

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : de Technologie  
Département : Génie des procédés  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Génie des procédés  
Spécialité : Génie Chimique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master  
Thème:

Inhibition de la corrosion de l'acier A37 par le Curcuma et  
l'huile essentielle de Rosmarinus dans l'eau d'alimentation  
de chaudière -FERTIAL-

Présenté par : *CHERIBOT CHERIF Sirine et BRINIS Nour El Houda*

Encadrante : *ZOUGAR Saida* Grade : *Pr* Université *Badji Mokhtar- Annaba*

### Jury de Soutenance :

BENMANSOUR Leila	Dr	Université Badji Mokhtar- Annaba	Présidente
ZOUGAR Saida	Pr	Université Badji Mokhtar- Annaba	Encadrante
BENDEBANE Farida	Dr	Université Badji Mokhtar- Annaba	Examinatrice

Année Universitaire : 2022/2023

## *Remerciement*

*Nous tenons à remercier, avant tout « Allah le tout Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre directrice de mémoire « Pr. ZOUGAR Saïda » qui nous a apporté l'aide nécessaire, tant sur le plan scientifique que moral.*

*Nous souhaitons exprimer notre sincère reconnaissance à « Dr. GUILLANE Sarra » enseignante à l'Université Badji Mokhtar Annaba pour nous avoir aidé dans ce travail.*

*Nous remercions l'ensemble des employés de l'unité centrale II et du laboratoire au niveau du complexe Fertial- Annaba, exceptionnellement Moussa pour son aide au cours de stage.*

*Nous remercierons les membres du jury, qui en dépit de leurs fonctions, ont bien voulu nous honorer en jugeant ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de génie des procédés.*

## *Dédicace*

*C'est avec un grand plaisir que je tiens à dédier ce modeste travail à l'être le plus cher de ma vie, à celle qui a fait de moi la personne que je suis aujourd'hui, ma grand-mère **zyneb** pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.*

*Je dédie ce mémoire également à :*

*Mes parents, ma sœur **Maroua**, mes frères **Billel** et **Abd El raouf**, ma tante **Amína** pour leur tendresse, leurs encouragements durant tout mon parcours.*

*Ma meilleure amie **lina** pour son précieux encouragement et sa solidarité durant tout mon parcours.*

*Toute ma famille, et à tous ceux qui me sont chers.*

*Cheribot cherif sirine*

## *Dédicace*

*Avec tout mon respect et ma reconnaissance, je dédie ce travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père **Noureddine** et ma mère **Samira**.*

*Je leur dis merci papa du fond de mon cœur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce que tu m'as fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur.*

*Je te dis merci et mille fois merci maman pour ta patience, ton courage et ton sacrifice pour moi.*

*« Que dieu les protège »*

*A mes chères sœurs **Soulef** et **Zeyneb***

*A mon petit frère **Amar***

*A toute ma famille*

*A mes amies avec qui j'ai vécu de beaux moments au cours de mon cursus à l'université*

***Sabrina, Sirine, Khawla, Weam.***

*A tous ceux que j'aime....*

***Brinis Nour El Houda***

## LISTE DES FIGURES

Numéro du Figure	Titre du Figure	Page
<b>CHAPITRE I</b>		
Figure I.1	Complexe FERTIAL d'ANNABA	5
Figure I.2	Organigramme du complexe FERTIAL- ANNABA	6
Figure I.3	Présentation de la structure des utilités	7
Figure I.4	Schéma de procédé de dessalement d'eau de mer	10
Figure I.5	Chaine de production d'eau déminée	11
Figure I.6	Schéma représentatif de la section chaudière	12
Figure I.7	Schéma représentatif de la chaudière C	12
<b>CHAPITRE II</b>		
Figure II.1	Classement des inhibiteurs de corrosion	17
Figure II.2	Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique	18
Figure II.3	Curcuma longa, Rhizome et poudre de curcuma	20
Figure II.4	Rosmarinus officinalis	21
Figure II.5	Appareillage utilisé pour l'hydrodistillation	22
Figure II.6	Courbe de polarisation $i=f(E)$	23
Figure II.7	Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel	24
<b>CHAPITRE III</b>		
Figure III.1	Organigramme présentant les titres de l'eau	3
Figure III.2	Les indicateurs utilisés pour la détermination des titres de l'eau	32
Figure III.3	Montage expérimental pour la détermination des titres de l'eau	32
Figure III.4	Variation du pH de l'eau d'alimentation en fonction de temps	35

<b>Figure III.5</b>	<b>Variation du TH de l'eau d'alimentation en fonction de temps</b>	<b>36</b>
<b>Figure III.6</b>	<b>Variation du TA de l'eau d'alimentation en fonction des temps</b>	<b>36</b>
<b>Figure III.7</b>	<b>Variation du TAC de l'eau d'alimentation en fonction des temps</b>	<b>37</b>
<b>CHAPITRE IV</b>		
<b>Figure IV.1</b>	<b>Echantillon pendant le polissage</b>	<b>43</b>
<b>Figure IV.2</b>	<b>Echantillon utilisé</b>	<b>43</b>
<b>Figure IV.3</b>	<b>Dispositif expérimental pour les mesures électrochimique</b>	<b>43</b>
<b>Figure IV.4</b>	<b>Potentiostat / Galvanostat SP300</b>	<b>44</b>
<b>Figure IV. 5</b>	<b>Cellule électrochimique à trois électrodes</b>	<b>44</b>
<b>Figure IV.6</b>	<b>Electrode de référence</b>	<b>45</b>
<b>Figure IV.7</b>	<b>Electrode auxiliaire</b>	<b>45</b>
<b>Figure IV.8</b>	<b>Electrode de travail</b>	<b>46</b>
<b>Figure IV.9</b>	<b>Solutions mère de 100ppm</b>	<b>47</b>
<b>Figure IV.10</b>	<b>Poids de 10g de curcuma</b>	<b>47</b>
<b>Figure IV.11</b>	<b>Courbe de polarisation en circuit ouvert pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de chaudière avec 1ppm de curcuma.</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV.12</b>	<b>Courbe d'intensité-potentiel pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de chaudière avec 1ppm de curcuma.</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV.13</b>	<b>Courbes de polarisation de l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation chaudière avant et après l'injection de « curcuma » à des faibles concentrations.</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV.14</b>	<b>Effet d'injection des différentes concentrations de 1ppm à 7ppm de curcuma sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion du l'acier dans l'eau d'alimentation de chaudière.</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV.15</b>	<b>Courbes de polarisation de l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation chaudière avant et après l'injection de « curcuma » à des fortes concentrations.</b>	<b>53</b>
<b>Figure IV.16</b>	<b>Effet d'injection des différentes concentrations de 10ppm à 70ppm de curcuma sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion du l'acier dans l'eau d'alimentation de chaudière.</b>	<b>54</b>

## CHAPITRE V

<b>FigureV.1</b>	<b>Montage utilisé pour l'extraction d'huile essentielle de Rosmerinus officinalis par la méthode d'hydrodistillation.</b>	<b>58</b>
<b>FigureV.2</b>	<b>Les feuilles de Rosmarinus séchées.</b>	<b>58</b>
<b>FigureV.3</b>	<b>Courbe du potentiel en circuit ouvert (OCP) pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de chaudière avec 18,75 g/l de Rosmarinus officinalis.</b>	<b>59</b>
<b>FigureV.4</b>	<b>Courbe d'intensité-potentiel pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation avec une concentration de 18,75 g/l de d'inhibiteur.</b>	<b>60</b>
<b>FigureV.5</b>	<b>Les courbes de polarisation de l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de la chaudière avant et après l'injection « d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » à des différentes concentrations.</b>	<b>61</b>
<b>FigureV.6</b>	<b>Effet de l'injection d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier dans l'eau d'alimentation de chaudière.</b>	<b>63</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Numéro du tableau	Titre du tableau	Page
<b>CHAPITRE III</b>		
Tableau III.1	Les résultats des analyses de l'eau d'alimentation.	34
Tableau III.2	La norme de l'eau d'alimentation.	35
Tableau III.3	Les résultats des analyses de l'eau de chaudière.	38
Tableau III.4	La norme de l'eau de chaudière.	39
<b>CHAPITRE IV</b>		
Tableau IV.1	Composition chimique de l'acier A37 (en % massique).	42
Tableau IV.2	Composants contenus dans 100 g de curcuma.	46
Tableau IV.3	Conditions utilisées pour tracer la courbe de polarisation.	48
Tableau IV.4	Les Paramètres électrochimiques tirés des courbes de polarisation à faibles concentrations de Curcuma.	52
Tableau IV.5	Les Paramètres électrochimiques tirés des courbes de polarisation de curcuma à fortes concentrations.	54
<b>CHAPITRE V</b>		
Tableau V.1	Composition chimique d'huile essentielle du Rosmarinus officinalis.	52
Tableau V.2	Les paramètres électrochimiques avec et sans injection d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis et leur efficacité inhibitrice.	56

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

NINA : Central Nitrate et Nitrique.

CUII : Central utilité deux.

SIDEM : Société International de dessalement de l'eau de mer.

NH<sub>3</sub> : L'ammoniac.

pH : Potentiel d'hydrogène.

TA : Titre alcalimétrique.

TAC : Titre alcalimétrique complet.

TH: Titre hydrotimétrique.

°F : Degré français.

ppm : Partie par millions.

°F : Degré français.

E(%) : Efficacité inhibitrice.

E : Potentiel.

I : Intensité de courant.

R<sub>p</sub> : Résistance de polarisation.

V : vitesses de corrosion.

## **Résumé**

Le but de ce travail est, d'une part de faire une étude qualitative des eaux d'alimentation de la chaudière BABCOCK avant et après traitement au niveau du complexe FERTIAL- ANNABA où nous avons fait un contrôle de la qualité physico- chimique, notamment des paramètres de la dureté (TH), de l'alcalinité (TA et TAC), du pH, des Chlorures, de la silice et de la soude afin de s'assurer de la conformité de l'eau utilisée pour la production de la vapeur.

Et d'autre part à étudier l'activité inhibitrice de deux inhibiteurs naturels différents qui sont « Le Curcuma » et « l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » contre la corrosion de l'acier au fer A37 dans un milieu neutre qui est l'eau d'alimentation de la chaudière.

Cette étude a été réalisée au moyen des méthodes électrochimiques stationnaires : évolution du potentiel libre en fonction du temps et tracé des courbes de polarisation.

Les résultats obtenus montrent que l'activité inhibitrice de l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis est mieux que celle de « Curcuma » où nous avons atteint une meilleure efficacité égale à 82,47% correspondante à une concentration de 1,5g /l de l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis.

**Mots clés :** Corrosion, Inhibiteur, Curcuma, Rosmarinus officinalis, Polarisation.

## **Abstract**

The purpose of this work is, on the one hand, to carry out a qualitative study of the BABCOCK boiler feed water before and after treatment at the level of the FERTIAL-ANNABA complex where we have carried out a physical and chemical quality control, in particular of the hardness parameters (TH), alkalinity (TA and TAC), pH, chlorides, silica and soda in order to ensure the conformity of the water used for steam production.

And on the other hand to study the inhibitory activity of two different natural inhibitors which are « Turmeric » and « Rosmarinus officinalis essential oil » against the corrosion of the iron steel A37 in a neutral medium which is the boiler water.

This study was carried out using stationary electrochemical methods : evolution of the free potential as a function of time and drawing of polarization curves.

The results obtained show that the inhibitory activity of the essential oil of Rosmarinus officinalis is better than that of « Turmeric » where we achieved a better efficiency equal to 82.47% corresponding to a concentration of 1,5g/l of Rosmarinus officinalis essential oil.

**Keywords** : Corrosion, Inhibitor, Turmeric, Rosmarinus officinalis, Polarization.

## ملخص

الغرض من هذا العمل هو، من ناحية، إجراء دراسة نوعية لمياه تغذية غلاية BABCOCK قبل وبعد المعالجة في مجمع ANNABA-FERTIAL حيث قمنا بمراقبة الجودة الفيزيائية والكيميائية، بما في ذلك معلمات الصلابة (TH)، القلوية (TA و TAC)، درجة الحموضة، الكلوريدات، السيليكا والصودا لضمان امتثال المياه المستخدمة لإنتاج البخار.

ومن ناحية أخرى لدراسة النشاط المثبط لاثنتين من المثبطات الطبيعية المختلفة وهما "الكركم" و "زيت اكليل الجبل الأساسي" ضد تآكل الحديد الصلب A37 في وسط محايد وهو مياه تغذية الغلاية.

أجريت هذه الدراسة باستخدام الطرق الكهروكيميائية الثابتة: تطور الجهد الحر كدالة للوقت ورسم منحنيات الاستقطاب.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن النشاط المثبط للزيت الأساسي لإكليل الجبل أفضل من نشاط "الكركم" حيث حققنا كفاءة أفضل تساوي 82.47% المقابلة لتركيز 1.5 جم / لتر من الزيت الأساسي لإكليل الجبل.

الكلمات المفتاحية: التآكل، طيبثم، الكركم، اكليل الجبل، الاستقطاب.

# TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABREVIATIONS

RESUME

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

## PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### CHAPITRE I : PRESENTATION DU COMPLEXE

I.1. Introduction.....	5
I.2. Présentation du complexe .....	5
I.3. Présentation de la structure des utilités.....	6
I.3.1. Section de pompage.....	8
I.3.2. Section de dessalement d'eau de mer (SIDEM).....	8
I.3.3. Section de déminéralisation.....	9
I.3.4. Section turbo-alternateur.....	11
I.3.5. Section de production de vapeur.....	11
I.4. Laboratoire de contrôle de qualité.....	13
Conclusion.....	13

### CHAPITRE II : APERÇU GENERAL SUR LA CORROSION ET LES INHIBITEURS

II.1. Introduction.....	15
II.2. Définition de la corrosion.....	15
II.3. Types De Corrosion.....	15
II.3.1. Corrosion chimique.....	15
II.3.2. Corrosion biochimique (bactérienne).....	16
II.3.3. Corrosion électrochimique (humide).....	16
II.4. Les inhibiteurs de corrosion.....	16
II.4.1. Définition.....	16
II.4.2. Propriétés des inhibiteurs.....	16
II.4.3. Classification des inhibiteurs.....	17
II.4.4. Domaines d'utilisation.....	17
II.4.5. Nature des inhibiteurs.....	17

II.4.5.1. Inhibiteur organique.....	17
II.4.5.2. Les inhibiteurs minéraux.....	18
II.4.5.3. Les inhibiteurs verts.....	19
II.4.6. La biodégradabilité des inhibiteurs verts .....	19
II.5. Présentation du curcuma.....	20
II.5.1. Définition.....	20
II.5.2. Utilisation dans le domaine de la corrosion.....	20
II.5.3. Effet anti-oxydant du curcuma.....	21
II.6. Présentation du Rosmarinus Officinalis.....	21
II.6.1. Définition.....	21
II.6.2. Effet anti oxydant du Rosmarinus.....	21
II.6.3. Méthode d'extraction des huiles essentielles.....	21
II.6.4. Les huiles essentielles.....	22
II.7. Mode d'évaluation des inhibiteurs de corrosion.....	22
Conclusion.....	25

## **PARTIE II : CONTRIBUTION A LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION DE L'ACIER A37**

Problématique.....	27
--------------------	----

### **CHAPITRE III : ÉTUDE QUALITATIVE DE L'EAU D'ALIMENTATION ET DE LA CHAUDIERE**

III.1. Introduction.....	30
III.2. Paramètres des analyses des eaux.....	30
III.2.1. Le titre hydrotimétrique (TH) .....	30
III.2.2. Le potentiel d'hydrogène PH .....	31
III.2.3. Les titres de l'eau .....	31
III.2.4. Les chlorures Cl <sup>-</sup> .....	33
III.2.5. Les phosphates .....	33
III.2.6. La silice .....	33
III.2.7. La soude libre .....	33
III.3. Les résultats des analyses de l'eau alimentaire.....	34
III.4. Représentation graphique des résultats des analyses de l'eau alimentaire.....	35
III.4.1. Représentation graphique des résultats de pH.....	35
III.4.2. Représentation graphique des résultats de TH.....	35
III.4.3. Représentation graphique des résultats de TA.....	36

III.4.4. Représentation graphique des résultats de TAC.....	36
III.5. Les résultats des analyses de l'eau de chaudière .....	37
Conclusion.....	40

## CHAPITRE IV : INHIBITION DE LA CORROSION PAR LE CURCUMA

IV.1. Introduction.....	42
IV.2. Matérielle et Dispositif experimental.....	42
IV.2.1. Matériaux utilises.....	42
IV.2.2. Préparation des échantillons.....	42
IV.2.3. Dispositif expérimental et cellule électrochimique.....	43
IV.2.3.1. Potentiostat / Galvanostat SP300.....	43
IV.2.3.2. Cellule électrochimique.....	44
(a). Une électrode de reference.....	44
(b). Une électrode auxiliaire.....	45
(c). Une électrode de travail.....	45
IV.3. L'inhibition par curcuma.....	46
IV.3.1. Composition chimique de curcum.....	46
IV.3.2. Préparation des solutions.....	47
IV.3.2.1. Préparation des solutions de 1ppm à 7ppm.....	47
IV.3.2.2. Préparation des solutions de 10ppm à 70ppm.....	47
IV.4. Le protocole de mesure électrochimique.....	48
IV.4.1. La courbe de polarisation.....	48
IV.4.2. Mesure de la vitesse de corrosion.....	48
IV.5. Résultats et discussion.....	49
IV.5.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP : Open Circuit Potential) .....	49
IV.5.2. Tracé des courbes de potentiel .....	50
IV.5.3. L'extrapolation des droites de Tafel.....	51
IV.5.3.1. L'extrapolation des droites de Tafel pour les faibles concentrations de 1ppm a 7ppm.....	51

<b>IV.5.3.2. L'extrapolation des droits de Tafel pour les fortes concentrations de 10ppm a 70ppm.....</b>	<b>53</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>55</b>

**CHAPITRE V : Inhibition de la corrosion par l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis**

<b>V.1.Introduction.....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.L'huile essentielle de Rosmarinus officinalis.....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.1. Composition chimique de Rosmarinus .....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.2. Le mode d'extraction.....</b>	<b>58</b>
<b>V.2.2.1. L'extraction d'huile essentiel de Rosmarinus officinalis.....</b>	<b>58</b>
<b>V.2.2.2. Le rendement en huile essentielle.....</b>	<b>59</b>
<b>V.3. Résultats et discussions.....</b>	<b>59</b>
<b>V.3.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP : Open Circuit Potentiel) .....</b>	<b>59</b>
<b>V.3.2. Courbes de polarisation Intensité-Potentiel.....</b>	<b>60</b>
<b>V.3.3. L'extrapolation de droite de Tafel.....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>63</b>
<b>CONCLUSIONN GENERALE.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>68</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**

Les aciers sont les alliages à base de fer, ils sont largement employés dans l'industrie spécialement dans les chaudières vu leurs bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques ainsi leur faible coût [1]. Cependant, le problème majeur de l'acier est la corrosion. Cette dernière est un phénomène universellement connu qui entraîne chaque année des pertes matérielles considérables. Elle résulte d'une réaction chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages. Ses conséquences sont très désastreuses dans divers domaines et en particulier dans l'industrie : arrêt de production, remplacement des pièces corrodées, accidents et risques de pollutions sont des événements fréquents avec parfois de lourdes incidences économiques [2].

Les problèmes résultant de la corrosion ont conduit au développement de diverses méthodes pour contrôler ces problèmes qui incluent l'injection d'inhibiteurs de corrosion qui sont largement utilisés comme solutions très efficaces et économiques [3].

La nouvelle génération de réglementations environnementales exige le remplacement des inhibiteurs toxiques par des inhibiteurs non toxiques. Dans cette perspective, plusieurs inhibiteurs de corrosion respectueux de l'environnement ont maintenant été développés. La classe d'inhibiteurs favorables à l'environnement la plus courante pour différents systèmes métal-environnement est constituée de produits naturels [4]. Ces derniers qui sont extraits de différentes parties des plantes présentent les avantages de leur effet inhibiteur important, leur non-toxicité, leur biodégradabilité et leurs propriétés écologiques.

