

PROTECTION CONTRE LA CORROSION DES ACIERS AU CARBONE : INFLUENCE D'ADDITIFS SUR L'EFFICACITE DES AMINES FILMANTES

Amaury BUVIGNIER, Antoine MAILLET, Fabrice CHAUSSEC

ODYSSEE Environnement, Z.A. de la Belle Croix, 72210 REQUEIL, 02.49.43.39.33., a.buvignier@odymail.fr

I. INTRODUCTION

Les solutions à base d'amines filmantes se sont progressivement imposées comme une alternative aux inhibiteurs de corrosion conventionnels, notamment en raison de leurs modalités d'action spécifiques et de leur intérêt potentiel pour certaines applications industrielles. Si de nombreux acteurs proposent aujourd'hui ce type de solutions, leur déploiement industriel a été relativement tardif, en grande partie en raison de la complexité de leur mise en œuvre et du manque de recul opérationnel sur certaines formulations.

Lors de leur injection dans les circuits, les amines filmantes (FFA) s'adsorbent à la surface métallique, limitant l'accès des espèces corrosives présentes dans l'eau, telles que l'oxygène dissous. La barrière interfaciale ainsi formée contribue à réduire significativement les réactions électrochimiques responsables de la corrosion et ainsi à améliorer la protection des aciers au carbone [1], [2]. Toutefois, leurs performances restent étroitement dépendantes de la formulation et des conditions de mise en œuvre.

Les solutions commerciales à base d'amines filmantes associent généralement la molécule filmante à différents composés destinés notamment à assurer sa dispersion et sa stabilité. Ainsi, à teneur équivalente en OLDA, les performances des formulations peuvent différer selon la nature des constituants associés. Leur influence sur les propriétés électrochimiques et structurales du film protecteur reste cependant peu documentée.

Dans cette étude, une approche formulationnelle spécifique reposant sur l'introduction d'un co-filmant associé à différents additifs est étudiée. L'hypothèse est que ce co-filmant peut modifier l'organisation interfaciale ainsi que les propriétés physico-électrochimiques du film formé par l'OLDA et, par conséquent, améliorer son efficacité protectrice.

L'objectif est d'évaluer expérimentalement l'effet de l'introduction du co-filmant, puis celui de la nature d'additifs cationique, anionique ou non ionique, sur les performances

anticorrosion de formulations à base d'OLDA. Une attention particulière est portée à la relation entre composition de la formulation, résistance de transfert de charge et propriétés du film organique, notamment son épaisseur apparente et son profil de résistivité, déterminés par spectroscopie d'impédance électrochimique et modélisation en loi de puissance.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 Matériels

L'amine filmante utilisée dans le cadre de cette étude est la 1,3 N-oleyl propanediamine (OLDA). Toutes les matières premières utilisées (OLDA, co-filmant, additifs) sont fournies par ODYSSEE Environnement.

Les quatre formulations étudiées sont les suivantes (Tableau 1).

Tableau 1. Composition des formulations étudiées

Formulation	FFA	Co-filmant	Additif
S1	OLDA	Sans	Cationique
S2	OLDA	Avec	Cationique
S3	OLDA	Avec	Anionique
S4	OLDA	Avec	Non ionique

Les formulations ont toutes été testées à 100 ppm, en duplicata.

II.2 Protocoles expérimentaux

II.2.1 Système électrochimique

Les mesures électrochimiques ont été réalisées à l'aide d'une cellule conventionnelle à trois électrodes, comprenant une référence au calomel saturé et une contre-électrode en platine. Une tige en acier au carbone P265GH, polie au grain 1200 et présentant une surface exposée de 1 cm², a été utilisée comme électrode de travail. La vitesse de rotation était fixée à 500 tr/min et la température à 25 °C.

Le milieu corrosif était constitué d'une solution aqueuse de NaCl à 200 mg·L⁻¹, préparée à partir d'eau osmosée.

L'évaluation de l'efficacité anticorrosion est réalisée selon les trois étapes successives suivantes :

- Suivi du potentiel libre de corrosion - *Open-Circuit Voltage (OCV)*,
- La spectroscopie d'impédance Electrochimique – *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*,
- La Voltampérométrie à Balayage Linéaire – *Linear Sweep Voltammetry (LSV)*.

Les mesures de spectroscopie d'impédance électrochimique ont été réalisées à l'aide du potentiostat Bio-logic SP-150.

Les diagrammes d'impédance ont été obtenus sous régulation potentiostatique au potentiel de corrosion (E_{Corr}), sur une gamme de fréquences allant de 200 kHz à 10 mHz, avec 8 points par décade, en appliquant une perturbation sinusoïdale de 50 mV RMS.

Les mesures LSV ont été réalisées de E_{Corr} à $\pm 0,5 \text{ V}/E_{\text{Corr}}$ à une vitesse de 10 mV/s .

