.J. *Corrosion Science*. 2009; 51(2009): 1935-1949.
14. Bammou, L., Chebli, B., Salghi, R., Bazzi, L., Hammouti, B., Mihit, M., Idrissi, H. Thermodynamic properties of *Thymus satureioides* essential oils as corrosion inhibitor of tinplate in 0.5 M HCl: chemical characterization and electrochemical study. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 2010; 3(3): 173-178.
15. Bammou, L., Mihit, M., Salghi, R., Bouyanzer, A., Al-Deyab, S. S., Bazzi, L., Hammouti, B. Inhibition effect of natural *Artemisia* oils towards tinplate corrosion in HCl solution: chemical characterization and electrochemical study. *International Journal of Electrochemical Science*. 2011; 6, 1454-1467.
16. Gualdrón, A. F., Becerra, E. N., Peña, D. Y., Gutiérrez, J. C., Becerra, H. Q.. Inhibitory effect of *Eucalyptus* and *Lippia alba* essential oils on the corrosion of mild steel in hydrochloric acid. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2013; 4(1): 143-158.
17. Halambek, J., Žutinić, A., Berković, K. *Ocimum basilicum L.* oil as corrosion inhibitor for aluminium in hydrochloric acid solution. *International Journal of Electrochemical Science*. 2013; 8(9): 11201-11214.
18. Lahhit, N., Bouyanzer, A., Desjobert, J. M., Hammouti, B., Salghi, R., Costa, J., Jama, C., Bentiss, F., Majidi, L. 2011. Fennel (*Foeniculum vulgare*) essential oil as green corrosion inhibitor of carbon steel in hydrochloric acid solution. *Portugaliae Electrochimica Acta*. 29(2): 127-138.
19. Potgieter, J. H., Olubambi, P. A., Thanjekwayo, N. P. Investigation of the potential of some plant extracts to inhibit the corrosion of duplex stainless steels in acidic media. *Journal of Metallurgical Engineering*. 2012; 1(2): 41-47.
20. Znini, M., Bouklah, M., Majidi, L., Kharchouf, S., Aouniti, A., Bouyanzer, A., Al-Deyab, S. S. Chemical composition and inhibitory effect of *Mentha spicata* essential oil on the corrosion of steel in molar hydrochloric acid. *International Journal of Electrochemical Science*. 2011; 6(3): 691-704.
21. Znini, M., Paolini, J., Majidi, L., Desjobert, J. M., Costa, J., Lahhit, N., Bouyanzer, A. 2012. Evaluation of the inhibitive effect of essential oil of *Lavandula multifida L.*, on the corrosion behavior of C38 steel in 0.5 M H₂SO₄ medium. *Research on Chemical Intermediates*. 38(2): 669-683.
22. L. El Hattabia, J. Costab, J. M. Desjobertb, A. Guenboura, M. Tabyaouia. Electrochemical studies of *Carum Carvi* plant as corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl solution. *Mor. J. Chem*. 2016; 4(4): 862-875.
23. A.Garaya, W.Dhif, M.Nehiri, A.Echhelh, M.Ebntouhami, A.Chaouch, W.Mnif, R. Ben Chaouacha-Chekir. Chemical composition and anti-corrosive activity of *Carum carvi* seed essential oil. *Journal of new sciences*. Published June, 01, 2016; 30(3).
24. IAR. M. Hukovic-Metikos, R. Babik, Z. Grotac. 2002. *J. Appl. Electrochem*. 2002; 32(35).
25. M. Dahmani, A. Et-Touhami, S.S. Al-Deyab, B. Hammouti and A. Bouyanzer. *Int J Electrochem Sci*. 2010; 5(1060).
26. Znini, M., Bouklah, M., Majidi, L., Kharchouf, S., Aouniti, A., Bouyanzer, A., Hammouti, B., Costa, J., Al-Deyab, S.S. *Int. J. Electrochem. Sci*. 2011; 6: 691-704.

Citer cet article : Marieme Nehiri, El Mahjoub Aouanei, Driss Hmounie, Mohammed Ouhssine, and Brahim Bourkhiss. Valorisation de l'huile essentielle de l'espèce *Carum Carvi L.* par son utilisation comme inhibiteur contre la corrosion de l'acier au carbone en milieu acide Chlorhydrique 1M. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2018; 6(3): 153-159.

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/>