

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA – BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie des Procédés



# MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie des Procédés

**Spécialité**

*Génie chimique*

**Thème**

**Evaluation du pouvoir inhibiteur d'entartrage du Pissenlit  
(*Taraxacum Officinale*) dans l'eau de Bejaia**

**Présenté par:**

M<sup>elle</sup> ABDOUNE Soulaf

M<sup>elle</sup> AMIR Asma

**Membres du jury:**

M <sup>lle</sup> N. CHERCHOUR	Maître de conférences, UAMB	Examinatrice
M <sup>r</sup> A. BENCHIKH	Maître de conférences, UAMB	Examinatrice
M <sup>me</sup> H. TIGHIDET	Maître de conférences, UAMB	Encadrant

2021-2022

### *Remerciements*

*Avant tout nous remercions Dieu « ALLAH » le tout puissant de nous avoir accordé la force,  
le courage et la patience pour terminer ce travail,*

*La réalisation d'un mémoire est la somme d'un travail collectif où l'apport de chacun, aussi anodin soit-il, est toujours indispensable et précieux. Cela nous permet de dire que rien n'est impossible et que l'union fait la force !*

*Un grand merci à notre encadreur Madame TIGHIDET Hassiba pour sa gentillesse, sa disponibilité, sa patience, son écoute, le fait qu'elle soit toujours ouverte à toutes suggestions lors des discussions et à ses conseils, ce qui nous a permis de réaliser ce travail dans de bonnes conditions malgré les conditions exceptionnelles de cette année.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Dr. CHERCHOUR Nabila et Dr. BENCHIKH Abdelkader pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous remercions chaleureusement Dr. BEY Zakia qui a gentilement accepté de nous orienté dans la partie du dosage. Sa disponibilité et son professionnalisme nous ont permis d'aller de l'avant et d'avancer dans notre travail.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Table de  
matières*

## Table de matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### *Chapitre I : Le Pissenlit (Taraxacum Officinale)*

I.1. Introduction :.....	4
I.2. Etude ethnobotanique : .....	4
I.3. Origine, habitat et culture : .....	5
I.4. Interactions :.....	5
I.5. Description botanique : .....	6
I.5.1. Caractère morphologique :.....	6
I.5.2. Taxonomies et systématique :.....	7
I.5.3. Nom vernaculaire et morphologie : .....	8
I.6. L'utilisation du <i>Taraxacum officinale</i> en médecine traditionnelle :.....	8
I.7. Données phytochimiques : .....	9
I.8. Données pharmacologiques : .....	9
I.9. Composition des plantes : .....	9
I.9.1. Alcaloïdes : .....	9
I.9.2. Terpènes : .....	10
I.9.3. Stéroïdes :.....	11
I.9.5. Composés phénoliques : .....	12
I.9.5.1. Flavonoïdes :.....	12
I.9.5.2. Anthocyanes :.....	13
I.9.5.3. Tanins :.....	13
Les tanins hydrolysables .....	14
Les tanins condensés .....	14

### **Chapitre II : Entartrage et son inhibition**

II.1. Introduction : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.2. Définition de l'entartrage : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.3. Causes de l'entartrage :.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Facteurs d'ordre thermodynamique : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Facteurs d'ordre cinétique : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.4. Conséquence de l'entartrage :.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Hydrauliques :.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Thermiques : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

II.5. Carbonate de calcium : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.1. Propriétés optiques : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.2. Cristallographie du carbonate de calcium : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Calcite : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Aragonite : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Vatérite : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3. Solubilité du carbonate de calcium : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.4. Mécanisme de précipitation du carbonate de calcium : ..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.5. Solubilité dans l'eau : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6. Influence de certains paramètres sur l'entartrage : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.1. Influence de température : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.2. Influence du pH : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6.3. Influence du substrat : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.5.4. Influence de la composition de l'eau : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Influence de $Mg^{2+}$ : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Influence de $Ca^{2+}$ : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
• Influence de NaCl : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.6. Equilibre calcocarbonique : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7. Inhibiteurs de tartre : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.1. Classification des différentes familles de tartrifuges : ...	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.1.1. Phosphates condensés .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.1.2 Polyélectrolytes .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.2. Travaux supplémentaires .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3. Mécanisme d'action contre le tartre .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3.1. Inhibition de la germination .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3.2 Inhibition de la croissance .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3. Inhibiteurs verts .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
II.7.3.1. Inhibiteurs dérivés de la pétrochimie.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
a. Inhibition avec carboxyméthyluline .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
b. Inhibition par le polyaspartate .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
c. Inhibition par l'acide polyepoxysuccinique (PESA): .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
d. Inhibition par les polyacrylates .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
a. Acide citrique : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
b. Mdm2 riche en cystéine : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
c. Utilisation de vitamine comme inhibiteur : .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

- d. Utilisation des molécules de xanthane (XC) ..... **Error! Bookmark not defined.**  
e. Utilisation d'extraits de plantes comme inhibiteurs de tartre.....**Error! Bookmark not defined.**

### Chapitre III : Mise en œuvre expérimentale

- III.1. Introduction : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2. Matériel végétal : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.1. Préparation du pissenlit : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.1.1. Récolte : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.1.2. Nettoyage : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.1.3. Séchage : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.1.4. Broyage ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.1.5. Conservation : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.2. Préparation de l'extrait du pissenlit : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.3. Méthodes de détermination de la composition du pissenlit: ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.3.1. Teneur en humidité : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.3.2. Teneur en matières sèches : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.3.3. Taux d'extraction: ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.2.3.4. Dosage des antioxydants: ..... **Error! Bookmark not defined.**  
a-Polyphénols totaux: ..... **Error! Bookmark not defined.**  
b.Flavonoïdes : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
c.Tanins condensés : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
d.Activité antioxydante : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.3. Cellule et électrolyte : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.3.1.1. Electrode de travail : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.3.1.2. Electrode de référence : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.3.1.3. Electrode auxiliaire : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.3.1.4. Préparation des électrodes : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
Électrode de travail en or ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.3.2. Électrolyte : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.4. Montage Potentiostatique : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.5. Techniques expérimentales : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.5.1. Chronoampérométrie : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.5.2. Voltampérométrie : ..... **Error! Bookmark not defined.**  
III.5.3. Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE) : .. **Error! Bookmark not defined.**

III.5.4. Spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier (FTIR) :... **Error! Bookmark not defined.**

### Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1. Introduction : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2. Dosage de l'extrait de plante de pissenlit (*Taraxacum Officinale*) :..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.1. Teneur en humidité : ..... **Error! Bookmark not defined.**

Taux de matières sèches : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.2. Taux d'extraction : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.3. Dosage des polyphenols totaux : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.4. Dosage des flavonoïdes : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.5. Dosage des tanins : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.6. Activité antioxydante : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.7. Analyse de la poudre du pissenlit par spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (FTIR): ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.3. Evaluation du pouvoir entartrant de l'eau de Bejaia :..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.3.1. Choix des paramètres électrochimiques : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.3.1.1. Vitesse de balayage du potentiel : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.3.1.2. Vitesse de rotation de l'électrode de travail : ..... **Error! Bookmark not defined.**

a.Détermination du potentiel imposé : ..... **Error! Bookmark not defined.**

b.Influence de la vitesse de rotation de l'électrode : Critère de LEVICH : ... **Error! Bookmark not defined.**

IV.3.2. Cinétique de précipitation du tartre en absence d'inhibiteur : .... **Error! Bookmark not defined.**

Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE) : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.4. Test de pouvoir anti-dépôt du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) :. **Error! Bookmark not defined.**

IV.4.1. Voltamétrie linéaire : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.4.2. Chronoampérométrie : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.4.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) : ... **Error! Bookmark not defined.**

IV.5.Conclusion : ..... **Error! Bookmark not defined.**

Références bibliographiques..... 68

### Liste des abréviations

pH : potentiel d'hydrogène

CaCO<sub>3</sub> : carbonate de calcium

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : ion hydrogénocarbonate

CH<sub>3</sub>COOH : acide acétique

HCl : acide chlorhydrique

HNO<sub>3</sub> : acide nitrique

pK's : constante caractérisant le potentiel de dissociation ionique

NaCl : chlorure de sodium

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> : ion orthophosphate

Cu<sup>2+</sup> : ions cuivreux

Zn<sup>2+</sup> : ion zinc

IUPAC : Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée

CMI : carboxyméthyluline

PESA : polyepoxysuccinique

Mdm2 : murine double minute 2

XC : molécules de xanthane

FTIR : spectroscopie Infra Rouge à Transformé de Fourier

MEB : microscopie électronique à balayage

KCl : chlorure de potassium.

ECS : électrode au calomel saturé

EAG : équivalent d'acide gallique

UV : rayonnement ultraviolet

DPPH : 2,2-diphényl 1-picrylhydrazyle

DRX : diffractométrie de rayons X



## Liste des abréviations

---

VL : Voltamètre Linéaire

PGP : Potentiostat / galvanostat

CA : chronoampérométrie

$I_{R\acute{e}s}$  : courant résiduel

$t_E$  : temps d'entartage

SIE : Spectroscopie d'Impédance Electrochimique.

Z : impédance complexe

$|Z|$  : module de l'impédance

### Liste des figures

#### Chapitre I :

Figure I.1 : Fleur et aigrettes d'un pissenlit.

Figure I.2 : Répartition géographique du pissenlit dans le monde.

Figure I.3 : Planche botanique du *Taraxacum officinale*.

Figure I.4 : Herbe de pissenlit, sa fleur et son fruit mûr.

Figure I.5 : Structure générale d'un acide aminé.

Figure I.6 : Structure de l'isoprène.

Figure I.7 : Structure de quelques stéroïdes.

Figure I.8 : Structure générale des flavonoïdes.

#### Chapitre II :

Figure II.1: Calcite.

Figure II.2: Aragonite.

Figure II.3: Vatérite de forme « lentille » et « rose des sables »

Figure II.4 : Photos MEB de (a) calcite, (b) aragonite et (c) vatérite.

Figure II.5: Solubilité apparente du carbonate de calcium en fonction du pH

Figure II.6: Classification des différentes familles de tartrifuges.

#### Chapitre III :

Figure III.1 : Pissenlit (photo originale).

Figure III.2: Agitation du mélange de la solution de poudre de pissenlit.

Figure III.3 : Cellule électrochimique.

Figure III.4 : Photographie de la polisseuse mécanique.

Figure III.5 : Potentiostat / galvanostat PGP 201 piloté par un micro-ordinateur.

Figure III.6 : La courbe type d'entartrage accéléré.

## Liste des figures

---

### Chapitre IV :

Figure IV.1 : Teneur en humidité du pissenlit.

Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage de la quercétine.

Figure IV.4 : Courbe d'étalonnage de l'acide tannique.

Figure IV.5 : Récapitulatif des teneurs en polyphénols, en flavonoïdes et en tanins.

Figure IV.6 : Spectre FTIR de la poudre de pissenlit.

Figure IV.7: Courbes  $I=f(E)$  enregistrées sur l'électrode d'or à différentes vitesses de balayage de potentiel.

Figure IV.8 : Courbes intensité-potentiel enregistrées sur l'électrode d'or à différentes vitesses de rotation de l'électrode.

Figure IV.9 : Tracé de l'évolution du courant limite de diffusion en fonction de  $\omega^{1/2}$  sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia.

Figure IV.10 : Courbe chronoampérométrique enregistrée sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia.

Figure IV.11 : Diagramme d'impédance enregistré sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia.

Figure IV.12 : Courbes intensité-potentiel enregistrées sur l'électrode d'or à différentes vitesses de rotation de l'électrode en présence de 25 ppm d'extrait du pissenlit.

Figure IV.13 : Superposition de deux voltammogrammes tracés en absence et en présence de 25 ppm d'extrait de pissenlit.

Figure IV.14 : Courbes chronoampérométriques enregistrées sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia en présence de différentes concentrations en extrait de pissenlit.

### Liste des tableaux

#### Chapitre I :

Tableau I.1 : Classification botanique du Pissenlit (dent-de-lion)

#### Chapitre III :

Tableau III.1 : Propriétés physiques de l'or

Tableau III.2 : Propriétés physico-chimiques de l'eau de Bejaia

#### Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Principales bandes d'absorption apparues sur le spectre IR

Tableau IV.2 : Paramètres extraits de la courbe chronoampérométrique de la figure IV.10

Tableau IV.3 : Paramètres extraits de la figure IV.11

Tableau IV.4 : Valeurs des densités de courant résiduelles enregistrées en fonction de la concentration en extrait du pissenlit

*Introduction*  
*générale*

### Introduction générale

À l'échelle mondiale, aucune ressource ne peut être considérée comme plus stratégique que l'eau. Son utilisation finale est essentielle pour chaque habitant et pour un large éventail d'activités économiques et informelles. Il est vital pour la santé, l'agriculture, l'industrie et l'hydroélectricité. L'eau est également une partie clé de l'environnement et abrite de nombreuses formes de vie dont dépend en fin de compte le bien-être humain [1].

