

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE 20 AOÛT 1955 SKIKDA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

## Master

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Ingénierie & Gestion de l'Eau

### **Etude de la corrosion microbienne des conduites d'eau potables**

Soutenu le 20/06/2023

**Réalisé par :**

BOUGRARA Roumaïssa  
DJABALLAH Roumaïssa

**Encadré par :**

Pr. Nadjla CHAIB

Année Universitaire 2022- 2023

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, Allah le tout puissant qui nous a donné la connaissance, la patience et le pouvoir à rédiger ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé dans la réalisation de ce mémoire de fin d'études, en particulier:

Notre encadrante, Pr. CHAIB Nadjla qui nous a dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, pour son soutien et sa grande générosité, qu'elle soit assurée de notre profonde gratitude.

Nos profonds remerciements pour les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail réalisé, nous souhaitons qu'il soit à la hauteur de leurs espérances.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à l'équipe de laboratoire N° 8 du département génie des procédés université de l'université de Skikda pour leur collaboration et leur aide.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à notre famille, tous nos proches et amis, qui nous ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

# **Dédicace**

*Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remis de diplôme et ma joie*

*À mon paradis, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié  
maman*

*À ma source de vie, d'amour et d'affection, à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon prince cher Papa*

*À ma sœur Ikram qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études*

*À mes chers frères Ramzy et Oubaida*

*À mon ami Houdaifa, qui m'a encouragé tout au long de mon parcours universitaire*

*À toute la famille Bougrara et la famille Kaabache*

*À mon binôme Maissa et sa famille*

*À tous mes collègues de la promotion de  
Master en Ingénierie et gestion de l'eau 2023*

*À tous ceux qui ont participé à ma réussite et tous ceux qui m'aiment*

**B.Roumaissa Arwa**

# Dédicace

Grâce à Dieu le tout puissant, qui nous a donné le courage, la volonté, la force pour réaliser ce mémoire, que nul ne peut se faire sans son désir.

Je dédie ce modeste travail

- A ma chère mère « Salima »

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit exactement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

- A mon père « Messaoud »

Ce travail te fait honneur et est le fruit d'énormes sacrifices consentis . Tu nous a toujours soutenus même dans les moments de découragements où nous étions sûrs de ne rien valoir. Tes paroles parfois dures mais réconfortantes nous ont toujours donné du courage pour matière à réflexion et surtout du courage pour tout reprendre.

Que Dieu Tout Puissant te donne longue vie.

- A tous les membres de ma famille, petits et grands, mes sœurs et mes frères Manal, Sarra, Hacene et Yahya qui sont toujours ma source de courage et de réussite.
- A mes proches amies Charifa, Sana Et nous espérons qu'ils seront toujours fiers de nous,
  - À toute personne de notre grande famille « Djaballah »
  - A ma très chère binôme Arwa.
- A nos amis et collègues de la promotion de Ingénierie et gestion de l'eau 2022/2023.

Pour tous ceux que j'aime, que Dieu vous protège.

**D. Maissa**

## Résumé :

L'étude de la corrosion microbiologique des conduites d'eau potable est une discipline qui rassemble des connaissances et des compétences issues de différents domaines Cette étude nécessite une approche multidisciplinaire pour aborder les aspects chimiques, environnementaux, biologiques et techniques de la corrosion microbiologique. Dans le cadre de cette recherche, des analyses approfondies de la composition chimique de l'eau sont réalisées afin d'identifier les éléments et les substances présentes qui peuvent influencer la croissance et l'activité des microorganismes corrosifs. Les conditions environnementales, telles que la température, le pH, la présence d'oxygène, ainsi que la concentration de substances comme le fer et le sulfate, sont également évaluées pour comprendre leur influence sur la corrosion microbiologique. La présence de bactéries spécifiques, telles que les bactéries sulfato réductrices (BSR) et les thiobacillus, est étudiée pour mieux comprendre leur rôle dans le processus de corrosion. Les résultats de cette étude sont utilisés pour évaluer l'impact de la corrosion microbiologique sur la sécurité des conduites et la qualité de l'eau potable.

**Mots clé :** Corrosion microbienne, Conduites d'eau potables, microorganisme, BSR, TBC.

## ملخص:

دراسة التآكل الميكروبيولوجي لأنابيب مياه الشرب هو تخصص يجمع المعرفة والمهارات من مختلف المجالات. تتطلب هذه الدراسة نهجًا متعدد التخصصات لمعالجة الجوانب الكيميائية والبيئية والبيولوجية والتقنية للتآكل الميكروبيولوجي. كجزء من هذا البحث ، يتم إجراء تحليلات متعمقة للتركيب الكيميائي للماء من أجل تحديد العناصر والمواد الموجودة التي يمكن أن تؤثر على نمو ونشاط الكائنات الحية الدقيقة المسببة للتآكل. يتم أيضًا تقييم الظروف البيئية ، مثل درجة الحرارة ودرجة الحموضة ووجود الأكسجين ، فضلاً عن تركيز المواد مثل الحديد والكبريتات ، (BSR) لفهم تأثيرها على التآكل الميكروبيولوجي. تمت دراسة وجود بكتيريا معينة ، مثل بكتيريا تقليل الكبريتات والثيوباسيلوس ، لفهم دورها بشكل أفضل في عملية التآكل. تستخدم نتائج هذه الدراسة لتقييم تأثير التآكل الميكروبيولوجي على سلامة الأنابيب وجودة مياه الشرب

**الكلمات المفتاحية:** التآكل الجرثومي ، أنابيب مياه الشرب ، الكائنات الحية الدقيقة ، البكتيريا التي تنقل

الكبريتات، ثيوباسيلوس

**Abstract:**

The study of microbiological corrosion of drinking water pipes is a discipline that brings together knowledge and skills from different fields. It requires a multidisciplinary approach to address the chemical, environmental, biological and technical aspects of microbiological corrosion. As part of this research, in-depth analyses of the chemical composition of water are carried out to identify the elements and substances present that can influence the growth and activity of corrosive microorganisms. Environmental conditions, such as temperature, pH, the presence of oxygen, as well as the concentration of substances such as iron and sulfate, are also evaluated to understand their influence on microbiological corrosion. The presence of specific bacteria, such as sulfate-reducing bacteria (SRB) and thiobacillus, is studied to better understand their role in the corrosion process. The results of this study are used to assess the impact of microbiological corrosion on pipe safety and drinking water quality.

**Keywords:** Bacterial corrosion, drinking water pipes, microorganisms, BSR, TBC.

## Liste des abréviations

<b>Pt :</b>	Point
<b>PH :</b>	Potentiel hydrogène
<b>IR :</b>	Infrarouge
<b>UV :</b>	Ultraviolet
<b>VIS :</b>	Visible
<b>MCO :</b>	Microorganisme
<b>BSR :</b>	Bactérie sulfato réductrice
<b>TBC :</b>	Thiobacillus
<b>Ppm :</b>	Parties par million
<b>NTU :</b>	Unité de turbidité néphélométrique
<b>MES :</b>	Matière en suspension
<b>OMS :</b>	Organisation mondiale de la santé
<b>H :</b>	Heure
<b>ml :</b>	Millilitre
<b>g/l :</b>	Gramme par litre
<b>mg/L :</b>	Milligramme par litre
<b>°C :</b>	Degré Celsius
<b>Nm :</b>	Nanomètre
<b>µS/cm :</b>	Micro Siemens par centimètre
<b>M :</b>	La masse
<b>V :</b>	Le volume
<b>% :</b>	Pourcentage
<b>Atm :</b>	Atmosphère
<b>d :</b>	Densité
<b>g :</b>	Gramme
<b>PCR :</b>	Polymérase chaine réaction
<b>ACP :</b>	Amplification en chaine par polymérase
<b>MEB :</b>	Microscopie électrochimique à balayage
<b>MET :</b>	Microscopie électrochimique à transmission
<b>MCF :</b>	Microscopie confocale à fluorescence
<b>µm :</b>	Micromètre
<b>ARN :</b>	Acide ribonucléique
<b>ADN :</b>	Acide désoxyribonucléique
<b>DBO :</b>	Demande biochimique en oxygène
<b>ATP :</b>	Adénosine triphosphate
<b>Fig :</b>	Figure
<b>qPCR :</b>	PCR quantitative en temps réel
<b>M :</b>	Mole

## List des figures

<b>Fig I.1 :</b>	Corrosion microbienne des conduites d'eau.	<b>4</b>
<b>Fig I.2 :</b>	Corrosion microbiologique générale.	<b>5</b>
<b>Fig I.3 :</b>	Corrosion microbiologique localisée.	<b>7</b>
<b>Fig I.4 :</b>	Corrosion microbiologique sous-cratéristique.	<b>8</b>
<b>Fig I.5 :</b>	Corrosion microbiologique galvanique.	<b>9</b>
<b>Fig I.6 :</b>	Corrosion microbiologique par piqûres.	<b>11</b>
<b>Fig I.7 :</b>	Corrosion microbiologique par sous-film.	<b>12</b>
<b>Fig II.1 :</b>	Représentation schématique de la composition de biofilm.	<b>27</b>
<b>Fig II.2 :</b>	Étapes de la formation et de la dispersion d'un biofilm bactérien.	<b>30</b>
<b>Fig II.3 :</b>	Bactéries Sulfato-réductrices.	<b>35</b>
<b>Fig III.1 :</b>	Points de prélèvement du biofilm bactérien et l'eau pour analyses physico-chimiques. (a)Pt1, (b) Pt2, (c)Pt3.	<b>47</b>
<b>Fig III.2 :</b>	Etape de prélèvement pour analyses bactériologique.(a) : Prélèvement d'échantillon (Pt1), (b) Prélèvement d'échantillon (Pt3).	<b>49</b>
<b>Fig III.3 :</b>	pH-mètre de pailleasse de type.	<b>50</b>
<b>Fig III.4 :</b>	Oxymétrie portablede type.	<b>51</b>
<b>Fig III.5 :</b>	Turbidimètre.	<b>52</b>
<b>Fig III.6 :</b>	Conductimètre.	<b>53</b>
<b>Fig III.7 :</b>	Balance analytique de précision	<b>54</b>
<b>Fig III.8 :</b>	Filtration des échantillons à l'aide d'une pompe à vide	<b>55</b>
<b>Fig III.9 :</b>	Les trois solutions de chaque point de prélèvement	<b>56</b>
<b>Fig III.10 :</b>	Spectrométrie UV-visibles	<b>57</b>
<b>Fig III.11 :</b>	Préparation des solutions	<b>59</b>
<b>Fig III.12 :</b>	Gamme des dilutions pour le dosage des sulfates	<b>60</b>
<b>Fig III.13 :</b>	Préparation de milieu de culture pour les TBC	<b>61</b>
<b>Fig III.14 :</b>	Préparation de milieu de culture pour les BSR	<b>62</b>
<b>Fig III.15 :</b>	Milieux de culture préparés de BSR et TBC	<b>62</b>
<b>Fig III.16 :</b>	Autoclave pour stérilisation des milieux de culture	<b>63</b>
<b>Fig III.17 :</b>	Écoulement du milieu de culture dans les boites de Pétri	<b>63</b>
<b>Fig III.18 :</b>	Ensemencement des prélèvements des bactéries dans la zone aseptique autour du bec bunsen	<b>64</b>
<b>Fig III.19 :</b>	Étuve de type Memmert d'incubation des bactéries à 37°C pendant 48h	<b>65</b>
<b>Fig IV.1 :</b>	Température de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement	<b>68</b>
<b>Fig IV.2 :</b>	pH de l'eau mesuré pour les trois points de prélèvement	<b>69</b>
<b>Fig IV.3 :</b>	Conductivité de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement	<b>70</b>
<b>Fig IV.4 :</b>	Turbidité de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement	<b>71</b>
<b>Fig IV.5 :</b>	Salinité de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement	<b>72</b>

<b>Fig IV.6 :</b>	Teneur de l'oxygène dissous l'eau pour les trois points	<b>73</b>
<b>Fig IV.7 :</b>	Courbe d'étalonnage de fer	<b>75</b>
<b>Fig IV.8 :</b>	Courbe d'étalonnage de dosage de sulfate	<b>76</b>
<b>Fig IV.9 :</b>	Avant incubation Pt 3	<b>77</b>
<b>Fig IV.10 :</b>	Après incubation Pt 3	<b>77</b>
<b>Fig IV.11 :</b>	Après incubation Pt2	<b>77</b>
<b>FigIV.12 :</b>	Après incubation Pt1	<b>77</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1:</b>	Préparation de la courbe d'étalonnage du sulfate	<b>59</b>
<b>Tableau III.2:</b>	Composition du milieu de culture pour BSR	<b>60</b>
<b>Tableau III.3:</b>	Composition du milieu de culture pour TBC	<b>61</b>
<b>Tableau IV.1:</b>	Résultats de l'analyse physicochimique de l'eau	<b>67</b>
<b>Tableau IV.2:</b>	Tableau de la gamme d'étalonnage du fer	<b>75</b>
<b>Tableau IV.3:</b>	Tableau de la gamme d'étalonnage du sulfate	<b>76</b>
<b>Tableau IV.4:</b>	Résultats des ions du sulfate	<b>76</b>
<b>Tableau IV.5:</b>	Dénombrement des bactériennes (BSR)	<b>78</b>
<b>Tableau IV.6:</b>	Aspect microscopique des bactéries BSR	<b>80</b>

# Sommaire

Sommaire

Remercîments

Dédicace

Résumé

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale ..... 1

## Chapitre I : Notions générales sur la corrosion microbienne

I.1.Introduction ..... 4

I.2. Les types de corrosion microbienne ..... 5

I.2.1. Corrosion microbiologique générale ..... 5

I.2.2. Corrosion microbiologique localisée ..... 6

I.2.2.1. Formation de biofilms ..... 6

I.2.2.2. Microbielle de piquêre ..... 6

I.2.2.3. Réactions électrochimiques locales ..... 6

I.2.3. Corrosion microbiologique sous-cratérisque ..... 7

I.2.4. Corrosion microbiologique galvanique ..... 8

<b>I.2.4.1. Sélection de matériaux compatibles .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.4.2. Isolation des métaux .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.4.3. Contrôle des micro-organismes .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.4.4. Surveiller et inspecter régulièrement .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.5. Corrosion microbiologique par piqûres .....</b>	<b>9</b>
<b>I.2.5.1. Contrôle de la croissance des micro-organismes .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.5.2. Utilisation de revêtements protecteurs .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.5.3. Utilisation d'inhibiteurs de corrosion .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6. Corrosion microbiologique par sous-film .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.6.1. Contrôle de la croissance des micro-organismes .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.6.2. Traitement biocide .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.6.3. Nettoyage régulier .....</b>	<b>12</b>
<b>I.2.6.4. Utilisation de revêtements protecteurs .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3. Les mécanismes de la corrosion microbienne .....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.1. Production de composés corrosifs par les micro organisme.....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.2. L'électrochimie.....</b>	<b>13</b>
<b>I.4. Les facteurs qui influencent la corrosion microbienne .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1. Composition chimique de l'environnement .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1.1. Oxygène.....</b>	<b>14</b>

<b>I.4.1.2. Dioxyde de carbone.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1.3. Sulfates et chlorures.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1.4. PH.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1.5. Nutriments.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.1.6. La température.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.1.7. La pression.....</b>	<b>15</b>
<b>I.4.1.8. La vitesse d'écoulement de l'eau .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.2. La présence d'autres micro-organismes.....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.2.1. Synergie .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4.2.2. Compétition .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2.3. Écosystème microbien .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.3. Les propriétés des matériaux.....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.3.1. Composition chimique .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.3.2. Structure .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3.3. Rugosité de surface .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3.4. Propriétés électrochimiques .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.3.5. Revêtements protecteurs .....</b>	<b>18</b>
<b>I.5. Les méthodes de détection et de mesure de la corrosion</b>	
<b>Microbienne .....</b>	<b>18</b>

<b>I.5.1. Observation microscopique .....</b>	<b>18</b>
<b>I.5.2. Analyse chimique .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.3. Electrochimie .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.4. Mesure de la perte de poids .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.5. Spectroscopie .....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.6. Mesure de la conductivité .....</b>	<b>21</b>
<b>I.6. Importance de l'étude de la corrosion microbienne.....</b>	<b>21</b>
<b>I.6.1.Coûts .....</b>	<b>21</b>
<b>I.6.2. Environnement .....</b>	<b>22</b>
<b>I.6.3. Sécurité .....</b>	<b>22</b>
<b>I.7.Les moyens de prévention et de lutte contre la corrosion</b>	
<b>Microbienne.....</b>	<b>23</b>
<b>I.7.1. Contrôle de l'environnement .....</b>	<b>23</b>
<b>I.7.2. Revêtements de protection .....</b>	<b>23</b>
<b>I.7.3. Utilisation de matériaux résistants à la corrosion .....</b>	<b>23</b>
<b>I.7.4. Traitement biocide .....</b>	<b>24</b>
<b>I.7.5. Surveillance régulière .....</b>	<b>24</b>
<b>I.8. Conclusion .....</b>	<b>24</b>

## Chapitre II : Notions générales sur les biofilms microbiens

II.1. Introduction .....	26
II.2. Définitions des biofilms microbiens .....	26
II.3. Conditions de formation des biofilms microbiens .....	27
II.3.1. La présence d'une surface .....	28
II.3.2. La production de polymères extracellulaires .....	28
II.3.3. La présence de nutriments .....	29
II.3.4. La coopération et la compétition entre les espèces .....	29
II.3.5. Les facteurs environnementaux .....	30
II.4. Etapes de développement des biofilms microbiens .....	30
II.4.1. Adhésion initiale .....	31
II.4.2. Formation de microcolonies .....	31
II.4.3. Maturation du biofilm .....	32
II.4.4. La dispersion du biofilm .....	33
II.5. Intérêt de l'étude des biofilms microbiens .....	33
II.6. Les types de microorganismes impliqués dans la formation des Biofilms .....	34
II.6.1. Les bactéries .....	34
II.6.1.1. Bactéries sulfato-réductrices (BSR) .....	35

II.6.1.2. Bactéries sulfuro-oxydantes (Thiobacillus) .....	38
II.6.1.3. Bactéries acido-géniques .....	39
II.6.1.4. Bactéries hétérotrophes .....	30
II.6.1.5. Bactéries du fer et du manganèse .....	40
II.6.2. Les champignons .....	40
II.6.2.1. Les moisissures .....	40
II.6.2.2. Les champignons de pourriture .....	41
II.6.2.3. Les champignons lignivores .....	41
II.6.3. Les algues .....	42
II.7. Méthodes de détection et de contrôle des microorganismes impliqués dans la formation des biofilms .....	42
II.7.1. Analyse microscopique .....	42
II.7.2. Tests de culture .....	43
II.7.3. Tests de biologie moléculaire .....	43
II.7.4. Méthodes basées sur l'activité métabolique .....	44
II.8. Conclusion .....	45

### **Chapitre III : Matériels et méthodes**

III.1. Introduction .....	47
III.2. Description des points d'échantillonnage .....	47

<b>III.2.1. Prélèvement échantillons d'eau pour les analyses physico-chimiques.....</b>	<b>47</b>
<b>III.2.1.1. Technique de prélèvement .....</b>	<b>47</b>
<b>III.2.2. Prélèvement pour analyse bactériologique .....</b>	<b>48</b>
<b>III.3. Paramètres physico-chimiques mesurés .....</b>	<b>49</b>
<b>III.3.1. Mesure de pH .....</b>	<b>49</b>
<b>III.3.2. La salinité .....</b>	<b>50</b>
<b>III.3.3. L'oxygène dissous .....</b>	<b>51</b>
<b>III.3.4. La température .....</b>	<b>51</b>
<b>III.3.5. La turbidité .....</b>	<b>52</b>
<b>III.3.6. La conductivité .....</b>	<b>53</b>
<b>III.3.7. Matières en suspension (MES) .....</b>	<b>53</b>
<b>III.3.8. Détermination de la teneur en fer .....</b>	<b>55</b>
<b>III.3.9. Détermination des ions du sulfate .....</b>	<b>57</b>
<b>III.4. Mise en évidence de la présence des BSR et Thiobacillus .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.1. Préparation du milieu de culture pour les pour les BSR et les Thiobacillu.....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.2. Ensemencement .....</b>	<b>64</b>
<b>III.5. Conclusion .....</b>	<b>65</b>

## Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction .....	67
IV.2. Les analyses physico-chimiques de l'eau .....	67
IV.2.1. Température .....	67
IV.2.2. pH .....	69
IV.2.3. Conductivité .....	79
IV.2.4. Turbidité .....	71
IV.2.5. Salinité .....	71
IV.2.6. Oxygène dissous .....	72
IV.2.7. Matières en suspension (MES) .....	74
IV.2. 8. Détermination de la teneur en fer .....	74
IV.2.9. Détermination des ions du sulfate .....	75
IV.3. Les analyses bactériologiques .....	77
IV.3.1. Résultats d'isolement des bactéries dans des milieux spécifiques.....	77
IV.3.2. Résultats des dénombrements de BSR de l'eau en milieu Solide .....	78
VI.3.3 Observation microscopique .....	79
VI.4. Conclusion .....	81
Conclusion générale .....	83
Références bibliographiques .....	86

**Introduction**

**générale**

L'eau potable est une ressource essentielle à la vie humaine, et son approvisionnement en toute sécurité est d'une importance primordiale pour la santé publique. Cependant, les infrastructures de distribution d'eau potable sont confrontées à un défi majeur, à savoir la corrosion des conduites. La corrosion microbienne des conduites d'eau potable est un phénomène préoccupant qui peut entraîner des problèmes de qualité de l'eau et de durabilité des infrastructures. Elle est causée par l'interaction complexe entre les micro-organismes présents dans l'eau et les matériaux constituant les conduites. Les micro-organismes, tels que les bactéries sulfato-réductrices (BSR) et les *Thiobacillus*, jouent un rôle clé dans ce processus corrosif.

Les BSR et les TBC sont capables de métaboliser certains composés chimiques présents dans l'eau, en particulier les sulfates et les sulfures, pour produire des acides corrosifs. Ces acides attaquent les matériaux des conduites, provoquant une dégradation progressive et une réduction de leur durée de vie. La corrosion microbienne peut entraîner la formation de puits, de fissures et de perforations dans les conduites, entraînant des fuites d'eau, une altération de la qualité de l'eau potable et des coûts de réparation considérables.

Pour comprendre et prévenir efficacement la corrosion microbienne des conduites d'eau potable, il est essentiel de connaître les mécanismes sous-jacents, les facteurs influençant sa survenue et les méthodes de détection et de prévention. De nombreuses études ont été menées dans ce domaine, permettant d'approfondir notre compréhension de ce phénomène complexe.

Parmi les recherches récentes, l'étude de Melchers et al. (2019) qui a mis en évidence l'impact des bactéries sulfato-réductrices sur la corrosion des conduites d'eau potable. Ils soulignent dans leur travail l'importance de la présence de sulfates et de sulfures dans l'eau en tant que facteurs déterminants dans le développement de la corrosion microbienne. De plus, l'étude de Lebeer et al. (2018) met en évidence le rôle des *Thiobacillus* dans la formation d'acides corrosifs et la détérioration des matériaux des conduites.

En outre, des travaux de recherche ont également été publiés dans des revues spécialisées telles que "Corrosion Science" et "Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA", qui traitent spécifiquement de la corrosion microbienne des conduites d'eau potable. Ces revues fournissent une plateforme pour partager les dernières avancées scientifiques et techniques dans ce domaine.

