

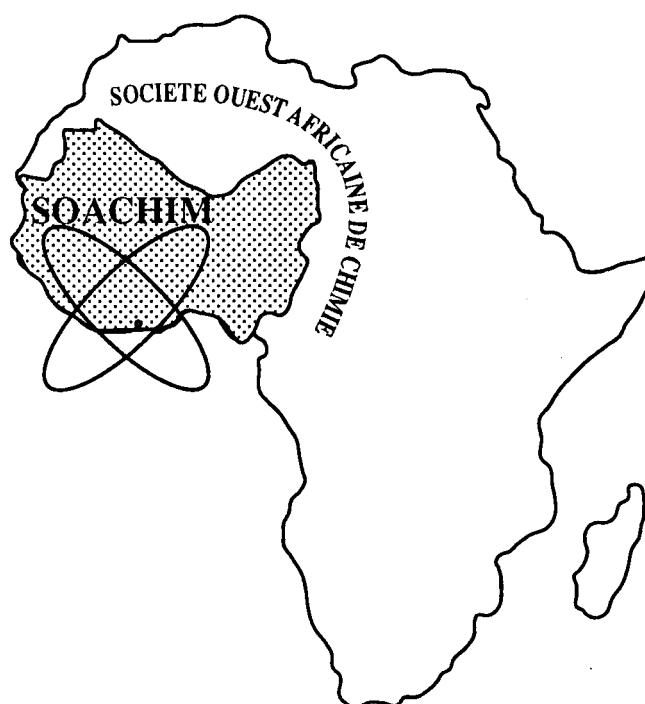
# *Valorisation des tufs volcaniques argileux de Bafoundou comme inhibiteurs de corrosion du fer à béton Fe E400*

**Diadioly Gassama, Serigne Massamba Seck, Ismaila Yade,  
Modou Fall, Mouhamadou Bassir Diop**

*Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*

*J. Soc. Ouest-Afr. Chim. (2014), 038 : 64- 72*

19<sup>ème</sup> Année, Décembre 2014



ISSN 0796-6687

Code Chemical Abstracts : JSOCF2

Cote INIST (CNRS France) : <27680>

Site Web: <http://www.soachim.org>

## **Valorisation des tufs volcaniques argileux de Bafoundou comme inhibiteurs de corrosion du fer à béton E400.**

**Diadioly Gassama<sup>1,2</sup>, Serigne Massamba Seck<sup>2</sup>, Ismaïla Yade<sup>2</sup>, Modou Fall<sup>2\*</sup>, Mouhamadou Bassir Diop<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *UFR Sciences & Technologies, Université de Thiès, Thiès, Sénégal.*

<sup>2</sup> *Laboratoire de Chimie Physique Organique et d'Analyses Environnementales, Département de Chimie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal*

<sup>3</sup> *Institut des Sciences de la Terre (IST), BP: 5396, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.*

(Reçu le 24/04/2014 – Accepté après corrections le 27/01/ 2015)

**Résumé :** Le comportement du fer E400, matériau d'usage général de construction métallique au Sénégal, a été étudié dans l'eau salée en présence des tufs volcaniques argileux de Bafoundou du Sénégal Oriental, comme inhibiteur de corrosion. Le pouvoir protecteur de ce composé a été évalué par des méthodes électrochimiques (courbes de polarisation stationnaire et spectroscopie d'impédance électrochimique), à différentes teneurs en inhibiteur.

Nous avons d'abord examiné l'effet de la saturation de l'atmosphère en humidité par l'eau pure, puis par une solution de NaCl 0,5 M produisant un "brouillard salin". Les mesures révèlent en atmosphère humide une forte corrosion du fer E400, celle-ci étant accélérée dans le brouillard salin. Nous avons ensuite envisagé de tester l'argile précitée en tant que qu'inhibiteur de corrosion aqueuse. Les essais électrochimiques montrent que les valeurs des paramètres de corrosion varient avec la teneur de l'argile. Une efficacité inhibitrice optimale d'environ 60% est obtenue pour cette substance, démontrant ainsi le caractère inhibiteur.

**Mots-clés:** corrosion, argile, acier E400, tufs.

## **Exploitation of clayey volcanic tuffs of Bafoundou as corrosion inhibitors for E400 concrete iron.**

**Abstract :** The behavior of E400 iron, a constructional steel widely used in Senegal, was studied in salt water in the presence of clayey volcanic tuffs of Bafoundou in Oriental Senegal, as corrosion inhibitor. The protection efficiency of this compound was electrochemically assessed (polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy) at various inhibitor contents.

We first examined the effect of a humidity-saturated atmosphere and a simulated marine atmosphere, obtained above a 0.5 M NaCl solution producing a "salt spray". The measurements revealed a strong corrosion of E400 steel in the humid atmosphere, which is enhanced in the salt spray. We then tested the clay as aqueous corrosion inhibitor. The electrochemical measurements showed that the corrosion parameters varied with the clay content. An optimal inhibitive efficiency of nearly 60 % was obtained for this substance, demonstrating its inhibitive character.