Le phénomène d'entartrage est connu, ne serait ce que par la formation d'architectures tout à fait remarquable tels les stalactites et leurs homologues les stalagmites, qui sont essentiellement composées de  $\text{CaCO}_3$ , dont le processus résulte de la rupture de l'équilibre calco-carbonique de l'eau naturelle. Les substances en solution, véhiculées par l'eau naturelle, sont susceptibles de former des dépôts au contact des parois des conteneurs, qu'on appelle tartres [2].

Le tartre est le nom donné à un dépôt cristallin adhérent, constitué majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , lorsqu'il est formé à partir des eaux de surface. Dans les installations industrielles, le  $\text{CaCO}_3$  est fréquemment associé à des produits de corrosion du fer issus de la circulation de l'eau dans des conduites en acier. Nous soulignons également la présence des co-précipitations avec de la silice et des matières en suspension (sables ou argiles) retrouvées dans les eaux naturelles.

Les conséquences du phénomène d'entartrage sont désastreuses. Pour mieux évaluer son effet néfaste, prenons un exemple simple rencontré au niveau domestique : la machine à café. L'eau est importante pour préparer un café irréprochable mais si la qualité de l'eau est détériorée, nous aurons comme conséquences un mauvais goût du café (saumâtre), l'eau ne chauffera plus à la température voulue, l'extraction du café dans la tasse ne sera plus régulière, des frais d'exploitation et de réparation additionnels et une consommation d'énergie importante. Si ces désagréments peuvent être causés pour une simple machine à café alors nous pourrions imaginer l'ampleur des dégâts au niveau industriel : une réduction progressive des sections de tuyauteries avec une augmentation des pertes de charge, voire leur obstruction, des pertes de rendement, une augmentation d'énergie et des surcoûts économiques considérables [3,4].

Pour résoudre ce problème, des études ont été entreprises pour palier à cette fatalité. Plusieurs procédés ont été appliqués et une multitude de composés ont été testés en tant qu'inhibiteurs

d'entartrage. Malheureusement, la plupart d'entre eux sont très nocifs à l'environnement. Pour cette raison, nous avons tenté, dans ce travail, de tester une substance naturelle, écologique, biodégradable et très disponible qui est la plante « Pissenlit » du nom vernaculaire « *Taraxacum Officinale* » comme tartrifuge. Cet inhibiteur vert a été introduit dans l'eau du réseau de distribution de la wilaya de Bejaia qui possède un caractère dure (53°F).

Le procédé adopté est électrochimique qui consiste à imposer à l'électrode de travail en or de surface 0,196 cm<sup>2</sup>, un potentiel de -1 V/ECS correspondant au potentiel de réduction de l'oxygène dissout. Celui-ci permettra la production d'ions hydroxyles qui donneront au contact des ions Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de l'électrolyte, du tartre à l'interface électrode/solution. Différentes concentrations en extrait de plante du Pissenlit ont été testées et les méthodes utilisées sont la voltamétrie linéaire (VL), la chronoampérométrie (CA), la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE), la Spectroscopie Infra Rouge à Transformé de Fourier (FTIR) et la spectrophotométrie UV-Visible.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre sera consacré aux recherches approfondies sur la plante testée comme tartrifuge. Le pissenlit "Dents de Lion" sera étudié en longueur et en largeur : sa description botanique, sa composition, ses méthodes de récolte et de séchage, son utilisation en médecine traditionnelle et ses données pharmacologiques et toxicologiques.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, une étude théorique sur le phénomène d'entartrage sera abordée : ses composants, ses causes, ses conséquences, les phénomènes qui participent à sa formation ainsi que son inhibition.
- ❖ Le dispositif expérimental ainsi que les méthodes utilisées lors de la réalisation de notre travail sera développé dans le troisième chapitre. Le protocole expérimental mis en œuvre pour la préparation de l'extrait du Pissenlit et sa caractérisation sera détaillé tout au long du chapitre.
- ❖ Enfin, le quatrième chapitre sera consacré au récit et à la discussion des principaux résultats trouvés, à savoir l'identification et le dosage de l'extrait du Pissenlit (*Taraxacum Officinale*) en composés phénoliques, flavonoïdes et tanins, le calcul de sa teneur en humidité et de son taux d'extraction et l'évaluation de son activité antioxydante. Une partie sera consacrée à la formation du dépôt de calcaire (tartre) en

## Introduction générale

---

absence de l'extrait de Pissenlit. Des paramètres électrochimiques seront déterminés (vitesse de balayage, potentiel imposé). Par la suite, une étude d'inhibition du dépôt de calcaire sera traitée dans laquelle l'influence de la concentration de l'extrait de plante sera détaillée ainsi que le mécanisme d'inhibition.

Ce manuscrit sera clôturé par une conclusion générale rassemblant tous les résultats obtenus précédemment et suivie par quelques perspectives.



***Chapitre I :***  
***Le Pissenlit***  
***(Taraxacum***  
***Officinale)***

## Chapitre I

### Le Pissenlit (*Taraxacum Officinale*)

#### I.1. Introduction :

Le pissenlit, mauvaise herbe connue de tous, est reconnaissable à son éclat jaune vif lors de sa floraison et à cette « boule blanche » sur laquelle, pour s'amuser, nous avons tous soufflé étant enfant pour faire s'envoler les aigrettes. Au-delà de son apparence, le pissenlit est populaire pour ses qualités culinaires et médicinales. Pour en apprendre davantage sur cette plante, nous verrons dans une première partie la description de la plante, puis sa phytochimie, son utilisation en thérapeutique et enfin le risque associé à la consommation du pissenlit hors du circuit pharmaceutique.

#### I.2. Etude ethnobotanique :

Aujourd'hui, les plantes sont utilisées dans le monde entier comme une source de médecine par des personnes de toutes cultures et la médecine traditionnelle devint une partie importante dans le système de santé dans la plupart des pays. La récente augmentation de la demande des remèdes à base de plantes a été associée à plusieurs facteurs dont une meilleure culture d'acceptabilité [5].

*Taraxacum officinale* (pissenlit) est une plante herbacée vivace, originaire de tout l'hémisphère nord avec de nombreuses variétés et microespèces, que l'on trouve à l'état sauvage dans les prairies, les pâturages et les terrains vagues. En médecine, la racine de pissenlit ou la plante entière est récoltée pendant ou avant la floraison, à la fois des plantes sauvages et cultivées [6] (Figure 1).

Les plantes du genre *Taraxacum* appartiennent à la famille des Astéracées (également appelées famille des asters, des marguerites ou des tournesols), sous-famille des Cichorioideae, tribu Lactuceae. Ils ont longtemps été acceptés comme herbes médicinales. La première référence à son application se reflète dans son nom, dérivé du mot grec "taraxis" pour inflammation et "akeomai" pour curative [7]. *Taraxacum officinale*, communément nommé pissenlit, est une plante comestible répandue dans le monde entier [8]. Le nom commun du pissenlit est une altération de « dent de lion », une phrase que l'on pense être basée sur le « Dant y Llew » gallois du XIIIe siècle, signifiant "dent du lion" [9].



**Figure I.1 :** Fleur et aigrettes d'un pissenlit.

### **I.3. Origine, habitat et culture :**

Très répandu en Europe, le pissenlit est souvent considéré comme une mauvaise herbe car il envahit rapidement les jardins, les espaces verts et les champs. En effet, grâce à la formation d'aigrettes à la suite de la floraison, cette plante a la particularité de disperser facilement ses graines. Malgré sa mauvaise réputation chez les jardiniers, le pissenlit présente un fort intérêt pour les herboristes, les phytothérapeutes et les chercheurs.

De nombreux principes actifs ont été identifiés dans les feuilles et les racines du pissenlit. Le pissenlit pousse non seulement en Europe mais aussi en Amérique du Nord et en Afrique. Si cette plante vivace se développe plus facilement dans les zones humides, le pissenlit est capable de s'adapter à de nombreux climats et à différents types de sols. Il peut également résister à des conditions climatiques extrêmes, aussi bien des fortes chaleurs que des épisodes de gel intenses [10].

Les racines du pissenlit se développent profondément dans le sol pour puiser les ressources nécessaires à son développement. En culture, le pissenlit est généralement semé durant les mois de mai et de juin pour être récoltés en hiver et au printemps [11].

### **I.4. Interactions :**

Le pissenlit pourrait interagir avec certains traitements comme les anticoagulants, les antidiabétiques, les diurétiques ou encore les médicaments à base de lithium. Avant de démarrer une cure, un avis médical est recommandé pour les personnes qui suivent un traitement médical [12].



Figure I.2 : Répartition géographique du pissenlit dans le monde.

### I.5. Description botanique :

#### I.5.1. Caractère morphologique :

Le pissenlit est une mauvaise herbe vivace avec une puissante racine pivotante qui mesure en moyenne 15-30 cm de long et 2-3 cm de large. On peut toutefois trouver des racines de 60 à 100 cm. Elle est charnue et friable, de couleur brun foncé à l'extérieur et blanche et laiteuse à l'intérieur. Les racines peuvent donner naissance à de nouvelles plantes, même si la plante est coupée à ou sous la surface du sol. Les grandes feuilles (5-40 cm de long et 1-10 cm de large), longues, polies, lisses, vert clair à vert foncé, sont disposées en rosette à la base de la plante et sont profondément dentelées à la base. Les feuilles poussent à partir de l'extrémité supérieure de la racine, près du sol, et ont un court pétiole (Figure 3).



Figure I.3 : Planche botanique du *Taraxacum officinale*.

*Le Pissenlit (Taraxacum Officinale)*

Il en existe plusieurs types : avec des bords dentelés, presque entièrement dentelés, certains avec des bords profondément dentelés se terminant par une tige centrale. Les tiges florales sont dressées, longues de 5 à 40 cm et portent une inflorescence terminale et solitaire. Les tiges creuses, sans feuilles, prennent naissance au centre de la rosette. Elle porte une fleur unique, plate et jaune d'or. Chaque plante développe en moyenne 5 à 10 fleurs. La fluorescence mesure de 7 à 15 mm et se compose de 140 à 400 fleurs jaunes rayonnantes. Les fleurs s'épanouissent du début du printemps à la fin de l'automne. Lorsque les fleurs sont mûres, elles produisent des graines duveteuses qui peuvent être facilement dispersées par le vent. Les fruits sont coniques, en forme de noix, brunes et recouverts d'une couche blanche et velue de couleur brune, qui permet la dispersion des graines par le vent [13] (Figure 4).



**Figure I.4 :** Herbe de pissenlit, sa fleur et son fruit mûr.

**I.5.2. Taxonomies et systématique :**

Les principales caractéristiques sont regroupées dans le tableau I.1.

**Tableau I.1 :** Classification botanique du Pissenlit (dent-de-lion).

<b>Règne</b>	<b>Plantae</b>
<b>Sous règne</b>	Tracheobionta
<b>Division</b>	Magnoliophita
<b>Classe</b>	Magnoliopsida
<b>Sous-classe</b>	Asteridae
<b>Ordre</b>	Asterales
<b>Famille</b>	Asteraceae
<b>Genre</b>	<i>Taraxacum</i>
<b>Espèce</b>	<i>Taraxacum officinale</i>

## *Le Pissenlit (Taraxacum Officinale)*

### **I.5.3. Nom vernaculaire et morphologie :**

- Identité botanique : *Taraxacum officinale*
- Identité vernaculaire :

Français : Pissenlit officinal, Dent-de-lion, salade-de-taupe, pisse-au-lit

Arabe: el-handaba ;

Berbère: thogmest n oumghar (Tifaf)

### **I.6. L'utilisation du *Taraxacum officinale* en médecine traditionnelle :**

Le pissenlit est utilisé dans de nombreux systèmes médicaux traditionnels et modernes à base de plantes. Le pissenlit, *Taraxacum officinale*, était originaire d'Europe, mais on le trouve maintenant dans les zones tempérées nord [14].

Le pissenlit augmente les fonctions rénales et hépatiques ; il permet de nettoyer l'organisme en favorisant les fonctions d'élimination, facilitant l'écoulement de la bile et il stimule la digestion et est intéressant dans les cas de constipation et de rétention d'eau [15].

Les racines et les feuilles du pissenlit contiennent un suc laiteux, d'une saveur amère ; elles sont apéritives, dépuratives, diurétiques, antiscorbutiques, fébrifuges [16].

La racine est principalement considérée comme un remède gastro-intestinal, favorisant la digestion et la fonction hépatique, alors que la feuille est utilisée comme stimulant digestif diurétique. Le nom latin *Taraxacum* vient du grec et signifie "Remède contre les maladies [17].

Les médicaments traditionnels de la Chine, de l'Inde et de la Russie ont reconnu l'effet du pissenlit en tant que tonique pour le foie. La médecine traditionnelle chinoise associe le pissenlit à d'autres herbes pour traiter l'hépatite [18], les problèmes d'estomac, l'appendicite et les problèmes mammaires, tels que l'inflammation ou le manque de débit de lait [19].

Il est utilisé dans le traitement de l'anémie et de l'inflammation et aussi dans le traitement de la jaunisse, pour la purification du sang, la fièvre, les problèmes oculaires, problèmes gastro-intestinaux, l'arthrose, l'eczéma et le cancer de l'utérus et du sein chez la femme. Les racines, les feuilles et les tiges du pissenlit possèdent des propriétés anti-inflammatoires et antimicrobiennes. Les chercheurs ont récemment signalé l'activité anti-inflammatoire, anticancéreuse et antioxydante du pissenlit [20].