## Introduction générale

---

L'objectif de notre travail est d'étudier l'interaction des micro-organismes avec les matériaux des conduites et l'effet qui en résulte sur le système d'eau potable. Ce travail se subdivise en quatre chapitres :

- Le premier chapitre : aborde une étude bibliographique sur la corrosion microbienne. Il examine les mécanismes de corrosion impliqués, les types de corrosion microbienne, ainsi que les facteurs environnementaux favorisant cette détérioration. Cette section permettra de poser les bases nécessaires à la compréhension des aspects fondamentaux de la corrosion microbienne.
- Le deuxième chapitre : porte sur les notions générales concernant les biofilms microbiens. Cette section permettra d'explorer les conditions de formation des biofilms et les types des microorganismes responsables de la corrosion microbienne des conduites d'eau potable.
- Le troisième chapitre : est consacré à la présentation du matériel et des méthodes utilisées dans cette étude. Détails des protocoles expérimentaux réalisés, en plus des analyses physiques et chimiques. Cette section fournira les informations nécessaires pour comprendre la méthodologie utilisée dans cette étude.
- Le quatrième chapitre : les résultats expérimentaux et les représentations graphiques avec leurs interprétations et discussion.

Notre travail se termine par une conclusion générale, des perspectives, et des et références bibliographiques.

# **Chapitre I**

## **Notions générales sur la corrosion microbienne**

## I.1. INTRODUCTION

La corrosion microbienne est un processus complexe qui résulte de l'interaction entre les micro-organismes et les surfaces métalliques en présence d'un milieu aqueux. Selon une étude publiée dans la revue "Current Opinion in Biotechnology" en 2020, la corrosion microbienne est "un phénomène omniprésent dans les environnements marins, mais elle peut également se produire dans les environnements terrestres et industriels". Les micro-organismes impliqués dans ce processus comprennent des bactéries, des champignons et des algues qui colonisent la surface métallique et forment un biofilm.

Les micro-organismes peuvent produire des acides, des enzymes et d'autres composés qui accélèrent les réactions d'oxydation et réduction, entraînant ainsi la corrosion des matériaux métalliques. Les facteurs environnementaux tels que la température, le pH, la salinité et la présence de nutriments peuvent influencer la croissance et l'activité des micro-organismes, ainsi que l'intensité de la corrosion.

Pour contrôler la corrosion microbienne, différentes stratégies sont mises en place, telles que l'utilisation de produits biocides, la modification de la composition chimique de la surface métallique ou l'utilisation de revêtements spécifiques. Selon une étude publiée dans la revue "Materials and Corrosion" en 2021, les avancées récentes dans la compréhension des mécanismes de la corrosion microbienne ont permis de développer des stratégies plus efficaces pour prévenir ou limiter les dommages causés par ce phénomène"



**Figure I.1** : La Corrosion microbienne des conduites d'eau

## I.2. Les types de corrosions microbiennes

### I.2.1. Corrosion microbiologique générale

La corrosion microbiologique générale, également appelée « corrosion microbiologique uniforme », est un type de corrosion microbienne qui se produit de manière uniforme sur toute la surface du matériau exposé aux micro-organismes corrosifs. Dans ce cas, la corrosion se propage de manière homogène sur toute la surface métallique.

La corrosion microbiologique générale est généralement causée par l'activité métabolique des micro-organismes présents dans l'environnement. Ces micro-organismes peuvent libérer des produits chimiques corrosifs, tels que des acides, des enzymes ou des déchets métaboliques, qui attaquent le matériau métallique. Ils peuvent également former des biofilms sur la surface du matériau, créant un environnement corrosif favorable à la propagation uniforme de la corrosion.

Les facteurs tels que la composition chimique de l'environnement, la concentration en nutriments, le pH, la température et la présence d'oxygène peuvent influencer la croissance des micro-organismes corrosifs et ainsi accélérer la corrosion microbiologique générale.

Ce type de corrosion peut être problématique car il peut entraîner une diminution de l'épaisseur du matériau, une perte de résistance mécanique et une détérioration généralisée de la structure. La prévention et le contrôle de la corrosion microbiologique générale impliquent généralement des mesures telles que la gestion des conditions environnementales, le contrôle de la croissance des micro-organismes, l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion et l'application de revêtements protecteurs.



**Figure I.2 :** Corrosion microbiologique générale

## I.2.2. Corrosion microbiologique localisée

La corrosion microbiologique localisée est un type spécifique de corrosion microbienne qui se produit de manière localisée sur des zones spécifiques du matériau exposé aux micro-organismes corrosifs. Contrairement à la corrosion uniforme, qui se produit de manière uniforme sur toute la surface, la corrosion microbiologique localisée se concentre sur des régions restreintes. Ce type de corrosion peut être causé par divers mécanismes, notamment :

### I.2.2.1. Formation de biofilms

Les micro-organismes peuvent former des biofilms sur la surface du matériau, créant ainsi des micro environnements corrosifs locaux. Les biofilms agissent comme une barrière protectrice, favorisant la rétention d'humidité, de nutriments et de déchets métaboliques corrosifs, ce qui entraîne une corrosion localisée.

### I.2.2.2. Microbielle de piqûre

Certains micro-organismes, tels que les bactéries sulfato-réductrices (BSR) et les champignons lignivores, ont la capacité de créer des conditions corrosives spécifiques à l'intérieur des piqûres ou des cavités formées sur la surface du matériau. Ces piqûres peuvent être causées par différents facteurs, tels que des réactions électrochimiques ou des processus biologiques, et agissent comme des sites d'initiation de la corrosion localisée. Les micro-organismes corrosifs, tels que les bactéries BSR, sont capables de produire des métabolites corrosifs tels que l'acide sulfhydrique ( $H_2S$ ), qui peut accélérer le processus de corrosion. Lorsqu'ils se développent à l'intérieur de piqûres ou de cavités sur la surface du matériau, ces micro-organismes peuvent créer un environnement localisé où les conditions chimiques favorisent la corrosion. De plus, les champignons lignivores peuvent également contribuer à la corrosion localisée des matériaux, tels que le bois, en dégradant les composants structurels et en créant des cavités à l'intérieur du matériau. Ces cavités fournissent un environnement propice à la rétention d'humidité et à la concentration de métabolites corrosifs, favorisant ainsi le développement de la corrosion.

### I.2.2.3. Réactions électrochimiques locales

Les micro-organismes peuvent modifier les conditions électrochimiques à l'interface métal-environnement, créant ainsi des régions cathodiques et anodiques locales. Cela peut conduire à une corrosion localisée où les régions anodiques subissent une dissolution accélérée. La corrosion microbiologique localisée peut entraîner des dommages considérables,

car elle peut provoquer la perforation du matériau, la formation de piqûres profondes, la fissuration sous-sous-cratéristique, ou d'autres formes de détérioration localisée. La prévention et la gestion de ce type de corrosion impliquent généralement le contrôle des conditions environnementales, la limitation de la croissance des micro-organismes corrosifs et l'utilisation de revêtements protecteurs appropriés.



**Figure I.3 :** Corrosion microbiologique localisée

### I.2.3 Corrosion microbiologique sous-cratéristique

La corrosion microbiologique sous-cratéristique est une forme spécifique de corrosion microbienne qui se produit sous les dépôts de biofilms ou de sédiments présents sur la surface métallique. Elle est souvent caractérisée par une détérioration sévère et rapide du matériau, se produisant de manière dissimulée sous les dépôts. Ce type de corrosion se produit lorsque des micro-organismes corrosifs colonisent la surface métallique et forment des biofilms ou des couches de sédiments. Ces dépôts peuvent piéger l'humidité et les substances corrosives, créant ainsi des micro environnements corrosifs sous les dépôts. Les micro-organismes peuvent également libérer des métabolites corrosifs qui accélèrent la corrosion. La corrosion microbiologique sous-cratéristique est souvent difficile à détecter, car elle se produit sous les dépôts et n'est pas visible à l'œil nu. Elle peut progresser rapidement et causer des dommages étendus avant d'être remarquée. Les conséquences de la corrosion sous-cratéristique peuvent inclure la perte d'épaisseur du matériau, l'affaiblissement de la structure et même la perforation. La prévention et la gestion de la corrosion microbiologique sous-cratéristique

impliquent généralement des mesures telles que le contrôle de la croissance des micro-organismes, le nettoyage régulier des dépôts et des sédiments, ainsi que l'utilisation de revêtements protecteurs appropriés pour empêcher la colonisation microbienne. La surveillance régulière de l'état des surfaces métalliques et des dépôts est également essentielle pour détecter et traiter rapidement toute corrosion sous-cratéristique.



**Figure I.4** : Corrosion microbiologique sous-cratéristique

### **I.2.4. Corrosion microbiologique galvanique**

La corrosion microbiologique galvanique, également connue sous le nom de corrosion bactérienne galvanique, est un type de corrosion microbienne qui se produit lorsque deux métaux différents sont en contact dans un environnement contenant des micro-organismes corrosifs. La présence de ces micro-organismes et la différence de potentiel électrochimique entre les métaux créent une réaction galvanique qui accélère la corrosion. Dans ce processus, un métal agit comme l'anode et se corrode de manière plus agressive, tandis que l'autre métal agit comme la cathode et subit une corrosion plus lente. Les micro-organismes jouent un rôle clé en favorisant cette réaction en agissant comme des conducteurs électrolytiques, facilitant ainsi le transfert d'électrons entre les métaux.

La corrosion microbiologique galvanique peut se produire dans diverses applications industrielles, telles que les systèmes de tuyauterie, les équipements de production d'énergie et les structures métalliques immergées dans l'eau ou le sol. Les conséquences de cette corrosion

peuvent inclure la perte de matériaux, la détérioration des performances des équipements et même des défaillances structurales.

Pour prévenir et contrôler la corrosion microbiologique galvanique, il est essentiel de prendre en compte les facteurs suivants :

**I.2.4.1. Sélection de matériaux compatibles :** Utiliser des métaux ayant des potentiels électrochimiques similaires réduit le risque de corrosion galvanique.

**I.2.4.2. Isolation des métaux :** Isoler physiquement les métaux différents pour éviter le contact direct et la formation de couples galvaniques.

**I.2.4.3. Contrôle des micro-organismes :** Mettre en œuvre des mesures de prévention et de traitement pour limiter la croissance des micro-organismes corrosifs, tels que la désinfection régulière, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion ou de biocides.

**I.2.4.4. Surveiller et inspecter régulièrement :** Effectuer des inspections régulières pour détecter tout signe de corrosion microbiologique galvanique et prendre des mesures correctives appropriées.



**Figure I.5 :** Corrosion microbiologique galvanique

### **I.2.5. Corrosion microbiologique par piqûres**

La corrosion microbiologique par piqûres, également connue sous le nom de corrosion microbienne localisée, est une forme de corrosion qui se produit localement sur la surface métallique, créant de petites piqûres ou cavités. Elle est causée par des micro-organismes corrosifs qui colonisent la surface métallique et créent des conditions favorables à la

corrosion. Ce type de corrosion est souvent observé dans les environnements aqueux, tels que les systèmes de tuyauterie, les réservoirs d'eau, les structures marines et les installations de traitement des eaux. Les micro-organismes corrosifs, tels que les bactéries sulfato-réductrices, les bactéries acido-géniques et les champignons, produisent des métabolites corrosifs qui endommagent la surface métallique. La corrosion par piqûres se manifeste par de petites cavités ou piqûres sur la surface métallique, qui peuvent progresser en profondeur si elles ne sont pas traitées. Ces piqûres créent des sites de concentration des agents corrosifs, ce qui accélère le processus de corrosion. Si la corrosion par piqûres n'est pas contrôlée, elle peut entraîner une perte de matériau significative, une fragilisation de la structure métallique et éventuellement une défaillance. La prévention et le contrôle de la corrosion microbiologique par piqûres impliquent plusieurs mesures, notamment :

**I.2.5.1. Contrôle de la croissance des micro-organismes :** La mise en place de méthodes de prévention, telles que le contrôle de la température, du pH, de l'oxygène et des nutriments, peut limiter la croissance des micro-organismes corrosifs.

**I.2.5.2. Utilisation de revêtements protecteurs :** L'application de revêtements résistants à la corrosion peut empêcher le contact direct entre la surface métallique et les micro-organismes corrosifs, réduisant ainsi les risques de corrosion par piqûres.

**I.2.5.3. Utilisation d'inhibiteurs de corrosion :** L'ajout d'inhibiteurs de corrosion dans le milieu aqueux peut aider à prévenir la corrosion en réduisant l'activité corrosive des micro-organismes.

**Surveillance régulière :** Il est important de surveiller régulièrement l'état de la surface métallique, en identifiant les signes de corrosion par piqûres et en prenant des mesures correctives appropriées.



**Figure I.6 :** Corrosion microbiologique par piqûres

### **I.2.6. Corrosion microbiologique par sous-film**

La corrosion microbiologique par sous-film, également appelée corrosion sous-film ou corrosion en sous-couche, est une forme de corrosion qui se produit sous un biofilm formé par des micro-organismes sur la surface métallique. Le biofilm agit comme une barrière protectrice qui crée des conditions locales propices à la corrosion. Ce type de corrosion est couramment observé dans les environnements aqueux, tels que les conduites d'eau, les réservoirs, les équipements de refroidissement et les installations marines. Les micro-organismes présents dans le biofilm produisent des métabolites corrosifs, tels que des acides organiques, des sulfures, des ions chlorures, qui endommagent la surface métallique en réduisant le pH et en créant des conditions corrosives locales. La corrosion par sous-film se manifeste généralement par une corrosion uniforme ou localisée sous le biofilm, qui peut entraîner une perte de matériau significative et une détérioration des performances des équipements. La présence du biofilm crée un environnement confiné qui favorise la rétention d'agents corrosifs, augmente la concentration d'oxygène dissous et maintient l'humidité, ce qui accélère le processus de corrosion. La prévention et le contrôle de la corrosion microbiologique par sous-film impliquent plusieurs mesures, notamment :

**I.2.6.1. Contrôle de la croissance des micro-organismes :** Le maintien de conditions défavorables à la croissance des micro-organismes, tels que la désinfection

régulière, la limitation des nutriments disponibles et la maintenance de la propreté, peut aider à prévenir la formation du biofilm et à réduire la corrosion.

**I.2.6.2. Traitement biocide :** L'utilisation d'inhibiteurs de croissance microbienne ou de biocides spécifiques peut aider à contrôler la population de micro-organismes et à réduire la formation du biofilm.

**I.2.6.3. Nettoyage régulier :** Le nettoyage régulier des surfaces métalliques peut éliminer le biofilm et réduire les risques de corrosion par sous-film.

**I.2.6.4. Utilisation de revêtements protecteurs :** L'application de revêtements résistants à la corrosion peut empêcher le contact direct entre la surface métallique et les micro-organismes, réduisant ainsi les risques de corrosion par sous-film.

Il est important de mettre en œuvre ces mesures de prévention de manière régulière et proactive pour contrôler la corrosion microbologique par sous-film et préserver l'intégrité des structures et des équipements métalliques dans les environnements aqueux.



**Figure I.7 :** Corrosion microbologique par sous-film

## I.3. Les mécanismes de la corrosion microbienne

La corrosion microbienne est un processus complexe impliquant à la fois des micro-organismes et des réactions chimiques. Il existe plusieurs mécanismes qui peuvent conduire à la corrosion microbienne, notamment :

### I.3.1. Production de composés corrosifs par les micro-organismes

Les micro-organismes peuvent produire des composés corrosifs qui peuvent causer des dommages à différents types de matériaux tels que les métaux, les plastiques, les composites, etc. Ces composés corrosifs peuvent être produits par des bactéries, des champignons ou d'autres micro-organismes.

Les composés corrosifs produits par les micro-organismes peuvent inclure des acides organiques tels que l'acide acétique, l'acide lactique et l'acide propionique. Ces acides peuvent corroder les métaux en réduisant le pH et en formant des ions métalliques solubles dans l'eau. D'autres composés corrosifs produits par les micro-organismes incluent des enzymes qui peuvent causer la dégradation des matériaux tels que les plastiques et les composites. Par exemple, les enzymes produites par certains champignons peuvent décomposer la cellulose dans les composites en fibres, affaiblissant ainsi leur structure.

### I.3.2. L'électrochimie

Il est important de comprendre ces mécanismes pour pouvoir prévenir et contrôler la corrosion microbienne dans les infrastructures métalliques, telles que les conduites d'eau potable, les réservoirs de stockage, les pipelines, etc. Les micro-organismes peuvent agir comme des catalyseurs ou des inhibiteurs des réactions électrochimiques impliquées dans la corrosion. Par exemple, certains micro-organismes peuvent favoriser la formation de dépôts corrosifs sur la surface métallique, accélérant ainsi le processus de corrosion. D'autres micro-organismes peuvent produire des substances telles que des acides organiques, des sulfures ou des ions métalliques qui favorisent la corrosion. D'autre part, certains micro-organismes peuvent également avoir des propriétés inhibitrices, empêchant ou ralentissant la corrosion. La compréhension de ces interactions entre les micro-organismes et les réactions électrochimiques est essentielle pour développer des stratégies de prévention et de contrôle de la corrosion microbienne. Cela peut inclure l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion, la modification des conditions environnementales pour décourager la croissance des micro-

organismes corrosifs, ou l'utilisation de revêtements protecteurs sur les surfaces métalliques pour empêcher leur contact avec les micro-organismes.

## I.4. Les facteurs qui influencent la corrosion microbienne

La corrosion microbienne est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

### I.4.1. La composition chimique de l'environnement

La composition chimique de l'environnement joue un rôle crucial dans la corrosion microbienne. Voici quelques éléments de composition chimique de l'environnement qui peuvent influencer la croissance et l'activité des micro-organismes impliqués dans la corrosion :

**I.4.1.1. Oxygène:** La présence d'oxygène dissous dans l'environnement peut favoriser la croissance de certains micro-organismes aérobies qui sont capables d'utiliser l'oxygène comme accepteur final d'électrons dans leurs processus métaboliques. Cela peut accélérer la corrosion en favorisant les réactions d'oxydation des métaux.

**I.4.1.2 Dioxyde de carbone :** Le dioxyde de carbone dissous peut également influencer la corrosion microbienne. Certains micro-organismes peuvent utiliser le dioxyde de carbone dans leurs processus métaboliques, produisant ainsi des acides qui peuvent augmenter l'acidité de l'environnement et accélérer la corrosion.

**I.4.1.3. Sulfates et chlorures :** Des concentrations élevées de sulfates et de chlorures dans l'environnement peuvent favoriser la croissance de micro-organismes sulfato-réducteurs et halophiles respectivement. Ces micro-organismes peuvent être impliqués dans des réactions de corrosion spécifiques, telles que la corrosion sous contrainte.

**I.4.1.4. Potentiel d'hydrogène (pH) :** Le pH de l'environnement peut influencer la croissance des micro-organismes impliqués dans la corrosion. Certains micro-organismes peuvent prospérer dans des environnements acides, tandis que d'autres préfèrent des environnements plus alcalins. Les variations de pH peuvent donc affecter la vitesse et l'étendue de la corrosion microbienne

**I.4.1.5. Nutriments:** La disponibilité de nutriments tels que les sels minéraux, les sucres, les acides aminés, etc., peut influencer la croissance des micro-organismes impliqués

dans la corrosion. Ces nutriments peuvent servir de sources d'énergie et de carbone pour les micro-organismes, favorisant ainsi leur croissance et leur activité corrosive.

**I.4.1.6. La température :** La température est un facteur important qui influence la corrosion microbienne. Les micro-organismes ont des plages de températures optimales pour leur croissance et leur activité métabolique. Ainsi, la température peut affecter la vitesse et l'activité des micro-organismes impliqués dans la corrosion. Lorsque la température est élevée, la croissance des micro-organismes peut être favorisée, ce qui peut accélérer la corrosion microbienne. Les réactions métaboliques et enzymatiques des micro-organismes sont souvent plus rapides à des températures élevées, ce qui peut entraîner une augmentation de la production de produits corrosifs tels que les acides et les ions corrosifs. D'autre part, des températures trop basses peuvent également influencer la croissance et l'activité des micro-organismes. Certains micro-organismes peuvent être moins actifs ou incapables de se développer à des températures plus froides, ce qui peut ralentir la corrosion microbienne. Il convient de noter que la plage de température optimale pour la croissance des micro-organismes peut varier en fonction du type de micro-organisme spécifique. Certains micro-organismes peuvent être adaptés aux environnements extrêmement chauds ou froids, tandis que d'autres peuvent préférer des températures modérées. Par conséquent, lors de l'évaluation de la corrosion microbienne, il est important de prendre en compte la température de l'environnement et de comprendre son impact sur les micro-organismes impliqués dans le processus corrosif.

**I.4.1.7. La pression :** La pression est un autre facteur qui peut influencer la corrosion microbienne, bien que son impact soit souvent indirect. La pression peut affecter la solubilité des gaz dans l'eau, tels que l'oxygène et le dioxyde de carbone. Une pression élevée favorise généralement une plus grande dissolution de ces gaz dans l'eau. Cela peut entraîner une augmentation de la concentration en oxygène dissous, ce qui peut favoriser la croissance de micro-organismes aérobies impliqués dans la corrosion. Inversement, une pression plus basse peut réduire la solubilité des gaz dans l'eau. Cela peut entraîner une diminution de la concentration en oxygène dissous, limitant ainsi la croissance des micro-organismes aérobies.

La pression peut également jouer un rôle dans la distribution des micro-organismes dans les environnements aquatiques. Par exemple, dans les profondeurs océaniques où la pression est extrêmement élevée, certains types de micro-organismes peuvent être adaptés à ces conditions spécifiques et être impliqués dans des processus de corrosion spécifiques à ces

environnements. Cependant, il convient de noter que la pression atmosphérique standard (1 atm) n'a généralement pas un impact significatif sur la corrosion microbienne dans la plupart des environnements terrestres. Les variations de pression dans ces environnements ne sont souvent pas suffisamment importantes pour influencer directement la croissance des micro-organismes ou la corrosion.

**I.4.1.8. La vitesse d'écoulement de l'eau :** La vitesse d'écoulement de l'eau est un facteur important qui peut influencer la corrosion microbienne, notamment en relation avec la formation de biofilms. La vitesse d'écoulement de l'eau peut avoir un impact sur la formation et la stabilité des biofilms. Une vitesse d'écoulement élevée peut perturber la formation des biofilms en empêchant leur adhérence et en favorisant leur élimination mécanique. En conséquence, une vitesse d'écoulement élevée peut réduire la colonisation des surfaces par les micro-organismes et ainsi ralentir la corrosion microbienne. En revanche, une vitesse d'écoulement faible ou stagnante peut favoriser la formation et la croissance des biofilms. Les micro-organismes peuvent s'accumuler et se développer plus facilement dans ces conditions, ce qui peut accélérer la corrosion microbienne en créant un environnement favorable à leur activité corrosive.

Il est important de noter que la vitesse d'écoulement de l'eau doit être considérée en combinaison avec d'autres facteurs tels que la composition chimique de l'eau, la température et la présence d'autres micro-organismes. Ces facteurs interagissent et peuvent influencer de manière complexe l'ampleur et la nature de la corrosion microbienne dans un système donné

**I.4.2. La présence d'autres micro-organismes :** La présence d'autres micro-organismes peut jouer un rôle significatif dans la corrosion microbienne. Certains types de micro-organismes peuvent interagir les uns avec les autres de différentes manières, ce qui peut influencer la croissance et l'activité des micro-organismes impliqués dans la corrosion.

**I.4.2.1. Synergie :** Certains micro-organismes peuvent former des synergies bénéfiques, où la présence d'un type de micro-organisme favorise la croissance d'autres micro-organismes corrosifs. Par exemple, certaines bactéries sulfato-réductrices peuvent produire des métabolites qui stimulent la croissance d'autres micro-organismes corrosifs. Cette interaction synergique peut accélérer la corrosion en favorisant la prolifération des micro-organismes corrosifs.