C'est en particulier pour ces raisons qu'on a envisagé de faire une étude sur des extraits de plantes.

Notre travail a été effectué au sein du laboratoire de génie de l'environnement, de l'université d'Annaba, a pour objet d'étudier l'inhibition de la corrosion de l'acier A37 par le Curcuma et l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* dans l'eau d'alimentation de la chaudière Babcock de l'unité centrale II du complexe FERTIAL d'Annaba.

Le pouvoir inhibiteur a été évalué en utilisant les méthodes électrochimiques stationnaires à savoir : le suivi du potentiel libre, la polarisation potentiodynamique et l'extrapolation des droites de Tafel. Cette dernière nous a permis de calculer l'efficacité inhibitrice de nos inhibiteurs naturels.

La rédaction de ce mémoire est organisée en deux parties et cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du complexe FERTIAL et particulièrement la centrale utilité (II).
- Le deuxième chapitre consiste en une étude bibliographique dans laquelle nous avons présenté des généralités sur la corrosion des métaux et les inhibiteurs de corrosion, généralités sur L'huile essentielle de Rosmarinus et le Curcuma, nous avons aussi exposé la méthode d'extraction et la méthode électrochimique pour tester l'efficacité inhibitrice des inhibiteurs utilisés au cours de cette étude.
- Le troisième chapitre est la partie de l'étude qualitative de l'eau d'alimentation et l'eau de chaudière.
- Le quatrième chapitre décrit les méthodes expérimentales (matériaux et montages) permettant d'étudier l'efficacité inhibitrice de Curcuma contre la corrosion de l'acier A37 dans l'eau d'alimentation, les discussions et les résultats obtenus au cours de ce travail et les conditions appropriées pour celui-ci.
- Le dernier chapitre regroupe les résultats et les discussions obtenus pendant notre étude sur l'efficacité inhibitrice d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis contre la corrosion de l'acier A37 dans l'eau d'alimentation. Cette huile a été extraite par la méthode d'Hydrodistillation.

Le mémoire est terminé par une conclusion générale.

**PARTIE I :**  
**Synthèse bibliographique**

**CHAPITRE I :**  
**Présentation de la structure des**  
**utilités**

## I.1. Introduction

FERTIAL d'ANNABA est l'une des plus importantes entreprises industrielles d'Afrique du Nord [1]. Ce complexe (**figure I.1**) construit pour le but de satisfaire les besoins de notre pays en fertilisants phosphatée et azotée soient locale ou exportée, et entre dans le cadre de la politique du développement de l'industrie chimique et principalement la promotion de l'agriculture algérienne [2].

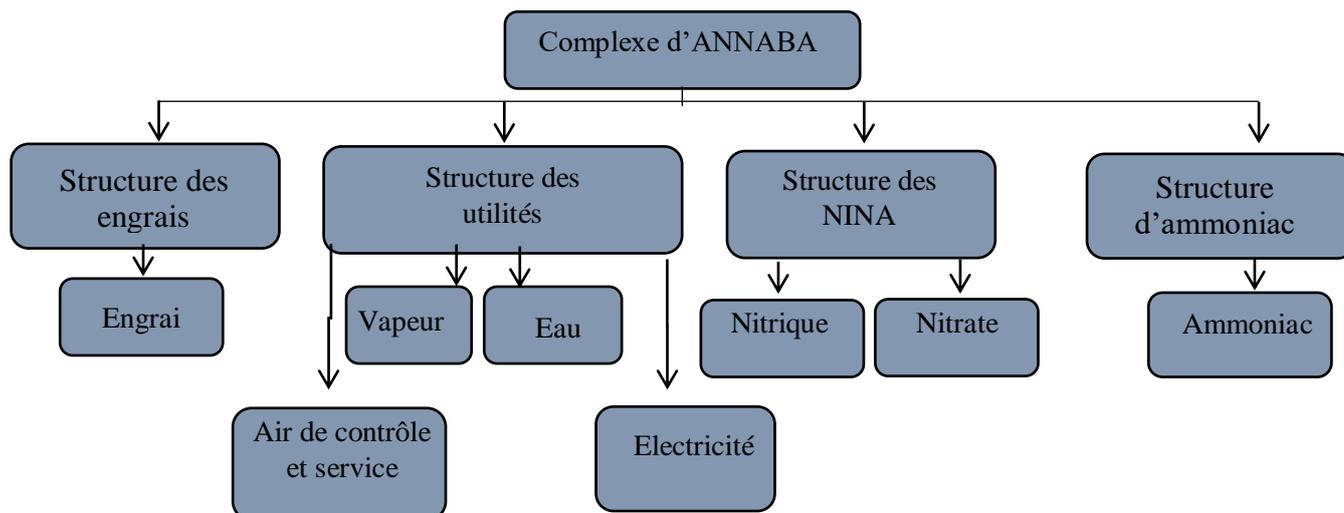


**Figure I.1. Complexe FERTIAL d'ANNABA [3].**

## I.2. Présentation du complexe

L'organigramme ci-dessous (**Figure I.2**) nous montre l'organisation des différentes structures ainsi que leurs produits finis au semi du complexe Fertial-Annaba.

- **Structure d'ammoniac** : l'unité de production  $\text{NH}_3$ .
- **Structure NINA** : l'unité de production de nitrate et nitrique.
- **Structure des engrais** : l'unité de production d'engrais.
- **Structure des utilités** : Fournir les nécessités du complexe en matière utilités tel que : eau, vapeur, électricité et l'air de contrôle et de service.



**Figure I.2. Organigramme du complexe FERTIAL- ANNABA.**

Pendant ce stage pratique au complexe FERTIAL, on s'est intéressé plus particulièrement à la dernière section qui représente une structure vitale pour le complexe, son dysfonctionnement se répercute directement sur le fonctionnement des différents ateliers.

### **I.3. Présentation de la structure des utilités**

La section des utilités ou la centrale utilité (II) a une grande importance dans le complexe FERTIAL. Elle a pour but de produire de l'eau, la vapeur, l'électricité et l'air de contrôle et service, qui sont des matières d'utilités répandant aux besoins du complexe. Cette structure (**Figure I.3**) se compose de 5 sections qui sont :

Les principales sections sont :

- Section de pompage.
- Section de dessalement d'eau de mer (SIDEM).
- Section de déminéralisation.
- Section turbo-alternateur.
- Section chaudière.

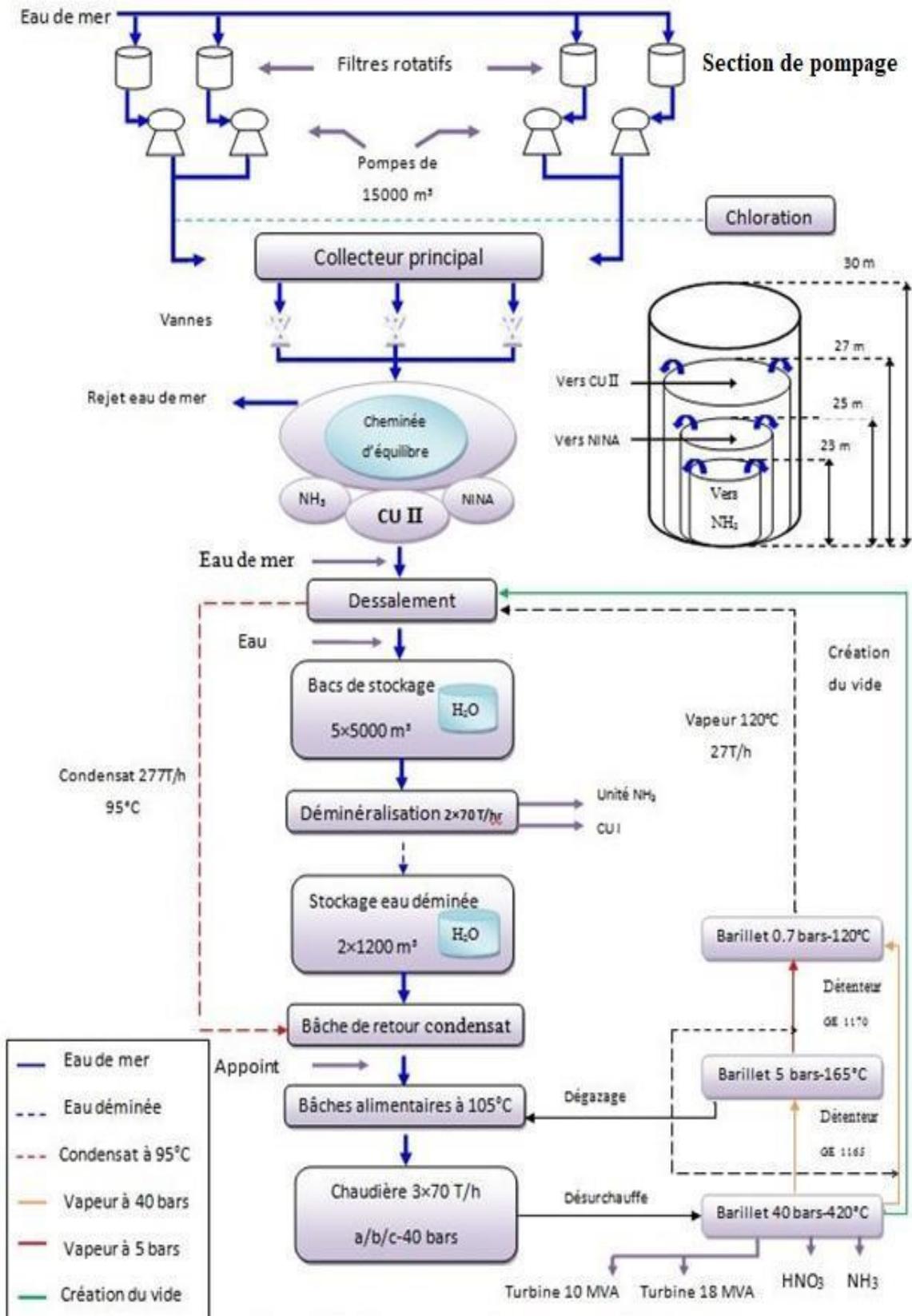


Figure I.3. Présentation de la structure des utilités [2].

### I.3.1. Section de pompage

Elle a pour but d'assurer le besoin d'entreprise d'eau de mer nécessaire. Cette unité est composée de deux sections, chaque section est contenue de :

- Deux filtres rotatifs pour éliminer les matières en suspension comme l'algue.
- Deux pompes pour remplir les conduites et chassé l'air.
- Pompes principales et vannes pour transporter l'eau de mer vers la cheminé d'équilibre.

Au cours de passage d'eau de mer, il y a une chloration pour éliminer les micros organiques et les bactéries.

### I.3.2. Section de dessalement d'eau de mer (SIDEM)

L'eau de mer est arrivée de la cheminé d'équilibre vers les blocs de dessalement ou la conductivité va être réduite à une valeur inférieure à 30  $\mu\text{s}/\text{cm}$  à cause de l'élimination des sels. Cette section est composée de trois blocs de dessalement multi-flash avec une capacité de 196  $\text{m}^3/\text{h}$  d'eau dessalée d'un bloc thermo-compression de capacité de production 209  $\text{m}^3/\text{h}$  et cinq bacs de stockage de capacité égale 5000 $\text{m}^3$ .

Dans notre stage, nous avons rencontré que le dessaleur multi flash qui s'appelle « SIDEM » dans lequel se fait la distillation par détente successive.

#### Distillation par détente successives (Procédés Flash)

Ce procédé dit flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la période du chauffage par l'éjecteur, lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 88°C, elle est introduite dans une cellule où règne une pression réduite (sous vide). Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash.

Une partie de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseur placés en haut de la cellule, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles (pot de recueillement) en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est introduit ensuite dans une deuxième cellule où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successives dans une série de cellule où règnent de la pression de plus en plus réduite.

On peut trouver jusqu'à 20 cellules successifs (**Figure.I.4**) dans l'unité de dessalement de l'eau de mer (Centrale II-FERTIAL).

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 88°C, elle circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différentes cellules en commençant d'abord par la 20<sup>ème</sup> cellule où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 88 °C grâce (préchauffeur) à de la vapeur à une température à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'un barillet de 0.7 bar à (120°C). On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un séparateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de la cellule.

L'avantage principal du procédé multi flash est que l'évaporateur de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffage, ceci limite les risques d'entartrage.

### I.3.3. Section de déminéralisation

L'eau dessalée contient des minéraux dessous présentés en quantité des cations à charge positif (+) et des anions à charge négative (-).

Pour les cations, on peut citer :  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$  et  $K^{+}$ .

Et pour les anions :  $CO_3^{-}$ ,  $F^{-}$ ,  $Cl^{-}$  et  $SiO_3^{-}$ .

La présence des sels dans cette eau particulièrement les sulfates, les chlorures et gaz dissous provoquent les problèmes de corrosion et l'entartrage, c'est pourquoi il faut traiter cette eau par déminéralisation.

Il y a deux chaînes de production d'eau déminée, chacune a une capacité de production de 70 m<sup>3</sup>/h et 2 bacs de stockages d'eau déminée avec une capacité de stockage de 1250 m<sup>3</sup> pour chaque bac.

La chaîne de production d'eau déminée (**Figure I.5**) contient :

- **Un filtre de charbon actif.**
- **Un échangeur d'ion à lit mixte.**

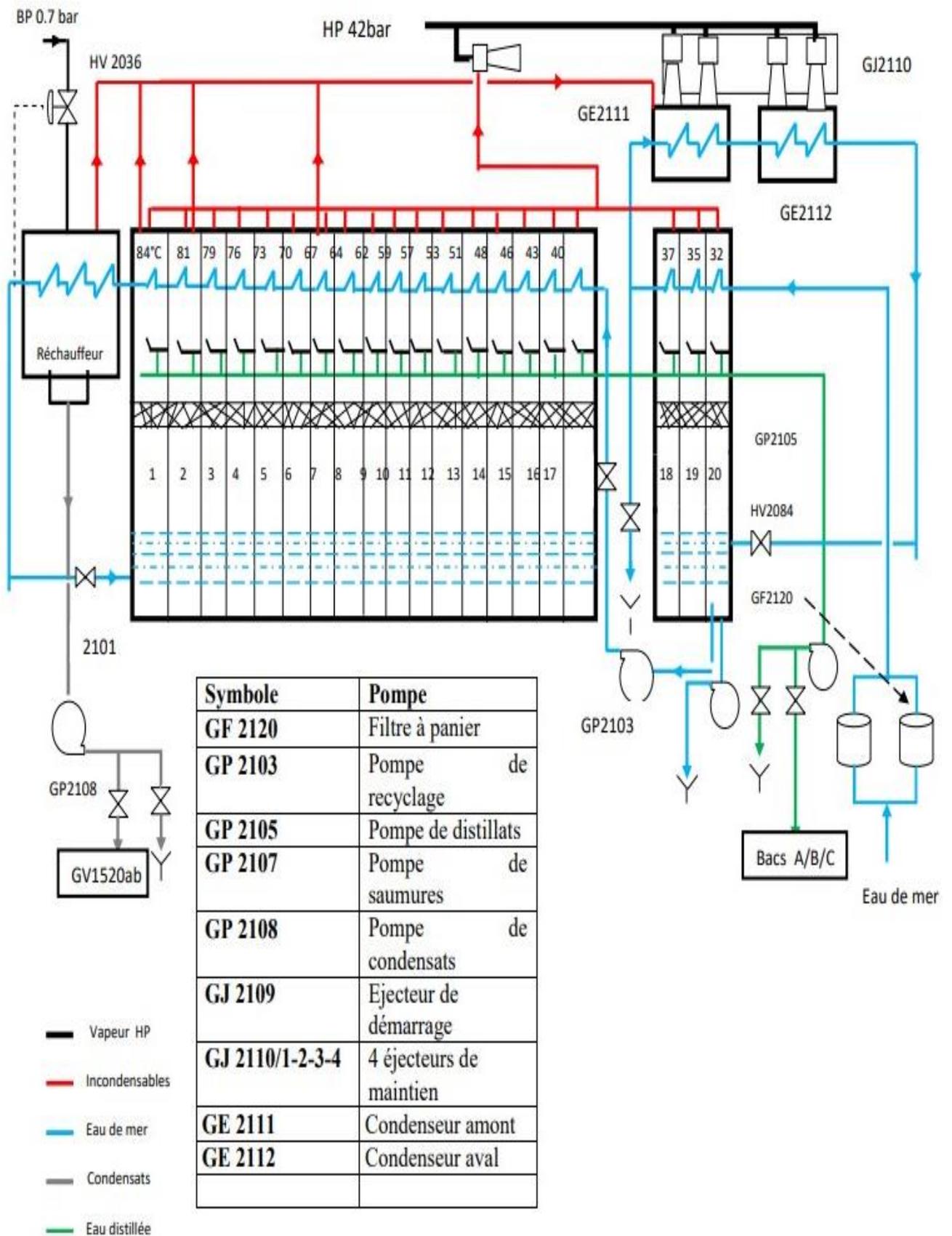


Figure I.4.Schéma de procédé de dessalement d'eau de mer.

La déminéralisation se réalise par le passage de l'eau dessalée à travers des filtres de charbon actif en premier pour faire transformer le chlorure libre en HCl très dilué et adsorbé les matières chimiques en suspension à la surface. Puis le passage de l'eau à travers des résines échangeuses d'ions mixte (cationiques et anioniques) afin d'éliminer les ions positif et négatif par adsorption sur la surface d'échangeurs d'ions et les remplacés par une quantité équivalente d'autre ions de même charge ( $H^+$  et  $OH^-$ ). L'eau sort de la résine avec une conductivité inférieure à  $1 \mu s/cm$ .

Si la conductivité d'eau déminéralisée dépasse  $1 \mu s/cm$  donc la chaîne est saturée (capacité d'échange est nulle), on injecte  $H_2SO_4$  pour la régénération des résines cationique, et  $NaOH$  pour la régénération des résines anionique.



Figure I.5. Chaîne de production d'eau déminérée.

### I.3.4. Section turbo-alternateur

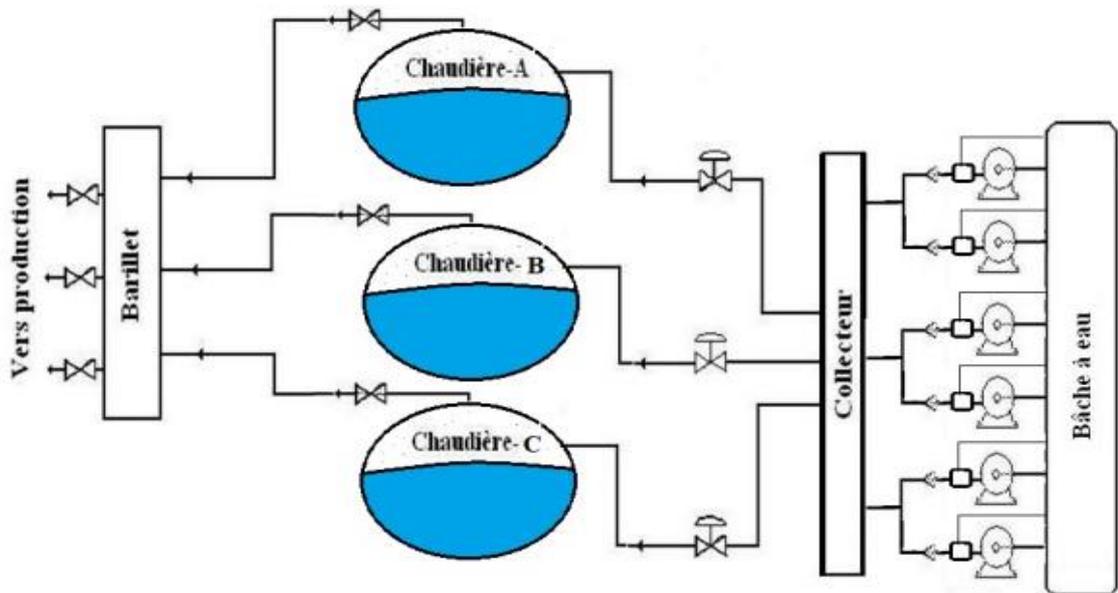
Le rôle de cette section est de produire l'électricité nécessaire pour alimenter toute l'entreprise. Il y a deux turbines :

- Une turbine à réaction ou à contre pression (10MVA).
- Une turbine à action ou à condensation (18 MVA).

