

# Etude comparative de la tenue à la corrosion des armatures en acier en fonction du procédé de fabrication \*

Ma Fall<sup>1</sup>, M. F. Niang<sup>2</sup>, M. B. Ndiaye<sup>3</sup>, Mo. Fall<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Département de Génie Civil, UFR des Sciences de l'ingénieur-Université de Thiès-Sénégal

<sup>2</sup>Ecole Doctorale Développement Durable et Société - Université de Thiès - Sénégal

<sup>3</sup>Institut Universitaire de Technologie- Université de Thiès-Sénégal

<sup>4</sup>Département de Chimie, Faculté des Sciences et Techniques - Université CAD de Dakar - Sénégal

Email : mathioro.fall@univ-thiès.sn

Reçu janvier 2014 – Accepté mai 2014

## Résumé

L'objectif de cette communication est d'étudier de manière comparative la tenue à la corrosion des armatures en acier produites au Sénégal, au Bénin, en Guinée et en Europe. Les armatures sont élaborées par deux procédés : étirage à froid (Sénégal, Bénin et Guinée) et le laminage à chaud (France). Cette analyse comparative est basée sur la méthode de Tafel. Cette dernière permet de mesurer la résistance et la vitesse de corrosion. Les résultats obtenus montrent que la résistance à la corrosion est liée au procédé de fabrication. Ainsi nous notons une faible résistance à la corrosion des armatures produites par l'étirage à froid et une bonne tenue à la corrosion pour les armatures obtenues par un laminage à chaud.

**Mots clés :** Armature, Acier, Corrosion, étirage, laminage, microstructure.

## 1. Introduction

D'une manière générale, les matériaux ont une interaction plus ou moins prononcée avec la plupart des milieux ambiants. Cette interaction met souvent en jeu l'utilité du matériau en raison de la détérioration de ses propriétés mécaniques notamment sa ductilité et sa résistance [1]. La détérioration des métaux consiste soit en une perte effective de matière par dissolution soit en une formation d'une pellicule ou d'une croûte non métallique.

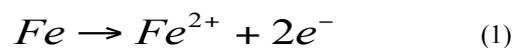
On définit la corrosion comme l'attaque destructrice et involontaire que subit un métal. Elle s'amorce souvent à la surface du métal.

## 2. Méthodologie

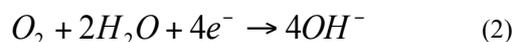
Notre étude consiste en une évaluation comparative du comportement électrochimique des différents échantillons. La méthode de Tafel est utilisée lors de cette étude. Elle consiste à polariser l'électrode dans la région de Tafel (en général à  $E_{\text{corr}} \pm 250$  mV), puis à ajuster les valeurs expérimentales au modèle théorique de Stern-Geary [2].

L'approche de Stern-Geary suppose qu'un système corrosif met en jeu deux réactions électrochimiques:

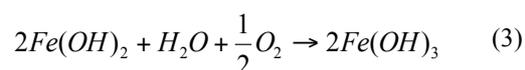
- une réduction



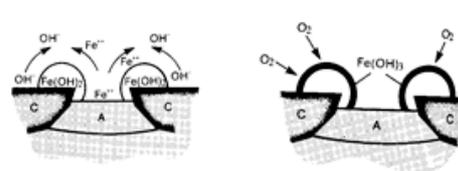
- une oxydation



La combinaison de ces deux équations donne :



La figure 1 illustre le processus électrochimique de la corrosion du fer.



Formation de  $Fe(OH)_2$     Formation de  $Fe(OH)_3$

**Figure 1. Etapes de la formation de la rouille [3]**

Cette approche est basée sur l'équation de Tafel, donnant l'évolution du courant (I) observé dans un processus électrochimique en fonction de la différence entre le potentiel appliqué et le potentiel

de libre corrosion ( $E - E_{corr}$ ).