## *Le Pissenlit (Taraxacum Officinale)*

Il aurait également des effets immunostimulateurs attribués aux composés phénoliques tels que l'acide chicorique et l'acide caféique présents dans toutes les parties de la plante. Les flavonoïdes présents dans les fleurs de pissenlit présentent des propriétés antioxydantes [21].

### **I.7. Données phytochimiques :**

La composition chimique du pissenlit joue un rôle important dans son activité biologique et a fait l'objet de nombreuses études. Le pissenlit est riche en vitamines, inuline, acides aminés et minéraux, notamment en potassium, en sesquiterpènes, triterpènes, phytostérols et composés phénoliques [22]. Aussi, il est riche en oligofructanes [23], acide chicorique et acide monocaféique apparenté, acide cinnamique, acide vanillique [24], Glycosides flavonoïdes (lutéoline 7-glucoside, lutéoline 7-diglucoside), coumarines, cicorine,..... Dans les feuilles de pissenlit ont été identifiés l'esculine [25], le sesquiterpénoïde phytoalexine (lettucénine A) [26], les esters d'inositol de l'acétate de 4-hydroxyphényle, l'esculine, l'acide caféique, l'acide chlorogénique, l'apigénine, l'isovitexine et l'acide chicorique [26]. En outre, les fleurs de pissenlit contiennent des glycosides flavonoïdes, les polyphénols (dérivés de l'acide hydroxycinnamique et glycosides flavonoïdes) sont abondants dans les parties aériennes du pissenlit. Dans une étude, le contenu phénolique de l'extrait de jeunes feuilles de pissenlit était plus élevé que celui de son extrait de racine [27].

### **I.8. Données pharmacologiques :**

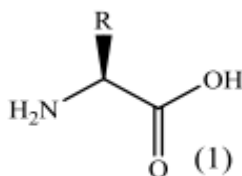
Les extraits aqueux, cétoniques, étherés, butyliques et méthyliques des écorces de troncs, des feuilles et des racines présentent une activité antibactérienne, anti-malaria, antiinflammatoire, anti-helminthique, anti-diarrhéique, analgésique, une augmentation des hormones de gestations et des effets positifs sur la libido [28].

### **I.9. Composition des plantes :**

Généralement, les plantes sont composées de :

#### **I.9.1. Alcaloïdes :**

Les composés azotés se divisent en deux groupes: les acides aminés et les alcaloïdes. Les acides aminés (qui n'appartiennent pas aux métabolites secondaires), sont à la base de la constitution des protéines et des autres peptides, même s'ils n'en sont pas toujours les mêmes uniques constituants. La structure générale des acides aminés (Figure I.5) est représentée ci-dessous. La plupart des composés de ces deux groupes sont très hydrosolubles.



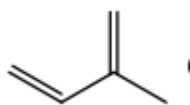
**Figure I.5 :** Structure générale d'un acide aminé.

Les alcaloïdes sont des substances organiques d'origine végétale, azotée et à caractère alcalin. Bien que beaucoup d'entre eux soient toxiques (comme la strychnine ou l'aconitine), certains sont employés dans la médecine pour leurs propriétés analgésiques (comme la morphine, la codéine), dans le cadre de protocoles de sédation (anesthésie, atropine) souvent accompagnés des hypnotiques, ou comme agents antipaludéens (quinine, chloroquinine) ou agents anticancéreux (taxol, vinblastine, vincristine). La morphine a été le premier alcaloïde isolé dans l'opium (vers 1805) puis on découvrit la strychnine (1818).

Les autres alcaloïdes plus connus sont : la colchicine, l'atropine, le tubocurarine, la théine, la cocaïne, la mescaline, l'acide lysergique et l'aconitine.

### **I.9.2. Terpènes :**

Les terpènes forment une classe d'hydrocarbures, produits par de nombreuses plantes, en particulier les conifères. Ce sont des composants majeurs de la résine et de l'essence de térébenthine produite à partir de résine. Les terpènes sont des dérivés de l'isoprène C<sub>5</sub>H<sub>8</sub> et ont pour formule de base des multiples de celle-ci (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>)<sub>n</sub>. On peut considérer l'isoprène comme l'un des éléments de construction préférés de la nature.



**Figure I.6 :** Structure de l'isoprène.

Leur squelette de carbone est constitué d'unités isopréniques reliées entre eux. C'est ce que l'on appelle la règle de l'isoprène. Ces squelettes peuvent être arrangés de façon linéaire ou bien former des cycles.

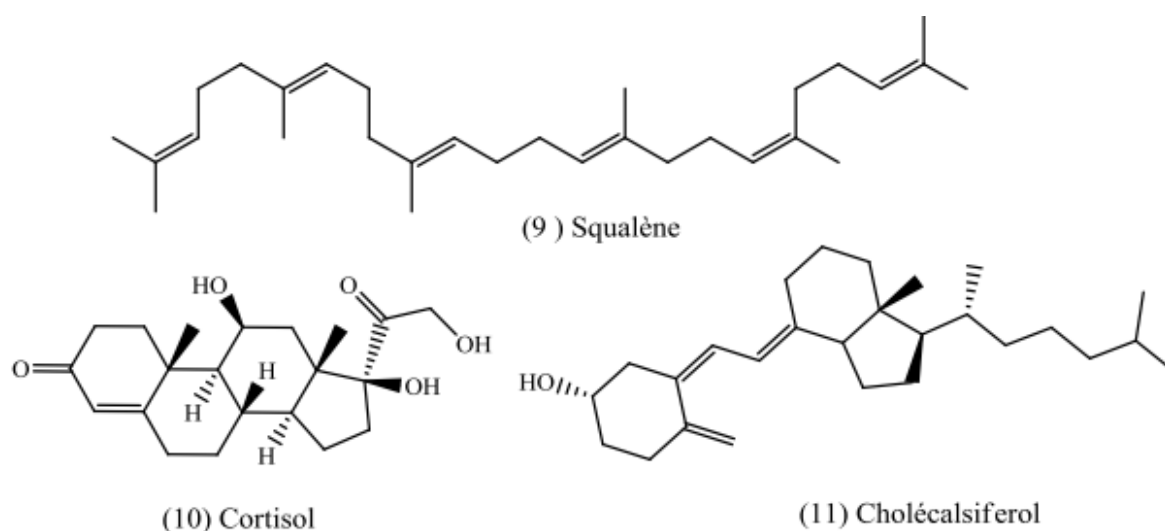
En fonction du nombre  $n$  (entier) d'unités, on peut distinguer pour;  $n = 2$  : les monoterpènes (C<sub>10</sub>),  $n = 3$ : les sesquiterpènes (C<sub>15</sub>),  $n = 4$ : les diterpènes (C<sub>20</sub>),  $n = 5$ : les sesterpènes (C<sub>25</sub>),  $n = 6$ : les triterpènes (C<sub>30</sub>). Le carotène est un tétraterpène (C<sub>40</sub>H<sub>64</sub>). Il joue le rôle de pigment en photosynthèse végétale. Des matières aussi diverses que le caoutchouc, la



vitamine A<sub>1</sub> ou le cholestérol sont construites essentiellement des «briques» d'isoprènes. Parmi les terpènes les plus importants on trouve: l' $\alpha$ -pinène, le  $\beta$ -pinène, le  $\delta$ -3- carène, le limonène, le carotène... En revanche, les caroténoïdes qui contiennent des atomes d'oxygènes, ne sont pas à proprement parler des terpènes, mais des terpénoïdes (luteine). Deux de propriétés fondamentales de terpènes sont leurs caractères odoriférants (géranium) et leurs sensibilités à la lumière.

### I.9.3. Stéroïdes :

Les stéroïdes constituent un groupe de lipides dérivant de triterpénoïdes (lipides à 30 atomes de carbones), majoritairement le squalène. Ils se caractérisent par un noyau cyclopentanophénanthrénique hydrophobe (cortisol) partiellement ou totalement hydrogéné. Habituellement, les carbones C<sub>10</sub>, C<sub>13</sub> sont liés à un groupe méthyle - CH<sub>3</sub> et le carbone C<sub>17</sub> à un groupe alkyle. Par extension, les stéroïdes incluent également les lipides dont le noyau cyclopentanophénanthrénique a été modifié par scission d'une liaison et l'ajout ou la déletion d'un carbone. En médecine le terme «stéroïde» fait référence aux hormones stéroïdiennes. Dans un contexte sportif, «stéroïde» est habituellement employé pour désigner les stéroïdes anabolisants.



**Figure I.7 :** Structure de quelques stéroïdes.

Les différentes instances scientifiques ne s'accordent pas sur leur classification. Dans la classification de l'IUPAC, les stéroïdes constituent une catégorie incluant les stérols. Dans la classification classique les stérols forment une catégorie qui inclut les stéroïdes. Selon l'IUPAC, les stéroïdes incluent tous les lipides possédant un noyau cyclopentanophénanthrénique ou dérivant de celui-ci. Toutefois, l'IUPAC précise que les

«stérols sont des stéroïdes» se caractérisant par la présence d'un groupe hydroxyle OH sur le carbone C<sub>3</sub>. En revanche, pour plusieurs biochimistes, les « stérols » constituent une catégorie à part entière incluant les «stéroïdes», cholécalsiférol; les acides biliaires; les stéroïdes conjugués; les hopanoïdes [29].

### **I.9.5. Composés phénoliques :**

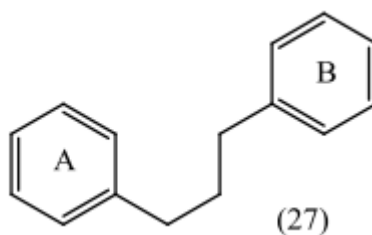
Le terme « polyphénols » est fréquemment utilisé dans le langage courant et même dans des articles scientifiques ou de vulgarisation pour désigner l'ensemble des composés phénoliques des végétaux. En fait, il devrait être réservé aux seules molécules présentant plusieurs fonctions phénols. Ce qui exclurait alors les monophénols, pourtant abondants et importants chez les végétaux. Donc la désignation générale « composés phénoliques » concerne à la fois les mono, les di et les polyphénols dont les molécules contiennent respectivement une, deux ou plusieurs fonctions phénoliques [30].

#### **I.9.5.1. Flavonoïdes :**

A l'état naturel, les flavonoïdes se trouvent souvent sous forme de glycosides. Une ou plusieurs de leurs fonctions hydroxyles sont alors glycolysés. La partie du flavonoïde autre que le sucre est dite : aglycone.

Les flavonoïdes représentent une classe de métabolites secondaires largement répandus dans le règne végétal. Ce sont des pigments quasiment universels des végétaux qui sont en partie responsables de la coloration des fleurs, des fruits et parfois des feuilles. On les trouve dissous dans la vacuole des cellules à l'état d'hétérosides ou comme constituants de plastes particuliers, les chromoplastes [31]. Le terme flavonoïde regroupe une très large gamme de composés naturels polyphénoliques. On dénombre près de 6500 flavonoïdes répartis en 12 classes [32], et leur nombre ne cesse d'accroître. Par définition, les flavonoïdes sont des composés qui ont en commun la structure du diphenylpropane (C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>); les trois carbones servant de jonction entre les deux noyaux benzéniques notés A et B forment généralement un hétérocycle oxygéné C [33].

Leur fonction principale semble être la coloration des plantes (au-delà de la chlorophylle, des caroténoïdes et des bétalaïnes) [33]. On distingue différentes structures des flavonoïdes parmi lesquels se trouvent : les flavones, les flavonols, les flavanones, les flavanonols, les flavanes, les flavan-3-oles, les flavylum, les chalcones, les aurones, les isoflavones, les isoflavonols, les isoflavanes, les ptérocarpanes, les coumaronochromones, les 3-arylcoumarines, les coumestanes, les roténoïdes.



**Figure I.8 :** Structure générale des flavonoïdes.

De Rijke et coll. [33] ont classé les flavonoïdes en 6 familles qui impliquent les flavonols, les flavones, les flavanes, les isoflavones, les anthocyanines et les flavanols. Au sein de ces six familles, deux types de structures ont été relevés, celui des flavonoïdes au sens strict dont la structure porte le noyau aromatique B en position 3 sur la chaîne C<sub>3</sub> et celui des isoflavonoïdes dont le noyau aromatique B est en position 2 sur la chaîne C<sub>3</sub>.

#### **I.9.5.2. Anthocyanes :**

Les anthocyanes (du grec anthos, fleur et Kuanos, bleu violet) est un terme général qui regroupe les anthocyanidols et leurs dérivés glycosylés [31]. Les anthocyanines sont des flavonoïdes porteurs d'une charge sur l'oxygène de l'hétérocycle C. La structure de base des anthocyanines est caractérisée par un noyau "flavon" généralement glucosylé en position C<sub>3</sub> [34]. Les anthocyanes se différencient par leur degré d'hydroxylation et de méthylation, par la nature, le nombre et la position des oses liés à la molécule. L'aglycone ou anthocyanidine constitue le groupement chromophore du pigment. Ces molécules faisant partie de la famille des flavonoïdes et capables d'absorber la lumière visible, sont des pigments qui colorent les plantes en bleu, rouge, mauve, rose ou orange [35]. Leur présence dans les plantes est donc détectable à l'œil nu. A l'origine de la couleur des fleurs, des fruits et des baies rouges ou bleues, elles sont généralement localisées dans les vacuoles des cellules épidermiques, qui sont de véritables poches remplies d'eau. Si la coloration des fleurs et des fruits est leur rôle le plus connu, on trouve également les anthocyanes dans les racines, tiges, feuilles et graines. En automne, les couleurs caractéristiques des feuilles des arbres sont dues aux anthocyanes et aux carotènes qui ne sont plus masqués par la chlorophylle.