### I.3.5. Section de production de vapeur

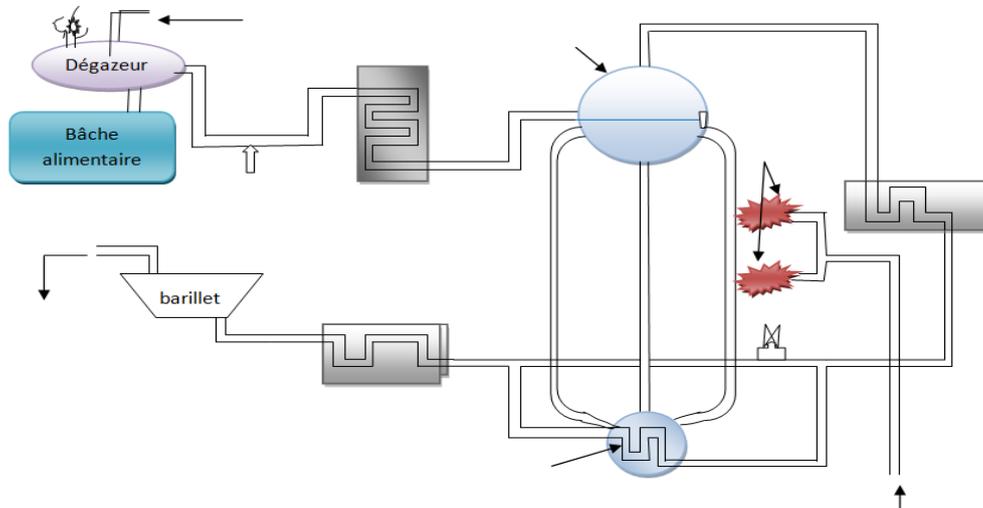
Elle a pour but de produire de la vapeur à haute pression de 40 bars et à une température de  $420^{\circ}C$  et de basses pressions à 5 et 0.7 bar nécessaire pour les autres structures et aussi pour toutes les sections de la centrale utilité II.

On trouve dans cette section (**Figure I.6**) trois chaudières de capacités de production maximale de 70 tonnes / h chacune.



**Figure I.6. Schéma représentatif de la section chaudière.**

Dans notre mémoire on va étudier la chaudière C de type Fives-Cail Babcock (**Figure I.7**).



**Figure I.7. Schéma représentatif de la chaudière C.**

L'eau provient de la section de déminéralisation vers la bâche alimentaire ou il y a un dégazage physique de l'eau pour éliminer le taux d'oxygène et augmente la température jusqu'à 105°C. L'appoint en eau dans la chaudière est réalisé grâce à une pompe alimentaire ou s'effectue le dégazage chimique par injection de trois produits chimiques qui sont :

- **La Morpholine** : pour augmenter le pH jusqu'à 9-10.

- **Le Sulfite de sodium** : pour le dégazage chimique d'oxygène et la formation d'un film protecteur pour les surfaces métalliques.
- **Le Phosphate trisodique** : anti-tartre.

Ensuite l'eau passe par l'économiseur pour le préchauffée avant d'entre au ballon supérieur.

Après le remplissage du ballon supérieur, l'eau s'écoule par gravité au ballon inférieur par l'intermédiaire du tube d'alimentation, ensuite il va être l'ébullition de l'eau à traverser les tubes écran. La vapeur passe encore par les surchauffeurs primaire et secondaire pour assurer le séchage de la vapeur, la température finale du vapeur égale 420 °c. Si la vapeur dépasse cette température, elle passe par la désurchauffe de forme d'un serpentin plongé dans le ballon inférieur.

#### **I.4. Laboratoire de contrôle de qualité**

Il est important de déterminer la qualité de l'eau dans chaque section et pour chaque étape pour éviter les phénomènes indésirables. Les analyses sont :

- Détermination de pH : Le potentiel hydrogène.
- Détermination de TH : Le titre hydrotimétrique, ou dureté (présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  dans l'eau).
- Détermination de TA : Le titre alcalimétrique (présence de carbonate dans l'eau).
- Détermination de TAC : Le titre alcalimétrique complet (présence de bicarbonate et carbonate dans l'eau).
- Détermination de chlorure  $\text{Cl}^-$ .
- Détermination de la conductivité.
- Pour la chaudière, on détermine aussi :  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NaOH}$ .

### **Conclusion**

D'après notre stage à la centrale d'utilité (II) au niveau de Ferial-Annaba, nous avons vu l'importance de cette structure pour le complexe, car elle répondre aux besoins des autres structure tel que l'électricité, l'eau, la vapeur et assure leur bon fonctionnement au cours de la production.

**CHAPITRE II :**  
**Aperçu général sur la corrosion**  
**et les inhibiteurs**

## II.1. Introduction

La corrosion est le processus de dégradation d'un matériau résultant d'une réaction chimique entre le matériau et son environnement. Ce domaine de recherche est nécessaire dans la science et l'ingénierie des matériaux, car la résistance contre la corrosion représente la stabilité ou la durabilité d'un matériau qui est l'une des propriétés des matériaux les plus importantes dans les industries appliquées [1].

C'est aussi un phénomène naturel qui tend à redonner aux métaux et alliages leur état d'origine qui est le plus stable dans le milieu environnant.

Les matières utilisées pour la protection contre la corrosion peuvent agir sur le matériau lui-même, sur sa surface ou sur l'environnement avec lequel le matériau est en contact. Les inhibiteurs de corrosion constituent le moyen de lutte original contre la corrosion des métaux [2].

Dans ce chapitre, nous allons parler de la corrosion et les inhibiteurs utilisés comme moyen de protection et plus particulièrement les inhibiteurs naturels utilisés au cours de ce travail.

## II.2. Définition de la corrosion

La corrosion est la perte d'une partie de matière d'un métal sous l'action d'un agent agressif comme l'oxygène et / ou constituants de l'air ( $H_2O$  humide,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ , etc.), d'un gaz chaud ( $O_2$  »,  $CO$ , etc.) ou d'une solution (acide, basique). Le solide ainsi corrodé tend à réagir pour former un composé (oxyde, sulfure, carbonate, etc.) plus stable [3].

En générale, la corrosion résulte d'interactions physico-chimiques entre le métal et l'environnement provoquant des modifications de ses propriétés accompagnées d'une dégradation du métal [4].

## II.3. Types De Corrosion

Selon la nature de l'environnement et le comportement du métal, on peut définir le type de corrosion selon trois classes :

### II.3.1. Corrosion chimique

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase liquide

ou gazeuse. Lorsque le réactif est gazeux, on parle de corrosion sèche.

Si le réactif est liquide, il est en général accompagné d'une corrosion électrochimique. La corrosion chimique se produit couramment dans les industries qui produisent ou utilisent des acides [5].

### **II.3.2. Corrosion biochimique (bactérienne)**

La corrosion bactérienne est causée par la présence de grandes colonies de bactéries dites anaérobies qui se développent dans l'eau contenant des sulfates. La lutte contre cette forme de corrosion est essentiellement biologique en injectant des conservateurs dans le milieu corrosif [6].

### **II.3.3. Corrosion électrochimique (humide)**

La corrosion électrochimique est un phénomène d'oxydoréduction qui se produit lorsque le métal est en contact d'un électrolyte. A l'anode, il y a oxydation des atomes métalliques avec formation de cations (dissolution). A la cathode, il y a réduction de l'oxydant dissous dans la solution.

En milieu acide, la réaction cathodique, est une réaction de réduction des ions hydrogène et de l'oxygène dissous dans l'électrolyte. Tandis qu'en milieu neutre ou légèrement basique, on assiste à la réduction de l'oxygène dissous [7].

## **II.4. Les inhibiteurs de corrosion**

### **II.4.1. Définition**

Selon la National Association of Corrosion Engineers (NACE), un inhibiteur de corrosion est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [8].

### **II.4.2. Propriétés des inhibiteurs**

Les stratégies d'application d'inhibiteurs de corrosion sont d'un grand intérêt pour de nombreux objets. Les composés de ce type sont ajoutés en faibles concentrations à des milieux corrosifs pour ralentir ou arrêter le processus de corrosion des métaux. En général, un inhibiteur doit être [9] :

- Réduit la vitesse de corrosion des métaux.
- Stable en présence d'autres constituants de l'environnement.
- Stable aux températures de fonctionnement.
- Efficace à faible concentration.
- Répond aux normes de non-toxicité.

- Peu coûteux.

### II.4.3. Classification des inhibiteurs

On les classe habituellement par domaine d'application, mécanisme réactionnel et par réaction partielle comme le montre l'organigramme suivant :

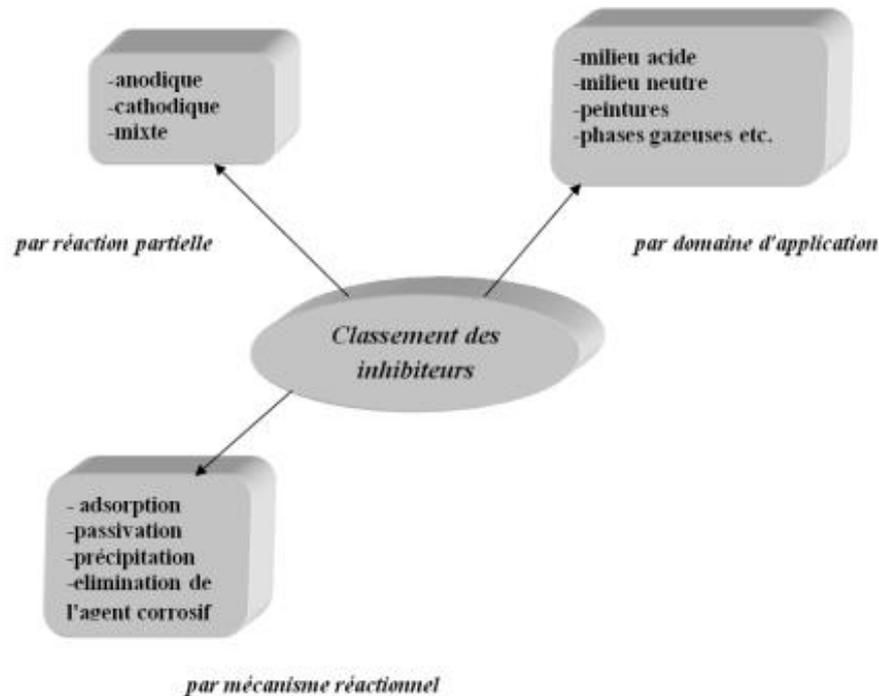


Figure II.1. Classement des inhibiteurs de corrosion [9].

### II.4.4. Domaines d'utilisation

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application à savoir :

- le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux des procédés industriels, eaux de chaudières, etc.).
- l'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport etc.
- les peintures où les inhibiteurs de corrosion sont des additifs assurant la protection contre la corrosion des métaux [8].

### II.4.5. Nature des inhibiteurs

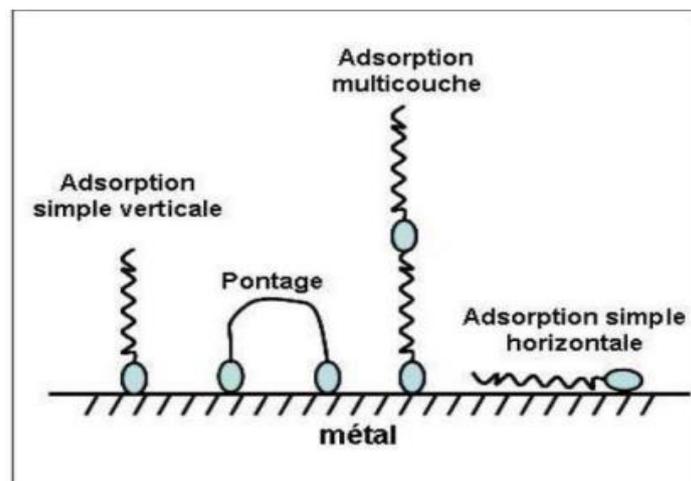
#### II.4.5.1. Inhibiteur organique

Les inhibiteurs organiques sont une classe très importante d'inhibiteurs de corrosion. L'efficacité ce type d'inhibiteur est liée à la structure, à la concentration et aux propriétés chimique des couches formées dans des conditions spécifiques.

L'effet des inhibiteurs organiques est le résultat de leur adsorption à la surface du matériau (**Figure II.2**). Après adsorption en surface, ils jouent un double rôle ralentissant à la fois les processus anodiques et cathodiques.

La plupart de ces inhibiteurs ont dans leur structure au moins un centre actif (les atomes N, S, P, O) susceptible d'échanger des électrons avec le métal, entre autres : l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre. Les groupes fonctionnels usuels permettant leur fixation sur le métal sont :

- \_ La radicale amine (-NH<sub>2</sub>).
- \_ Le radical mercaptan (-SH).
- \_ Le radical hydroxyle (-OH).
- \_ Le radical carboxyle (-COOH) [10].



**Figure II.2. Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique [10].**

#### II.4.5.2. Les inhibiteurs minéraux

Les molécules minérales sont utilisées généralement en milieu neutre/alcalin mais rarement en milieu acide. Les inhibiteurs se dissocient en solution et leurs produits de dissociation assurent les phénomènes d'inhibition ((anions ou cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type  $XO_4^{n-}$  tels que les chromates, les molybdates, les phosphates et les silicates, Les cations sont essentiellement  $Ca^{2+}$  et  $Zn^{2+}$  et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle  $OH^-$ .

Le nombre de molécules utilisées sera limité pour le moment, car l'environnement est souvent impacté négativement par l'efficacité de nombreux produits [11].

### **II.4.5.3. Les inhibiteurs verts**

On sait que les inhibiteurs verts font l'objet d'un grand intérêt dans l'industrie, et ce compte tenu de leur non-toxicité et de leur grande efficacité dans le domaine de la corrosion [12]. Un grand nombre de composés organiques ont été étudiés pour examiner leur potentiel d'inhibition de la corrosion. Toutes ces études montrent que les composés organiques, en particulier ceux contenant des atomes de N, S et O, présentent des effets inhibiteurs importants, et la plupart de ces composés sont non seulement coûteux mais également toxiques pour les organismes [13]. Ces effets toxiques ont conduit à envisager l'utilisation de produits naturels respectueux de l'environnement et inoffensifs comme des agents anticorrosifs. Des terres rares aux composés organiques, De nombreux inhibiteurs de corrosion respectueux de l'environnement ont été développés [12].

A ce jour, plus de 4000 articles ont traité des extraits naturels de différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines), comme inhibiteurs de corrosion, des métaux et leurs alliages, dans différents milieux corrosifs [14].

### **II.4.6. La biodégradabilité des inhibiteurs verts**

Un produit biodégradable est un produit qui se décompose naturellement après l'utilisation. La biodégradabilité est l'un des paramètres les plus importants caractérisant l'impact environnemental des produits organiques. Elle dépend de la capacité à se dégrader d'une part, et de la vitesse à laquelle le produit se décompose dans le milieu biologique d'autre part. Par exemple la décomposition complète d'une feuille de plante nécessite quelques semaines par contre une bouteille plastique nécessite environ 4 mille ans.

Chimiquement, la biodégradation aboutit à un processus dans lequel la structure chimique des composés organiques est progressivement simplifiée, dans lequel le carbone est minéralisé (sous forme de dioxyde de carbone) et des métabolites de poids moléculaire inférieur sont obtenus. Cependant, la capacité des écosystèmes à absorber les produits biodégradables est limitée, créant ainsi un risque d'engorgement, comme l'eutrophisation des étangs (pollution par les nitrates due à un excès de substances biodégradables contenant de l'azote) [14].

Vue de l'efficacité des composés antioxydants utilisés comme inhibiteurs durables pour la corrosion de différents métaux et alliages, nous avons choisi dans ce travail deux inhibiteurs naturels, qui sont :

- *Le Curcuma*
- *L'huile essentielle de Rosmarinus officinalis*

## II.5. Présentation du Curcuma

### II.5.1. Définition

Le Curcuma (*Curcuma longa*) est une plante herbacée rhizomateuse vivace de la famille des Zingibéracées de sud-Asie. A partir de ses rhizomes (**Figure II.3**) en poudre, on extrait l'épice homonyme. Le curcuma est spécialement présent dans la vie socioculturelle du sous-continent indien, où il est considéré comme une plante d'exception par rapport à ses multiples propriétés (épice, conservateur de nourriture, agent colorant, cosmétique et médicinal) [15].



**Figure II.3. Curcuma longa, Rhizome et poudre de curcuma [16].**

### II.5.2. Utilisation dans le domaine de la corrosion

Le Curcuma a été utilisé avec succès comme inhibiteurs de corrosion verts pour de nombreux métaux. Il a également été utilisé comme inhibiteur de corrosion vert, un inhibiteur de l'aluminium et un inhibiteur de l'Al commercial dans la solution de pores de béton simulée.

De plus, l'inhibition de la corrosion de l'acier par un extrait aqueux de Curcuma s'est révélée efficace. L'efficacité inhibitrice de l'extrait aqueux de poudre de rhizome de plante (*Curcuma longa*) a été utilisée comme inhibiteur de corrosion contre la corrosion de l'acier au carbone dans l'eau de mer grâce à une étude de perte de poids [17].

### II.5.3. Effet anti-oxydant du curcuma

Le Curcuma est un antioxydant qui piège Les radicaux libres, il a une capacité à inhiber la formation d'espèces oxygénées actives à mieux développer comme les radicaux hydroxyles et l'anion superoxyde [18].

## II.6. Présentation du *Rosmarinus officinalis*

### II.6.1. Définition

Le romarin tire son nom de rose de mer uniquement du fait qu'il pousse a grandi spontanément au bord de la mer. C'est un arbuste de 50 cm à 1 m voire plus, toujours vert (**Figure II.4**), très aromatique, très ramifié et très feuillu. Les fleurs sont bleu pâle ou blanches. Son écorce est pelée sur les vieilles branches et l'odeur est extrêmement aromatique et persistante. La floraison commence en février (parfois janvier) et se poursuit en avril-mai [19].



**Figure II.4. Rosmarins officinalis [20].**

### II.6.2. Effet anti oxydant du Rosmarinus

L'activité antioxydante de romarin est connue depuis environ 30 ans. Le romarin est largement considéré comme l'épice ayant la plus grande activité antioxydante. Plusieurs auteurs ont étudié l'utilisation de l'extrait de romarin comme antioxydant pour conserver les produits viande [19].

### II.6.3. Méthode d'extraction des huiles essentielles

Il existe plusieurs techniques d'extraction, dans notre travail nous avons utilisé l'hydrodistillation (**Figure II.5**).

Cette technique est utilisée depuis longtemps à cause de sa simplicité pour l'extraction des huiles à partir des feuilles et des fleurs fraîches ou séchées [21]. Dans cette technique la matière végétale est immergée directement dans un ballon rempli d'eau et placé sur une source de chaleur pour l'ébullition. Au cours d'ébullition, les vapeurs hétérogènes seront montées et condensées dans un réfrigérant. L'huile essentielle généralement plus légère que l'eau donc il y a une différence de densité permet la séparation entre l'huile et l'hydrolat [22].