**I.4.2.2. Compétition :** À l'inverse, il peut y avoir une compétition entre différents types de micro-organismes pour les ressources disponibles. Certains micro-organismes peuvent produire des substances inhibitrices qui entravent la croissance d'autres micro-organismes. Cette compétition peut avoir un effet inhibiteur sur la croissance des micro-organismes corrosifs, réduisant ainsi la corrosion.

**I.4.2.3. Prédation :** Certains micro-organismes prédateurs peuvent se nourrir d'autres micro-organismes, y compris ceux impliqués dans la corrosion. Ces prédateurs peuvent contribuer à réduire la population des micro-organismes corrosifs, limitant ainsi l'étendue de la corrosion.

**I.4.2.4.Écosystème microbien :** Les micro-organismes sont souvent présents dans des communautés complexes, formant un écosystème microbien. Les interactions au sein de cet écosystème peuvent influencer la diversité et l'activité des micro-organismes corrosifs. Par exemple, la présence de micro-organismes producteurs de biofilms peut favoriser la colonisation de surfaces par d'autres micro-organismes corrosifs, augmentant ainsi la corrosion.

Il est important de noter que la présence d'autres micro-organismes peut varier en fonction de l'environnement spécifique. Par exemple, dans les environnements marins, différents types de micro-organismes peuvent être présents par rapport à ceux trouvés dans les environnements d'eau douce. Par conséquent, l'influence de la présence d'autres micro-organismes sur la corrosion microbienne dépendra du contexte environnemental spécifique.

### **I.4.3. Les propriétés des matériaux**

Les propriétés des matériaux jouent un rôle important dans la corrosion microbienne. Les micro-organismes corrosifs peuvent coloniser et se développer sur les surfaces des matériaux, ce qui peut entraîner leur corrosion. Les propriétés physico-chimiques des matériaux peuvent influencer la colonisation des surfaces par les micro-organismes et donc la corrosion microbienne.

Voici quelques propriétés des matériaux qui peuvent avoir un impact sur la corrosion microbienne :

**I.4.3.1. Composition chimique :** La composition chimique d'un matériau peut influencer sa susceptibilité à la corrosion microbienne. Certains matériaux sont plus résistants

à la corrosion que d'autres en raison de leur composition chimique spécifique. Par exemple, l'acier inoxydable contenant du chrome est souvent utilisé dans des environnements corrosifs car il forme une couche protectrice de chrome oxydé qui empêche la corrosion.

**I.4.3.2. Structure:** La structure cristalline et la microstructure des matériaux peuvent également influencer leur résistance à la corrosion microbienne. Par exemple, une structure plus dense et homogène peut rendre plus difficile la pénétration des micro-organismes corrosifs dans le matériau.

**I.4.3.3. Rugosité de surface:** Une surface rugueuse peut offrir des zones de rétention pour les micro-organismes corrosifs, favorisant ainsi leur colonisation et la formation de biofilms. Une surface lisse et polie peut réduire la rétention des micro-organismes et limiter leur croissance.

**I.4.3.4. Propriétés électrochimiques:** Les propriétés électrochimiques d'un matériau, telles que le potentiel de corrosion, peuvent influencer sa réactivité avec les micro-organismes corrosifs. Un matériau avec un potentiel de corrosion plus élevé peut être plus susceptible à la corrosion microbienne.

**I.4.3.5. Revêtements protecteurs:** L'application de revêtements protecteurs sur la surface d'un matériau peut aider à prévenir la corrosion microbienne. Ces revêtements peuvent être conçus pour être résistants aux micro-organismes corrosifs et empêcher leur adhérence et leur croissance.

## I.5. Les méthodes de détection et de mesure de la corrosion microbienne

La détection et la mesure de la corrosion microbienne peuvent être effectuées à l'aide de différentes méthodes. En voici quelques-unes :

### I.5.1. Observation microscopique

L'observation microscopique est une méthode utilisée pour détecter et étudier la corrosion microbienne. Elle consiste à examiner les surfaces des matériaux exposés à la corrosion à l'aide d'un microscope, qu'il soit optique ou électronique. Cette technique permet d'observer les biofilms microbiens, les dépôts, les altérations de surface et autres signes de corrosion microbienne. L'observation microscopique permet également de visualiser les

micro-organismes présents sur les surfaces et d'analyser leur adhésion, leur morphologie et leur distribution. Cette méthode fournit des informations détaillées sur l'activité corrosive des micro-organismes et permet d'évaluer les dommages causés aux matériaux

### I.5.2. Analyse chimique

L'analyse chimique est une méthode utilisée pour détecter et caractériser la corrosion microbienne. Elle consiste à prélever des échantillons des matériaux corrodés ou de l'environnement environnant, puis à les soumettre à des techniques d'analyse chimique pour identifier les produits de corrosion, les dépôts et les réactions chimiques associées à la présence de micro-organismes. Les techniques couramment utilisées comprennent la spectrométrie d'absorption atomique, la spectrométrie de masse, la chromatographie, la spectroscopie infrarouge et la spectroscopie Raman. Ces techniques permettent d'identifier les éléments chimiques présents, les composés organiques, les sels, les acides et les produits de corrosion spécifiques. L'analyse chimique fournit des informations sur la composition chimique des matériaux corrodés et peut aider à déterminer les mécanismes de corrosion microbienne et les agents corrosifs impliqués.

### I.5.3. Electrochimie

L'électrochimie est une méthode utilisée pour étudier la corrosion microbienne en analysant les réactions électrochimiques qui se produisent à l'interface entre le matériau et l'environnement corrosif. Dans le contexte de la corrosion microbienne, l'électrochimie permet de mesurer les paramètres électrochimiques tels que le potentiel électrochimique, la résistance électrique et le courant électrique. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'électrodes spécifiques, généralement en utilisant des techniques telles que la voltamétrie, la polarisation, l'impédance électrochimique et la spectroscopie d'impédance électrochimique.

L'électrochimie permet de déterminer les réactions électrochimiques qui se produisent lors de la corrosion microbienne, d'évaluer la cinétique des réactions, d'identifier les espèces chimiques impliquées et de caractériser les mécanismes de corrosion. Elle permet également de suivre l'efficacité des inhibiteurs de corrosion ou d'autres traitements de protection appliqués pour prévenir la corrosion microbienne.

### I.5.4. Mesure de la perte de poids

La mesure de la perte de poids est l'une des méthodes les plus courantes utilisées pour évaluer la corrosion microbienne. Elle consiste à mesurer la diminution de masse d'un

matériau exposé à un environnement corrosif contenant des micro-organismes. Dans cette méthode, des échantillons du matériau sont prélevés et pesés avec précision avant d'être exposés à l'environnement corrosif. Après une période donnée, les échantillons sont retirés, nettoyés pour éliminer les dépôts ou les biofilms, puis pesés à nouveau. La différence de masse entre les deux mesures représente la perte de poids due à la corrosion. Cette méthode permet d'estimer quantitativement l'ampleur de la corrosion microbienne en termes de perte de matière. Elle peut être utilisée pour évaluer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion, la résistance des matériaux à la corrosion microbienne et pour comparer l'impact de différents facteurs sur la vitesse de corrosion. Il convient de noter que la mesure de la perte de poids est une méthode destructive, car elle implique la destruction de l'échantillon pour les mesures. Par conséquent, elle est généralement utilisée pour des études de laboratoire plutôt que pour des applications sur site.

## **I.5.5. Spectroscopie**

La spectroscopie est une méthode utilisée pour détecter et analyser la corrosion microbienne en étudiant les interactions entre la lumière et les matériaux. La spectroscopie peut être réalisée à l'aide de différentes techniques, telles que la spectroscopie infrarouge (IR), la spectroscopie Raman, la spectroscopie ultraviolette-visible (UV-Vis), la spectroscopie de fluorescence, etc. La spectroscopie infrarouge permet d'identifier les groupes fonctionnels présents dans les matériaux et de détecter les produits de corrosion. Elle peut également être utilisée pour étudier les interactions entre les micro-organismes et les surfaces métalliques.

La spectroscopie Raman permet d'analyser les vibrations moléculaires et d'identifier les composés présents sur les surfaces des matériaux. Elle est utile pour détecter les dépôts microbiens, les biofilms et les produits de corrosion.

La spectroscopie UV-Vis permet de mesurer l'absorption de la lumière par les échantillons, ce qui peut fournir des informations sur les espèces chimiques présentes et leur concentration.

La spectroscopie de fluorescence permet de détecter la fluorescence émise par certains composés lorsqu'ils sont excités par la lumière. Elle peut être utilisée pour détecter la présence de certaines molécules ou de produits de corrosion spécifiques.

Ces techniques spectroscopiques permettent de caractériser la composition chimique des échantillons, d'identifier les espèces chimiques impliquées dans la corrosion microbienne

et de suivre les réactions chimiques qui se produisent. Elles offrent une grande sensibilité et peuvent être utilisées pour des analyses non destructives des surfaces des matériaux corrodés.

### **I.5.6. Mesure de la conductivité**

La mesure de conductivité est une méthode utilisée pour évaluer la corrosion microbienne en mesurant la capacité d'un matériau à conduire l'électricité. Dans cette méthode, un dispositif de mesure de la conductivité est utilisé pour mesurer la conductivité électrique d'un matériau exposé à la corrosion microbienne. La conductivité électrique peut être influencée par la présence de dépôts microbiens, de biofilms, de produits de corrosion ou d'autres facteurs liés à la corrosion microbienne.

En général, la mesure de la conductivité est réalisée en utilisant une sonde de conductivité qui est placée en contact avec la surface du matériau. Un courant électrique de faible intensité est appliqué à travers la sonde, et la conductivité électrique du matériau est déterminée en mesurant la résistance au passage du courant. La mesure de la conductivité permet de détecter les changements de conductivité causés par la présence de micro-organismes et de produits de corrosion. Elle peut être utilisée pour suivre l'évolution de la corrosion microbienne dans le temps, évaluer l'efficacité des traitements de protection et détecter les zones de corrosion active. La mesure de la conductivité est une méthode relativement simple et rapide pour évaluer la corrosion microbienne, mais elle fournit des informations indirectes sur l'état de corrosion et nécessite souvent des calibrations spécifiques pour une interprétation précise des résultats

Il est important de noter que chaque méthode a ses avantages et ses limites, et qu'il est souvent nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes pour obtenir une évaluation précise de la corrosion microbienne.

## **I.6. Importance de l'étude de la corrosion microbienne**

### **I.6.1. Coûts**

La corrosion microbienne peut causer des coûts importants en raison de la réparation, du remplacement et de la maintenance de structures et d'équipements endommagés. Comprendre les mécanismes de la corrosion microbienne peut aider à prévenir les défaillances de structures et d'équipements, assurant ainsi leur durabilité et réduisant les coûts

de maintenance. En identifiant les micro-organismes corrosifs et en comprenant comment ils interagissent avec les surfaces métalliques, il est possible de mettre en place des mesures de prévention appropriées. Cela peut inclure la sélection de matériaux résistants à la corrosion, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion ciblant les micro-organismes spécifiques, le contrôle des conditions environnementales favorisant la croissance des micro-organismes corrosifs, ainsi que la surveillance régulière des structures et des équipements pour détecter les signes de corrosion microbienne. En prévenant les défaillances dues à la corrosion microbienne, les coûts de réparation et de remplacement peuvent être considérablement réduits, ce qui permet d'économiser du temps et des ressources financières.

### **I.6.2. Environnement**

La corrosion microbienne peut avoir un impact négatif sur l'environnement, notamment en libérant des substances toxiques et en polluant l'eau et le sol. Les micro-organismes corrosifs peuvent produire des sous-produits chimiques, tels que des acides et des gaz, qui peuvent être dangereux pour la santé humaine et animale, ainsi que pour les écosystèmes environnants. De plus, la corrosion des structures métalliques peut entraîner des fuites de substances nocives dans l'environnement, ce qui peut avoir des effets dévastateurs sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. En comprenant les mécanismes de la corrosion microbienne, il est possible de mettre en place des mesures de prévention pour minimiser l'impact environnemental. Cela peut inclure l'utilisation de revêtements protecteurs sur les surfaces métalliques, la mise en place de techniques de surveillance et d'entretien régulières pour détecter et traiter rapidement les problèmes de corrosion, ainsi que l'utilisation de méthodes de traitement des eaux contaminées pour limiter la propagation des substances corrosives. En prenant des mesures préventives adéquates, il est possible de réduire l'impact environnemental de la corrosion microbienne, en préservant la qualité de l'eau et du sol, en minimisant la pollution et en maintenant l'équilibre des écosystèmes. Cela contribue également à la durabilité et à la protection de l'environnement pour les générations futures.

### **I.6.3. Sécurité**

La corrosion microbienne peut également avoir un impact significatif sur la sécurité des structures et des équipements. Lorsque les micro-organismes corrosifs attaquent les surfaces métalliques, ils peuvent affaiblir leur intégrité structurelle, les rendant potentiellement instables et susceptibles de se rompre ou de provoquer des défaillances. Cela présente des risques pour la sécurité des travailleurs qui interagissent avec ces structures, ainsi que pour le public qui peut être exposé à des environnements dangereux. En comprenant les

mécanismes de la corrosion microbienne, il devient possible de mettre en place des mesures de prévention et de maintenance appropriées pour assurer la sécurité des structures et des équipements. Cela peut impliquer l'inspection régulière des surfaces métalliques, l'identification précoce des signes de corrosion microbienne et la prise de mesures correctives pour renforcer les structures affaiblies. De plus, la sensibilisation et la formation des travailleurs sur les risques liés à la corrosion microbienne peuvent contribuer à une utilisation plus sécuritaire des infrastructures. En investissant dans la prévention et la gestion de la corrosion microbienne, il est possible de maintenir des conditions de travail sûres et de prévenir les incidents liés à des défaillances structurales. Cela permet de protéger la sécurité des travailleurs et du public, en assurant des environnements de travail et des infrastructures stables et fiables.

### **I.7. Les moyens de prévention et de lutte contre la corrosion microbienne**

Il existe plusieurs moyens de prévenir et de lutter contre la corrosion microbienne. En voici quelques-uns :

#### **I.7.1. Contrôle de l'environnement**

Il est important de surveiller et de maintenir les conditions environnementales pour empêcher la croissance des bactéries responsables de la corrosion microbienne. Cela peut inclure le contrôle de la température, du pH, de la salinité et de l'humidité.

#### **I.7.2. Revêtements de protection**

L'utilisation de revêtements de protection, tels que des peintures, des émaux ou des vernis, peut aider à protéger les surfaces métalliques contre les bactéries et les agents corrosifs. Ces revêtements peuvent également être traités avec des additifs antimicrobiens pour renforcer leur efficacité.

#### **I.7.3. Utilisation de matériaux résistants à la corrosion**

Les matériaux résistants à la corrosion, tels que l'acier inoxydable et le titane, peuvent être utilisés pour remplacer les métaux plus sensibles à la corrosion microbienne.

### I.7.4. Traitement biocide

Les produits biocides peuvent être utilisés pour tuer les bactéries responsables de la corrosion microbienne. Cependant, l'utilisation de biocides peut avoir des effets néfastes sur l'environnement, il est donc important de les utiliser avec précaution.

### I.7.5. Surveillance régulière

Il est important de surveiller régulièrement les équipements et les structures métalliques pour détecter les signes de corrosion microbienne. Cela peut permettre d'identifier rapidement les problèmes et de mettre en place des mesures préventives ou correctives avant qu'ils ne deviennent plus graves.

## I.8. Conclusion

En conclusion, la corrosion microbienne est un problème sérieux pour de nombreuses industries et nécessite une gestion proactive pour prévenir les dommages causés par cette forme de corrosion. Les connaissances actuelles sur la corrosion microbienne doivent être régulièrement mises à jour afin de développer des stratégies efficaces de prévention et de traitement.

**Chapitre II**

**Notions générales sur**

**les biofilms microbiens**

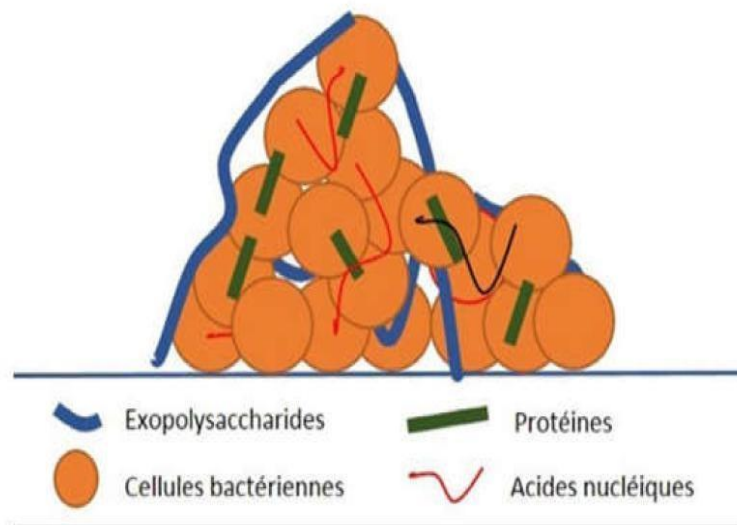
## **II.1. Introduction**

Les biofilms sont des communautés complexes de microorganismes qui se forment à la surface de différents milieux, tels que les surfaces biologiques ou les matériaux inanimés. Ces structures sont constituées de cellules bactériennes, fongiques ou microbiennes, qui se regroupent en colonies et s'entourent d'une matrice extracellulaire protectrice. Les biofilms sont omniprésents dans la nature, que ce soit dans les écosystèmes aquatiques, les sols ou même à l'intérieur du corps humain. Leur formation et leur résistance aux conditions environnementales et aux traitements antimicrobiens en font un sujet d'étude important dans le domaine de la microbiologie. Plusieurs études ont mis en évidence le rôle des biofilms dans la corrosion des conduits, par exemple (une étude menée par Dang et al.(2017) a identifié des microorganismes présents dans les biofilms capables de produire des métabolites corrosifs, contribuant ainsi à l'accélération de la corrosion. De même, Zhang et al. (2019) ont mis en évidence le lien entre la présence de biofilms microbiens et la formation de piles galvaniques, un mécanisme majeur de corrosion dans les conduits d'eau potable),et dans les infections nosocomiales, les infections des voies urinaires et les maladies parodontales, ce qui souligne l'importance de comprendre leur formation et leur dynamique pour développer des stratégies de prévention et de traitement efficaces (Douterelo et al., 2019).

## **II.2. Définitions des biofilms microbiens**

Les biofilms microbiens sont des communautés complexes de micro-organismes, tels que des bactéries, des champignons, des algues et des protozoaires, qui se développent sur des surfaces solides ou liquides pour former une matrice extracellulaire. Cette matrice extracellulaire est produite par les microbes eux-mêmes et leur permet d'adhérer aux surfaces, de les protéger des facteurs environnementaux, de communiquer et de coopérer entre eux pour remplir des fonctions spécifiques.

Les biofilms microbiens ont été étudiés dans de nombreux domaines, notamment la biologie marine, la médecine, l'industrie alimentaire, l'environnement et la biotechnologie. Ils peuvent avoir des effets bénéfiques ou nocifs, selon leur composition et leur localisation. Par exemple, les biofilms microbiens peuvent aider à décomposer les polluants dans l'environnement, mais ils peuvent également entraîner des infections chroniques chez les patients atteints de maladies respiratoires, cutanées ou urinaires (Jang et al., 2018).



**Figure II.1** : Représentation schématique de la composition de biofilm (Goetz et al., 2016).

### II.3. Conditions de formation des biofilms microbiens

Les biofilms microbiens sont des communautés complexes de micro-organismes qui se développent sur des surfaces solides ou liquides, formant une matrice extracellulaire. La formation de biofilms microbiens est un phénomène omniprésent dans la nature et peut se produire dans une variété d'environnements, y compris les sols, les rivières, les lacs, les égouts, les conduites d'eau, les implants médicaux et les surfaces dentaires. La formation de biofilms microbiens est un processus dynamique influencé par de nombreux facteurs environnementaux et biologiques.

Les conditions dans lesquelles les biofilms microbiens se forment peuvent varier en fonction de l'environnement et des espèces de micro-organismes impliqués. Cependant, certaines conditions communes favorisent leur développement. Premièrement, les biofilms microbiens ont besoin de nutriments pour se nourrir et se reproduire rapidement. Ils se forment souvent dans des environnements riches en nutriments tels que les conduites d'eau, les réservoirs, les égouts et les sols fertilisés. De plus, les biofilms microbiens nécessitent des surfaces solides ou liquides pour se fixer et se développer. Les surfaces peuvent être naturelles (comme des roches, des feuilles ou des racines) ou artificielles (comme des implants médicaux, des tuyaux et des réservoirs d'eau). De plus, certaines espèces microbiennes préfèrent des conditions de pH spécifiques pour se développer et former des biofilms, tandis que d'autres préfèrent des températures spécifiques.

La formation de biofilms peut être fortement influencée par les relations entre les différentes espèces microbiennes. Certains peuvent travailler ensemble en stimulant la croissance d'autres membres grâce à diverses substances, tandis que d'autres peuvent entrer en compétition pour l'espace et les nutriments précieux. La création et l'organisation de ces biofilms peuvent également être influencées par divers facteurs environnementaux, notamment la pression, la lumière, la turbidité, la salinité et les courants (Flemming & Wingender, 2010).

### II.3.1. La présence d'une surface

Pour s'épanouir, les biofilms microbiens doivent localiser une surface de nature solide ou liquide qui leur permet de s'accrocher et de se développer. Cela peut être fourni soit par des sources naturelles, comme le sol, les plantes ou les roches, soit par des objets fabriqués par l'homme, notamment des surfaces dentaires, des implants médicaux et des tuyaux. Une fois qu'ils ont trouvé une surface appropriée, les microorganismes libres dans leur environnement se fixent à cette surface en utilisant des mécanismes d'adhésion spécifiques. Ces mécanismes comprennent la production de pili, de protéines d'adhésion et de polymères extracellulaires qui facilitent l'attachement des microorganismes à la surface. Une fois fixés, les microorganismes commencent à se multiplier et à former une matrice extracellulaire. Cette matrice, principalement composée de polymères extracellulaires produits par les microorganismes, forme une structure tridimensionnelle qui maintient les cellules ensemble et les attache à la surface. La matrice extracellulaire fournit également une protection aux microorganismes contre les facteurs environnementaux défavorables, tels que les variations de température, la sécheresse ou la présence de substances antimicrobiennes.

Au fil du temps, le biofilm se développe et devient plus complexe. Les microorganismes présents dans le biofilm interagissent entre eux, créant ainsi une communauté diversifiée. Des canaux et des espaces se forment à l'intérieur du biofilm, permettant la circulation des nutriments, de l'eau et des métabolites entre les différentes couches de microorganismes. Cette architecture tridimensionnelle favorise la coopération et les échanges métaboliques au sein du biofilm (Hall-Stoodley et al., 2004).

### II.3. 2. La production de polymères extracellulaires

Les exopolysaccharides, également connus sous le nom de polymères extracellulaires, jouent un rôle central pour les micro-organismes en leur permettant de former des réseaux

complexes ainsi que d'établir des connexions adhésives aux surfaces. Ces substances collantes sont

synthétisées par les bactéries grâce à divers signaux environnementaux, notamment la présence de molécules organiques, de nutriments ou de métaux (Hall-Stoodley et al., 2006).

