



Revue: Huiles et Extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique. (Review: oils and extracts plants as corrosion inhibitors for different metals and alloys in hydrochloric acid medium).

D. Benmessaoud Left*, M. Zertoubi, A. Irhzo, M. Azzi.

*Laboratoire Interface Matériaux, Environnement, Faculté des Sciences, Université Hassan II Casablanca, B.P 5366
Maârif Casablanca Morocco.*

Received 9 Jan 2013, Revised 29 May 2013, Accepted 29 May 2013.

* Corresponding author. E mail: Drishshadra@yahoo.fr

Abstract

Several methods are available to prevent or retard corrosion of metallic materials, the use of inhibitors is one of the best technique to ensure their protection in contact with aggressive media such as hydrochloric acid medium. Oil and plant extracts have become a source of inhibitors, ecological guarantee high efficiency at a cheaper price. These types of inhibitors do not contain heavy metals or toxic compounds and they are biodegradable. This review presents a synthesis of the majority of the contributions published in the literature during these last ten years, on the use of oil and extracts of plants as inhibitor of corrosion in the hydrochloric acid medium.

Key-words: Oils, Extracts, Plants, Corrosion, Inhibitor, Metallic Materials, hydrochloric acid.

Résumé

Plusieurs méthodes sont disponibles pour empêcher ou retarder la corrosion des matériaux métalliques, l'utilisation des inhibiteurs est l'une des meilleures techniques qui assure leur protection lorsqu'ils sont en contact avec des milieux très agressifs tel que le milieu acide chlorhydrique. Les huiles et les extraits de plantes sont devenus une source d'inhibiteurs, écologiques qui garantissent une efficacité élevée à un prix moins cher. Ces types d'inhibiteurs ne contiennent ni des métaux lourds, ni des composés toxiques et ils sont biodégradables. Cette revue présente une synthèse de la majorité des contributions publiées dans la littérature au cours de ces dix dernières années, sur l'utilisation des huiles et des extraits de plantes comme inhibiteur de corrosion dans le milieu acide chlorhydrique.

Mots-clés: Huiles, Extraits, Plantes, Corrosion, Inhibiteur, Matériaux métalliques, Acide chlorhydrique.

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], 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, décapage à l'acide, le nettoyage industriel, détartrage acide, et aussi dans les procédés pétrochimiques [2-3], etc....

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 disponibles pour protéger les métaux de la corrosion dans ce milieu, comme l'utilisation d'une barrière de protection, la galvanisation, la protection cathodique, utilisation des solutions antirouille ou des inhibiteurs de corrosion.

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).

La plupart des composés synthétiques présentent une bonne action anticorrosion, mais la plupart d'entre eux sont hautement toxiques pour les êtres humains et l'environnement. Ces inhibiteurs peuvent causer des dommages temporaires ou permanents au système d'organes tels que les reins ou le foie, ou de perturber le système enzymatique dans le corps [4].

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 de corrosion verts. Ils sont utilisés pour la protection de métaux dans l'environnement acide, afin de remplacer les produits chimiques toxiques utilisés actuellement [5].

Le but de cette revue est, d'une part citer à partir des travaux publiés dans la littérature au cours de ces dix dernières années, les différents inhibiteurs extraits de plantes naturelles que se soit des huiles ou tannins végétaux, qui ont permis aux chercheurs d'atteindre des valeurs d'efficacité inhibitrices élevées (jusqu'à 99%) pour différents types de métaux utilisés dans l'industrie en contact avec l'acide chlorhydrique, et d'autre part mentionner les différentes techniques utilisés pour l'évaluation de la corrosion et les techniques d'identification des molécules responsables de l'inhibition afin d'explicitier leurs mécanismes de protection mis en jeu ,en tenant compte de leur nature huiles ou extraits.

2- Les méthodes d'évaluation de la corrosion :

Les méthodes d'évaluations de la corrosion sont très nombreuses, mais les plus utilisés et les plus citées dans la littérature dans le cas de l'inhibition de la corrosion des métaux en milieu HCl sont les suivantes :

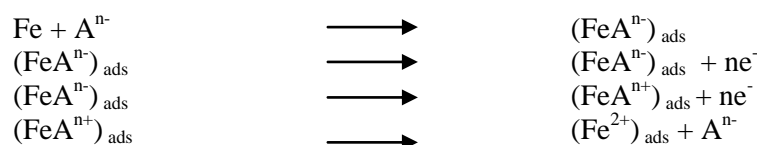
- La gravimétrie (ou la perte de masse).
- Les techniques de polarisation potentiodynamique.
- La voltamétrie cyclique.
- La spectroscopie d'impédance électrochimique
- Méthode d'évolution de l'hydrogène
- Méthode thermométrique

Ces techniques sont complétées par d'autres qui consistent à analyser et identifier les huiles et extraits de plantes utilisés comme inhibiteur de corrosion tel que la GC-MS, HPLC et IR-TF. L'état de surface des métaux est analysé dans la plupart des travaux étudiés par des techniques telles que : la spectroscopie des photoélectrons (XPS), la microscopie électronique à balayage (MEB) et le Raman.

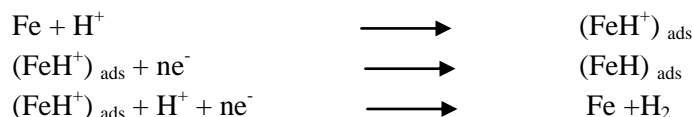
3- Mécanismes de dissolution de l'acier doux et l'aluminium en milieu HCl :

Le très grand nombre de recherches menées sur la corrosion de l'acier doux et de l'aluminium en milieu HCl a permis à quelque auteurs de représenter dans la littérature, les mécanismes de dissolution de ces deux métaux.

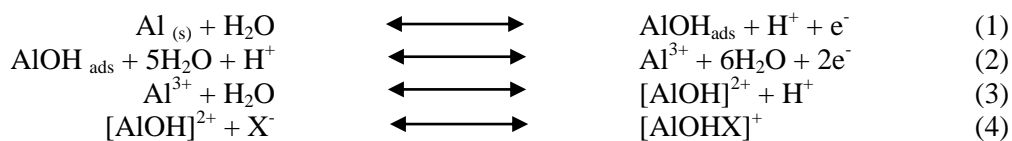
Quelques auteurs ont proposé le mécanisme de la corrosion de l'acier dans le milieu acide [6], suivant les réactions :



L'évolution cathodique de l'hydrogène est représentée par les réactions suivantes :



Parmi les propositions de mécanismes de la corrosion de l'aluminium en milieu acide [7], on cite :



La réaction (4) est celle qui contrôle la dissolution de ce métal, en présence des ions chlorures la réaction est :



4- Inhibiteurs de corrosion : huiles et extraits de plantes.