Les coefficients de proportionnalité entre  $\log I$  et ( $E - E_{corr}$ ) sont appelés coefficients de Tafel et notés  $\beta$  dans la notation standard en corrosion. L'équation est de la forme :

$$I = I_{corr} \left[ 10^{(E-E_{corr})/\beta_a} - 10^{(E-E_{corr})/\beta_c} \right] \quad (4)$$

La méthode consiste à chercher le point d'intersection des droites cathodique et anodique dites de Tafel définies par :

$$\log I = f(E) \quad (5)$$

Ces droites doivent avoir un point commun qui correspond à un potentiel  $E$  et à une intensité nulle.

Ce point commun des droites anodique et cathodique comme indiqué sur la **figure 2** a pour coordonnées :

- le potentiel de corrosion :  $E_{corr}$
- le courant de corrosion:  $I_{corr}$ .

La vitesse et le courant de corrosion sont reliés par la formule :

$$V_{corr} = \frac{CMI_{corr}}{\rho S} \quad (6)$$

Avec :

$M$  : la masse d'un équivalent gramme de l'échantillon (g),  $S$  : la surface ( $\text{cm}^2$ ),  $\rho$  : la masse volumique du matériau (g/ml) et  $C$ : un facteur de conversion égal à  $3,268 \cdot 10^3$ .

### 3. Procédure expérimentale

Les échantillons à tester sont produit par deux méthodes : l'étirage à froid [4] : il s'agit des échantillons sénégalais produits par trois entreprises (SN1, SN2 et SN3), des échantillons béninois (BEN) des échantillons guinéens produits localement (GU) et des échantillons importés (GU Imp) et du laminage à chaud [5], [6] : il s'agit de l'échantillon français (EUR).

Les échantillons sont enrobés dans une résine époxy et les mesures sont faites sur les sections transversales des armatures.

Avant toute mesure, les échantillons sont polis, rincés à l'éthanol puis séchés, pour enlever toutes les traces d'oxyde. Le principe de la mesure est décrit par le schéma de la **figure 3**.

