

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research



Université M'hamed Bougara Boumerdès

Faculté des Sciences

Département de biologie

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Science de la Nature et de la Vie

Filière : Biotechnologie

Spécialité : Biotechnologie Microbienne

**Contribution à l'étude de l'effet biocide des Biosurfactants
sur les bactéries sulfatoréductrices**

Etablit par: M^{elle}Babaci Sabrina et M^{elle}Dahmane Salima

Devant le jury:

| | | |
|--|-----------------------------------|---------------|
| M ^{me} Toumi Akmouci Sihem | MAA (UMBB) | Présidente |
| M ^{me} Kebbouche Gana Salima. | Professeur (UMBB) | Promotrice |
| M ^{me} Si Ahmed Dihya | MAA (Uni Alger 1) | Co-Promotrice |
| M ^f Gana Mohamed Lamine | Docteur (CDT/Sonatarch boumerdes) | Examineur |

Année universitaire : 2019–2020

Remerciements

On remercie *Allah* le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté pour réaliser ce travail

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous ont fait Mme *GANAS* pour son aide et ses conseils

Nous tenons également à remercier notre Co-promotrice Mme *SIAHMED.D* qui nous a vraiment aidés, pour sa patience, sa générosité, son aide et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de jury Mme Toumi Akmouci Sihem et M Gana Mohamed Lamine qui ont voulu examiner ce travail.

Enfin, il nous serait difficile d'omettre de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. Qu'ils trouvent dans ces quelques lignes l'expression de notre sincère remerciement.



Dédicace

Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu de m'avoir aidé et donné le courage pour terminer cet ouvrage.

J'ai l'honneur de présenter ce modeste travail pour le dédie a :

Mon cher père, celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant toujours que la volonté fait toujours des miracles, qui m'a toujours encouragé, m'a aidé et attendu avec patience ma réussite.

Ma chère mère, celle qui a attendu le fruit de sa bonne éducation, son soutien et sa prière.

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent pas de me combler.

Que le bon dieu leurs procurent la bonne santé et la longue vie.

Mon cher grand frère Yassine qui m'a toujours aidé et mon cher frère Sofiane en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Mes chères sœurs Farida et Syla

Mon binôme Salima

Je vous remercie pour votre affection si sincère.

Et sans oublier mes chers amis, que dieu vous protège.



Sabrina

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A la mémoire de mon père, décédé trop tôt.

A ma sœur, mon âme sœur Nour el Houda t'es ma source de joie, de bonheur et de motivation, puisse Dieu te donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

A celles qui vivent au plus profond de mon cœur, et étaient derrière chaque pas que je fais sur le chemin de la connaissance, à mes très chères tantes Saliha, Sadjia et Ouiza, Naima quoi que je fasse ou je dise je ne saurais vous remercier comme il se doit, j'ai de la chance de vous avoir à mes côtés, vous êtes ma source de vie, d'amour et d'affection.

A toutes les personnes de ma grande famille.

A toutes mes amies.

A celle qui a partagé avec moi la peine de préparer ce travail, ma coéquipière Sabrina

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du

Secondaire ou de l'enseignement supérieur.



Salima

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

| | |
|--|----------|
| Introduction | 1 |
| Chapitre I : Revue bibliographique | 3 |
| I . 1. La corrosion | 4 |
| I . 1.1. Les principales formes de la corrosion | 4 |
| I . 1.1.1. Corrosion uniformes | 5 |
| I . 1. 1.2. Corrosion par pique | 5 |
| I . 1. 1.3. Corrosion par érosion | 5 |
| I . 1.1.4. Corrosion galvanique | 5 |
| I . 1.1.5. Corrosion inter granulaire | 5 |
| I . 2. La biocorrosion | 5 |
| I . 2.1. Définition | 5 |
| I .2. 2. Les bio films | 6 |
| I .2.2.1. Définition | 6 |
| I . 2.2.2. Caractéristiques des bio films bactériens | 7 |
| I .2.2.3. Etapes de formation d'un bio film | 7 |
| I .2.2.4. Composition de la matrice du bio film | 9 |
| I .2.3. Les bactéries corrosives | 9 |
| I .2.3.1. Les bactéries aérobies strictes | 10 |
| I .2.3.1.1. Les bactéries de fer (les Ferro bactéries) | 10 |
| I .2.3.1.2. Les bactéries oxydantes de soufre (BOS) | 10 |

| | |
|---|----|
| I .2.3.1.3. Les bactéries réductrices des métaux (BRM) | 11 |
| I .2.3.2. Les bactéries anaérobies strictes | 11 |
| I .2.3.2.1. Les bactéries méthanogènes (carbonato- réductrices) | 11 |
| I .2.3. 2.2. Les bactéries productrices d'acide (BPA) | 11 |
| I .2.3.2.3. Les bactéries thiosulfate-réductrice (BTR) | 12 |
| I .2. 3.2.4. Les bactéries sulfato-réductrices (BSR) | 12 |
| I .2.3.2.4.1. Caractéristique des BSR | 12 |
| I .2.3.2.4.2. Métabolisme des bactéries sulfato réductrices | 12 |
| I .3. La lutte contre la biocorrosion | 13 |
| I .3.1. Les stratégies de contrôle physique | 13 |
| I .3.2. Stratégies de lutte biologique | 14 |
| I .3.3. Les stratégies de contrôle chimique | 15 |
| I .3.3.1. L'ozone | 15 |
| I .3.3.2. Les biocide | 15 |
| I .3.3.2.1. Classification des biocides | 16 |
| I .3.3.2.2.Types d'action des biocides | 16 |
| I .3.3.2.2.A. Biocides a effet bactéricides | 16 |
| I .3.3.2.2.B. Biocides a effet bactériostatiques | 17 |
| I .3.3.2.3. Mode d'action des biocides | 17 |
| I .3.3.2.4. Les facteurs d'efficacité d'un biocide | 17 |
| I .3.3.2.4.A. La concentration du biocide | 17 |
| I . 3.3.2.4.B. Le temps de contact | 17 |
| I . 4. Les biosurfactants | 18 |

| | |
|--|-----------|
| I .4.1. Propriétés des biosurfactants | 18 |
| I .4.2. Composition chimique des biosurfactant | 19 |
| I .4.3. Mode d'action des biosurfactants | 19 |
| I .4.4. Domaines d'applications des biosurfactants | 20 |
| I .4.5. Les biosurfactants comme inhibiteur de la biocorrosion | 20 |
| Chapitre II : Matériels et Méthodes | 22 |
| II.1. Isolement et culture de BSR | 23 |
| II.2. Extraction, purification et caractérisation de biosurfactant | 23 |
| II.3. Activité antimicrobienne de biosurfactant | 24 |
| II.4. Etude de l'effet inhibiteur de biosurfactant sur la biocorrosion | 26 |
| II.4.1. Teste de perte de poids | 26 |
| II.4.2. Analyse de surface | 26 |
| II.4.3. Test électrochimique | 27 |
| II.4.3.1. La résistance de polarisation linéaire (LPR) | 27 |
| II.4.3.2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) | 27 |
| II.4.3.3. Polarisation potentiodynamique | 28 |
| Chapitre III : Résultats et discussions | 29 |
| III.1. Caractérisation des biosurfactant | 30 |
| III.2. Activité antimicrobienne des biosurfactants | 34 |
| III.3. Etude de la biocorrosion | 35 |
| III.3.1. La perte de poids | 35 |
| III .3.2. Analyse de surface | 36 |
| III.3.3. Analyses électrochimiques | 41 |

III.3.3.1. Evaluation de l'effet potentiodynamiques et pectroscopie d'impédance
électrochimique 41

Conclusion 45

Références bibliographiques

Résumé

Listes des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Matériel industriel influencé par la biocorrosion..... | 5 |
| Figure 2. Interactions matériau- milieu-micro-organisme en biocorrosion..... | 6 |
| Figure 3. Etapes de formation d'un bio film bactérien avec l'observation microscopique à balayage des biofilms formés à chaque étape..... | 8 |
| Figure 4. Les différents groupes de bactéries corrosives..... | 10 |
| Figure 5. Métabolismes des BSR et mécanisme de corrosion par précipitation des sulfures de fer par les BSR..... | 13 |
| Figure 6. Microdilution en bouillon pour les tests antibactériens comme recommandé par le protocole CLSI..... | 25 |
| Figure7. Détermination du potentiel de corrosion par la méthode des droites de Tafel..... | 28 |
| Figure 8. Caractérisation par FTIR du biosurfactant glycolipide produite par la bactérie <i>P. mosselii</i> F01 | 31 |
| Figure 9. La Chromatographie sur couche mince (CCM) du biosurfactant obtenu à partir de <i>P. mosselii</i> F01 après traitement avec le réactif orcinol a révélé une tache brune avec une valeur Rf de 0,72, indiquant la présence de biosurfactant glycolipidiques. Les chromatogrammes ont été développés avec du chloroforme : méthanol : acide acétique..... | 32 |
| Figure 10. Analyses par CG-SM du biosurfactant produit par <i>S.parvus</i> B7 (a) spectres CG du biosurfactant, (b) spectres de masse du n-hexadécanoïque, (c) spectres de masse de l'acide octadécanoïque et (d) spectres de masse de l'acide octadécanoïque ,ester méthylique..... | 33 |
| Figure 11. Le spectre FT-IR de biosurfactant partiellement purifié isolé de <i>S.parvus</i> (B7)..... | 34 |
| Figure 12. Image de formation du biofilm sur le coupon d'acier au carbone ST 37 après 5 jours (a) sans antimicrobiens et (b) avec biosurfactant observé au MEB..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figure 13. Observation au MEB des dépôts formés la surface des coupons d'acier au carbone ST37 après la période de 5 jours d'incubation pour la croissance du biofilm: (a) sans croissance du biofilm, (b) sans biofilmérisation, (c) après la biofilmérisation avec le glutaraldéhyde 15% et (d) avec le biosurfactant. | 38 |
| Figure 14. Les Spectres EDS des dépôts formés la surface des coupons après la période de 5 jours d'incubation pour la croissance du biofilm : (a) sans croissance du biofilm, (b) sans biofilmérisation, (c) après la biofilmérisation avec le glutaraldéhyde 15% et (d) avec le biofilm..... | 39 |
| Figure 15. Analyse par XRD des produits de rouille formés sur la surface métallique de l'acier au carbone ST37..... | 40 |
| Figure 16. Analyse par FTIR de l'absorbance du biosurfactant sur la surface métallique de l'acier au carbone ST37..... | 41 |
| Figure 17. Courbe de polarisation potentiodynamique pour les différents systèmes de corrosion, y compris les consortia abiotiques, mixtes et les systèmes inhibiteurs..... | 42 |
| Figure 18. Courbe de l'impédance pour différents systèmes de corrosion, des consortia bactériens abiotiques et mixtes et systèmes inclus de biosurfactant..... | 43 |

Liste des tableaux

- Tableau 1.** La concentration minimale inhibitrice (CMI) et la concentration minimale bactéricide (CMB) du biosurfactant glycolipidique en présence de différentes souches bactériennes corrosives.....34
- Tableau 2.** Vitesse de corrosion et l'efficacité de l'inhibition de l'acier au carbone API 5XL en présence et l'absence de consortium mixtes du biosurfactant glycolipidique.....36
- Tableau 3.** Paramètres de polarisation et d'impédance de l'acier au carbone API 5XL en présence et absence de consortia bactériens mixtes et du biosurfactant glycolipidique.....44

Liste des abréviations

AC: Courant alternatif

BSR: Bactéries sulfato-réductrices

BTR: Bactéries thiosulfato-réductrices

BOS: Bactéries oxydantes du soufre

BRM: Bactéries réduites des métaux

BRN: Bactéries réduites de nitrate

CIM: La corrosion induite microbiologiquement

CMB: La concentration minimale bactéricide

CMI: La concentration minimale inhibitrice

CMC : La concentration micellaire critique

CCM: Chromatographie sur couche mince

ELISA: Technique de dosage d'immunoabsorption par enzyme liée (Enzyme linked immuno Sorbent Assay)

EIS: La spectroscopie d'impédance électrochimique

EDS: Spectroscopie à rayons x à dispersion d'énergie

Ecorr: Potentiel de corrosion

FTIR: Spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier

Icorr: la densité de courant de corrosion

kHz: kilohertz

LPR: La résistance de polarisation linéaire

MV: millivolt

mHz: mégahertz

MH: gélose Mueller-Hinton

MEB: Microscope électronique à balayage

OCP: Potentiel de circuit ouvert

PT: Pétagramme

PBS: Tampon phosphate salin (phosphate bufferd saline)

ppm: partie par million (mg/l)

THPS: Tetrakis-hydroxyméthyl phosphonium sulfate

UFC: Unité formant colonie

V_{corr}: Vitesse de corrosion

PBS: Tampon phosphate salin (phosphate bufferd saline)

THPS: Tetrakis-hydroxyméthyl phosphonium sulfate

Introduction

Les phénomènes de biocorrosion engendrent des dommages conséquents dans divers secteurs industriels. L'industrie du pétrole utilise un nombre élevé de structures métalliques enterrées ou immergées dans le domaine de la production que dans ceux du stockage et du transport du pétrole. Alors que le prix de vente de celui-ci a diminué [**Gana, 2010**].

Ces dernières années, l'industrie pétrolière dépense des sommes élevées pour lutter contre les processus de corrosion. Elle emploie des produits chimiques comme : inhibiteurs de corrosion et biocides. Elle effectue des opérations de nettoyage des canalisations et elle doit remplacer les parties corrodées, ce qui entraîne souvent un arrêt du travail et par conséquent une perte de production, de temps et d'argent [**Mimouni, 2017**].

La corrosion induite microbiologiquement (CIM; biocorrosion) est associée aux biofilms qui entraînent de gros problèmes économiques, elle est causée par les bactéries corrosives aérobies et anaérobies [**Askeland, 2004**]. En effet, les bactéries sulfato-réductrices, les bactéries sulfato-oxydantes et Ferro-bactéries peuvent être responsables de la corrosion du fer dans le sol et les environnements aqueux, les bactéries sulfato réductrices (BSR) sont les plus étudiées dans la littérature de la CIM en raison de leur importance pratique. La surveillance et le contrôle de la biocorrosion coutent des milliards de dollars chaque année [**Gana, 2010**].

Au cours des dernières années, les restrictions sur l'utilisation des prétraitements traditionnels et des revêtements organiques pour la protection contre la corrosion sont strictement limitées en raison à la fois de problèmes de santé humaine et d'environnement [**Plaza et Achal, 2020**].

Cependant, la plupart des inhibiteurs chimiques traditionnels tel que les amides, les sels d'ammonium quaternaire sont toxiques et nocifs. Ils n'ont pas un profil environnemental favorable et ils peuvent se bioaccumuler [**Mehanna, 2009**].

De nouvelles substances antimicrobiennes relativement écologiques sont en cours de développement ; les biosurfactants se sont avérés être l'une des meilleures substances antimicrobiennes « comme biocide écologique » respectueuses de l'environnement pour inhiber le processus de biocorrosion et protéger les matériaux contre la corrosion, les biosurfactants sont récemment devenus des produits importants de la bioéconomie avec des applications multiples [**Plaza et Achal, 2020**].

Notre travail représente un aperçu des études réalisées sur l'effet inhibiteur de quelques biosurfactants sur la biocorrosion.

Ce manuscrit s'articule autour de trois parties :

- La première partie est réservée à une analyse bibliographique portant sur les différents aspects abordés dans ce mémoire, à savoir, des notions sur la biocorrosion et les méthodes d'inhibitions, un état d'art sur les biosurfactants.
- La deuxième partie est consacrée à la description du matériel et des méthodes utilisées par différents auteurs sur l'étude de l'effet inhibiteur des biosurfactants sur la biocorrosion.
- Dans la troisième partie, les résultats de la littérature sont présentés et discutés.



Chapitre I :

Revue bibliographique

I . 1. La corrosion

La corrosion est une réaction électrochimique entre l'environnement et un matériau, généralement un métal, qui altère les propriétés du matériau et altère sa fonction [Fang et al., 2002; Garcia et al., 2012]. La corrosion se produit sur la plupart des matériaux métalliques, c'est un fléau qui touche les matériaux utilisés dans de nombreux domaines industriels : industries pétrolières, chimiques, électriques, nucléaires. Il s'agit donc d'un dilemme industriel ancien et problématique, c'est aussi la principale cause des défaillances des structures métalliques [Askeland, 2004].

La corrosion d'une phase métallique fait donc intervenir deux réactions électrochimiques différentes :

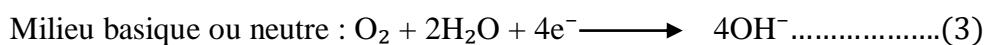
* Réaction partielle anodique qui est l'oxydation du métal :



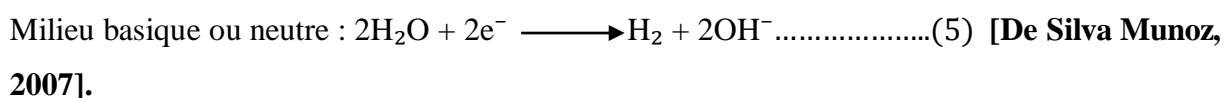
Globalement, c'est une réaction d'oxydation qui correspond à la dissolution du métal sous forme d'ions dans la solution et la libération d'électrons dans le réseau métallique.

* Réaction partielle cathodique : c'est une réaction qui implique la réduction d'un composant du milieu aqueux :

En milieu aéré, l'accepteur d'électrons est normalement l'oxygène dissous dans la solution :



En milieu désaéré, l'accepteur peut être des protons en solution ou de l'eau.



I .1.1. Les principales formes de la corrosion

Le processus de la corrosion prend de nombreuses formes, qui sont classées principalement selon le phénomène qui se manifeste à la surface corrodée [Normand et al., 2004].

I .1.1.1. Corrosion uniforme : C'est la plus classique de la corrosion, dont la surface entière du métal sert à l'oxydation et à la réduction, sans distinction de sites anodiques et cathodiques, un seul métal intervient.

I .1.1.2. Corrosion par piqure : Elle est produite par certains anions le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètres.

I .1.1.3. Corrosion par érosion : Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide.

I .1.1.4. Corrosion galvanique : Appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.

I .1.1.5. Corrosion inter granulaire : C'est l'attaque sélective aux joints de grainer, par suite d'hétérogénéités locales : c'est l'appauvrissement de l'un des constituants ou au contraire, enrichissement par suite de précipitation lors d'un traitement thermique.