Les huiles et les extraits sont obtenus des différentes parties d'une plante : des feuilles, des graines, des écorces, des racines ou d'autres structures spéciales. Leur composition est complexe, puisqu'elle est constituée d'un mélange de composés qui appartiennent aux différentes classes de la chimie organique, telle que les phénols, les hydrocarbures, les alcools, les aldéhydes, les cétones, etc....

La composition d'une même espèce peut varier selon la localisation géographique, les conditions climatiques, la période de récolte, la partie de la plante utilisée, etc.... Les propriétés peuvent varier également, d'où la nécessité de travailler dans les mêmes conditions, pour avoir la reproductibilité des résultats à l'étape d'analyse et d'identification des molécules que contient une huile ou un extrait.

En 1930, l'extrait de plante de la chélidoine et d'autres plantes a été utilisé comme inhibiteur de corrosion. En 1970 et 1980, l'étude des extraits de plantes est devenue plus étendue. En se basant sur les statistiques des années 1970, on aurait pu penser qu'il y aura un accroissement dans les publications et l'application des extraits de plantes comme inhibiteurs de la corrosion métallique dans les années 90. C'était le contraire qui a été constaté, et la raison n'a pas de lien avec les difficultés rencontrées pour isoler et purifier les ingrédients actifs des extraits responsables de l'inhibition, mais plutôt avec l'effet de l'utilisation de ces inhibiteurs sur l'environnement [8]. Ce qui a poussé plusieurs chercheurs (Hammouti, Bouyanzer, Ebenso, El-Etre, Umoren, Quraishi, etc....), à utiliser une ou plusieurs techniques parmi celles citées dans la première partie, en tenant compte des conditions opératoires (T°, Concentration, Solvant d'extraction, etc....). Ils ont pu ainsi vérifier et comprendre le comportement de ces produits naturels via les milieux et les matériaux d'études ce qui a permis de les classer en fonction de leurs pouvoirs d'inhibition de la corrosion en tenant compte de leurs impacts sur l'environnement.

• Inhibiteurs à base des huiles :

L'huile des graines de *Prickly Pear (Opuntia Ficus -indica L.)* a été utilisée par Ben Hmamou et coll [9], pour lutter contre la corrosion de l'acier C38 en milieu HCl (1M). Les résultats obtenus ont montré que c'est un inhibiteur mixte dont l'efficacité pouvant atteindre 90% pour une concentration de 5g/l à 298 K. Cet effet peut diminuer (80%) à une température plus élevée (328 K). En changeant d'inhibiteur et en restant dans les mêmes conditions opératoires, Ben Hmamou et coll. ont obtenu une efficacité de 90% pour 2g/l en utilisant l'huile essentielle de la *chamomille (Chamomilla recutita)*, tout en constatant que cette efficacité est indépendante de la température. [10]. Afia et coll., ont utilisé l'huile d'argan pour tester son effet sur la corrosion du même type d'acier et dans le même milieu, l'efficacité inhibitrice était de 81% pour une concentration de 3g/l à 298 K qui diminue quand la température passe à 328K, il a été montré que cet inhibiteur est de type mixte [11]. L'utilisation de l'huile essentielle de *Mentha Spicata L.* par Znini et coll., a révélé une efficacité inhibitrice vis-à-vis de la corrosion de l'acier en milieu HCl (1M) atteignant 97% pour 2g/l d'inhibiteur à 298K, la diminution de cette efficacité est observée aux températures de 303 à 333K, cet inhibiteur est aussi de type mixte. [12].

D'autres études sur l'inhibition de la corrosion par les huiles et les huiles essentielles dans le milieu HCl sont rapportées dans le tableau suivant :

Source de l'inhibiteur	Concentration du Milieu	Type de Métal	Efficacité inhibitrice	T° (K)	Remarques	Réf
huile du Pennyroyal (<i>Mentha pulegium</i>)	1M	Acier	80 % pour 2,76g/l	298	Un inhibiteur cathodique	[13]
huile essentielle de l' <i>Artemisia</i>	0,5M	Tinplate	81 % pour 0,5 g/l	298	-----	[14]

huile de l' <i>Artemisia</i>	1M	Acier	87 % pour 19 g/dm ³	343	Un inhibiteur cathodique	[15]
Huile de <i>jojoba</i>	1M	Fer	100 % pour 0,515 g/l	298	Un inhibiteur cathodique	[16]
Huile de <i>Clove</i>	0,5M	Fer	98 % pour 5 g/l	298	-----	[17]
huile essentielle de fennel (<i>Foeniculum Vulgare</i>)	1M	Acier au carbone	76 % pour 3ml/l	298	Un inhibiteur Mixte	[18]

• **Inhibiteurs à base d'extraits :**

La corrosion de l'aluminium type AA 1060 a fait l'objet de recherches au sein de plusieurs équipes scientifiques, afin de comprendre le mécanisme de l'inhibition de la corrosion de ce métal dans le milieu acide chlorhydrique. Ainsi, Ating et coll. ont vu dans l'extrait ethanologique des feuilles de *Ananas Sativum* une solution pour inhiber la corrosion. La variation des concentrations de l'inhibiteur de 0,1g/l à 0,5g/l et la température de 303K à 333K, leur a permis de remarquer qu'à 0,5g/l l'efficacité a atteint 96,09% dans un milieu HCl (0,1M) à 333K [7]. Obot et coll. ont choisi l'extrait des feuilles de *Chlomolaena odorata L.* comme inhibiteur en milieu HCl (2M), les résultats obtenus montrent une efficacité de 92,16% à 30°C, efficacité qui diminue jusqu'à 77,43% à 60°C, [19]. Le pouvoir d'inhibition de la corrosion par des feuilles du *Jasminum nudiflorum Lindl.* a été prouvé par Deng et coll. en milieu HCl (1M), l'efficacité obtenue était de 93,6 % pour 1g/l d'inhibiteur à 20°C [20]. D'autres inhibiteurs ont prouvé leurs efficacités, notamment ceux utilisés par Abiola et coll. qui ont travaillé avec l'extrait de *Delonix Regia* [21], El-Etre avec l'extrait de l'*Opuntia* [22] et Matsatar et coll. avec l'extrait de *Nipah* [23], en milieu HCl (2M).