**Keywords:** corrosion, clay, E400 steel, tuffs.

---

\* **Corresponding author.** E-mail: modou.fall@ucad.edu.sn

## 1. Introduction

L'emploi du fer à béton en tant que matériau de construction dans le bâtiment, les ponts et les ouvrages d'art, présente de nos jours un intérêt majeur pour tous les utilisateurs. De nombreuses études révèlent l'existence d'une grande variété d'oxydes, comme par exemple les chromates, nitrites, etc. identifiés comme inhibiteurs de corrosion des aciers dans des environnements aqueux <sup>[1]</sup>.

En milieu neutre, l'action de l'inhibiteur s'appuie sur l'oxygène et nécessite par conséquent sa présence dans le milieu. Les risques d'une attaque diminuent considérablement si l'on empêche l'oxygène d'accéder à la surface (inhibition cathodique). Alternativement, on peut diminuer la vitesse de réaction partielle anodique en rendant le métal passif (inhibition anodique) <sup>[2,3]</sup>.

En raison de la toxicité de la plupart des oxydes traditionnellement employés, la nécessité de trouver des composés plus respectueux de l'environnement s'est imposée aux chercheurs. C'est ainsi que des inhibiteurs organiques, à base de benzoate de sodium et d'autres sels d'acides aromatiques substitués et d'acides gras ont été proposés par Kuznetsov et al. <sup>[4-7]</sup>. La plupart de ces inhibiteurs se sont avérés efficaces à partir d'une certaine "concentration minimale critique" <sup>[8]</sup>. Plus récemment, certains minéraux sont de plus en plus utilisés comme inhibiteurs de la corrosion d'aciers. Il s'agit de différentes classes d'argiles utilisées sous forme de nanocomposites incorporés dans des revêtements <sup>[9,10]</sup>. D'autres études ont porté sur la corrosion du fer en milieu aqueux saturé de briques d'argiles <sup>[11]</sup>, de pipelines en acier dans des sols argileux <sup>[12]</sup> ou encore sur l'inhibition de la corrosion du zinc par un minerai argileux échangeur de calcium <sup>[13]</sup>. Dans ce travail, nous examinerons le comportement électrochimique de l'acier E400 en milieu aqueux à une concentration en NaCl voisine de celle de l'eau de mer, en présence de tufs, produit volcanique argileux prélevé à Bafoundou au Sénégal Oriental. L'objectif visé consiste à établir la capacité des tufs sélectionnés à assurer une inhibition efficace de la corrosion du matériau de construction E400.

## 2. Conditions et méthodes expérimentales

Les mesures électrochimiques ont été effectuées sur des échantillons prélevés sur des barres en acier E400 de diamètre 10 mm et de longueur 12 m, de composition chimique massique centésimale : C = 0,24, P = 0,055, S = 0,055, N = 0,013 et du Fe ; fournis par le Pôle de Développement Industriel (PDI), Dakar, (Sénégal). Les échantillons se

présentent sous forme de cylindres pleins, découpés en rondelles à l'aide d'une cisaille universelle Gruchoir, puis enrobés dans des résines de type "Epoxy Steel". La surface des rondelles en contact avec la solution est de 0,785 cm<sup>2</sup>. Avant chaque essai, l'électrode de travail est polie au papier abrasif de granulométrie variable (600, 800, 1000 et 1200 μm) puis rincée à l'eau distillée et séchée à l'air libre.

Les mesures de taux de corrosion ont été effectuées sur des échantillons mis dans une chambre d'exposition à atmosphère d'air saturée en humidité par l'eau d'une part, et à atmosphère d'air saturée en humidité par une solution de chlorure de sodium, appelée "brouillard salin" d'autre part, et hermétiquement fermée. Ce dispositif est exposé à la température ambiante du laboratoire. Les échantillons sont retirés puis photographiés et rapidement remis dans la chambre d'exposition aux intervalles de temps réguliers fixes de 5 jours. La surface de l'échantillon est totalement recadrée par le logiciel Photoshop CS5, alors que le logiciel Mesurim est utilisé pour mesurer la surface corrodée rapportée à la surface totale de l'échantillon, initialement indemne.

Les mesures électrochimiques ont été effectuées à l'aide d'un montage à trois électrodes : une grille en platine comme contre-électrode, une électrode de référence au calomel saturée (ECS, +247 mV/ENH à 25 °C), et l'électrode de travail constituée de l'échantillon. Expérimentalement, les mesures sont effectuées au moyen d'un potentiostat – galvanostat μAutolab type III + FRA 2 piloté par le logiciel GPES (General Purpose for Electrochemical System) ou FRA (Frequency Response Analyzer) qui permet la polarisation de l'électrode de travail. La corrosion de l'acier a été étudiée par la méthode potentiodynamique, la vitesse de balayage étant fixée à 0,5 mV/s et le temps d'équilibre à 120 secondes. L'électrode de travail est maintenue préalablement en immersion au potentiel de corrosion libre pendant une heure sous agitation magnétique. La détermination des paramètres électrochimiques ( $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$ ,  $R_p$ ,  $b_a$  et  $b_c$ ) à partir des courbes de polarisation de Tafel, se fait à l'aide d'une régression non linéaire par le logiciel GPES selon l'équation de Stern-Geary après correction de la chute ohmique. L'efficacité inhibitrice est calculée à partir de la formule suivante <sup>[14]</sup>:

$$IE = \frac{i_{corr}^0 - i_{corr}}{i_{corr}^0} \times 100 \quad (1)$$

$i_{corr}^0$  et  $i_{corr}$  étant les densités de courant de corrosion sans et avec inhibiteur, respectivement.