I . 2. La biocorrosion

I . 2.1. Définition

La biocorrosion, également appelée corrosion induite par les micro-organismes (CIM) correspond à la détérioration des structures métalliques causée directement ou indirectement par l'activité métabolique des micro-organismes [Liu et al., 2018].



Figure 1. Matériel industriel influencé par la biocorrosion [Bronkhorst France, 2018].

De nombreux micro-organismes, dont les bactéries, les archées, et les champignons contribuent à la corrosion. Les études de recherche les plus publiées sur la corrosion influencée microbiologiquement (CIM) se concentrent sur les bactéries [Lv et du, 2018].

Les mécanismes de la biocorrosion sont variés reflétant la diversité des différents types de microorganismes, des milieux et des matériaux [Libert et al., 2014].

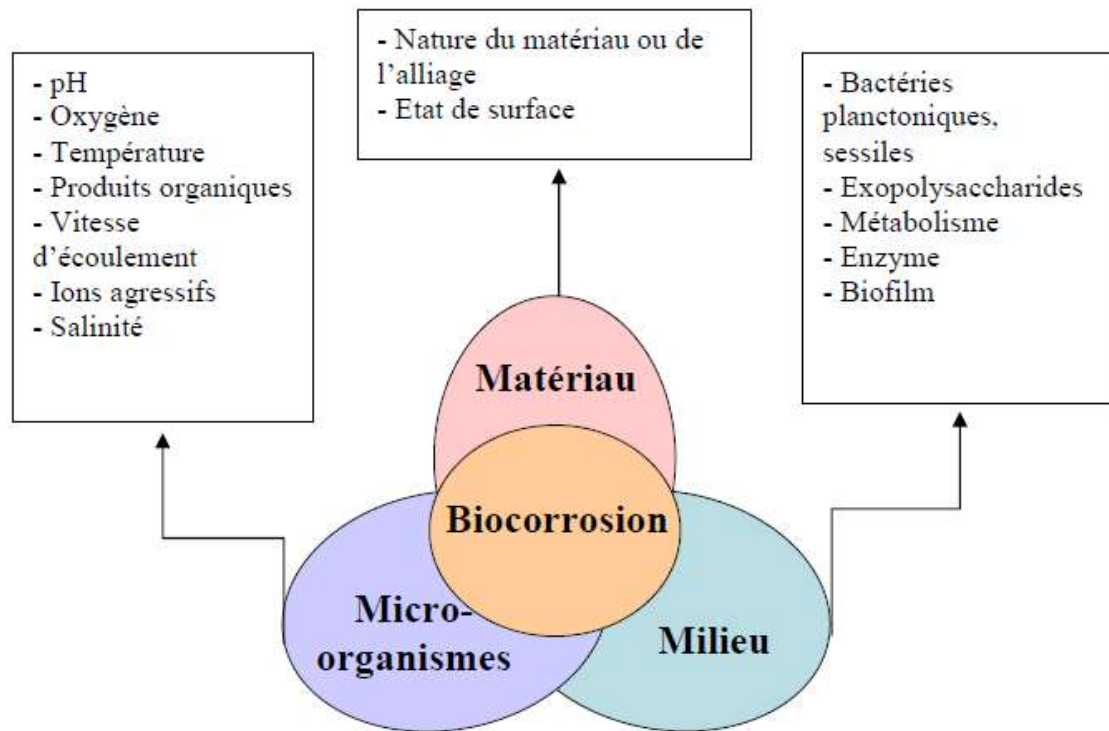


Figure 2. Interactions matériau-milieu-micro-organisme en biocorrosion [Bérangeret, 2002].

I .2.2. Les biofilms

I .2.2.1. Définition

Le biofilm est une communauté microbienne adhérente à une surface, qui n'est pas spécialement uniforme, il se forme naturellement par des microorganismes [Flemming, 1998], quel que soit le milieu suspendant le développement du biofilm reste toujours universel, Il peut se mettre en place en quelques heures et permet ainsi aux bactéries qui s'y trouvent de devenir résistantes aux agents extérieurs tels que : les agents antimicrobiens et la chaleur [Klingler et al., 2005].

I .2.2.2. Caractéristiques des biofilms bactériens

Les biofilms bactériens sont généralement définis comme des agrégats de cellules bactériennes attachés à une surface et enrobés d'une matrice polymérique [Costerton *et al.*, 1999; Hall-Stoodley *et al.*, 2004]. Les bactéries peuvent bien adhérer à une surface biotique (exp: cellules de la muqueuse) comme à une surface abiotique (exp : plancher ou équipement à la ferme, à l'abattoir ou à l'usine de transformation). La formation d'un biofilm se fait en plusieurs étapes selon un modèle bien établi. La capacité de former un biofilm est maintenant reconnue comme une caractéristique propre à plusieurs microorganismes [Richards *et al.*, 2009].

On estime d'ailleurs que 80% de la biomasse microbienne de notre planète réside sous forme de biofilm [Richards *et al.*, 2009]. Les biofilms bactériens isolés de divers environnements partagent des caractéristiques communes :

* Les cellules bactériennes sont retenues ensemble par une matrice polymérique composée d'exo polysaccharides, de protéines et d'acides nucléiques.

*Le biofilm protège les bactéries contre le système immunitaire de l'hôte, la dessiccation et les biocides [Costerton *et al.*, 1999; Hall-Stoodley *et al.*, 2004].

I .2.2.3. Etapes de formation d'un biofilm

Le développement d'un bio film se déroule en plusieurs étapes (figure 3) :

La première consiste en l'**adhésion** réversible des bactéries sur une surface inerte par adsorption d'ions et de molécules organiques sur la surface par des liaisons chimiques non covalentes [Mehanna, 2009].

Lors de la deuxième étape qui est l'**accumulation**, les bactéries sécrètent des polymères extracellulaires, ces exo polymères représentent 85 à 98 % de la matrice organique du bio film, les bactéries ne constituent qu'une faible portion du volume totale, les exo polymères comprennent des polysaccharides, des protéines, des glycoprotéines et des lipoprotéines et forment une matrice qui renforce la structure du bio film tout en lui conservant une grande plasticité [Mehanna, 2009].

Au cours de la troisième étape, les **microorganisme se divisent** et forment des micro colonies dont la structuration implique l'expression de gènes liés au «quorum sensing »

[Characklis et al., 1990], qui est « un mécanisme de communication entre les microorganismes qui coordonnent leur comportement comme la formation du bio film , la motilité, la sporulation, la résistance aux antibiotiques, la bioluminescence et les facteurs de virulence » [Williams, 2007; Rocha-Estrada et al., 2010]. Ce processus dépend de la population, la densité et la concentration des molécules de signal [Waters et Bassler, 2005; Bhrgava et al., 2010].

La quatrième étape consiste en la **maturation** du bio film qui devient épais. La dernière étape est la phase de **dispersion** : sous l'effet des forces hydrodynamique les bactéries se détachent de la matrice, retournent à l'état planctonique c'est-à-dire en suspension, et peuvent ainsi coloniser d'autres surfaces [Characklis et al., 1990; Lappin-Scott et al., 1995; Prigent- Combaret et al., 1999].

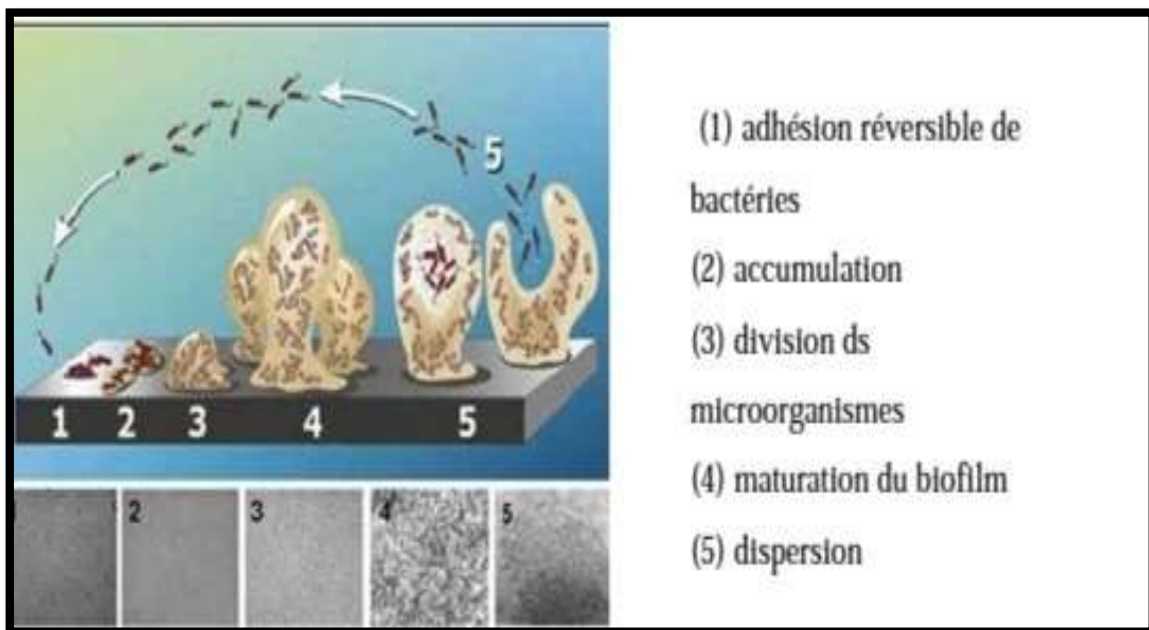


Figure 3. Etapes de formation d'un biofilm bactérien avec l'observation microscopique à balayage des bio films formés à chaque étape [Stoodley et al., 2002].

I .2.2.4. Composition de la matrice du biofilm

La matrice du biofilm est hautement hydratée et peut contenir jusqu'à 97% d'eau. Elle peut être constituée de polysaccharides, de protéines, d'acides nucléiques, d'agents tensioactifs, de lipides, de glycolipides et de cations [Karatan, 2009].

La composition de la matrice varie selon l'espèce bactérienne et les conditions de croissance. Un des exo polysaccharides le plus souvent retrouvé est un polymère de β -1,6-N-acétyl-D-glucosamine (poly glucosamine, PGA ou PNAG).

On retrouve ce polymère chez plusieurs espèces bactériennes, dont *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *staphylococcus epidermidis*, *Yersinia pestis*, *Bordetella* spp et *Actenobacillus* spp. La cellulose, un polymère linéaire de glucose, est également retrouvée fréquemment chez diverses espèces et genres bactériens, dont *E.coli*, Salmonella, Enterobacter et Pseudomonas. Il existe plusieurs autres polysaccharides dont le glucane chez *Streptococcus mutans* et l'alginate retrouvé chez Pseudomonas [Flemming et Wingender, 2010].

I .2.3. Les bactéries corrosives

Au sein des bactéries, les bactéries sulfato-réductrices (BSR) ont le plus grand impact sur la corrosion car le sulfate est largement distribué dans les environnements anoxiques [LV et Du, 2018]. Elles ont aussi tendance à produire des acides organique qui peuvent provoquer la corrosion en acier et une corrosion sur d'autres métaux tels que l'alliage de magnésium et le zinc [Juzeliunas et al., 2007; Qu et al., 2017]. Les principales bactéries associées à la corrosion des métaux sont représentées dans la figure 4.

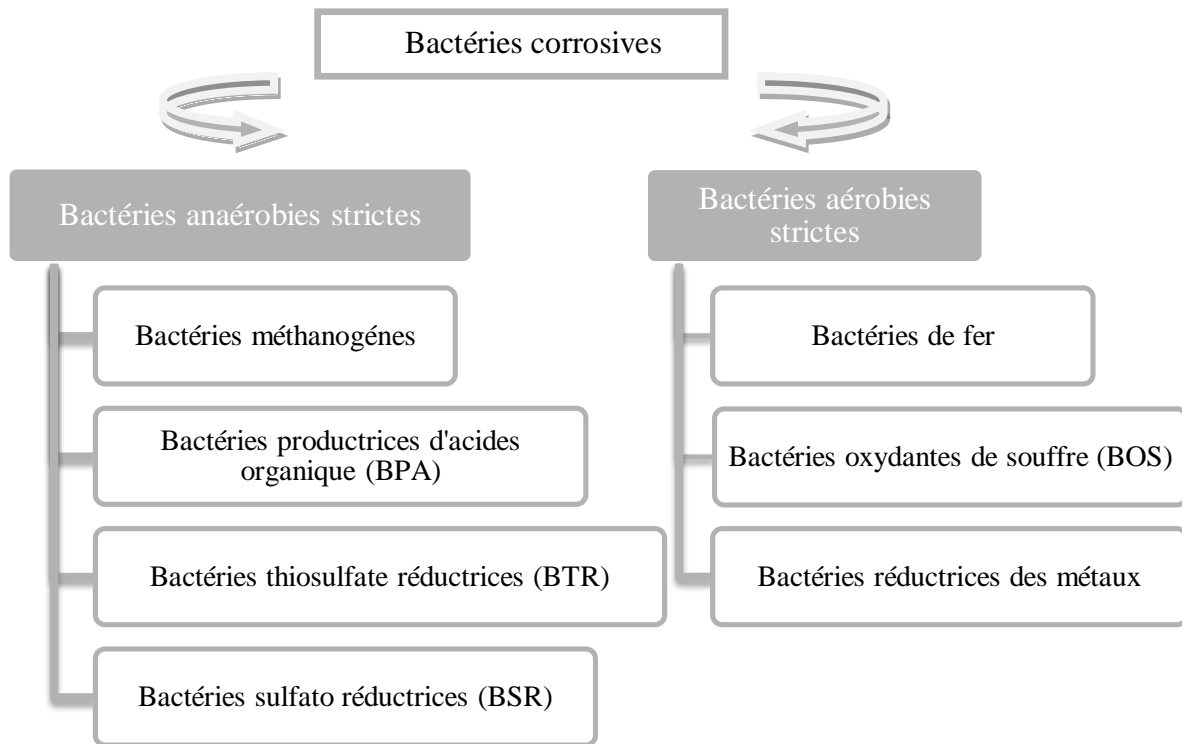


Figure 4. Les différents groupes des bactéries corrosives [Iwona, 1999].

I .2.3.1. Les bactéries aérobies strictes

I .2.3.1.1. Les bactéries de fer (les Ferro bactéries)

Les Ferro bactéries transforment le fer présent dans leur environnement aqueux en hydroxyde ferreux hydraté [Fe(OH)]. Ce type de bactérie peut être à l'origine de corrosion par piqure puisque l'énergie nécessaire à leur métabolisme est obtenue par oxydation d'ions ferreux Fe^{2+} en ions ferriques Fe^{3+} selon la réaction suivante [King, 1977].



I .2.3.1.2. Les bactéries oxydantes de soufre (BOS)

Sont principalement des microbes aérobies qui oxydent des composés soufrés inorganiques tels que les sulfures métalliques, H_2S , SO_3^{-2} , $S_2O_3^{-2}$ et le soufre élémentaire pour obtenir l'énergie nécessaire à leur croissance [Tang et al., 2009].

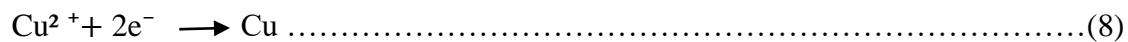
Les sous-produits métaboliques de ces microbes sont l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide sulfureux (H₂SO₃), qui sont très agressifs et corrosifs pour le fer et l'acier [Muthukumar et al., 2003]. L'une de leurs réactions métaboliques correspond à la suite :



I .2.3.1.3. Les bactéries réductrices des métaux (BRM)

Les bactéries réductrices des métaux ont été reconnues pour leur rôle dans la transformation métallique dans des environnements vierges et contaminés.

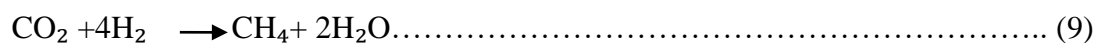
Ces organismes peuvent réduire directement et indirectement de nombreux métaux lourds toxiques tels que la réduction du cuivre influençant ainsi les cellules de corrosion [Royer et al., 2003].



I .2.3.2. Les bactéries anaérobies strictes

I .2.3.2.1. Les bactéries méthanogènes (carbonato- réductrices)

Les méthanogènes auraient contribué à la corrosion du fer dans l'environnement sans oxygène [Daniels et al., 1987]. Plusieurs études suggèrent que les méthanogènes entraîneraient une corrosion par piqûres des pipelines [Larsen et al., 2010; Park et al., 2011]. Habituellement, les méthanogènes utilisent le « H₂ » comme donneurs d'électron qui est pendant sa respiration couplé à une réduction du CO₂ selon la réaction (9) [Boopatie et Daniels, 1991].

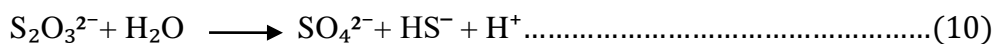


I .2.3.2.2. Les bactéries productrices d'acide (BPA)

Les bactéries productrices d'acide sont un groupe de bactéries hétérotrophes capable de produire des acides organiques lorsqu'elles sont cultivées dans des conditions environnementales réductrices [Wilkie, 2005]. Les acides sont produits lors de la fermentation de matières organiques tels que l'acide lactique pour provoquer une baisse du pH de neutre à pH de 3,5. Ces conditions acides affectent l'intégrité de tout matériau métallique, provoquant la corrosion. Les APB sont les contributeurs importants à la biocorrosion [Thomas, 2002].

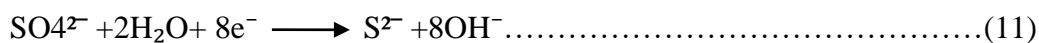
I .2.3.2.3. Les bactéries thiosulfate-réductrice (BTR)

Sont des bactéries qui effectuent la réduction des ions thiosulfates qui ont un rôle qui s'apparentes à celui du sulfate pour les BSR, la réduction du thiosulfate suit la réaction (10) [Dagbert et *al.*, 2002].



I .2.3.2.4. Les bactéries sulfato-réductrices (BSR)

Ces bactéries représentent l'un des principaux groupes responsables de la biocorrosion dans différentes industries et sont les plus étudiés dans la littérature CIM en raison de leur importance pratique. Les BSR permettent la production d'énergie par la réduction des sulfates en sulfures suit la réaction [Venzlaff et *al.*, 2013; Gu et *al.*, 2019].



I .2.3.2.4.1. Caractéristiques des BSR

La plupart des BSR sont des grams négatifs, de tailles et de formes variantes, elles peuvent être flagellées ou non, mésophiles ou modérément thermophiles, elles présentent une meilleure croissance dans un domaine de pH allant de 6 à 8 [Madigan et Martinko, 2005].