Jusqu'à aujourd'hui, plusieurs extraits de plantes ont été utilisés comme inhibiteur de corrosion pour différents types de métaux en milieu acide chlorhydrique. Toutefois, c'est l'acier et ces alliages qui ont retenu le plus l'attention des chercheurs à cause de leur large utilisation dans l'industrie.

Acier C38 :

Parmi ces recherches on trouve, l'étude comparative menée par Dahmani et coll. sur l'inhibition de la corrosion de l'acier C38 en milieu HCl (1M). Il a été montré que l'extrait du *Black pepper* et le composé *Piperin* isolé de la même plante, présentent une efficacité d'inhibition élevée, soit respectivement 95,8 % à 2g/l et 98,9% à 10⁻³ M à 35°C. Dans un domaine de températures de 40°C – 70°C, l'efficacité diminue pour les deux types d'inhibiteurs [24]. Dans les mêmes conditions opératoires, Dahmani a étudié l'effet d'un autre composé isolé du Black pepper (le *Piperanine*). Les résultats obtenus montrent que l'efficacité inhibitrice atteint 97,5% pour 10⁻³ M de l'inhibiteur à 35°C et que la diminution de cette efficacité est observée également à haute températures [25]. Lecante et coll. ont réalisé des études sur l'effet des alcaloïdes sur l'inhibition de la corrosion de l'acier C38 en milieu HCl (0.1M). Parmi ces études celle sur des alcaloïdes extraits de *Gutteria ouregou* et *Simira tinctoria*, dont les résultats ont montré une efficacité de 92% pour une concentration de 250 mg/l à 25°C [26]. Une autre étude portait sur des alcaloïdes extraits des feuilles et des tiges de *Siparuna guianensis*, les résultats ont montré une bonne efficacité de l'extrait des tiges par rapport à celui des feuilles [27]. D'autres recherches sur la corrosion du même type d'acier ont été réalisées par des inhibiteurs à base d'alcaloïdes. Ainsi, Faustin et coll. ont étudié l'effet d'alcaloïdes extraits d'*Aspidosperma album*, l'efficacité inhibitrice élevée est enregistrée pour la concentration de 100mg/l à 25°C en milieu HCl (1M). Les tests effectués à des températures élevées (55°C) ont montré une diminution de cette efficacité [28]. Lebrini et coll. ont étudié l'effet des alcaloïdes extraits à partir de *Isertia coccinea* [29], *Palicourea guianensis* [30], et *Annona Squamosa* [31] dans le même milieu et ils ont obtenu des efficacités inhibitrices similaires.

Acier doux :

Plusieurs auteurs ont porté un très grand intérêt à la corrosion de l'acier doux, Singh et coll. ont testé les extraits de fruits de quelques plantes comme inhibiteurs. Les résultats ont montré une efficacité inhibitrice de 98,2 % pour 300 ppm de l'extrait de *Moringa oleifera*, 96,6 % pour 600 ppm de l'extrait de *Piper longum* et 88,1 % pour 1200 ppm de l'extrait du *Citrus autantium*, en milieu HCl (1M) à 308 K. Cette étude avait pour but aussi de voir la variation de l'efficacité inhibitrice dans le domaine de concentrations (0,5 M – 2 M) en HCl et dans le domaine de températures (308 K -338 K). Les résultats ont montré la diminution de l'efficacité quand on augmente ces deux paramètres [32]. Dans les mêmes conditions opératoires, Singh et coll. ont utilisé l'extrait

de graine de *Pongamia pinnata* comme inhibiteur. L'efficacité obtenue est de 98% pour 400 ppm en milieu HCl 1M à 308 K [6]. Ces inhibiteurs ont été classés de type mixte. Les études menées par Affia et Coll. sur l'inhibition de l'acier doux en milieu HCl (1 M), par l'extrait de la coque d'*Argan (Argania Spinosa)* [33] et l'extrait de l'amande d'*Argan (Argania Spinosa)* [34], montrent une efficacité inhibitrice de 97,3% pour 0,5 g/l du premier extrait et de 96% pour 3g/l du deuxième.

Plusieurs extraits ont prouvé leur capacité d'inhiber la corrosion de l'acier doux dans les différentes concentrations en HCl. On cite : l'extrait des graines de *Areca catechu* [35], l'extrait de la coque des grain de *Jatropha curcas* [36], *Ecbolium virid* [37], *Murraya koenigii* [38], *Brugmansia suaveolens* et *Cassia roxburghii* [39], *Lycium shawii*, *Teucrium oliverianum*, *Ochradenus baccatus*, *Anvillea garcinii*, *Cassia italica*, *Artemisia sieberi*, *Carthamus tinctorius* et *Tripleurospermum auriculatum* [40], *Eggplant* [41], *feuille de Figuier* [42], la gomme de *Anogessus leocarpus* [43], *Andrographis paniculata* [44], *Hibiscus sabdariffa calyx* [45], *Solanum Melongena* [46], *Osmanthus fragran* [47], *Schinopsis lorentzii* [48], l'extrait de la peau extérieure du *Garlic* [49], *Euphorbia Falcata.L* [50], *Artemisia pallens* [51], la peau extérieure des *Pomme de terre* [52], Grain de *Cyamopsis Tetragonaloba* [53], la peau extérieure *Musa Acuminata* [54], *Emblia Officinalis* [55], *Garcinia Mangostana* [56], *Xylopi ferruginea* [57], les gommes de *Ferula assa-foetida* et *Dorema ammoniacum* [58], *Tinospora crispa* [3], *Justicia gendarussa* [59], *Uncaria Gambir* [1], *Adathoda vasica*, *Eclipta alba* et *Centella asiatica* [60], *Acacia Senegal* [61], *jus de pêche* [62], *jus de Prunus cerasus* [63].

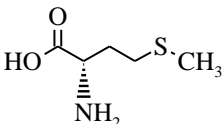
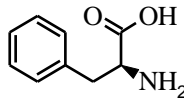
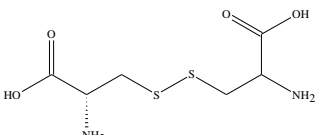
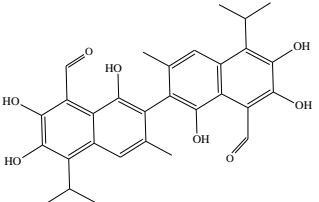
Aciers inoxydables :

La corrosion de l'acier IS 226 a été étudiée par Nahlé et coll., l'inhibiteur utilisé est extrait à partir de UAE *Neem (Azadirachta Indica)*. Les résultats obtenus ont montré une efficacité de 87% pour 2g/l en milieu HCl (1M) à une température ambiante. Ce taux diminue à (80%) dans des températures plus élevées 303K [64]. La corrosion de l'acier 1018 à été étudié par Inzunza et coll., l'extrait ethanolique des feuilles de *Pachycormus discolor* a été utilisé comme inhibiteur dans le milieu HCl (1M) , les résultats obtenu ont montré qu'à 25°C l'efficacité est de 94,52% et à 75°C l'efficacité atteint 97,89% pour une concentration 2 % v/v [65]. L'inhibition de la corrosion de l'acier A3 à été étudié par l'ajout de l'extrait de *Rice Bran* [66], et celle de l'acier inoxydable 304 par l'ajout de l'extrait de feuille de *Salvia officinalis* [67].