### II.3.3. La présence de nutriments

Les biofilms microbiens se développent souvent dans des environnements riches en nutriments tels que les conduites d'eau, les réservoirs, les égouts et les sols fertilisés. Les nutriments nécessaires à la croissance des microorganismes peuvent provenir de sources externes ou être produits par les microorganismes eux-mêmes. Les sources externes de nutriments incluent des composés organiques tels que les matières organiques en suspension dans l'eau, les débris végétaux, les restes alimentaires, les substances dissoutes provenant de l'environnement environnant, etc. Ces nutriments externes peuvent être adsorbés à la surface sur laquelle le biofilm se forme et servir de source de nourriture pour les microorganismes. Parallèlement, les microorganismes eux-mêmes peuvent produire des composés extracellulaires tels que des enzymes et des métabolites qui leur permettent de dégrader et de convertir les molécules présentes dans leur environnement en nutriments utilisables. Par exemple, certains microorganismes peuvent sécréter des enzymes qui décomposent les polymères complexes en sucres simples, qui peuvent ensuite être absorbés et utilisés comme source de carbone et d'énergie. De plus, la présence de biofilms microbiens peut entraîner des modifications locales de l'environnement, créant ainsi des conditions favorables à la libération de nutriments supplémentaires. Par exemple, la formation du biofilm peut entraîner l'accumulation de matière organique et la création de microenvironnements où les concentrations de nutriments sont plus élevées que dans l'environnement environnant (Giaouris & Chorianopoulos, 2018).

### II.3.4. La coopération et la compétition entre les espèces

La formation de biofilm nécessite souvent la présence de plusieurs espèces différentes de micro-organismes, qui interagissent. Ces interactions peuvent être de différentes natures, comme la coopération, la compétition, la prédation ou la communication cellulaire. Les microbes peuvent produire des signaux chimiques pour communiquer entre eux, favoriser leur croissance ou éviter la concurrence (Klausen, et al., 2003)

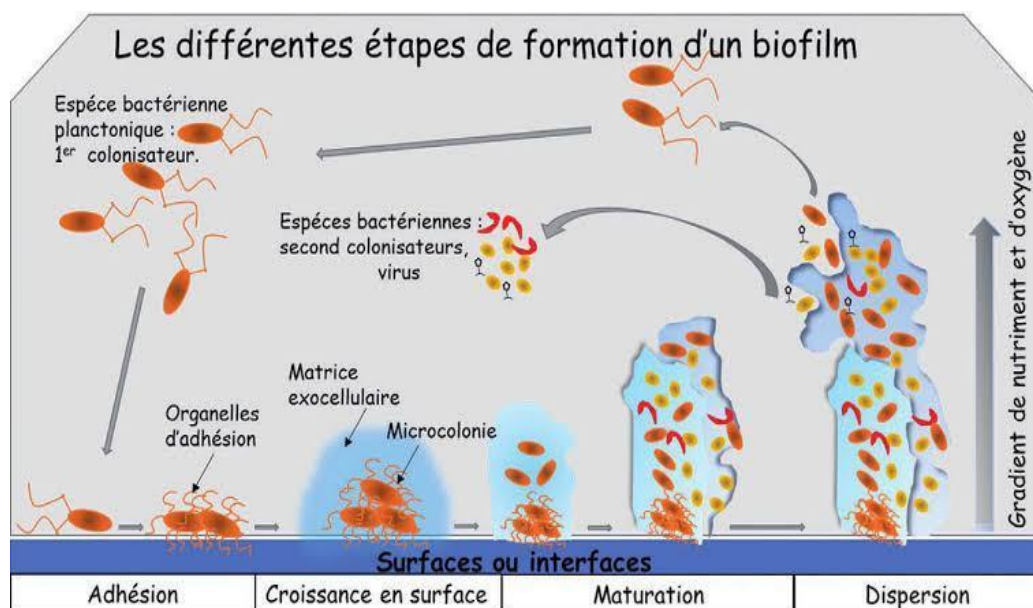
### II.3.5. Les facteurs environnementaux

Des facteurs environnementaux tels que la température, le pH, l'oxygénation, la turbidité, la salinité, la pression ou le débit d'eau affectent également la formation et la structure du biofilm microbien. Par exemple, certains biofilms sont capables de survivre à des conditions extrêmes, telles qu'une acidité élevée, une salinité élevée ou des environnements à haute température.

- Ces conditions ne sont pas exhaustives et peuvent varier selon les types de micro-organismes impliqués et le milieu environnant. En comprenant ces facteurs, il est possible de mieux contrôler la formation des biofilms dans différents environnements, et ainsi prévenir les problèmes de contamination et d'infections associées à leur présence (Parsek & Singh, 2003).

### II.4. Étapes de développement des biofilms microbiens

Les biofilms microbiens sont des communautés de micro-organismes enrobées dans une matrice extracellulaire. La formation de biofilms microbiens implique une série d'étapes complexes qui sont influencées par plusieurs facteurs, tels que la composition du substrat, la température, le pH et la présence d'autres microorganismes. Les étapes de développement des biofilms microbiens peuvent être résumées en quatre grandes étapes (O'Toole & Wong, 2016).



**Figure II.2 :** Étapes de la formation et de la dispersion d'un biofilm bactérien.

### II.4.1. Adhésion initiale

Lors de cette étape, les micro-organismes libres dans l'environnement se fixent sur une surface solide et commencent à se multiplier. Cette adhésion est facilitée par les flagelles et les pili présents sur la surface des cellules bactériennes. Les bactéries cherchent des surfaces qui leur permettent de s'installer et de se développer rapidement, telles que les surfaces lisses et solides comme celles des équipements médicaux, des implants, des canalisations et des surfaces dentaires.

Il est important de noter que l'adhésion initiale est une étape critique dans le développement des biofilms microbiens, car elle détermine le type et la composition des bactéries qui colonisent la surface. Une surface plus adhérente facilite l'adhésion initiale des bactéries, ce qui peut conduire à la formation de biofilms plus importants et plus résistants. Les surfaces lisses sont également plus facilement colonisées que les surfaces rugueuses. Cela est dû au fait que les surfaces rugueuses offrent moins de surface d'adhérence pour les bactéries. L'adhésion initiale est influencée par de nombreux facteurs, tels que la charge de surface, la rugosité de la surface, la composition chimique de la surface et la concentration des micro-organismes dans l'environnement. Les micro-organismes peuvent se fixer à la surface par une adsorption électrostatique, une adsorption hydrophobe ou une adsorption spécifique. En outre, les bactéries peuvent former des agrégats de cellules dès la première étape pour faciliter leur fixation à la surface. La recherche a montré que les bactéries présentes dans l'environnement peuvent coloniser les surfaces très rapidement et former des biofilms en quelques heures seulement. Cela souligne l'importance de la prévention de l'adhésion bactérienne pour contrôler la formation de biofilms microbiens. Des méthodes telles que la modification de surface, la stérilisation, le nettoyage et la désinfection peuvent être utilisées pour minimiser l'adhésion bactérienne et réduire la formation de biofilms (Stewart & Franklin, 2008).

### II.4.2. Formation de microcolonies

Après l'adhésion initiale des micro-organismes à la surface, ils commencent à se diviser et à former des agrégats de cellules appelés microcolonies. Les microcolonies sont des agrégats de cellules bactériennes qui sont en contact étroit les unes avec les autres. Ces microcolonies sont recouvertes d'une matrice extracellulaire composée de polysaccharides, de protéines et de lipides produits par les bactéries elles-mêmes. Les microcolonies se forment

lorsque les bactéries commencent à se diviser et à former des agrégats de cellules en utilisant la matrice extracellulaire comme ciment pour se lier les unes aux autres. Les bactéries dans les microcolonies commencent à coopérer pour leur propre survie. Elles partagent des nutriments et des signaux de communication, ce qui favorise leur croissance et leur survie. Les microcolonies peuvent être divisées en deux types :

- Les microcolonies de croissance rapide sont caractérisées par une croissance rapide des cellules bactériennes et une production abondante de matrice extracellulaire, ce qui favorise la formation de biofilms plus rapidement.
- Les microcolonies de croissance lente, en revanche, sont caractérisées par une croissance plus lente des cellules bactériennes et une production de matrice extracellulaire plus faible. La formation de microcolonies est influencée par de nombreux facteurs, tels que la disponibilité des nutriments, la concentration des bactéries dans l'environnement, la température et la composition de la matrice extracellulaire. Les microcolonies de biofilms peuvent également différer dans leur composition et leur densité en raison de l'hétérogénéité des conditions environnementales et de la diversité des micro-organismes présents (Hall-Stoodley, et al., 2020).

### II.4.3. Maturation du biofilm

La troisième étape critique dans le développement des biofilms microbiens est la maturation. À ce stade, les microcolonies se développent en biofilms complexes matures caractérisés par des structures tridimensionnelles, des densités cellulaires élevées et une organisation fonctionnelle.

Au cours de cette étape, les bactéries continuent à se diviser et à produire une matrice extracellulaire. La matrice extracellulaire se densifie et devient plus complexe, fournissant une protection physique et une barrière défensive contre les agresseurs externes, tels que les agents antimicrobiens, les protéases et les phagocytes. Une autre caractéristique de la maturation des biofilms est l'organisation fonctionnelle des bactéries, dans laquelle différentes populations microbiennes se spécialisent dans différents rôles pour soutenir les biofilms.

Les biofilms matures peuvent contenir des milliers d'espèces différentes de micro-organismes, chacun ayant un rôle spécifique dans le biofilm. Par exemple, certaines bactéries peuvent produire des enzymes qui décomposent les nutriments, tandis que d'autres peuvent produire des pigments ou des gaz qui modifient les conditions environnementales. De plus, les bactéries peuvent également coopérer pour protéger les biofilms des agressions extérieures,

comme la production d'enzymes qui dégradent les antibiotiques. Une autre caractéristique de la maturation du biofilm est l'organisation spatiale complexe des bactéries, formant des microenvironnements distincts selon les conditions locales. Les zones de biofilm près de la surface peuvent être plus aérées et riches en nutriments, tandis que les zones plus profondes peuvent être moins pauvres en nutriments et en oxygène. Cela conduit à une hétérogénéité spatiale au sein du biofilm, qui affecte la distribution et la fonction des microbes présents (Flemming et al., 2016).

### II.4.4. La dispersion du biofilm

Au fur et à mesure que le biofilm se développe, les cellules individuelles commencent à se détacher de la surface et à se disperser dans le milieu environnant. Cette étape est importante car elle permet aux bactéries de coloniser le nouvel habitat et de se propager à d'autres parties de l'environnement. La diffusion peut se produire passivement lorsque les cellules sont érodées d'une surface par un écoulement de fluide, ou activement lorsque les bactéries produisent des enzymes qui dégradent la matrice extracellulaire et libèrent des cellules individuelles.

En résumé, les stades de développement des biofilms microbiens comprennent l'adhésion initiale, la formation de microcolonies, la maturation du biofilm et la propagation du biofilm. Ces étapes ne sont pas nécessairement linéaires, mais dynamiques et continues (McDougald et al., 2011).

### II.5. Intérêt de l'étude des biofilms microbiens

En raison des conséquences délétères de ce phénomène, l'étude des biofilms microbiens dans la biocorrosion des conduites d'eau est d'un grand intérêt. Les biofilms microbiens peuvent provoquer une dégradation accélérée des matériaux de plomberie, entraînant des fuites, des ruptures et des problèmes de qualité de l'eau. Comprendre les mécanismes sous-jacents de la biocorrosion des conduites d'eau est essentiel pour développer des stratégies de prévention et de gestion efficaces. Les biofilms microbiens favorisent la corrosion des conduites d'eau en produisant des substances corrosives telles que des acides organiques, des ions sulfure et des enzymes. Ils créent également des conditions locales qui favorisent la formation d'un microenvironnement corrosif. Les micro-organismes présents dans le biofilm peuvent être divisés en bactéries sulfato-réductrices, bactéries acétogènes et bactéries oxydantes du fer selon leur rôle dans la biocorrosion. L'étude des biofilms microbiens dans la biocorrosion des conduites d'eau comprend l'identification des espèces microbiennes impliquées, leur abondance et leur activité métabolique. Des techniques

d'analyse moléculaire avancées, telles que la «Polymerase Chain Reaction» quantitative (PCR) (ou encore ACP pour Amplification en Chaîne par Polymérase) et la métagénomique, peuvent fournir des informations détaillées sur la composition et la dynamique des biofilms microbiens. Il est également important de comprendre les facteurs qui influencent la formation, le développement et la stabilité des biofilms microbiens dans les cours d'eau. Les propriétés physiques et chimiques de l'eau, telles que le pH, la température, la turbidité et la composition chimique, ainsi que les caractéristiques du matériau de la tuyauterie, affectent toute la croissance du biofilm. La prévention et le contrôle de la biocorrosion dans les conduites d'eau reposent sur la gestion des biofilms microbiens. Cela peut inclure des mesures de nettoyage régulières pour éliminer le biofilm et les dépôts associés, et l'utilisation de désinfectants appropriés pour empêcher leur formation. L'optimisation des conditions environnementales, telles que le contrôle de la température et l'élimination des nutriments, peut également contribuer à limiter la croissance du biofilm. La recherche dans ce domaine vise à développer des méthodes de détection précoce de la biocorrosion, ainsi que des stratégies efficaces de prévention et de traitement. Des recherches sont en cours pour évaluer l'efficacité des agents antimicrobiens, des revêtements protecteurs et des techniques de traitement innovantes pour contrôler la formation et la croissance du biofilm microbien. Les connaissances acquises à partir d'études sur les biofilms microbiens dans la biocorrosion des conduites d'eau ont d'importantes implications pratiques. Ils permettent la conception et la mise en œuvre de mesures d'entretien préventif et préventif pour assurer la pérennité des systèmes de distribution d'eau et la sécurité des approvisionnements en eau (Zhang et al. 2019).

## **II.6. Les types de micro-organismes impliqués dans la formation des biofilms**

Le monde de la biocorrosion comprend des micro-organismes qui peuvent être classés en trois catégories distinctes: les algues, les champignons et les bactéries.

### **I.6.1. Les Bactéries**

Sont généralement liés à la biocorrosion. Certains types de ces bactéries, comme les bactéries sulfato-réductrices et les bactéries acidogènes, peuvent altérer les surfaces métalliques en produisant du sulfure d'hydrogène et de l'acide. Mais il existe également d'autres types impliqués dans la biocorrosion, comme les bactéries méthanogènes, les bactéries ferro-oxydantes et les bactéries nitrifiantes.

**I.6.1.1. Bactéries sulfato-réductrices (BSR) :** Dans les environnements riches en sulfates, les organismes appelés SRB prospèrent. Ces bactéries anaérobies utilisent des sulfates pour produire du sulfure d'hydrogène, ou  $H_2S$ , par réduction. Malheureusement, ce gaz est toxique et peut corroder les métaux en formant des sulfures métalliques insolubles. Pour cette raison, les scientifiques pensent que les BSR sont la principale cause de biocorrosion dans des endroits tels que les conteneurs de stockage de pétrole et de gaz, les conduites d'eau et les structures métalliques qui ont été immergées dans l'eau de mer (Beech & Sunner, 2014).

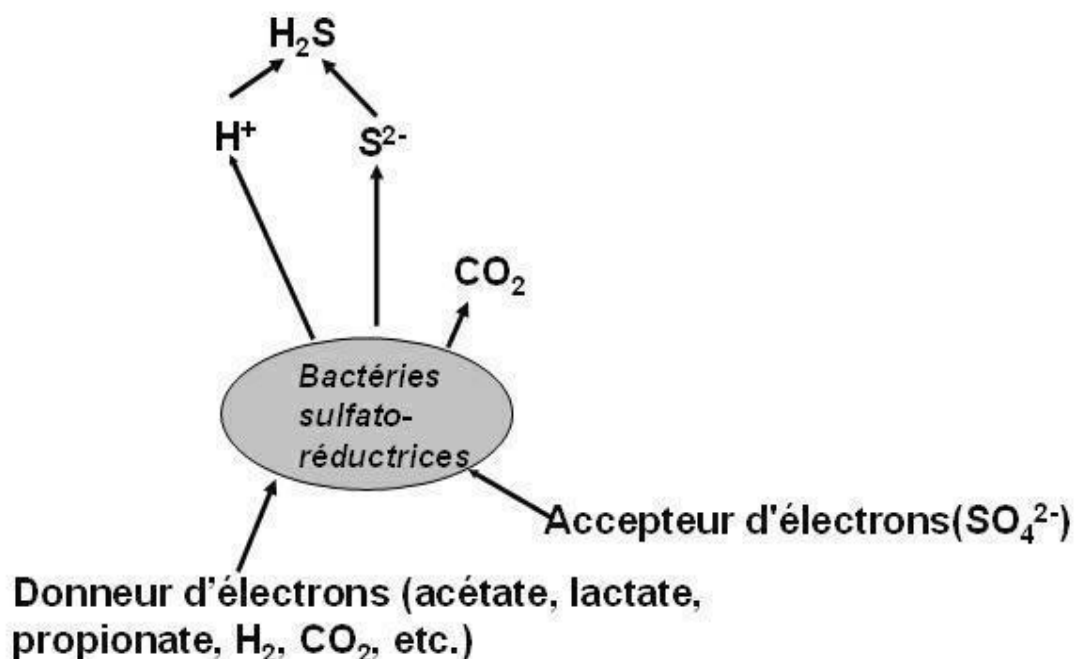


Figure II.3 : Bactéries Sulfato-réductrices

**I.6.1.1.a. Caractéristiques principales des BSR :** Les (biofilms Structurés à Rhéologie élevée) sont des communautés microbiennes qui se forment à la surface des canalisations d'eau potable. Ils sont considérés comme des agents clés dans la biocorrosion des conduites d'eau et leur caractérisation est importante pour prévenir les problèmes de corrosion.

Les BSR ont des caractéristiques uniques qui les distinguent des autres biofilms. Ils sont structurés de manière complexe et possèdent une rhéologie élevée, ce qui signifie qu'ils ont une résistance mécanique et une viscosité élevées. Leur structure est composée de canaux et de voies qui leur permettent de fournir de l'eau et des nutriments aux cellules microbiennes. Les BSR sont également riches en polysaccharides extracellulaires qui leur confèrent une résistance accrue aux stress environnementaux.

La formation des BSR est un processus complexe qui dépend de nombreux facteurs, tels que la qualité de l'eau, la température, le pH et la présence de nutriments. Les BSR sont composés de plusieurs espèces de micro-organismes, notamment des bactéries, des champignons et des algues. Les espèces les plus courantes dans les BSR incluent les genres *Pseudomonas*, *Sphingomonas*, *Burkholderia*, *Ralstonia*, *Bacillus*, *Micrococcus*, et *Achromobacter*.

La caractérisation des BSR est importante pour la prévention de la biocorrosion des conduites d'eau. Les méthodes de caractérisation des BSR incluent la microscopie électronique à balayage (MEB), la microscopie confocale à fluorescence (MCF), la microscopie électronique à transmission (MET) et la rhéométrie. La rhéométrie permet de mesurer la viscosité des BSR et d'analyser leur structure.

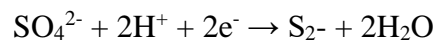
Les BSR sont impliqués dans la biocorrosion des conduites d'eau en raison de leur capacité à former des micro-zones anaérobies à l'intérieur du biofilm. Ces zones anaérobies favorisent la croissance de bactéries sulfato-réductrices (BSR) qui peuvent produire de l'acide sulfurique en réduisant les sulfates présents dans l'eau. L'acide sulfurique est un agent corrosif qui peut endommager les conduites d'eau. De plus, les BSR peuvent absorber des métaux présents dans les conduites d'eau et les stocker sous forme de composés organométalliques, ce qui peut également causer de la corrosion.

En conclusion, les BSR sont des bactéries impliquées dans la biocorrosion des conduites d'eau potable. Elles présentent des caractéristiques uniques, telles que leur capacité à former des biofilms, leur métabolisme anaérobie et leur capacité à utiliser les électrons des métaux pour leur croissance. Les BSR peuvent causer de graves problèmes de corrosion dans les conduites d'eau, ce qui peut entraîner des fuites, des ruptures de conduites et des problèmes de qualité de l'eau. Il est donc important de surveiller et de contrôler la croissance des BSR dans les réseaux de distribution d'eau. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la compréhension des mécanismes de la biocorrosion impliquant les BSR et pour développer des stratégies de contrôle plus efficaces (Wozniak, 2016).

**I.6.1.1.b. Métabolisme des BSR :** Les BSR (bactéries sulfato-réductrices) présentes dans les conduites d'eau potable peuvent avoir un impact significatif sur la corrosion des matériaux métalliques. Leur métabolisme est étroitement lié à la production de sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), un gaz toxique qui peut accélérer la corrosion des métaux.

Les BSR ont un métabolisme anaérobie et utilisent des composés organiques et inorganiques comme source d'énergie pour leur croissance. La réduction du sulfate ( $SO_4^{2-}$ ) en

sulfure ( $S^{2-}$ ) est leur principal mode de métabolisme. Cette réaction est catalysée par l'enzyme sulfate réductase, qui est produite par les BSR. La réaction chimique est la suivante :



Les BSR peuvent également utiliser des composés organiques, tels que les acides aminés, comme source d'énergie. Les acides aminés sont dégradés par un processus appelé désamination, qui libère des groupes ammonium ( $NH_4^+$ ) et des groupes acides carboxyliques ( $COO^-$ ). Les groupes ammonium sont ensuite utilisés pour réduire le sulfate en sulfure, tandis que les groupes carboxyliques sont convertis en dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) par le processus de décarboxylation.

Les BSR (bactéries sulfato-réductrices) présentes dans les conduites d'eau potable peuvent avoir un impact significatif sur la corrosion des matériaux métalliques. Leur métabolisme est étroitement lié à la production de sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), un gaz toxique qui peut accélérer la corrosion des métaux.

En résumé, le métabolisme des BSR dans les conduites d'eau potable est principalement axé sur la réduction du sulfate en sulfure, avec des sources d'énergie provenant de divers composés organiques et inorganiques. Ces réactions métaboliques peuvent produire du sulfure d'hydrogène, qui est un facteur important dans la biocorrosion des matériaux métalliques. La compréhension du métabolisme des BSR est essentielle pour le développement de stratégies de prévention et de contrôle de la biocorrosion dans les systèmes de distribution d'eau (Dinh et al., 2018).

**II.6.1.1.c. Les conditions de culture :** Les bactéries sulfato-réductrices ont des exigences spécifiques en matière de conditions de culture, qui dépendent de leur habitat naturel et de leur métabolisme. Voici les principales conditions de culture pour les BSR (Kim & Park., 2017) :

- **Milieu de culture :** Les BSR peuvent être cultivées sur divers milieux de culture, notamment le milieu de Postgate C, le milieu de Schaedler, le milieu de lactate sulfate, le milieu de Gaspard et le milieu de basal marine. Le milieu de Postgate C est largement utilisé pour la culture des BSR en laboratoire, car il est facile à préparer et à utiliser.
- **pH :** Les BSR ont besoin d'un pH compris entre 6,5 et 8,5 pour une croissance optimale. Des variations importantes du pH peuvent inhiber leur croissance.

- **Température** : Les BSR peuvent être cultivées à des températures allant de 20 à 45°C, mais leur température optimale de croissance est de 30-37°C.
- **Source de carbone** : Les BSR sont hétérotrophes et utilisent des composés organiques comme source de carbone. Les composés organiques couramment utilisés dans les milieux de culture pour les BSR sont le lactate, le pyruvate, le succinate, le malate et le glucose.
- **Source d'énergie** : Les BSR sont des organismes anaérobies facultatifs qui utilisent le sulfate comme accepteur final d'électrons pour produire de l'énergie. Les BSR peuvent également utiliser d'autres accepteurs d'électrons tels que le nitrate, le sulfite et le fumarate.
- **Nutriments supplémentaires** : Les BSR ont besoin de nutriments supplémentaires tels que les sels minéraux, les vitamines et les acides aminés pour leur croissance.