Le tracé des diagrammes d'impédance électrochimique a été effectué à l'aide du Logiciel FRA II avec une amplitude de signal de 10 mV. Le domaine de fréquence exploré varie de 100 kHz à 100 mHz. L'efficacité inhibitrice a été évaluée à l'aide de l'équation <sup>[14]</sup>:

$$IE = \frac{R_p - R_p^0}{R_p} \times 100 \quad (2)$$

$R_p^0$  et  $R_p$  représentant la résistance de transfert de charge en absence et en présence d'inhibiteur, respectivement.

Dans le présent travail, nous avons évalué le pouvoir protecteur d'un inhibiteur naturel, les tufs de Bafoundou (Sénégal) dont la composition chimique est donnée dans le **tableau I**.

Les autres caractéristiques des tufs telles que les propriétés mécaniques, cristallographiques et morphologiques sont disponibles dans la littérature <sup>[15]</sup>.

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1. Taux de corrosion

Le taux de corrosion sera assimilé au rapport (en pourcentage) de la surface rouillée sur la surface totale de l'échantillon. L'exposition à une atmosphère d'air saturée en humidité donne un pourcentage de surface corrodée de presque 80% au bout de 30 jours.

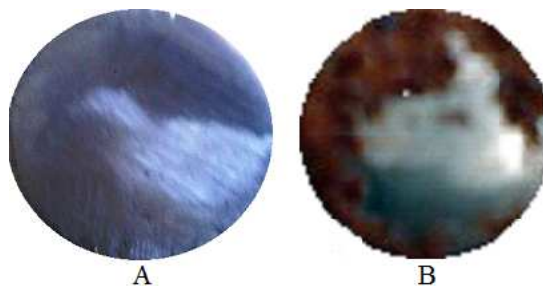
En guise d'exemples nous avons représenté sur les **figures 1-A et B** les morphologies du substrat nu et corrodé après 30 jours d'exposition dans la chambre. Les zones sombres sur la **figure 1 B** correspondent aux parties rouillées.

Dans la chambre d'essais, la vaporisation d'une solution salée (au lieu de l'eau distillée) produit une atmosphère plus propice à la corrosion ("brouillard salin") qui attaque la pièce testée. Dans ces conditions, le phénomène de corrosion est accéléré. Afin d'examiner l'impact des ions chlorures sur le taux de corrosion, nous avons tracé le taux de corrosion en fonction du temps, le matériau étant exposé à "un brouillard salin" produit par une solution aqueuse de NaCl 0,5 M. Nous remarquons cette fois-ci qu'au bout de 15 jours, la presque totalité de la surface de E400 est attaquée. Ce matériau subit apparemment une corrosion généralisée, car la totalité de la surface est couverte de rouille au bout de 15 jours seulement. L'influence des ions chlorures sur le matériau est donc manifeste, la vitesse de dégradation du métal étant augmentée par la présence de ces ions Cl<sup>-</sup>. Selon la littérature <sup>[16,17]</sup>, le mécanisme d'oxydation du fer est caractérisé par une linéarité de l'épaisseur de la couche corrodée avec  $t^n$ . La valeur de l'exposant n permet de déterminer l'étape limitante dans le mécanisme de la réaction de corrosion. Dans le cas de la corrosion humide, la pente des courbes Ln S en fonction de Ln t (**figure 2**), est égale à 0,87. Cette valeur, plutôt proche de 1, est compatible avec une évolution quasi-linéaire de S avec le temps. Ce résultat indique un mécanisme contrôlé par la réaction d'interface. Exposé au "brouillard salin", la cinétique de la corrosion de l'acier E400 est plus complexe et révèle une pente égale à 0,29. Une valeur similaire de n (inférieure à 0,5) a déjà été obtenue dans la littérature <sup>[18]</sup> et interprétée comme résultant d'une baisse du coefficient de diffusion de l'oxygène dans le métal car la couche de rouille devient de plus en plus compacte avec le temps.

**Tableau I:** Composition chimique des tufs de Bafoundou (en % massique) <sup>[15]</sup>

Composé	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PAF*	Silice réactive
% (mass)	69,7	13,3	10,1	0,1	0,1	1,3	0,6	0,8	0,1	0,03	4	8,9

\* PAF : pertes au feu



**Figure 1:** Morphologies d'échantillons d'acier Fe 400 avant introduction dans l'enceinte (A) puis après 30 jours d'exposition à une atmosphère saturée en humidité (B). Les parties rouillées sont en marron.