Cuivre métallique et alliage zinc-Aluminium :

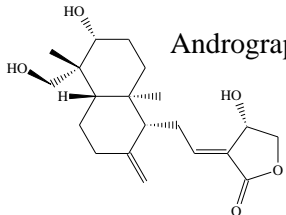
L'inhibition de la corrosion du cuivre a été étudiée par l'ajout des tanins de la *Mangrove (Rhizopora apiculata)* en milieu HCl (1M) [68], dans une autre étude l'extrait de *Ocimum Gratissimum* à été ajouté en milieu HCl (2M) afin d'inhiber la corrosion de l'alliage Zinc –Aluminium [69].

D'autres extraits utilisés pour l'inhibition de la corrosion dans le milieu HCl sont rapportées dans le tableau suivant :

Source de l'inhibiteur	Ingrédients Active	Type du métal	Milieu
<i>Gossipium Hirsutum L.</i> (Extrait de feuilles)	Methionine 	Aluminium 2S	1M
	Phenylalanine 		
	Cystine 		
	Gossypol 		

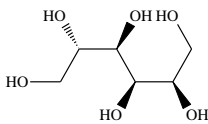
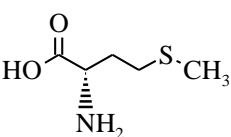
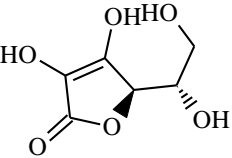
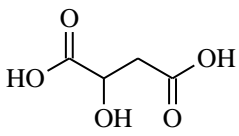
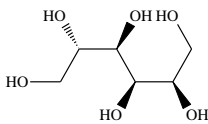
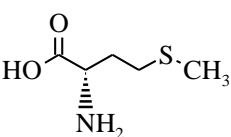
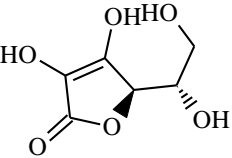
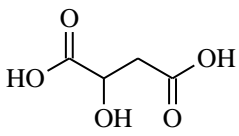
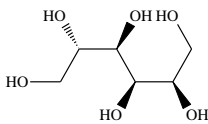
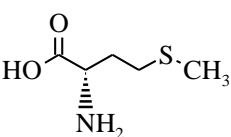
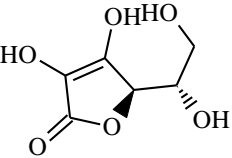
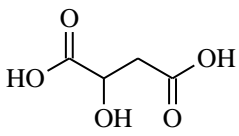
Remarques

Cet inhibiteur a été évalué en utilisant des mesures de perte de masse à 30 ° C. L'adsorption de l'inhibiteur était compatible avec l'isotherme d'adsorption de Langmuir avec une efficacité inhibitrice qui atteint 92% [70]

<p>Kalmegh (<i>Andrographis paniculata</i>) (Extrait de feuilles)</p>	<p style="text-align: center;">Andrographolide</p> 	<p>Acier Doux</p>	<p>1M</p>
---	--	-----------------------	-----------

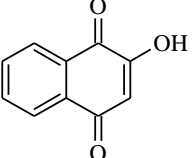
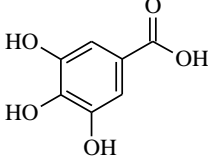
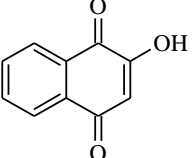
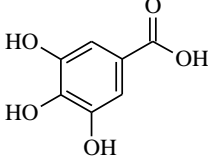
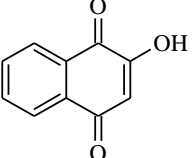
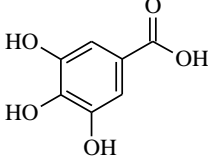
Remarques

L'inhibition de la corrosion a été étudiée à l'aide de la perte de masse, spectroscopie d'impédance électrochimique, et les techniques de polarisation potentiodynamique. L'adsorption de l'inhibiteur était compatible avec l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Efficacité inhibitrice = 98% [71]

<p>Cocos nucifera L. (Eau)</p>	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;"> <p style="text-align: center;">Sorbitol</p>  </td> <td style="width: 50%; border: none;"> <p style="text-align: center;">Methionine</p>  </td> </tr> <tr> <td style="border: none;"> <p style="text-align: center;">Ascorbic acid</p>  </td> <td style="border: none;"> <p style="text-align: center;">Malic acid</p>  </td> </tr> </table>	<p style="text-align: center;">Sorbitol</p> 	<p style="text-align: center;">Methionine</p> 	<p style="text-align: center;">Ascorbic acid</p> 	<p style="text-align: center;">Malic acid</p> 	<p>Aluminium</p>	<p>0,5 M</p>
<p style="text-align: center;">Sorbitol</p> 	<p style="text-align: center;">Methionine</p> 						
<p style="text-align: center;">Ascorbic acid</p> 	<p style="text-align: center;">Malic acid</p> 						

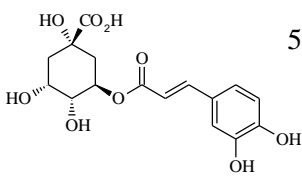
Remarques

Cet inhibiteur est évalué par des mesures de perte de masse à 30 ° C, l'action inhibitrice des molécules de l'inhibiteur sur la surface métallique suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir isotherme. Efficacité inhibitrice = 93% [5].