Le temps de génération des BSR varie selon les espèces et les conditions de culture. En général, il est compris entre 6 et 24 heures, mais peut atteindre 48 heures dans certains cas. Il est important de noter que les BSR sont des organismes anaérobies stricts, ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas survivre en présence d'oxygène. Par conséquent, leur culture doit être réalisée dans des conditions strictement anaérobies, ce qui peut nécessiter l'utilisation de chambres anaérobies ou d'incubateurs spéciaux.

**II.6.1.2. Bactéries sulfuro-oxydantes (Thiobacillus)** : Le microbiologiste allemand Gessard a découvert le genre Thiobacillus en 1901, mais sa classification et sa dénomination ont changé au fil des ans. De nos jours, le manuel de bactériologie systématique de Bergey classe Thiobacillus dans l'ordre des Chromatiales et la classe des Gamma Protéobactéries.

Les micro-organismes du genre Thiobacillus se trouvent couramment dans divers environnements, y compris les environnements acides, les habitats riches en soufre, l'eau douce et salée et les sols. De plus, ils jouent un rôle important dans les processus biologiques clés tels que la biocorrosion, la biolixiviation, le cycle biogéochimique du soufre et la dégradation des composés organiques soufrés. Ces micro-organismes sont répandus et présents dans de nombreux écosystèmes. Les environnements riches en soufre attirent de manière unique les bactéries qui possèdent la capacité d'utiliser l'oxygène comme accepteur d'électrons pour oxyder le soufre élémentaire et les composés soufrés, leur permettant de prospérer dans des zones où d'autres micro-organismes sont incapables de survivre. La récupération des métaux dans l'industrie minière est l'une des capacités des espèces de Thiobacillus, qui sont également reconnues pour leur capacité à oxyder le fer, le manganèse et

d'autres métaux. En tant que contributeurs à la biocorrosion, ces bactéries sont responsables de dommages importants dans divers milieux industriels, entraînant des coûts élevés d'entretien et de réparation (Beijerinck, 1904)

**II.6.1.2.a. Classification et morphologie :** Les thiobacillus sont des bactéries à Gram négatif appartenant à la classe C des protéobactéries, des chromobacterium et des thiobacilliacées. Il existe plusieurs espèces de Thiobacillus, chacune avec des caractéristiques spécifiques et des habitats de prédilection. Les cellules de Thiobacillus sont généralement des bactéries en forme de bâtonnet ou en forme de bâtonnet, mais leur morphologie peut varier en fonction des conditions environnementales. Les cellules sont généralement immobiles, mais certaines espèces de Thiobacillus peuvent posséder des flagelles mobiles.

Les cellules de Thiobacillus varient généralement en taille de 0,5 à 2,5  $\mu\text{m}$  de largeur et de 2 à 10  $\mu\text{m}$  de longueur. Les cellules peuvent apparaître sous forme de cellules individuelles, de chaînes de cellules ou de colonies. Ils sont des chimioautotrophes, ce qui signifie qu'ils utilisent des composés inorganiques pour produire de l'énergie et du carbone. Les thiobacillus sont généralement associés à des environnements riches en sulfure d'hydrogène, tels que les environnements marins, les eaux usées, les sols contenant des minerais sulfurés et les habitats géothermiques (Widdel, Shima, 2012).

**II.6.1.2.b. Métabolisme :** Ce métabolisme est très diversifié, ce qui leur permet de s'adapter à des conditions environnementales extrêmes. Les thiobacillus sont des bactéries chimioautotrophes qui utilisent des composés inorganiques tels que le soufre, le sulfure d'hydrogène, le fer et l'ammoniac comme sources d'énergie et de carbone. Ils ont le statut de leur capacité à convertir le sulfure d'hydrogène en soufre élémentaire ( $\text{S}_0$ ) ou en acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en fonction de l'environnement. Certains thiobacillus peuvent également oxyder le fer ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en acide ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ) et sulfurique, provoquant une corrosion acide. Ils fixent également l'azote atmosphérique et le convertissent en ammoniac, ce qui leur permet de prospérer dans des environnements pauvres en azote (Kelly & Wood, 2000).

**II.6.1.3. Bactéries acido-géniques :** Présentes dans les zones riches en matière organique, les bactéries acidogènes produisent des acides en métabolisant des composés inorganiques et organiques. Ces acides, tels que sulfurique et nitrique, accélèrent également la corrosion et peuvent éroder les surfaces métalliques. Vous pouvez rencontrer fréquemment

des bactéries acidogènes dans des endroits tels que les eaux usées ou les boues (VanGylswyk, 1995).

**II.6.1.4. Bactéries hétérotrophes :** Sur les surfaces métalliques, des biofilms microbiens se développent et sont envahis par des bactéries hétérotrophes. Ces bactéries utilisent des composés organiques pour produire du carbone et de l'énergie, provoquant potentiellement une biocorrosion en créant des acides et d'autres composés qui peuvent éroder les métaux (Madigan, et al., 2014).

**II.6.1.5. Bactéries du fer et du manganèse :** Les bactéries du fer et du manganèse sont également impliquées dans la biocorrosion. Les bactéries du fer peuvent oxyder le fer présent dans les structures métalliques, ce qui conduit à la formation de rouille et à une dégradation accrue de la surface métallique. Les bactéries du manganèse peuvent oxyder le manganèse et former des dépôts de manganèse qui peuvent endommager les conduites d'eau et les équipements de traitement de l'eau. Ces bactéries peuvent se développer dans des environnements acides ou alcalins, et leur croissance peut être encouragée par la présence de nutriments tels que les sels de fer et de manganèse. Les conséquences de la croissance de ces bactéries dans les infrastructures de distribution d'eau peuvent inclure des obstructions, des fuites et une réduction de la qualité de l'eau potable. La compréhension de l'implication de ces bactéries dans la biocorrosion est importante pour le développement de stratégies de prévention efficaces. Les mesures de prévention peuvent inclure le maintien d'un pH optimal de l'eau, l'utilisation de revêtements protecteurs sur les surfaces métalliques et la mise en place de programmes de surveillance régulière de la qualité de l'eau (Ruecker et al., 2016).

### II.6.2. Les champignons

En milieu humide, les champignons filamenteux, tels qu'*Aspergillus* et *Penicillium*, sont régulièrement impliqués dans la biocorrosion. Ils remplissent ce rôle en créant des biofilms sur les surfaces métalliques, ce qui est une fonction vitale pour les champignons (Kuhn, 1962).

**II.6.2.1. Les moisissures :** Les environnements humides et mal ventilés comme les sous-sols, les salles de bains et les cuisines accueillent souvent des moisissures, qui sont des champignons filamenteux qui peuvent corroder de nombreux matériaux, notamment le bois, les matériaux polymères et le plâtre (Enning & Garrelfs, 2014).

**II.6.2.2. Les champignons de pourriture :** Les champignons filamenteux connus sous le nom de champignons de pourriture se développent généralement dans des matériaux riches en cellulose, tels que le bois et la paille, provoquant la désintégration des structures en bois comme les planchers et les poutres. Ces champignons sont capables de décomposer la cellulose grâce à des enzymes spécifiques, appelées cellulases, qu'ils produisent. Les cellulases dégradent les liaisons chimiques présentes dans la cellulose, transformant ainsi ce polymère complexe en sucres simples, tels que le glucose, qui peuvent être utilisés comme source de carbone et d'énergie par les champignons.

Une fois que les champignons de pourriture se sont établis dans le bois ou d'autres matériaux riches en cellulose, ils forment un réseau de filaments appelé mycélium, qui pénètre profondément dans la structure du matériau. Le mycélium sécrète des enzymes de dégradation qui agissent sur la cellulose et d'autres composés présents dans le bois, provoquant la désintégration progressive de la structure. Outre la cellulose, certains champignons de pourriture sont également capables de dégrader d'autres composants du bois, tels que l'hémicellulose et la lignine. Ces composants jouent un rôle important dans la résistance et la rigidité du bois. La dégradation de l'hémicellulose et de la lignine par les champignons de pourriture affaiblit davantage la structure du matériau, entraînant sa désintégration et sa pourriture. Il convient de noter que différents types de champignons de pourriture ont des préférences spécifiques en termes de substrats et de conditions environnementales. Certains sont plus adaptés à la pourriture du bois en surface, tandis que d'autres sont capables de pénétrer plus profondément dans la structure du matériau. Les conditions environnementales, telles que l'humidité, la température et la disponibilité en nutriments, jouent également un rôle clé dans la croissance et le développement des champignons de pourriture (la Cruz-Mendoza et al., 2017).

**II.6.2.3. Les champignons lignivores :** Présents dans les forêts, les champignons lignivores jouent un rôle crucial dans le recyclage de la matière organique car ils sont capables de se nourrir de la lignine, principal composant du bois. Cependant, leur présence dans les structures en bois peut entraîner une corrosion rapide des métaux et des dommages structurels importants causés par leur infection. Lorsque les champignons lignivores colonisent les structures en bois, ils sécrètent des enzymes spécialisées, appelées ligninases, qui dégradent la lignine en composés plus simples. Cette dégradation de la lignine affaiblit la structure du bois, le rendant plus vulnérable aux attaques des champignons et à la détérioration générale. En plus de la dégradation de la lignine, les champignons lignivores

peuvent également décomposer d'autres composants du bois, tels que la cellulose et l'hémicellulose, ce qui aggrave les dommages causés à la structure. Certains champignons lignivores produisent également des acides organiques qui peuvent corroder les métaux présents dans les structures en bois, tels que les clous, les vis et les éléments de fixation, entraînant une détérioration rapide et une perte d'intégrité structurelle. Les dommages causés par les champignons lignivores peuvent être très graves, mettant en danger la stabilité et la durabilité des structures en bois. Ils peuvent provoquer des déformations, une perte de résistance, une pourriture et même l'effondrement des structures. Par conséquent, il est essentiel de mettre en œuvre des mesures préventives appropriées, telles que le traitement du bois avec des agents fongicides, le maintien de conditions de séchage adéquates et la surveillance régulière des structures en bois pour détecter toute infection fongique (Smith & Douglas, 2016).

### II.6.3. Les algues

Bien qu'elles ne soient pas aussi bien étudiées que les bactéries et les champignons, les algues ont le potentiel de contribuer à la biocorrosion. En produisant des acides organiques et des polysaccharides, ils sont capables de modifier les surfaces métalliques (Guiry & Guiry, 2021).

## II.7. Méthodes de détection et de contrôle des micro-organismes impliqués dans la formation des biofilms

La détection et le contrôle des micro-organismes impliqués dans la formation des biofilms sont des éléments clés pour prévenir les dommages causés par la corrosion microbologique dans les systèmes de distribution d'eau. Il est important de mettre en place des méthodes de surveillance régulières pour identifier la présence de micro-organismes potentiellement corrosifs et de prendre des mesures pour limiter leur croissance et leur activité. Les méthodes de détection et de contrôle peuvent varier en fonction du type de micro-organisme ciblé, de la gravité de l'infestation, et des caractéristiques spécifiques du système d'eau en question.

### II.7.1. Analyse microscopique

Cette méthode implique l'examen visuel des micro-organismes à l'aide d'un microscope. Les micro-organismes peuvent être détectés en utilisant une variété de

techniques, notamment la coloration de Gram et la coloration de Ziehl-Neelsen pour les bactéries, ainsi que la coloration à l'encre de Chine pour les champignons. Cette méthode est utile pour déterminer la présence et l'abondance des micro-organismes, mais elle ne permet pas d'identifier les espèces spécifiques (Stoodley et al., 2002).

### II.7.2. Tests de culture

Cette méthode consiste à cultiver des échantillons d'eau sur des milieux de culture spécifiques qui favorisent la croissance de certaines espèces de micro-organismes. Les bactéries peuvent être cultivées sur des milieux tels que la gélose nutritive ou la gélose à l'agar sang, tandis que les champignons peuvent être cultivés sur des milieux tels que la gélose de Sabouraud. Les colonies qui se développent peuvent être identifiées à l'aide de tests biochimiques et/ou de séquençage d'ADN (Ehrlich, et al., 2012).

### II.7.3. Tests de biologie moléculaire

Ces tests sont basés sur l'analyse de l'ADN ou de l'ARN des micro-organismes. Les tests de PCR (Réaction en Chaîne par Polymérase) et de qPCR (PCR quantitative en temps réel) sont couramment utilisés pour détecter des bactéries spécifiques telles que *Legionellapneumophila*, *Mycobacteriumavium* et *Pseudomonas aeruginosa*. Ces tests amplifient et détectent des séquences spécifiques d'ADN ou d'ARN caractéristiques de ces bactéries, ce qui permet une détection rapide et sensible de leur présence dans un échantillon. Parallèlement, les tests de séquençage d'ADN peuvent être utilisés pour identifier les espèces de champignons présents dans un échantillon. Le séquençage de l'ADN permet de déterminer la séquence spécifique des bases nucléotidiques qui composent l'ADN des champignons. En comparant cette séquence avec des bases de données de séquences génétiques de référence, il est possible d'identifier avec précision l'espèce de champignon présente dans l'échantillon. Ces techniques de détection moléculaire, telles que la PCR, la qPCR et le séquençage d'ADN, offrent plusieurs avantages pour la détection des micro-organismes. Elles sont rapides, sensibles et spécifiques, permettant une détection précise même à partir d'échantillons contenant de faibles concentrations de micro-organismes. De plus, ces tests moléculaires peuvent être automatisés et permettent une analyse à haut débit, ce qui les rend appropriés pour une utilisation en laboratoire et dans des contextes cliniques ou environnementaux.

Il convient de noter que ces tests moléculaires sont complémentaires aux méthodes traditionnelles de culture et d'identification des micro-organismes. Alors que la culture permet

de cultiver et d'isoler les micro-organismes pour une identification précise, les tests moléculaires offrent une détection rapide et spécifique, permettant une intervention rapide et ciblée lorsque la présence de micro-organismes pathogènes est suspectée (Donlan & Costerton, 2002).

### II.7.4. Méthodes basées sur l'activité métabolique

Ces méthodes mesurent l'activité métabolique des micro-organismes pour déterminer leur présence. Les tests couramment utilisés comprennent la mesure de la demande biochimique en oxygène (DBO) et la mesure de l'ATP (adénosine triphosphate).

Il existe plusieurs méthodes pour contrôler la croissance des micro-organismes impliqués dans la formation des biofilms (Gomes et al., 2019).

Les méthodes couramment utilisées sont :

- **Traitement chimique** : Les produits chimiques tels que le chlore, le peroxyde d'hydrogène, les sulfates de cuivre et de zinc sont utilisés pour tuer les micro-organismes. Le chlore est l'un des produits chimiques les plus couramment utilisés pour la désinfection de l'eau.
- **Traitement thermique** : Les températures élevées peuvent être utilisées pour tuer les micro-organismes. La pasteurisation et la stérilisation sont des exemples de traitements thermiques.
- **Traitement biologique** : Les bactéries bénéfiques sont ajoutées à l'eau pour inhiber la croissance des bactéries pathogènes. Cette méthode est connue sous le nom de biocontrôle.
- **Traitement physique** : L'utilisation d'ultrasons et de rayonnement ultraviolet peut aider à tuer les micro-organismes.
- **Traitement mécanique** : L'utilisation de filtres peut aider à éliminer les micro-organismes de l'eau.

Il est important de noter que l'utilisation de ces méthodes dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature et la concentration des micro-organismes, les caractéristiques de l'eau, la disponibilité des produits chimiques, les coûts et l'impact environnemental.

### II.8. Conclusion

En conclusion, l'étude des biofilms microbiens dans la biocorrosion des conduits d'eau est essentielle pour prévenir la détérioration des conduits, maintenir la qualité de l'eau et assurer la durabilité des systèmes de distribution d'eau.

# **CHAPITRE III**

## **Matériels et méthodes**

### III.1. Introduction

Ce chapitre joue un rôle fondamental dans la compréhension et l'évaluation de notre présent travail, en détaillant la méthodologie et en présentant les matériaux, ainsi que leur manipulation au laboratoire nous cherchons à fournir une base solide pour les résultats et les conclusions qui seront présentés dans les chapitres suivants.

### III.2. Description des points d'échantillonnage

Le site d'étude est représenté au milieu de l'université 20 Août 1955 Skikda côté du jardin botanique. Il s'agit d'un espace vert situé en face du bâtiment du rectorat, entre le bâtiment de la faculté des sciences de la nature et de la vie et celui de la faculté de droit et de gestion, les trois échantillons (Pt1, Pt2, Pt3) prélevés à partir de robinet de 3 points différents (Figure III.1) :



**Figure III.1** : Points de prélèvement du biofilm bactérien et l'eau pour analyses physico-chimiques. (a)Pt1, (b) Pt2, (c)Pt3.

#### III.2.1. Prélèvement d'échantillons pour les analyses physicochimiques

##### III.2.1.1. Technique de prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. Il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physicochimiques de l'eau (oxygène dissous, matières en suspension, le fer, turbidité...etc.). Avant de procéder au prélèvement d'échantillons d'eau pour les analyses

physico-chimiques, il est important de suivre un protocole approprié. Les étapes générales du processus de prélèvement peuvent inclure :

- **Préparation du matériel** : Rassemblez tous les éléments nécessaires, tels que des gants jetables, des récipients d'échantillonnage propres et stériles (de préférence en verre ou en plastique alimentaire), une étiquette d'identification de l'échantillon
- **Écoulement initial** : Laissez couler l'eau du robinet à un débit modéré pendant environ 2 à 3 minutes pour purger les canalisations. Cela permet de prélever un échantillon représentatif de l'eau courante.
- **Prélèvement de l'échantillon** : Ouvrez le robinet et remplissez le récipient d'échantillonnage sans le toucher avec vos mains ni le poser sur une surface non stérile. Assurez-vous de prélever la quantité d'eau requise pour les analyses spécifiques que vous souhaitez réaliser.
- **Manipulation** : Refermez hermétiquement le récipient d'échantillonnage dès que l'échantillon est prélevé afin de minimiser les risques de contamination. Étiquetez clairement le récipient avec les informations pertinentes, y compris la date, l'heure, l'emplacement et le numéro d'échantillon.
- **Transport** : Si vous devez envoyer l'échantillon à un laboratoire, suivez les directives de transport fournies par le laboratoire pour assurer la stabilité de l'échantillon pendant le transport.

### III.2.2. Prélèvement pour analyse bactériologique

Pour effectuer un prélèvement d'échantillons en vue d'une analyse bactériologique, il faut effectuer un prélèvement (prendre un échantillon de chaque point), lors du prélèvement, l'écouvillon est frotté ou tamponné sur la zone à échantillonner. Cela permet de collecter des échantillons de bactéries présentes dans cet environnement. Il est important de noter que les écouvillons doivent être stériles afin de prévenir toute contamination croisée lors du prélèvement. Après le prélèvement, l'écouvillon est généralement placé dans un tube pour maintenir la viabilité des bactéries jusqu'à leur analyse ultérieure au laboratoire.



**Figure III.2 :** Etapes de prélèvement pour analyse bactériologique. (a) : Prélèvement d'échantillon (Pt1), (b) Prélèvement d'échantillon (Pt3).

### III.3. Paramètres physico-chimiques mesurés

#### III.3.1. Mesure du pH

Le pH est une mesure de l'acidité ou de la basicité de l'eau, et il joue un rôle crucial dans la qualité de l'eau potable. Un pH idéal pour l'eau potable se situe généralement entre 6,5 et 8,5. Un pH inférieur à 6,5 peut indiquer une acidité excessive de l'eau, ce qui peut être corrosif pour les tuyaux et les équipements de distribution d'eau, entraînant une détérioration et des fuites. D'autre part, un pH supérieur à 8,5 peut donner un goût désagréable à l'eau, ce qui peut affecter sa consommation.

➤ **Mode opératoire**

- D'abord on a rincé le bout de pH mètre avec l'eau distillée.
- Essuyer l'extrémité de l'électrode.
- On trempe l'électrode dans le bêcher contenant l'échantillon.
- Laisser stabiliser un moment.
- Puis noter le pH.
- La mesure du pH a été réalisée à l'aide du pH-mètre présenté sur la (**Figure III.3**) :



Figure III.3 : pH-mètre de paillasse de type pH 7310

### III.3.2. La salinité

La salinité de l'eau mesure la quantité totale de sels dissous dans l'eau. Elle est généralement exprimée en parties par million (ppm) ou en pourcentage (%). La salinité peut avoir un impact sur les organismes aquatiques et sur les processus biologiques qui se produisent dans l'eau. Les limites recommandées pour la salinité dans l'eau potable sont généralement inférieures à 1000 ppm ou 0,1 %, mais peuvent varier en fonction de la source d'eau et de la réglementation locale. Une augmentation de la salinité peut favoriser la corrosion des conduites d'eau et des équipements de distribution.

#### ➤ Expression des résultats

Pour convertir une salinité exprimée en pourcentage en ppm, il suffit de multiplier par 10 000. Par exemple, une salinité de 0,05 % équivaut à 500 ppm.

#### ➤ Mode opératoire

- Préparation de l'échantillon.
- Immergez les électrodes du conductimètre dans l'échantillon, en veillant à ne pas les toucher ou les endommager.

- Attendez que la lecture se stabilise sur l'affichage du conductimètre et noté la valeur mesurée.

La mesure de la salinité a été réalisée à l'aide du conductimètre (**figure III.6**).

### III.3.3. L'oxygène dissous

L'oxygène dissous est essentiel à la vie des organismes aquatiques. Il est généralement mesuré en milligrammes d'oxygène par litre d'eau (mg/L). Une concentration d'oxygène dissous inférieure à 4 mg/L peut être préjudiciable à la vie aquatique.

#### ➤ Mode opératoire

- L'analyse s'effectue sur un prélèvement d'eau dont le volume doit être suffisant pour plonger la sonde de conductivité.
- l'étalonnage étant réalisé et l'appareil ayant acquis son régime de marche.
- Allumer l'instrument en poussant le bouton ON/Off. Lorsque l'afficheur indique zéro, L'instrument est prêt pour la mesure de l'oxygène dissous.



**Figure III.4** : Oxymétrie portable de type Multi 3420

### III.3.4. La température

La température de l'eau est un facteur important pour la croissance et la survie des organismes aquatiques. Elle affecte également la solubilité des gaz dans l'eau et la vitesse des réactions chimiques. La température optimale de l'eau potable est généralement considérée comme étant entre 5°C et 25°C. Une température de l'eau.

➤ **Mode opératoire**

- Mesure de température La mesure de la température a été faite, pour chaque prise d'essai à l'aide d'une sonde de température (thermomètre).

### III.3.5. La turbidité

La turbidité mesure la quantité de matières en suspension dans l'eau. Les matières en suspension peuvent être des particules organiques ou inorganiques. Une eau très turbide peut avoir un goût désagréable et peut contenir des microorganismes pathogènes. La turbidité est généralement mesurée en unités de néphélogétrie (NTU). La valeur maximale autorisée pour une eau potable est de 1 NTU.

➤ **Mode opératoire**

- Après remplissage de la cuvette de mesure propre et bien essuyée au papier hygiénique contenant l'échantillon à analyser, bien homogénéisé.
- La mesure s'effectue rapidement. Il est nécessaire de vérifier l'absence de bulle d'air avant la mesure.
- La mesure est obtenue directement.