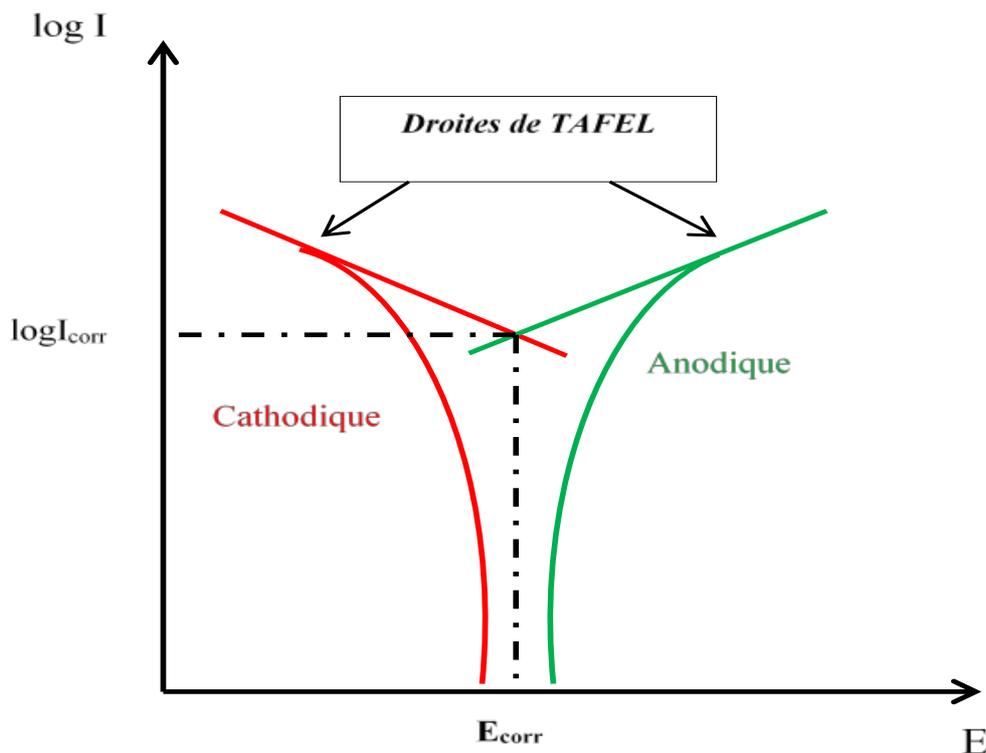


Figure 2. Représentation schématique des droites de Tafel

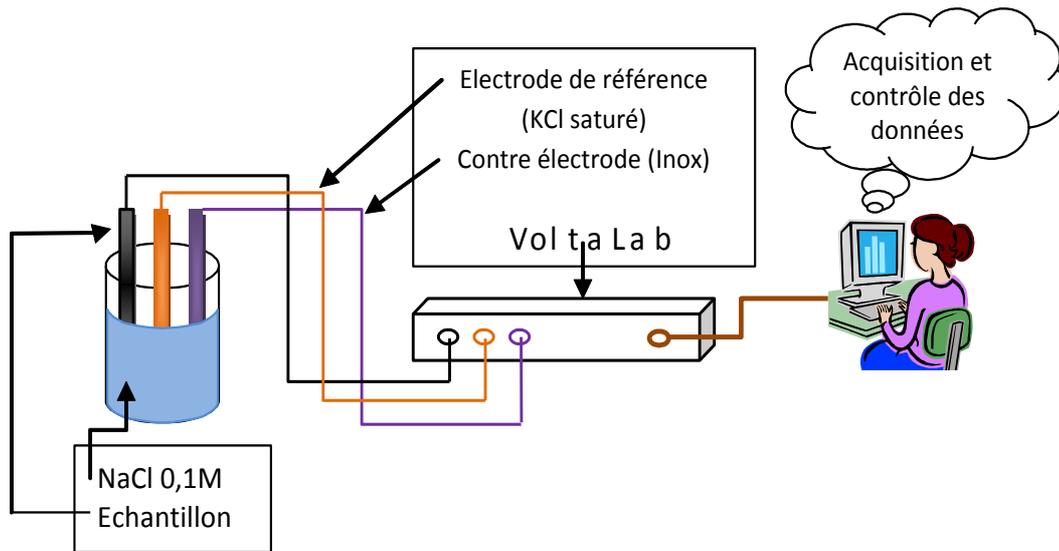


Figure 3. Mesure de la résistance à la corrosion schéma de principe

L'échantillon (Anode), l'électrode de référence (Cathode) et la contre électrode sont immergés dans une solution de NaCl 0,1M.

L'électrode au calomel saturé (ECS:  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Cl}^-$ , KCl saturé + 0,244 V à 25 °C) et un fil d'inox sont utilisés respectivement comme électrode de référence et contre électrode.

Ces électrodes sont reliées au VoltaLab 40. Ce dernier, de type PGZ 301 Dynamic, EIS, Voltammetry, est connecté à un ordinateur équipé d'un logiciel: VoltaMaster 4 qui permet de contrôler, d'acquérir et d'analyser les données (figure 3).

Durant les essais, la zone de polarisation ( $E_{I=0}$ ) est fixée entre - 250 mV et + 250 mV, avec une vitesse de balayage constante égale à 10 mV/s. Chaque échantillon est immergé dans 30 ml de la solution de NaCl 0,1M à température ambiante, pendant 15 minutes [7]. Toutes les cinq minutes on effectue une mesure et quatre séries de mesures sont faites pour chaque échantillon. La première méthode de Tafel est utilisée pour calculer la vitesse et la résistance à la corrosion ainsi que les coefficients de Tafel, en choisissant pour chaque mesure une zone de calcul de -120 mV à 120 mV, un segment de 50 mV et un lissage égal à 5.

#### 4. Résultats

Les mesures électrochimiques décrites précédemment, sont effectuées sur les différents échantillons. Les résultats obtenus sont consignés dans le **tableau 1**.

#### 5. Discussions

Les résultats sont illustrés sur la figure 5. L'analyse de cette dernière montre que l'échantillon EUR possède la vitesse la plus faible suivi de celui de SN3 avec des résistances respectivement égales à 38,18  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  et à 33,65  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ .

La plus grande vitesse est observée au niveau de l'échantillon BEN et au niveau de celui de la GU Impavec des valeurs respectives de 9,66 et 7,57  $\mu\text{m}/\text{an}$ .

La faible résistance à la corrosion observée pour les échantillons BEN et GU Imp peut être expliquée par leur microstructure.

Ces deux échantillons ont pratiquement la même microstructure, constituée de phases perlitiques (noires) et ferritiques (claires) comme l'illustre les **figures 4a** et **4b**. Or, il a été montré que cette microstructure a une mauvaise résistance à la corrosion [8].

Tableau 1. Vitesse et résistance à la corrosion

Echantillons	BEN	GUImp	GU	SN1	SN2	SN3	EUR
Vitesse de corrosion ( $\mu\text{m}/\text{an}$ )	9,66	7,57	7,34	5,42	5,05	4,04	3,48
Résistance ( $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	13,89	16,21	18,58	25,08	28,03	33,65	38,18

Ces microstructures présentent un taux assez élevé de cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ou carbure de fer que l'on

retrouve entre les joints de grains et dans la perlite elle-même, car étant le deuxième constituant de

cette perlite à côté de la ferrite. Pour l'échantillon européen (EUR), sa grande résistance à la corrosion est due d'une part au

procédé de fabrication (laminage à chaud) et d'autre part aux traitements thermiques de surface [10] qui lui ont été appliqués.

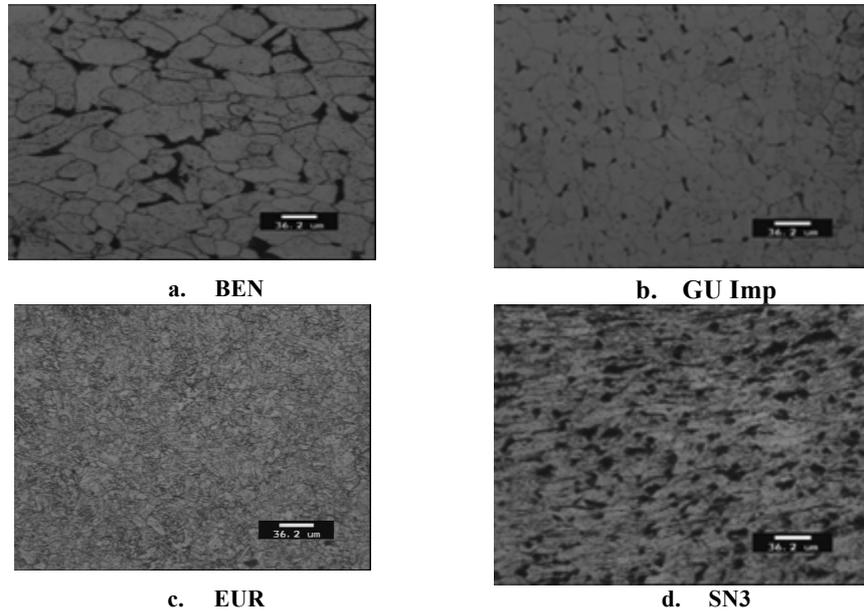


Figure 4. Micrographies des échantillons

Ainsi donc, cette grande vitesse de corrosion par rapport à celle des autres échantillons se justifie par le taux élevé de cémentite présente dans ces échantillons. En effet, selon Crolet [9] la présence de la cémentite non dissoute à la surface d'un acier entraîne un phénomène de couplage galvanique.

Or dans la perlite, la ferrite est attaquée de préférence à la cémentite car cette dernière est cathodique par rapport à la ferrite [3]. Ainsi lors de la dissolution de la ferrite, la cémentite non dissoute peut subsister à la surface. Lorsque le temps d'immersion s'allonge, il y'a une importante accumulation de la cémentite non dissoute [9]. La présence de la cémentite augmente la surface active disponible pour la réaction cathodique et entraîne par conséquent un effet galvanique. D'où une augmentation de la vitesse de corrosion.