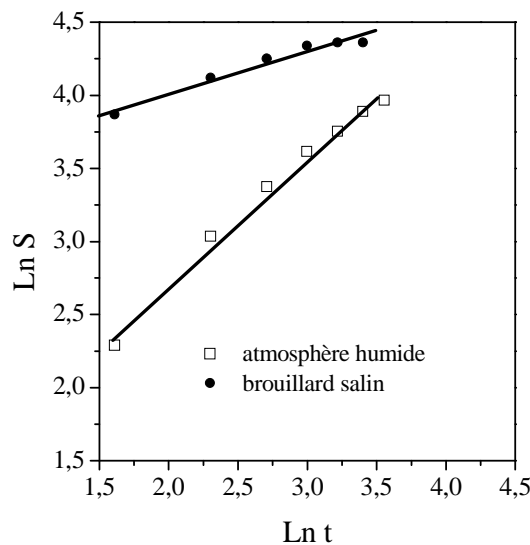
Cette étude montre donc que l'exposition de l'acier E400 au brouillard salin (à proximité des zones marines par exemple) modifie non seulement le niveau de corrosion, mais également la cinétique de la réaction par rapport aux résultats obtenus lors d'une exposition dans une atmosphère non saline. C'est partant de ces constats que nous avons testé le pouvoir inhibiteur de corrosion d'une argile pour ce métal dans une solution salée à 0,5 M.

Les courbes de polarisation stationnaires, en absence et en présence des différentes concentrations en inhibiteur, tracées après 1 heure d'immersion au potentiel de libre corrosion et sous agitation, sont représentées dans la **figure 3**.

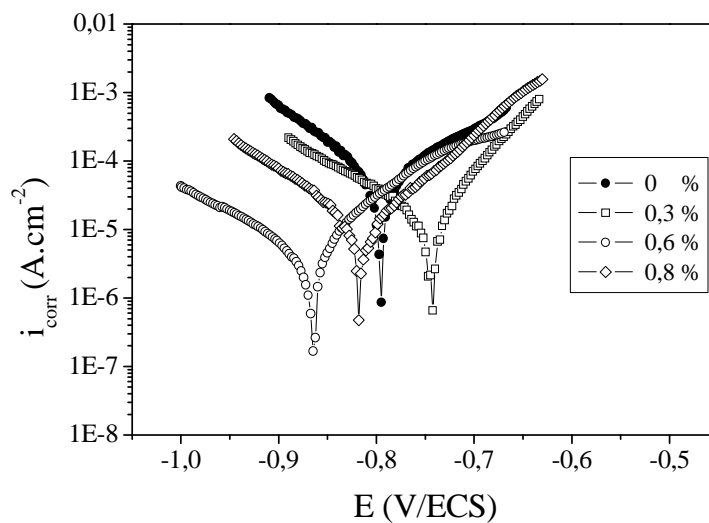
L'examen de cette figure permet de noter que l'addition d'inhibiteur entraîne une diminution importante du courant de corrosion pour des teneurs inférieures à 0,6%, les potentiels de corrosion devenant de plus en plus anodiques. Au-delà, les intensités de corrosion augmentent alors que le potentiel de corrosion se déplace dans le sens cathodique.

### 3.2. Méthodes électrochimiques

#### 3.2.1. Courbes de polarisation



**Figure 2 :** Variation de la surface corrodée ( $\text{mm}^2$ ) avec le temps (jours) pour les différents milieux d'exposition.



**Figure 3 :** Courbes de polarisation stationnaire pour l'acier E400 dans l'eau salée (NaCl 0,5 M), à différentes concentrations en inhibiteur.

Afin de voir clairement l'effet de l'additif (les tufs) sur la cinétique de corrosion, nous avons représenté dans le **tableau II** les densités de courant recueillies dans le domaine anodique ( $E = -0,7$  V/ECS) et dans le domaine cathodique ( $E = -0,9$  V/ECS) pour tous les pourcentages testés. On constate qu'en présence de l'inhibiteur; les intensités des courants anodique et cathodique sont diminuées et atteignent un minimum autour de 0,5 %. De plus, les valeurs du potentiel de corrosion sont très légèrement déplacées vers des valeurs moins nobles. Ces constatations confirment le caractère mixte de l'inhibiteur et montrent clairement que ces tufs réduisent la dissolution anodique du métal et retardent la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré.

Dans le domaine anodique, il y a probablement un changement du mécanisme de corrosion de l'acier dans la solution corrosive en présence de l'inhibiteur. On note en effet une diminution de la densité de courant pour toutes les concentrations inférieures à 0,6% comparativement au milieu sans inhibiteur. D'autre part, on note l'apparition d'un palier de courant dans un large domaine de potentiel (de l'ordre de 250 mV/ECS) au voisinage de la teneur optimale (0,5-0,7%) des tufs. Cependant la longueur de ce palier de courant diminue lorsque le pouvoir inhibiteur diminue. Ceci peut être expliqué par la formation d'un film d'inhibiteur à caractère protecteur à la surface métallique. Au delà de ce palier, la valeur de la densité de courant anodique augmente rapidement, dû probablement au développement d'une corrosion localisée ou à un décrochage du film inhibiteur de la surface du métal, ce qui augmente la surface active. En effet, les inhibiteurs anodiques ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de la densité de courant sur ces surfaces. Il peut conduire à un processus de corrosion localisée, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif. Les inhibiteurs anodiques agissent par formation d'une couche passive et doivent être utilisés avec précaution car ils peuvent rendre perforante une corrosion au départ généralisée <sup>[19]</sup>. Dans le domaine des faibles potentiels anodiques, la densité du courant anodique augmente légèrement avec la surtension. Lorsque le potentiel de désorption ( $E_d$ ) (ou de non polarisabilité) <sup>[20-22]</sup> est dépassé, les tufs n'ont presque plus d'effet sur les courbes anodiques ; l'intensité de courant anodique augmente alors rapidement et le métal se dissout avec une pente plus prononcée dans la région des potentiels élevés.