La mesure de la turbidité a été réalisée à l'aide d'un turbidimètre présente la (figure III.5).



**Figure III.5 :** Turbidimètre de type LovibondTurbicheck TB 211 IR

### III.3.6. La conductivité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire l'électricité. Des niveaux élevés de conductivité peuvent indiquer une contamination chimique de l'eau. L'eau potable doit avoir une conductivité inférieure à 800 micro Siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

➤ **Mode opératoire**

- Pour déterminer la conductivité il faut rincer l'électrode plusieurs fois d'abord avec l'eau distillée.
- On trempe l'électrode dans le bêcher contenant l'échantillon.
- faire la mesure en prenant soin que l'électrode soit complètement immergée. Le résultat de conductivité est donné directement en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- Après chaque série de mesure, rincer l'électrode à l'eau distillée

Pour la détermination de la conductivité un conductimètre est utilisé (**Figure III.6**).



**Figure III.6** : Conductimètre de type LF197-S

### III.3.7. Matières en suspension (MES)

Les MES sont des particules solides en suspension dans l'eau, telles que la boue, l'argile, les débris organiques et les particules minérales. Les MES peuvent affecter la qualité

de l'eau en réduisant la transparence et en altérant les processus biologiques de l'eau. Les limites recommandées pour les MES dans l'eau potable sont généralement inférieures à 10 ppm, mais peuvent varier en fonction de la source d'eau et de la réglementation locale.

Exemple de calcul : Pour calculer les MES dans une eau, il faut filtrer un échantillon à travers un filtre de 0,45 microns, puis peser la masse de particules retenues sur le filtre. Cette masse peut être exprimée en ppm ou en mg/L.

### ➤ Mode opératoire

- Mesurer le poids de 03 papiers filtre dans la balance (**Figure III.7**).
- Notez le poids de chaque papier filtre.
- Mettre le papier filtre sur l'appareil de filtration.
- Filtrer 100 ml de chaque échantillon d'eau (**Figure.8**).
- Mettre les trois papiers filtres sur un support de séchage (assiette plate).
- Sécher les filtres à 105°C pendant deux heures et les peser à nouveau.



**Figure III.7** : Balance analytique de précision



**Figure III.8 :** Filtration des échantillons à l'aide d'une pompe à vide

➤ **Expression des résultats**

$$p = 1000 (M_2 - M_1) / V$$

$M_2$  : masse du filtre après filtration en milligramme.

$M_1$  : masse du filtre avant filtration en milligramme.

$V$  : volume d'échantillon en millilitre.

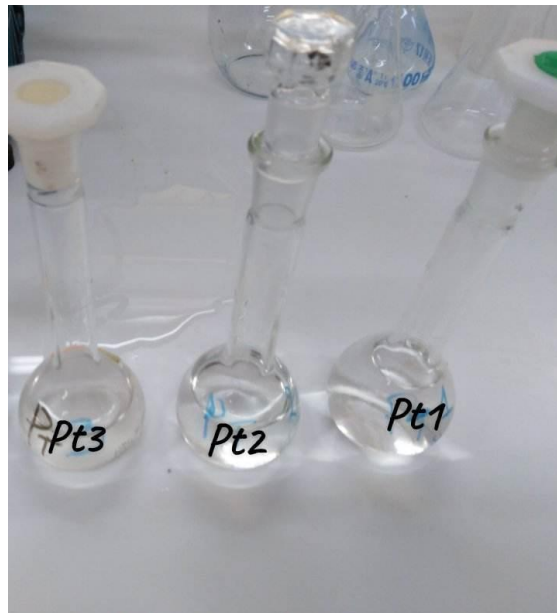
### III.3.8. Détermination de la teneur en fer

Il s'agit d'une mesure de la quantité de fer dissous dans l'eau, qui peut influencer la qualité de l'eau potable et son utilisation dans différents domaines tels que l'agriculture et l'industrie. La concentration de fer dans l'eau peut varier considérablement en fonction de facteurs tels que la géologie locale, la pollution, les sources de fer artificielles et les processus de traitement de l'eau. La présence de fer dans l'eau peut être mesurée en utilisant différents tests, tels que la spectrophotométrie (**Figure III.10**), la colorimétrie, la chromatographie et la fluorescence. La limite maximale de la teneur en fer dans l'eau potable est fixée par les normes de qualité de l'eau potable, qui varient selon les pays et les régions. En général, les normes recommandées de l'organisation mondiale de la santé (OMS) pour la teneur en fer dans l'eau potable sont inférieures à 0,3 mg/L. La présence de fer dans l'eau peut également avoir des effets biologiques, en favorisant la croissance de certaines bactéries et en perturbant l'équilibre écologique de l'eau. Par exemple, la présence de fer peut stimuler la croissance de bactéries sulfato-réductrices (BSR), qui sont connues pour être impliquées dans la biocorrosion. Pour réduire la teneur en fer dans l'eau, différents processus de traitement

peuvent être utilisés, tels que la coagulation, la filtration, l'adsorption et l'oxydation. Les techniques les plus courantes pour éliminer le fer de l'eau sont l'oxydation chimique ou biologique, suivie d'une filtration ou d'une sédimentation.

### ➤ Mode opératoire

- Préparez 40 ml de chaque échantillon.
- Ajoutez 1 ml de chlorhydrate d'hydroxylamine.
- Ajoutez 2 ml de tampon d'acétate pour obtenir un pH (3,5 à 5,5).
- Ajoutez 2 ml de phénanthroline.
- Laissez reposer 15 min.
- Passez les solutions au spectrophotomètre à UV-visibles à 510 nm pour établir la courbe d'étalonnage qui servira à mesurer la concentration de l'échantillon inconnu.



**Figure III.9 :** Les trois solutions de chaque point de prélèvement



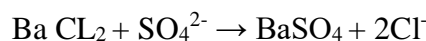
**Figure III.10 :** Spectrophotomètre à UV-visibles de type UV mini 1240 Shimadzu manual

- **Étapes d'établissement de la courbe d'étalonnage**
- **Mode opératoire**
  - Préparation des solutions standard de fer
  - Allumez le spectrophotomètre à UV-visibles (**Figure III.10**)
  - Mesure des solutions standards de fer
  - Notez les valeurs d'absorbance correspondantes
  - Tracez une courbe d'étalonnage en utilisant les valeurs d'absorbance mesurées pour les solutions standards de fer de concentrations connues.
  - Calculez la concentration en fer de chaque échantillon à partir de la courbe d'étalonnage.

### III.3.9. Détermination des ions sulfates

Le dosage des sulfates dans l'eau est une mesure effectuée couramment pour évaluer la qualité de l'eau. Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) sont des composés chimiques contenant du soufre et de l'oxygène. Ils peuvent se retrouver naturellement dans l'eau ou provenir de diverses sources telles que les dépôts atmosphériques, les activités industrielles, les eaux souterraines ou les processus de traitement de l'eau. Le dosage des sulfates dans l'eau peut être réalisé à l'aide de différentes méthodes analytiques, notamment les méthodes gravimétriques, colorimétriques ou spectroscopiques. Ces méthodes impliquent généralement la formation d'un précipité avec un réactif, suivi d'une mesure ou d'une détermination de la concentration à l'aide d'un appareil

de mesure. Les ions de sulfates sont précipités et passés à l'état de baryum en présence de  $BaCl_2$  :



### Mode opératoire

- Préparer les solutions nécessaires (**Figure III.11**).
  1. **Solution mère de sulfates à 1 g/l à partir de sulfate de sodium ( $Na_2SO_4$ ) :**  
Dissoudre 0,1479 g de  $Na_2SO_4$  dans environ 80 ml d'eau distillée et compléter à 100 ml avec de l'eau.
  2. **Solution stabilisante :** Dans une fiole jaugée de 100 ml, mettre 10 ml d'eau distillée, ajouter successivement 6 ml d'acide chlorhydrique pur ( $HCl$ :d = 1.19), 20 ml d'éthanol ( $C_2H_5OH$ ), 15 g de chlorure de sodium ( $NaCl$ ) et 10 ml de glycérol ; compléter à 100 ml avec de l'eau distillée.
  3. **Solution de chlorure de baryum ( $BaCl_2$ ) à 0.01N :** Peser 15 g de chlorure de baryum ( $BaCl_2$ ), ajouter 0,5 ml d'acide chlorhydrique, dans une fiole de 100ml et compléter jusqu'au trait de jauge.
  4. **Solution d'acide chlorhydrique ( $HCl$ ) à 0.01 N :** Diluer 0,82 ml d'acide chlorhydrique concentré à 37 % et compléter à 1000 ml avec de l'eau distillée.
- Préparation de la courbe d'étalonnage du sulfate (**Tableau III.3**).
- Enregistrer la gamme dans le spectrophotomètre à la longueur d'onde 420 nm.
- Tracez la courbe d'étalonnage du sulfate
- Prendre 20 ml de chaque échantillon puis compléter à 100 ml d'eau distillée.
- Ajouter 5 ml de solution stabilisante.
- Agiter pendant 1 min.
- Ajouter 2 ml de solution de chlorure de baryum.
- Agiter pendant 1 min.
- Analyser les échantillons avec le spectrophotomètre à  $\lambda = 420$  nm.

Le résultat est donné directement en mg/l.



Figure III.11 : Préparation des solutions

Tableau III.1 : Préparation de la courbe d'étalonnage du sulfate

N°Fiole	0	1	2	3	4	5	6	7
Solution mère à 1g/l (ml)	0	1	2	3	4	5	6	7
Qsp eau distillée (ml)	100	99	98	97	96	95	94	93
Solution stabilisante (ml)	5	5	5	5	5	5	5	5

Agitation énergétique

Solution $\text{BaCl}_2$ (mL)	2	2	2	2	2	2	2	2
-------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---



Figure III.12 : Gamme des dilutions pour le dosage des sulfates

### III.4. Mise en évidence de la présence des BSR et Thiobacillus

#### III.4.1. Préparation du des milieux de culture pour BSR et TBC

- D'abord, on doit peser les différents produits pour obtenir les quantités nécessaires qui entreront dans la composition du milieu de culture de base pour BSR (Tableau III.2), et la composition du milieu de culture de base pour Thiobacillus (Tableau III.3).

La composition pour 500 ml de milieu liquide est la suivante :

Tableau III.2 : Composition du milieu de culture pour BSR

N°	Composés	Quantité
1	$K_2HPO_4$	0,25 g
2	$KH_2PO_4$	0,25 g
3	$NH_4Cl$	0,25 g
4	$NaCl$	2g
5	$HCl$	0,125ml
6	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0,025g
7	$MgCl \cdot 6H_2O$	0,15g
8	$KCl$	0,05 g
9	$NaSO_4$	1g
10	Acide lactique	2ml
11	L'extrait de levure	0,05 g
12	Vitamine C	En trace
13	Agar-agar	10g

Tableau III.3 : Composition du milieu de culture pour TBC

N°	Composés	Quantité
1	$K_2HPO_4$	1,135g
2	$KH_2PO_4$	0,9g
3	$NH_4SO_4$	0,99g
4	NaCl	0,2g
5	$MnSO_4 \cdot H_2O$	0,01g
6	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0,05 g
7	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0,15g
8	$Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$	2,5g
9	$NaCO_3$	0,5 g
10	Agar-agar	7,5g

- Ensuite, les produits sont introduits dans un Erlenmeyer contenant de l'eau distillée et mis sous agitation magnétique et une température de 65°C jusqu'à ébullition.
- Après avoir compléter le volume du milieu avec de l'eau distillée, le pH est mesuré et ajusté 7,2 a l'aide de la solution KOH 10M et 1M.

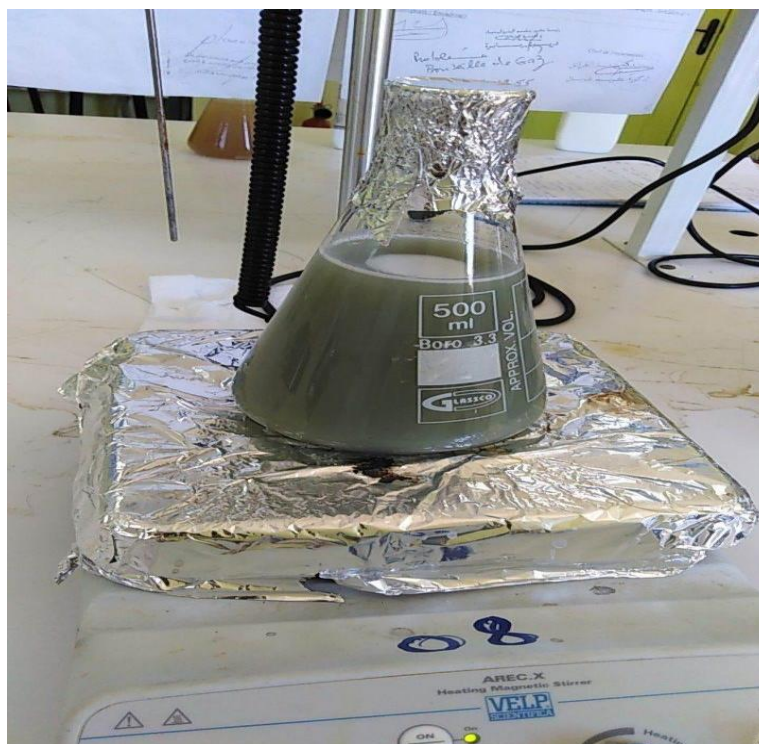
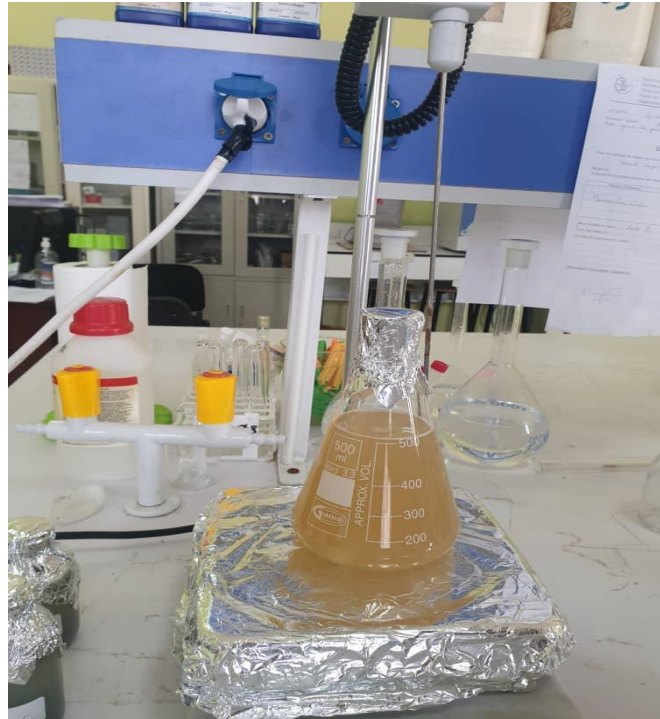
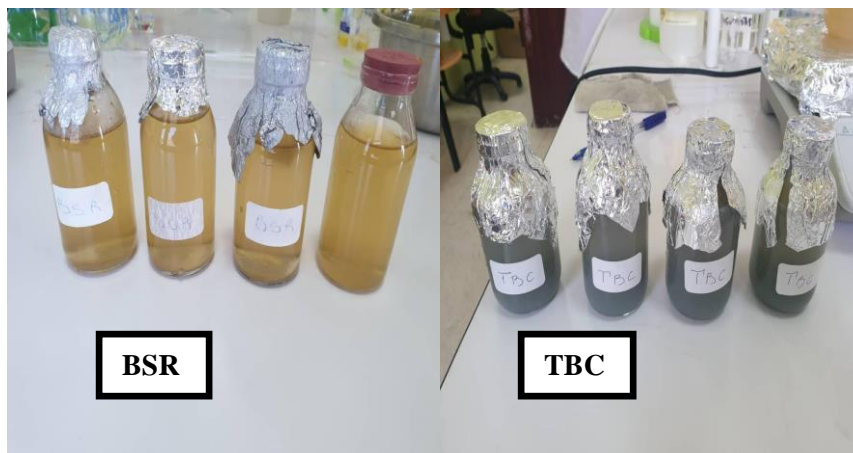


Figure III.13 : Préparation de milieu de culture pour les TBC



**Figure III.14 :** Préparation de milieu de culture pour les BSR

- Le milieu est ensuite réparti dans des flacons de type pénicilline immédiatement fermés à l'aide de bouchons en caoutchouc (**Figure III. 15**).



**Figure III.15:** Milieux de culture préparés de BSR et TBC

- Après les bouteilles des deux milieux de culture sont par la suite stérilisés dans un autoclave pendant une durée de 20min à une température 120°C et une pression de 1 bar.



**Figure III.16 :** Autoclave pour stérilisation des milieux de culture

- Après cela, le milieu de culture est réparti dans les boîtes de Pétri (**Figure III.17**), qui seront bien emballées avec du film alimentaire puis du papier d'aluminium afin de les protéger de toute source de contamination.
- Cette opération est réalisée dans la zone aseptique d'un bec Bunsen à flamme bleue (**Figure III.17**).



**Figure III.17 :** Écoulement du milieu de culture dans les boîtes de Pétri

### III.4.2. Ensemencement des bactéries

L'ensemencement en bactériologie est une étape cruciale pour la culture et l'étude des micro-organismes (Bactéries) en laboratoire.

- Le prélèvement avec l'écouvillon est ensemencé en le frottant délicatement à la surface la gélose stérile, en réalisant des stries serrées (**Figure III.18**).
- Les boîtes de Pétri sont déposées à la fin dans une étuve (**Figure III.19**) pour incubation à 37°C pendant 48h.



**Figure III.18:** Ensemencement des prélèvements des bactéries dans la zone aseptique autour du bec bunsen



**Figure III.19 :** Étuve de type Memmert d'incubation des bactéries à 37°C pendant 48h

### III.5. Conclusion

Il est essentiel de mesurer régulièrement les paramètres physico-chimiques et de réaliser des analyses bactériologiques pour assurer la qualité de l'eau potable dans les conduites. Ces mesures permettent de maintenir des normes strictes et de garantir la sécurité sanitaire des consommateurs. En surveillant les paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH, la turbidité, la salinité, l'oxygène dissous, la conductivité, le dosage de fer, le dosage du sulfate, les MES, on peut détecter tout écart par rapport aux normes établies, ce qui permet d'identifier et de résoudre les problèmes potentiels. De plus, les analyses bactériologiques sont cruciales pour détecter la présence de bactéries pathogènes, signe d'une contamination potentiellement dangereuse. En combinant ces mesures, on assure la qualité et la salubrité de l'eau potable, protégeant ainsi la santé des individus et préservant l'environnement.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents résultats obtenus des analyses physico-chimique des eaux puis les résultats de l'étude bactériologique et le dénombrement des bactéries BSR et Thiobacillus, pour mettre en évidence l'installation d'une corrosion microbienne dans les conduites d'eaux potables des trois points de prélèvement

### IV.2. Les analyses physico-chimiques de l'eau

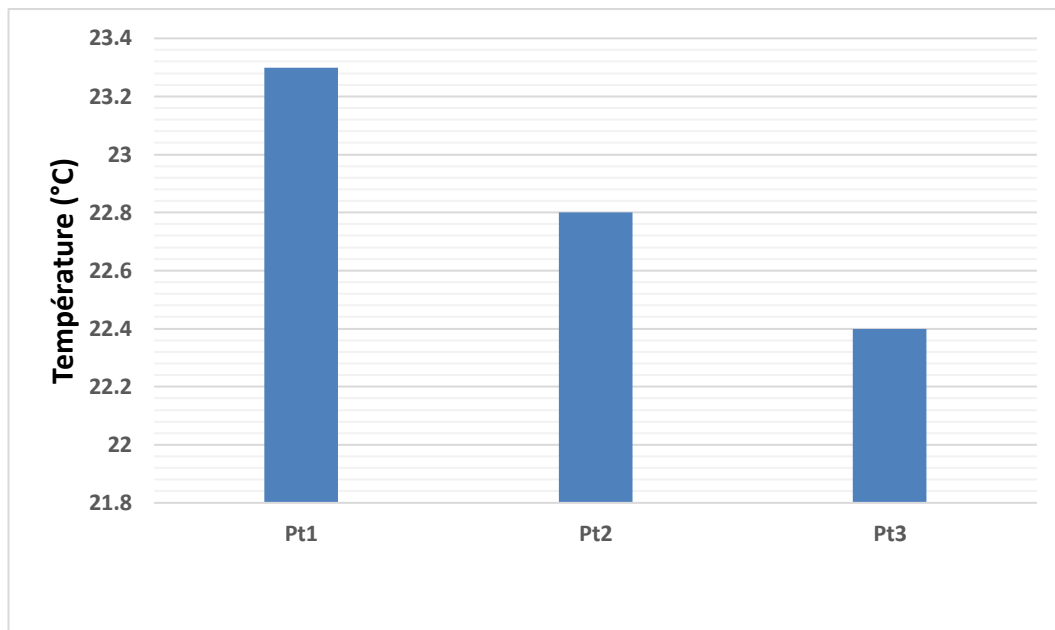
Les résultats de l'analyse physicochimique des échantillons d'eau sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1** : Résultats de l'analyse physicochimique de l'eau

Paramètres physico-chimique	Pt1	Pt2	Pt3
Température (°C)	23,3	22,8	22,4
pH	7,8	7,8	8,8
Conductivité (µS/cm)	1341	1334	1351
Turbidité (NTU)	1,04	1,25	29,8
Salinité (%)	0,5	0,5	0,5
Oxygène dissous (mg/l)	8,43	8,54	8,74
MES (mg/l)	<1	<1	18
Fer (mg/l)	<1	<1	0,14

#### IV.2.1. Température

La température de l'eau peut influencer la croissance des bactéries sulfato-réductrices (BSR) et des Thiobacillus. Ces bactéries peuvent se développer et se multiplier à des températures qui varient entre 22,4°C et 23,3°C (**Tableau IV.1**), (**Figure IV.1**). Des variations de température en dehors de cette plage peuvent avoir un impact négatif sur leur croissance et leur activité métabolique (Galińska et al. 2016).

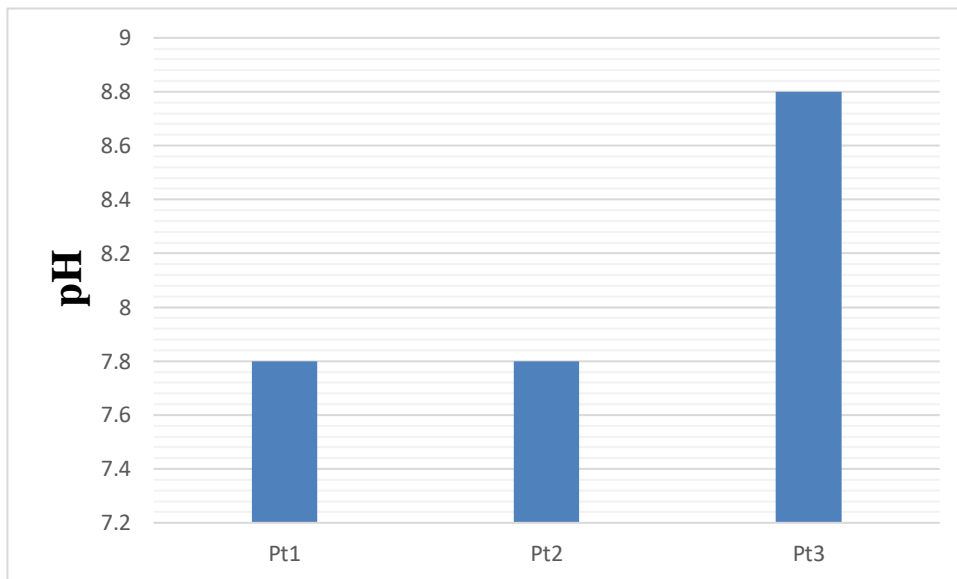


**Figure IV.1 :** Température de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement

- Les BSR, qui sont des bactéries anaérobies, sont généralement connues pour leur capacité à réduire les sulfates en sulfures. Elles ont une plage de température de croissance relativement large, allant généralement de 20°C à 45°C. Cependant, certaines souches spécifiques de BSR peuvent tolérer des températures plus élevées, allant jusqu'à 60°C, tandis que d'autres peuvent être plus sensibles aux températures élevées et préférer des conditions plus modérées (Lovley, 2013).
- Les bactéries du genre *Thiobacillus* sont des bactéries chimioautotrophes qui utilisent le soufre comme source d'énergie. Elles sont généralement considérées comme des bactéries mésophiles, ce qui signifie qu'elles préfèrent des températures modérées. La plage de température de croissance optimale pour les *Thiobacillus* se situe généralement entre 20°C et 35°C. Cependant, certaines souches peuvent tolérer des températures légèrement plus élevées, jusqu'à 40°C (Castelle et Banfield., 2018).