#### **I.9.5.3. Tanins :**

Le terme tanin dérive de la capacité de tannage de la peau animale en la transformant en cuir par le dit composé. Les tanins sont un groupe des polyphénols à haut poids moléculaire. Les tanins sont des molécules fortement hydroxylés et peuvent former des complexes insolubles

lorsqu'ils sont associés aux glucides, aux protéines et aux enzymes digestives, réduisant ainsi la digestibilité des aliments. Ils peuvent être liés à la cellulose et aux nombreux éléments minéraux [36]. On distingue: les tanins hydrolysables et condensés.

#### ✚ Les tanins hydrolysables :

Ces tanins sont des dimères d'acide gallique condensés sur un dérivé glycosylé. Ils comprennent l'acide gallique et les produits de condensation de son dimère et l'acide hexahydroxydiphénique. Comme leur nom l'indique, ces tanins subissent facilement une hydrolyse acide et basique : ils s'hydrolysent sous l'action enzymatique et de l'eau chaude [35].

#### ✚ Les tanins condensés :

Appelés aussi proanthocyanidines ou procyanidines, les tanins condensés, sont des polyphénols de masse molaire élevées. Ils résultent de la polymérisation autoxydative ou enzymatique des unités de flavan-3,4-diol liées majoritairement par les liaisons C<sub>4</sub>-C<sub>8</sub> (parfois C<sub>4</sub>-C<sub>6</sub>) des unités adjacentes, et se nomment ainsi pro anthocyanidines de type B. Lorsque la condensation se produit entre les unités adjacentes par la liaison C<sub>4</sub>-C<sub>8</sub> et par une liaison d'éther additionnelle entre C<sub>2</sub> et C<sub>7</sub>, les proanthocyanidines sont dits de types A [37,38].

***Chapitre II :***  
***Entartrage et son***  
***inhibition***

## Chapitre II

### Entartrage et son inhibition

#### II.1. Introduction :

Le calcaire dans l'eau naturelle constitue une préoccupation majeure pour les procédés industriels et les installations domestiques. Les dépôts de tartre indésirables causent de nombreux problèmes techniques aux lourdes conséquences sécuritaires et économiques

#### II.2. Définition de l'entartrage :

L'entartrage est la formation de dépôts sur les parois internes des conduites et ouvrages qui véhiculent les eaux. Ce dépôt est, en général constitué de carbonate de calcium, de sulfate de calcium ou de silice. Il peut aussi contenir d'autres carbonates mixtes de calcium et de magnésium, des oxydes et hydroxydes tel que l'hydroxyde ferrique ou des argiles selon l'origine de l'eau.

L'entartrage est un phénomène complexe qui conduit à la formation d'un dépôt dans les canalisations, au niveau de la robinetterie et sur les résistances des chauffe-eaux. Ce dépôt peut à terme obstruer complètement les canalisations ; il favorise le développement microbien et diminue les échanges thermiques. La vitesse d'entartrage est augmentée par l'élévation de la température de l'eau [39].

#### II.3. Causes de l'entartrage :

Pour qu'il y ait dépôt entartrant, deux conditions doivent être réunies [40].

- Il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est-à-dire qu'il y ait sursaturation, c'est l'aspect thermodynamique.
- Il faut ensuite que la vitesse de dépôt soit suffisamment rapide, c'est l'aspect cinétique.

##### • Facteurs d'ordre thermodynamique :

- L'échange du dioxyde de carbone entre l'eau et la phase gazeuse au contact de laquelle on la manipule ;
- Changement des conditions physiques (température, pression, pH ...) d'une eau contenant des ions capables de donner un précipité en se recombinaut [41] ;

## Entartrage et son inhibition

- Modification de la composition d'eau due au mélange de deux eaux incompatibles, c'est-à-dire deux eaux contenant des ions capables de former un précipité après mélange ;
- Modification par évaporation et augmentation des concentrations [40].

- **Facteurs d'ordre cinétique :**

La cinétique de la formation de tartre est basée sur deux processus qui sont la germination et la croissance cristalline. Les facteurs qui influent sur ces deux processus sont :

- La nature du matériau : elle constitue le récipient où a lieu le dépôt de carbonate de calcium;
- L'état de surface : les surfaces les moins bien polies offrent de meilleures conditions pour la germination et la croissance;
- La mouillabilité de la surface intervient également : plus la surface est mouillable par l'eau, plus le dépôt se forme et adhère facilement. On va, dans le sens d'une formation plus difficile du tartre [41].

### II.4. Conséquence de l'entartrage :

Il existe plusieurs conséquences dû à l'entartrage :

- **Hydrauliques** : En réduisant les sections et en dégradant l'état des surfaces, ces tartres adhèrent fortement, augmentent, à débit constant, les pertes de charge et par conséquent les dépenses énergétiques liées à la circulation des fluides. Déjà gênantes dans le cas de tuyauteries démontables et nettoyables, ces formations deviennent catastrophiques quand elles affectent les conduites enterrées [42].
- **Thermiques** : Ayant un faible coefficient de transfert thermique en regard des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs, le tartre diminue la qualité des échanges [43].
- **Transfert de matière** : Le colmatage des membranes par la précipitation des sels altère gravement le transfert de matière [43].
- **Mécaniques** : Au regard des quantités déposées dans certaines structures, celles-ci, voient leur résistance mécanique sérieusement remise en cause, suite à la surchauffe. Il se produit des déformations et des hernies qui aboutissent aux éclatements des tubes de l'échangeur [43].
- **Economiques** : La formation du tartre reste un problème économique majeur aussi bien dans l'industrie que dans les installations domestiques du fait qu'il engendre des surcoûts

## Entartrage et son inhibition

économiques considérables, dus aux coûts de maintenance et renouvellement de ces installations [44].

### II.5. Carbonate de calcium :

Le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) est un tartre alcalin formé en raison de la dégradation de l'ion bicarbonate, et c'est l'un des types de tartre les plus courants. Le degré de l'entartrage dépend principalement du niveau de dureté calcique et d'alcalinité au bicarbonate de l'eau d'alimentation. Le taux de dégradation du bicarbonate augmente avec l'augmentation du pH et de la température et est également affecté par la teneur en solides totalement dissouts [45].

#### II.5.1. Propriétés optiques :

Les carbonates peuvent facilement être reconnus dans les sections minces du sol, car leur biréfringence est extrême, ce qui donne des couleurs d'interférence blanc crème crémeux [46].

#### II.5.2. Cristallographie du carbonate de calcium :

Il est à priori l'un des minéraux les plus répandus dans l'écorce terrestre et constitue un élément essentiel des roches sédimentaires. Le carbonate de calcium se présente sous plusieurs formes qu'on peut diviser en deux groupes : les formes anhydres et les formes hydratées. Nous citons dans ce qui suit les formes anhydres :

Elles sont peu solubles et se distinguent par leur structure cristalline. Elles sont au nombre de trois : calcite, aragonite et vatérite.

##### • Calcite :

La calcite est de structure rhomboédrique à face centrée et se présente habituellement sous forme de cristaux quasi-cubiques, incolores et blancs [47,48]. C'est la forme la plus stable du point de vue thermodynamique donc elle est la plus insoluble des trois formes anhydres et la plus fréquemment observée dans la nature [49,50]. Elle est soluble dans l'acide chlorhydrique dilué froid, avec une vive effervescence. Elle reste stable jusqu'aux plus hautes températures, subissant seulement une recristallisation et une augmentation de la taille des grains [51].





**Figure II.1:** Calcite.

• **Aragonite :**

Elle cristallise dans le système orthorhombique pseudo-hexagonal et se présente en général sous forme d'aiguilles plus au moins allongées [52] Elle est métastable à la température ordinaire [48] A des températures supérieures à 400°C, l'aragonite se transforme en calcite. Elle précipite à chaud avec une prédominance au-dessus de 60°C, et elle apparaît pour des coefficients de sursaturation élevés, et en présence de magnésium à l'abri de l'air et par conséquent en l'absence de pression de CO<sub>2</sub>, la proportion d'aragonite croît régulièrement depuis la température ambiante jusqu'à 100°C [46].



**Figure II.2:** Aragonite.

• **Vatérite :**

Cette variété se cristallise dans le système hexagonal et présente une grande sensibilité au contact de l'eau à la température ambiante [52] Elle est donc la moins stable, pratiquement inexistante à l'état naturel et n'est observable qu'à des températures basses [51]. Trois faciès sont couramment rencontrés, les faciès dits en lentilles, en fleurs et la rose des sables. Le faciès le plus fréquemment observé est en lentilles [49]. Il est facile d'observer la transformation de la vatérite en aragonite ou en calcite par le fait que la vatérite est moins stable des trois formes anhydres [53].

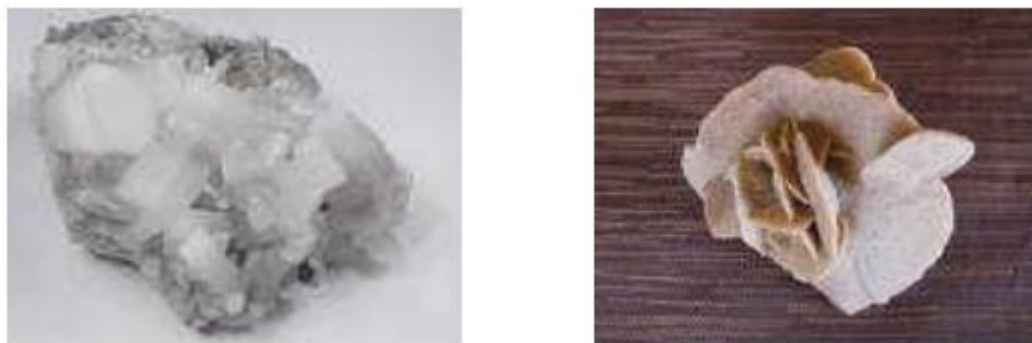


Figure II.3: Vaterite de forme « lentille » et « rose des sables »

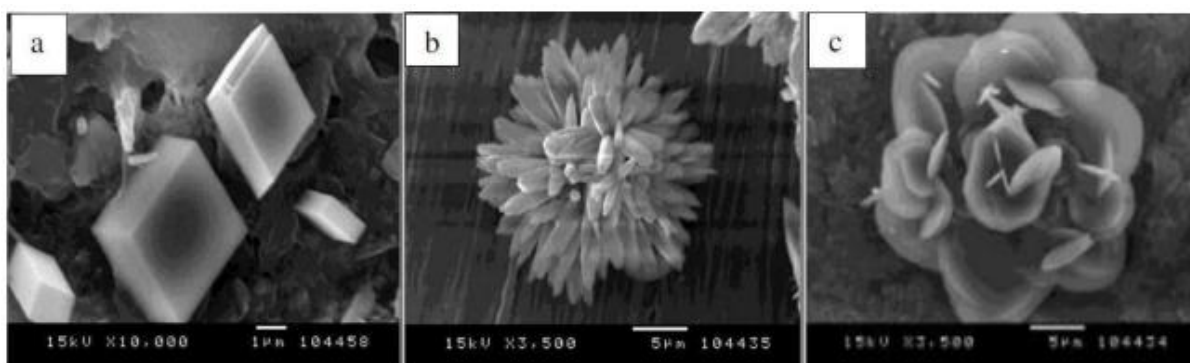
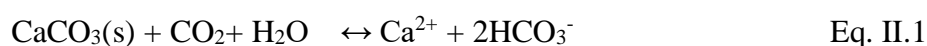


Figure II.4 : Photos MEB de (a) calcite, (b) aragonite et (c) vaterite.

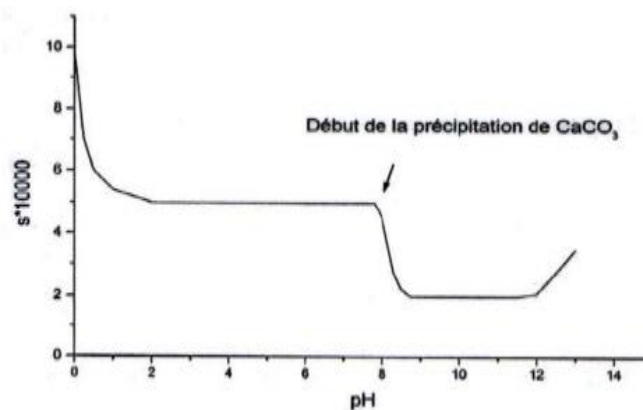
### II.6.3. Solubilité du carbonate de calcium :

Selon USP (United States Pharmacopeia), le  $\text{CaCO}_3$  est pratiquement insoluble dans l'eau. Sa solubilité dans l'eau est augmentée par la présence de sel d'ammonium ou de  $\text{CO}_2$  selon l'équilibre :



La précipitation de  $\text{CaCO}_3$  peut intervenir sous l'action d'un phénomène local, tel que l'augmentation du pH, comme le montre la figure II.5. Cette courbe montre la solubilité du carbonate de calcium diminue à  $\text{pH} = 8,5$  [48].