L'augmentation brusque de la densité de courant anodique, après le potentiel de désorption, est attribuée à la désorption des molécules de tufs adsorbées à la surface de l'acier. Ce qui montre nettement que le mode d'inhibition de ce composé dépend du potentiel d'électrode. On décrit alors le caractère de protection observé comme étant dû à la formation d'une couche de l'inhibiteur adsorbé à la surface de l'électrode <sup>[23]</sup>. Remarquons aussi que les valeurs du potentiel de désorption sont presque constantes (autour de  $-600$  mV/ECS) pour les différentes teneurs en tufs étudiées. Cela nous amène à penser que les valeurs du potentiel de désorption des tufs sont légèrement modifiées par le recouvrement des molécules de l'inhibiteur. Ce résultat est en accord avec la littérature <sup>[24]</sup>.

Néanmoins au-delà de la teneur optimale en inhibiteur, on observe une augmentation de la vitesse de corrosion. Ce phénomène peut être dû à la formation de dépôts de produits insolubles de corrosion, les conditions locales étant considérablement modifiées et les mécanismes d'endommagement peuvent évoluer et donc la poursuite du phénomène de corrosion <sup>[25]</sup>. Cette poursuite de corrosion au-delà de la concentration optimale de l'argile entraîne un nouveau déplacement du potentiel vers les valeurs anodiques.

Les courbes de polarisation cathodique montrent une diminution des densités de courant. Cependant, quelles que soient les proportions de tufs, les densités de courant sont assez comparables. Pour un potentiel de  $-0,900$  V/ECS, les valeurs de la densité de courant en présence de l'inhibiteur sont comprises entre  $6,40$  et  $152 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  alors qu'en l'absence d'inhibiteur la valeur est de  $653 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ . La modification des pentes de Tafel cathodiques, en absence et en présence de l'inhibiteur, montre que la réaction de réduction à la surface de l'acier n'est pas modifiée par l'addition de ces tufs et qu'elle se fait selon un mécanisme d'activation pure. L'inhibiteur s'adsorbe d'abord sur la surface de l'acier avant d'agir par simple blocage de ses sites actifs. Les inhibiteurs cathodiques induisent une augmentation de la surtension cathodique, et réduisent donc le courant de corrosion. Si ces inhibiteurs n'arrêtent pas complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée.

Le pouvoir inhibiteur augmente avec la concentration des substances et atteint une valeur maximale de 56,93% pour une teneur de 0,6 % en tufs. Ce taux d'inhibition est satisfaisant et modifie le comportement électrochimique de l'acier au voisinage de  $E_{\text{corr}}$ . L'ensemble des paramètres

électrochimiques tirés de ces courbes sont donnés dans le **tableau III**.

**3.2.2. Etude par spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)**

Nous avons également étudié la corrosion du matériau E400 par SIE, en présence et en l'absence

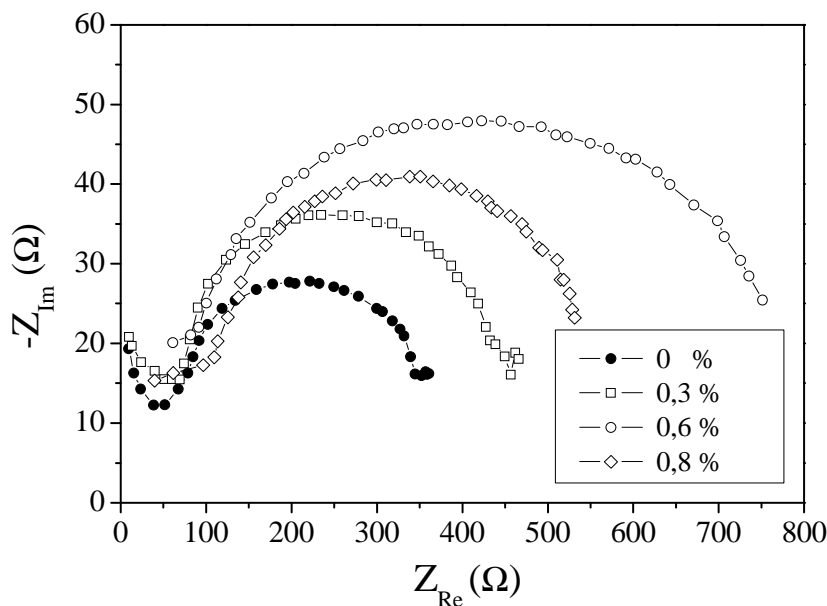
de tufs. La **figure 4** représente les diagrammes d'impédance électrochimique dans le plan de Nyquist de l'acier dans l'eau salée (NaCl 0,5 M) à différentes proportions d'inhibiteur, enregistrés après 1 h d'immersion à température ambiante au potentiel d'abandon dans la gamme de fréquence 100 kHz - 100 mHz.