A métabolisme oxydatif anaérobies strictes, les BSR ont été utilisées comme model pour étudier la biocorrosion, biorestauration des ions métalliques toxiques [Heindelberg et *al.*, 2004], et la formation des bio films [Posarla et *al.*, 2017].

I .2.3.2.4.2. Métabolisme des bactéries sulfato-réductrice en milieu anaérobie

En conditions anaérobies, les bactéries sulfato-réductrices utilisent les sulfates comme accepteur final d'électrons pour leur respiration. Ces bactéries sont généralement organotrophes, elles oxydent les composés organiques de faible poids moléculaire et simultanément réduisent les sulfates en sulfures [Lens et *al.*, 1998]. Leur métabolisme peut être schématisé par la réaction suivante :



Divers composés organiques de faible poids moléculaire peuvent servir de donneurs d'électrons couramment utilisés par les grands groupes de sulfato-réduction. Il s'agit de l'acétate, du lactate, du pyruvate, du butyrate, de l'éthanol et de l'hydrogène [Kalyuzhnyi et al., 1998].

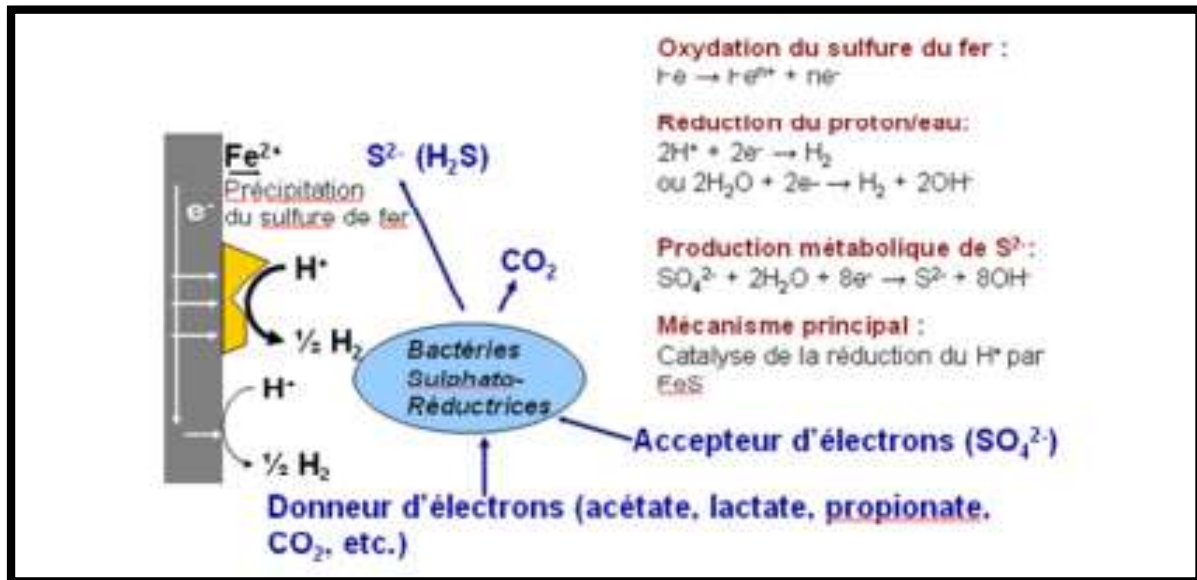


Figure 5. Métabolisme des BSR et mécanisme de corrosion par précipitation des sulfures de fer par les BSR [Mehanna, 2009].

I .3. La lutte contre la biocorrosion

Les moyens de lutte contre les bactéries de corrosion sont de trois types :

I .3. 1. Les stratégies de contrôle physique

Parmi les méthodes de contrôle physique le rinçage est considéré comme le plus simple mais son efficacité est limitée [Videla et Herrera, 2005]. Pour augmenter l'efficacité, le rinçage peut être effectué à l'aide de nettoyants ou d'agents chimiques qui induiraient le détachement du bio film [Videla et Herrera, 2005].

Des boules d'éponge abrasives ou non abrasives sont fréquemment utilisées. Cependant, des boules d'éponge abrasives peuvent endommager la protection des films protecteurs passifs, et les boules d'éponge non abrasives ne sont pas très efficaces vis-à-vis des biofilms [Videla et Herrera, 2007].

Enfin, une méthode générale pour améliorer la résistance à la corrosion consiste à appliquer des revêtements protecteurs, divers revêtements organiques ont été étudiés pour la protection contre la corrosion [Chou et al., 2002; Avci et Abanoz, 2004; Shimura et Aramaki, 2008].

Des nanoparticules tels que Ag/SiO₂ pourraient améliorer la protection anticorrosion à long terme et ont un fort potentiel [Le et al., 2010]. Il existe aussi un autre traitement de contrôle physique qui est l'irradiation comme la lumière ultraviolette qui peut inhiber /tuer les microorganismes, considéré comme alternative aux biocides et n'affecte que les microorganismes directement exposés à la lumière c'est-à-dire si les microorganismes sont enfermés dans des produits de corrosion, ils sont bien protégés contre les rayons UV; de plus des tuyaux ne sont pas adaptées au traitement UV.

L'irradiation inactive les cellules vivantes mais les cellules ne sont pas éliminées et restent donc dans la matrice du bio film ou elles servent de nutriments pour les organismes ultérieurs y compris ceux qui favorisent la CIM [Jaffer, 2003]. Les ultrasons qui sont un traitement ultrasonique produisent des bulles de cavitation dans l'eau qui lorsqu'elles s'effondrent, elles effectuent un effet néfaste sur les micro-organismes, ce traitement a été suggéré pour l'atténuation de la CIM [Pound et al., 2005].

I .3.2. Stratégies de lutte biologique

Les stratégies de contrôle biologique impliquent l'utilisation de micro-organisme pour contrôler la biocorrosion [Zuo et al., 2004], les méthodes de contrôle biologique ont également l'avantage d'être beaucoup moins chères et plus respectueuses de l'environnement que les méthodes de contrôle physique ou chimique et ont le potentiel d'être beaucoup plus efficaces.

La stratégie de lutte biologique peut être réalisée par l'exclusion bio concurrentielle [Videla et Herrera, 2007]. Cela implique l'utilisation des nutriments qui stimulent la croissance de bactéries compétitives telles que les bactéries réductrices de nitrate (BRN) qui sont capables de supprimer les BSR de la communauté [Tabari et al., 2011].

Il a été démontré que l'ajout de nitrate induisait un déplacement des populations bactériennes dominantes des bactéries réductrices de sulfate vers des bactéries réductrices de nitrate, ce qui empêche par la suite la production de sulfure d'hydrogène et la croissance de BSR [Videla et Herrera, 2007] et par les espèces bactériennes qui peuvent produire des

composés antimicrobiens dans le bio film ou par la formation de bio films bactérienne seuls [Jayaraman et al., 1999; Zuo et al., 2004].

I .3. 3. Les stratégies de contrôle chimique

Les stratégies de lutte chimique utilisées pour contrôler la biocorrosion impliquent l'utilisation de biocides qui sont des agents chimiques capables de tuer les organismes vivants. Les biocides pourraient être utilisés en conjonction avec d'autres substances telles que des agents dispersifs ou pénétrants capable d'augmenter l'efficacité du traitement [Gómez de Saravia et al., 2003]. Ces substances sont couramment utilisées dans les systèmes fermés, tel que les réservoirs de stockage en raison de leur nature toxique [Bartolomé et Sánchez-Fortiu, 2005].

I .3.3.1. L'ozone :

L'ozone a suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années en raison de son efficacité et du manque d'accumulation de produits toxiques [Saravia et al., 2003]. L'ozone attaque rapidement les parois cellulaires bactériennes et il est plus efficace contre les spores à parois épaisses des phytopathogènes et de parasite d'animaux que le chlore à des concentrations pratiques et sûres [Suslow, 2003]. En ce qui concerne les préoccupations environnementales, l'utilisation de l'ozone présente de nombreux avantages par rapport aux biocides conventionnels [Saravia et al., 2003].

La nature hautement toxique de l'ozone comme biocide et ces rejets de sous-produits non toxiques font de lui un biocide très prometteur pour l'avenir [Zuma et al., 2009].

I .3.3.2. Les biocides :

Les biocides peuvent être des agents oxydants ou non oxydants [Videla et Herrera, 2005]. Par exemple le tétra-kis-hydroximéthyl phosphonium sulfate (THPS) est l'un des biocides non oxydants les plus prometteurs de ces dernières années [Videla et Herrera, 2005]; il a un large spectre, étant efficace contre un large éventail de microorganismes tels que les bactéries y compris le BSR, les champignons et les algues [Videla et Herrera, 2005].

Lorsqu'il est utilisé avec un surfactant, le THPS est efficace pour éradiquer les biofilms et a été utilisé dans les systèmes de refroidissement industriels et dans l'industrie de fabrication de papier ainsi que dans les opérations sur les champs pétrolifères en raison de sa capacité à dissoudre le sulfure ferreux [Vedela et Herrera, 2007].

I .3.3.2.1. Classification des biocides

La première catégorie c'est les **agents oxydants** tels que le chlore, les composés de chloration, les choramines et le brome, couramment utilisés dans les systèmes d'eau douce, les plus pratiques étant les composés chlorés.

Cependant, l'efficacité des composés chlorés dépend des facteurs tel que le pH, la température ainsi que la lumière , ils ne sont pas très efficace lorsqu'ils sont utilisés pour contrôler les bio films, actuellement il existe une tendance à utiliser des biocides oxydants puissants comme le dioxyde de chlore dans les systèmes de refroidissement et l'ozone dans les systèmes de distribution d'eau car de faibles niveaux de chlore se sont avérés inefficaces contre les biofilms [Murthy et Venkatesan, 2009].

La deuxième catégorie c'est les agents **non oxydants** qui comprennent les sels quaternaires, les anthraquinones, les composés de type amine, et les aldéhydes. Ils sont plus stables que les biocides oxydants, et peuvent être utilisés dans une variété d'environnements différents [Vedila et Herrera, 2005]. Dans la plupart des cas, des combinaisons des biocides oxydants et non oxydants sont utilisés pour augmenter le contrôle microbiologique du système [Videla et Herrera, 2005].

D'autres biocides couramment utilisés sont le glutaraldéhyde, les isothiazolones et le quaternaire, le composé d'ammoniac, et les métaux lourds tel que chromates en raison de leurs efficacité et de leur capacité à agir sur un large éventail de conditions environnementales [Videla et Herrera, 2005].

I .3. 3.2.2. Types d'action des biocides

Selon leur effet, les biocides peuvent être classés en deux grandes catégories :

I .3.3.2.2.A. Biocides à effet bactéricide

Un biocide est dit bactéricide lorsqu'il tue les bactéries avec lesquelles il entre en contact. Cette activité est quantifiée par la mesure de la CMB (Concentration minimales bactéricide); sa valeur est en fonction de la souche utilisée, le produit et le temps de contact.

Par ailleurs la CMB est définie comme étant la plus faible concentration du biocide pour lequel l'effet bactéricide souhaité est de 99.999% dans les conditions standardisées [Lemaitre, 1998].

I .3.3.2.2.B. Biocides à effet bactériostatique

Le biocide bactériostatique est un produit ou procédé ayant la propriété d'inhiber momentanément des bactéries dans des conditions définies, cette activité quantifiée par la mesure de la concentration minimale inhibitrice (CMI), c'est la plus faible concentration du produit empêchant le développement des micro-organismes testés [Lemaitre, 1998].

I .3.3.2.3. Mode d'action des biocides

Soit en détruisant la structure cellulaire des bactéries par la destruction de certaines constituantes cellulaires, par la combinaison avec les acides nucléiques ou par l'extraction de l'eau du cytoplasme.

Soit en interférant avec le métabolisme énergétique par la combinaison avec les groupements prothétiques des enzymes ou par la compétition avec les substances enzymatiques.

Soit en interférant avec la biosynthèse en empêchant la production des enzymes, en empêchant la synthèse de la paroi bactérienne ou en provoquant un arrêt de la réplication de l'ADN [Denyer, 1995].

I .3.3.2.4. Les facteurs d'efficacité d'un biocide

Différents facteurs peuvent influencer l'efficacité d'un biocide, cependant les plus importants sont :

I .3.3.2.4.A. La concentration du biocide

Dans certaines limites la vitesse de destruction d'une population microbienne, est proportionnelle à la concentration du produit utilisé. Cette relation est due au fait qu'aux concentrations élevées, il y a de fortes probabilités qu'un grand nombre de micro-organismes soit atteint et tués par les composés chimiques présents [Leclerc, 1995].

I .3.3.2.4.B. Le temps de contact

L'influence de l'efficacité d'action au sein d'une même population, formée par une espèce donnée, tous les micro-organismes ne soient également vulnérables, donc ne meurent pas au même temps [Pineau, 1995].

I .4. Les biosurfactants

La plupart des inhibiteurs chimiques traditionnels, tels que les amines, les amides et les sels d'ammonium quaternaire, sont toxiques et nocifs, ce qui a conduit la recherche actuelle à se pencher sur la production de biocides verts naturellement synthétisés avec propriétés appropriées telles qu'une activité antimicrobienne efficace, une faisabilité économique, une faible toxicité et des caractéristiques respectueuses de l'environnement.

Les biosurfactants sont des composés tensioactifs biologiques, qui présentent des propriétés respectueuses de l'environnement, telles qu'une faible toxicité et une biodégradabilité élevée.

Ce sont des métabolites secondaires, des composés amphiphiles tensioactifs d'origine biologique, peuvent être synthétisés par des bactéries, champignons et levures spécifiques, avec comme espèces principales *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Candida albicans* et *Acinetobacter calcoaceticus* [Vijayakumar et Saravanan, 2015; Santos et al., 2016].

Sur la base de leur composition chimique et de leur origine microbienne, les biosurfactants ont été classés en différents groupes. Il existe cinq grandes classes : les glycolipides, les lipopeptides, les phospholipides, les composés polymères et les lipides neutres [Kosaric et Sukan, 2015].

I .4.1. Propriétés des biosurfactants

Les propriétés d'intérêt des biosurfactants comprennent les actions de mouillage, de pénétration, d'étalement, d'hydrophilie et d'hydrophobicité, d'émulsification, de désémulsification, de détergence, de gélification, de moussage, de floculation, les valeurs de faible concentration micellaire critique (CMC) et d'amélioration de la croissance microbienne ou de propriétés antimicrobiennes [Kosaric et al., 2015; Rosenberg et al., 1999; Fait et al., 2019].

Les propriétés fonctionnelles des biosurfactants sont principalement déterminées par leur structure, par exemple l'emplacement et la taille des groupements fonctionnels, en plus des structures amphiphiles, par exemple un changement dans la structure d'une paroi cellulaire par des microorganismes peut produire des tensioactifs non ioniques ou lipopolysaccharides dans leur paroi cellulaire [Marchant et Banat, 2012].

I .4.2. Composition chimique des biosurfactants

Les biosurfactants sont composés de complexes biochimiques qui comprennent une large gamme de molécules, telles que les acides gras et di carboxylique, les amides d'acide gras, les lactones, les alkyl glycosides, les phospholipides, les glycolipides, les lipopeptides et les saccharides.

Généralement les composants moléculaires des biosurfactants sont divisés en groupements hydrophobes et hydrophiles, le fragment hydrophobe se compose généralement d'acide gras à longue chaîne saturés ou insaturés tandis que le fragment hydrophile est constitué d'anions, de cations, d'acides aminés ou de polysaccharides [Plaza, 2018; Fenibo et al., 2019].

I .4.3. Mode d'action des biosurfactants

Les biosurfactants détruisent les cellules microbiennes en perturbant directement l'intégrité de la membrane plasmique ou de la paroi cellulaire ; l'ampleur de tels dommages dans la limite de la cellule rend n'importe quelle organisme cible très faible et incapable de développer leur résistance au biosurfactant [Banat et al., 2014; Satpute et al., 2016].

Les lipopeptide créent des pores dans la membrane cellulaire de l'organisme cible, créant un déséquilibre dans le mouvement des ions à la fois dans et hors de la cellule microbienne qui est mortel pour la cellule endommagée [Satpute et al., 2016].

De plus, les biosurfactants lipopeptidiques produits par les espèces de Bacillus présentent spécifiquement des effets inhibiteurs de croissance et lytique contre un large spectre des microorganismes ceux-ci incluent les bactéries gram-négatives et gram-positives, les champignons et certains virus, les biosurfactants à base de glycolipides tel que le rhamnolipide produits principalement par les espèces Pseudomonas présentent également des propriétés algicides, anti amibes.

Il a également été rapporté que ces composés lipidiques tuent efficacement diverses bactéries, ainsi que les champignons et certains virus [De Rienzo et al., 2015; Efremenkova, et al., 2019].

Dans une étude il a été conclu que les biosurfactants lipopeptidiques produits par Bacillus tel que les rhamnolipides ont la capacité d'influencer la division cellulaire par inhibition de la croissance pendant la phase exponentielle, il a été conclu aussi que les biofilms formés par

Pseudomonas aeruginosa, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* et *Staphylococcus aureus* sur des lamelles de verre étaient perturbés par des sophorolipides [De Rienzo et al., 2016].

Les rhamnolipides et les sophorolipides peuvent avoir différents mécanismes d'action contre les bactéries, ils ont indiqué que les sophorolipides ont un grand potentiel d'utilisation pour la perturbation des biofilms [Mireles et al., 2001; Rosenberg et al., 1999].

I .4.4. Domaines d'applications des biosurfactants :

Les biosurfactants sont utilisés dans divers domaines : la pétrochimie, l'agriculture, les cosmétiques, les médicaments, la production alimentaire et pharmaceutique, la récupération d'huile de pétrole, l'inhibition de la corrosion, les pollutions de l'eau et du sol, science de la vie, chimie, etc [Parthipan et al., 2017].

I .4.5. Les biosurfactants comme inhibiteur de la biocorrosion

Les espèces bacilles sont capables de former des biofilms qui secrètent judicieusement une large gamme de composés antimicrobiens, tels que la polymyxine B, la gramicidine S et les biosurfactants qui appartiennent à la famille des lipopeptides. Ils semblent être des candidats prometteurs pour produire des agents antimicrobiens contre les BSR en provoquant des perturbations au sein de la membrane externe et la membrane cytoplasmique [Jayaraman et al., 1999; Zuo et al., 2004].

La corrosion de l'acier inoxydable en présence de biosurfactant produit par des bactéries à gram négatif *Pseudomonas fluorescens* a été étudiée. L'acier inoxydable est fréquemment utilisé dans le domaine maritime. La solution de biosurfactant a retardé la corrosion des aciers inoxydables [Dagbert et al., 2006].