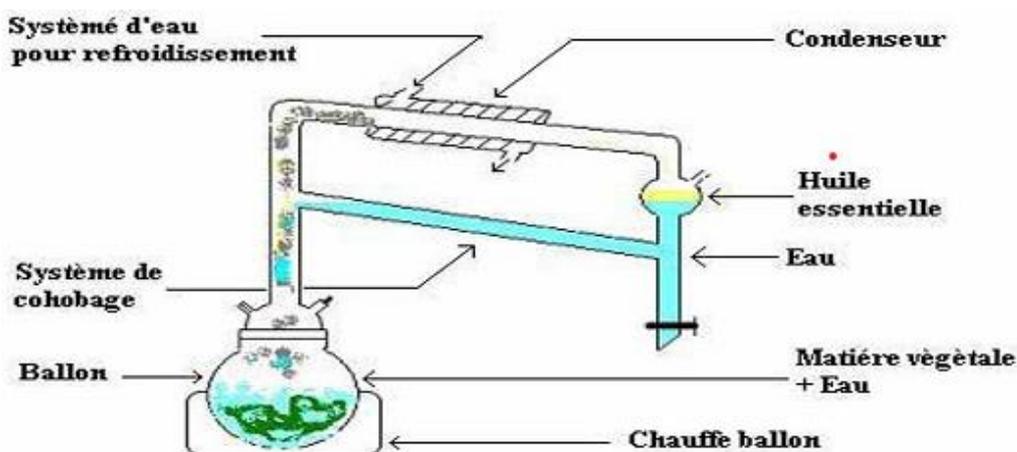


Figure II.5. Appareillage utilisé pour l'hydrodistillation [23].

#### II.6.4. Les huiles essentielles

Les huiles essentielles (H. E.) sont des complexes naturels contenant des molécules volatiles et odorantes, synthétisées par les cellules sécrétrices des plantes aromatiques. Celles-ci les conservent dans des poches au niveau de certains organes. La composition des huiles essentielles est très complexe par plusieurs centaines de molécules chimiques différentes [22].

La définition qui semble la plus universellement acceptée est la suivante « huile obtenue suite à l'extraction de la matière végétale à la vapeur d'eau » [23].

#### II.7. Mode d'évaluation des inhibiteurs de corrosion

Les méthodes d'évaluation des inhibiteurs de corrosion sont très nombreuses, Dans notre travail, nous avons utilisé la méthode électrochimique « les courbes de polarisation ».

L'étude électrochimique du comportement des aciers dans un milieu corrosif en absence ou en présence d'inhibiteur, est basée essentiellement sur les tracés des courbes

de polarisation  $i = f(E)$  (**Figure II.6**) et les droites de Tafel (**Figure II.7**)[24].

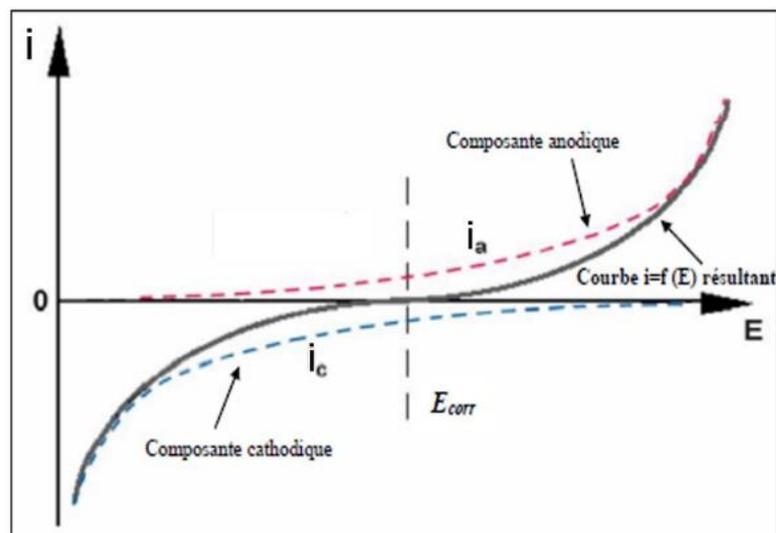
- **Courbes de polarisation intensité- potentiel**

La courbe de polarisation consistant à faire varier de façon continue le potentiel appliqué à l'électrode de travail depuis le domaine cathodique jusqu'au domaine anodique en enregistrant pour chaque valeur de potentiel et la valeur de la densité de courant. Mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique [25].

Cette méthode Figure II.6 permet une détermination précise des paramètres électrochimiques des métaux au contact d'un l'électrolyte, à savoir : la vitesse instantanée de corrosion ( $V_{corr}$ ), le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ), les pentes de Tafel, les résistances de polarisations ( $R_p$ ), les courants limites de diffusion [26].

Pour déterminer la courbe de polarisation il est nécessaire dans cette méthode d'utiliser un montage de trois électrodes :

- une électrode de travail (dans notre cas acier A37 « le fer »)
- une électrode de référence (calomel saturé « chlorure de potassium »),
- une électrode auxiliaire.



**Figure II.6. Courbe de polarisation  $i=f(E)$  [27].**

- **Droites de Tafel**

Pour déterminer expérimentalement les paramètres cinétiques  $I_{corr}$  et  $E_{corr}$ , la représentation logarithmique de la densité de courant est préférable (méthode de Tafel) car elle permet de mettre en évidence la présence d'une relation linéaire entre  $\log i = f(E)$  et le potentiel. En fait, la relation entre le courant de corrosion et le potentiel est donnée

par la formule simplifiée de l'équation de Butler-Volmer [28].

$$I = I_a + I_c = I_{corr} [ \exp((1 - a_c) \frac{nF}{RT} \eta) - \exp(-a_c \frac{nF}{RT} \eta) ] \quad (\text{Eq. II.1})$$

$I_a$  et  $I_c$  : les densités des courants partiels anodique et cathodique.

$\alpha$ : le coefficient de transfert de charge cathodique.

$I_{corr}$ : densité de courant de corrosion.

F: la constante de Faraday.

R: la constante universelle des gaz parfaits.

T: la température absolue.

n: le nombre d'électrons transférés.

$\eta$ : La surtension ( $\eta = E - E_{corr}$ ).

Afin de déterminer expérimentalement les paramètres cinétiques  $I_{corr}$ ,  $E_{corr}$ ,  $\beta_a$  et  $\beta_c$ , une représentation logarithmique de la densité de courant est préférable [28].

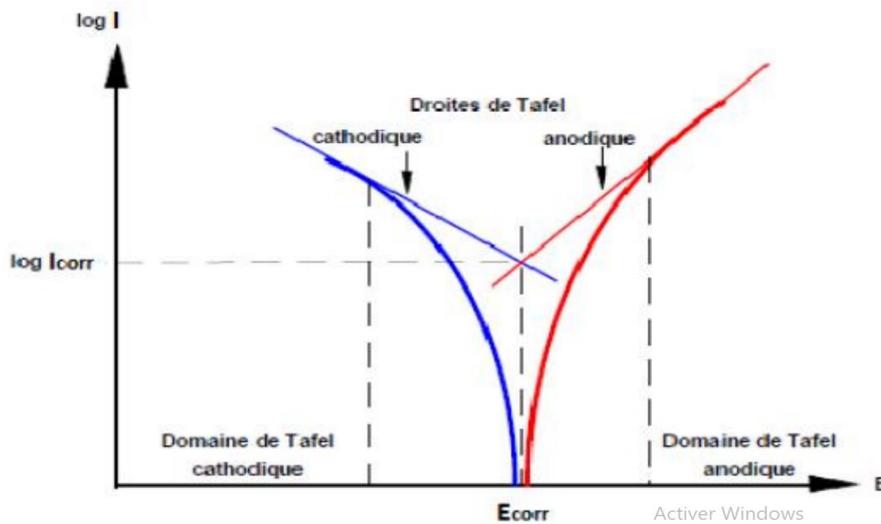


Figure II.7. Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel [24].

On définit les coefficients de Tafel anodique et cathodique respectivement comme suit :

$$\beta_a = \frac{RT}{(1 - a_c)nF} \quad (\text{Eq. II.2})$$

$$\beta_c = \frac{RT}{a_c nF} \quad (\text{Eq. II.3})$$

L'équation (II.1) devient :

$$I = I_a + I_c = I_{corr} \left[ \exp\left(\frac{1}{\beta_a} \eta\right) - \exp\left(-\frac{1}{\beta_c} \eta\right) \right] \quad (\text{Eq. II.4})$$

On appelle domaine de Tafel anodique le domaine de potentiel qui correspond à  $\eta > 0$  ( $E \gg E_{corr}$ ), la relation (Eq. II.4) devient :

$$I \approx I_a = I_{corr} \exp\left(\frac{\eta}{\beta_a}\right) \quad (\text{Eq. II.5})$$

$$\text{L'équation de droite de Tafel anodique : } \mathbf{Log I_a} = \frac{\eta}{2.3\beta_a} + \mathbf{Log I_{corr}} \quad (\text{Eq. II.6})$$

$$\text{La pente de droite de Tafel anodique est égale : } \mathbf{b_a} = \frac{1}{2.3\beta_a} \quad (\text{Eq. II.7})$$

On appelle domaine de Tafel cathodique le domaine de potentiel qui correspond  $\eta < 0$  ( $E \ll E_{corr}$ ), l'équation (Eq. II.4) devient :

$$I \approx I_c = - I_{corr} \exp\left(-\frac{\eta}{\beta_c}\right) \quad (\text{Eq. II.8})$$

$$\text{L'équation de droite de Tafel cathodique : } \mathbf{Log I_c} = \frac{\eta}{2.3\beta_c} + \mathbf{Log I_{corr}} \quad (\text{Eq. II.9})$$

$$\text{La pente de droite de Tafel cathodique est égale : } \mathbf{b_c} = -\frac{1}{2.3\beta_c} \quad (\text{Eq. II.10})$$

## Conclusion

Les inhibiteurs verts respectueux de l'environnement sont devenus importants en tant que source d'énergie renouvelable et biodégradable. Ils sont efficaces pour inhiber le métal dans différentes solutions agressives.

**PARTIE II :**  
**CONTRIBUTION A LA**  
**PROTECTION CONTRE LA**  
**CORROSION DE L'ACIER A37**

# PROBLEMATIQUE

Aujourd'hui, la prévention contre la corrosion est une problématique importante pour l'emploi à l'échelle industrielle des matériaux métalliques. Il existe de nombreuses mesures préventives parfois concurrentielles pour assurer leur protection telles que les revêtements, la protection électrochimique (cathodique ou anodique) et/ou les inhibiteurs de corrosion.

L'inhibition de la corrosion est une alternative très appréciée pour lutter contre les attaques corrosives. Un grand nombre de composés organiques ont été étudiés et utilisés en tant qu'inhibiteurs de corrosion. En dépit de l'efficacité avérée et reconnue de ces inhibiteurs organiques, ils présentent néanmoins des activités nuisibles à l'encontre de la santé publique et de l'environnement. Récemment, l'utilisation de ces inhibiteurs nocifs à l'écosystème a été fermement dénoncée et proscrite par diverses réglementations internationales [1].

Par conséquent, ces derniers temps, l'attention des chercheurs s'est portée sur l'utilisation d'inhibiteurs verts de corrosion respectueux de l'environnement ou, souvent dits, amis de l'environnement, de nature biologique.

Le complexe FERTIAL de Annaba, producteur et exportateur d'engrais azotés et phosphatés, utilise dans ses différentes unités la vapeur produite par les chaudières. Ces derniers reçoivent de l'eau d'alimentation qui est un mélange en proportions variables d'eau d'appoint et de vapeur condensée récupérée après utilisation. Si cette eau n'est pas correctement traitée, des phénomènes surviennent qui altèrent la fiabilité du matériel, perturbent son fonctionnement et augmentent les coûts d'exploitation. Les principaux inconvénients résultant d'un manque de traitement ou d'un traitement imparfait sont la corrosion et l'entartrage.

Afin d'éviter ce type de problèmes, le complexe utilise des inhibiteurs et oxydants en l'occurrence : la Morpholine, le Sulfite de sodium et le Phosphate trisodique. Par conséquent, en raison des préoccupations environnementales, les huiles et les extraits de plantes sont considérés de plus en plus comme une source d'inhibiteurs de corrosion verts.

Le travail présenté dans cette partie du mémoire s'articule en trois chapitres.

D'abord, nous avons comme objectif de contrôler les paramètres physico-chimiques de l'eau d'alimentation et de chaudière. Cela a pour but de s'assurer du respect des normes de cette eau. Ensuite, nous allons présenter l'inhibition de la corrosion de l'acier A37 par le Curcuma.

En fin, le dernier chapitre sert à tester l'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* comme inhibiteur vert de corrosion.

## **CHAPITRE III :**

### **Etude qualitative de l'eau d'alimentation et de la chaudière**

### III.1. Introduction

L'eau est largement utilisée dans l'industrie, elle est généralement polluée et chargée en suspension, déchets des végétaux, organismes et des sels. Ce qu'il impose un traitement pour assurer sa qualité et ses propriétés, c'est une étape importante avant l'entrée à la chaudière.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les analyses physico-chimiques réalisées au niveau du laboratoire de contrôle de qualité dans le complexe- FERTIAL dans le but de faire une étude qualitative de l'eau d'alimentation et l'eau de chaudière.

### III.2. Paramètres des analyses des eaux

Pour estimer la qualité de l'eau d'alimentation et de la chaudière, il faut mesurer le pH, le titre hydrotimétrique, les titres alcalimétrique et alcalimétrique complet de l'eau, les phosphates, la silice et la soude libre. Les méthodes d'analyses varient entre potentiométrique, volumétrique et spectrophométrique.

#### III.2.1. Le Titre Hydrotimétrique (TH)

Il représente la somme des concentrations en ion calcium et magnésium présents dans l'eau. Il s'exprime en degré français (°F). Cette mesure indique le risque de dépôt de tartre. On classe généralement le caractère des eaux de la manière suivante :

- ❖  $TH < 6 \rightarrow$  Eaux très douces.
- ❖  $6 < TH < 15 \rightarrow$  Eaux douces.
- ❖  $15 < TH < 30 \rightarrow$  Eaux moyennement dures.
- ❖  $TH > 30 \rightarrow$  Eaux dures.

#### *La dureté calcique $TCa^{2+}$ et magnésienne $TMg^{2+}$*

Le calcium ou dureté calcique exprime la concentration globale d'une eau en sels de calcium quel que soit l'anion associé. On l'appelle aussi quelquefois titre

Calcique  $\text{TCa}^{2+}$  de l'eau. On parle de même de la dureté magnésienne (ou Titre Magnésien,  $\text{TMg}^{2+}$ ) uniquement due aux sels de magnésium, dont :

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$$

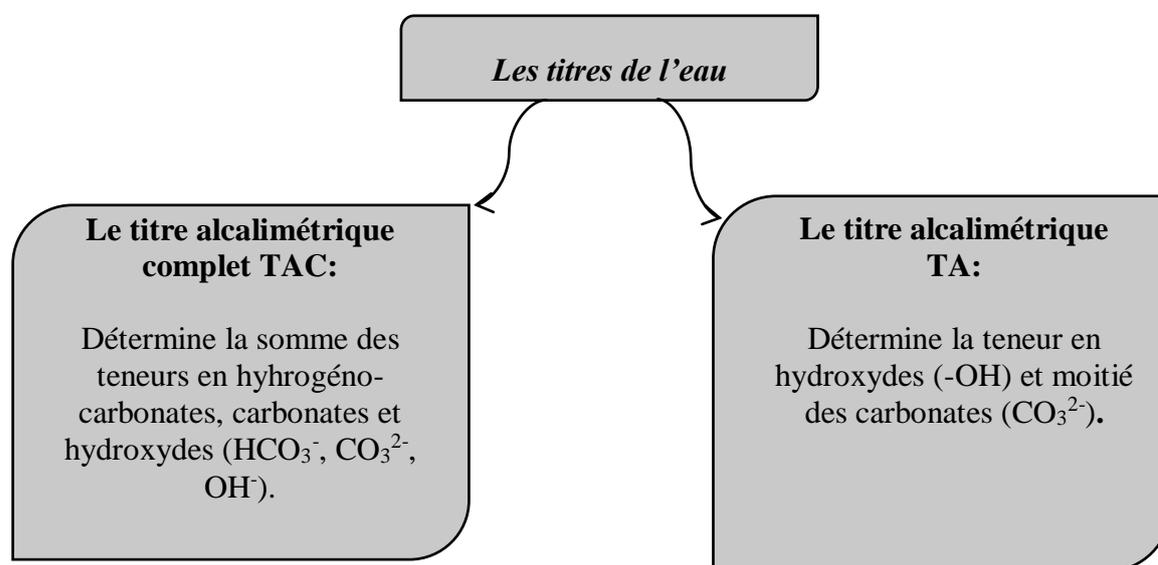
### III.2.2. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Il indique la concentration des ions hydrogène présents dans l'eau, c'est -à-dire si une eau est acide, basique ou neutre.

Le pH représente une notion importante de la détermination de l'agressivité de l'eau et la précipitation des éléments dissous. Il permet d'évaluer le caractère agressif ou incrustant d'une eau.

### III.2.3. Les Titres de l'eau

Ils représentent l'alcalinité d'une eau due à la présence des bases et des sels d'acides faibles, il y a deux types de titre, comme la montre la **Figure III.1**.



**Figure III.1. Organigramme présentant les titres de l'eau.**

Les réactifs utilisés pour la détermination des titres sont :

- **Indicateur PHENOLPHTALEINE à 1% :**

10g de phénolphtaléine [ $C_{20}H_{14}O_4$ ] (**Figure III.2**) dissout dans un litre d'éthanol à 95%, est utilisé pour la détermination de TA. Après l'ajout de deux gouttes de l'indicateur, si on développe une coloration rose, on verse l'acide nitrique  $HNO_3$  N/50 (**Figure III.3**) jusqu'à la décoloration complète de la solution.

- **Indicateur METHYLE ORANGE à 1 g/L :**

Dissoudre 1g dans un litre d'eau. Après l'avoir ajouté dans la même solution on continue à verser le même acide, jusqu'à le virage du jaune au jaune orangé.



**Figure III.2.** Les indicateurs utilisés pour la détermination des titres de l'eau.



**Figure III.3.** Montage expérimental pour la détermination des titres de l'eau.

### III.2.4. Les chlorures $\text{Cl}^-$

Les chlorures s'impliquent dans le phénomène de corrosion par piqûres. Elles s'expriment en mg/L. Ils sont dosés en milieu acide, à pH convenable, par du nitrate mercurique en présence de diphénylcarbazon, comme indicateur, selon la méthode titrimétrique.

Les réactifs utilisés pour la détermination des chlorures sont :

- Acide nitrique : solution titrée à 0,04N.
- Indicateur diphénylcarbazon.
- Nitrate mercurique.

### III.2.5. Les phosphates

L'ion orthophosphate forme avec le vanadomolybdate, en milieu sulfurique, un complexe phosphovanadomolybdique de couleur jaune. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un spectrophotocolorimètre. L'utilisation de tare optique de cet appareil permet d'espacer les étalonnages suivant la norme.

Le réactif utilisé pour la détermination des phosphates est le Vanadomolybdique à N/25.

### III.2.6. La silice

La silice ionisée forme un complexe silico-molybdique jaune en milieu acide avec le molybdate d'ammonium.

Les réactifs utilisés pour la détermination de la silice sont :

- Acide chlorhydrique : solution à (2/48) N (2ml HCl + 48 ml d'eau).
- Molybdate d'ammonium : solution à 100mg au litre.
- Sulfite de sodium : solution à 170 mg au litre.

### III.2.7. La soude libre

Après précipitation des carbonates et des phosphates par le chlorure de baryum, le TA résiduel, parfois appelé TA(OH), correspond à la soude libre. Ce TA résiduel, titré par un acide fort, est traduit par calcul de concentration de soude libre (NaOH).

Les réactifs utilisés pour la détermination de la soude :

- Chlorure de baryum à 10%.
- Acide chlorhydrique : solution à N/25.
- Phénoiphtaléine à 1%.