**Tableau II** : Densité de courant (en  $\mu\text{A cm}^{-2}$ ) pour un potentiel de -0,9 V/ECS (domaine cathodique) et de -0,7 V/ECS (domaine anodique) pour les différents teneurs en inhibiteur.

	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
E = -0,9 V/ECS	650	260	150	120	56	6	35	78
E = -0,7 V/ECS	290	78	71	82	85	150	200	240

**Tableau III** : Paramètres électrochimiques issus des courbes intensité-potential de l'acier en absence et en présence de tufs.

C (%)	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A/cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	$b_c$ (mV/dec)	$b_a$ (mV/dec)	$V_{\text{corr}}$ (mm/an)	IE (%)
0	-797	18,798	295,1	103	110	0,4179	-
0,20	-764	16,496	335,4	104	66	0,3875	12,25
0,30	-741	16,013	347,2	114	49	0,3772	14,81
0,40	-786	11,233	493,4	102	79	0,2639	40,24
0,50	-809	9,331	561,8	82	78	0,2027	50,36
0,60	-864	8,096	684,7	113	92	0,1925	56,93
0,70	-833	10,521	527,1	110	99	0,2385	44,03
0,80	-818	11,977	508,9	78	79	0,2345	36,29



**Figure 4**: Diagrammes d'impédance dans le plan de Nyquist de l'acier E400 dans l'eau salée (NaCl 0,5 M) au potentiel d'abandon, à différentes concentrations en inhibiteur. Temps d'immersion : 1 h.

Dans le plan de Nyquist, les diagrammes d'impédances en présence d'inhibiteur montrent l'apparition de deux boucles capacitives indiscernables avec une importante augmentation de la résistance de polarisation. Aux hautes fréquences, la taille de la boucle capacitive augmente avec la concentration. Ceci est attribué à la formation d'un film d'inhibiteur qui a un effet barrière contre les ions agressifs [26].

Aux basses fréquences, l'addition de l'inhibiteur entraîne une augmentation de la valeur de la résistance de polarisation  $R_p$  (la taille de la boucle entre la haute fréquence et la basse fréquence) qui présente une variation non monotone en fonction de la teneur en inhibiteur. La plus forte valeur est obtenue pour 0,6% ( $573 \Omega \text{ cm}^2$ ) (**tableau IV**). Ceci peut être attribué au transfert de charge [27].

Nous constatons, au vu du **tableau IV**, que la résistance de transfert augmente jusqu'à la teneur de 0,6 %, puis diminue au fur et à mesure que la teneur en inhibiteur augmente. L'inhibition en milieu neutre semble être complexe, en raison de la réaction du fer avec l'oxygène et l'eau qui peut donner naissance à plusieurs produits de corrosion (différents hydroxydes de fer), ce qui complique les processus d'adsorption.

Afin de caractériser l'interface acier/solution, nous avons utilisé le circuit électrique équivalent de Randles, illustré par la **figure 5**.

Les valeurs de la résistance de transfert de charge ( $R_{ct}$ ) ainsi que celles de l'efficacité inhibitrice (IE) de la substance avec les concentrations sont reportées sur la **figure 6**.

On constate qu'il existe pour l'inhibiteur, une teneur optimale pour laquelle l'efficacité inhibitrice atteint sa valeur maximale. Le maximum de l'efficacité inhibitrice en présence de tufts est de 57%. Cette valeur est en parfaite concordance avec celles obtenues avec les courbes de polarisation de Tafel.

Afin de déterminer et de comparer les constantes de temps, nous avons transformé les valeurs des CPE en capacités pures (C) en utilisant l'équation suivante [28,29].

$$Q = R^{-n-1} C^n$$

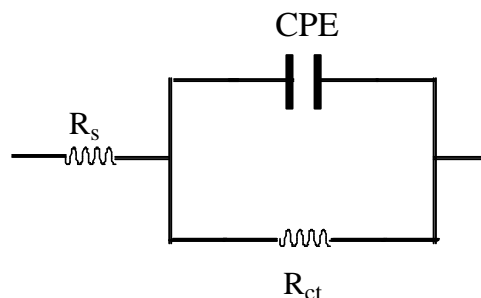
La constante de temps ( $\tau$ ) est calculée par [28,29]:

$$\tau = RC$$

Les résultats des calculs de constantes de temps sont donnés dans le **tableau IV**. Nous obtenons des valeurs quasiment constantes, proches de 0,1 s, indiquant que le circuit électrique équivalent est associé avec un processus de charge/décharge lent [28,30].

**Tableau IV:** Résultats des mesures de SIE au potentiel d'abandon en absence et en présence de tufts.

C (%)	$R_s$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_{ct}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE ( $\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	n	C ( $\mu\text{F} \text{ cm}^{-2}$ )	$\tau$ (s)	IE (%) (SIE)	IE (%) (Tafel)
0	5,96	245	568	0,91	467	0,115	-	-
0,2	6,76	279	497	0,87	370	0,103	12,17	12,25
0,3	6,80	286	484	0,85	341	0,098	14,32	14,81
0,4	7,64	406	378	0,89	300	0,122	39,63	40,24
0,5	7,96	497	277	0,88	211	0,105	50,65	50,36
0,6	8,12	573	238	0,85	167	0,096	57,22	56,93
0,7	7,72	440	339	0,82	223	0,098	44,32	44,03
0,8	7,49	386	372	0,88	285	0,110	36,50	36,29



**Figure 5:** Circuit électrique permettant la modélisation des spectres d'impédance.  $R_s$  et  $R_{ct}$  désignent les résistances de la solution et de transfert de charge et CPE est la capacité de double couche, simulée ici en tant qu'élément de phase constante.