La présence de tout hydroxyde alcalin réduit sa solubilité. Il est insoluble dans l'alcool. Il se dissout avec effervescence dans  $\text{CH}_3\text{COOH}$  1N, dans  $\text{HCl}$  3M et dans  $\text{HNO}_3$  2M. La solubilité du  $\text{CaCO}_3$  (conventionnel) dans l'eau est de 16,6 mg / L (20 °C, pH 9–9,4), tandis que celle des formes aragonite et calcite est de 6,6 mg / L (20 °C) et 11 mg / L (20 °C) pour la forme vaterite. La forme amorphe de  $\text{CaCO}_3$ , dont les particules sont principalement à l'échelle nanométrique est environ 10 fois plus soluble que le  $\text{CaCO}_3$  cristallin [48].



**Figure II.5:** Solubilité apparente du carbonate de calcium en fonction du pH [48].

#### II.5.4. Mécanisme de précipitation du carbonate de calcium :

La précipitation d'une nouvelle phase solide à partir d'une phase liquide ne peut avoir lieu que si un degré de saturation de la solution est atteint. Ce dernier est un paramètre important qui conditionne tout le processus de cristallisation. Cependant, dans beaucoup de cas, le simple dépassement du produit de solubilité  $K_S$  n'induit pas automatiquement l'apparition de dépôt. Des expériences ont montré qu'une valeur qui dépasse  $K_S$  n'est pas suffisante pour la formation d'une phase solide. Dans le cas du carbonate de calcium, même si le produit  $(Ca^{2+}).(CO_3^{2-})$  se trouve supérieur à  $K_S$  mais l'écart de concentration entre ces deux valeurs n'est pas suffisant, l'évolution spontanée de l'eau vers l'équilibre calcocarbonique n'aura pas lieu : c'est le phénomène de sursaturation. Comme dans tout processus de cristallisation, le carbonate de calcium se forme en deux étapes: germination puis croissance cristalline. Les études relatives à l'étape de croissance sont très nombreuses, alors que peu de travaux sont effectués sur la germination. Ceci est probablement dû au fait de la complexité du système qui n'a pas permis à ce jour une modélisation mathématique satisfaisante de la germination. Par ailleurs, les méthodes d'études utilisées par ces systèmes ne permettent pas une bonne séparation des deux étapes des échanges de matières à l'interface solide liquide [54].

#### II.5.5. Solubilité dans l'eau :

La forme cristalline stable à la température ordinaire est la calcite. La calcite est la moins soluble ( $pK's = 8.35$ ), elle précipite à froid. L'aragonite est plus soluble que la calcite ( $pK's = 8.22$ ), elle précipite à chaud ( $T > 60^\circ C$ ). La forme vaterite est la plus instable des trois formes cristallographiques de  $CaCO_3$  et rend son identification difficile.

**II.6. Influence de certains paramètres sur l'entartrage :****II.6.1. Influence de température :**

La solubilité de  $\text{CaCO}_3$  et  $\text{CO}_2$  diminuent lorsque la température augmente conduisant à des dépôts riches en carbonate de calcium et donc plus bloquant à hautes températures [54]. Quand la température augmente, la germination et la vitesse de croissance des cristaux augmentent, occasionnant la formation plus rapide du dépôt, qui est plus compact, composé de cristaux de plus petite taille. A cet effet, s'ajoute le changement de forme cristallographique (calcite-aragonite qui s'opère à partir de  $45^\circ\text{C}$ ) [55]. Ils ont constaté que le temps de germination diminue fortement quand la température augmente. En effet, l'augmentation de l'entartrage avec la température est due à la diminution de la solubilité du dioxyde de carbone et à la variation des constantes des équilibres carbonique et calcocarbonique avec la température [56].

**II.6.2. Influence du pH :**

Dans un milieu naturel, les protons peuvent être fournis par l'eau, par un acide, par dissolution des minéraux carbonatés, ou par dissociation du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. De ce fait, le pH d'un tel système sera avant tout conditionné par l'existence ou non des échanges avec l'air, qui représente un réservoir infini du  $\text{CO}_2$  atmosphérique [57]. Les vitesses de germination et de croissance cristalline augmentent avec l'augmentation du pH de la solution. L'alcalinisation d'une solution peut induire la formation de  $\text{CaCO}_3$ , alors que l'acidification peut entraîner la dissolution du  $\text{CaCO}_3$  solide. L'analyse morphologique montre que le  $\text{CaCO}_3$  précipite sous la variété vatérite à plus de 90% pour la solution à  $\text{pH}=6$ . Plus le pH augmente, plus la fraction de calcite devient importante et devient majoritaire à  $\text{pH}=7,27$  [57].

**II.6.3. Influence du substrat :**

Plusieurs études ont montré que la nature de la paroi influence considérablement sur la cinétique de précipitation du  $\text{CaCO}_3$  surtout pour des faibles concentrations en calcium [58].

Plusieurs types matériaux ont été testés dont le PVC, cuivre, aluminium, nickel, or, acier et verre. L'analyse MEB des plots montre effectivement que la paroi influe sur la morphologie du carbonate de calcium déposé. La calcite est la variété majoritaire déposée sur le PVC et sur l'acier à forte et à faible concentration en carbonate de calcium dans la solution. A une concentration de  $40^\circ\text{F}$ , sur les autres supports, cuivre, nickel, aluminium, verre et or, la

## Entartrage et son inhibition

vatérite est la forme majoritairement précipitée. Vers les faibles concentrations en  $\text{CaCO}_3$  en solution, sur ces mêmes matériaux, le  $\text{CaCO}_3$  se précipite sous la forme calcite [58].

Les travaux montrent que la nature du substrat n'influe pas sur la cinétique de précipitation des eaux dures à température élevées, mais affecte considérablement le type de nucléation. Le dépôt formé est plus important sur les matériaux plastiques que sur les métaux [59].

### II.5.4. Influence de la composition de l'eau :

#### • Influence de $\text{Mg}^{2+}$ :

En ce qui concerne le cation  $\text{Mg}^{2+}$ , son effet sur l'entartrage a été trouvé conforme à ce qui est généralement observé, c'est-à-dire un effet d'inhibition de l'entartrage dû à la formation majoritaire d'aragonite aux dépens de la calcite. Un effet original inverse a cependant été noté à très faible concentration en ions  $\text{Mg}^{2+}$ , hypothétiquement attribué à une intervention du cation dans le processus de formation des germes colloïdaux de  $\text{CaCO}_3$  [55].

#### • Influence de $\text{Ca}^{2+}$ :

L'effet des ions calcium sur la déposition du tartre en présence de différents cations étrangers a été étudié [60]. Une forte concentration en calcium favorise la précipitation sous forme de calcite avec une quantité de dépôt plus importante et pour de faibles concentrations les deux formes, calcite et vatérite, ont été observées [61].

#### • Influence de $\text{NaCl}$ :

L'augmentation de la quantité de  $\text{NaCl}$  prolonge le temps de nucléation. En revanche, cette augmentation de quantités de  $\text{NaCl}$  semble perturber davantage la précipitation homogène que la précipitation totale. On suggère que la présence de  $\text{NaCl}$  favorise l'incrustation dans les parois et inhibe la nucléation homogène. La présence de  $\text{NaCl}$  influence légèrement la morphologie et semble favoriser la cristallisation de l'aragonite au profit des autres variétés [62].

### II.6. Equilibre calcocarbonique :

Toutes les eaux contiennent en quantité plus ou moins importante, de l'acide carbonique, des ions monohydrogéno-carbonates et des carbonates. Toutes ces espèces chimiques sont interdépendantes. Il s'agit de l'équilibre calcocarbonique. Le comportement d'une eau dépend du fait qu'elle soit ou non équilibrée. Lors de son parcours dans les canalisations, elle fera tout pour le retrouver [63].

## Entartrage et son inhibition

L'équilibre calcocarbonique permet de prévoir la tendance de l'eau à l'entartrage ou à la corrosion. Considéreront une eau contenant du CO<sub>2</sub> et mise en contact avec du carbonate de calcium solide en excès. Au bout d'un certain temps, un équilibre physico-chimique se produit [64].



Le CO<sub>2</sub>, en présence d'une phase gazeuse (atmosphère ou rhizosphère), peut se dissoudre dans l'eau. Après hydratation et ionisation, le CO<sub>2</sub> donne lieu à un produit acide qui permet l'attaque du CaCO<sub>3</sub> présent dans toutes les roches sédimentaires. Celui-ci se dissout et passe en solution sous forme d'hydrogénocarbonate beaucoup plus soluble que le carbonate. Cette transformation, qui correspond au sens (1) de la réaction (Eq.II.2), est celle qui correspond au processus de solubilisation des roches sédimentaires dans le sol quand l'eau est au contact de la rhizosphère riche en CO<sub>2</sub>. Si par la suite cette eau perd du CO<sub>2</sub>, par dégazage et/ou échauffement, la réaction peut être déplacée dans le sens (2) et donner lieu à une précipitation de CaCO<sub>3</sub> qui, s'il adhère aux parois, va constituer le tartre. Dans le cas des eaux douces superficielles, le carbonate de calcium sera toujours le constituant majeur du tartre déposé.[43]

### II.7. Inhibiteurs de tartre :

Face aux problèmes de formation des dépôts de tartre, plusieurs méthodes chimiques fondées sur l'emploi des inhibiteurs d'entartrage ont largement fait preuve de leur efficacité. Admettant l'apparition des cristaux comme fatale, ce traitement s'attaque directement au temps et au type de germination. A ce effet, on utilise des produits qui retardent l'apparition des germes (temps de germination plus long que le temps de séjour de l'eau dans le circuit), et favorisent la formation des cristaux peu adhérents (germination homogène) et/ou qui diminuent la vitesse de croissance des cristaux [41]. On appelle « tartrifuges », les substances qui présentent une ou plusieurs de ces propriétés. L'effet tartrifuge est connu depuis longtemps. Aussi, la recherche de nouveaux tartrifuges et leur mise au point reste encore une démarche marquée d'un certain empirisme. Pour cette raison, il est important de bien préciser les conditions de test dans lesquelles l'efficacité d'un tartrifuge peut être appréciée. Historiquement, la recherche d'inhibiteurs a commencé à partir du polymère naturel. Depuis le siècle dernier (dès la fin des années 60 début des années 70), la technique d'inhibition de l'eau de refroidissement a été rapidement développée avec l'émergence de l'acide polyacrylique et l'acide poly-maléique, favorisant le développement d'une série de binaire et des copolymères

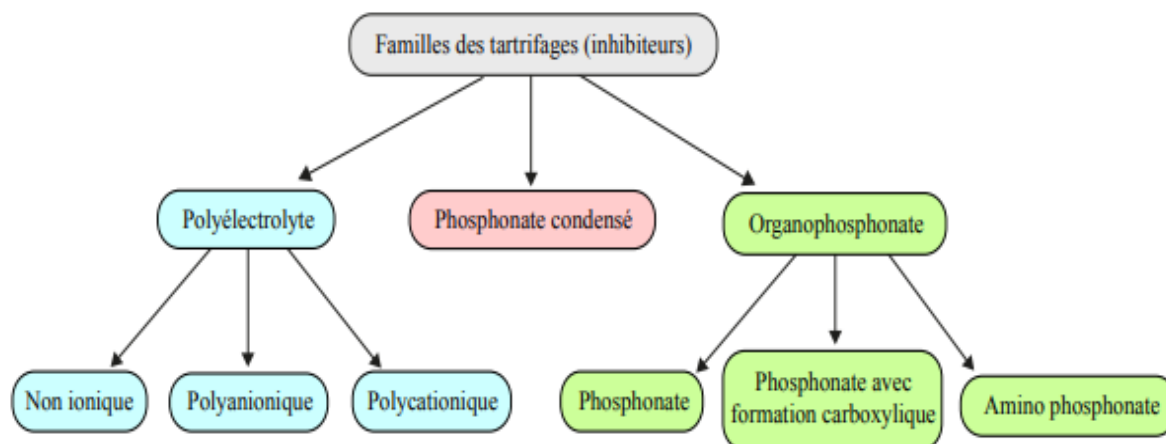
synthétiques. À la fin des années 70, des polymères contenant du phosphore ont été développés avec des propriétés d'inhibition contre le tartre et la corrosion. Dans les années 80, le développement d'un polymère contenant un groupement d'acide sulfonique révolutionne la science. L'apogée du développement de la chimie verte des années 80 et 90 a favorisé le développement de plusieurs inhibiteurs de polymères respectueux de l'environnement. Durant ce siècle et avec la profonde et large propagation de la chimie verte, les inhibiteurs verts d'entartrage respectueux de l'environnement qui sont non-phosphoriques et biodégradables deviennent la direction principale de recherche du traitement des eaux industrielles. Autres fois, Les inhibiteurs utilisés dans le développement industriel, sont composés de produits inorganiques. En effet le polyphosphate inorganique, tel que le tripolyphosphate de sodium, l'hexamétaphosphate de sodium, peut inhiber la formation de tartre. L'inconvénient du polyphosphate inorganique est qu'il s'hydrolyse facilement en orthophosphate. L'utilisation abusive de cet inhibiteur conduit à la formation du tartre  $\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_2$  qui est plus difficile à traiter et accélère en même temps la phosphorylation de l'eau. Après les années 1960, la recherche d'inhibiteurs se concentre sur les inhibiteurs de l'acide phosphorique organique et les inhibiteurs copolymères. L'acide phosphorique organique (l'acide polyacrylique, l'acide poly-maléique) présente une bonne résistance à la température élevée de l'eau, une bonne stabilité chimique et une forte alcalinité.