Une étude de l'influence du bio complexe rhamnolipidique tensioactif produit par la bactérie *Pseudomonas.sp* sur la corrosion et la repassivation d'une surface en alliage d'aluminium AL-Cu-Mg fraîchement coupée, a montré que ce complexe de biosurfactants inhibait effectivement la corrosion de l'alliage dans l'eau de pluie acide synthétique par adsorption du biosurfactant sur la surface de l'alliage, avec la formation d'un film barrière monocouche [Zin et al., 2018].

Dans une étude des biosurfactants susceptibles d'être utilisés comme une alternative au biocide chimique contre le biofilm associé à la biocorrosion, en particulier dans l'industrie pétrolière et gazière. Huit biosurfactants appartenant au glycolipide et au rhamnolipide ont été

obtenus à partir des bactéries indigènes productrices de biosurfactants isolés d'un réservoir d'huile, leurs activités contre la biocorrosion associée aux biofilms ont été déterminées.

Grace à cette recherche, les biosurfactants peuvent être utilisés dans l'industrie pétrolière non seulement pour la récupération assistée du pétrole, mais également comme alternatifs aux biocides chimiques [**Astuti et al., 2018**].



Chapitre II :

Matériels et Méthodes

Après la méthode d'isolement des BSR à partir des eaux d'injection nous avons résumé dans ce chapitre les techniques d'extraction, de purification et de caractérisation des biosurfactants, les techniques d'évaluations de l'effet antimicrobien des biosurfactants et enfin les techniques utilisées pour étudier l'effet inhibiteur des biosurfactants sur la biocorrosion.

II . 1. Isolement des BSR

L'isolement des BSR se fait à partir des eaux d'injection obtenu à partir du champ pétrolifère situé à Hassi Messaoud dans la région sud-est algérienne. Cette dernière est choisie car affectée par une charge microbiologique riche en bactéries corrosives de type BSR. L'isolement se réalise sur un milieu spécifique, codé par le symbole APIRP 38 (American Petroleum Institute Recommended Practice 38).

La composition de ce milieu est: $C_3H_5NaO_3$ 4 ml/L, extrait de levure 0,1 g/L, $C_6H_8O_6$ 0,1 g/L, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,2 g/L, K_2HPO_4 0,01 g/L, $Fe (SO_4)_2(NH_4) 6H_2O$ 0,2 g/L et Na Cl 10 g/L. Ce milieu stimule la croissance bactérienne en fournissant des sources de carbone (lactate et acide ascorbique), azote (extrait de levure), sels minéraux, chélateur d'oxygène et autres facteurs de croissance. 90 ml d'eau d'injection et 10 ml du milieu API RP 38 sont placés dans des flacons Erlenmeyer de 250 ml, puis incubés à 37 °C pendant 28 jours.

Cette technique permet d'isoler les espèces de BSR les plus dominantes (capables de croître dans le milieu) dans l'échantillon d'origine [Djouahra et al., 2019].

On peut définir l'eau d'injection comme une eau utilisée pour la récupération secondaire du pétrole, elle doit être homogène et ses caractéristiques physicochimiques doivent rester stables pour obtenir des résultats analytiques représentatifs [Mimouni, 2017].

II . 2. Extraction, purification et caractérisation des biosurfactants

Diverses méthodes analytiques ont été utilisées pour extraire, purifier et caractériser différents biosurfactants [Heyd et al., 2008].

Parmi les techniques analytiques courantes pour étudier les biosurfactants Satpute et al 2010 ont rapporté la précipitation, l'extraction par solvant de filtration, la centrifugation, le fractionnement de la mousse et les techniques chromatographiques. L'une des méthodes les

plus simples de récupération des rhamnolipides de *Pseudomonas sp* est une précipitation acide ou les précipitations de sulfate d'aluminium [Varjani et Upasani, 2016].

Le rhamnolipide précipité peut être extrait en utilisant un solvant approprié, à savoir l'acétone, l'acétate d'éthyle, le chloroforme et le méthanol [Heyd et al., 2008; Banat et al., 2010; Satpute et al., 2010]. La précipitation au sulfate d'ammonium est généralement utilisée pour la précipitation de biosurfactants de haut poids moléculaire [Banat et al., 2010].

Entre l'extraction par solvant et la centrifugation, l'extraction par solvant est la méthode d'extraction la plus adoptée [Varjani et Upasani, 2016].

Le biosurfactant extrait et purifié peut être caractérisé par méthodes analytiques chromatographiques et/ou spectrophotométriques simples à sophistiquées; la chromatographie sur couche mince (CCM), la chromatographie en phase gazeuse (GC), spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse (GC-MS), la spectrométrie de masse à ionisation par électrospray (ESI-MS), la chromatographie sur couche mince haute performance (HP-TLC), la chromatographie liquide haute performance (HPLC), la chromatographie liquide-spectrométrie de masse (LC-MS), bombardement atomique rapide-spectrométrie de masse (FAB-MS) et la résonance magnétique nucléaire (RMN), etc [Benincasa et al., 2004].

II. 3. Activité antimicrobienne des biosurfactants

La méthode la plus utilisée pour déterminer les valeurs de la CMI est la méthode de dilution car elles offrent la possibilité d'estimer la concentration de l'agent antimicrobien testé dans la gélose (dilution de gélose) ou le bouillon (macro dilution ou micro dilution) [Pfaller et al., 2004].

La méthode de dilution en bouillon ou en gélose peut être utilisée pour mesurer quantitativement l'activité antimicrobienne *in vitro* contre les bactéries. La valeur de CMI enregistrée est définie comme la concentration la plus faible de l'agent antimicrobien testé qui inhibe la croissance visible du microorganisme testé et elle est généralement exprimée en mg/ml ou mg/l. Il existe de nombreuses directives approuvées pour les tests de sensibilité aux antimicrobiens par dilution des bactéries [Pfaller et al., 2004].

Pour la détermination du point finale CMI, les dispositifs de visualisation peuvent faciliter la lecture des tests de microdilution et l'enregistrement des résultats avec une grande capacité

à discerner la croissance dans les puits. De plus, plusieurs méthodes colorimétriques basés sur l'utilisation de réactifs colorants ont été développées sont souvent utilisés dans la détermination du point final de CMI pour les dosages de micro dilution et anti bactériens [AL-Bakri *et al.*, 2007; Kuhn *et al.*, 2003].

La micro-dilution en bouillon est l'une des méthodes de test de sensibilité aux antimicrobiens les plus élémentaires ; la procédure consiste à préparer des dilutions double de l'agent anti microbien (par exemple 1, 2, 4, 8, 16 et 32 μg /ml) dans un milieu de croissance liquide distribué en puits avec des volumes plus petits en utilisant une plaque de microtitration à 96 puits (microdilution). Ensuite, chaque puits est inoculé avec un inoculum microbien préparé dans le même milieu après dilution de suspension microbienne standardisée ajustée à l'échelle de 0,5 McFarland. Après avoir bien mélangé, la plaque de microdilution à 96 puits est incubée (la plupart du temps sans agitation) dans des conditions appropriées en fonction du micro-organisme testé. La méthodologie expérimentale pour effectuer avec précision la micro dilution est schématisée sur la figure 6 [CLSI, 2012].

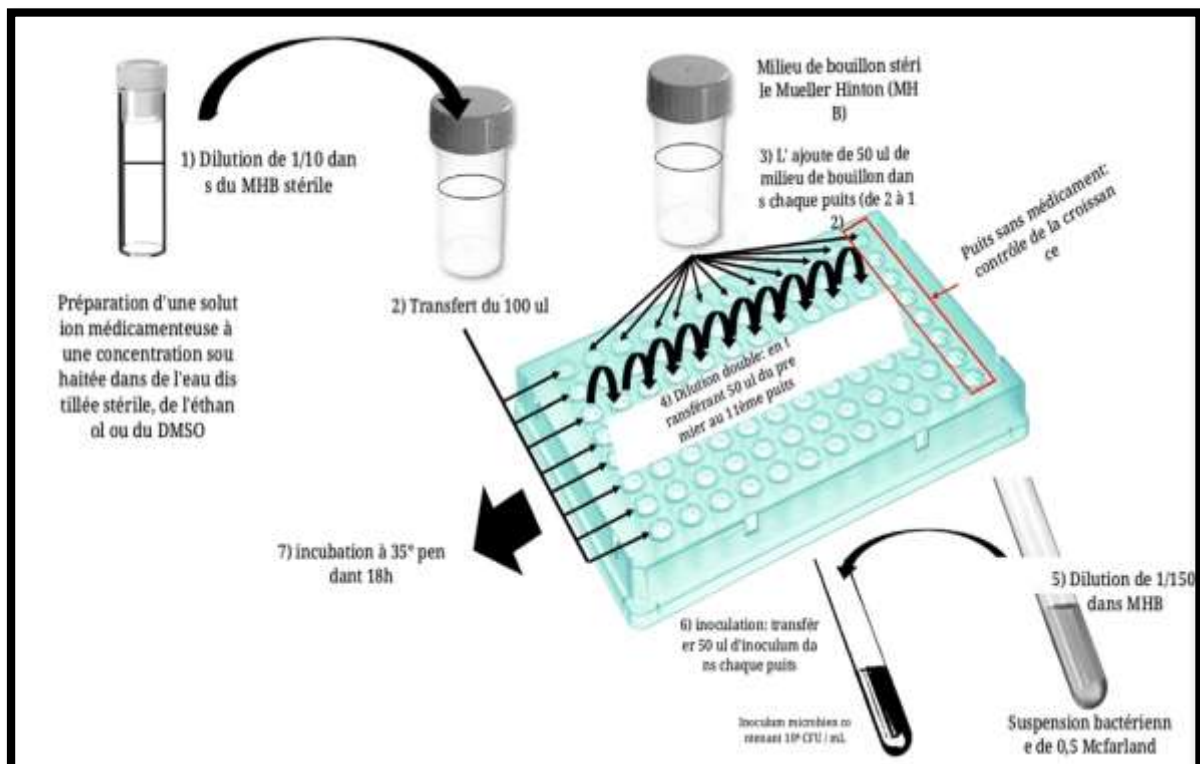


Figure 6. Micro dilution en bouillon pour les tests antibactériens comme recommandé par le protocole CLSI [Balouiri *et al.*, 2015].

Il existe d'autres méthodes d'évaluation de l'activité antimicrobienne on citera les méthodes de diffusion sur disque d'agar, par puits d'agar, par bouchon d'agar et méthode du gradient antimicrobien, la chromatographie sur couche mince (CCM)-bio autographie comme diffusion d'agar, bio autographie directe et dosage biologique de superposition d'agar [Balouiri et al., 2015].

II . 4. Etude de l'effet inhibiteur du biosurfactant sur la biocorrosion

II . 4.1. Test de perte de poids

La perte de poids est un test simple et fiable pour mesurer la corrosion. Il est largement utilisé dans les études CIM comme preuve de la capacité globale des biofilms à corroder un métal. Un coupon métallique poli (généralement à 600 grains) est pesé avant d'être placé dans un environnement corrosif pendant une période de temps, suivi de l'élimination des biofilms et des produits de corrosion selon des méthodes standard. L'échantillon propre est pesé à nouveau pour déterminer la perte de poids. Pour les aciers au carbone, la solution de Clarke est souvent utilisée pour nettoyer un coupon [ASTM, 2017].

Une perte de corrosion allant jusqu'à 0,3 mg/cm² peut être attribuée au processus de nettoyage des coupons [Jia et al., 2017c].

II . 4.2. Analyse de surface

La microscopie électronique à balayage (MEB) est la méthode de base pour l'observation de la morphologie des bio films et des produits de corrosion [Liu.T et al., 2018]. Le bio film sur une surface solide telle qu'une surface métallique doit d'abord être fixé à l'aide d'un biocide fort. Il est déshydraté à l'alcool et suivi de préférence d'un séchage au CO₂ supercritique dans un sécheur à point critique [Jia et al., 2017a]. Enfin, un mince film d'or ou de platine est utilisé pour revêtir le bio film non conducteur pour l'observation au MEB. Le MEB fournit des images haute résolution montrant différentes formes de cellules dans un consortium de bio film en culture mixte [Jia et al., 2017b]. Il peut également révéler des contaminants microbiens pour un bio film de souche pure si des formes de cellules étrangères apparaissent.

Le MEB est généralement équipée d'un accessoire de spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) qui peut être utilisé pour analyser la composition chimique du bio film et des produits de corrosion. L'EDS fournit la composition élémentaire d'un endroit

particulier sous MEB peut indiquer l'efficacité du traitement du bio film si le biofilm traité se détache de la surface du coupon [Jia et al., 2017a].

D'autres méthodes sont également disponibles pour les analyses de surface des coupons. La diffraction des rayons X (XRD) a été appliquée avec succès pour identifier la structure cristalline et la composition chimique des produits de corrosion. Les résultats peuvent aider à expliquer un processus de corrosion [Liu et al., 2016]. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT IR) a également été utilisée pour étudier la formation de bio film [Rjasekar et Ting, 2010] et pour identifier différents microbes, la FT IR ne nécessite pas beaucoup de préparation d'échantillons elle peut être appliquée sur des échantillons humides [Chakraborty et Das, 2017].

II. 4.3. test électrochimique

Les techniques électrochimiques fournissent des informations sur la corrosion transitoire in-situ dès le premier jour et elles peuvent être exécutées en continu pendant toute la durée du test tant qu'elles ne sont pas destructives. Elles peuvent être utilisées non seulement pour étudier les comportements CIM, mais également pour l'évaluation de l'effet des biocides.

II. 4.3.1. La résistance de polarisation linéaire (LPR)

Est une technique non destructive couramment utilisée dans les études de corrosion des matériaux. Elle est considérée comme une technique pratique qui fournit des données de corrosion en temps quasi réel, ce qui la rend très utile sur le terrain. Pour cette technique, un balayage de potentiel DC linéaire (courant continu) dans une plage étroite (± 10 mV ou aussi petite que ± 5 mV) par rapport au potentiel de circuit ouvert (OCP) est effectué. Ensuite, la résistance de polarisation (R_p) est calculée par le logiciel du potentiostat. R_p est inversement proportionnel à la vitesse de corrosion. En pratique, R_p est généralement utilisé pour l'analyse qualitative en CIM sans conversion en taux de corrosion en utilisant les valeurs de pente de Tafel car les pentes de Tafel pour CIM varient considérablement même pour le même système CIM à des moments différents [Jia et al., 2017c].

II. 4.3.2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS)

Est une autre technique non destructive utilisée dans l'étude de la CIM. Dans cette technique, un AC (courant alternatif) avec une perturbation d'amplitude de 5 à 10 mV est appliqué sur une très large gamme de fréquences (typiquement 100 kHz à 10 mHz). Les

réponses électrochimiques sont enregistrées pour fournir des graphiques de Nyquist (impédance) et de Bode (impédance et angle de phase en fonction de la fréquence). Un diamètre de demi-cercle plus grand dans un Nyquist signifie une résistance à la corrosion plus élevée ou un taux de corrosion inférieur en analyse qualitative. Les données spectrales EIS sont modélisées à l'aide de circuits équivalents composés d'une résistance, d'un condensateur (ou d'autres composants) [Jia et al., 2017d].

II. 4.3.3. Polarisation potentiodynamique

Utilise une tension continue dans la plage de plus et moins plusieurs centaines de mV autour d'un OCP (potentiel de circuit ouvert) stable pour examiner le comportement global de corrosion d'un système. Les pentes Tafel de la courbe anodique et de la courbe cathodique donnent les valeurs β_a et β_c (figure 7). La densité de courant de corrosion (i_{corr}) de l'analyse Tafel peut être utilisée pour calculer le taux de corrosion basé sur un simple bilan de masse [Jia et al., 2017e].

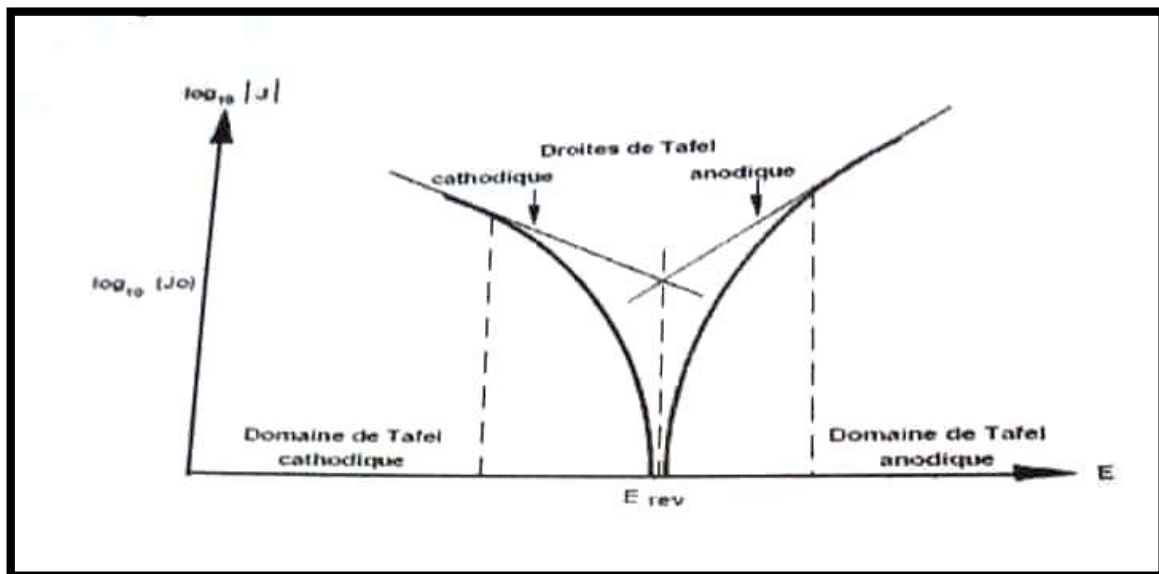
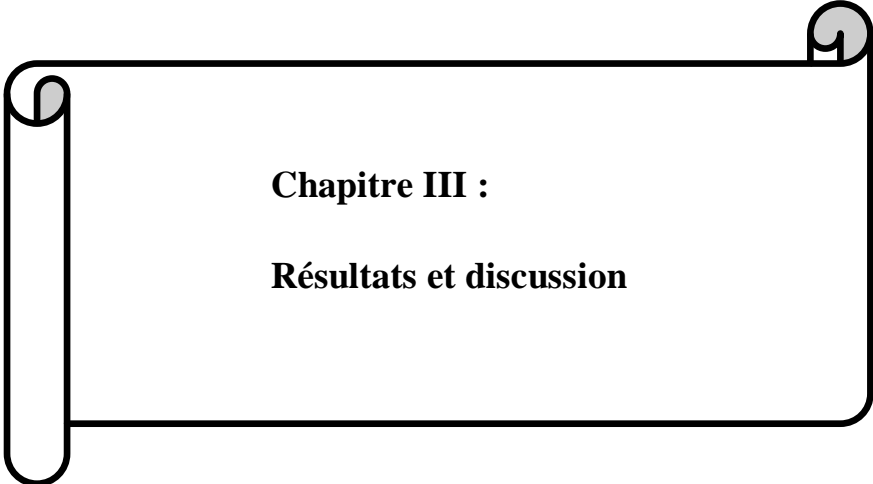


Figure 7. Détermination du potentiel de corrosion par la méthode des droites de Tafel [Lebrini, 2005].