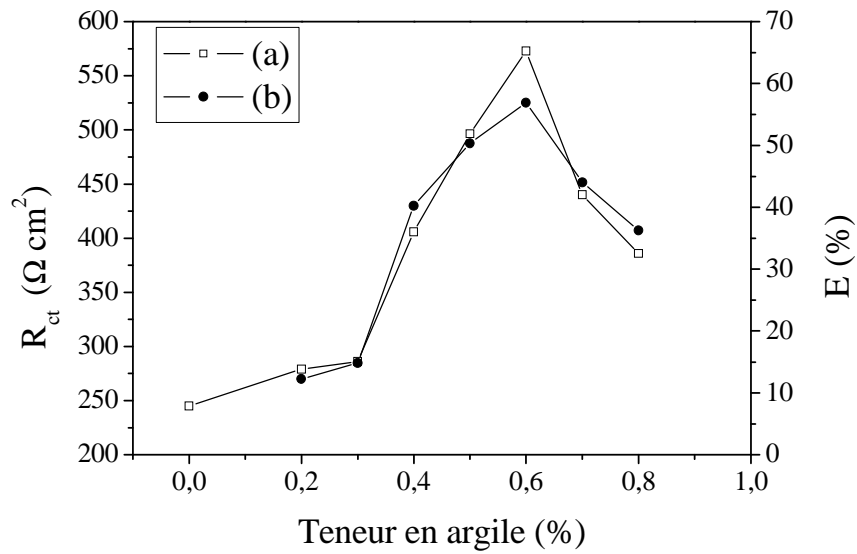


Figure 6: Variation de la résistance de polarisation (a) et l'efficacité inhibitrice (b) avec la teneur en inhibiteur.

#### 4. Conclusion

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'influence de l'inhibition de la corrosion de l'acier E400 dans l'eau salée en vue d'une protection des installations contre la corrosion. Cette étude a été réalisée par analyse de surface et par voie électrochimique.

Tout d'abord, l'étude de la surface a montré que l'acier E400 se corrode rapidement. La vitesse est plus élevée dans le brouillard salin comparé à l'atmosphère saturée en humidité. La corrodabilité de l'acier ordinaire E400 a également été étudiée par polarisation (méthode de Tafel) et par spectroscopie d'impédance électrochimique dans l'eau salée (concentration voisine de celle de l'eau de mer). L'étude a montré que la vitesse de corrosion est réduite d'environ 60% grâce à l'utilisation d'un inhibiteur naturel, les tufts de Bafoundou. Les résultats obtenus montrent que cet inhibiteur agit en tant qu'inhibiteur mixte, présente une efficacité de l'ordre de 60% pour une concentration optimale de 0,6 %. L'évolution des diagrammes d'impédance dans le plan Nyquist en fonction des concentrations en inhibiteur naturel confirme la formation d'une couche protectrice, qui se traduit par l'augmentation de la résistance de transfert de charge conjointement à une diminution de la capacité de double couche.

#### Bibliographie

[1] Agarwal P., Landolt D., "Effect of anions on the efficiency of aromatic carboxylic acid corrosion inhibitors in near neutral media: Experimental investigation and theoretical modeling", *Corros. Sci.* (1998) 40, 673-691.

- [2] Trabellini G., "Corrosion Mechanisms", F. Mansfeld Editor, Marcel Dekker, (1987) 119-163, New York,
- [3] Landolt D., "Corrosion et chimie de surfaces des métaux", *Traité des Matériaux*, vol. 12, 3<sup>rd</sup> Ed., Presses Polytechniques Universitaires Romandes (1997) 62, 492-495, Lausanne.
- [4] Kuznetsov Y.I., "Organic Inhibitors of Corrosion of Metals", Plenum Press, (1996), New York.
- [5] Kuznetsov Y.I., Andreev N.N., *Zastch. Met.* (1987) 23, 495-498 (en russe).
- [6] Kuznetsov Y.I., *Zastch. Met.* (1990) 26, 954-964 (en russe).
- [7] Andreev N.N., Lapshina S.V., Kuznetsov Y.I., *Zastch. Met.* (1992) 28, 1017-1020 (en russe).
- [8] Reinhard G., Radtke, M., Rammelt, U., "On the role of the salts of weak acids in the chemical passivation of iron and steel in aqueous solutions", *Corros. Sci.* (1992) 33, 307-313.
- [9] Navarchian A.H., Joulazadeh M., Karimi F., "Investigation of corrosion protection performance of epoxy coatings modified by polyaniline/clay nanocomposites on steel surfaces", *Prog. Org. Coat.* (2014) 77, 347-353.
- [10] Motte C., Poelman M., Roobroeck A., Fedel M., Deflorian F., Olivier M.-G., "Improvement of corrosion protection offered to galvanized steel by incorporation of lanthanide modified nanoclays in silane layer", *Prog. Org. Coat.* (2012) 74, 326-333.
- [11] Martin F.A., Bataillon C., Schlegel M.L., "Corrosion of iron and low alloyed steel within a water saturated brick of clay under anaerobic deep geological disposal conditions: An integrated experiment", *J. Nucl. Mat.* (2008) 379, 80-90.
- [12] Yan M., Sun C., Xu J., Dong J., Ke W., "Role of Fe oxides in corrosion of pipeline steel in a red clay soil", *Corros. Sci.* (2014) 80, 309-317.
- [13] Ait Aghzzaf A., Rhouta B., Rocca E., Khalil A., Steinmetz J., "Corrosion inhibition of zinc by calcium