### III.3. Les résultats des analyses de l'eau d'alimentation

Les résultats des analyses de l'eau d'alimentation effectués au niveau du laboratoire durant le mois de février à 09h:00 sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau III.1. Les résultats des analyses de l'eau d'alimentation.**

Jours	pH	TH (°F)	TA (°F)	TAC (°F)
01/02/2023	8.30	0	TRS	0.50
02/02/2023	8	0	0	0.40
03/02/2023	8	0	0	0.40
04/02/2023	7.80	0	0	0.40
05/02/2023	7.80	0	TRS	0.40
06/02/2023	8.40	0	0.10	0.60
07/02/2023	8.30	0	TRS	0.50
08/02/2023	8.80	0	0.40	1.10
09/02/2023	8.20	0	0	0.40
10/02/2023	7	0	0	0.30
11/02/2023	8.20	0	0	0.40
12/02/2023	8.30	0	TRS	0.50
13/02/2023	7.80	0	0	0.40
14/02/2023	7.50	0	0	0.40
15/02/2023	8.30	0	0.05	0.50
16/02/2023	8.30	0	0.05	0.50
17/02/2023	8.40	0	0.1	0.60
18/02/2023	8.30	0	0.05	0.50
19/02/2023	8.30	0	0.05	0.50
20/02/2023	8.30	0	0.05	0.50
21/02/2023	8	0	0	0.40
22/02/2023	8	0	0	0.40
23/02/2023	8	0	0	0.40
24/02/2023	8.50	0	0.1	0.60
25/02/2023	8.40	0	0.1	0.60
26/02/2023	8.30	0	0.05	0.50
27/02/2023	8.40	0	0.1	0.60
28/02/2023	8.30	0	0.05	0.50

Le tableau ci-dessous regroupe les paramètres physique-chimique selon la norme :

Tableau III.2. La norme de l'eau d'alimentation [1].

Paramètre	Unité	Norme
pH	/	$\geq 8.50$
TH	°F	$<0.05$

### III.4. Représentation graphique des résultats des analyses de l'eau d'alimentation

#### III.4.1. Représentation graphique des résultats de pH

D'après la **Figure III.4** qui représente l'évaluation du pH de l'eau d'alimentation en fonction du période d'étude, on remarque que les valeurs de pH de tous les échantillons sont comprises entre 7 et 8,50. Ces valeurs ne respectent pas la norme.

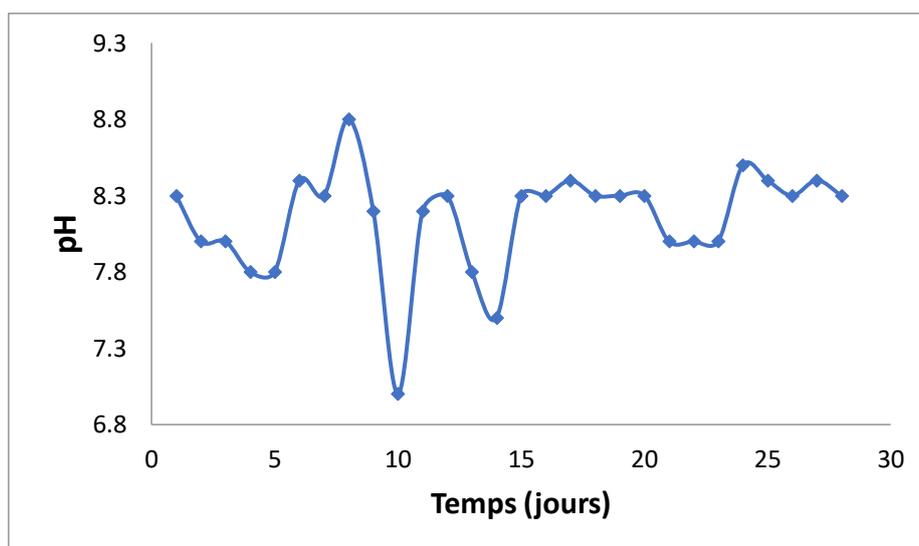


Figure III.4. Variation du pH de l'eau d'alimentation en fonction du temps.

#### III.4.2. Représentation graphique des résultats de TH

La **Figure III.5**. Représente l'allure de la variation de la dureté totale de l'eau d'alimentation en fonction de la période d'étude.

On constate que les valeurs de TH sont nulles, ce qui montre que la teneur en calcium et en magnésium est nulle, due à une bonne déminéralisation de l'eau.

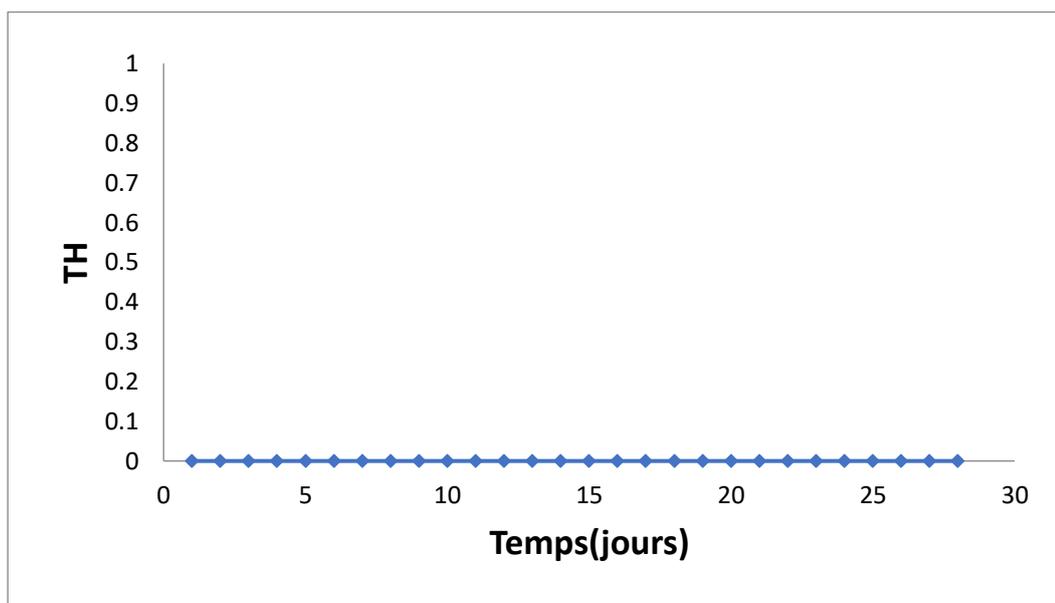


Figure III.5. Variation du TH de l'eau d'alimentation en fonction de temps.

### III.4.3. Représentation graphique des résultats de TA

D'après la Figure III.6, on remarque que la mesure de titre alcalimétrie simple TA varie de 0 à 0,4.

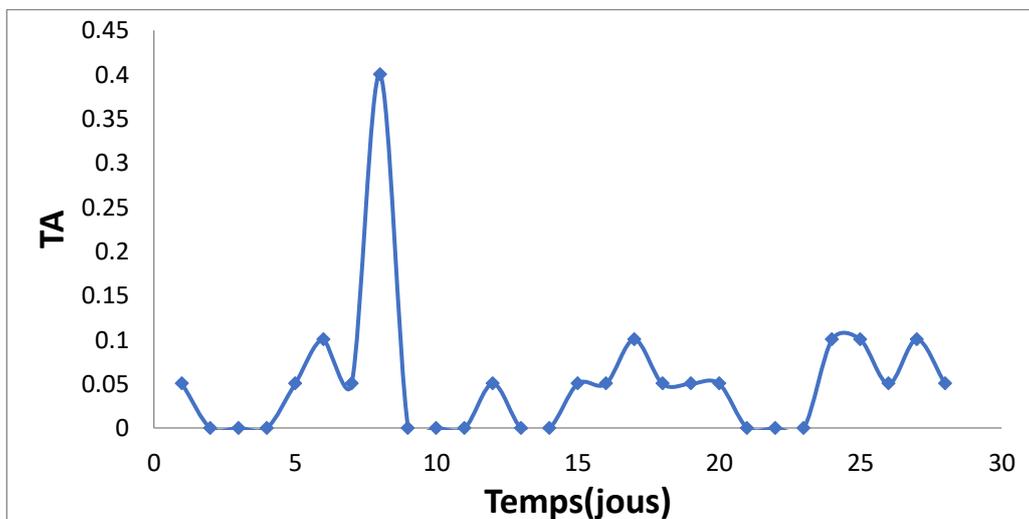
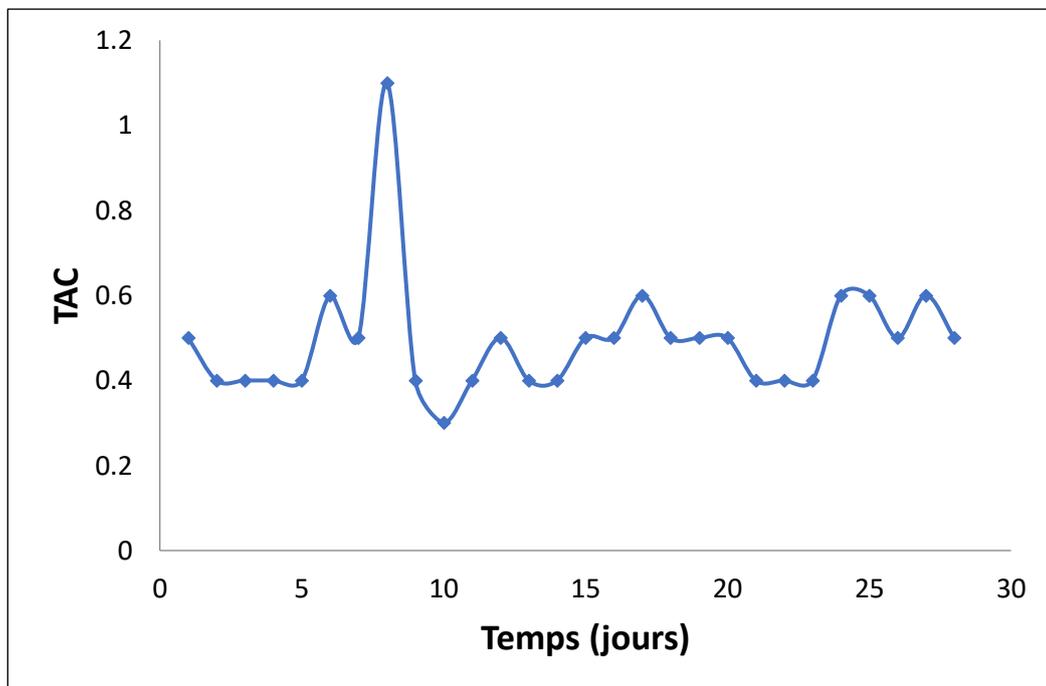


Figure III.6. Variation du TA de l'eau d'alimentation en fonction de temps.

### III.4.4. Représentation graphique des résultats de TAC

Ce paramètre permet de déterminer la teneur en bicarbonates, carbonates et éventuellement en hydroxydes contenus dans l'eau.

Nous remarquons que les valeurs sont variables et comprise entre 0,3°F et 1,10°F. Ces fluctuations est peut-être dû au mauvais traitement de l'eau d'alimentation. D'où la possibilité de formation de dépôts dans la chaudière.



**Figure III.7. Variation du TAC de l'eau d'alimentation en fonction de temps.**

### **III.5. Les résultats des analyses de l'eau de chaudière**

L'eau d'alimentation subit un traitement chimique par injection des produits comme le phosphate trisodique et la morphine avant qu'elle alimente la chaudière.

Les résultats des analyses de l'eau de chaudière effectuées au niveau du laboratoire durant le mois de février à 09h:00 sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau.III.3. Les résultats des analyses de l'eau de chaudière.**

Jours	pH	TH (°F)	TA (°F)	TAC (°F)	Cl (mg/l)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l)	NaOH (mg/l)
01/02/2023	10.2	0	2.2	4.5	0.9	3.95	17.75	3.2
02/02/2023	10	0	1.5	3	0.9	5.39	2.23	1.7
03/02/2023	10	0	1.8	3.5	0.9	3.95	12.98	1.6
04/02/2023	10.2	0	2.6	5	0.9	6.29	22.68	3.2
05/02/2023	10.2	0	2.4	4.9	1.35	6.11	21.48	3.2
06/02/2023	10.2	0	2.8	5.3	1.35	6.58	31.1	3.2
07/02/2023	10.2	0	2.7	5.6	1.35	5.64	29.48	3.2
08/02/2023	10.3	0	3.2	6.5	1.35	6.83	27	3.2
09/02/2023	10.2	0	2.8	6	1.35	6.79	25.36	3.2
10/02/2023	10.2	0	2.1	3.8	0.9	4.56	17.16	3.2
11/02/2023	10.2	0	1.6	3.2	0.9	3.38	13.12	3.2
12/02/2023	10	0	1.5	3.1	0.9	2.81	11.49	1.6
13/02/2023	10	0	1.4	3.1	0.9	2.87	8.95	1.6
14/02/2023	10.2	0	2.2	5.5	0.9	5	24.45	3.2
15/02/2023	10.3	0	4	7.5	1.35	7.08	28.94	4.8
16/02/2023	10.4	0	4.5	8.2	0.9	8.74	36.25	3.2
18/02/2023	10.5	0	6	11.8	1.35	7.76	43.86	4.8
19/02/2023	10.6	0	8	14	1.8	15.75	63.11	6.1
20/02/2023	10.3	0	8.5	15.5	2.25	11.97	61.03	6.4
21/02/2023	10.6	0	6.1	11.3	2.25	8.8	46.89	6.4
22/02/2023	10.3	0	3.8	7.6	1.35	8.77	31.9	6.4
23/02/2023	10.2	0	2.7	5.5	1.35	6.61	25.21	4.8
24/02/2023	10.3	0	3	6.5	0.9	9.2	32.97	3.2
25/02/2023	10.3	0	3.6	7.5	0.9	8.7	36.1	3.2
26/02/2023	10.2	0	2.1	4.6	0.9	4.56	18.94	3.2
27/02/2023	10.3	0	3.2	7	0.9	6.79	28.19	3.2
28/02/2023	10.3	0	3.3	6.9	0.9	6.83	32.07	3.2

Le tableau ci-dessous regroupe les paramètres physique-chimique selon la norme :

**Tableau III.4. La norme de l'eau de chaudière [2].**

Paramètre	Unité	Norme
TA	°F	<1
TAC	°F	1-3
TH	°F	00
Chlorure	mg/l	<5
pH	/	9-10,5
SiO <sub>2</sub>	mg/l	< 2

D'après les résultats récapitulés dans le tableau **III.3**, on observe que :

- , Les valeurs du pH de l'eau de la chaudière est presque stable et conforme à la norme, durant la période étudiée avec une valeur maximale de 10,6 et une valeur minimale de 10. Ce qui peut s'expliquer par un bon traitement de l'eau.
- Les valeurs des TA et TAC ne sont pas dans les normes. Les valeurs de TA varient entre 1,4 à 8,5°F et les valeurs de TAC varient entre 3 à 15,5°F, ce qui signifie que les alcalins libres et les carbonates existent dans l'eau avec des quantités très élevées.
- La dureté est nulle dans cette période.
- Les teneurs en ion chlore de l'eau de chaudière varient dans les normes, ils sont entre 0,9 à 2,25 mg/L
- Les teneurs en phosphate ne sont pas stables. On observe qu'il y a de nombreuses fluctuations à cause d'une mauvaise préparation de la solution et une mauvaise régulation de la pompe doseuse.
- La présence de silice avec une teneur qui dépasse la norme exigée durant toute la période d'étude, cela provoquera forcément des dommages dans le circuit à cause de dépôt de silice sur les parois de la chaudière.

## Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à l'étude de la qualité d'eau d'alimentation et de chaudière. Les résultats obtenus montrent que le pH et le TAC de l'eau d'alimentation dépassent les normes et que l'eau de chaudière est en mauvaise qualité

car le TA, TAC et la quantité de silice ne respectent pas les normes, ce qui provoque des dépôts de tartres et la corrosion des tuyaux.

Donc, on peut dire que le bon traitement et le conditionnement de ces eaux pour protéger les chaudières contre les phénomènes de corrosion sont indispensables.

L'utilisation des inhibiteurs verts de corrosion devenus de nos jours des agents attrayants. Si leur efficacité est prouvée, ces inhibiteurs pourraient être des substituts par excellence aux inhibiteurs de corrosion de nature chimique. C'est dans cette optique que s'inscrivent les travaux qui suit.

**CHAPITRE IV :**  
**Inhibition de la corrosion**  
**par le Curcuma**

## IV.1. Introduction

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Génie de l'environnement, département de Génie des procédés de l'université Badji-Mokhtar, Annaba.

L'objectif est consacré à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier A37 dans l'eau d'alimentation de la chaudière sans et avec différentes concentrations du Curcuma.

Ce chapitre décrit la méthode expérimentale et électrochimique utilisée dans cette étude. Une description du matériau, des solutions et de montage utilisé permet, dans un premier temps, de fixer une démarche expérimentale assurant une bonne reproductibilité des résultats. Les tests ont été conduits dans les mêmes conditions opératoires.

A l'aide des résultats obtenus, nous avons pu calculer l'efficacité inhibitrice pour chaque concentration afin de déterminer la concentration optimale qui assure une protection maximale de l'acier.

## IV.2. Matériels et Dispositif expérimental

### IV.2.1. Matériau utilisé

Les études sont effectuées sur un échantillon un acier A37 dont la composition chimique (%) est récapitulée dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1. Composition chimique de l'acier A37 (en % massique) [1].**

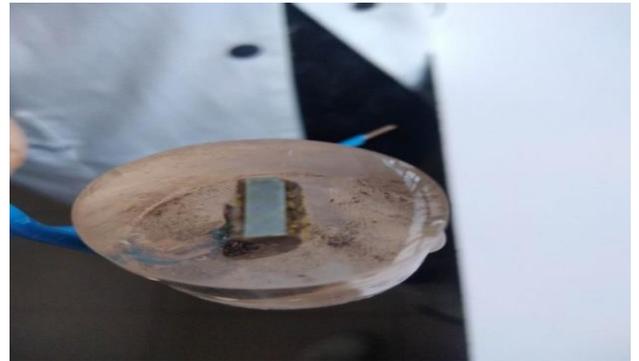
Elément	Fe	N	S	P	Mn	C
(m%)	98.3	0.009	0.045	0.045	1.40	0.17

### IV.2.2. Préparation des échantillons

Dans un premier temps, Les échantillons métalliques sont taillés de façon à présenter précisément  $0,44\text{cm}^2$  de surface. Par la suite, ils sont enrobés dans une résine inerte chimiquement et préparé en appliquant un polissage (**Figure IV.1**) avec une polisseuse mécanique munie d'un papier abrasif de différentes granulométries de (80,

120, 180, 240, 400, 800, 1200,2000) afin d'obtenir un état de surface adéquat.

Ensuite, les échantillons (**Figure IV.2**) sont nettoyés à chaque fois avant les essais électrochimiques à l'aide de l'eau distillée et l'acétone. On finit par un séchage à l'air afin d'éviter la formation immédiate des produits de corrosion. Ces traitements sont, nécessaires afin de rendre la surface chimiquement active.

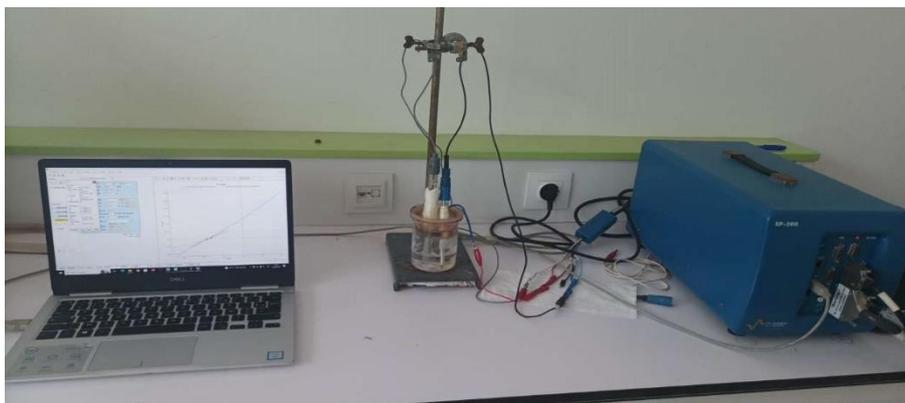


**Figure IV.1. Echantillon pendant le polissage [2].** **Figure IV.2. Echantillon utilisé**

### IV.2.3. Dispositif expérimental et cellule électrochimique

Le dispositif expérimental (**FigureIV.3**) utilisé pour les essais électrochimiques est composé de :

- Potentiostat / Galvanostat SP300 piloté par un micro-ordinateur avec un logiciel « EC lab ».
- Cellule électrochimique contient trois électrodes.