Les propriétés de l'acide phosphorique organique rendent cet inhibiteur difficile à hydrolyser comparativement aux inhibiteurs poly-phosphates inorganiques et lui donnent d'excellentes performances d'inhibition du  $\text{CaCO}_3$  [42].

### II.7.1. Classification des différentes familles de tartrifuges :

La grande famille des tartrifuges s'agrandit tous les jours, ce qui ne nous permet pas de donner une liste exhaustive de tous les produits qui ont été proposés. Toutefois, la plupart de ces produits peuvent se regrouper en famille ayant un groupement ou une architecture commune qui est à la base des propriétés tartrifuges. En nous limitant aux plus classiques et aux plus utilisés, cette classification est représentée sur la figure II.6.





**Figure II.12:** Classification des différentes familles de tartrifuges.

#### II.7.1.1. Phosphates condensés [65]:

Ces produits dont les propriétés sont connues depuis longtemps et qui sont très utilisés en Europe, particulièrement dans la formulation des poudres à laver, s'hydrolysent facilement au dessus de 70° C et donnent des orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) qui, une fois rejetés dans le milieu naturel sont considérés comme étant les principaux responsables des phénomènes d'eutrophisation des milieux aquatiques. Vers la fin des années 60, ces produits ont été remplacés par les organophosphonates.

#### II.7.1.2 Polyélectrolytes :

Un certain nombre de macromolécules ont des propriétés tartrifuges. On peut distinguer les polycationiques [65], les polyanioniques [66,67] et les non ioniques [65].

#### II.7.2. Travaux supplémentaires :

Plusieurs types d'inhibiteurs d'entartrage, qu'ils soient minéraux ou organiques, ont prouvé leur efficacité et sont déjà commercialisés. L'effet inhibiteur d'entartrage d'ions métalliques ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) se traduit par la formation de carbonates mixtes de calcium et de cuivre  $\text{Cu}_x\text{Ca}_{1-x}\text{CO}_3$  et les carbonates de zinc et de calcium  $\text{Zn}_x\text{Ca}_{1-x}\text{CO}_3$ . Le mécanisme de l'inhibition repose sur l'énergie de déshydratation des ions  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$  qui est plus importante que celle des ions  $\text{Ca}^{2+}$ . Ceci permet de bloquer la croissance des germes formés [68]. A leur tour, les ions métalliques du fer jouent un rôle important dans l'inhibition de l'entartrage [69].



## Entartrage et son inhibition

### II.7.3. Mécanisme d'action contre le tartre :

Les antitartres qui empêchent la précipitation pour des doses bien inférieures à la valeur stœchiométrique nécessaire à la séquestration ou à la chélation sont appelés « inhibiteurs à effet de seuil » [65]. Ces produits sont capables d'inhiber les dépôts en agissant sur:

- la période de germination;
- la période de croissance;
- la période de germination et de croissance.

#### II.7.3.1. Inhibition de la germination :

La germination peut être inhibée, ou au moins retardée, si la réaction élémentaire résultant de l'association des ions calcium et des ions carbonates est elle-même inhibée. D'après les recherches en cours, il s'agit de composés métabolisés par certains microorganismes des eaux. Ces composés constituent une partie de ce que l'on nomme « les matières organiques » de l'eau sans que l'on connaisse avec précision leur composition. Ils sont parfois confondus avec les acides humiques qu'ils accompagnent, bien que ceux-ci ne présentent en fait qu'un pouvoir inhibiteur très faible voir nul. Ces composés peuvent retarder la germination de carbonate de calcium mais n'en modifient pas la croissance. Leur présence peut être mise en évidence par des essais d'électrodéposition tels que ceux mis au point par Lédion. Ils tendent à accroître le temps d'entartrage sans modifier la qualité de la couche de carbonate de calcium formée sur la surface de l'électrode de travail et sans en modifier l'adhérence [70].

#### II.7.3.2 Inhibition de la croissance :

L'inhibition de la croissance a été largement étudiée dans le cas de l'addition à l'eau de composés tels que les polyphosphates [71] ou certains composés organophosphorés [72]. Ces composés présentent une grande affinité pour le carbonate de calcium solide sur la surface où ils s'adsorbent. Cette adsorption entraîne une modification des propriétés de surface du solide et particulièrement un changement de la charge électrique initialement positive qui devient négative [73].

Dans ce cas, la germination du carbonate est toujours possible mais dès leur apparition, les germes sont inhibés et ne peuvent plus accroître. Dans le cas d'un test d'électrodéposition, l'effet de ces composés se manifeste par une légère augmentation du temps d'entartrage, accompagnée d'un accroissement important du courant résiduel. Cette intensité résiduelle tend d'ailleurs vers l'intensité initiale lorsque la concentration en inhibiteur devient suffisante.

**II.7.3. Inhibiteurs verts :**

A la fin des années 80 à 90, la chimie verte a émergé et a conduit au développement de plusieurs inhibiteurs non phosphatés respectueux de l'environnement et biodégradables deviennent la direction principale de la recherche dans le traitement des eaux [74].

Les polymères biodégradables sont éliminés par l'environnement bioactif par action enzymatique des micro-organismes tels que les bactéries, champignons ou encore algues [75]. Comme ils peuvent être éliminés par des procédés non enzymatiques (hydrolyse chimique) ou ils sont convertis en CO<sub>2</sub>, eau, méthane, biomasse et autres substances naturelles par biodégradation. Ils sont aussi éliminés par des procédés biologiques [76].

Les inhibiteurs dits verts doivent répondre à des exigences : une excellente inhibition du tartre, une faible toxicité vis à vis des organismes aquatiques et humains, avoir une biodégradabilité élevée, un faible impact sur la qualité des eaux et un bon rapport qualité/ prix. Le stockage et l'utilisation à long terme sont limités par la biodégradabilité et cela à cause de micro-organismes. La dégradation peut être empêchée par ajout de biocides et d'agents stabilisants et cela peut rendre certains extraits plus efficaces [77].

Les inhibiteurs peuvent être de plusieurs natures : dérivés de la pétrochimie, molécules organiques naturelles ou encore extraits de plantes.

**II.7.3.1. Inhibiteurs dérivés de la pétrochimie :**

Ces inhibiteurs sont synthétisés à partir de composés issus du pétrole.

**a. Inhibition avec carboxyméthyluline :**

La carboxyméthyluline (CMI) est un poly-carboxylate à base de polysaccharide biodégradable et non toxique, obtenu à partir de l'inuline par synthèse chimique. Elle a un effet significatif sur l'inhibition du tartre de par son groupement d'acide carboxylique [78]. Verraest et al. ont étudié l'effet du CMI (de 0,1 à 200 mg/l) sur la cristallisation du CaCO<sub>3</sub>. Ils ont conclu que le CMI est un bon inhibiteur qui agit par modification de la morphologie du cristal. Ils ont aussi démontré qu'il agissait sur la cinétique de germination à une composition fixe et à la constante de sursaturation. Ils ont aussi suggéré qu'avec un grand degré de saturation et de polymérisation, il était le plus efficace. A une température de 25°C et à pH=8, l'inhibition a atteint 95% obtenue à l'aide d'un inhibiteur CMI-25 avec une concentration de 1,5.10<sup>-9</sup> mol/l. Ils ont conclu que plus le nombre de groupement chargé négativement est élevé, plus l'inhibition est meilleure, ce qui est cohérent avec les résultats précédents [79].

**b. Inhibition par le polyaspartate [80] :**

Le polyaspartate est un polypeptide dérivé de l'acide aspartique, une amine naturellement présente dans les protéines. Il existe plusieurs méthodes pour l'obtenir soit par condensation thermique soit la polymérisation catalysée ou bien par la polymérisation thermique de l'acide maléique et l'hydroxyde d'ammonium. Ces trois réactions nous donnent un composant intermédiaire qui est le polysuccinimide qui va se transformer par la suite en polyaspartate par un alcalin hydrolysé. La variation de la structure chimique et les caractéristiques du polyaspartate dépendent de la méthode de son obtention. Le polyaspartate est très biodégradable cela dépend de la méthode de synthèse et aussi de la linéarité de la chaîne polymérique. Ce composant est l'un des inhibiteurs de la précipitation du carbonate de calcium. La masse moléculaire optimale pour l'inhibition de  $\text{CaCO}_3$  est de 2 à 4 kg/mol. Il agit à des concentrations très supérieures à la stœchiométrie.

**c. Inhibition par l'acide polyepoxysuccinique (PESA):**

Le PESA est un inhibiteur vert biodégradable et sa structure ne contient ni phosphore ni azote. La valeur de  $n$  est comprise entre 2 et 50. Le PESA possède une grande résistance contre l'alcalinité et une bonne performance inhibitrice. En le combinant avec l'atome d'oxygène, il devient plus efficace que les inhibiteurs organiques tels que le polyacrylate de sodium, l'acide polymaléique ou l'acide tartrique. Il présente une bonne solubilité thermique et une forte chélation de  $\text{Ca}^{2+}$ . Il est utilisé dans plusieurs applications, tels que le dessalement d'eau de mer et la séparation membranaire [74].

**d. Inhibition par les polyacrylates [81] :**

Khalil [82] a testé un polyacrylate commercial, et a remarqué que l'entartrage est d'autant plus faible que la concentration en inhibiteur croît : pour 6 mg/l de polyacrylate le tartre est nulle. Il n'agit pas par effet complexant comme le cas des phosphonates. Une étude, réalisée en utilisant la modélisation moléculaire, a montré que le polyacrylate s'adsorbe sur les cristaux de  $\text{CaCO}_3$  par leur groupement fonctionnel chargé négativement. L'additif adsorbé empêche la croissance des cristaux [83].

**II.7.3.2. Inhibiteurs à base de molécules organiques naturelles :**

Plusieurs recherches ont été réalisées sur ce genre de molécules du fait qu'elles soient acceptables du point de vue environnemental comparées aux inhibiteurs classiques.

## Entartrage et son inhibition

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à quelques travaux relatifs à ces molécules.

### a. Acide citrique :

L'acide citrique à une concentration de 13 mg/l se révèle être un bon inhibiteur avec une concentration totale de 800 mg/l de calcium. La croissance est inhibée grâce à l'adsorption de cet acide sur la surface du  $\text{CaCO}_3$ . Une étude réalisée sur plusieurs acides carboxyliques (acide humique, acide maléique, acide tartrique...) a avancé que la conformation de l'acide carboxylique avait un rôle dans l'inhibition [84]. Reddy et al. ont montré qu'avec une composition constante d'acide citrique (10 mg/l, à 25 °C et à pH =8,55), la vitesse de croissance de la calcite diminue légèrement pour une concentration de  $\text{Ca}^{2+}$  de 76 mg/l. Cela est dû au fait que l'acide citrique soit linéaire alors il a suggéré que travailler avec des acides cycliques serait plus intéressant [85]. Les mêmes résultats en été constatés pour d'autres composés comme l'acide glutamique [86] ou la leucine [87].

### b. Mdm2 riche en cystéine :

La Mdm2 est une substance physiologique (peptide) qui bouge librement dans la circulation sanguine ainsi que dans tous les tissus et vertèbres. Cette étude réalisée à 25 °C et à pH = 8,5 a montré que l'inhibition avait un rendement allant de 22 à 58 % en sa présence avec une concentration totale de calcium ente 80 et 120 mg/l. Il a été suggéré que les sites actifs de croissance du  $\text{CaCO}_3$  ont été bloqués par adsorption des peptides. Les fragments de cette peptide interagissent avec le  $\text{CaCO}_3$  soit avec le groupement carboxylique soit en créant des liaisons hydrogène [88].

### c. Utilisation de vitamine comme inhibiteur :

RS1600 est un mélange de deux vitamines Thiamine 50% (B1) et pyridoxine 50% (B6). Une étude a montré qu'il pouvait retarder la cinétique de germination avec la nucléation d'un temps équivalent à 72 minutes en présence de 160 mg/l de  $\text{Ca}^{2+}$  avec la méthode de dégazage de  $\text{CO}_2$ . De plus, ce dégazage se fait par barbotage de nitrogène a montré qu'il faut augmenter la teneur de l'inhibiteur pour inhiber la germination des cristaux. Ce mélange est considéré comme inhibiteur vert destiné au traitement des eaux potable [89].