<p>Henna (<i>Lawsonia inermis</i>) (Extrait de feuilles)</p>	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;">  <p style="text-align: center;">Lawsone</p> </td> <td style="width: 50%; border: none;">  <p style="text-align: center;">l'acide gallique</p> </td> </tr> </table>	 <p style="text-align: center;">Lawsone</p>	 <p style="text-align: center;">l'acide gallique</p>	<p>Acier Doux</p>	<p>1M</p>
 <p style="text-align: center;">Lawsone</p>	 <p style="text-align: center;">l'acide gallique</p>				

Remarques

L'action inhibitrice de l'extrait de henné et de ses principaux constituants sur la corrosion a été étudiée par techniques électrochimiques et des analyses de surface (MEB / EDS), L'efficacité d'inhibition maximale (92,06%) est obtenue à 1,2 g / l. [4]

<p>Café moulu</p>	<p style="text-align: center;">5-caffeoylquinic acid</p> 	<p>Acier au carbone</p>	<p>1M</p>
--------------------------	--	-----------------------------	-----------

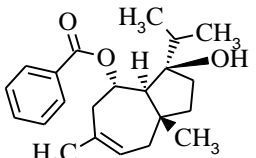
Remarques

Deux techniques sont utilisées : la décoction et l'infusion. L'inhibiteur est considéré comme un inhibiteur mixte avec une efficacité cathodique et son efficacité inhibitrice augmente lorsqu'on augmente la concentration de l'inhibiteur et la température du milieu. [72]

<p><i>Oxandra asbeckii</i> (Alcaloïdes)</p>	<p>Cette plante contient les alcaloïdes suivant : oxoaporphinoid comme liriodenine, et azafluorenones et quelque triterpenoid.</p>	<p>Acier C38</p>	<p>1M</p>
--	--	------------------	-----------

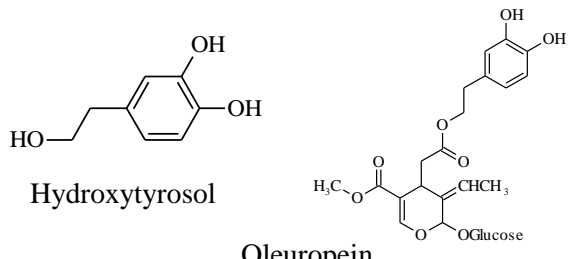
Remarques

L'inhibiteur est considéré comme un inhibiteur mixte, son efficacité inhibitrice augmente lorsqu'on augmente la concentration de l'inhibiteur et la l'étude a été réalisée entre une température de 25°C et 55°C. L'efficacité d'inhibition maximale (91%) est obtenue à 50 mg / l. [73]

<p><i>Zallouh</i> (<i>Ferula Harmonis</i>) (Extrait de racine)</p>	 <p>Ferutinol benzoate</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>2M</p>
---	---	-------------------------	-----------

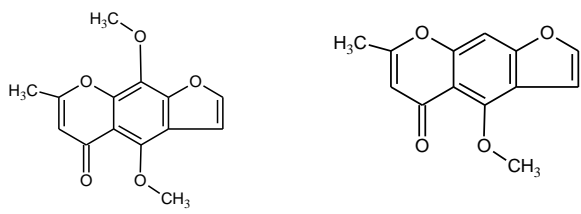
Remarques

L'inhibiteur a été testé par les techniques : perte de masse, la polarisation potentiostatique et la voltammetrie cyclique. L'efficacité d'inhibition maximale (93%) est obtenue à 900 ppm, mais elle diminue si on passe d'une température de 25°C à 70°C. [74]

<p>Olivier (<i>Olea europaea</i> L.) (Extrait de feuilles)</p>	 <p>Hydroxytyrosol Oleuropein</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>2M</p>
---	---	-------------------------	-----------

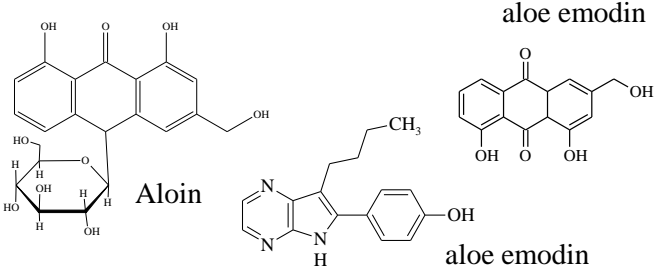
Remarques

L'inhibiteur a été testé par les techniques : perte de masse, Tafel et la voltammetrie cyclique, et c'est un inhibiteur mixte. L'efficacité d'inhibition maximale (93%) est obtenue à 900 ppm, mais elle diminue si on passe d'une température de 298 K à 343 K. [75]

<p>Khillah (<i>Ammi visnaga</i>)</p>	 <p>Khellin Visnagin</p>	<p>Acier SX 316</p>	<p>2M</p>
---	--	---------------------	-----------

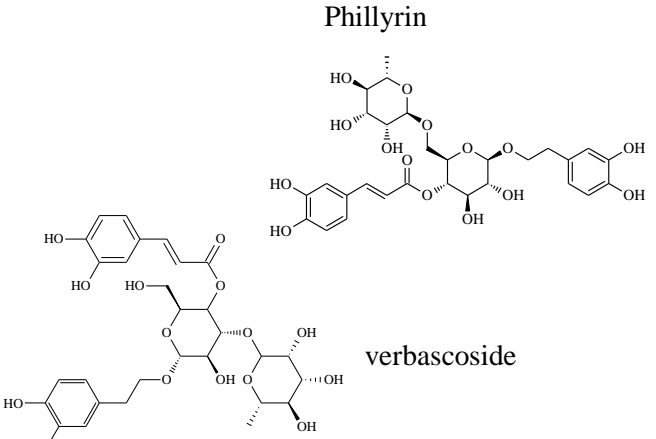
Remarques

L'efficacité d'inhibition maximale (99,3%) est obtenue à 300 ppm, mais elle diminue si on passe d'une température de 25°C à 80°C. [76]

<p>Aloe vera (Extrait de feuilles)</p>	 <p>Aloin</p> <p>aloe emodin</p> <p>aloe emodin</p>	<p>Zinc</p>	<p>2M</p>
---	---	-------------	-----------

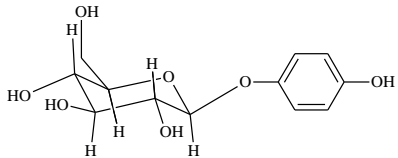
Remarques

L'inhibiteur a été testé par la technique de perte de masse, L'efficacité d'inhibition maximale (67%) est obtenue à 10% V/V de l'extrait, mais elle diminue si on passe d'une température de 30°C à 40°C. [2]

<p>Jasminum nudiflorum Lindl. (Extrait de feuilles)</p>	 <p>Phillyrin</p> <p>verbascoside</p>	<p>Acier laminé à froid</p>	<p>1M</p>
---	--	-----------------------------	-----------