Les résultats d'impédance obtenus pour les échantillons traités ont été exploités selon deux approches complémentaires [3], [4]. La première vise à évaluer l'efficacité inhibitrice vis-à-vis de la corrosion tandis que la seconde permet de caractériser le film organique, notamment son épaisseur et ses propriétés. Cette caractérisation repose sur une analyse graphique indépendante de tout modèle physique [5], [6], complétée par l'application du modèle de résistivité en loi de puissance proposé par Hirschorn et al. [7], [8].

II.2.2 Analyse graphique

L'interprétation des spectres d'impédance repose généralement sur l'utilisation de circuits électriques équivalents. Lorsque la réponse capacitive de l'interface s'écarte du comportement d'un condensateur idéal, celui-ci est généralement remplacé par un élément à phase constante (CPE), dont l'impédance s'écrit :

$$Z_{\text{CPE}} = \frac{1}{Q(j\omega)^\alpha}$$

Équation 1

avec $\omega = 2\pi f$, Q le paramètre du CPE et α son exposant caractéristique.

Le paramètre α peut être déterminé à partir de la pente de $\log(-Z_j)$ en fonction de $\log f$:

$$\alpha = - \frac{d\log(-Z_j)}{d\log(f)}$$

Équation 2

Le paramètre Q est ensuite calculé selon :

$$Q = \frac{\sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{-Z_j(f)(2\pi f)^\alpha}$$

Équation 3

Pour un film diélectrique déposé sur un substrat conducteur, les paramètres du CPE peuvent être reliés aux propriétés physiques du film. La capacité complexe est notamment obtenue à partir de :

$$C(\omega) = \frac{1}{j\omega[Z(\omega) - R_e]}$$

Équation 4

où R_e est la résistance de l'électrolyte, déterminée par extrapolation du diagramme de Nyquist aux hautes fréquences.

Une représentation de Bode corrigée de la chute ohmique peut également être utilisée afin de mieux isoler le comportement du film aux hautes fréquences :

$$|Z| = \sqrt{(Z_r - R_e)^2 + Z_j^2}$$

Équation 5

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{Z_j}{Z_r - R_e}\right)$$

Équation 6

Avec Z_r et Z_j les parties réelle et imaginaire de l'impédance.

II.2.3 Modèle de résistivité en loi de puissance

Le comportement CPE observé pour les films organiques ou les couches d'oxydes peut être attribué à une variation de résistivité à travers l'épaisseur du film. Hirschorn et al. [5], [6] décrivent cette distribution à l'aide d'un modèle en loi de puissance.

La résistivité locale $\rho(\xi)$ dépend de la position dans le film (x), son épaisseur (δ), ainsi que des résistivités ρ_0 et ρ_δ aux interfaces métal/film et film/électrolyte. Le paramètre de distribution γ est relié à l'exposant CPE par :

$$\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \text{ et } \xi = \frac{x}{\delta}$$

Équation 7 et Équation 8

La distribution de résistivité est définie par :

$$\frac{\rho(\xi)}{\rho_\delta} = \left[\frac{\rho_\delta}{\rho_0} + \left(1 - \frac{\rho_\delta}{\rho_0} \right) \xi^\gamma \right]^{-1}$$

Équation 9

L'impédance du film est alors décrite par :

$$Z_f(\omega) = \delta \int_0^1 \frac{1}{\frac{1}{\rho_0} + j\omega\varepsilon\varepsilon_0 + \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_0} \right) \xi^\gamma} d\xi$$

Équation 10

L'ajustement des données EIS par ce modèle permet d'accéder directement à plusieurs propriétés physiques du film : son épaisseur d , sa permittivité ε , ainsi que les résistivités interfaciales ρ_0 et ρ_d .

Pour les fréquences inférieures à :

$$f_\delta = \frac{1}{2\pi\rho_\delta\varepsilon\varepsilon_0}$$

Équation 11

L'impédance du film peut être approchée analytiquement par :

$$Z_f(\omega) = g \frac{\delta\rho_\delta^{1-\alpha}}{(\rho_0^{-1} + j\omega\varepsilon\varepsilon_0)^\alpha}$$

Équation 12

avec :

$$g = 1 + 2,88(1 - \alpha)^{2,375}$$

Le paramètre Q est alors relié directement aux propriétés physiques du film :

$$Q = \frac{(\varepsilon\varepsilon_0)^\alpha}{g\delta\rho_\delta^{1-\alpha}}$$

Équation 13

Enfin, la résistivité à l'interface métal/film peut être estimée à partir de la fréquence caractéristique f_0 , correspondant au maximum de la composante imaginaire :

$$\rho_0 = \frac{1}{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 f_0}$$

Équation 14

Cette approche permet ainsi de dépasser une simple description par circuit équivalent et de relier directement la réponse EIS à la structure et aux propriétés diélectriques du film organique.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 Voltampérométrie

La Figure 1 présente les courbes LSV obtenues sans inhibiteur et pour chacune des formulations étudiées, dosées à 100 ppm.