**Figure IV.3. Dispositif expérimental pour les mesures électrochimiques.**

#### IV.2.3.1. Potentiostat / Galvanostat SP300

Les mesures électrochimiques nécessaires pour tracer les courbes de polarisation sont obtenues avec un Potentiostat / Galvanostat SP300 (**Figure IV.4**) associé au

logiciel.

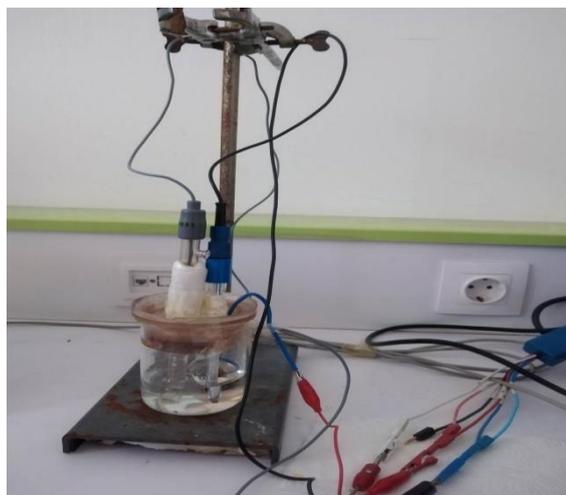
« EC Lab » qui assure le pilotage des séquences expérimentales, l'acquisition et le traitement des données. Le système est piloté par un micro-ordinateur.



**Figure IV.4. Potentiostat / Galvanostat SP300.**

#### IV.2.3.2. Cellule électrochimique

Les mesures électrochimiques ont été réalisées dans une cellule cylindrique en verre dont son volume est équivalent de 250 ml à trois trous des électrodes : l'électrode de travail, l'électrode auxiliaire et l'électrode de référence (**Figure IV.5**).



**Figure IV. 5. Cellule électrochimique à trois électrodes.**

##### *(a). Une électrode de référence*

Est une électrode en KCL saturé. Cette électrode (**Figure IV.6**) possède un potentiel spécifique, connu et constant, ce qui permet d'imposer un potentiel précisément défini l'électrode de travail.



**Figure IV.6. Electrode de référence.**

*(b). Une électrode auxiliaire*

Aussi connue sous le nom de contre-électrode (**Figure IV.7**) qui permet de boucler le circuit électrique dans la cellule électrochimique. C'est une électrode en platine, dont le rôle d'assurer le passage du courant dans la cellule de mesure.



**Figure IV.7. Electrode auxiliaire.**

*(c). Une électrode de travail*

C'est l'électrode sur laquelle on examine les différents processus électrochimiques à Explorer. Elle est conçue à partir d'une tige en fer. Cet acier est enrobé dans une résine qui permet de délimiter une section plane (surface étudiée) et évité toute infiltration d'électrolyte (**Figure IV.8**).

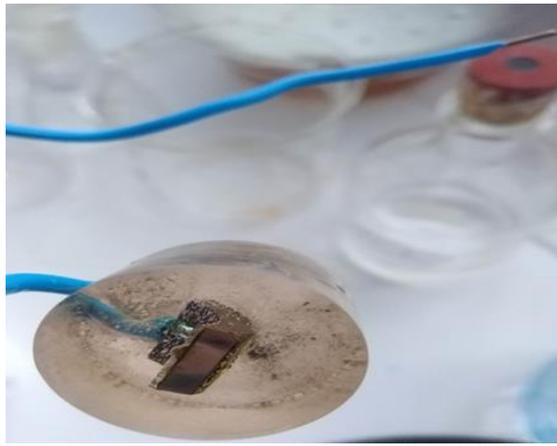


Figure IV.8. Electrode de travail.

### IV.3. Inhibition de la corrosion par le Curcuma

#### IV.3.1. Composition chimique de Curcuma

Pour 100 g de partie comestible, la poudre de Curcuma contient approximativement

Tableau IV.2. Composants contenus dans 100 g de Curcuma [3].

Composants	Quantités
Eau	11,4 g
Energie	1481 kJ (354 kcal)
Protéines	7,8 g
Lipides	9,9 g
Glucides	64,9 g
Dont Amidon :45 à 55% de la composition totale	
Fibres alimentaires	21,1 g
Ca	183 mg
Mg	193 mg
P	268 mg
Fe	41,4 mg
Zn	4,4 mg
Vitamine A	Traces
Thiamine	0,15 mg
Riboflavine	0,23 mg
Niacine	5,14 mg
Folate	39 µg
Acide ascorbique	25,9 mg

Il est riche aussi en Curcumine qui est une substance antioxydante de la famille des polyphénols. Parmi eux se trouvent des Curcuminoïdes, à l'origine de la couleur jaune orangé de cette épice [4].

### IV.3.2. Préparation des solutions

#### IV.3.2.1. Préparation des solutions de 1ppm à 7ppm

Pour la préparation de la solution mère (**Figure IV.10**), on prend 10mg de Curcuma (**Figure IV.9**) et les versés dans une fiole de 100 ml et compléter avec l'eau d'alimentation de chaudière.

Ensuite on prépare nos solutions inhibitrices à différentes concentrations (1ppm, 2ppm, 4ppm et 7ppm) avec une dilution par l'eau alimentaire selon la loi  $C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$

$C_1$ : la concentration initiale (100ppm).

$V_1$ : le volume à prendre de la solution mère.

$C_2$ : la concentration qu'on veut obtenir.

$V_2$  :80ml



**Figure IV.9. Poids de 10g de Curcuma. Figure IV.10. Solutions mère de 100 ppm.**

#### IV.3.2.2. Préparation des solutions de 10 ppm à 70 ppm

Cette fois, on va préparer une solution mère en mélangeant 150 ml d'eau alimentaire avec 15mg de Curcuma, ensuite on procéde à des dilutions avec l'eau alimentaire pour

avoir des concentrations en inhibiteurs allant de 10 ppm à 70 ppm.

## IV.4. Le protocole de mesure électrochimique

### IV.4.1. Courbe de polarisation

La courbe de polarisation est tracée à l'aide d'un potentiostat SP300, piloté par un ordinateur. Cet appareil permet de faire varier le potentiel de l'électrode de travail par rapport à une électrode de référence au calomel saturé (chlorure de potassium). Le potentiostat mesure l'intensité du courant qui circule entre l'électrode de travail et l'électrode auxiliaire quand le potentiel libre est stable. Les conditions utilisées pour tracer la courbe de polarisation sont présentée dans le tableau ci-dessous (**Tableau IV.3**).

**Tableau IV.3. Conditions utilisées pour tracer les courbes de polarisation.**

Potentiel initial	$E_{\text{abond}} - 700 \text{ mV}$
Potentiel final	$E_{\text{abond}} + 400 \text{ mV}$
Vitesse de balayage du potentiel	2 mV /s
Volume de l'eau alimentaire dans la cellule	80 ml

### IV.4.2. Mesure de la vitesse de corrosion

Il est possible de calculer la vitesse de corrosion par la méthode de Tafel. Il s'agit des courbes intensité-potentiel ou courbes de polarisation de l'interface métal|solution. Avant de tracer ces courbes, l'électrode de travail est maintenue à son potentiel d'abandon pendant 60 minutes et dans les mêmes conditions citées dans le tableau précédent (**Tableau IV.3**). Elles indiquent le type de l'inhibiteur (anodique, cathodique) suivant le sens de déviation du potentiel par rapport au potentiel mesuré en l'absence de cet inhibiteur. Si l'inhibiteur est à caractère mixte, aucune indication n'est donnée par la faible variation de potentiel.

L'efficacité inhibitrice  $E$  (%) est calculée en utilisant selon la formule :

$$E\% = \frac{V_{\text{corr}} - V'_{\text{corr}}}{V_{\text{corr}}} \times 100 \quad (\text{Eq IV.1})$$

Dans laquelle :

$V_{\text{corr}}$  est la vitesse moyenne de corrosion de métal utilisé en l'absence d'inhibiteur.

$V'_{\text{corr}}$  est la vitesse moyenne de corrosion de métal utilisé en présence d'inhibiteur.

On peut aussi utiliser l'expression suivante :

$$E\% = \frac{I_{\text{corr}} - I'_{\text{corr}}}{I_{\text{corr}}} \times 100 \quad (\text{Eq IV.2})$$

Dans laquelle :

$I_{\text{corr}}$  est l'intensité de courant de corrosion en l'absence d'inhibiteur.

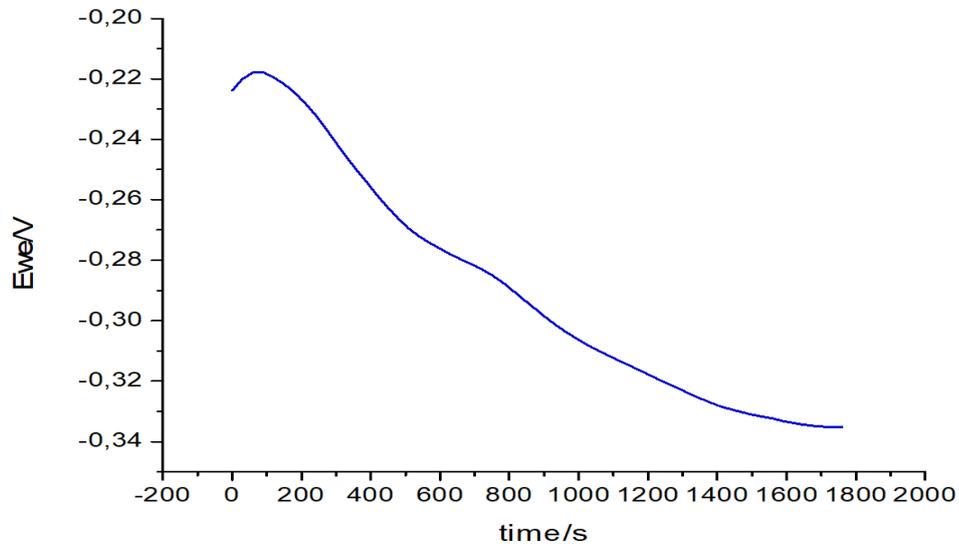
$I'_{\text{corr}}$  est l'intensité de courant de corrosion en présence d'inhibiteur.

## IV.5. Résultats et discussions

### IV.5.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP : Open Circuit Potential)

Dans cette méthode, nous avons suivi le potentiel en fonction du temps d'immersion d'acier dans l'eau d'alimentation de la chaudière Babcock (**Figure IV.11**), il est mesuré par rapport à un potentiel d'une électrode de référence à calomel saturé.

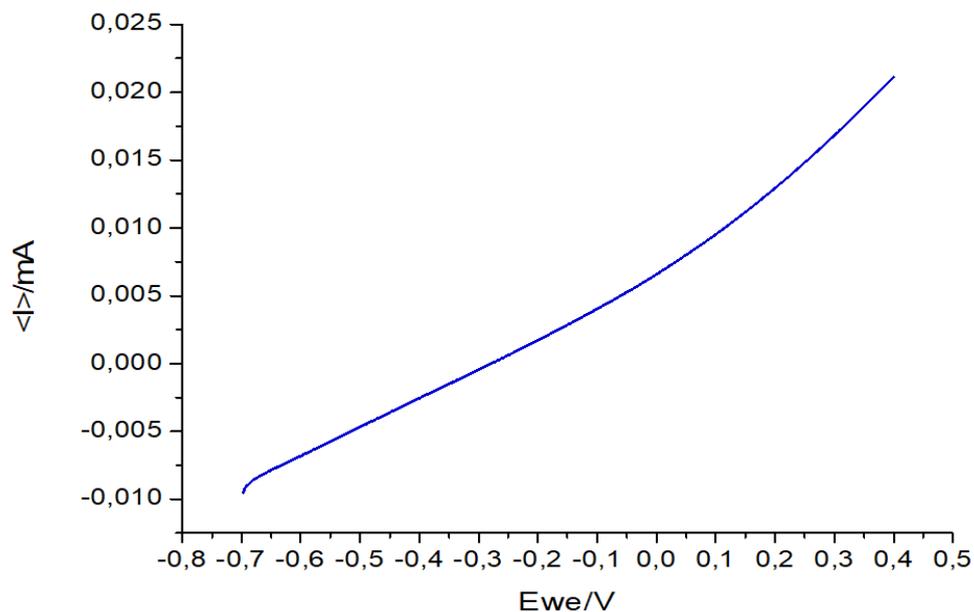
Cette mesure permet de connaître la durée d'immersion nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire nécessaire à l'utilisation des droites de Tafel. Le système électrochimique est équilibré lorsque le potentiel est constant en fonction du temps, ce qui signifie que le système a atteint son équilibre. Dans d'autres mots, nous pouvons dire que la vitesse d'oxydation est devenue égale à la vitesse de réduction. Nous avons atteint la stabilisation après environs 30 minutes, correspondante à une valeur du potentiel libre de "-0,336 mV" pour une vitesse de balayage du potentiel de 2 mV/s.



**Figure IV.11. Courbe de polarisation en circuit ouvert pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de chaudière avec 1ppm de curcuma.**

#### IV.5.2. Tracé des courbes de potentiel

L'étude est faite en mode potentiodynamique en appliquant à l'échantillon un potentiel qui varie de façon continue de -400 à +700mV/ECS avec une vitesse de balayage de 2 mV/s.



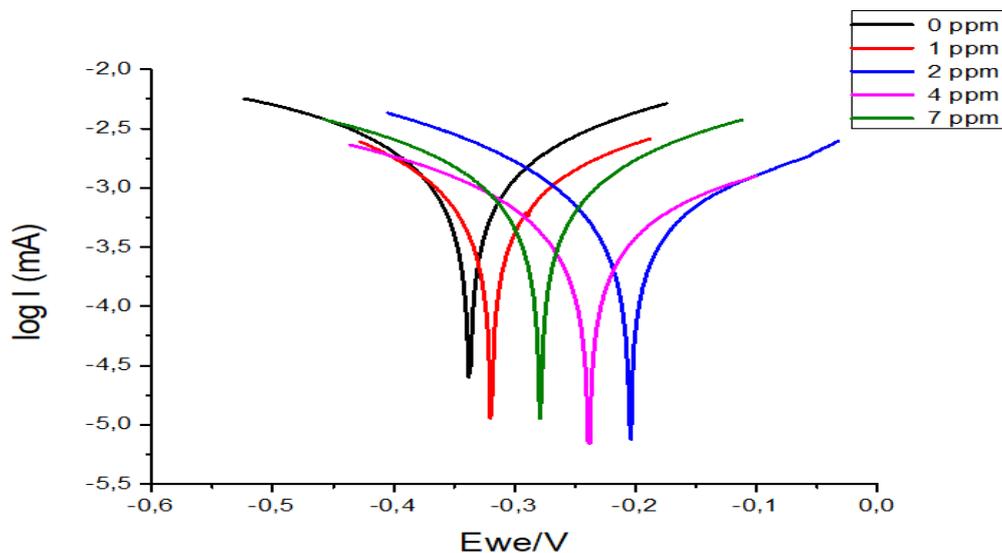
**Figure IV.12. Courbe d'intensité-potential pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de chaudière pour 1ppm de curcuma.**

Cette courbe nous permet de faire l'extrapolation des droites de Tafel pour déterminer les paramètres électrochimiques.

### IV.5.3. L'extrapolation des droites de Tafel

#### IV.5.3.1. L'extrapolation des droites de Tafel pour les faibles concentrations de 1ppm à 7ppm.

Le traçage des courbes de polarisation obtenus sans et avec l'injection de « Curcuma » comme inhibiteur de corrosion est présenté dans la figure ci-dessous, pour différentes concentrations de l'inhibiteur et qui sont : 1ppm, 2ppm, 4ppm et 7ppm.



**Figure IV.13. Courbes de polarisation de l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation chaudière avant et après l'injection de « curcuma » à des faibles concentrations.**

Nous remarquons que les valeurs du potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) sont déplacées vers des valeurs les plus positives [anodique] pour les concentrations de 1ppm, 2 ppm, 4ppm et 7ppm de Curcuma.

D'après ces résultats, il est clair que le Curcuma présente un comportement d'un inhibiteur anodique dans cet intervalle.

Les paramètres électrochimiques nécessaires pour étudier l'activité inhibitrice de « Curcuma » sont obtenus à partir des courbes de polarisation de la figure (IV.13) et qui sont représentés dans le tableau ci-dessous.

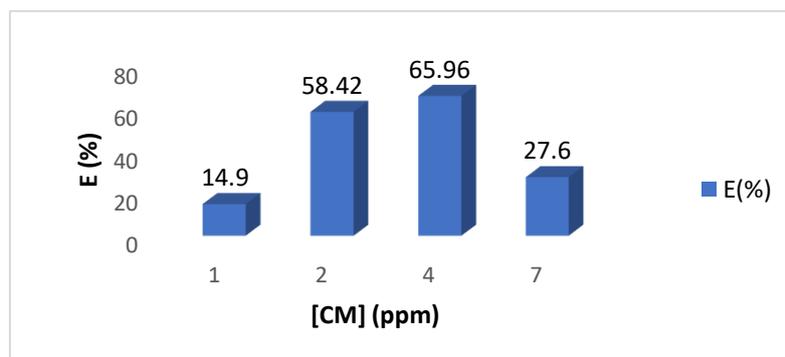
**Tableau IV.4. Les Paramètres électrochimiques tirés des courbes de polarisation à faibles concentrations de Curcuma.**

Concentrations (ppm)	$E_{corr}(mV)$	$I_{corrosion} (\mu A)$	$V_{corrosion} (mm/an)$	$R_p (kOhm)$	$E_I (%)$	$E_V (%)$
0	-338,422	1,181	0,0311185	31, 506	/	/
1	-318,096	1,005	0,0264811	46, 780	14,90	14,90
2	-202,558	0,491	0,0129375	92, 834	58,42	58,42
<b>4</b>	<b>-238,373</b>	<b>0,402</b>	<b>0,0105924</b>	<b>138, 550</b>	<b>65,96</b>	<b>65,96</b>
7	-280,822	0,855	0,0225287	64, 122	27,60	27,60

D'après le tableau précédant, on constate qu'avant l'injection d'inhibiteur (Curcuma), la vitesse de corrosion est la plus élevée, de l'ordre de 0,031 mm/an et une résistance de polarisation la plus faible ou on note une valeur de 31,506 KOhm. Aussi, on remarque que l'intensité du courant de corrosion est la valeur la plus l'élévée de l'ordre 1,181  $\mu A$ .

Après l'addition de l'inhibiteur, on remarque que la vitesse de corrosion diminue, une augmentation de la résistance de polarisation pour une concentration de 4 ppm atteint 138,550 kOhm avec une intensité de courant la plus petite de l'ordre de 0,402  $\mu A$ , ce qui représente le pouvoir protecteur du « Curcuma » à empêcher le phénomène de la corrosion dans l'eau d'alimentation. A cette concentration l'efficacité inhibitrice calculée par les deux équations (Eq.IV.1-Eq.IV.2) donne le même résultat ou on note une valeur de l'ordre 65,96%.