### d. Utilisation des molécules de xanthane (XC) :

La cristallisation du  $\text{CaCO}_3$  a été étudiée dans une solution de pH=9 avec les concentrations initiale de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  respectives de 2664 mg/l et 2544 mg/l avec des concentration de XC

## Entartrage et son inhibition

allant de 100 à 1000 mg/l . Dans les conditions de travail précédentes, il a été montré que les particules de  $\text{CaCO}_3$  été des cristaux de calcite qui s'empilent les uns sur les autres en présence de cet inhibiteur. Le degré d'empilage diminue avec l'augmentation de la concentration de (XC). Les chercheurs ont suggéré que le groupement carboxylique du XC dispersait les particules de carbonate de calcium les empêchant ainsi de s'agréger [90].

### e. Utilisation d'extraits de plantes comme inhibiteurs de tartre :

Les extraits de plantes qui contiennent plusieurs familles de composés organiques naturelles (flavonoïdes, alcaloïdes, tannins ...), étant écologiques, disponibles dans la nature, obtenues par des procédés simples et peu coûteux, peuvent avoir des propriétés inhibitrices de tartre. Les extraits de plantes en tant qu'inhibiteurs sont devenus une matière de recherche.

- Chanvre (*Cannabis Sativa* L) [90] : le chanvre séchée contient des celluloses, des hémicelluloses, des pectines et de la lignine, qui en fait un inhibiteur de tartre prometteur. Les hémicelluloses sont des polymères court et ramifiée. Il renferme aussi des acétyles et des acides. Ces derniers sont moins polymérisés que la cellulose. Grace à ces acides ferriques, l'hémicellulose forme des liaisons covalentes avec la lignine qui agit comme une matrice dans la fibre de la plante. Toutes ces molécules font office de polymère organique ce qui fait du chanvre un inhibiteur de tartre efficace.
- La plante de chicorée [91] : les principaux composants des racines de chicorée sont les carbohydrates (saccharose, glucose, fructose, fructooligosaccharides, polyphénols et inuline). L'inuline dont la teneur est de 21% en moyenne est une chaîne constituée d'environ 100 unités. La Carboxymethylinuline (CMI) formé par  $\beta$ D-fructofuranose reliée par des glucosidique, la carboxylation d'un carboxylate naturel obtenu à partir de la chicorée, il est considéré comme un bon antitartre. La chicorée étant principalement constituée d'inuline (de 60 à 80%) peut être considéré comme un bon inhibiteur.
- Topinambour [91] : le topinambour a une forte teneur en inuline (80%). Il est aussi composé de protéines, de fructose et de glucose ce qui en fait un bon inhibiteur de tartre du fait que la Carboxymethylinuline peut être dérivé à partir de l'inuline qu'il contient.
- Radis (*Raphanussativus* L) [92] : l'extrait de radis contient principalement l'isothiocyanate (39,1%), de phénols (10,9%), anthocyanidines (13,6%) et d'acide gras saturés (8,9%). Les tests d'entartage thermiques ont montré que pour une concentration de 10 ml/l, le tartre a été réduit de 4,7 fois que sans utilisation d'inhibiteur. Les analyses par SEM et FTIR ont confirmé la présence d'un film dont les composants principaux sont les phénols et les

## Entartrage et son inhibition

isothiocyanates partiellement polymérisé.

- Gypsophila aretioides [93] : cette plante possède des phénols et des agents moussants qui pourraient être à l'origine de l'inhibition du tartre. Pour une concentration de 10% (p/v) dans une solution saline, il a été constaté qu'aucune précipitation de  $\text{CaCO}_3$  n'a été retrouvée sur l'électrode en acier utilisée lors de l'expérience selon l'imagerie MEB.
- Paronychia Argentea : l'extrait de cette plante agit sur la germination qu'il bloque ainsi que sur la croissance des cristaux. Son mode d'action empêche complètement le dépôt de tartre. Une étude a montré que pour une concentration de 150 ppm l'inhibition du carbonate de calcium est totale et cela sous toutes ses formes (homogène et hétérogène) [94]. Mais cependant l'extrait ne peut pas être utilisé pour des températures dépassant  $45^\circ\text{C}$ , il a été aussi constaté que son efficacité diminue à partir de  $60^\circ\text{C}$  [95].
- Faux cotonnier (petite ouate) [96] : ces extraits agissent principalement sur l'étape de nucléation. Il a été montré que pour une concentration de 50 ppm en extraits, le temps de nucléation retardant la formation du tartre. L'inhibiteur est absorbé sur les sites de croissance des cristaux et en modifie la morphologie. L'extrait a aussi été comparé à un inhibiteur chimique ou il a été constaté qu'il présentait les mêmes résultats, cela en fait un bon inhibiteur.
- Extraits de feuilles de figes : avec l'ajout d'extrait de feuilles de figuier, une diminution de la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  avec augmentation de la concentration de l'extrait jusqu'à 75 ppm qui représente la concentration critique. Cette extrait augmente le temps de nucléation ce qui empêche la formation du carbonate de calcium. Son efficacité atteint les 85 % [97].
- Extrait de feuilles d'olivier : l'extrait aqueux de la feuille olive (*Oléa europaea* L) se compose au moins de 30 composés phénoliques (Tyrosol, Hydroxytyrosol, polyphénol ...). Les composés phénoliques adsorbent sur la surface de l'acier formant un film isolant. Cet arrangement des atomes d'oxygène peut mener à la conclusion que le composé phénolique est forcé pour être adsorbé horizontalement sur une surface en acier. l'efficacité élevée d'inhibition a pu être obtenue en employant des concentrations relativement basses de l'extrait. Pour une concentration critique de 50 ppm, une inhibition de 83% est observée, elle peut être attribuée à la formation complexe des molécules extraites avec les ions de calcium. Le mécanisme anti-incrustant n'est pas connu en détail [97].
- Extrait de *Punica granatum* (grenadier) : l'effet des extraits d'écorce et de feuille de grenadier sur le tartre a montré l'extrait d'écorce a donné de meilleurs résultats comparés à l'extrait des feuilles. Polyphénols punicaline et punicalagine deux constituant majeurs de l'écorce pourrait bien être impliqués dans l'inhibition du processus. L'étude microscopique du

## Entartrage et son inhibition

film formé sur la surface de l'électrode en acier utiliser lors de l'expérience, indique que cela pourrait se faire par modification de la surface. La densité de courant a augmenté pour atteindre 87% cela quand la concentration de l'extrait a augmenté de 10 mg/l à 100 mg/l. Cela prouve que l'extrait de l'écorce de grenadier est un inhibiteur efficace. Il a aussi été noté qu'avec une concentration de 50 mg/l l'inhibiteur été toujours efficace et cela à 5°C et après 28 jours [98].

- L'orange [99] : De ce travail, il a été conclu que les agents inhibiteurs présents dans la pelure d'orange avaient les mêmes effets que l'acide citrique. Il a aussi été remarqué que pour 5 ml d'extrait, la solubilité du  $\text{CaCO}_3$  augmente de 14 mg/l à 60 mg/l avec un pH avoisinant les 6,2. Il a aussi été constaté que pour une solution de 1g/l, la formation de carbonate de calcium peut être altérée de manière efficace. Enfin, les pelures d'oranges peuvent être une excellente alternative aux inhibiteurs chimiques classiques toute en participant à la protection de l'environnement.

***Chapitre III :***  
***Mise en œuvre***  
***expérimentale***



## Chapitre III

### Mise en œuvre expérimental

#### III.1. Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la présentation du protocole expérimental adopté pour la réalisation de notre travail. Pour commencer, les étapes suivies pour la préparation de l'extrait aqueux du Pissenlit (*Taraxacum Officinale*) seront développées. Certaines propriétés de la plante ont été calculées à savoir : la teneur en eau et en matière sèche, le taux d'extraction et l'activité antioxydant. Les méthodes de détermination de la composition chimique de l'extrait ont été définies : dosage des polyphénols, des flavonoïdes et des tanins ainsi que par spectroscopie Infra Rouge à Transformé de Fourier (FTIR).

La seconde partie sera dédiée à la partie électrochimique, en l'occurrence la préparation des électrodes, la description du dispositif utilisé ainsi que des méthodes qui ont permis d'effectuer notre travail.

#### III.2. Matériel végétal :

La plante utilisée et testée dans le processus d'inhibition du tartre est le Pissenlit (*Taraxacum Officinale*). Cette plante a subi des étapes de traitements avant d'avoir l'extrait avec lequel se sont fait les tests électrochimiques.



**Figure III.1 :** Pissenlit.

#### III.2.1. Préparation du pissenlit :

##### III.2.1.1. Récolte :

Le pissenlit (*Taraxacum Officinale*) a été récolté dans la Wilaya de Bejaia et plus exactement dans la région « Ait Smail ». La cueillette est effectuée au printemps 2022.

## Mise en œuvre expérimentale

### III.2.1.2. Nettoyage :

Avant d'entamer l'étape de séchage, les parties végétales étrangères ont été enlevées. Ensuite, la plante désirée a été étalée sur une table à l'ombre et à l'abri de l'humidité. Notez qu'en général, il n'est pas nécessaire de nettoyer les parties aériennes des plantes, c'est-à-dire les passer à l'eau. Pour les racines, il faudra, soit les nettoyer à sec en utilisant une brosse métallique, soit les laisser tremper dans de l'eau afin d'enlever la terre avant de les brosser.

### III.2.1.3. Séchage :

La partie aérienne du pissenlit a été séché à l'ombre et à l'abri de l'humidité.

### III.2.1.4. Broyage :

Une fois la plante devenue sèche, celle-ci est broyée par un broyeur électrique puis passée au tamis pour obtenir une poudre de granulométrie micrométrique.

### III.2.1.5. Conservation :

La poudre obtenue est conservée dans une bouteille en verre couverte par du papier en aluminium et mise dans un réfrigérateur.

### III.2.2. Préparation de l'extrait du pissenlit :

A l'aide d'une balance analytique, on pèse 20 g de poudre obtenue et on l'introduit dans une fiole de 1 L. Par la suite ; on ajoute de l'eau distillée et on complète la fiole jusqu'au trait de jauge. L'ensemble est soumis à une agitation magnétique pendant 4 heures. Après cela, on laisse le mélange au repos pendant 48 heures, dans le but de cueillir le maximum d'extrait de feuilles de persil. En dernière étape, on filtre sous vide et on récupère le filtrat.

A partir de la solution mère, on a préparé une solution fille de 250ml de concentration 2,5 g/l. Pour obtenir le volume qu'il faut prélever, on a :

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad \rightarrow \quad V_1 = C_2 V_2 / C_1$$

$$\text{Donc } V_1 = 250 * 2,5 / 20 = 31,25 \text{ ml}$$

$C_1$  : Concentration de la solution mère ;

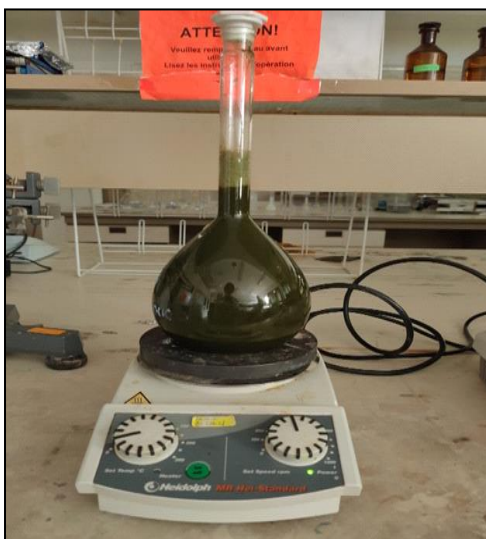
$V_1$  : Volume à prélever de la solution mère en ml ;

$C_2$  : Concentration de la solution fille qu'on veut préparer en g.l<sup>-1</sup> ;

$V_2$  : Volume pour préparer la solution fille de 250 ml.

## Mise en œuvre expérimentale

On mesure un volume de 31,25 ml de la solution mère et on les verse dans une fiole jaugée de 250 ml puis on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. On mélange bien cette solution et on l'enrobe l'avec un papier aluminium pour qu'elle ne perd pas ces propriétés. A partir de cette solution, on va prélever des volumes équivalents aux concentrations qu'on a voulu tester.



**Figure III.2:** Agitation du mélange de la solution de poudre de pissenlit.

### III.2.3. Méthodes de détermination de la composition du pissenlit:

#### III.2.3.1. Teneur en humidité :

Le test d'humidité a été réalisé selon la méthode décrite par (Doymaz et al. 2004) [1]. Une pesée de 2 g de la plante est étuvée à  $103 \pm 2$  °C. Des prises de poids ont été effectuées jusqu'à stabilisation finale de la masse.

Le résultat du taux d'humidité est exprimé par l'équation ci-dessous :

$$H\% = \frac{M_0 - M}{PE} * 100 \quad \text{Eq. III.1}$$

H% : humidité du produit exprimé en % ;

$M_0$  : masse du creuset contenant l'échantillon avant étuvage (g) ;

M : masse du creuset contenant l'échantillon après étuvage (g) ;

PE : prise d'essai.