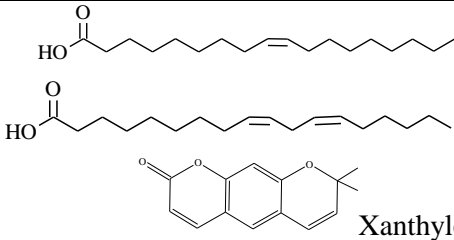
Remarques

L'inhibiteur a été testé par les techniques : perte de masse, la polarisation potentiostatique et la spectroscopie d'impédance électrochimique. Les résultats montrent que c'est un inhibiteur mixte L'efficacité d'inhibition m (96,3%) est obtenue à 50mg/l à 20°C. [77]

<p>Artemisia pallens (Asteraceae)</p>	<p>Arbutin</p> 	<p>Acier doux</p>	<p>1M</p>
--	---	-------------------	-----------


Remarques

Les tests ont été réalisés par la technique de perte de masse et des techniques électrochimiques L'efficacité d'inhibition maximale (98%) est obtenue à 400mg/l à 30°C. [78]

<p>Citrus aurantiifolia (Extrait de feuilles)</p>	 <p>Oleic acid Linoleic acid Xanthyletin</p>	<p>Acier doux</p>	<p>1M</p>
--	---	-------------------	-----------

Remarques

Les tests ont été réalisés par la technique de perte de masse et des techniques électrochimiques. Les courbes de polarisation révèlent que c'est un inhibiteur de type mixte qui enregistre une efficacité inhibitrice de 97,5% pour une concentration de 2,5% v/v. [79]

<ul style="list-style-type: none"> - Ocimum sanctum - Aegle marmelos - Solanum trilobatum 	 <p>α-bisabolene β-bisabolene Constituent majeur de l'ocimum sanctum</p>	<p>Acier doux</p>	<p>1N</p>
---	---	-------------------	-----------

Remarques

Les tests ont été réalisés par la technique de perte de masse, des techniques électrochimiques et la méthode de perméation de l'hydrogène. Ces inhibiteurs sont de type mixte, et l'efficacité inhibitrice est de 99,6 % pour une concentration de 6% v/v de l'extrait de l'Ocimum sanctum, les résultats obtenus montrent que l'efficacité suit le classement suivant : Ocimum sanctum > Aegle marmelos > Solanum trilobatum [80]

5- Inhibiteurs de corrosion + ions halogénures

Il est reporté dans la littérature que les halogénures inhibent la corrosion de quelques métaux surtout dans des milieux acides très agressifs, et que leurs effets dépendent de leur taille, leur charge et leur concentration dans le milieu. Il est reporté aussi que leur effet d'inhibition augmente dans l'ordre suivant : $Cl^- < Br^- < I^-$, ce qui indique que peut être le rayon de ces ions a un rôle très important.

Par exemple I^- (rayon de 135 pm) est prédisposé à être adsorbé que Br^- (rayon de 114 pm) ou Cl^- (rayon de 90 pm).

L'étude de l'inhibition de la corrosion de l'aluminium (AA1060) par l'extrait des racines de *Ginseng* en milieu HCl (1M) était menée par des chercheurs du Nigeria et de l'Afrique du Sud, qui ont obtenu une efficacité inhibitrice de 93,1% pour 50% v/v de l'extrait à 30°C, l'ajout de 5,0 mM de KI dans ce milieu en présence de l'inhibiteur a enregistré une augmentation de l'efficacité (96%) à 30°C, les chercheurs ont expliqué ce résultat par le fait qu'il y a une synergie entre l'ion halogénure I^- et les cations organiques de l'extrait, ce qui a permis à I^- de former un pont entre la surface du métal et ces cations organiques, traduisant donc un accroissement au niveau du taux de recouvrement de la surface métallique [81]. Dans les mêmes conditions et sur le même type de métal, un autre travail a été réalisé par cette équipe de recherche sur l'effet inhibiteur de l'extrait d'*Ipomoea invulcrata*, en présence et en absence de KI et KSCN, les résultats ont confirmé la synergie entre les I^- et les composés organiques de l'extrait, et aussi l'effet négative de SCN^- vis-à-vis de l'efficacité inhibitrice qui diminue notamment à 40-60°C [82]. L'effet de l'extrait de *Aningeria robusta* [83] et la gomme *Raphia hookeri* [84] était étudié en présence et en absence des halogénures pour inhiber la corrosion de l'aluminium en milieu HCl (2M) et en milieu HCl (0,1M) avec la gomme de *Pachylobus edulis* [85], l'effet inhibiteur de l'extrait de *Nypa Fruticans' Wurmb* en présence de KI a montré de bon résultats vis-à-vis de la corrosion de l'acier doux en milieux HCl (0,1 et 0,5 M)[86].

6- Types d'adsorption des inhibiteurs extraits de plantes en milieu HCl:

L'adsorption est un phénomène de surface universel car toute surface est constituée d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant atomes et

molécules se trouvant à proximité. Deux types d'adsorption peuvent être distingués dans l'étude des inhibiteurs à base des huiles et des extraits de plantes en milieu acide chlorhydrique : la physisorption (formation de liaisons faibles) et la chimisorption.

La première, encore appelée adsorption physique conserve l'identité aux molécules adsorbées ; trois types de forces sont à distinguer :

- ∞ Les forces de dispersion (Van der Waals, London) toujours présentes,
- ∞ Les forces polaires, résultant de la présence de champ électrique,
- ∞ Les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyle ou aminé.

La chimisorption, au contraire, consiste en la mise en commun d'électrons entre la partie polaire de la molécule et la surface métallique, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques bien plus stables car basées sur des énergies de liaison plus importantes. Les électrons proviennent en grande majorité des doublés non appariés des molécules inhibitrices tels que O, N, S, P... (Tous ces atomes se distinguant des autres de par leur grande électronégativité).

La loi de variation de la quantité adsorbée en fonction de la concentration en inhibiteur peut souvent être représenté par les isothermes classiques suivant :

- Isotherme de Langmuir
- Isotherme de Frumkin
- Isotherme de Temkin

7- Conclusion :

Plusieurs inhibiteurs synthétisés au laboratoire ont permis de réduire notablement la corrosion des métaux et alliages en milieu HCl. Toutefois, leurs toxicités élevées et leurs impact sur l'environnement ont favorisé l'utilisation de plus en plus importante d'une nouvelle génération d'inhibiteurs extraits à partir de plantes, qui se distinguent d'une part par des efficacités inhibitrices des alliages métalliques en milieu HCl très élevées pouvant atteindre les 99 %, et d'autre part par leur effet écologique, respect des normes de santé et d'environnement.