Chapitre III :
Résultats et discussion

Ce chapitre est une synthèse des résultats des travaux antérieurs qui tournent autour de la thématique, soit la caractérisation des biosurfactants et leurs effets sur l'inhibition de la biocorrosion .

III. 1. Caractérisation des biosurfactants

Un biosurfactant de type glycolipidique a été utilisé comme inhibiteur microbien contre des souches bactériennes corrosives, les résultats obtenus à partir des analyses FTIR et CCM ont été utilisés pour connaître les propriétés fonctionnelles du biosurfactant [**Parthipan et al., 2018a**].

Comme indiqué sur la Figure 8, l'analyse FTIR du biosurfactant a bien montré que la souche *Pseudomonas.mosselii* F01 produit des biosurfactants de nature glycolipidique. Un pic à 3402 cm^{-1} qui a représenté l'étirement hydroxyle OH qui est due à la présence des groupements glucidiques. Le pic à 2928 cm^{-1} indique l'étirage de CH_2 , CH_3 , le pic à 1629 cm^{-1} est lié à la vibration de l'étirement de COO. Un pic à 1400 indique la présence de vibrations de flexion de CH CH_3 et CH_2 qui sont attribuait aux polysaccharides, alors que le pic à 1282 cm^{-1} indique l'étirement C-O de la chaîne hydrocarbonée. Les pics entre 1108 - 1058 cm^{-1} confirment la présence d'un étirement de COC dans le rhamnose.

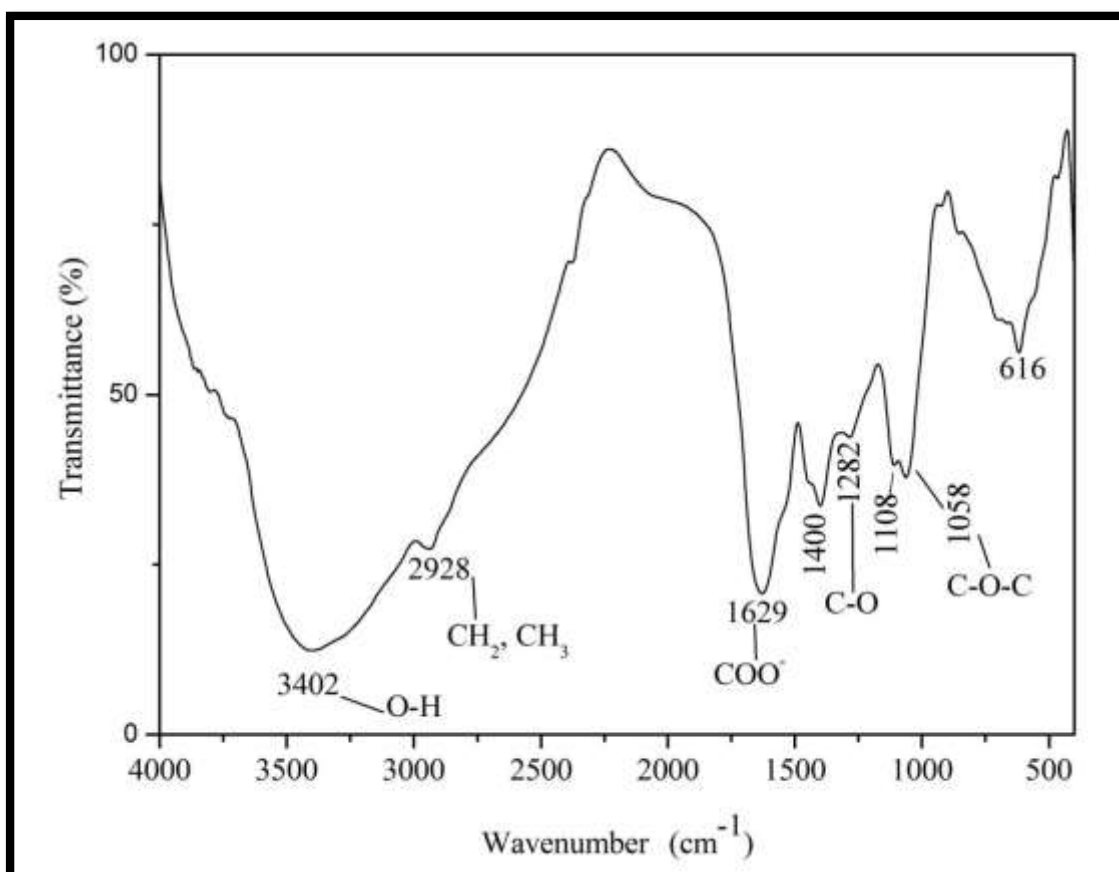


Figure 8. Caractérisation par FTIR du biosurfactant glycolipidique produit par la bactérie *P. mosselii* F01 [Partihipan et al., 2018a].

L'analyse par CCM du biosurfactant recueilli à partir de la souche *Pseudomonas. Mosselii* F01 est représentée sur la Figure 9. Une tache migre lentement avec un facteur de retard de 0.72 dans la voie 2 qui représente le glycolipide comparé au rhamnolipide standard représenté dans la voie 1. Les auteurs ont remarqué que la vitesse de migration du biosurfactant est similaire à celle du biosurfactant commerciale utilisé comme témoin de référence, ceci indique que le biosurfactant produit par la souche F01 est de nature glycolipidique (rhamnolipide).



Figure 9. La Chromatographie sur couche mince (CCM) du biosurfactant obtenu à partir de *P. mosselii* F01 après traitement par le réactif orcinol a révélé une tache brune avec une valeur R_f de 0,72, indiquant la présence de biosurfactant glycolipidique. Les chromatogrammes ont été développés avec du chloroforme: méthanol: acide acétique [Partihipan et al., 2018a].

En 2018b Prthiphan et al, ont étudié l'effet du biosurfactant issu de bactéries dégradant les hydrocarbures sur la biocorrosion, l'analyse par chromatographie en phase gazeuse a révélé que les principaux composants présents dans les extraits étaient uniquement des acides gras. Le biosurfactant produit par *Streptomyces. parvus* B7 (Figure 10a) contient les acides gras suivants: acide n-hexadécanoïque ($C_{16}H_{32}O_2$) (32,49%) (Figure 10b), acide oléique ou acide octadécanoïque ($C_{18}H_{34}O_2$) (40,33%) (Figure 10c) et l'acide octadécanoïque, ester méthylique ($C_{19}H_{38}O_2$) (Figure 10d) représentant 17% de l'ensemble des pics présents dans les spectres GC. L'ester de bis (2-éthylhexyle) d'acide hexanedioïque ($C_{22}H_{42}O_4$) était présent dans les souches restantes telles que *Bacillus pumilus* B1, *Bacillus subtilis* B5 et *Bacillus megaterium* B6. De plus, l'acide palmitique ($C_{16}H_{32}O_2$) est également présent dans *Bacillus pumilus* B1, l'acide palmitique et l'ester méthylique ($C_{17}H_{34}O_2$) est présent dans *Bacillus megaterium* B6.

L'analyse FT-IR du biosurfactant produit par *Streptomyces parvus* B7 (Figure 11) a confirmé la présence d'acides gras. Les spectres FT-IR ont révélé un pic à 599 cm^{-1} provenant de la liaison C-I (carbone-iodé). Le pic à 638 cm^{-1} confirme la présence de C-Br. Le pic à 3116 cm^{-1} représente le système cumulé $R_2C=N=N$ dans l'échantillon. Une bande d'absorption à 976 cm^{-1} s'est avérée être un étirement de $RCH=CH_2$, ce qui indique la

présence d'alcènes. Les nombres d'ondes 3560, 2308 et 2390 cm^{-1} révèlent l'étirement du groupe N-H. La transmission à 1405 cm^{-1} est causée par la chaîne aliphatique du groupe C-H. Des pics d'étirement intenses à 1171 et 1645 cm^{-1} indiquent la présence de groupes R-NO₂. La présence de ces groupes chimiques a clairement révélé que le biosurfactant était de nature acide gras.

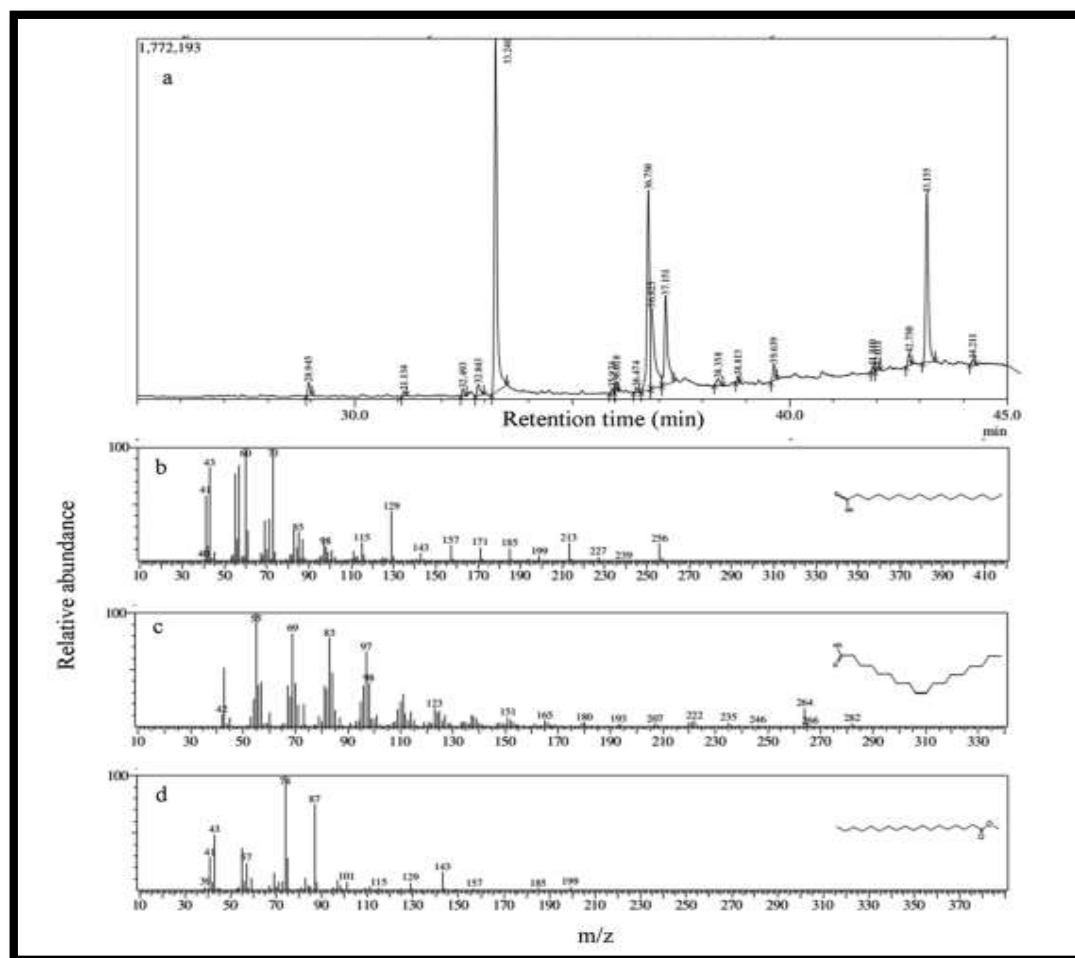


Figure 10. Analyses par CG-SM du biosurfactant produit par *S. parvus* B7 (a) spectres CG du biosurfactant, (b) spectres de masse du n-hexadécanoïque, (c) spectres de masse de l'acide octadécanoïque et (d) spectres de masse de l'acide octadécanoïque, ester méthylique [P Parthipan *et al.*, 2018b].

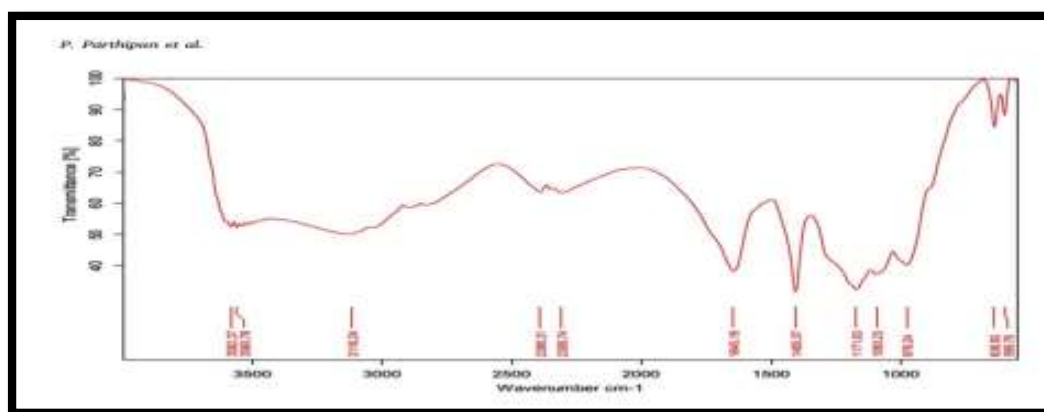


Figure 11. Le spectre FT-IR du biosurfactant partiellement purifié isolé de *S.parvus* (B7) [Parthipan et al., 2018b].

III. 2. Activité antimicrobienne des biosurfactants

Par la méthode de microdilution, il a été montré que le biosurfactant extrait à partir *Pseudomonas mosselii* F01 a une activité antibactérienne plus élevée dans la gamme de 1280-2560 µg / ml en présence de souches bactériennes corrosives [Parthipan et al., 2018a].

Comme mentionné dans le tableau 1, toutes les souches considérées corrosives sont sensibles à de très faibles doses de biosurfactant. La Souche *Bacillus subtilis* A1 est fortement inhibée à des concentrations relativement faibles (1280 µg/ml) d'inhibiteur par rapport à d'autres souches bactériennes corrosives testées qui montrent une inhibition complète à 2560 µg / ml.

Tableau 1. La concentration minimale inhibitrice (CMI) et la concentration minimale bactéricide (CMB) du biosurfactant glycolipidique en présence de différentes souches bactériennes corrosives [Parthipan et al., 2018a].

| Nom de souche | CMI (µg / ml) | CMB (µg / ml) |
|-------------------------|---------------|---------------|
| <i>B. subtilis</i> A1 | 1280 | 1280 |
| <i>S. Parvus</i> B7 | 2560 | 2560 |
| <i>P. stutzeri</i> NA3 | 2560 | 2560 |
| <i>A. baumannii</i> MN3 | 1280 | 2560 |

Par ailleurs, un autre biosurfactant a été isolé par **Purwasena et al., 2019** à partir de *Bacillus sp* ; bactéries indigènes du réservoir de pétrolafin de prévenir et d'éliminer le biofilm induisant la corrosion microbienne sur l'acier au carbone ST37.

La concentration minimale inhibitrice (CMI), la concentration minimale inhibitrice du biofilm (CMIB) et de la concentration minimale d'éradication du biofilm à 50% (CMEB50) du biosurfactant contre les bactéries formant un biofilm isolées du réservoir d'huile ont été déterminé par la méthode des microdillution, les valeurs obtenues sont respectivement 62,5; 31,25; et 500 $\mu\text{g ml}^{-1}$

III. 3. Etude de la biocorrosion

III. 3.1. Perte de poids

Purwasena et al., 2019 qui ont isolé à partir de *Bacillus sp* ; bactérie indigène du réservoir de pétrole, un biosurfactant pour prévenir et éliminer le biofilm induisant la corrosion microbienne sur l'acier au carbone ST37.

La technique de perte de poids a montré une diminution de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone ST 37 suite à l'ajout des biosurfactants, de $4,56 \times 10^{-4} \text{ mm an}^{-1}$ à $3,31 \times 10^{-4} \text{ mm an}^{-1}$ sur la base de la valeur CMIB et de $5,18 \times 10^{-5} \text{ mm an}^{-1}$ à $2,7 \times 10^{-5} \text{ mm an}^{-1}$ après éradication du biofilm à la valeur de la CMEB.

Un biosurfactant de type glycolipidique a été produit à partir de la souche bactérienne *Pseudomonas mosselii* F01, il a été utilisé comme inhibiteur microbien contre des souches bactériennes corrosives [**Parthipan et al., 2018a**].

Le tableau 2 montre une faible vitesse de corrosion de l'acier au carbone (0,0215 mm / an) dans le système de consortia bactériens mixtes en présence de biosurfactant comme inhibiteur / biocide par rapport au système bactérien mixte (0,1653 mm /an) en absence de biosurfactant. L'efficacité d'inhibition a été estimée à 87% pour les systèmes consortia mixtes incluant le biosurfactant.

Tableau 2. Vitesse de corrosion et efficacité d'inhibition de l'acier au carbone API 5XL en présence et en absence de consortium mixte et de biosurfactant glycolipidique [Parthipanet *al.*, 2018a].

| Systèmes en acier au carbone API 5LX | | | |
|--|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | Perte de poids (mg) | Vitesse de corrosion (mm /an) | Efficacité d'inhibition (%) |
| I- EP+Coupons | 21,1 ± 0,5 | 0,0820 | - |
| II-EP+Coupons+BS | 4,21 ±0,2 | 0,0156 | 80 |
| III-EP+Coupons+MC(10 ⁴ UFC/ml d'A1, B7, NA3 et MN3) | 44,5 ± 1 | 0,1653 | - |
| IV-EP+Coupons+MC(10 ⁴ UFC/ml d'A1, B7, NA3 et MN3 + BS) | 5,8 ± 0,4 | 0,0215 | 87 |

Note: EP = eau produite, BS= biosurfactants, MC= consortium mixte, A1= *Bacillus subtilis*, B7=*Streptomyces parvus*, NA3=*Pseudomonas stutzeri* et MN3= *Acinetobacter baumannii*.