### IV.2.2. pH

L'influence de la composition chimique de l'eau sur la croissance des bactéries sulfato-réductrices (BSR) et des Thiobacillus dépend de plusieurs facteurs, dont le pH. Dans la plage de pH entre 7,8 et 8,8, ces microorganismes peuvent généralement se développer et se multiplier. Les résultats sont représentés dans le tableau (**Tableau IV.1**), et le figure (**Figure IV.3**) (Rajala et al., 2015).

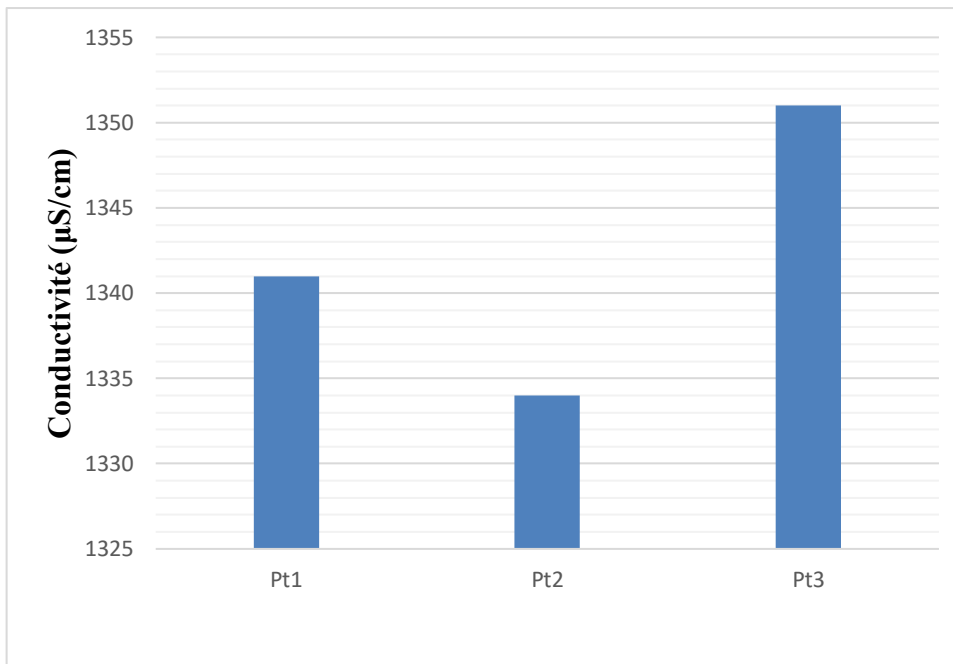


**Figure IV.2.** pH de l'eau mesuré pour les trois points de prélèvement

Un pH légèrement basique à légèrement acide est souvent préféré par les BSR, tandis qu'un pH légèrement plus élevé est plus propice à la croissance des Thiobacillus. Cela est dû à leurs adaptations métaboliques spécifiques et à leurs exigences environnementales distinctes (Ullah et al. 2015).

### IV.2.3. Conductivité

La conductivité de l'eau est une mesure de sa capacité à conduire le courant électrique et peut être influencée par la présence de sels dissous et d'autres substances ioniques. Dans le cas de la croissance des bactéries BSR et Thiobacillus, la conductivité de l'eau peut jouer un rôle dans leur développement. Une plage de conductivité de l'eau entre 1334 et 1351  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a été mentionnée.



**Figure IV.3.** Conductivité de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement

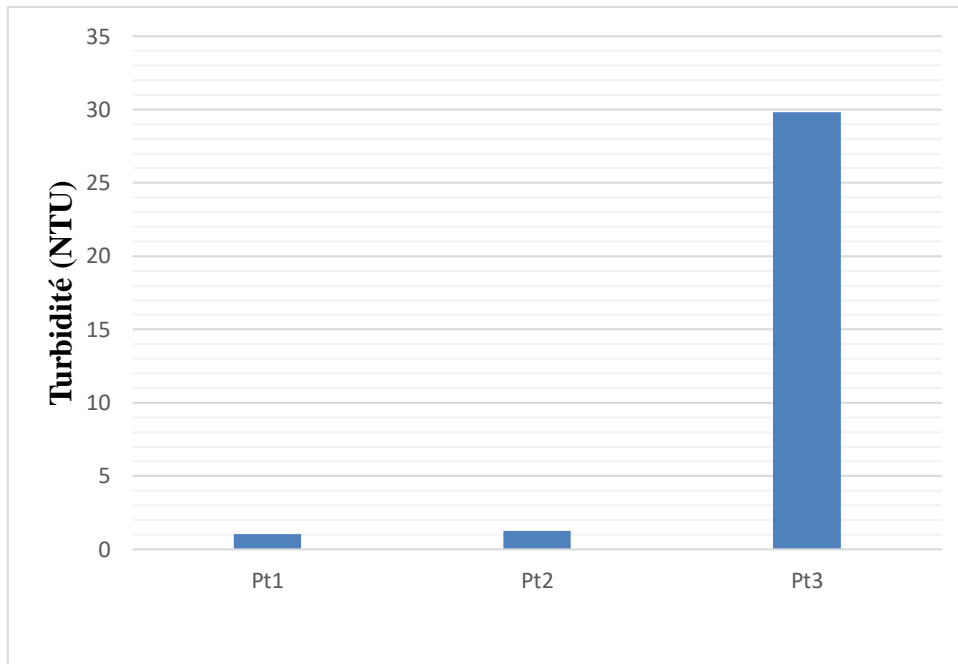
Ces valeurs indiquent que l'eau présente une conductivité relativement élevée, ce qui suggère une concentration plus élevée de sels dissous et d'ions dans l'eau. Les bactéries BSR et *Thiobacillus* ont la capacité de tolérer des niveaux élevés de conductivité et peuvent se développer dans des environnements contenant ces concentrations de sels dissous (Hassaniet al., 2018). Les résultats sont représentés dans le tableau (**Tableau IV.1**), et la figure (**Figure IV.4**).

- Les BSR sont généralement considérées comme des bactéries halotolérantes, ce qui signifie qu'elles peuvent tolérer des concentrations relativement élevées de sels dans l'eau. Une conductivité élevée de l'eau peut donc favoriser leur croissance dans certaines conditions. Cependant, il convient de noter que les BSR peuvent également être présentes dans des environnements à faible conductivité, tant qu'il existe des conditions favorables à leur développement, comme la disponibilité de sulfates (Lovley, 2013).
- Les bactéries du genre *Thiobacillus* sont moins spécifiques en termes de tolérance à la conductivité. Elles sont généralement moins sensibles à la conductivité de l'eau par rapport aux sels spécifiques présents dans l'eau, tels que les sulfates. Leur croissance

dépend davantage de la disponibilité des sources d'énergie, comme le soufre, que de la conductivité de l'eau elle-même (Garrity & Brenner., 2005).

### IV.2.4. Turbidité

Dans les conditions passées, ces variations peuvent être considérées comme modérées pour les bactéries BSR et Thiobacillus. Ces niveaux de turbidité ne sont ni extrêmement élevés ni extrêmement bas. Les résultats sont représentés dans le tableau (**Tableau IV.1**) et le Figure (**Figure IV.5**).



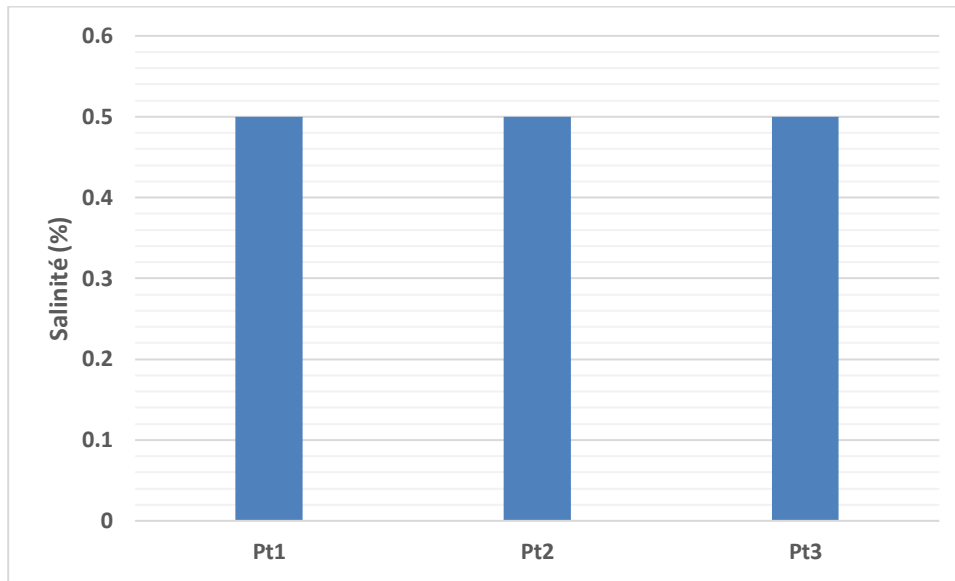
**Figure IV.4 :** Turbidité de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement

Les bactéries BSR et Thiobacillus peuvent tolérer une gamme de turbidités dans leur environnement, et les niveaux spécifiques de tolérance peuvent varier d'une espèce à l'autre. Les particules en suspension dans l'eau peuvent fournir des surfaces de fixation pour ces bactéries, favorisant ainsi leur croissance. Cependant, des niveaux de turbidité très élevés peuvent réduire la disponibilité de la lumière et des nutriments, ce qui peut limiter la croissance et l'activité des bactéries. De même, des niveaux de turbidité très faibles peuvent également avoir un impact sur la croissance des bactéries en réduisant la disponibilité des surfaces de fixation et des nutriments associés (Lens et Visser., 1998).

### IV.2.5. Salinité

La salinité de l'eau, exprimée en termes de conductivité ou de concentration en sels, peut avoir un impact sur la croissance des bactéries BSR (Bacteria Sulfate-Reducing) et

Thiobacillus. Une salinité de 0,5%, généralement mesurée en pourcentage de la salinité de l'eau de mer, est considérée comme relativement faible.

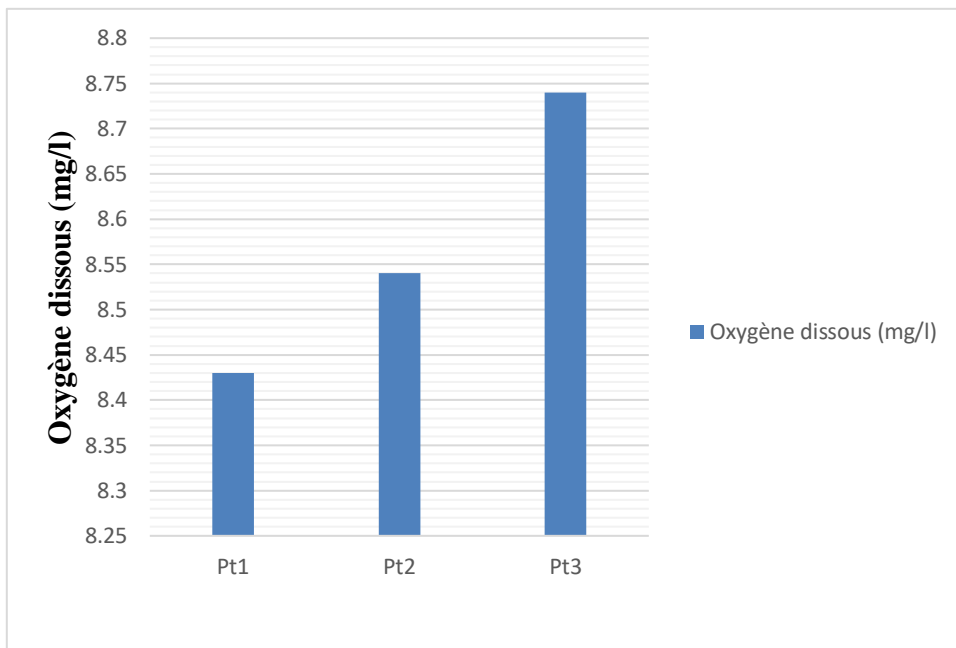


**Figure IV.5 :** Salinité de l'eau mesurée pour les trois points de prélèvement

Pour les bactéries BSR et Thiobacillus, qui sont capables de tolérer une gamme de conditions environnementales, une salinité de 0,5 ppm peut être considérée comme basse. Ces bactéries sont généralement plus adaptées à des environnements plus riches en sels, tels que l'eau de mer ou les environnements saumâtres. Les résultats sont représentés dans le tableau (Tableau IV.1) et le figure (Figure IV.6) (Postgate., 1984).

### IV.2.6. Oxygène dissous

La présence d'oxygène dissous dans l'eau peut avoir une influence significative sur la croissance des bactéries BSR et Thiobacillus.



**Figure IV.6** Teneur de l’oxygène dissous l’eau pour les trois points

Les bactéries BSR sont généralement anaérobies, ce qui signifie qu'elles préfèrent des environnements pauvres en oxygène ou dépourvus d'oxygène.

Les Thiobacillus, quant à eux, peuvent être adaptés à des conditions aérobies (présence d'oxygène) ainsi qu'à des conditions anaérobies (Chapelle et O'Neill., 2018).

Dans le cas d'une concentration d'oxygène dissous variant entre 8,43 et 8,74 mg/, il est important de noter que ces valeurs ne sont pas directement mesurées à l'intérieur de la conduite pour déterminer la présence ou l'absence d'oxygène dans l'eau. Cependant, il est possible d'inférer que l'eau dans la conduite est aérée en raison de sa mise en contact avec l'air lors de l'ouverture du robinet. Ce contact avec l'air entraîne la dissolution de l'oxygène atmosphérique dans l'eau, ce qui explique la présence d'une concentration d'oxygène dissous. Il convient de souligner que l'oxygène dissous dans l'eau peut avoir un impact sur divers processus chimiques et biologiques, y compris la croissance des microorganismes. Dans le cas des conduites d'eau, la présence d'oxygène dissous peut potentiellement influencer la corrosion des matériaux, car certaines bactéries peuvent utiliser l'oxygène pour des réactions chimiques qui peuvent accélérer le processus de corrosion. Les résultats sont représentés dans le tableau (**Tableau IV.1**) et le Figure (**Figure IV.7**) (Rodriguez-Caballero et al. 2020).

### IV.2.7. Matières en suspension (MES)

La présence de matières en suspension dans l'eau peut influencer la croissance des bactéries BSR et Thiobacillus de différentes manières. Les résultats sont représentés dans le tableau (Tableau IV.1).

- ✓ **Matière en suspension inférieure à 1 mg/L** : Une concentration de matière en suspension inférieure à 1 mg/L est considérée comme basse. Dans de telles conditions, il est possible que les bactéries BSR et Thiobacillus rencontrent des difficultés pour se fixer et se développer sur les particules en suspension. Cela peut limiter leur croissance et leur activité métabolique.
- ✓ **Matière en suspension à 18 mg/L** : Une concentration de matière en suspension de 18 mg/L est considérée comme modérée à élevée. Dans de telles conditions, les particules en suspension peuvent offrir des surfaces de fixation et des sites de croissance pour les bactéries BSR et Thiobacillus. Cela peut favoriser leur colonisation et leur multiplication, ce qui peut potentiellement conduire à la formation de biofilms (Hennessey et al. 2015).

### IV.2.8. Détermination de la teneur en fer

Les bactéries BSR (bactéries sulfato-réductrices) et Thiobacillus sont connues pour leur capacité à tolérer des niveaux variables de fer dans leur environnement. Cependant, des concentrations plus élevées de fer sont généralement bénéfiques pour leur croissance et leur activité métabolique. Dans le cas présent, les concentrations de fer mesurées aux points Pt1 et Pt2, inférieures à 1 mg/l, ainsi que la concentration de 0,14 mg/l de fer au point Pt3, sont considérées comme basses pour ces bactéries. Cette faible teneur en fer peut potentiellement limiter la croissance et l'activité métabolique des bactéries BSR et Thiobacillus dans cet environnement. Les bactéries BSR et Thiobacillus peuvent tolérer des niveaux variables de fer dans leur environnement, mais des concentrations plus élevées sont généralement bénéfiques pour leur croissance. Par conséquent, dans ce cas, les concentrations de fer sont considérées comme basses pour ces bactéries (Carvalho et al, 2015).

Tableau VI.2 : Tableau de la gamme d'étalonnage du fer

[C]	Abs
5	0.7
4	0.56
3	0.43
2	0.28
1.5	0.18
1	0.11
0.5	0.05

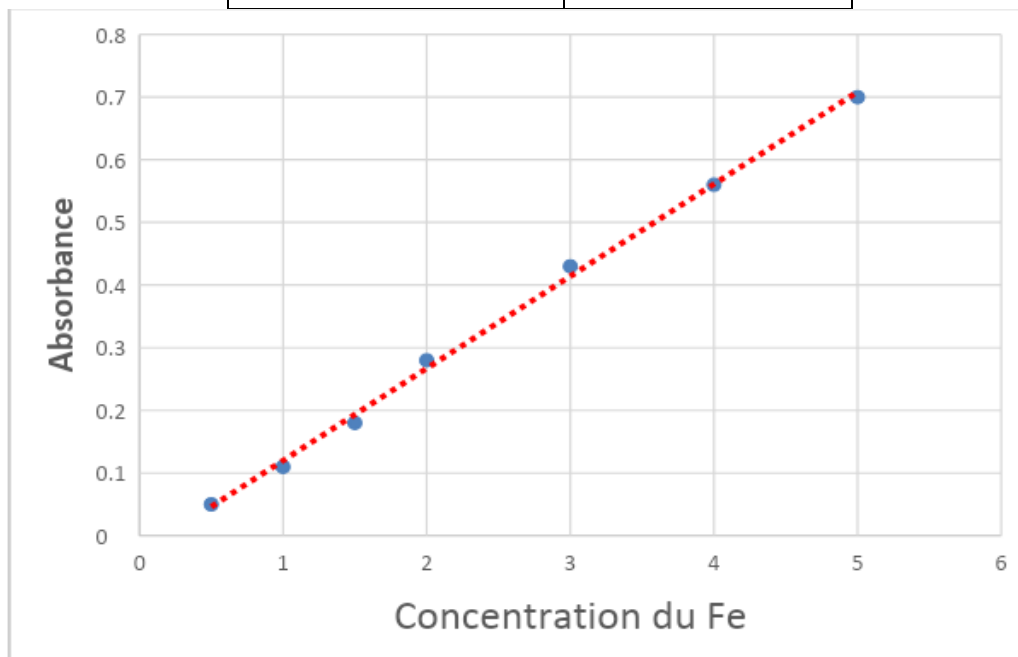


Figure IV.7 : Courbe d'étalonnage de fer

#### IV.2.9. Détermination des ions du sulfate

Les résultats de dosage de sulfate dans les échantillons P1, P2 et P3 sont respectivement de 0,114 mg/L, 0,123 mg/L et 0,369 mg/L. Ces valeurs indiquent la concentration de sulfate présente dans l'eau et sont utilisées comme indicateur de la présence de bactéries sulfato-réductrices (BSR) et de Thiobacillus, qui sont impliquées dans la corrosion microbienne. Une concentration plus élevée de sulfate dans l'échantillon P3 par rapport aux échantillons P1 et P2 suggère une plus grande activité des bactéries sulfato-réductrices et de Thiobacillus dans cet échantillon. Cette concentration plus élevée de sulfate peut être le résultat de la production de sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) par ces bactéries, qui réagit ensuite avec l'oxygène dissous pour former du sulfate.

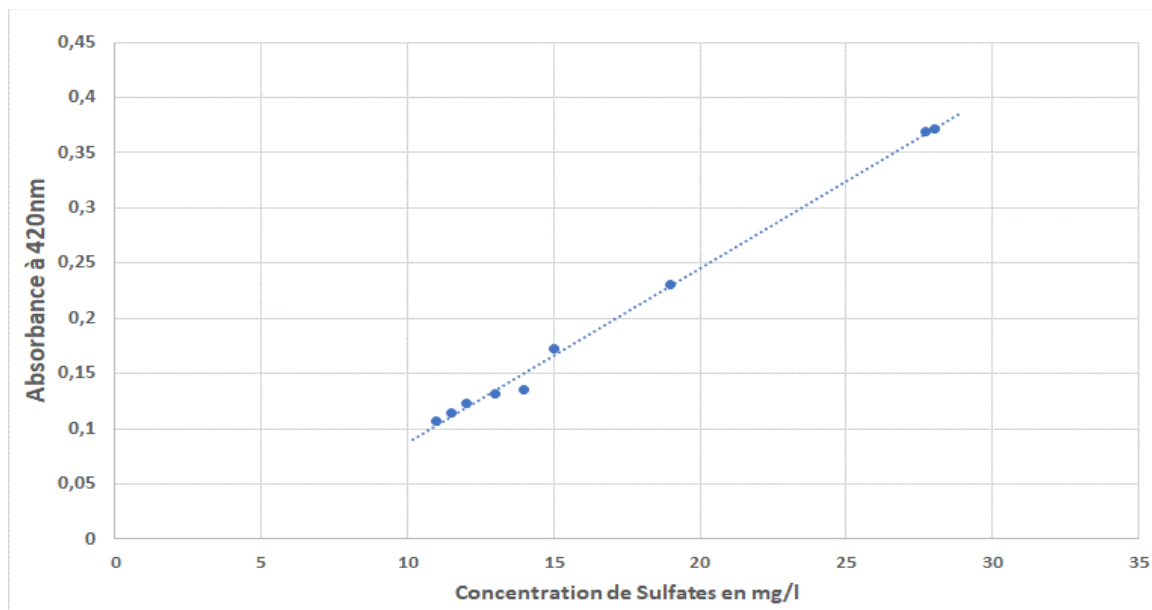
Il est important de noter que la présence de sulfate dans l'eau peut contribuer à la corrosion des matériaux, car il peut réagir avec des métaux pour former des produits de corrosion, tels que des sulfures métalliques. Par conséquent, la concentration de sulfate est un paramètre clé pour évaluer le risque de corrosion microbienne dans les systèmes d'eau.