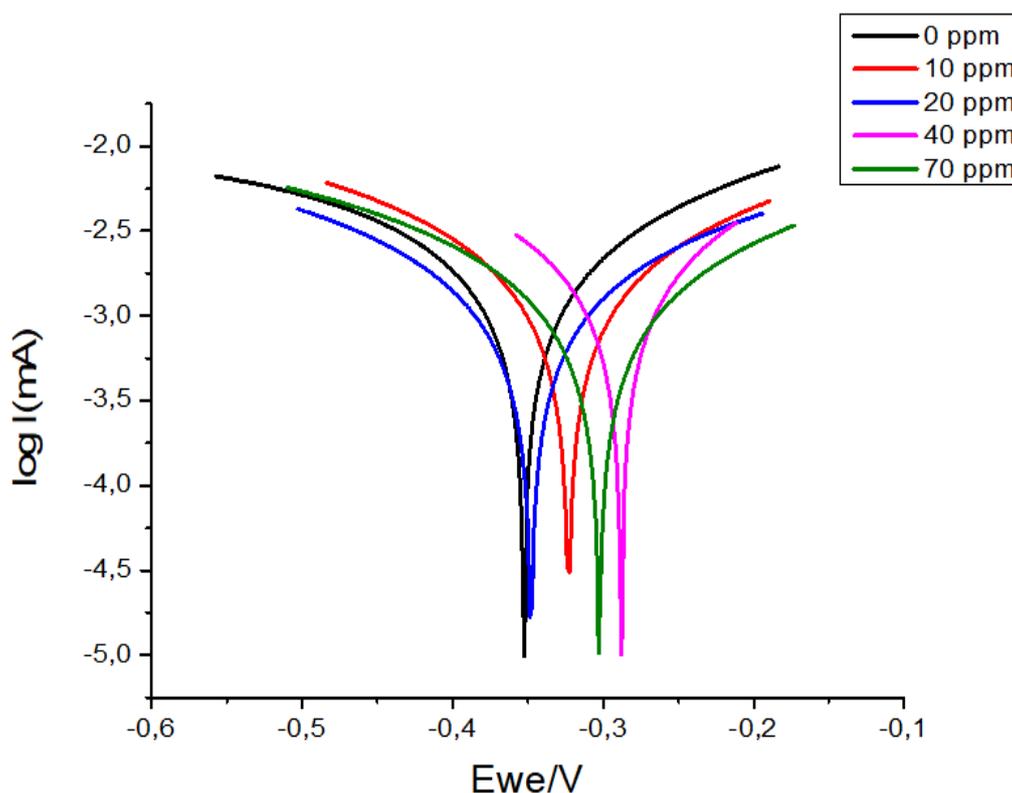
Afin de mieux illustrer ces résultats, nous avons pu tracer les histogrammes de l'efficacité inhibitrice en fonction de l'injection de curcuma à différentes concentrations.



**Figure IV.14. Effet d'injection des différentes concentrations de 1ppm à 7ppm de curcuma sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier dans l'eau d'alimentation de chaudière.**

### IV.5.3.2. L'extrapolation des droites de Tafel pour les fortes concentrations de 10 ppm à 70 ppm.

Les courbes de polarisation obtenus avant et après l'injection de « Curcuma » à des concentrations appartiennent à cette gamme (10ppm, 20ppm,40ppm et 70 ppm) sont représentées dans la figure ci-dessous (**Figure IV.15**).



**Figure IV.15. Courbes de polarisation de l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation chaudière avant et après l'injection de « Curcuma » à des fortes concentrations.**

D'après les courbes, on voit que les valeurs du potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) sont déplacées vers des valeurs les plus positives. Donc le « Curcuma » se comporte toujours comme un inhibiteur anodique dans l'intervalle entre 10 ppm à 70ppm.

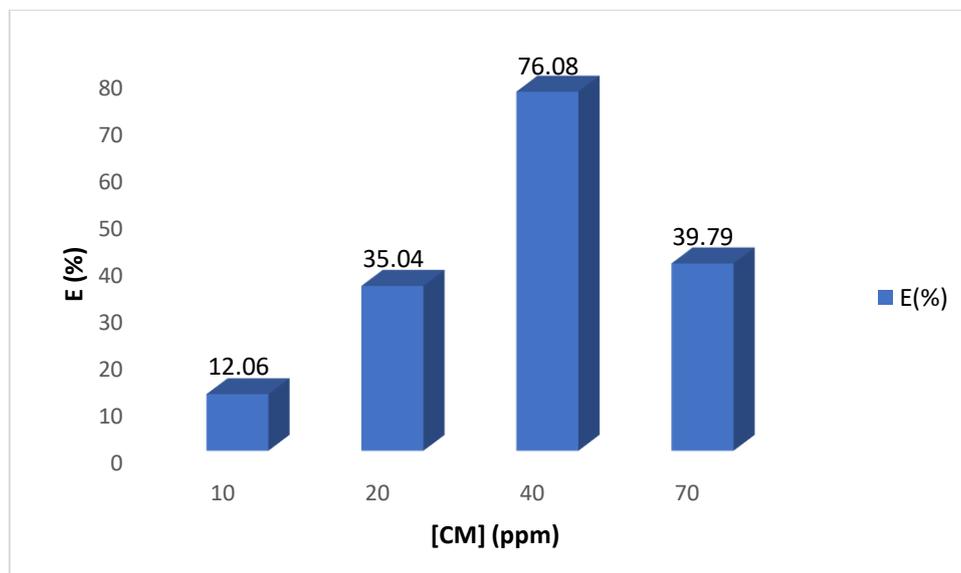
A partir de ces courbes, on peut tirer les résultats électrochimiques de corrosion qui sont récapitulée dans le tableau qui suit.

**Tableau IV.5. Les Paramètres électrochimiques tirés des courbes de polarisation de Curcuma à fortes concentrations.**

Concentrations (ppm)	$E_{corr}(mV)$	$I_{corrosion}(\mu A)$	$V_{corrosion}(mm/an)$	$R_p(k\Omega)$	$E_I(\%)$	$E_v(\%)$
0	-349,491	1,915	0,0504589	35,360	/	/
10	-324,408	1,684	0,0443723	38,246	12,06	12,06
20	-346,557	1,244	0,0327786	52,288	35,04	35,04
<b>40</b>	<b>-597,609</b>	<b>0,458</b>	<b>0,012068</b>	<b>57,621</b>	<b>76,08</b>	<b>76,08</b>
70	-304,650	1,153	0,0303808	52,383	39,79	39,79

Les paramètres électrochimiques déduits des courbes de polarisation potentiodynamique (**Tableau IV.5**), montrent que l'augmentation de la concentration de Curcuma inclut la diminution de la vitesse de corrosion, l'augmentation de la résistance de polarisation, la diminution du courant de corrosion jusqu'à la concentration de 40 ppm ou enregistre une efficacité inhibitrice maximale de l'ordre 76,08%. Ce qui traduit la formation d'un filtre inhibiteur à l'interface et d'empêcher par conséquent le phénomène de la corrosion.

Grace aux calculs de l'efficacité inhibitrice, on a pu représenter l'évolution de ce paramètre en fonction de la concentration de l'inhibiteur comme le montre la figure (**IV.16**)



**Figure IV.16. Effet d'injection de différentes concentrations de 10ppm à 70ppm de Curcuma sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion du l'acier dans l'eau d'alimentation de chaudière.**

## Conclusion

Cette partie de travail est consacré à l'étude de l'effet de « Curcuma » contre la corrosion de l'acier A37 dans l'eau d'alimentation par les deux techniques électrochimiques stationnaires à savoir : le tracé de la courbe OCP et la méthode potentiodynamique basée sur l'extrapolation des droites de Tafel.

Cette étude montre que « le Curcuma » se comporte comme un inhibiteur anodique dans les deux intervalles de concentration d'inhibiteur de 1 ppm à 7ppm et de 10ppm à 70ppm.

L'efficacité maximale obtenue avec le Curcuma égale 76,08% correspondante à 40ppm.

**CHAPITRE V :**  
**Inhibition de la corrosion par**  
**l'huile essentielle de Rosmarinus**  
**officinalis**

## V.1.Introduction

Ce chapitre a été dédié, pour une étude expérimentale de l'application d'une huile essentielle de Rosmarinus officinalis en tant qu'inhibiteur de corrosion de l'acier A37 dans l'eau d'alimentation de la chaudière.

Cette huile essentielle a été extraite par hydrodistillation dans un appareil de type Clevenger au laboratoire de recherche de Génie de l'environnement du département de génie des procédés de l'université d'Annaba.

Dans ce qui suit, nous allons présenter le mode d'extraction de l'huile essentielle de Rosmarinus ainsi que les résultats obtenus après qu'elle est utilisée en tant qu'inhibiteur vert en appliquant les mêmes méthodes électrochimiques stationnaire utilisées auparavant.

## V.2. L'huile essentielle de Rosmarinus officinalis

### V.2. 1.Composition chimique de Rosmarinus

Le Rosmarinus est relativement riche en l'huile essentielle (1 à 5%). Des études phytochimiques antérieures de cette espèce ont montré que cette plante accumule plus de 50 composants terpéniques qui rentrent dans la composition chimique d'huile essentielle de romarin dont les constituants principaux sont : camphre,  $\alpha$ -pinène, Bornéol et estérifié, 1,8 Cinéol Limonène [1,2].

Les composants contenus dans l'huile essentielle du romarin sont présentés dans le tableau ci-dessous (**Tableau V.1**).

**Tableau V.1. Composition chimique d'huile essentielle du Rosmarinus officinalis.**

Composant	Pourcentages %	Composant	Pourcentages %
Borneol	14.9	$\alpha$ -Pinéne	3.68
Terpinen-4-ol	3.33	Camphene	1.70
a-Terpineol	1.61	3-Octanone	0.83
Verbinone	0.56	Sabinene	1.94
PiperitoneBornylacetate	2.07	Myrcene	23.7
b-Caryophyllene	0.71	O-Cymene	3.08
cis-b-Farnesene	7.43	1,8-Cineole	2.68
GermacreneD	14.9	Linalool	1.26
a-Bisabolol	0.75	Myrceno	0.52
	4.97	l Camphor	1.01

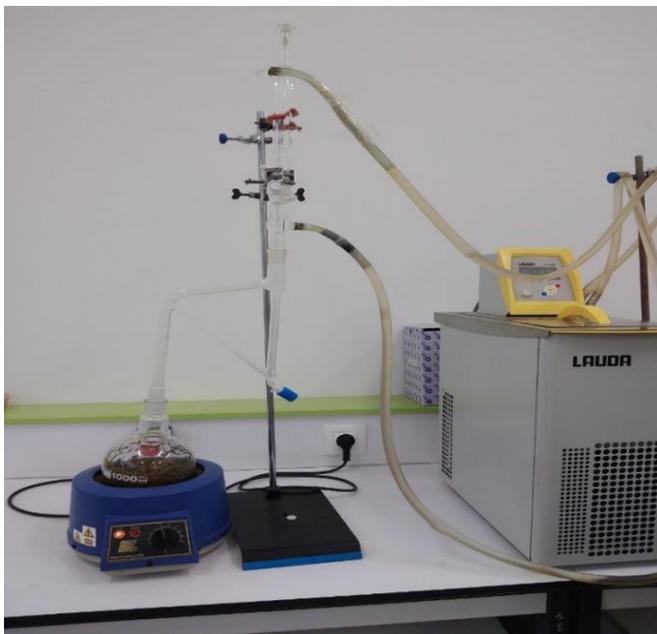
## V.2.2. Le mode d'extraction

Il existe plusieurs modes d'extraction des huiles essentielles à savoir la distillation, la percolation et l'hydrodistillation. Cette dernière fait l'objet de présent travail.

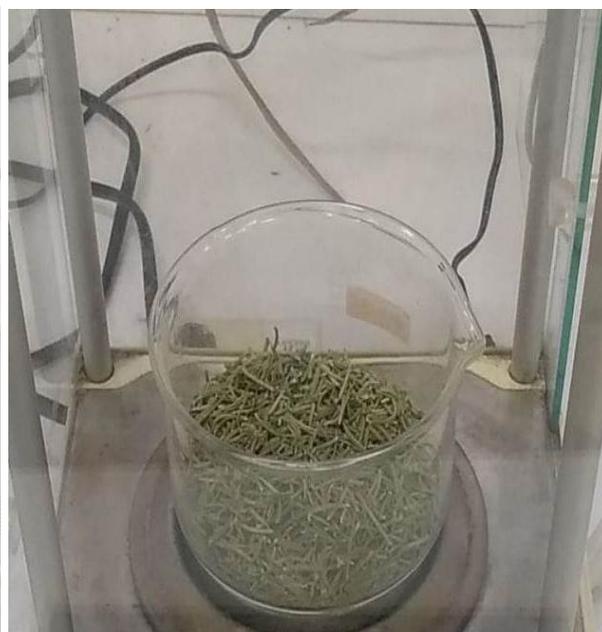
### V.2. 2.1. L'extraction d'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis*

L'extraction d'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* a été effectuée par Hydrodistillation (**Figure V.1**) où 40 g de matière végétale (**Figure V.2**) sont introduits avec 300 ml d'eau distillée dans un ballon de 1 litre. On chauffe le ballon par un réglage optimum du chauffage pour stabiliser l'extraction à une vitesse constante et bien maîtrisée.

L'ensemble est porté à ébullition pendant 3 heures. Les vapeurs chargées d'huile en traversant un réfrigérant, se condensent, la séparation d'huile essentielle se fait par une différence de densité. Enfin L'huile récupérée dans un béccher différente à celui de l'eau.



**Figure V.1. Montage utilisé pour l'extraction d'huile essentielle de *Rosmarinus officinalis* par la méthode d'hydrodistillation.**



**Figure V.2. Les feuilles de romarin séchées.**

### V. 2.2.2. Le rendement en huile essentielle

Le rendement en huile essentielle est le rapport entre la masse d'huile essentielle obtenue après l'extraction et la masse de la matière végétale utilisée en pourcentage selon la formule :

$$R = (m/m_0) \times 100 \quad \text{Eq IV.1.}$$

Tel que : m : masse d'huile essentielle en (g).

$m_0$  : masse de la matière végétale séchée en (g).

R : Rendement de l'huile essentielle en pourcentage.

Le rendement d'huile essentielle Rosmarinus officinalis calculé selon d'après **Eq IV.1** est égale à 30%.

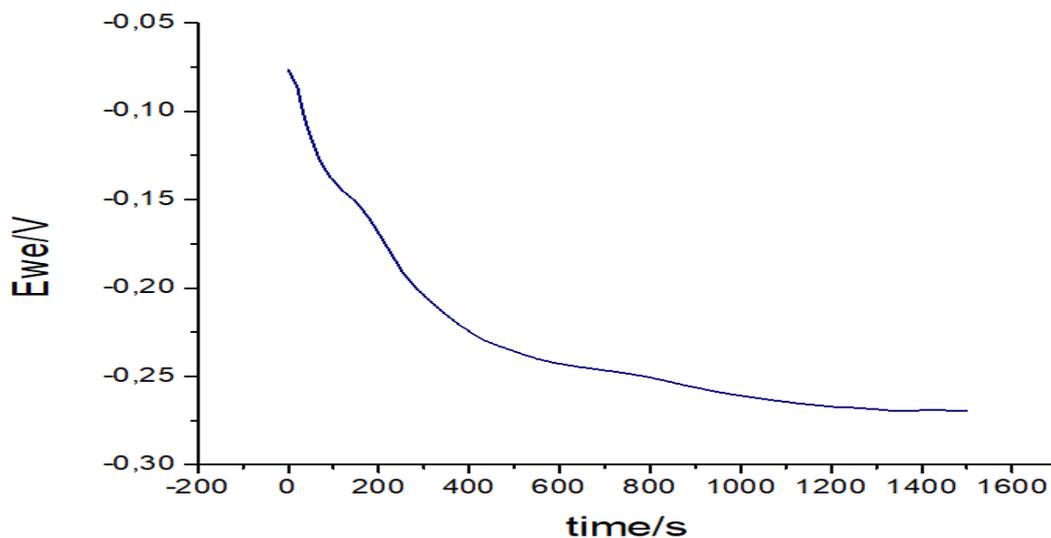
$$R = (1.2/40) \times 100$$

$$R = 0.30\%.$$

## V.3. Résultats et discussions

### V.3.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (OCP : Open Circuit Potential)

Dans cette méthode, nous suivons le potentiel en fonction du temps d'immersion de l'acier dans d'eau d'alimentation de la chaudière (**Figure V.3**).



**Figure V.3.** Courbe du potentiel en circuit ouvert (OCP) pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de chaudière avec 18.75 g/l de Rosmarinus officinalis.

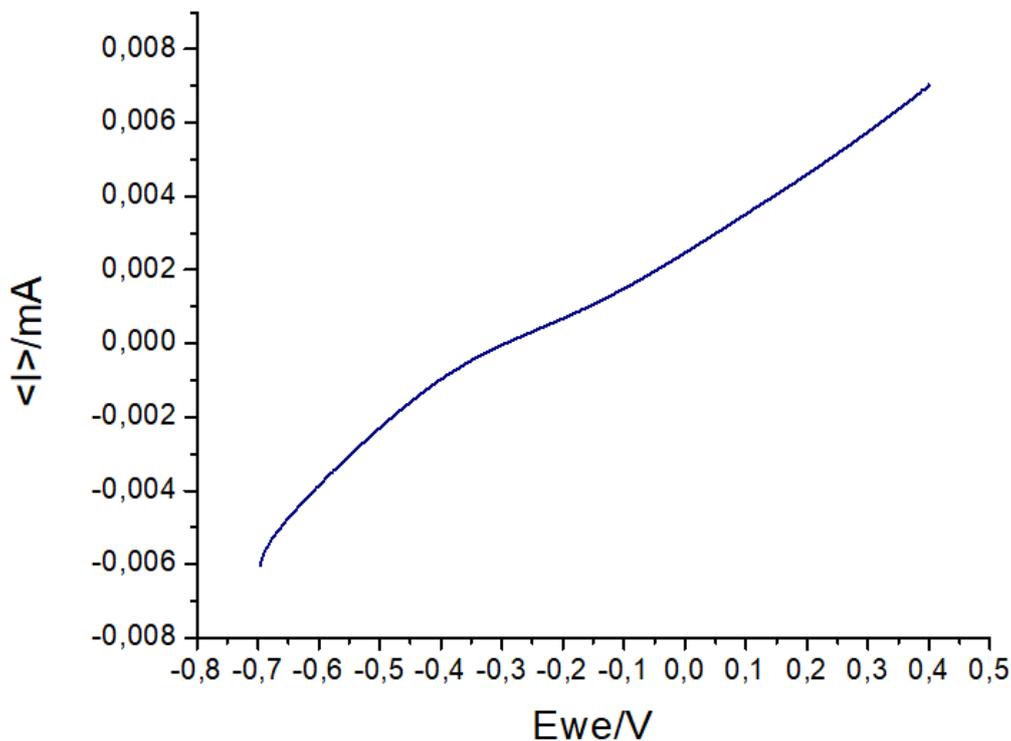
En absence de l'huile essentielle de Rosmarinus, on observe que la stabilisation du potentiel libre de l'acier A37 est atteinte après 30 min d'immersion.

Pendant les premières minutes d'immersion, une chute brusque de potentiel de circuit ouvert vers les valeurs négatives se produire jusqu'à une valeur stabilisée soit atteinte. Cette diminution du potentiel indique que le métal a été attaqué par dissolution continu.

### V.3.2. Courbe de polarisation Intensité-Potentiel

Ayant le même objectif, à savoir l'effet de l'inhibiteur sur les réactions anodiques et cathodiques pour le matériau A37, on a tracé les courbes de polarisation dans les mêmes conditions que pour le Curcuma.

La **Figure V.4** représente l'évolution de l'intensité du courant en fonction du potentiel pour une électrode d'acier immergée dans l'eau d'alimentation de chaudière avec une concentration d'inhibiteur de 18,75 g/l.