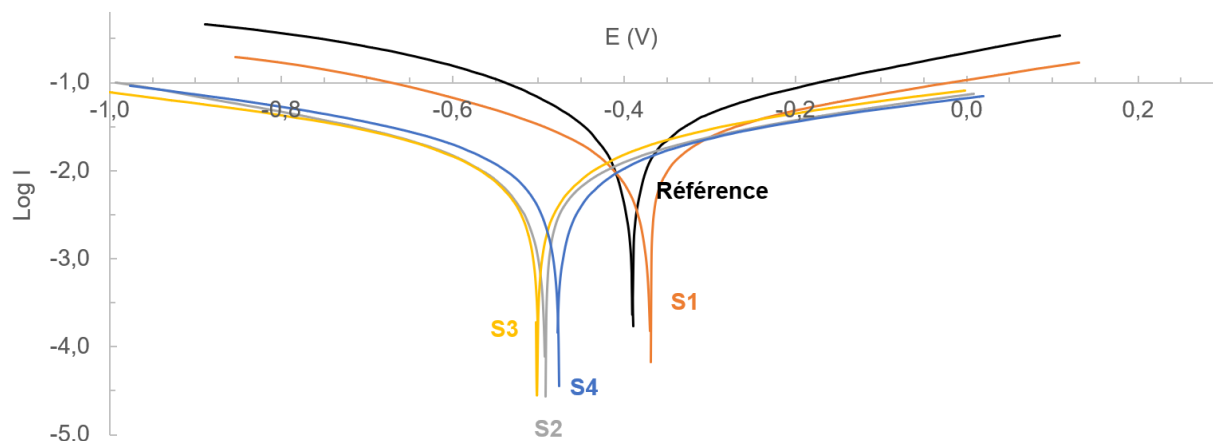


Figure 1. Courbe LSV pour chacune des formulations étudiées et sans inhibiteur

L'ajout des solutions inhibitrices à 100 ppm entraîne, pour l'ensemble des formulations, une diminution du plateau de courant, traduisant une réduction des phénomènes de corrosion. Cette diminution est toutefois plus marquée pour les S2, S3 et S4, associée à un déplacement du potentiel de corrosion (E_{Corr}) vers des valeurs plus cathodiques. Pour la S1, seul un léger déplacement anodique est observé, sans évolution notable du potentiel de corrosion E_{Corr} .

Les amines filmantes sont généralement décrites dans la littérature comme des inhibiteurs mixtes [7], [8], les formulations agissent à la fois sur le plateau cathodique et anodique, mais S2, S3 et S4 présentent ici un effet plus marqué sur la branche cathodique dans les conditions d'essai considérées.

Ce comportement pourrait s'expliquer par deux hypothèses non exclusives : (i) un effet intrinsèque du co-filmant sur la réaction cathodique, notamment sur la réduction de l'oxygène dissous ; (ii) un effet de synergie entre le FFA et le co-filmant, modifiant les propriétés du film protecteur (compacité, épaisseur) et limitant ainsi le transport de l'oxygène vers la surface métallique.

L'ensemble de ces résultats indique que toutes les formulations testées présentent une bonne efficacité anticorrosion dès 100 ppm, la S1 se distinguant néanmoins par une efficacité plus limitée. L'introduction du co-filmant dans les formulations S2, S3 et S4 semble ainsi modifier le mécanisme d'inhibition en renforçant l'action cathodique, ce qui suggère un rôle déterminant de la composition et des propriétés du film protecteur formé.

III.2 Etats de surface

La Figure 2 présente les états de surface après soumission au test de corrosion (partie cathodique et anodique) pour chaque formulation.