Références:

1. Hussin, M. H., Kassim, M. J., *Materials Chemistry and Physics*, 125 (2011) 461–468.
2. Abiola, O. K., James, A.O., *Corrosion Science*, 52 (2010) 661–664.
3. 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.
4. Ostovari, A., Hoseinieh, S.M., Peikari, M., Shadizadeh, S.R., Hashemi, S.J., *Corrosion Science*, 51 (2009) 1935–1949.
5. Abiola, O. K., Tobun, Y., *Chinese Chemical Letters*, 21 (2010) 1449–1452.
6. Singh, A., Ahamad, I., Singh, V. K. & Quraishi, M. A., *J Solid State Electrochem*, 15 (2011) 1087–1097.
7. Ating, E.I., Umoren, S.A., Udousoro, I.I., Ebenso, E.E., Udoh, A.P., *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3(2010) 61-68.
8. Okafor, P. C., Ebenso, E. E., El-Etre, A. Y., and Quraishi, M. A., *International Journal of Corrosion*, Volume 2012 (2012) doi :10.1155/2012/908290.
9. Ben Hmamou, D., Salghi, R., Bazzi, Lh., Hammouti, B., Al-Deyab, S.S., Bammou, L., Bazzi, L., Bouyanzer, A., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 1303 – 1318.
10. Ben Hmamou, D., Salghi, R., Zarrouk, A., Hammouti, B., Al-Deyab, S.S., Bazzi, Lh., Zarrok, H., Chakir, A., Bammou, L., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 2361 – 2373.
11. Afia, L., Salghi, R., Bammou, L., Bazzi, El., Hammouti, B., Bazzi, L., Bouyanzer, A., *Journal of Saudi Chemical Society*, (2011) doi:10.1016/j.jscs.2011.05.008.
12. Znini, M., Bouklah, M., Majidi, L., Kharchouf, S., Aouniti, A., Bouyanzer, A., Hammouti, B., Costa, J., Al-Deyab, S.S., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 691 – 704.
13. Bouyanzer, A., Hammouti, B., Majidi, L., *Materials Letters*, 60 (2006) 2840-2843.
14. Bammou, L., Mihit, M., Salghi, R., Bouyanzer, A., Al-Deyab, S.S., Bazzi L., Hammouti, B., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 1454 – 1467.
15. Bouyanzer, A., Hammouti, B., *Pigment & Resin Technology*, 33 (2004) 287–292.
16. Chetouani, A., Hammouti, B., Benkaddour, M., *Pigment & Resin Technology*, 33 (2004) 26–31.
17. Saxena, A., Sharma, A., Saxena, D., Jain, P., *E-Journal of Chemistry*, 9 (2012) 2044-2051.

18. Lahhit, N., Bouyanzer, A., Desjobert, J.-M., Hammouti, B., Salghi, R., Costa, J., Jama, C., Bentiss, F., Majidi, L., *Portugaliae Electrochimica Acta*, 29 (2011) 127-138.
19. Obot, I. B., Obi-Egbedi, N. O., *J Appl Electrochem*, 40 (2010) 1977–1984.
20. Deng, S., Li, X., *Corrosion Science*, 64 (2012) 253–262.
21. Abiola, O.K., Oforka, N.C., Ebenso, E.E., Nwinuka, N.M., *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 54 (2007) 219–224.
22. El-Etre, A.Y., *Corrosion Science*, 45 (2003) 2485–2495.
23. Satar, M. Z. M., Noor, M. F. M., Samsudin, M. W., Rozali Othman, M., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 1958 – 1967.
24. Dahmani, M., Et-Touhami, A., Al-Deyab, S.S., Hammouti, B., Bouyanzer, A., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 5 (2010) 1060 – 1069.
25. Dahmani, M., Al-Deyab, S.S., Et-Touhami, A., Hammouti, B., Bouyanzer, A., Salghi, R., ElMejdoubi, A., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 2513 – 2522.
26. Lecante, A., Robert, F., Blandinières, P.A., Roos, C., *Current Applied Physics*, 11 (2011) 714-724.
27. Lecante, A., Robert, F., Lebrini, M., Roos, C., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 5249 – 5264.
28. Faustin, M., Lebrini, M., Robert, F., Roos, C., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 4095 – 4113.
29. Lebrini, M., Robert, F., Blandinières, P.A., Roos, C., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 2443 – 2460.
30. Lebrini, M., Robert, F., Roos, C., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 847 – 859.
31. Lebrini, M., Robert, F., Roos, C., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 5 (2010) 1698 – 1712.
32. Singh, A., Singh, V. K., Quraishi, M. A., *J. Mater. Environ. Sci.*, 1 (2010) 162-174.
33. Afia, L., Salghi, R., Bazzi, El., Zarrouk, A., Hammouti, B., Bouri, M., Zarrouk, H., Bazzi, L., Bammou, L., *Res Chem Intermed*, 38 (2012) 1707- 1717.
34. Afia, L., Salghi, R., Bazzi, El., Bazzi, L., Errami, M., Jbara, O., Al-Deyab, S. S., Hammouti, B., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 5918 – 5939.
35. Kumar, K. P. V., Pillai, M. S. N., Thusnavis, G. R., *J Mater Sci*, 46 (2011) 5208–5215.
36. Kumar, K. P. V., Pillai, M. S. N., Thusnavis, G. R., *J. Mater. Environ. Sci.*, 1 (2010) 119-128.
37. Kumar, S. L. A., Iniyavan, P., Kumar, M. S., Sreekanth, A., *J. Mater. Environ. Sci.*, 3 (2012) 461-468.
38. Beenakumari, K.S., *Green Chemistry Letters and Reviews*, 4 (2011) 117-120.
39. Gopiraman, M., Sakunthala, P., Kesavan, D., Alexramani, V., Kim, I. S., Sulochana, N., *J. Coat. Technol. Res.*, 9 (2012) 15–26.
40. Al-Otaibi, M.S., Al-Mayouf, A.M., Khan, M., Mousa, A.A., Al-Mazroa, S.A., Alkathlan, H.Z., *Arabian Journal of Chemistry*, (2012) doi:10.1016/j.arabjc.2012.01.015.
41. Ibrahim, T., Habbab, M., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 5357 – 5371.
42. Ibrahim, T. H., Abou Zour, M., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 6442 – 6455.
43. Eddy, N. O., Ameh, P., Gimba, C. E., Ebenso, E. E., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 5815 – 5829.
44. Eddy, N. O., Awe, F. E., Siaka, A. A., Magaji, L., Ebenso, E. E., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 4316 – 4328.
45. Eddy, N. O., Ita, B. I., Dodo, S. N., Paul, E. D., *Green Chemistry Letters and Reviews*, 5 (2012) 43-53.
46. Eddy, N. O., Awe, F., Ebenso, E. E., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 5 (2010) 1996 – 2011.
47. Li, L., Zhang, X., Lei, J., He, J., Zhang, S., Pan, F., *Corrosion Science*, 63 (2012) 82–90.
48. Gerengi, H., Sahin, H. I., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51 (2012) 780 –787.
49. Pereira, S. S. de A. ã. A., Pêgas, M. M., Fernández, T. L., Magalhães, M., Schöntag, T. G., Lago, D. C., Senna, L. F. D, D’Elia, E., *Corrosion Science*, 65 (2012) 360–366.
50. El bribri, A., Tabyaoui, M., El Attari, H., Boumhara, K., Sinititi, M., Tabyaoui, B., *J. Mater. Environ. Sci.*, 2 (2011) 156-165.
51. Kalaiselvi, P., Chellammal, S., Palanichamy, S., Subramanian, G., *Materials Chemistry and Physics*, 120 (2010) 643–648.
52. Ibrahim, T. H., Chehade, Y., Abou Zour, M., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 6542 – 6556.
53. Subhashini, S., Rajalakshmi, R., Prithiba, A., Mathina, A., *E-Journal of Chemistry*, 7 (2010) 1133-1137.
54. Gunavathy, N., Murugavel, S. C., *E-Journal of Chemistry*, 9 (2012) 487- 495.
55. Saratha, R., Vasudha, V.G., *E-Journal of Chemistry*, 7 (2010) 677-684.
56. Kumar, K.P.V., Pillai, M.S.N., Thusnavis, G. R., *Portugaliae Electrochimica Acta*, 28 (2010) 373-383.
57. Elyn Amira, W.A.W., Rahim, A.A., Osman, H., Awang, K., Bothi Raja, P., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6 (2011) 2998 – 3016.