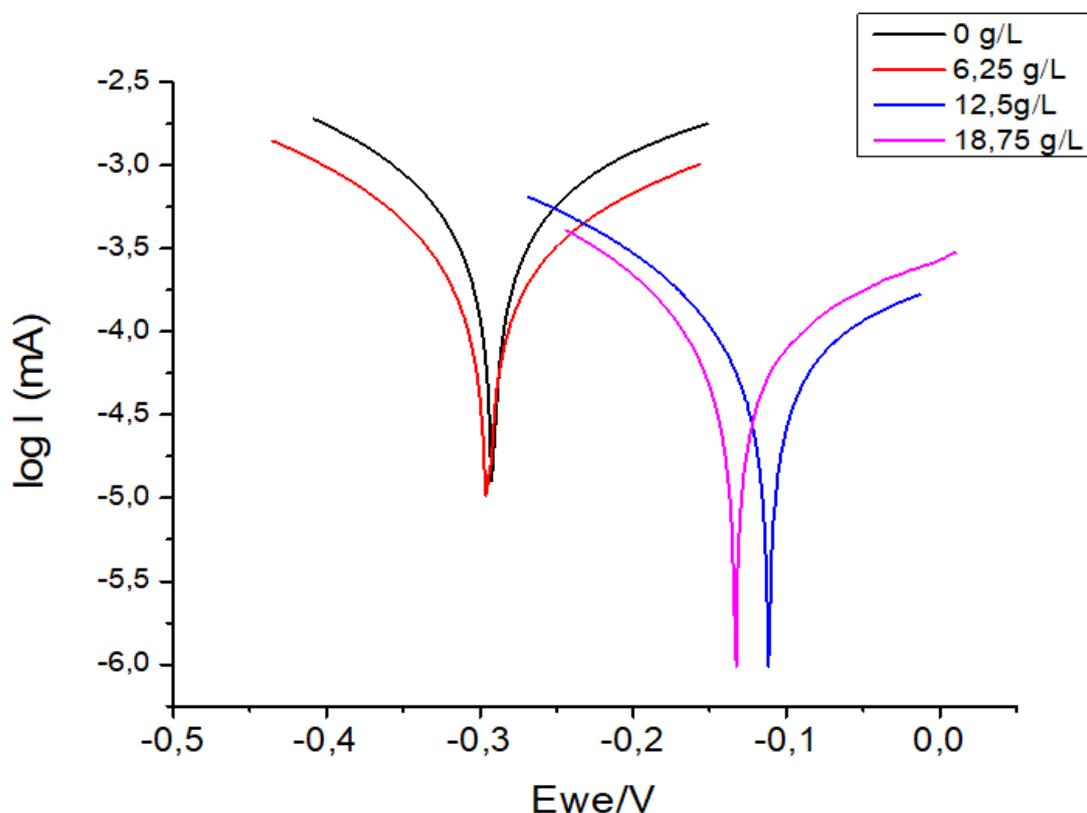


**Figure V.4. Courbe d'intensité-potentiel pour l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation avec une concentration de 18,75 g/l d'inhibiteur.**

D'après cette figure, il est clair que le système constitué de l'acier A37 et l'eau d'alimentation est un système rapide car n'existe pas de domaine de potentiel où les réactions de réduction et d'oxydation se produisaient simultanément.

### V.3.3. L'extrapolation de droite de Tafel

Les courbes de polarisation obtenus avant et après l'injection « d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » comme inhibiteur de corrosion à différentes concentrations [6,25g/l ; 12,5g/l et 18,75g/l] sur l'acier du A37, immergé dans l'eau d'alimentation de la chaudière, sont présentées sur la figure ci-dessous :



**FigureV.5. Les courbes de polarisation de l'acier A37 immergé dans l'eau d'alimentation de la chaudière avant et après l'injection « d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » à différentes concentrations.**

Ces courbes de polarisation montrent que le décalage de potentiel de concentrations est vers le sens positif pour les concentrations d'inhibiteur utilisées avec la diminution des intensités de courant des branches anodique et cathodique.

Ce comportement indique que l'inhibiteur se comporte comme un inhibiteur anodique

Le tableau ci-dessous (**Tableau V.2**) représente les valeurs des paramètres électrochimiques obtenus à l'aide des courbes de polarisation d'inhibiteur à différentes concentrations.

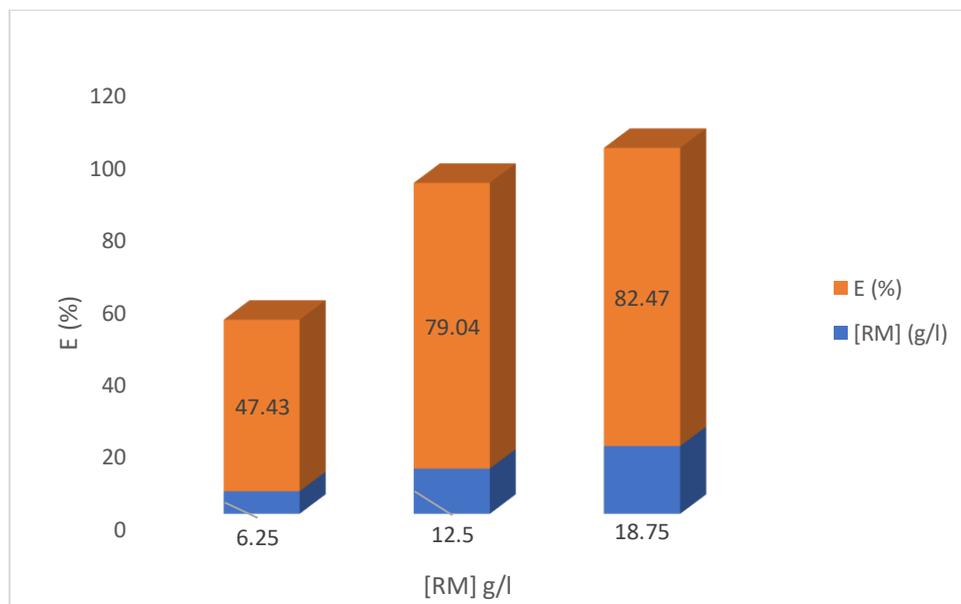
**Tableau V.2. Les paramètres électrochimiques avec et sans injection d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis et leur efficacité inhibitrice.**

<b>Concentration (g/L)</b>	<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	<b>I<sub>corrosion</sub> (μA)</b>	<b>R<sub>p</sub> (KOhm)</b>	<b>V<sub>corrosion</sub> (mm/an) x 10<sup>3</sup></b>	<b>E<sub>I</sub> (%)</b>	<b>E<sub>v</sub> (%)</b>
0	-292,105	0,525	95,067	13,8334	/	/
6,25	-295,056	0,276	173, 141	7 ,2724	47,43	47,43
12,5	-112,090	0,110	498, 199	2,89843	79,04	79,04
<b>18,75</b>	<b>-132,351</b>	<b>0,092</b>	<b>559, 321</b>	<b>2,42414</b>	<b>82,47</b>	<b>82,47</b>

D'après le tableau ci-dessus, on remarque que la valeur de ( $V_{corr}$ ) et ( $I_{corr}$ ) avant l'injection d'inhibiteur sont les plus élevées 00138334 mm/an et 0,525μA, avec la plus petite valeur de la résistance de polarisation 95,067 KOhm.

Après l'injection d'inhibiteur, on remarque que les valeurs de la vitesse de corrosion et la densité de courant sont diminuées chaque fois avec l'augmentation de la concentration de Rosmarinus et la valeur de la résistance de polarisation augmente chaque fois avec l'augmentation de la concentration d'inhibiteur. Les plus petites valeurs de la vitesse et l'intensité du courant dans le tableau sont 2,42414x 10<sup>-3</sup>mm/an et 0,092 μA avec la plus grande valeur de R<sub>p</sub> 559,321 KOhm correspondante à 18,75 g/l d'où on note une efficacité maximale égale à 82,47%.

Nous avons par la suite tracé les histogrammes (**Figure V.6**) de l'efficacité inhibitrice en fonction de l'injection d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis à différentes concentrations afin de mieux illustrer ces résultats.



**FigureV.6. Effet de l'injection de l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis sur l'efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier dans l'eau d'alimentation.**

L'efficacité inhibitrice de l'huile augmente avec l'augmentation de sa concentration, ce qu'il confirme que la substance utilisée dans notre étude peut s'adsorber sur la surface de l'acier A37.

Dans la plupart du temps, l'inhibiteur de corrosion fournit une couche protectrice qui aide à prévenir ou à ralentir le processus de corrosion.

### Conclusion

Cette partie de travail est consacré à l'étude de l'effet de « l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » contre la corrosion de l'acier A37 dans l'eau d'alimentation de la chaudière par les méthodes électrochimiques stationnaires.

Les résultats obtenus montrent que l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis est un inhibiteur de corrosion très efficacité de comportement anodique.

# **CONCLUSION GENERALE**

Le présent travail a été consacré à l'étude de l'inhibition contre la corrosion de l'acier **A37** utilisé pour la fabrication des tubes écrans de la chaudière dans l'eau d'alimentation par deux inhibiteurs naturels différents qui sont « Le Curcuma » et « L'huile essentielle de Rosmarinus officinalis ».

Avant d'étudier l'inhibition de la corrosion, nous avons effectué une étude qualitative de l'eau d'alimentation et l'eau de chaudière Babcock au niveau du complexe Fertial- Annaba.

Les résultats d'analyse de l'eau d'alimentation montrent que les valeurs de la dureté totale (TH) sont nulles, ce qui montre que la teneur en calcium et en magnésium est nulle, due à une bonne déminéralisation de l'eau, par contre le suivi de pH, TA et de TAC indique que ces valeurs ne sont pas dans la norme.

Le suivi des analyses effectuées sur l'eau de chaudière à savoir : le pH, TH, TA, TAC, les chlorure, la silice et la teneur en phosphate a montré que le pH, TH et les chlorures sont dans la norme, par contre le TA, TAC, les phosphates, et la silice dépassent les normes. Ces constats montrent qu'il y a un risque de présentation de dépôts des tartres et la corrosion des tuyaux.

Le traitement de l'eau joue un rôle très important pour une exploitation meilleure de la chaudière et sa protection contre les phénomènes de corrosion et les dépôts de tartes. L'inhibiteur est un moyen efficace pour la protection contre la corrosion.

Pour atteindre notre objectif, nous avons effectué au niveau de laboratoire de génie de l'environnement, une série de mesures électrochimiques : le tracé des courbes OCP et les courbes de polarisation afin de tester le pouvoir protecteur des deux inhibiteurs utilisés.

Nous pouvons résumer les principaux résultats de cette étude comme suit :

- Les résultats obtenus par les courbes de polarisation ont démontré que les inhibiteurs utilisés ont une influence positive contre la corrosion de l'acier **A37** dans l'eau alimentaire. Cette influence est traduite par la diminution de la vitesse de corrosion, l'intensité du courant de corrosion et l'augmentation de la

résistance de polarisation  $R_p$  par rapport aux résultats obtenus par les échantillons, sans inhibiteur.

- L'évolution des paramètres de courbes de polarisation ont démontré que la concentration d'inhibiteur a une influence sur son efficacité. Chaque fois la concentration augmente, il y a une diminution de la vitesse de corrosion et l'intensité de courant cependant une augmentation de la résistance de polarisation jusqu'à une valeur optimale.
- La nature d'inhibiteur démontré par l'évolution les pics des courbes de polarisation au cours de changement de concentration. Les deux inhibiteurs utilisés se comportent comme des inhibiteurs anodiques.
- Les résultats déterminés par les courbes de polarisation ont démontré que la meilleure efficacité pour « Le curcuma » est de **76,08%** avec une concentration de **40ppm**.
- La meilleure efficacité « d'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » correspondante à **18.75g/l** avec une valeur de **82,47%**.
- Entre ces deux inhibiteurs la meilleure inhibition par « l'huile essentielle de Rosmarinus officinalis » avec la plus grande efficacité.

Enfin nous souhaiterons que cette étude contribue d'une manière ou d'une autre à la valorisation des produits naturels en tant qu'inhibiteurs biodégradables. Ces dernières présentent un intérêt économique important à l'heure où les inhibiteurs organiques synthétisés sont toxiques et très coûteux.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## INTRODUCTION GENERALE

- [1] F. GOUDJIL, S. ZAITRI, « Utilisation des huiles essentielles de plantes comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans le milieu acide », Mémoire de Master, Université A. MIRA – Bejaia, Algérie, 2020.
- [2] B. MEZHOUD, « Inhibiteurs de corrosion d'acier et d'alliage d'aluminium », Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri- Constante1, Algérie, 2019.
- [3] M.C. NEBBAR, « NEBBAR Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion », Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider –Biskra, Algérie, 2010.
- [4] M. DJELLAB, « Corrosion des installations pétrolières : Effet de la synergie des ions iodures et des inhibiteurs naturels sur la protection contre la corrosion de l'acier API 5L X70 en milieux acides », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2019.

## CHAPITRE I

- [1] A. AKAKCHI, L. BOUADJINA, « Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion au niveau de la chaudière Babcock FERTIAL- ANNABA », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2021.
- [2] M.N. GUEBLA, Z. LATRECHE, « Etude qualitative de l'eau d'alimentation des équipements du complexe FERTIAL - ANNABA », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2019.
- [3] <https://dz.linkedin.com/company/fertial>.

## CHAPITRE II

- [1] L. HAMADI, « Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, Algérie, 2020.
- [2] H. HAMANI, « Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif -1, Algérie, 2015.

- [3] H. MARMI, « Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, 2017.
- [4] O. ASSOWE DABAR, « Etude des processus de corrosion du nickel par dynamique moléculaire avec un potentiel réactif ReaxFF », Thèse de Doctorat, Université-Bourgogne, France, 2012.
- [5] W. BOURBIA, R. KERROUCHI, « Effet des traitements thermiques sur le comportement microstructural, mécanique et électrochimique de l'alliage d'aluminium 2017A », Mémoire de Master, Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel, Algérie, 2021.
- [6] M. DARAF, S. RECHID, « Étude électrochimique de l'efficacité inhibitrice des huiles sur la corrosion de l'aluminium », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider- Biskra, Algérie, 2020.
- [7] Z. BENSOU DA, « Extraction, caractérisation et potentiel inhibiteur des huiles essentielles contre la corrosion d'aciers doux dans une solution chlorhydrique molaire », These de Doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Algérie, 2018.
- [8] A. FIALA, « Synthèses et caractérisations de nouvelles molécules contenant du soufre et de l'azote, études de leur effet inhibiteur sur la corrosion des métaux de transition application a la protection a la protection du cuivre en milieux acides », Thèse de Doctorat, Université Mentouri-Constantine, Algérie, 2007.
- [9] F. HADRI, « Etude du mécanisme de corrosion atmosphérique à long terme des aciers : nouvelles stratégies de protection des aciers du patrimoine culturel » Thèse de Doctorat, Université Lorraine, Nancy 1, France, 2012.
- [10] I. E. ZERZOUR, « Etude de l'effet inhibiteur de corrosion des extraits des plantes *Lactuca virosa* L. et *Verbascum thapsus* L. sur l'acier X60 dans un milieu acide  $H_2SO_4 2M$  », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi- Oum el Bouaghi, Algérie, 2020.
- [11] F. ABDELALI, « Synthèses et caractérisations de nouvelles molécules contenant du soufre et de l'azote, études de leur effet inhibiteur sur la corrosion des métaux de transition application a la protection a la protection du cuivre en milieux acides », Thèse de Doctorat, Université Mentouri-Constantine, Algérie, 2007.

- [12] M. Areas, A. Conde et J. Damborenea, « Cerium a suitable green corrosion inhibitor for tinplate », Corrosion science, vol. 44, p. 511–520, 2002.
- [13] P. Raja, M. Sethuraman, « Natural product as corrosion inhibitor for metals in media », Materialsletters, vol. 62, p. 113, 2008.
- [14] A. OULABBAS, « Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides. », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, Algérie, 2019.
- [15] S. BELAZIZIA, H. BETTICHE, « Extraction et caractérisation de la substance active de curcumine », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi- Oum El Bouaghi, Algérie, 2019.
- [16] F. HOCINI, « Etude de complexes de Cu(II), Ni(II), Co(II) et Co(III) avec la curcumine et l'histidine », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.
- [17] N. MELLE BEGHDAD, L. MELLE BEGHDAD, « Extraction de la curcumine du Curcuma, étude de ses propriétés par DFT et évaluation de ses activités antibactérienne, antioxydante et anti inflammatoire », Mémoire de Master, Université Djilali Bounaâma - Khemis Miliana, Algérie, 2018.
- [18] E. PORTES, « Synthèse et étude de tetrahydrocurcuminoides : propriétés photochimiques et antioxydantes, application à la préservation de matériaux d'origine naturelle. », Thèse de Docteur, Université Bordeaux I, France, 2008.
- [19] M. ABDESSULTANE « Effet du Romarin (*Rosmarinus officinalis*) sur la conservation traditionnelle des dattes dans la région d'Adrar », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia- Adrar, Algérie, 2017.
- [20] N.H.Y. ADJIMI, « Etude physico-chimique de l'huile extraite de *Rosmarinus officinalis*.L. », Mémoire de Master, Université Ziane Achour- Djelfa, Algérie, 2014.
- [21] N. BOUHASSOUSA, « Activités antioxydante et antimicrobienne de deux plantes du sol local : *Origanum vulgare* et *Mentha pulegium*. », Thèse de Doctorat, Univ Badji Mokhtar -Annaba, Algérie, 2015.

- [22] F. MECHERI, N. AKDIF, « Contribution à l'étude de l'effet des huiles essentielles de Rosmarinus officinalis et de Ruta graveolens sur la croissance des quelques microorganismes pathogènes », Thèse de Master, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, Algérie, 2017.
- [23] H. BELGHARBI, « Etude de l'effet inhibiteur de corrosion de l'huile essentielle de Cyprès : Extraction, caractérisation et application », Thèse de Master, Université 8 mai 1945-Guelma, Algérie, 2020.
- [24] A.N. BENOTHMANE, A. FETATNIA, « Inhibition de la corrosion de l'acier AM9 avec l'extrait de feuilles de fenouil (EFF) », Mémoire de Master, Université 8 mai 1945-Guelma, Algérie, 2020.
- [25] I. Bouali, « Étude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base ortho phosphates de zirconium lamellaire fonctionnalisés : Synthèse, caractérisations et applications », Thèse de Doctorat, L'université de Lorraine, Nancy, France, 2018.
- [26] A. N. BENOTHMANE, A. FETATNIA, « Inhibition de la corrosion de l'acier AM9 avec l'extrait de feuilles de fenouil (EFF) », Mémoire Master, Université 8 mai 1945 Guelma, Algérie, 2020.
- [27] B.A. ADJOUAT, A. ZIANE, « L'inhibition de la corrosion de l'acier par les extraits aqueux de feuilles d'olivier », Mémoire de Master, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2020.
- [28] S. ABDELAZIZ, « Evaluation des propriétés anticorrosives des huiles et extraits d'une plante de la région de Jijel. », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel, Algérie, 2022.

### **Problématique**

M. NAILI DOUAOUA, « Etude des performances de l'Extrait de la Sabline Rouge « Spergularia Rubra » comme inhibiteur vert de corrosion de l'acier ordinaire en environnements sévères », Mémoire de Master, Université de Blida 1- Blida, Alger, 2020.

### CHAPITRE III

[1] D. BAHROUN, L. KHEMIRI, « Etude de la qualité des eaux de chaudière et de refroidissement du complexe FERTIAL-Annaba », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2020.

[2] A. AKAKCHI, L. BOUADJINA, « Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion au niveau de la chaudière Babcock Faertial-Annaba. », Mémoire de Mater, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2021.

### CHAPITRE IV

[1] <https://www.deperly-dufour.fr/wp-content/uploads/2018/03/A37.pdf>

[2] A. AKAKCHI, L. BOUADJINA, « Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion au niveau de la chaudière Babcock FERTIAL- ANNABA » Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2021.

[3] M. BERRA, M. KHAICHE, Y. ZIOUACHE, « Recherche bibliographique sur l'activité biologique de la Curcumine et leur complexation par  $\beta$ -CD », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf- Msila, Algérie, 2020.

[4] <https://protrainer.fr/blog/curcuma/#:~:text=La%20composition%20nutritionnelle%20du%20curcuma,et%20antioxydants%2C%20notamment%20la%20curcumine.>

### CHAPITRE V

[1] S. SOUFIT, K. BENNACER, « Evaluation de l'activité antioxydante de l'extrait méthanolique et l'activité Antimicrobienne des huiles essentielles de Rosmarinus officinalis », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira - Bejaïa, Algérie, 2014.

[2] <https://popups.uliege.be/0037-9565/index.php?file=1&id=6050.>