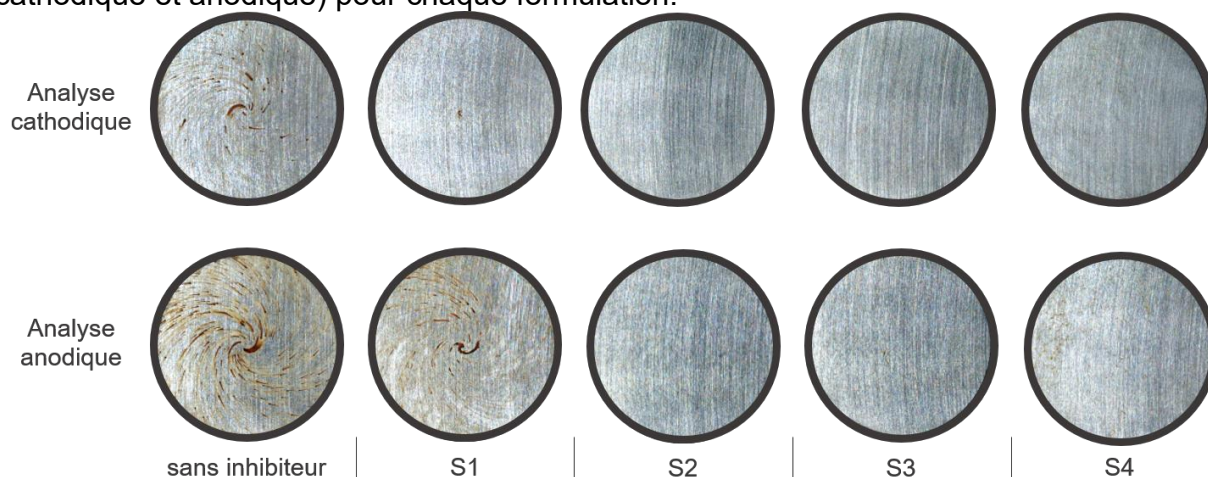


Figure 2. Etat de surface après soumission au protocole de corrosion en fonction des formulations (à 100 ppm).

Sans inhibiteur, la surface de l'électrode présente une corrosion marquée, accentuée après polarisation anodique malgré l'amplitude limitée de celle-ci. En présence de S1 à 100 ppm, des piqûres de corrosion sont observées dès la polarisation cathodique, traduisant une protection plus limitée de cette formulation. La polarisation anodique entraîne naturellement une dégradation plus importante de la surface.

En revanche, en présence de S2, S3 et S4, les surfaces restent globalement intactes, sans corrosion apparente, y compris après polarisation anodique.

III.3 Spectroscopie d'impédance

La Figure 3 présente le diagramme de Nyquist avec et sans inhibiteurs.

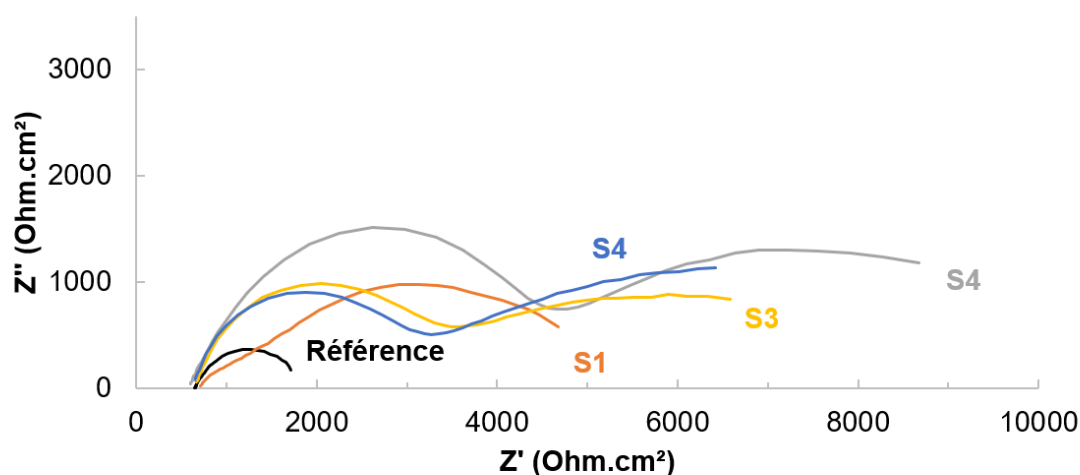


Figure 3. Diagramme de Nyquist pour chacune des formulations étudiées.

En l'absence d'inhibiteur, le diagramme d'impédance se caractérise par une pseudo-boucle unique, avec une résistance de transfert de charge (R_t) d'environ 1200 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ et une résistance de l'électrolyte (R_e) de l'ordre de 650 $\Omega \cdot \text{cm}^2$. L'ajout d'un inhibiteur entraîne l'apparition d'une boucle supplémentaire, traduisant la présence d'un second phénomène

attribué à la formation d'un film organique à la surface du métal. Les phénomènes de corrosion en présence de ces inhibiteurs sont bien connus et clairement identifiés dans la littérature [2], [7], [9].

La Figure 4 présente le diagramme de Bode pour chaque formulation étudiée.