III. 3.2. Analyse de surface

Dans une étude d'inhibition de la biocorrosion sur l'acier au carbone ST37 en utilisant un biosurfactant produit par *Bacillus sp* et d'après **Purwasena et al 2019**, le biofilm formé à la surface des coupons sans exposition aux antimicrobiens (Figure 12a) et avec biosurfactant (Figure 12b) ont été observés au MEB. Il a été révélé que la matrice du bio film était plus épaisse et remplie de bactéries sur les coupons qui n'ont pas été traités avec le biosurfactant. Contrairement aux coupons traités avec le biosurfactant ils étaient recouverts d'une couche plus mince avec moins de cellules attachées à la surface. Cela confirme les données selon lesquelles l'exposition aux biosurfactants pourrait inhiber le développement du bio film.

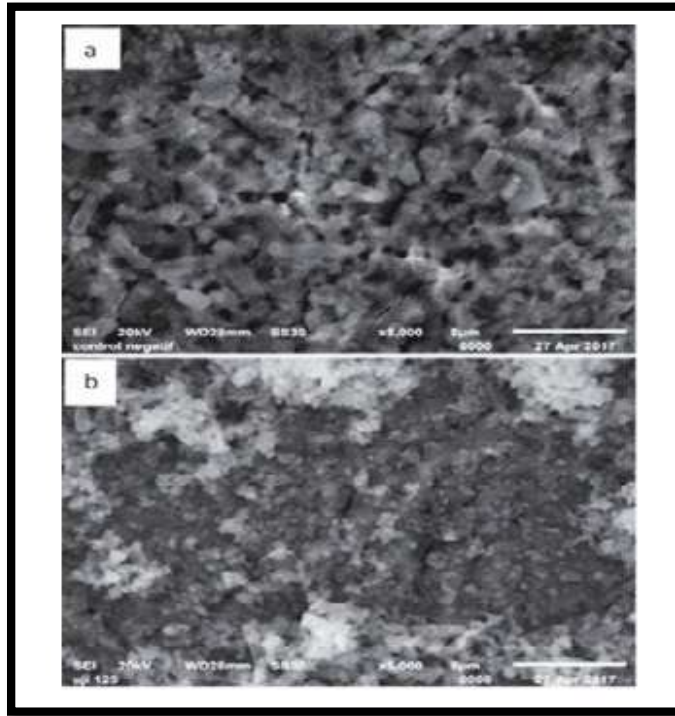


Figure 12. Image de formation du biofilm sur le coupon d'acier au carbone ST37 après 5 jours (a) sans antimicrobiens et (b) avec biosurfactant observés au MEB [Purwasena et al., 2019].

La visualisation des coupons corrodés après la régénération des biofilms, qui sont capturés à l'aide de **MEB-EDS** (figure 13). Il a été révélé que les coupons sans consortium de biofilms ajoutés n'ont montré aucun produit de corrosion sur leur surface (figure 13 (a)). Pendant ce temps, tous les couples qui ont été inoculés avec le consortium de biofilm ont révélé un produit de corrosion (figure 13 (b), (c)). Le coupon qui n'a pas été traité (figure 13 (b)) et celui traité avec du glutaraldéhyde (figure 13 (c)), ont révélé tous les deux un produit de corrosion qui ressemble à une ampliation de feuilles. Tandis que des échantillons traités avec le biosurfactant a révélé des produits de corrosion à structure de centre fleuris (figure 13 (d)). A partir de ces résultats, il est prouvé que la formation de biofilm sur la surface de l'acier est corrélée à la corrosion [Purwasena et al., 2019].

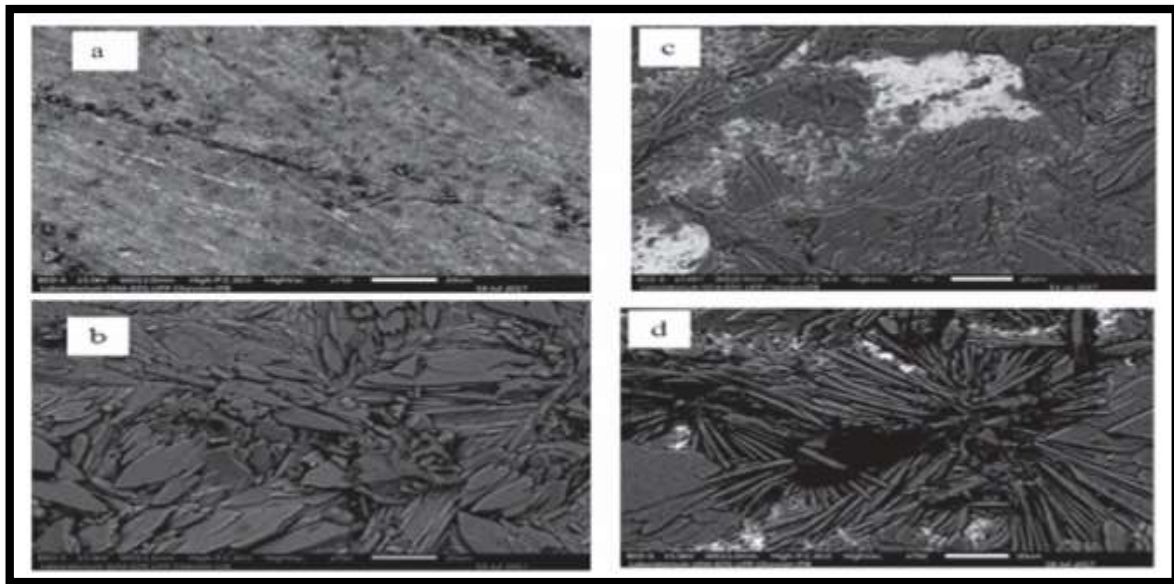


Figure 13. Observation au MEB des dépôts formés la surface des coupons d'acier au carbone ST37 après la période de 5 jours d'incubation pour la croissance du biofilm : (a) sans croissance du biofilm, (b) sans biofilmérisation, (c) après la biofilmérisation avec le glutaraldéhyde 15% et (d) avec le biosurfactant [Purwasena *et al.*, 2019].

Le spectre EDS (figure 14) a montré une teneur élevée en éléments O, P et Fe dans les échantillons corrodés avec les formules de composés chimiques P_2O_5 et FeO. D'après ces résultats, le produit de corrosion sur la surface des coupons est supposé être de l'oxyde de fer(III) (Fe_3O_4) ou de l'oxyde de fer (II) (Fe_2O_3). L'apparition du phosphate dans le spectre EDS est probablement due à l'ajout du phosphate dans un milieu d'eau salée [Dhaiveegan *et al.*, 2016].

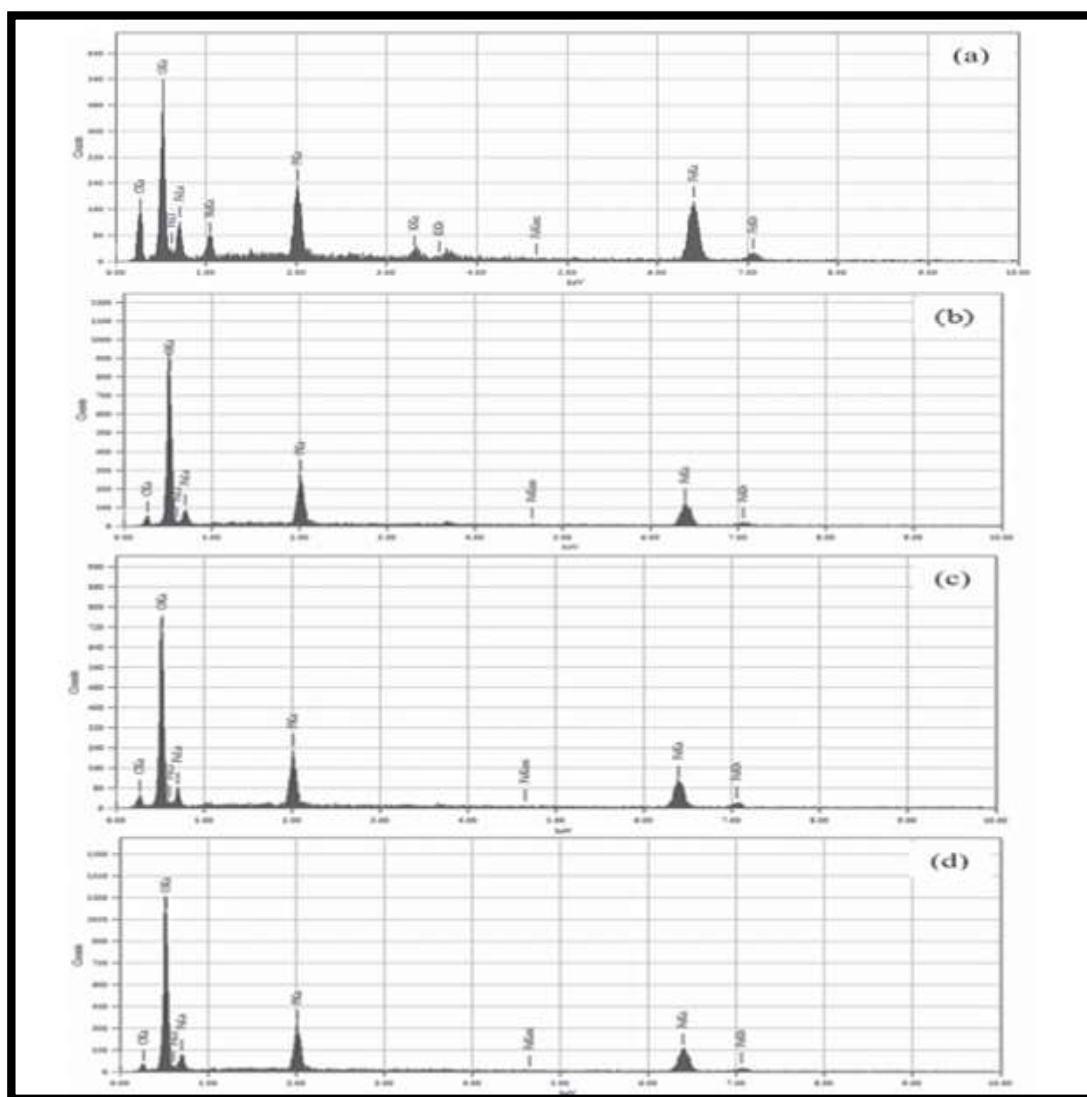


Figure 14. Les spectres EDS des dépôts formés la surface des coupons d’acier au carbone ST37 après la période de 5 jours d’incubation pour la croissance du biofilm : (a) sans croissance du biofilm, (b) sans polymérisation, (c) après éradication du biofilm avec le glutaraldéhyde 15% et (d) avec le biofilm $1500 \mu\text{g ml}^{-1}$ [Purwasena et al., 2019].

L’analyse par XRD des produits de rouille formés à la surface d’un acier au carbone au contact de souches bactériennes corrosives en présence et en absence d’un biosurfactant glycolidique a été réalisé par Parthipan et al 2018a. Les résultats obtenus, représentés par la figure 15 montrent la présence d’oxyde ferrique, oxyde de fer -hydroxyde, oxyde de manganèse dans le système abiotique ainsi que dans le système contenant les consortia bactériens mixtes (système biotique). Des pics forts comparativement plus élevés sont observés dans le système biotique que dans le système abiotique. De nombreux pics apparus dans le système abiotique disparaissent ou diminuent d’intensité dans le système biotique

incluant le biosurfactant glycolipidique. Une observation similaire est également notée dans le système biotique en présence du biosurfactant comme inhibiteur. Les particules de fer observées dans les systèmes de consortia mixtes confirment que ces souches bactériennes ont le potentiel de corroder l'acier au carbone en oxydant le composite inorganique sur les coupons métalliques [Rabaska et al., 2005; Suflita et al., 2012].

En outre, ces observations sont bien étayées par d'autres analyses selon lesquelles le biosurfactant glycolipidique agit à la fois comme inhibiteur et biocide, car il inhibe le développement des bactéries à la surface du métal et réduit également le processus de corrosion chimique en présence d'un milieu corrosif agressif éventuellement par adsorption à la surface du métal.

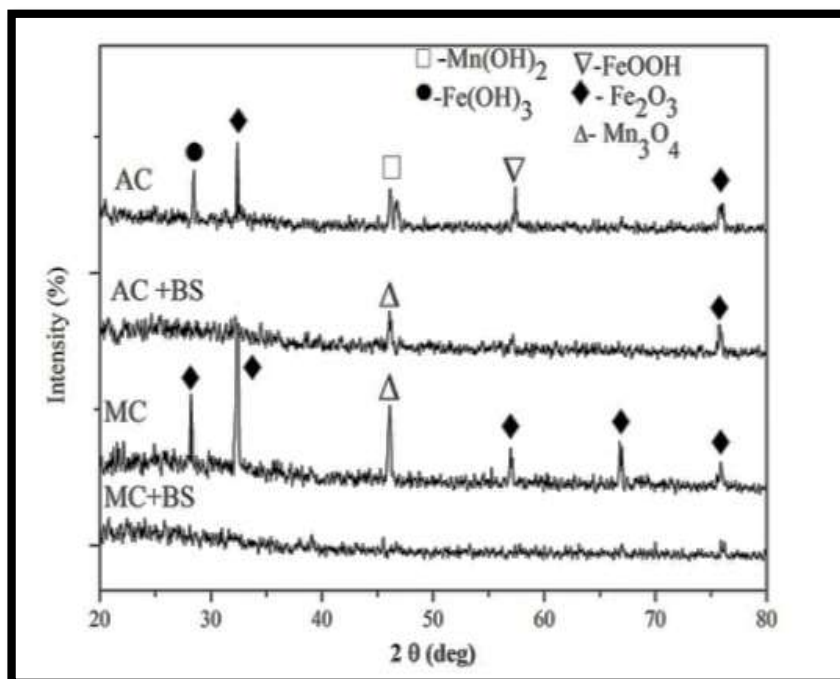


Figure 15. Analyse par XRD des produits de rouille formés sur la surface métallique de l'acier au carbone ST37 [Parthipan et al., 2018a].

Parthipan et al 2018a ont étudié l'absorbance du biosurfactant sur la surface métallique qui est confirmée par analyse FT-IR (Figure 16) des produits de rouille collectés à partir de la surface métallique et ont trouvé plusieurs pics, qui représentent OH, CH₂, CH₃, COO⁻, COC.

La présence de ces pics dans le produit de corrosion a confirmé que l'inhibiteur de nature glycolipidique forme un film protecteur sur la surface métallique [Ituen et al., 2016]. Cette propriété d'adsorption était subjective pour de nombreux facteurs tels que la charge de surface

de l'acier au carbone, les propriétés chimiques / biologiques du biosurfactant et sur la solution d'électrolyte destructrice. L'adsorption des molécules du biosurfactant sur la surface du métal est due à l'énergie d'interaction élevée entre les molécules de biosurfactant / surface métallique par rapport à celle des molécules d'eau / surface métallique. Il a été révélé que l'activité d'inhibition de la corrosion des biosurfactants est attribuée à l'adsorption des groupes fonctionnels du biosurfactant sur la surface du métal [Olajira, 2017].

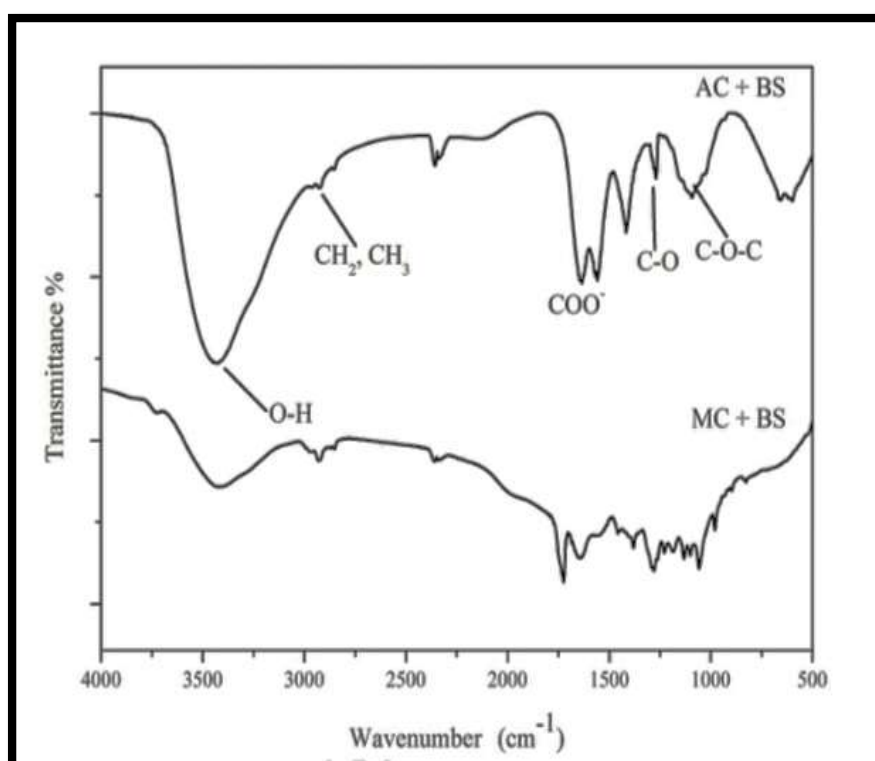


Figure 16. Analyse par FT-IR de l'absorbance du biosurfactant sur la surface métallique de l'acier au carbone ST37 [Parthipan et al., 2018a].

III. 3.3. Analyse électrochimique

III .3.3.1. Evaluation de l'effet potentiel-dynamique et spectroscopie d'impédance électrochimique

Dans une étude sur les biosurfactants glycolipidiques en tant qu'inhibiteur microbien écologique contre la corrosion de l'acier au carbone par des souches bactériennes corrosives vulnérables, et d'après Parthipan et al 2018a, la courbe de polarisation potentiodynamique

pour les différents systèmes de corrosion, y compris les consortia abiotiques, mixtes et les systèmes inhibiteurs, est présentée sur la figure 17. En outre, les paramètres de polarisation, y compris la densité du courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), anodique (β_a) et cathodique (β_c). Les données Tafel ont été mentionnées dans le tableau 3. Après 20 jours d'études sur la perte de poids, ces valeurs sont obtenues, à partir de ces informations, il est confirmé que les consortia bactériens mixtes (*Bacillus subtilis* A1, *Streptomyces parvus* B7, *Pseudomonas stutzeri* NA3 et *Actinobacter baumannii* MN3) induisent l'accélération de la corrosion dans la solution d'électrolyte hypersaline. Ils ont observé qu'un très faible niveau d' I_{corr} et d' E_{corr} dans les systèmes d'addition de biosurfactants par rapport aux systèmes bactériens témoins et mixtes. Ces informations sont bien soutenues par les β_c et β_a des quatre systèmes. Une observation similaire est remarquée par quelques chercheurs pour le surfactant synthétique en tant qu'inhibiteur de corrosion pour différents métaux [Kaczerewska et al., 2017]. Ces observations révèlent que la molécule de glycolipide active forme une couche protectrice sur la surface métallique d'acier au carbone ST37 et protège le métal des attaques bactériennes et chimiques. Le déplacement positif du potentiel de corrosion est un incident clé qui se produit en raison de la présence de biofilm sur la surface du métal et il est dû à l'effet de l'absorption bactérienne d'électron cathodique et à l'amélioration conséquente de la capacité de réduction du système à accélérer la dissolution anodique.