58. Behpour, M., Ghoreishi, S.M., Khayat Kashani, M., Soltani, N., *Corrosion Science*, 53 (2011) 2489–2501.
59. Satapathy, A.K., Gunasekaran, G., Sahoo, S.C., Amit, K., Rodrigues, P.V., *Corrosion Science*, 51 (2009) 2848–2856.
60. Shyamala, M., Kasthuri, P. K., *International Journal of Corrosion*, Volume 2012 (2012), doi:10.1155/2012/852827.
61. Garg, U., Tak, R. K., *E-Journal of Chemistry*, 7 (2010) 1220-1229.
62. Yaro, A. S., Khadom, A. A., Ibraheem, H. F., *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 58 (2011) 116–124.
63. Ashassi-Sorkhabi, H., Seifzadeh, D., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 1 (2006) 92-98.
64. Nahlé, A., Abu-Abdoun, I., Abdel-Rahman, I., Al-Khayat, M., *International Journal of Corrosion*, Volume 2010 (2010) doi:10.1155/2010/460154.
65. Inzunza, R.G., Salas, B.V., Kharshan, R., Furman, A., SchorrWiener, M., *International Journal of Corrosion* Volume 2012 (2012) doi:10.1155/2012/980654.
66. Dong, L., Yuanhua, L., Yigang, D., Dezhi, Z., *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 58 (2011) 205–210.
67. Soltani, N., Tavakkoli, N., Khayat Kashani, M., Jalali, M. R., Mosavizade, A., *Corrosion Science*, 62 (2012) 122-135.
68. Shah, A.M., Rahim, A.A., Yahya, S., Raja, P.B., Hamid, S.A., *Pigment & Resin Technology*, 40 (2011) 118–122.
69. Nkiko, M.O., Bamgbose, J.T., *Portugaliae Electrochimica Acta*, 29 (2011) 419-427.
70. Abiola, O.K., Odin, E.M., Olowoyo, D.N., Adeloye T.A.; *Bull. Chem. Soc. Ethiop.*, 25(2011) 475-480.
71. Singh, A., Singh, V.K., Quraishi, M. A., *International Journal of Corrosion* Volume 2010 (2010) doi:10.1155/2010/275983.
72. Torresa, V.V., Amado, R.S., Faia de Sá, C., Fernandez, T.L., Riehl, C.A. da S., Torres, A.G., D’Elia, E., *Corrosion Science*, 53 (2011) 2385–2392.
73. Lebrini, M., Robert, F., Lecante, A., Roos, C., *Corrosion Science*, 53 (2011) 687–695.
74. El-Etre, A.Y., *Materials Chemistry and Physics*, 108 (2008) 278–282.
75. El-Etre, A.Y., *Journal of Colloid and Interface Science*, 314 (2007) 578–583.
76. El-Etre, A.Y., *Applied Surface Science*, 252 (2006) 8521–8525.
77. Li, X.H., Deng, S.-D., Fu, H., *J Appl Electrochem*, 40 (2010) 1641–1649.
78. Garai, S., Garai, Sa., Jaisankar, P., Singh, J.K., Elango, A., *Corrosion Science*, 60 (2012) 193–204.
79. Saratha, R., Priya, S.V., Thilagavathy, P., *E-Journal of Chemistry*, 6 (2009), 785-795.
80. Shyamala M., Kasthuri, P. K., *International Journal of Corrosion* Volume 2011(2011) doi:10.1155/2011/129647.
81. Obot, I.B., Obi-Egbedi, N.O., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 4 (2009) 1277 – 1288.
82. Obot, I.B., Obi-Egbedi, N.O., Umoren, S.A., Ebenso, E.E., *Int. J. Electrochem. Sci.*, 5 (2010) 994 – 1007.
83. Obot, I.B., Umoren, S.A., Obi-Egbedi, N.O., *J. Mater. Environ. Sci.*, 2 (1) (2011) 60-71.
84. Umoren, S.A., Ebenso, E.E., *Pigment & Resin Technology*, 37 (2008) 173–182.
85. Umoren, S.A., Obot, I.B., Ebenso, E.E., *E-Journal of Chemistry*, 5 (2008) 355-364.
86. Orubite-Okorosaye, K., Jack, I. R., Ochei, M., Akaranta, O., *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 11 (2007) 27

(2013); <http://www.jmaterenvirosci.com>