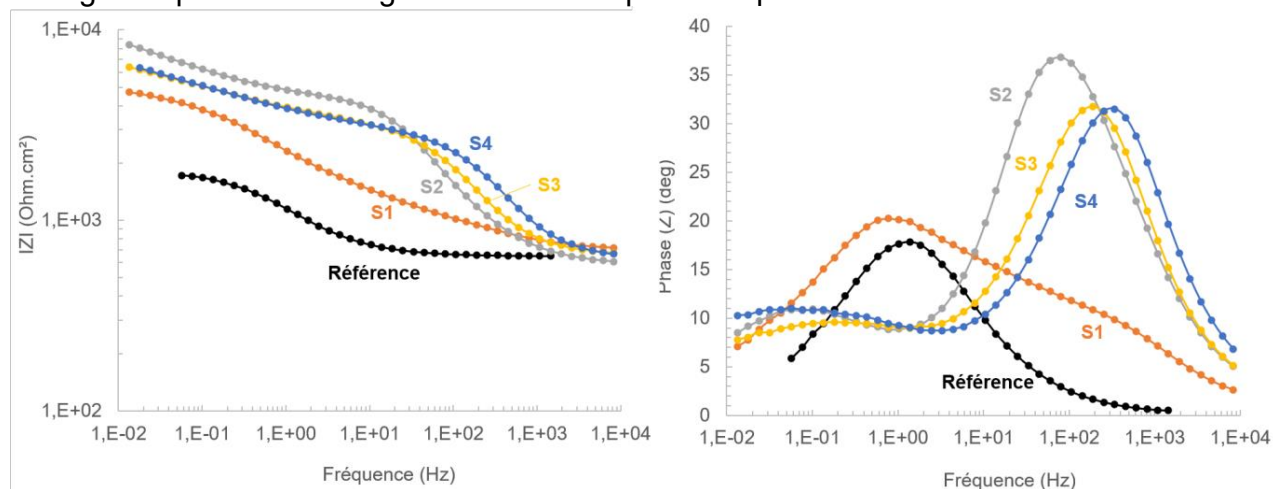


Figure 4. Diagramme de Bode pour chaque formulation étudiée

On observe une constante de temps (10^1 Hz – 10^{-1} Hz) attribuée à la résistance de transfert de charge (R_t) et la capacité interfaciale [2], [10]. En présence des formulations, les diagrammes montrent une seconde constante de temps (10^4 Hz – 10^2 Hz) associée à la présence des inhibiteurs adsorbés sur la surface [10]. Les valeurs des résistances de transfert de charge (boucle BF) et des résistances associées à la présence du film (boucle HF) sont présentées en Figure 5.

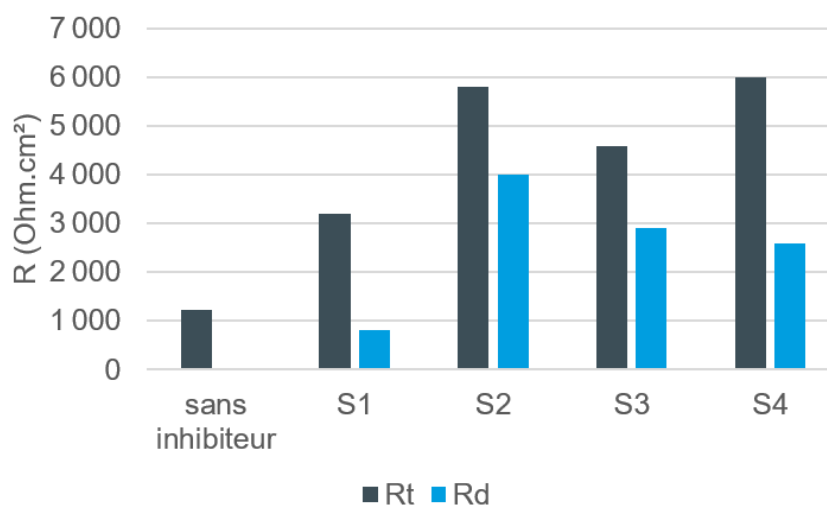


Figure 5. Résistance de transfert de charge (R_t) et résistance associée à la présence du film (R_d) pour l'acier nu et traité avec 100 ppm de formulations.

Avec une valeur de R_t de l'ordre de 1 200 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ sans inhibiteur, celle-ci atteint respectivement 3 200, 5 800, 4 600 et 6 000 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ en présence des solutions S1, S2, S3 et S4. Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec les formulations contenant les additifs non ionique et cationique.

L'ajout du co-filmant se traduit par une augmentation de R_t et, de manière plus marquée, de la résistance associée au film (R_d), qui est environ trois fois plus élevée. La nature de l'additif

semble également influencer R_d , avec une valeur maximale pour S2 (cationique) et minimale pour S4 (non ionique).

Dans un premier temps, les paramètres associés à la boucle capacitive basse fréquence, Q_{dl} et α_{dl} , ainsi que la résistance de l'électrolyte, R_e , et la résistance de transfert de charge, R_t , pour l'acier au carbone nu et pour l'acier traité par les différentes formulations ont été déterminés graphiquement.

À partir des paramètres du CPE, la valeur de la capacité de double couche (C_{dl}) a été calculée, en considérant une distribution 2D des résistances de transfert de charge sur la surface de l'électrode, à l'aide de la formule de Brug [11], [12].

$$C_{dl} = Q^{1/\alpha} * \left(\frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_e} \right)^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}$$

Équation 15

L'efficacité inhibitrice des formulations a été déterminée à partir des valeurs de C_{dl} mesurées sans inhibiteur et en présence de chaque formulation à 100 ppm. Elle est de 94% pour S1, et de plus de 99% pour les formulations S2, S3 et S4. Ce qui met en évidence en premier lieu une bonne protection de l'acier mais surtout une différence notable entre les formulations. L'ajout du co-filmant permet d'améliorer grandement l'efficacité des formules. Cependant, l'efficacité ne semble pas significativement modifiée par la nature de l'additif.