- exchanged beidellite clay mineral: A new smart corrosion inhibitor", *Corros. Sci.* (2014) 80, 46-52.
- [14] Doubi M., Dermaj A., Ramli H., Chebabe D., Hajjaji N., Srhir A., "Inhibition de la corrosion d'un acier E24 dans des eaux d'irrigation agricole", ScienceLib Editions Mersenne, Mersenne, (2013) 5 (130110) ISSN 2111-4706.
- [15] Diop M.B., Grutzeck M.W., "Low temperature process to create brick", *Const. Build. Mater.* (2008) 22, 1114-1121.
- [16] Lapuerta S., "Etude de la corrosion du fer à l'interface de différents milieux (eau, air), soumis à l'irradiation de protons", Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard de Lyon, 2005.
- [17] Graedel T.E., Frankenthal R.P., "Corrosion Mechanisms for Iron and Low Alloy Steels Exposed to the Atmosphere", *J. Electrochem. Soc.* (1990) 137, 2385-2395.
- [18] Chen Y.Y., Tzeng H.J., Wei L.I., Wang L.H., Oung J.C., Shih H.C., "Corrosion resistance and mechanical properties of low-alloy steels under atmospheric conditions", *Corros. Sci.* (2005) 47, 1001-1021.
- [19] Moran F., "Inhibiteurs de corrosion et traitement des eaux", *Techniques de l'ingénieur, COR1000*.
- [20] Bentiss F., Bouanis M., Mernari B., Traisnel M., Lagrenée M., "Effect of iodide ions on corrosion inhibition of mild steel by 3,5-bis(4-methylthio-phenyl)-4H-1,2,4-triazole in sulfuric acid solution", *J. Appl. Electrochem.* (2002) 32, 671-678.
- [21] Heusler K.E., Cartledge G.H., "The Influence of Iodide Ions and Carbon Monoxide on the Anodic Dissolution of Active Iron", *J. Electrochem. Soc.* (1961) 108, 732-740.
- [22] Bartos M., Hackerman N., "A Study of Inhibition Action of Propargyl Alcohol during Anodic Dissolution of Iron in Hydrochloric Acid", *J. Electrochem. Soc.* (1992) 139 (12), 3428-3433.
- [23] Lorentz W.J., Mansfeld F., "Interface and interphase corrosion inhibition", *Electrochim. Acta* (1986) 31, 467-476.
- [24] Feng Y., Siow K.S., Teo W.K., Hsieh A.K., "The synergistic effects of propargyl alcohol and potassium iodide on the inhibition of mild steel in 0.5 M sulfuric acid solution", *Corros. Sci.* (1999) 41, 829-852.
- [25] Crolet J. L., in "Corrosion localisée", F. Dabosi et al. Ed., Les Editions de Physique (1994) 407, Les Ulis.
- [26] Touir R., Dkhireche N., Ebn Touhami M., Sfaira M., Senhaji O., Robind J.J., Boutevin B. Cherkaoui M., "Study of phosphonate addition and hydrodynamic conditions on ordinary steel corrosion inhibition in simulated cooling water", *Mater. Chem. Phys.* (2010) 122, 1-9.
- [27] Srisuwan N., Ochoa N., Pebere N., Tribollet B., "Variation of carbon steel corrosion rate with flow conditions in the presence of an inhibitive formulation", *Corros. Sci.* (2008) 50, 1245-1250.
- [28] Danaee I., Niknejad K.M., Attar A.A., "Corrosion of AISI 4130 Steel Alloy under Hydrodynamic Condition in Ethylene Glycol + Water + NO<sub>2</sub><sup>-</sup> Solution", *J. Mater. Sci. Technol.* (2013) 29, 89-96.
- [29] Tamil S. S., Raman V., Rajendran N., "Corrosion inhibition of mild steel by benzotriazole derivatives in acidic medium", *J. Appl. Electrochem.* (2003) 33, 1175-1182.
- [30] Outirite M., Lagrenée M., Lebrini M., Traisnel M., Jama C., Vezin H., Bentiss F., "ac impedance, X-ray photoelectron spectroscopy and density functional theory studies of 3,5-bis(n-pyridyl)-1,2,4-oxadiazoles as efficient corrosion inhibitors for carbon steel surface in hydrochloric acid solution", *Electrochim. Acta* (2010) 55, 1670-1681.