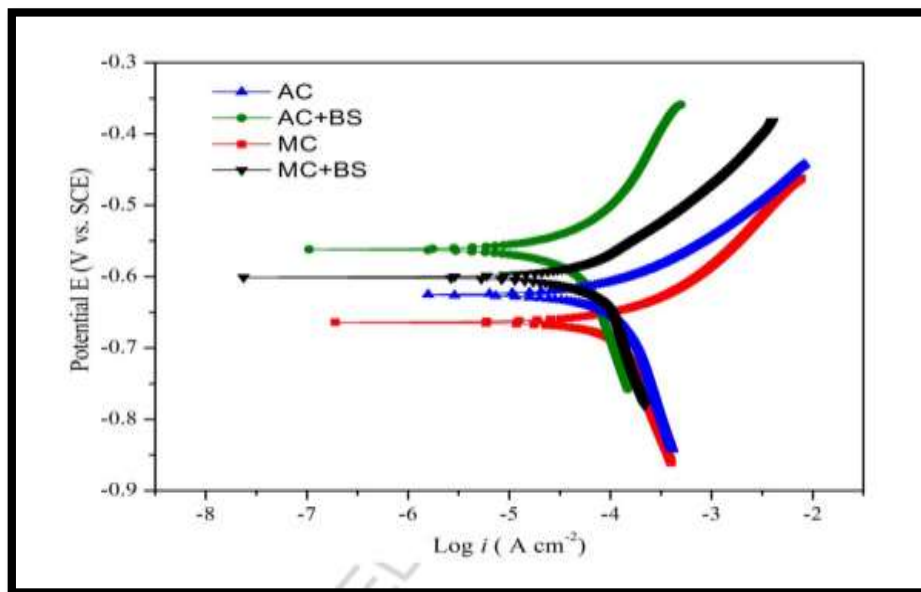


Figure 17. Courbe de polarisation potentiodynamique pour les différents systèmes de corrosion, y compris les consortia abiotiques, mixtes et les systèmes inhibiteurs [Partiphan et al., 2018a].

Semblable à l'analyse de polarisation, l'impédance a également été analysée à la fin de la période d'incubation pour différents systèmes de corrosion, y compris des consortia bactériens abiotiques et mixtes et systèmes inclus de biosurfactant comme indiqué sur la figure 18. Les valeurs de transfert de charge (R_{ct}) et de résistance à la solution (R_s) sont mentionnées dans le tableau 3. Les valeurs R_{ct} et R_s sont très élevées dans les deux systèmes inclus de biosurfactant et une très faible résistance est enregistrée dans le système des consortia mixtes. Les valeurs R_{ct} accrues dans le système inhibiteur confirment que le biosurfactant s'est développé comme couche protectrice sur la surface métallique [Guo et al., 2002 ; Javadian et al., 2017].

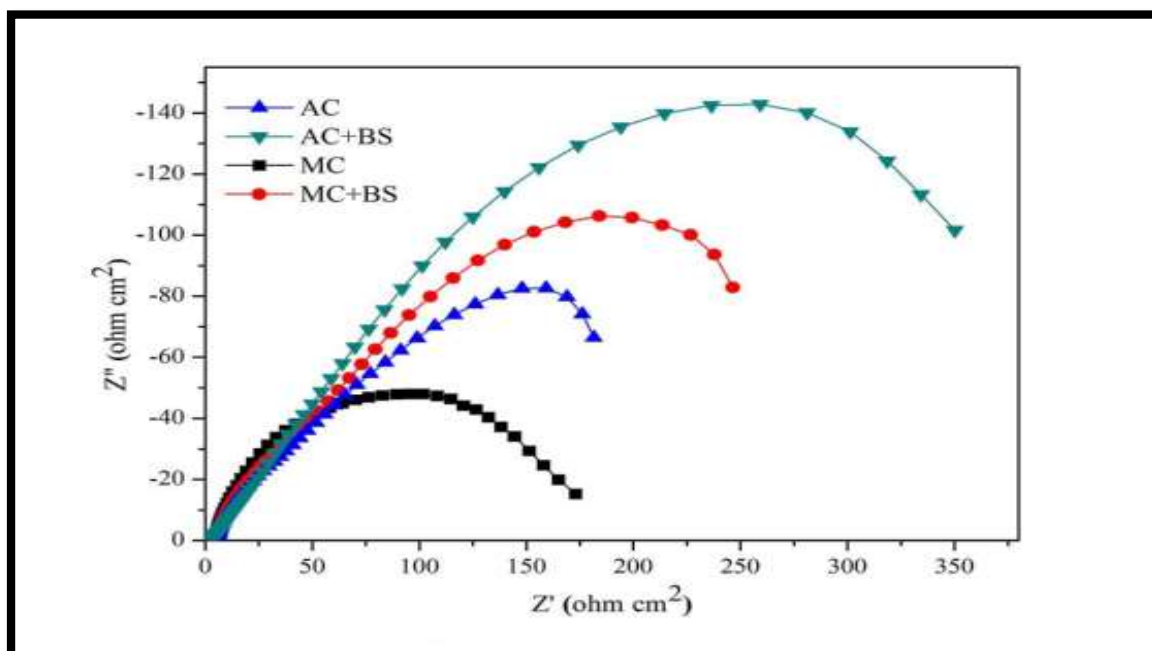


Figure 18. Courbe de l'impédance pour différents systèmes de corrosion, des consortia bactériens abiotiques et mixtes et systèmes inclus de biosurfactant [Partiphan et al., 2018a].

Tableau 3. Paramètres de polarisation et d'impédance de l'acier au carbone API 5XL en présence et absence de consortia bactériens mixtes et du biosurfactant glycolipidique [Partiphan et al., 2018a].

| Systèmes | Données de Polarisation | | | | Données d'impédance | |
|---|---|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---|-------------------------|
| | I _{corr} (A/cm ²) | E _{corr} (V) | β _a (Vm/dec) | β _c (mV/dec) | R _{ct} (Ω.cm ²) | R _s (ohm) |
| I – EP+ coupons | 1.4*10 ⁻⁴ | -625 | 8.14 | 2.70 | 1.74 | 4.25 |
| II – EP + coupons + BS | 8*10 ⁻⁵ | -562 | 5.34 | 2.48 | 3.09 | 5.58 |
| III – EP + coupons + MC (10⁴ UFC/ml d'A1, B7, NA3 et MN3) | 2.4*10 ⁻⁴ | -664 | 10.54 | 2.72 | 1.41 | 2.09 |
| IV–PW + coupons + MC (10⁴ UFC/ml d'A1, B7, NA3 et MN3) + BS | 1.2*10 ⁻⁴ | -601 | 8.36 | 2.13 | 7.5 | 10.70 |

Note: EP = eau produite, BS = biosurfactants, MC = consortia mixtes, A1 = *B. subtilis*, B7= *S. Parvus*, NA3 = *P. stutzeri* et MN3=A. *baumannii*, I_{corr}= courant de corrosion, E_{corr}=potentiel de corrosion, β_a = une pente de Tafel anodique, β_c = une pente de Tafel cathodique, R_{ct} = résistance au transfert de charge, R_s= résistance à la solution.

Conclusion

De nombreuses installations pétrolières dans le monde, y compris en Algérie, sont sensibles au phénomène de biocorrosion induite microbiologiquement qui est la forme la plus insidieuse causant des catastrophes écologiques et des pertes économiques.

Par conséquent, des études de recherche innovantes sont nécessaires pour remplacer les biocides synthétisés chimiquement actuellement utilisés comme agents anticorrosifs par des solutions vertes respectueuses de l'environnement et sans effets sur les êtres humains. En effet la découverte de nouvelles voies biologiques qui réduisent l'effet de la corrosion d'origine microbienne est d'une grande valeur.

Dans ce contexte, des méthodologies de criblage efficaces et des techniques de purification améliorées ont été développées pour obtenir la qualité et la quantité souhaitées de biosurfactant ayant un effet antibactérien ainsi qu'un effet anti biocorrosif.

Malgré la présence de nombreuses études sur la production de nouveaux types de biocides verts, les chercheurs sont encore loins d'atteindre les principaux objectifs de production de biocides respectueux de l'environnement comme les biosurfactants. Des technologies adéquates sur site basées sur des outils non invasifs devraient également être développées.



Références bibliographiques

Références

A

Askeland, V. D., R. (2004).The science and engineering of materials. Master Corrosion 47(5), 287-293.

Avci, G. G., & Abanoz, D. (2004). Corrosion protection of steel by hybrid sol-gel coating. In *Key Engineering Materials* (Vol. 264, pp. 387-390). Trans Tech Publications Ltd.

Astuti, D. I., Purwasena, I. A., Putri, F. Z. (2018).Potential of biosurfactant as an alternatif biocide to control biofilm associated biocorrosion. *J. Environ. Sci. Technol*, 11, 104-111.

Al-Bakri, A. G., & Affi, F. U. (2007).Evaluation of antimicrobial activity of selected plant extracts by rapid XTT colorimetry and bacterial enumeration, *Journal of Microbiology Methods* 68 (1), 19–25.

ASTM (American Society for Testing and Materials) (2017).Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test specimens. *ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania*.

B

Bartolomé, M. C., & Sanchez-Fortun, S. (2005). Effects of selected biocides used in the disinfection of cooling towers on toxicity and bioaccumulation in Artemialarvae. *Environmental.Toxicology and chemistry: An International Journal*, 24 (12), 3137-3142.

Bhargava, N., Sharma, P., Capalash, N. (2010). Quorum sensing in Acinetobacter: anemerging pathogen. *Crit. Rev. Microbiol.* 36, 349–360.

Boopathy, R., & Daniels, L. (1991) .Effect of PH on anaerobic mild steel corrosion by methanogenic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(7), 2014-2018.

Banat, I. M., De Rienzo, M. A., Quinn, G. A. (2014). Biofilms microbiens : Biosurfactants comme agents antibiofilm. *Applied microbiology and biotechnology*. 98, 9915-9925.

Berner, R. A. (1974). Kinetic models for early diagenesis of nitrogen, sulfur, phosphorus and Silicon in anoxic marine sediments. *The sea*, 427-450.

Banat, I. M., Fransetti, A., Gandolfi, I., Bestetti, G., Martinotti, M. G., Fracchia, L., Smyth, J., & Marchant, R. (2010). Microbiol Biosurfactants Production, applications and future potential. *Applied microbiology and biotechnology*, 87(2), 427-444.

Benincasa, M., Abalos, A., Oliveira, I., & Manresa, A. (2004). Chemical structure, surface properties and biological activities of the biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* LBI from soapstok. *Antonie Van Leeuwenhoek* 85(1), 1-8.

Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of pharmaceutical analysis*, 6(2), 71-79.

Béranger, G., et Mazille, H. (2002). Corrosion des métaux et alliages. Mécanismes et phénomènes. Ed. Lavoisier, Paris. Pp : 121-404.

C

Chou, T.P., Chandrasekaran, C., Limmer, S., Nguyen, C., & Cao, G. Z. (2002). Organic - inorganic sol-gel coating for corrosion protection of stain less steel. *Journal of Materials science Letters*, 21(3), 251-255.

Charaklis, W. G. (1990). Microbial Fouling Control. *Biofouling*, 585-633.

Costerton, J.W., Stewart, P.S., & Greenberg, E.P. (1999). Bacterial bio films: A common cause of persistent infections. *Science*, 284(5418), 1318-1322.

CLSI (Clinical and Laboratory Standards Institute) (2012). Methods for Dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically; approved standard. *CLSI document M07-A9*, 32.

Chakraborty, J., & Das, S. (2017). Application of spectroscopic techniques for monitoring microbial diversity and bioremediation. *Applied Spectroscopy Reviews*, 52(1), 1-38.

Costerton, J. W., Lewandowski, Z., Caldwell, D. E., Korber, D. R., & Lappin-Scott, H. M. (1995). Microbial biofilms. *Annual review of microbiology*, 49(1), 711-745.

D

Daniels, L., Belay, N., Rajagopal, B. S., Weimer, P. J. (1987). Bacterial methanogenesis and growth from CO₂ with elemental iron as the sole source of electrons. *Science* 237(4814),509-511.

Denyers, S. D. (1995). Mechanisms of action antibacterial biocides. *International biodegradation et biodégradations*, 36 (3-4), 227-245.

Dagbert, C., Meylheuc, T., & Bellon-Fontaine, M. N. (2006).Corrosion behaviour of AISI304 stainless steel in presence of a biosurfactant produced by *Pseudomonas fluorescens*. *Electrochimica Acta*, 51(24), 5221-5227.

De Silva Munoz, L. (2007). Positive aspects issued from bio-corrosion studies: from hydrogen production to biofuel cells. Des aspects positifs issus des recherche en biocorrosion : de la production d'hydrogène aux biopiles a combustible.

Djouahra-Fahem, D., Angar, Y., Gana, L. M., Khokhi, F., & Kebbouche-Gana, S. (2019). A Comprehensive study on Crude Methanolic Extract of *Daphne gnidium* L. as effective Corrosion inhibitors of mild steel induced by SRB Consortium. *Journal of bio-and Tribo-corrosion*, 5(1), 18.

De Rienzo, M. A., Stevenson, P., Marchant, R., & Banat, I. M. (2016).Anti bacterial properties of biosurfactants against selected Gram-positive and-negative bacteria. *FEMS Microbiology Letters*, 363(2), fmv224.

Dagbert, C., Compere, C., Feron, D. (2002). Biodétérioration des matériaux. *Ecole Thématique du CRS Théma-cor*.

Dhaiveegan, P., Elangovan, N., Nishimura, T., & Rajendran, N. (2016).Weathering steel in industrial-marine-urban environment: field study. *Materials Transactions*, 57(2), 148-155.

DeReinzo, M. A., Banat, I. M., Dolman, B., Winterbun, J., Martin, P. J. (2015). Sophorolipid biosurfactants: Possible uses as antibacterial and antibiofilm agent *New Biotechnol.* 32, 720-726.

E

Efremenkova, O., Gabrielyan, N., Malanechva, I., Demiankova, M., Efimenko, T., Rogozhin, E., & Kornilov, M. (2019). Antimicrobial Properties of the probiotic strain *Bacillus subtilis* 534. *Int. Arch. Med. Microbiol*, 2, 119.

F

Fang, H. H., Xu, L. C., & Chan, K. Y. (2002). Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion. *Water Res.* 36(19), 4709-4716.

Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature reviews microbiology*, 8 (9), 623-633.

Fait, M. E., Bakas, L., Garrote, G.L., Morcelle, S. R., Mario, C. N., & Saparrat, M. C. (2019). Cationic surfactants as antifungal agents. *Applied Microbiology Biotechnology*, 103(1), 97-112.

Fenibo, E.O., Ijoma, G. N., Selvarajan, R., Chikere, C. B. (2019). Microbial surfactants: The next generation multifunctional biomolecules for application in the petroleum industry and Its Associated Eenvironmental Remediation. *Microorganisms*, 7(11), 581.

G

Guo, R., Liu, T., & Wei, X. (2002). Effects of SDS and some alcohols on the inhibition efficiency of corrosion for nickel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 209(1), 37-45.

Garsia, F., Lopez, A. L. R., Guillén, J. C., Sandoval, L. H., González, C. R., & Castano, V. (2012). Corrosion inhibition in copper by isolated bacteria. *Anti-Corrosion Methods and Materials*.

Gu, T., Jia, R., Unsal, T., & Xu, D., (2019). Toward a better understanding of microbiologically influenced corrosion caused by sulfate reducing bacteria. *Journal of materials science & technology*, 35(4), 631-636.

Grandclément, C., Tannières, M., Moréra, S., Dessaux, Y., Faure, D., (2016). Quorum quenching: role in nature and applied developments. *FEMS microbiology reviews*, 40(1), 86-116.

Gómez de Saravia, S. G., Guiamet, P. S., & Videla, H. A. (2003). Prevention and protection of the effects of biocorrosion and biofouling minimizing the environmental impact. *Revista de metalurgia (Madrid)*, 49-54.

H

Heidelberg, J. F., Seshadri, R., Haveman, S. A., Hemme, C. L., Paulsen, I. T., Kolonay, J. F., & Daugherty, S. C. (2004). The genome sequence of the anaerobic, sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio vulgaris*. *Hildenborough. Nature biotechnology*, 22(5), 554-559.

Hall-Stoodley, L., Costerton, J.W., & Stoodley, P. (2004). Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases. *Nature reviews microbiology*, 2 (2), 95-108.

Heyd, M., Kohnert, A., Tan, T. H., Nusser, M., Kirschhofer, F., Brenner-Weiss, G., & Berensmeier, S. (2008). Development and trends of biosurfactant analysis and purification using rhamnolipids as an example. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 391(5), 1579-1590

I

Ituen, E., Akaranta, O., & James, A. (2016). Green anticorrosive oilfield chemicals from 5-hydroxytryptophan and synergistic additives for X80 steel surface protection in acidic well treatment fluids. *Journal of Molecular Liquid*, 224, 408-419.

Iwona, B. B., Gaylarde, C. C. (1999). Recent advances in the study of biocorrosion: an overview, *Revista de Microbiologia*, 30, pp, 177-190.

J

Jayaraman, A., Ornek, D., Duarte, D. A., Lee, C. C., Mansfeld, F. B., & Wood, T. K. (1999). Axenic aerobic biofilms inhibit corrosion of copper and aluminium. *Applied microbiology and biotechnology*, 52 (6), 787-790.

Juzeliunas, E., Ramanaukas, R., Lugauskas, A., Leinartas, K., Samuleviciene, M., & Juskenas, R. (2007). Microbially influenced corrosion of zinc and aluminum-two-year subjection to influence of *Aspergillus niger*. *Corrosion science*, 49(11), 4098-4112.

Jia, R., Yang, D., Li, Y., Xu, D., Gu, T. (2017a). Mitigation of the *Desulfovibrio vulgaris* biofilm using alkyldimethylbenzylammonium chloride enhanced by D-aminoacids. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 117, 97–104.