Dans un second temps, l'analyse des données d'impédance s'est concentrée sur la constante de temps à haute fréquence obtenue pour les échantillons traités. La Figure 6 présente le diagramme d'impédance en coordonnées de Bode, corrigé de la chute ohmique.

Sur le tracé de l'angle de phase et à haute fréquence, un plateau est observé, caractéristique d'un comportement CPE pur. La valeur de l'angle de phase sur le plateau est respectivement de 50,6°, 61,5°, 64,9° et 64,4° pour S1, S2, S3 et S4.

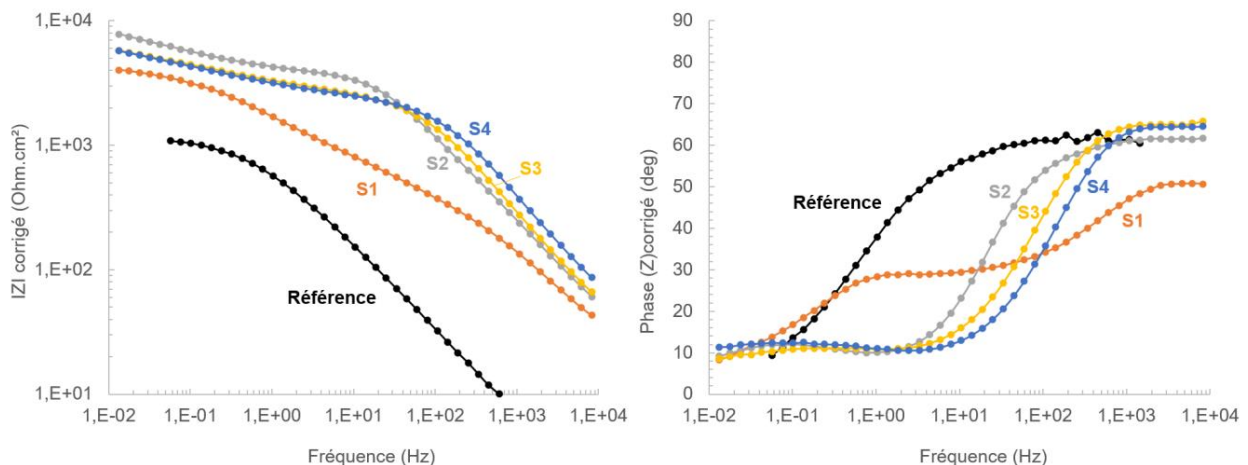


Figure 6. Diagrammes de Bode corrigés de la chute ohmique pour chaque formulation étudiée

La constante de temps à haute fréquence a révélé un comportement non idéal décrit par un CPE. Les paramètres associés (α_f et Q_f) ont été déterminés graphiquement (Équation 3).

La partie haute fréquence du diagramme a été régressée à partir de l'expression intégrale du modèle en loi de puissance (Équation 10). La procédure de régression a fourni les

valeurs numériques des paramètres ajustables (ρ_0 , ρ_δ , ε et δ) relatifs au film de FFA. Ces valeurs ont été reportées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Valeurs issues des modèles en loi de puissance pour chaque formulation

Paramètres	ρ_0	ρ_δ	ε	δ
Unité	($\Omega \cdot \text{cm}$)	($\Omega \cdot \text{cm}$)		nm
S1	8,3E+09	1,7E+05	2,7	56
S2	2,0E+10	6,1E+05	2,7	29
S3	3,6E+10	9,3E+05	2,7	24
S4	2,7E+10	6,7E+05	2,7	36

Les données sont cohérentes avec les modélisations réalisées par Baux et al. sur de l'ODA ou avec Jero et al. sur de l'OLDA [4], [10].

Les données de l'épaisseur et de la résistivité sont représentées en Figure 7.

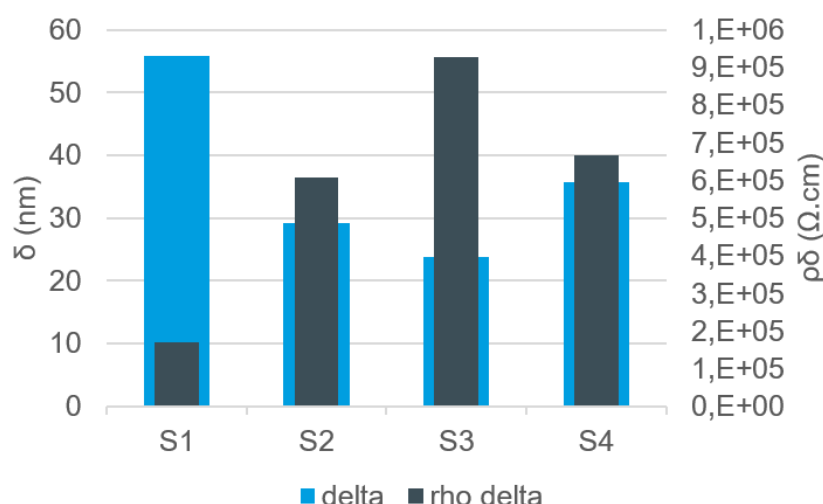


Figure 7. Épaisseur et résistivité extrait de la modélisation pour les 4 formulations.