Il faut noter que l'échantillon de GU Imp a un taux de cémentite plus faible que celui du BEN ce qui explique sa faible vitesse par rapport à ce dernier. D'autre part, l'érouissage ou la déformation plastique des métaux ductiles contribue à accroître leur résistance, mais les rend également plus vulnérables à la corrosion lorsqu'ils sont à l'état recuit [1].

Pour l'échantillon européen (EUR), sa grande résistance à la corrosion est due d'une part au procédé de fabrication (laminage à chaud) et d'autre part aux traitements thermiques de surface [10] qui lui ont été appliqués.

Un métal déformé plastiquement par érouissage est très souvent le siège de contraintes résiduelles.

Son énergie interne est supérieure à celle du même métal à l'état recuit. Une zone érouie ou une zone sous contrainte sera donc anodique par rapport à une zone non érouie ou libre de contrainte. Ceci justifie la plus grande résistance à la corrosion de l'échantillon européen par rapport à ceux obtenus par étirage à froid.

De même, les traitements thermiques de recuit, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant de traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques et par conséquent à diminuer la vitesse de corrosion.

Du point de vue microstructural, selon Balakhovskaya et al [11], la structure bainitique résiste mieux à la corrosion que la structure ferrite. Cependant l'éprouvette SEN3 présente la plus faible vitesse après celle européenne. Sa microstructure, qui présente de grains très allongés au bord, réduit la surface des joints de grains (figure 4c). Or ces joints de grains sont les zones d'attaques préférentielles quand l'échantillon est en contact avec un milieu corrosif. D'où sa grande résistance à la corrosion. On parle parfois d'une corrosion feuilletante pour ces structures fibreuses.

## 6. Conclusion

Cette étude basée sur la méthode électrochimique a montré que la tenue à la corrosion est fortement liée au procédé de fabrication.

Les résultats ont montré que les échantillons obtenus par étirage à froid ont la plus grande vitesse de corrosion. Cependant l'étirage entraîne un écrouissage du métal. A cet effet les échantillons écrouis présentent des zones sous contraintes et que ces dernières constituent des zones d'attaques préférentielles d'où donc cette grande vitesse de corrosion notée chez les échantillons produits par étirage.

Ainsi, nous recommandons le laminage à chaud à défaut l'étirage à froid qui sera complété par un traitement thermique de recuit.

### REFERENCES

- [1]. Franck MONTHEILET, Métallurgie en mise en forme à froid ; Techniques de l'Ingénieur, M 3030.
- [2]. STERN, M. AND A.L. GEARY. J. Electrochem. Soc., 104 (56), 1957.
- [3]. Sabine CARE, Alexa BRESSON, Karim BEDDIAR, Yves BERTHAUD, Effet de couplage électro-chimico-mécanique sur le processus de corrosion des armatures dans le béton, 16<sup>ième</sup> Congrès Français de Mécanique, Septembre 2003.
- [4]. Jean-Pierre POTTELETTE, calibrage à froid des barres d'acier, Technique de l'Ingénieur, M 3100.
- [5]. Pascal FABRÈGUE Métallurgie du laminage à chaud, Technique de l'Ingénieur, M 7860.
- [6]. Pierre MONTMITONNET, laminage : objectif et modélisation, Technique de l'Ingénieur, M 3065.
- [7]. Qinghui SUO, Mark G. STEWART; Corrosion cracking prediction updating of deteriorating RC structures using inspection information; Elsevier, Reliability Engineering and System Safety 94 (2009) 1340–1348.
- [8]. Regine MOLINS, Microstructure et chimie du substrat, EDP Sciences, 2009.
- [9]. J. L. CROLET, N. THEVENOT, S. NESIC, Corrosion 54, 194, (1998).
- [10]. Yves DESALOS, Introduction aux traitements thermiques des métaux et alliages, Techniques de l'Ingénieur, M 1105.
- [11]. M. B. BALAKHOVSKAYA, L.V. NADTSYNA and L. N. DAVLYATOVA, Structure and properties of steel for high-pressure vessels, [Metal Science and Heat Treatment, Volume 24, Number 11 / novembre 1982](#)