Jia, R., Li, Y., Al-Mahamed, H.H., & Gu, T. (2017b). Enhanced biocide treatments with D-amino acid mixtures against a biofilm consortium from a water cooling tower. *Frontiers in microbiology*, 8, 1538.

Jia, R., Yang, D., Abd Rahman, H. B., Gu, T. (2017c). Laboratory testing of enhanced biocide mitigation of an oilfield biofilm and its microbiologically influenced corrosion of carbon steel in the presence of oilfield chemicals. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 125, 116–12.

Jia, R., Yang, D., Al-Mahamedh, H.H., & Gu, T. (2017d). Electrochemical testing of biocide enhancement by a mixture of D-amino acids for the prevention of a corrosive bi film consortium on carbon steel. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(27), 7640-7649.

Jia, R., Yang, D., Xu, J., Xu, D., Gu, T. (2017e). Microbiologically influenced corrosion of C1018 carbon steel by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm under organic carbon starvation. *Corrosion Science*, 127, 1-9.

Jaffer, A. E., & Almajnoui, A. D. (2003). Monitoring Microbiological Activity in a Wastewater System Using Ultraviolet Radiation as an Alternative to chlorine Gas, IN CORROSION 2003. NACE International.

Javadian, S., Darbasizadeh, B., Yousefi, F., Dalir, N., & Kakemam, J. (2017). Dye-surfactant aggregates as corrosion inhibitor for mild steel in NaCl medium: Experimental And theoretical studies. *Journal of Chemical Engineers*, 71, 344-354.

K

King, R. A., & Miller, J. D. A. (1977). Corrosion of ferrous metals by bacterially produced iron sulphides and its control by cathodic protection. *Anti Corrosion Methods and Materials*.

Kosaric, N., sukan, F. (2015). Biosurfactants: production et utilisation processus, technologies et économies, 1^{ère} éd. Série scientifique sur les surfactants, *CRC press Taylor et Francis. Group : Boca Raton, FL, Etats-Unis, 2015.*, Volume 159.

Kalyuzhnyi, S., Fedorovich, V., Lens, P., Pol, L. H., & Lettinga, G. (1998). Mathematical modelling as a tool to study population dynamics between sulfate reducing and methanogenic bacteria. *Biodegradation*, 9(3-4), 187-199.

Karatan, E., & Watnick, P. (2009). Signals, regulatory networks, and materials that build and break bacterial biofilms. *Microbiology and molecular biology reviews*, 73(2), 310-347.

Kuhn, D. M., Balkis, M., Chandra, J., Mukherjee, P. K., & Ghannoum, M. A. (2003). Uses and limitations of the XTT assay in studies of *Candida* growth and metabolism. *Journal of clinical microbiology*, 41 (1), 506-508.

Kaczerewska, O. R., Leiva-Garcia, R., Akid, B., Brycki. (2017). Efficiency of cationic gemini surfactants with 3-azamethylpentamethylene spacer as corrosion inhibitors for stainless steel in hydrochloric acid, *J. Mol. Liq.* 247: 6–13.

ℒ

Le, Y., Hou, P., Wang, J., & Chen, J. F. (2010). Controlled release active antimicrobial corrosion coatings with Ag/SiO₂ core-shell nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 120(2-3), 351-355.

Larsen, J., Rasmussen, K., Pedersen, H., Sørensen, K., Lundgaard, T., & Skovhus, T. L. (2010). Consortia of MIC bacteria and archaea causing pitting corrosion in top side oil production facilities. In CORROSION 2010. NACE International.

Leclerc, H., (1995). *Microbiologie générale. La bactérie et le monde bactérien.* Edition Doin .paris. pp : 27-46 ; 59-103 et 267-280.

Lemaitre, C., pebere, N., et Festy, D. (1998). *Bio détérioration des matériaux.* EDP. Sciences ISBN : 2-86883-329-2, France, p91.

Lv, M., & Du, M. (2018). A review: microbiologically influenced corrosion and the effect of cathodic polarization on typical bacteria. *Reviews in Environmental Science and BioTechnology*, 17(3), 431-446.

Lens, P. N. L., Visser, A., Janssen, A. J. H., Pol, L. H., & Lettinga, G. (1998). Biotechnological treatment of sulfate-rich wastewaters. *Critical reviews in environmental science and technology*, 28(1), 41-88.

Liu, T., Guo, Z., Zeng, Z., Guo, N., Lei, Y., Liu, T., & Wang, X. (2018). Marine bacteria provide lasting anticorrosion activity for steel via biofilm-induced mineralization. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(46), 40317-40327.

Labrini, M. (2005). Synthèse et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide. Thèse de doctorat. Université des sciences et Technologies de Lille.

Liu, H., Gu, T., Zhang, G., Cheng, Y., Wang, H., & Liu, H. (2016). The effect of magnetic field on biomineralization and corrosion behavior of carbon steel induced by iron-oxidizing bacteria. *Corrosion Science*, 102, 93-102.

Libert, M., Shutz, M. K., Esnailt, L., Féron, D., Bildstein, O. (2014). *Bioelectrochemistry*, 97, p. 162.

Lappin-Scott, H. M., Costerton, J. W. (1995). *Microbial biofilms*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

M

Mehanna, M. (2009). Mécanismes de transfert direct en corrosion microbienne des aciers : Application à *Geobacter sulfur reducens* et à l'hydrogénase de *Clostridium acetobutylicum* (Doctoral dissertation).

Marchant, R., & Banat, I. M. (2012). Biosurfactants: a sustainable replacement for chemical surfactants. *Biotechnology Letters*, 34(9), 1597-1605.

Mireles, J. R., Toguchi, A., & Harshey, R. M. (2001). *Salmonella enterica* serovar Typhimurium swarming mutants with altered biofilm-forming abilities: surfactin inhibits biofilm formation. *Journal of bacteriology*, 183(20), 8-5854.

Madigan, M. T., & Martinko, J. (2005). *Brock Biology of Microorganisms*, 11th edn.

Mimouni, B. (2017). Lutte contre la biocorrosion causée par les microorganismes isolés des filtres du centre de séparation de fluides CS2 de la région de TFT. Mémoire de master. Université de Boudjema.

Muthukumar, N., Rajasekar, A., Penmariappan, S., Mohanan, S., & Raghavan, M. (2003). Microbiologically influenced corrosion in petroleum product pipelines—a review.

Murthy, P. S., Venkatesan, R. (2009). Industrial biofilms and their control. *Marine Ind. Biofouling*, 4:65-101.

N

Normand, B., Pébère, N., Richard, C., & Werry, M. (2004). Prevention and fighting against corrosion: a scientific and technical approach. The Presses polytechniques et universitaires romandes. *ISBN: 2-88074-543*, Lyon. P. 21, 170, 610-697.

O

Olajire, A. A. (2017). Corrosion inhibition of offshore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors-A review, *Journal of Molecular Liquids*, 248, 775-808.

P

Poosarla, V. G., Wood, T. L., Zhu, L., Miller, D. S., Yin, B., & Wood, T. K. (2017). Dispersal and inhibitory roles of mannose, 2-deoxy-d-glucose and N-acetyl galactosaminidase on the biofilm of *Desulfo vibrio vulgaris*. *Environmental microbiology reports*, 9(6), 779-787.

Park, H.S., Chatterjee, I., Dong, X., Wang, S.H., Sensen, C. W., Caffrey, S.M.,& Voordouw, G. (2011). Effect of sodium bisulfite injection on the microbial community composition in a brackish-water-transporting pipeline. *Applied environmental microbiology*, 77(19), 6908-6917.

Plaza, G., & Achal, V. (2020). Biosurfactants: Eco-Friendly and Innovative Biocides against Biocorrosion. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(6), 2152.

Parthipan, P., Elumalai, P., Sathishkumar, K., Sabarinathan, D., Murugan, K., Benelli, G., & Rajasekar, A. (2017). Biosurfactant and enzyme mediated crude oil degradation by *Pseudomonas stutzeri* NA3 and *Acinetobacter baumannii* MN3. *Biotech*, 7(5), 278.

Plaza, G. (2018). Production verte-Industrie verte: bio économie et produits bio sources, université technique de Silésie: Gliwice, polo gène, 2018; pp. 10-24.

Prigent-Combaret, C., Vidal, O., Dorel, C., & Lejeune, P. (1999). Abiotic surface sensing and biofilm dependent regulation of gene expression in *Escherichia coli*. *Journal of bacteriology*, 181(19), 5993-6002.

Parthipan, P., Sabarinathan, D., Angaiah, S., & Rajasekar, A. (2018a). Glycolipid biosurfactant as an eco-friendly microbial inhibitor for the corrosion of carbon steel in vulnerable corrosive bacterial strains. *Journal of Molecular Liquids*, 261, 473-479.

Parthipan, P., Elumalai, P., Ting, Y. P., Rahman, P. K., & Rajasekar, A. (2018b). Characterization of hydrocarbon degrading bacteria isolated from Indian crude oil reservoir and their influence on biocorrosion of carbon steel API 5LX. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 129, 67-80.

Purwasena, I. A., Astuti, D. I., Fauziyyah, N. A., Putri, D. A. S., & Sugai, Y. (2019). Inhibition of microbial influenced corrosion on carbon steel ST37 using biosurfactant produced by Bacillus SP. *Materials Research Express*, 6(11), 115405.

Pfaller, M. A., Sheehan, D. J., & Rex, J. H. (2004). Determination of fungicidal activities against yeasts and molds: lessons learned from bactericidal testing and the need for standardization. *Clinical Microbiology Reviews*, 17(2), 268-280.

Pound, B. G., Gorfu, Y., Schattner, P., & Mortelmans, K.E. (2005). Ultrasonic mitigation of microbiologically influenced corrosion. *Corrosion*, 61(5), 452-463.

Q

Qu, Q., Li, S., Li, L., Zuo, L., Ran, X., Qu, Y., & Zhu, B. (2017). Adsorption and corrosion behaviour of *Trichoderma harzianum* for AZ31B magnesium alloy in artificial seawater. *Corrosion Science*, 118, 12-23.

R

Royer, R. A., Unz, R. F., Dempsey, B. A., & Burgos, W. D. (2003). Dissimilatory metal reducing bacteria in biogeochemistry and corrosion. In NACE-International Corrosion Conference Series (Vol. 2003). *National Association of Corrosion Engineers*.

Richards, J. J., & Melander, C. (2009). Controlling bacterial biofilms. *Chembiochem*, 10(14), 2287-2294.

Rajasekar, A., & Ting, Y. P. (2010). Microbial corrosion of aluminum 2024 aeronautical alloy by hydrocarbon degrading bacteria *Bacillus cereus* ACE4 and *Serratia marcescens* ACE2. *Industrial & engineering chemistry research*, 49(13), 6054-6061.

Rajasekar, A., Maruthamuthu, S., Muthukumar, N., Mohanan, S., Subramanian, P., & Palaniswamy, N. (2005). Bacterial degradation of naphtha and its influence on corrosion. *Corrosion Science*, 47(1), 257-271.

Rabaska, S., Maruthamuthu, N., Muthukumar, S., Mohanan, P., Subramanian, N., Palaniswamy. (2005). Bacterial degradation of naphtha and its influence on corrosion, *Corros. Sci.* 47: 257–271.

Rosenberg, E., & Ron, E.Z. (1999). High- and low-molecular-mass microbial surfactants. *Applied microbiology and biotechnology*, 52(2), 154-162.

Rocha-Estrada, J., Aceves-Diez, A.E., Guarneros, G., & de la Torre, M.(2010). The RNPP family of quorum-sensing proteins in Gram-positive bacteria. *Applied microbiology Biotechnology*, 87(3), 913-923.

S

Satpute, S. K., Banat, I. M., Dhakephalkar, P. K., Banpurkar, A. G., & Chopade, B. A. (2010). Biosurfactants, bioemulsifiers and exopolysaccharides from marine microorganisms. *Biotechnology advances*, 28(4), 436-450.

Satpute, S. K., Banpurkar, A. G., Banat, I. M., Sangshetti, J. N., Patil, R. H., & Gade, W. N. (2016). Multiple roles of biosurfactants in biofilms. *Current pharmaceutical design*, 22(11), 1429-1448.

Suflita, J.M., Aktas, D. F., Oldham, A. L., Perez-Ibarra, B. M., & Duncan, K. (2012). Molecular tools to track bacteria responsible for fuel deterioration and microbiologically influenced corrosion. *Biofouling*, 28 (9), 1003-1010.

Stoodley, P., Sauer, K., Davies, D. G., Costerton, J. W. (2002). Biofilms as complex differentiated communities. *Annu. Rev. Microbiol.* 56, 187-209.

Soslow, T.V.(2003). Basics of ozone application for postharvest treatment of fresh produce. *Department of vegetables and crops. University of California, Davis.*

Shimura, T., & Aramaki, K. (2008). Improvement of the film thickness by modification of the hydroxymethylbenzene SAM with tetraethoxysilane and octanediol for protection of iron from corrosion in 0.5M NaCl. *Corrosion Science*, 50(5), 1397-1405.

Santos, D. K. F., Rufino, R. D., Luna, J. M., Santos, V. A., & Sarubbo, L. A. (2016). Biosurfactants: Multifunctional Biomolecules of the 21st Century. *International Journal of molecular Science*, 17(3), 401.

T

Tang, K., Baskaran, V., & Nemati, M. (2009). Bacteria of the sulphur cycle: an overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 73-94.

Thomas, R. J. (2002). Biological Corrosion Failures: Failure Analysis and Prevention. *ASM: International, Materials Park. ASM Handbook*, 11.

Tabari, K., Tabari, M., & Tabari, O. (2011). Application of biocompetitive exclusion in prevention and controlling biogenetic H₂S of petroleum reservoirs. *Aust. J. Basic Appl. Sci*, 5(12), 715-718.

V

Videla, H. A., & Herrera, L. K. (2005). Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. *International microbiology*, 8(3), 169.

Videla, H. A., & Herrera, L. K. (2007). Biocorrosion in oil recovery systems: prevention and protection-An update. *Edición Especial*, 30, 272-279.

Vijayakumar, S., & Saravanan, V. (2015). Biosurfactants-types, sources and applications. *Research Journal of Microbiology*, 10(5), 181.

Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2016). Carbon spectrum utilization by an indigenous strain of *Pseudomonas aeruginosa* NCIM 5514: Production, characterization and surface active properties of biosurfactant. *Bioresource technology*, 221, 510-516.

Venzlall, H., Enning, D., Srinivasan, J., Mayrhofer, K J., Hassel, A. W., Widdel, F. & Stretman, M. (2013). Accelerated cathodic reaction in microbial corrosion of iron due to direct electron uptake by sulfate-reducing bacteria. *Corrosion Science*, 66, 88-96.

W

Wilkie, A. C. (2005). Anaerobic digestion: biology and benefits. Dairy Manure Management: treatment, handling, and community relations, 63-72.

Williams, P., (2007). Quorum sensing, communication and cross-kingdom signalling in the bacterial world. *Microbiology* 153, 3923-3938.

Waters, C.M., Bassler, B. L. (2005). Quorum sensing: cell-to-cell communication in bacteria. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 21, 319-346.

X

Xu, D., Li, Y., GU, T.,(2016). Mechanistic modeling of biocorrosion caused by bio films of sulfate reducing bacteria and acid producing bacteria. *Bioelectrochemistry* 110, 52-58.

Z

Zuma, F. N., Lin, J., Jonnalagadda, S. B. (2009). Kinetics of inactivation of pseudomonas aeruginosa in aqueous solutions by ozone aeration. *Journal of Environmental sciences and health Part A*, 44(10), 929-935.

Zin, I. M., Pokhmurskii, V. I., Korniy, S. A., Karpenko, O. V., Lyon, S. B., Khlopyk, O. P., & Tymus, M. B. (2018). Corrosion inhibition of aluminium alloy by rhamnolipid biosurfactant derived from Pseudomonas sp. PS-17. *Anti Corrosion Methodes and Materials*.

Zuo, R., Ornek, D., Syrett, B. C., Green, R. M., Hsu, C-H., Mansfeld, F. B., Wood, T. K. (2004). Inhibiting mild steel corrosion from sulfate-reducing bacteria using antimicrobial-producing biofilm in Three-Mile-Island process water. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 64: 275-283.

Résumé

La corrosion induite par les microorganismes est associée à la présence de biofilm, elle est connue comme être l'un des problèmes majeurs rencontrés en industrie. Elle endommage les équipements et les infrastructures ce qui peut entraîner d'importantes pertes économiques et des problèmes environnementaux. L'utilisation de biocides avec un lavage physique est souvent utilisée contre la corrosion mais ces techniques restent inefficaces contre la formation des biofilms responsables de la biocorrosion. De nouvelles technologies émergentes telles que l'utilisation de biosurfactants a été proposées ces dernières années. Ce mémoire fait le point sur l'efficacité des biosurfactants dans l'inhibition de la biocorrosion induite par des bactéries corrosives.

Mots clés : BSR, biocorrosion, biosurfactant, acier au carbone.

ملخص

يرتبط التآكل الناجم عن الكائنات الحية الدقيقة بوجود الأغشية الحيوية، ومن المعروف أنه أحد المشاكل الرئيسية التي تواجهها الصناعة. فهو يضر بالمعدات الصناعية والبنية التحتية مما قد يؤدي إلى خسائر اقتصادية كبيرة ومشاكل بيئية. غالبًا ما يتم استخدام المبيدات الحيوية مع الغسل الفيزيائي ضد التآكل، لكن هذه التقنيات تظل غير فعالة ضد تكوين الأغشية الحيوية المسؤولة عن التآكل الحيوي. تم اقتراح تقنيات ناشئة جديدة في السنوات الأخيرة مثل استخدام المواد الحيوية الخافضة للتوتر السطحي. تستعرض هذه الرسالة فعالية هذه المواد الحيوية في تثبيط التآكل الحيوي الناجم عن البكتيريا المسببة للتآكل.

الكلمات المفتاحية : البكتيريا المختزلة للكبريتات، التآكل الحيوي، المواد الحيوية الخافضة للتوتر السطحي، الفولاذ الكربوني.

Abstrat

Corrosion induced by microorganisms is associated to the presence of biofilm, it is known as one of the major problems encountered in industry. It damages equipment and infrastructure which can lead to significant economic losses and environmental problems. The use of biocides with physical washing is often used against corrosion, but these techniques remain ineffective against the formation of biofilms responsible for biocorrosion. New emerging technologies such as the use of biosurfactants have been proposed in recent years. This thesis reviews the effectiveness of biosurfactants in inhibiting biocorrosion induced by corrosive bacteria.

Keywords: SRB, biocorrosion, biosurfactant, carbon steel.