L'épaisseur des films obtenus à partir du modèle en loi de puissance vont de 24 à 56 nm. Naturellement, ces estimations reposent toutefois sur plusieurs hypothèses et doivent, par conséquent, être interprétées avec prudence. (on pourrait faire des mesures AFM ou PM-IRRAS pour les comparer). Elles ont une valeur relative. La valeur de permittivité est proche de celle trouvée dans la littérature [3], [4], [13].

L'analyse conjointe de l'épaisseur et de la résistivité du film met en évidence des différences notables entre les formulations (Figure 7). S1 présente l'épaisseur de film la plus importante, mais avec une résistivité relativement faible comparé aux autres formulations, traduisant peut-être une structure moins dense. Les données d'efficacité mettent en évidence que l'épaisseur du film ne suffit à obtenir une efficacité optimale. S3 présente une épaisseur la plus faible, mais la résistivité la plus élevée, suggérant la formation d'un film particulièrement compact. Corrélé aux données d'efficacité inhibitrice, S4 semble être le meilleur compromis entre épaisseur de film et résistivité.

Les valeurs de ρ_0 , ρ_d et α_f ont été utilisées pour calculer le profil en profondeur de l'interface métal/film/électrolyte (Équation 9). Parmi les quatre formulations étudiées, seul le résultat obtenu pour S4 est présenté en Figure 8.

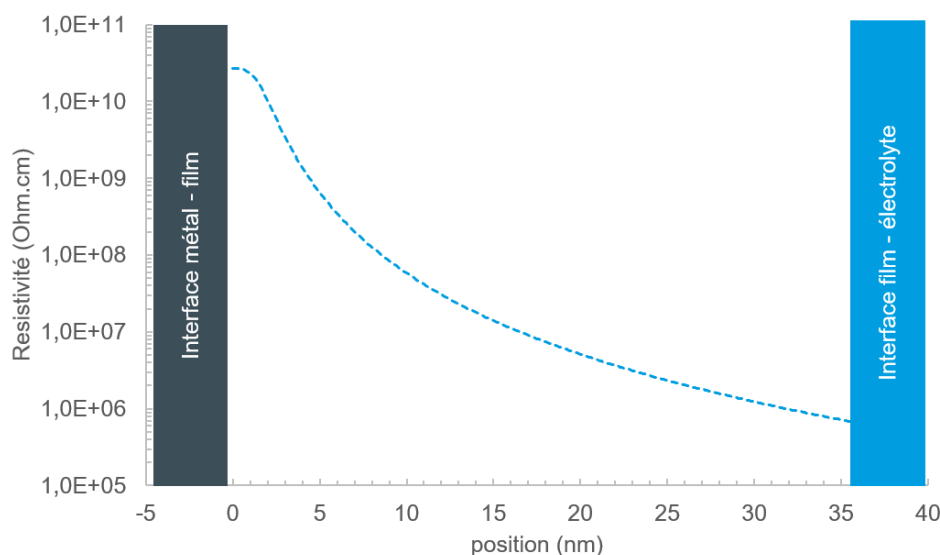


Figure 8. Profil de résistivité dans le film (S4), en fonction des données de modélisation.

Une zone de haute résistivité ($\rho_0 = 2,7 \times 10^{10} \Omega.cm$) est observée dans une région proche de l'interface métal/film. Cette couche de 1,7 nm d'épaisseur pourrait correspondre à une couche compacte de FFA/co-filmant et additif. Au-delà de cette zone, la résistivité diminue pour atteindre une valeur minimale de $6,7 \times 10^5 \Omega.cm$ à l'interface film/électrolyte.

Ces résultats indiqueraient une forte interaction entre la première couche de FFA en contact avec la surface du métal (ou la couche d'oxyde/hydroxyde de fer [4]). Les couches additionnelles seraient moins compactes en raison d'interactions plus faibles. Ce résultat est cohérent avec les observations faites par Baux et al. et Jero et al. [9], [10]. Cependant, les épaisseurs obtenues ici sont environ 2 à 3 fois plus importantes. Ceci pourrait s'expliquer par la nature plus complexe des formulations, conçues justement dans le but d'optimiser le film organique.

IV. CONCLUSION

Quatre formulations contenant une amine filmante (FFA), associée ou non à un co-filmant et à un additif (cationique, anionique ou non ionique), ont été étudiées par voltampérométrie et spectroscopie d'impédance électrochimique afin d'évaluer leur comportement inhibiteur vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone.