**Tableau IV.3.** Tableau de la gamme d'étalonnage du sulfate

Fliale	1	2	3	4	5	6
<b>C</b> (mg/)	11	13	14	15	19	28
<b>A</b> à <b>420n</b> <b>m</b>	0,107	0,132	0,135	0,172	0,231	0,371

**Tableau IV.4.** Résultats des ions du sulfate

	<b>Pt2</b>	<b>Pt3</b>	<b>Pt1</b>
<b>C</b> (mg/l)	11,5	12	27,7
<b>A</b>	0,114	0,123	0,369



**Figure IV.8 :** Courbe d'étalonnage de dosage de sulfate

### IV.3. Les analyses bactériologiques

#### IV.3.1. Résultats d'isolement des bactéries dans des milieux spécifiques

Le résultat de l'incubation à 105 °C des boîtes de Pétri contenant des milieux de culture sélectionnés pour le développement des bactéries BSR et Thiobacillus pendant 48 heures varie selon les caractéristiques de ces bactéries et les conditions expérimentales. La BSR, une bactérie sulfato-réductrice, peut généralement tolérer des températures plus élevées. Cependant, Thiobacillus, une bactérie acidophile, peut-être plus sensible aux températures élevées.



Figure IV.9 : Avant incubation

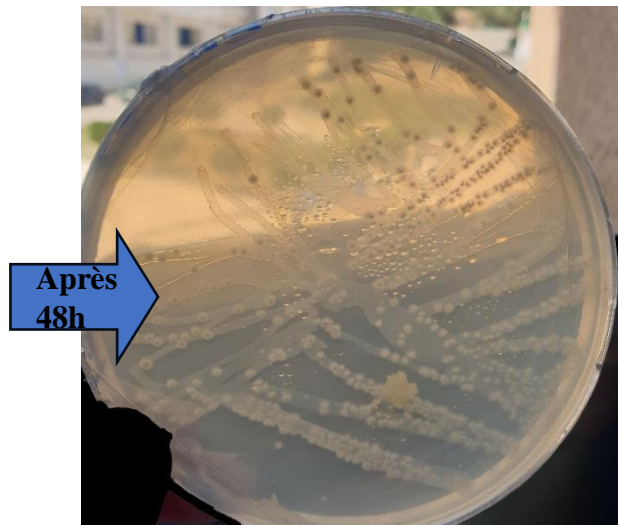


Figure IV.10 : Après incubation Pt3

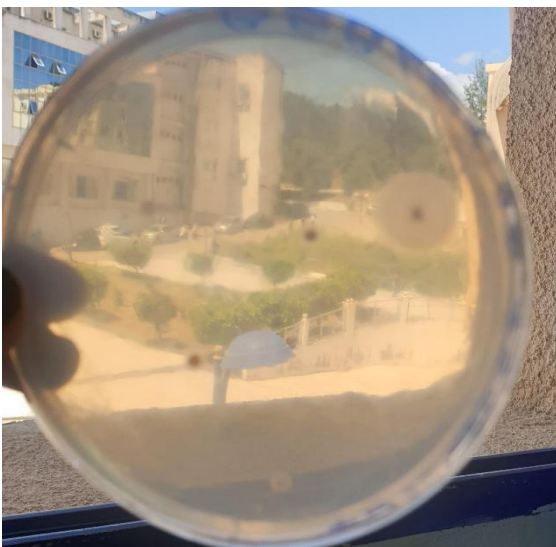


Figure IV.11 : Après incubation Pt2

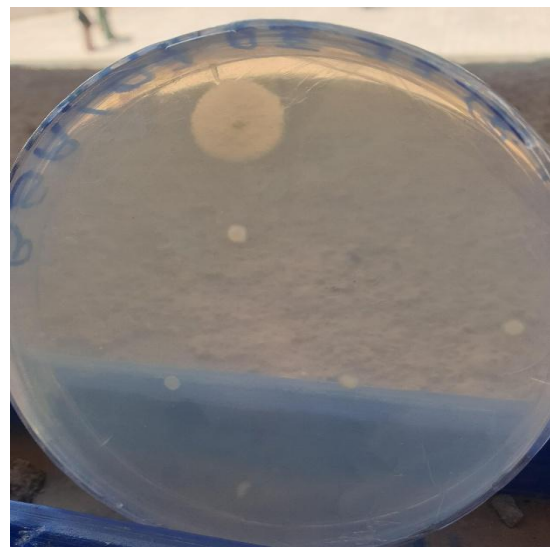


Figure IV.12 : Après incubation Pt1

L'apparition des colonies noires de taille moyenne a été observée sur la majorité des boîtes de Pétri, de genre de BSR est un marqueur de la formation d'H<sub>2</sub>S (Marchal et al. 1973). Aucune colonie des bactéries de genre thiobacillus n'a été observée.

Concernant le milieu spécifique aux bactéries sulfato-réductrices (BSR), on observe un noircissement du milieu après 48 heures pour les BSR prélevées du troisième point d'échantillon (Pt3), tel que représenté dans la Figure (**Figure IV.8**). Ce noircissement indique la production de sulfures par les microflores sulfurogènes présentes dans cet échantillon, ce qui suggère une adaptation efficace de ces bactéries au milieu. En revanche, les échantillons d'eau prélevés aux points Pt1 et Pt2 présentent un noircissement moins prononcé en comparaison avec le troisième échantillon (Pt3). Cela suggère une présence moins importante de microflores sulfurogènes dans ces deux échantillons ou une activité sulfurogène moins développée.

Ces observations soulignent l'importance de la concentration de sulfures produits par les bactéries sulfato-réductrices, et mettent en évidence une différence significative entre les échantillons prélevés à différents points. Il est possible que les conditions environnementales, telles que la présence de nutriments spécifiques ou d'autres composants chimiques, influencent la capacité des bactéries sulfato-réductrices à produire des sulfures. Ces résultats suggèrent que le troisième échantillon (Pt3) contient une population plus active de bactéries sulfato-réductrices, capables de produire des sulfures à une concentration plus élevée, ce qui peut avoir des implications sur les processus biogéochimiques et la qualité de l'eau dans cet environnement spécifique.

### IV.3.2. Résultats du dénombrement de BSR de l'eau en milieu Solide

Les résultats de dénombrement des BSR dans les boîtes de pétri après incubation sont enregistrés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.5.** Dénombrement des BSR

Les points	Pt1	Pt2	Pt3
Nombre de bactéries comptées (bac/ml)	400 00	500 0	445 ×10 <sup>2</sup>

**Calcul : exemple** sur le point 3

$$n(1) = \frac{N1}{F(D) \cdot V}$$

$$n(1) = \frac{445}{1 \times 10^{-2}} = 445 \times 10^2 \text{ bac/ml}$$

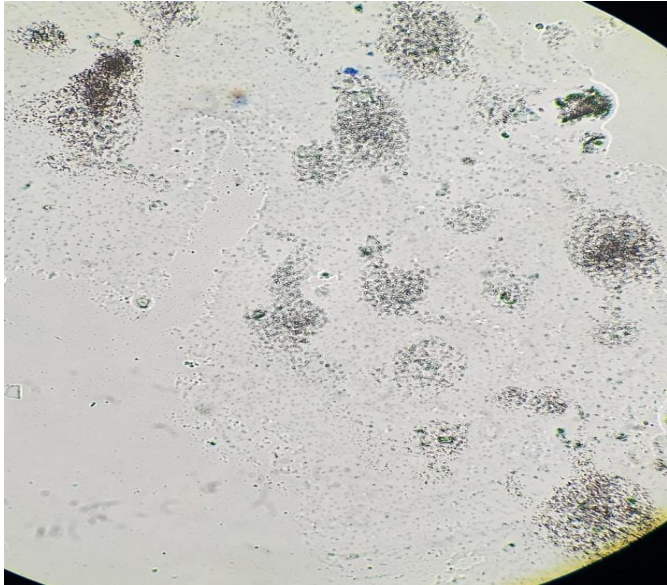
- **n1** : Nombre de boîte comptée dans la première dilution.
- **N** : la totalité des colonies comptées.
- **FD** : Facteur de dilution.
- **V** : Le volume de solution déposée.

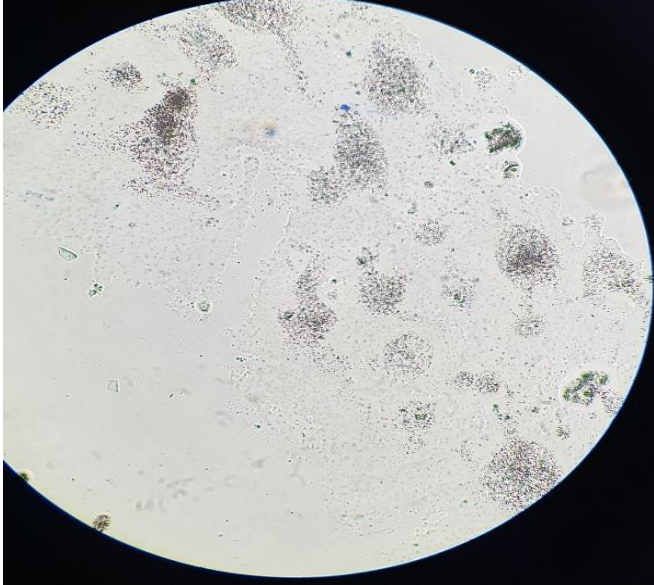

### IV.3.3. Observations microscopiques

L'observation microscopique des bactéries BSR permet de visualiser leur morphologie et leur structure cellulaire. Les caractéristiques observées peuvent inclure la forme des cellules, la présence de flagelles ou de pili pour la mobilité, la coloration spécifique des composants cellulaires, ainsi que d'autres caractéristiques pertinentes les images enregistrées par microscopie dans le tableau (**Tableau IV.2**)(Madiganetal. 2018).

Le tableau IV.3 présente les observations microscopiques des bactéries sulfato-réductrices (BSR). Ces observations fournissent des informations visuelles sur la morphologie et la structure cellulaire des BSR. Les caractéristiques observées comprennent la forme des cellules, la présence de structures de mobilité. Ces résultats visuels sont essentiels pour la caractérisation et la compréhension des BSR.

Tableau IV.6. Aspect microscopiques des BSR

Les points	La forme de bactérie	Observation microscopique
<p>Pt 1</p>	<p>Bacillus</p>	

<p>Pt 2</p>	<p>Bacillus</p>	
<p>Pt 3</p>	<p>Bacillus</p>	

IV.4. Conclusion

Les résultats de nos expériences ont révélé que la bactérie BSR, connue pour sa capacité à réduire les sulfates présents dans l'eau, joue un rôle prépondérant dans la corrosion des conduites d'eau potable. Contrairement à la bactérie Thiobacillus, la bactérie BSR a montré une résistance élevée à diverses conditions environnementales telles que les variations de pH, la présence d'oxygène et les fluctuations de température. Cette résistance lui confère un avantage adaptatif et lui permet de proliférer dans les conduites d'eau, favorisant ainsi le processus de corrosion. Ces résultats soulignent l'importance de la surveillance et de la gestion spécifique de la bactérie BSR pour prévenir les problèmes de corrosion dans les systèmes de distribution d'eau potable.

**Conclusion**

**générale**

### Conclusion générale

Pour conclure, la biocorrosion ou Corrosion induite par les micro-organismes est reconnue comme une catégorie importante de corrosion dans de nombreux processus industriels, etc.

La biocorrosion fait l'objet depuis 50 ans de recherches approfondies et attire toujours de nombreuses recherches scientifiques dues à son impact dans le monde industriel du point de vue économique et environnemental (Rice et al, 2015). Ce présent travail de mémoire de fin d'études porte sur l'étude du phénomène de biocorrosion dans les canalisations et conduites d'eau potable, et est réalisé à travers une approche scientifique. Dans notre étude, nous avons utilisé une approche expérimentale pour étudier cette corrosion microbienne. Nous avons collecté des échantillons d'eau de différentes sources et les avons exposés à des conditions de laboratoire contrôlées. Nous avons créé des milieux de culture spécifiques pour favoriser la croissance des bactéries responsables de la corrosion, notamment les BSR et les Thiobacillus (Duan et al. 2008). Nous avons ensuite réalisé des tests de corrosion en mesurant les changements physico-chimiques des échantillons d'eau et en évaluant l'activité corrosive des bactéries. Cette approche nous a permis de mieux comprendre les facteurs qui contribuent à la corrosion microbienne et d'identifier les conditions favorables à son développement dans les conduits d'eau potable (Beech et Sunner, 2004).

Après avoir réalisé les tests de corrosion et collecté les données, nous avons analysé les résultats obtenus. Nous avons examiné les effets de différents paramètres, tels que la composition chimique de l'eau, la présence de bactéries corrosives et les conditions environnementales, sur le processus de corrosion microbienne. Nous avons comparé les taux de corrosion observés dans différentes conditions et avons identifié les facteurs les plus influents. Nous avons également étudié les mécanismes sous-jacents à la corrosion microbienne en analysant les interactions entre les bactéries et les matériaux des conduits d'eau potable. Enfin, nous avons tiré des conclusions sur l'impact de la corrosion microbienne sur la durabilité et la sécurité des infrastructures de distribution d'eau potable. Ces résultats nous ont permis de proposer des recommandations et des stratégies de prévention pour minimiser les effets de la corrosion microbienne et maintenir la qualité de l'eau potable (Zuo R., 2007).

Nos différentes perspectives à l'issue de cette étude peuvent être énumérées ainsi :

1. Évaluation de l'efficacité des méthodes de contrôle de la corrosion basées sur l'utilisation de bactériophages ou d'enzymes spécifiques pour cibler et éliminer les bactéries responsables de la corrosion.
2. Analyse de l'impact économique de la corrosion microbienne des conduits d'eau potable, y compris les coûts de réparation, de remplacement des infrastructures endommagées et les pertes en termes de qualité de l'eau et de satisfaction des consommateurs.
3. Étude de l'impact de la corrosion microbienne sur la qualité de l'eau potable, en mettant l'accent sur la présence de contaminants métalliques ou d'autres produits de corrosion pouvant affecter la santé publique.

# **Références bibliographiques**

### [B]

- Beech, I. B., & Sunner, J. (2014). Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. *Current opinion in biotechnology*.
- Beech, I. B., & Sunner, J. (Eds.). (2004). *Microbial biofilms: Current research and applications*. Caister Academic Press.
- *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*" (Manuel de bactériologie systématique de Bergey)
- Ortiz C., Guiamet P.S and Videla H.A.,(2021). «Int- Biodeter». *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*" (Recueil de méthodes pour l'examen microbiologique des aliments) : Publié par l'American Public Health Association (APHA).

### [C]

- Cornelissen, R., & van der Meer, W. (2013). Iron-oxidizing and iron-reducing bacteria and their role in environmental processes. *Critical reviews in microbiology*.
- Cruz-Mendoza, V., Ramos-Sanchez, L. B., Gonzalez, I., & Cervantes, C. (2017): Fungal role in corrosion of materials. In *Fungi as Biocatalysts in Biotechnology*.
- Castelle CJ, Banfield JF. Major new microbial groups expand diversity and alter our understanding of the tree of life. *Cell*. 2018.
- Chapelle, F. H., & O'Neill, K. (2018). *Groundwater Microbiology and Geochemistry*. CRC Press.
- Carvalho, D. P., da Silva, F. M., da Silva, A. M., & Vieira, R. P. (2015). Influence of iron on the growth and biofilm formation of *Sulfitobacter* sp. Isolated from marine environment. *Marine Pollution Bulletin*.

### [D]

- Dinh HT, Kuever J, Mußmann M.(2018): The sulfate reducing microbial communities in marine sediments. *Front Microbiol.*
- Dinh, H. T., Kuever, J., Mußmann, M., Hassel, A. W., Stratmann, M., & Widdel, F. (2004). Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. *Nature.*
- Donlan, R. M., & Costerton, J. W. (2002): Biofilms Survival mechanisms of clinically relevant microorganisms.
- Douterelo, I., et al. (2019). Understanding the factors controlling the formation and growth of biofilms in drinking water distribution systems.
- Duverneuil P., Dupuy N., Refait P., Chaussadent A., Sablayrolles C., Gaudet J.-P., 2021, A review of microbial corrosion studies: The evolution of research methods and priorities, *International Biodeterioration & Biodegradation.*

### [E]

- Ehrlich, G. D., Stoodley, P., & Kathju, S. (2012). Biocide resistance and the use of biocides in biofilms. In *Biofilms in Infection Prevention and Control.*
- Enning, D., & Garrelfs, J. (2014). Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: new views of an old problem. *Applied and environmental microbiology.*
- Enning, D., Venzlaff, H., Garrelfs, J., & Dinh, H. T. (2012). Microbial corrosion of iron in the presence of sulfate- reducing and aerobic bacteria. *Frontiers in microbiology.*

### [F]

- Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*.
- Flemming, H. C., et al. (2016). Microbial biofilm control: recent advances using emerging strategies. *Current Opinion in Biotechnology*.
- Fontana, M.G., (1986). *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill .

### [G]

- Giaouris, E., & Chorianopoulos, N. (2018). Formation, architecture, and functionality of microbial biofilms in the food industry. *Frontiers in Microbiology*.
- Gomes, I. B., Simões, M., Simões, L. C., & Cleto, M. (2019): The contribution of ATP measurements to assess the efficacy of antimicrobial compounds in the control of drinking water biofilms. *Frontiers in Microbiology*.
- Gu, T., & Ford, T. E. (2014). Microbiologically influenced corrosion and its mitigation strategies.
- Guiry, MD, & Guiry, GM (2021). *AlgaeBase*. Publication électronique mondiale, National University of Ireland, Galway. Disponible sur : <https://www.algaebase.org>.
- Galińska A, Grządziel J, Górniak D. Utilization of various carbon sources for hydrogen production by *Thiobacillus versutus*. *World J Microbiol Biotechnol*. 2016.
- Garrity GM, Brenner DJ, Krieg NR, Staley JT (eds). *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Volume 2 : The Proteobacteria, Part C : The Alpha-, Beta-, Delta-, and Epsilonproteobacteria*. Springer ; 2005.

### [H]

- Hall-Stoodley, L., et al. (2004). Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases. *Nature Reviews Microbiology*.
- Hall-Stoodley, L., et al. (2006). Towards diagnostic guidelines for biofilm-associated infections. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*.
- Hall-Stoodley, L., et al. (2020). Biofilm formation as a developmental process. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*.
- Hassani, A. H., Hacene, H., & Soufiane, M. (2018). Effect of physicochemical parameters on the growth of *Thiobacillus* spp. And evaluation of biotechnological performances for biodesulfurization process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Hennessey, S.M., Begg, J.D., May, H.D., Anderson, G.K., Krumholz, L.R. (2015). Impact of sediment grain size and biofilm formation on the biogeochemical behavior of sulfate-reducing bacteria in freshwater sediments. *Environmental Science & Technology*.

### [J]

- Jang, H. J., et al. (2018). Biofilm dynamics in drinking water distribution systems: an interdisciplinary approach.

### [K]

- Kelly, D. P. & Wood, A. P. (2000). Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*.
- Klausen, M., et al. (2003). Biofilm formation by *Pseudomonas aeruginosa* wild type, flagella, and type IV pili mutants. *Molecular Microbiology*.

• Kobrin G.,2004. «A practical manual on microbiologically influenced corrosion»,Ed.(NACE).

• Kuhn, T. S. (1962). The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press.

### [L]

• Lee, C. C., & Characklis, W. G. (1994). Microbial corrosion: Processes and prevention. John Wiley & Sons.

• Lee, J. S., & McBeth, J. M. (2014). Microscopy techniques for corrosion studies. In Handbook of microscopy . John Wiley & Sons, Ltd.

• Little BJ.(2007): Microbiologically influenced corrosion: An engineering insight. 1st edition. John Wiley & Sons.

• Little, B. J. (Ed.). (2008). Microbiologically influenced corrosion in the upstream oil and gas industry. John Wiley & Sons.

• Little, B. J., & Lee, J. S. (2015). Microbiologically influenced corrosion. New York: Wiley.

• Lovley DR. Dissimilatory Fe(III)- and Mn(IV)-Reducing Prokaryotes. In: Rosenberg E, DeLong EF, Lory S, Stackebrandt E, Thompson F, editors. The Prokaryotes: Prokaryotic Physiology and Biochemistry. Springer; 2013.

• Lens, P. N., Visser, A., & Hulshoff Pol, L. W. (1998). Environmental Technologies to Treat Sulfur Pollution. IWA Publishing.

### [M]

• Machuca, L. L., & Puentes, N. G. (2015). Microbiologically influenced corrosion: an updated overview. International Biodeterioration & Biodegradation.

• Materials and corrosion.International, Houston, 1993)Kip, N. et al. (2011).

• Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2014). Brock Biology of Microorganisms (14th ed.). Pearson.

- Melton, E. D., Sorokin, D. Y., Overmars, L., & van Kranenburg, R. (2016).

Comparative genomics.

- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Bender, K. S. (2018). Brock Biology of

Microorganisms.

### [N]

- Nealson, K. H., & Saffarini, D. (1994). Iron and manganese in anaerobic respiration : environmental significance, physiology, and regulation. Annual Review of Microbiology.

### [O]

- Organisation mondiale de la santé (OMS), Directives de qualité de l'eau potable, 4e édition, 2011).

- O'Toole, G.A. and Wong, G.C. (2016). Sensational biofilms: surface sensing in bacteria.

Current Opinion in Microbiology.

### [P]

- Parsek, M. R., & Singh, P. K. (2003). Bacterial biofilms : an emerging link to disease pathogenesis. Annual Review of Microbiology.

- Pearson. Postgate, J. R. (1984). The Sulphate-reducing Bacteria. Cambridge University

Press.

### [R]

- Rodier J., Bazing C., Broutin J. P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L. (2005). L'analyse de l'eau, aux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Ed. Dunod, Paris.
- Ruecker, A., Roncal-Herrero, T., Dixon, J. L., & Kappler, A. (2016). A combined chemical and biological approach for the design of manganese oxide nanoparticles for reductive contaminant transformation. *Environmental Science & Technology*.
- Rajala P, Bomberg M, Kietäväinen R, et al. Microbiological and geochemical characterization of bacterial mats from the Hot Lake geothermal area, El Tatio, northern Chile. *Extremophiles*. 2015.
- Rodriguez-Caballero, A., Abreu-Morales, D., & Galindez-Mayer, J. (2020). Sulfate-Reducing Bacteria (SRB). In *Encyclopedia of Astrobiology*.

### [S]

- Smith, D. C., & Douglas, A. E. (2016). *The biology of symbiosis*. Cambridge University Press.
- Stewart, P.S. and Franklin, M.J. (2008). Physiological heterogeneity in biofilms. *Nature Reviews Microbiology*.
- Stoodley, P., Sauer, K., Davies, D. G., & Costerton, J. W. (2002). Biofilms as complex differentiated communities. *Annual Review of Microbiology*.
- Szklarek, S. L., Venzlaff, H., & Richnow, H. H. (2016). Microbial iron corrosion under electrochemically controlled conditions: a review on recent advances. *Frontiers in Microbiology*

### [U]

- Ullah R, Siddique T, Khan N, et al. Bacterial dynamics in crude oil- and diesel-contaminated soil microcosms : Establishment of the rhizospheric condition and degradative potential. Environ Sci Pollut Res Int. 2015

### [V]

- VanGylsswyk, 1995
- Videla, H. A., & Herrera, L. K. (2010). Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. International microbiology.
- Videla, H. A., & Herrera, L. K. (Eds.). (2012). Microbial corrosion. Springer Science & Business Media.

### [W]

- Water Research Center. (2021). pH in water. <https://www.water-research.net/index.php/pH>.
- Widdel, shima. (2012).
- World Health Organization. (2017). Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition.
- Wozniak, D. J. (2016). The EPS matrix: the "house of biofilm cells". Journal of bacteriology.

### [Z]

- Zhang, Y., et al. (2019). Microbial biofilms in drinking water distribution systems: detection and control strategies. Frontiers in Microbiology.