Les résultats ont montré que la formulation dépourvue de co-filmant conduisait à la formation d'un film organique relativement épais (60 nm) mais peu résistif ($1,7 \times 10^5 \Omega.cm$), associé à une résistance de transfert de charge plus faible ($3\,200 \Omega.cm^2$) et, par conséquent, à une efficacité inhibitrice moindre.

En présence du co-filmant, à l'inverse, le film adsorbé à la surface du métal était plus fin (30 nm en moyenne) mais nettement plus résistif ($7 \times 10^5 \Omega.cm$ en moyenne). Cette augmentation de résistivité s'est traduite par une résistance de transfert de charge plus élevée ($5\,500 \Omega.cm^2$ en moyenne), traduisant une meilleure efficacité inhibitrice et une protection renforcée de la surface métallique.

L'ajout d'un additif à la formulation contenant le co-filmant a par ailleurs révélé un effet différencié selon sa nature : l'additif anionique tendait à réduire l'épaisseur du film tout en

augmentant sa résistivité, tandis que les additifs cationique et non ionique conduisaient à des épaisseurs et résistivités comparables, légèrement supérieures pour l'additif non ionique. Ces résultats mettent en évidence que ce n'est pas l'épaisseur du film organique qui gouverne son pouvoir protecteur, mais bien la balance entre épaisseur et compacité/résistivité. Cette démarche d'optimisation (additif, co-filmant), guidée par la compréhension fine du couplage épaisseur/résistivité, distingue nettement les formulations présentées dans cette étude de formulations historiques du marché.

Ainsi, la seule présence d'amines filmantes dans un produit ne saurait garantir un niveau de protection équivalent : leur efficacité dépend directement de la nature de la formulation et des synergies entre ses constituants.

REFERENCES

- [1] S. Odar et P. Rudling, « Use of film forming amines (FFA) in nuclear power plants for lay-up and power operation ».
- [2] J. Baux *et al.*, « Film-Forming Amines for the Corrosion Protection of Carbon Steels in Nuclear Power Plant Secondary Circuit Conditions: An Impedance Study », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, n° 6, p. 061504, mars 2020
- [3] J. Baux, « Utilisation d'une amine filmante pour la protection des aciers au carbone dans l'industrie nucléaire : apport de la spectroscopie d'impédance électrochimique », These de doctorat, Toulouse, INPT, 2018. Consulté le: 22 juin 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2018INPT0128>
- [4] D. Jero, « Analyse par spectroscopie d'impédance électrochimique de la formation d'une barrière d'amines filmantes pour l'inhibition de la corrosion des aciers au carbone », thesis, Toulouse, INPT, 2023. Consulté le: 31 août 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2023INPT0084>
- [5] B. Hirschorn, M. E. Orazem, B. Tribollet, V. Vivier, I. Frateur, et M. Musiani, « Constant-Phase-Element Behavior Caused by Resistivity Distributions in Films: I. Theory », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, n° 12, p. C452, oct. 2010
- [6] B. Hirschorn, M. E. Orazem, B. Tribollet, V. Vivier, I. Frateur, et M. Musiani, « Constant-Phase-Element Behavior Caused by Resistivity Distributions in Films: II. Applications », *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, n° 12, p. C458, oct. 2010
- [7] D. Jero, N. Caussé, T. Buffeteau, F. Chaussec, A. Buvignier, et M. Roy, « Adsorption Kinetics of Film Forming Amines on Carbon Steel Surfaces Using Electrochemical Impedance Spectroscopy », présenté à 5th international conference on Film Forming Amines, Virtual Event, mars 2022.
- [8] D. Jero, N. Caussé, et N. Pébère, « Film-forming amines as corrosion inhibitors: a state-of-the-art review », *npj Mater Degrad*, vol. 8, n° 1, p. 111, nov. 2024
- [9] D. Jero, N. Caussé, E. Dantras, A. Roggero, T. Buffeteau, et N. Pébère, « Analysis of a film-forming amine response in impedance spectra », *Electrochimica Acta*, vol. 498, p. 144690, sept. 2024
- [10] J. Baux *et al.*, « Impedance analysis of film-forming amines for the corrosion protection of a carbon steel », *Electrochimica Acta*, vol. 283, p. 699-707, sept. 2018
- [11] B. Hirschorn, M. E. Orazem, B. Tribollet, V. Vivier, I. Frateur, et M. Musiani, « Determination of effective capacitance and film thickness from constant-phase-element parameters », *Electrochimica Acta*, vol. 55, n° 21, p. 6218-6227, août 2010

- [12]G. J. Brug, A. L. G. van den Eeden, M. Sluyters-Rehbach, et J. H. Sluyters, « The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element », *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, vol. 176, n° 1, p. 275-295, sept. 1984
- [13]D. Lide, « Grace Eileen Lide David Austell Whitcomb Kate Elizabeth Whitcomb », *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition, 2003-2004*, 2003.