#### III.2.3.2. Teneur en matières sèches :

La teneur en matières sèches est le volume de solides résiduels obtenu après étuvage, exprimé en pourcentage en poids.

$$MS\% = 100 - H\%$$

Eq. III.2

### III.2.3.3. Taux d'extraction:

La méthode utilisée pour l'extraction est celle suivi par (Al-Farsi et al. 2005)[100].

5 g de l'échantillon est macéré dans 30 ml d'eau distillée. Le mélange est porté à un malaxage pendant 10 mn, et une agitation de 45 mn. Le mélange est ensuite filtré et le résidu subit une autre extraction dans les mêmes conditions. Cette agitation permet d'apporter plusieurs avantages à savoir l'augmentation de la surface de contact entre les phases solide (poudre) et liquide (eau). Après la deuxième agitation, le mélange est filtré à l'aide d'un papier filtre. La solution récupérée est mise à l'étuve pour l'évaporation à 40°C jusqu'à stabilisation du poids du bécher (l'évaporation du solvant). Par la suite, l'extrait est récupéré puis pesé dans le but de calculer le rendement d'extraction.

$$\text{Rendement d'extraction} = \frac{P_1 - P_0}{E}$$

Eq. III.3

P : poids du bécher vide (g) ;

P : poids du bécher après évaporation (g) ;

E : poids de l'échantillon (g).

### III.2.3.4. Dosage des antioxydants:

#### a. Polyphénols totaux:

La quantification des composés phénoliques totaux est réalisée selon la méthode de Singleton et Ross [101] avec le réactif Folin-Ciocalteu.

200 µl d'extrait est mélangé avec 1 ml du réactif de Folin- Ciocalteu (dilué 1/10). Après 5 min, 1 ml de la solution de carbonate de sodium (7,5 %) sont ajoutés. Le mélange est laissé pendant 60 min à l'abri de la lumière puis l'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à  $\lambda=765$  nm. Les concentrations des extraits en composés phénoliques sont déterminées en se référant à la courbe d'étalonnage obtenues avec l'acide gallique. Les résultats sont exprimés en mg équivalent d'acide gallique (EAG) par g d'extrait aqueux.

#### b. Flavonoïdes :

La méthode du trichlorure d'Aluminium est utilisée pour qualifier les flavonoïdes dans les différents extraits [102]. La méthode de dosage des flavonoïdes repose sur la capacité de ces composés à former des complexes chromogènes avec le chlorure d'aluminium ( $AlCl_3$ ).

## Mise en œuvre expérimentale

Le protocole de dosage est effectué comme suit : 1 ml de l'échantillon ou du standard (quercétine (dilué dans l'éthanol)), est ajouté à 1 ml de la solution d' $\text{AlCl}_3$  (% 2). Après 10 minutes d'incubation, l'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de  $\lambda=430$  nm par un spectrophotomètre UV-Visible. Les concentrations des flavonoïdes sont déduites à partir de la courbe d'étalonnage, établie avec la quercitrine, et sont exprimées en milligrammes équivalents de quercétine par un gramme de la matière sèche.

### c. Tanins condensés :

Cette méthode a été décrite par Swain et Hillis (1959). Elle implique la réaction de la vanilline préparée dans une solution d'acide sulfurique à 70% avec le noyau A de flavan-3-ols ou des flavan-3,4-diols pour former un produit de condensation rouge qui peut être mesuré par la spectrophotométrie à  $\lambda=500$  nm [103].

La méthode de la vanilline a été utilisée pendant de nombreuses années comme méthode colorimétrique pour le dosage des tanins condensés en raison de sa sensibilité et de sa simplicité.

Le protocole de dosage est le suivant : 1 ml de l'extrait dilué est ajouté à 2 ml de la vanilline (1g/100ml d'acide sulfurique 70%). L'ensemble est mélangé. Les tubes sont incubés pendant 20 min dans le bain marie à une température de 50 C°. La lecture est faite à l'aide d'un spectrophotomètre avec une longueur d'onde égale à  $\lambda=500$  nm.

### d. Activité antioxydante :

Le DPPH (2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyl) est un radical libre, stable et accepteur d'hydrogène, de couleur violet intense. Ce radical perd sa coloration native quand il se lie avec des substances anti-oxydantes (AH), qui lui transfèrent des électrons ou des protons. La forme réduite du DPPH confère à la solution une couleur jaune.

Le virage vers cette coloration et l'intensité de la décoloration découle de la nature, de la concentration et de la puissance des principes actifs présents.

Le pourcentage d'activité anti-oxydante (ou I%= pourcentage d'inhibition du DPPH) est calculé selon la formule suivante :

$$I\% = \frac{(\text{Abs blanc} - \text{Abs éch})}{\text{Abs blanc}} * 100 \quad \text{Eq. III.4}$$

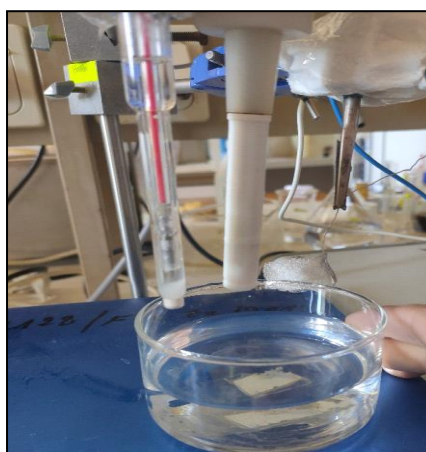
Abs blanc : absorbance du DPPH au temps zéro avant l'addition de l'échantillon ;

Abs éch : Absorbance de l'échantillon testé après 30 mn d'incubation.

### III.3. Cellule et électrolyte :

#### III.3.1. Cellule électrochimique :

Une cellule électrochimique est un système capable de produire de l'énergie électrique par le biais de réactions chimiques spontanées. Les réactions chimiques impliquées dans ce processus sont appelées réactions d'oxydoréduction. Les réactions d'oxydo-réduction se produisent par le transfert d'électrons entre espèces chimiques. Une réaction redox comprend deux demi-réactions : une réaction d'oxydation et une réaction de réduction. La réaction d'oxydation libère toujours des électrons dans le système, tandis que la réaction de réduction prend des électrons du système. Par conséquent, les deux demi-réactions se produisent simultanément [104].



**Figure III.3** : Cellule électrochimique.

La cellule électrochimique utilisée pour la réalisation de notre travail est une cellule à trois électrodes :

##### III.3.1.1. Electrode de travail :

Une électrode de travail est une électrode dans un système électrochimique sur laquelle se produit la réaction d'intérêt [105-106]. L'électrode de travail est souvent utilisée avec une électrode auxiliaire et une électrode de référence dans un système à trois électrodes. Selon que la réaction sur l'électrode est une réduction ou une oxydation, l'électrode de travail est appelée cathodique ou anodique. Les électrodes de travail courantes peuvent être constituées de matériaux allant de métaux inertes tels que l'or, l'argent ou le platine, à du carbone inerte tel que le carbone vitreux, le diamant dopé au bore [107] ou le carbone pyrolytique, en passant par électrodes à film et à goutte de mercure. Dans notre cas, nous avons utilisé une électrode de travail en or.

## Mise en œuvre expérimentale

Les électrodes en or occupent actuellement une place importante dans le domaine de l'électroanalyse en raison de leurs performances électrochimiques en analyse organique et inorganique. Plusieurs chercheurs ont montré que les électrodes en or pouvaient être utilisées comme supports de couches minces de mercure pour la détermination simultanée du plomb, du cadmium et du cuivre en raison de leurs propriétés répertoriées dans le tableau III.1 [108,109].

**Tableau III.1** : Propriétés physiques de l'or :

Propriété	Valeur
Conductivité thermique	317 s/m
Conductivité électrique	$45 \cdot 10^6$ s/m
Pointe de fusion	1063 °C
Point d'ébullition	2856 °C
Module de Young	79 GPa
Masse volumique	19,3 g/cm <sup>3</sup>
Résistivité	22

### III.3.1.2. Electrode de référence :

C'est une électrode dont le potentiel est remarquablement stable même lorsqu'elle débite de faibles courants. Comme son nom l'indique, elle sert de référence au potentiostat afin d'appliquer une différence de potentiel exacte entre cette électrode et l'électrode de travail, et ainsi de faire varier de façon exacte et connue le potentiel appliqué à l'électrode de travail. L'électrode de référence est isolante dans un environnement saturé en ions, de sorte qu'elle garde toujours le même potentiel. Par conséquent, le potentiel présent dans le milieu électrolytique est la dérivation associée à cette référence et le retour fourni par le potentiostat permettent les changements potentiels sont régulièrement ajustés au cours de l'analyse [104]. L'électrode de référence que nous avons utilisée dans notre travail est une électrode au calomel saturé au KCl (ECS).

### III.3.1.3. Electrode auxiliaire :

Une électrode auxiliaire parfois appelée contre-électrode permet de mesurer le courant qui circule dans la cellule électrochimique. Elle est usuellement en platine ou en carbone (graphite) et possède une large surface par rapport à l'électrode de travail. L'électrode auxiliaire utilisée dans le cadre de ce travail est une électrode en platine.



#### III.3.1.4. Préparation des électrodes :

Les oxydes métalliques exposés à l'air ambiant peuvent absorber des contaminants tels que l'eau et les molécules de carbone présentes. Cela signifie que les électrodes doivent être nettoyées avant l'étape de fonctionnalisation. Dans la littérature, les procédures de nettoyage sont nombreuses et nous citons la procédure que nous avons suivie dans toutes les expériences :

Électrode de travail en or : Les électrodes en or subissent différents types de polissage avant de commencer la manipulation. Nous avons d'abord poli mécaniquement à l'aide d'une polisseuse de marque Metaserv 2000 avec du papier SiC de grain 2400, puis poli chimiquement avec des solutions d'acide acétiques de faibles concentrations et enfin rincé avec de l'eau distillée et séché avec du papier absorbant.



**Figure III.4** : Photographie de la polisseuse mécanique.

#### III.3.2. Électrolyte :

Pour la réalisation de nos expériences, nous avons utilisé l'eau de réseau d'alimentation de la wilaya de Bejaia et plus exactement celle de la région de Targa Ouzemour (Taghzout) comme électrolyte pour les essais électrochimiques.

La composition et les propriétés de l'eau de Bejaia sont illustrées sur le tableau III.2.



Tableau II.2 : Propriétés physico-chimiques de l'eau de Bejaia.

Paramètres	unités	valeurs
La température	° C	18.9
La conductivité	µs/cm	643
pH	/	7.79
TDS	mg/l	321
salinité	%	0.3
Turbidité	NTU	10
TA	mg/l	0
TAC	mg/l	232
TH	mg/l	415
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	84.8
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	49
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	283.05
Cl <sup>-</sup>	mg/l	45
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	110
N <sup>+</sup>	mg/l	64
K <sup>+</sup>	mg/l	1.2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	0.022
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0.001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	1.267
Fe <sup>2+</sup>	mg/l	0.00

#### III.4. Montage Potentiostatique :

Des mesures électrochimiques utilisant des électrodes à disque tournant en or ont été effectuées à l'aide d'un potentiostat/galvanostat PGP contrôlé par le logiciel Voltmaster. Ce dispositif permet d'enregistrer les courbes de polarisation  $i=f(E)$  et les courbes chronoampérométriques  $i=f(t)$ .

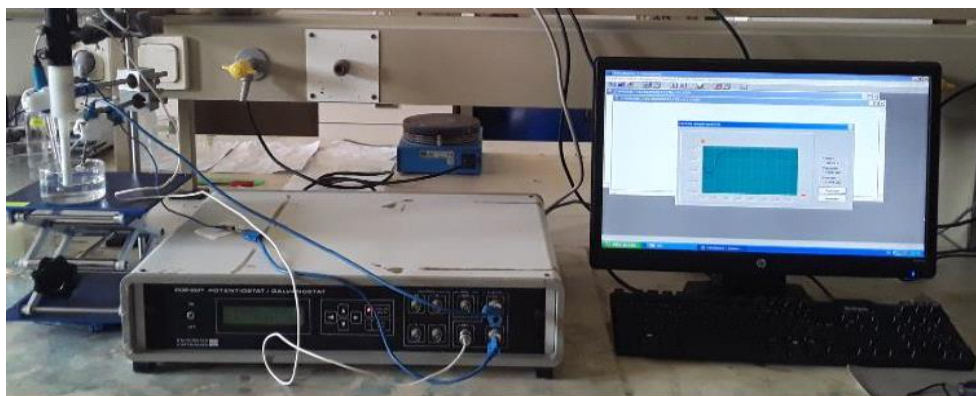


Figure III.5 : Potentiostat / galvanostat PGP 201 piloté par un micro-ordinateur.

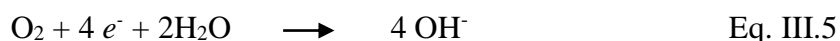
### III.5. Techniques expérimentales :

#### III.5.1. Chronoampérométrie :

La chronoampérométrie (CA) a été la première technique utilisée dans l'analyse des processus de l'entartrage accéléré électrochimiquement. Elle a été employée, pour la première fois, en 1985 par Lédion. Elle consiste à mesurer en fonction du temps, le courant qui passe au travers de l'électrode pendant l'entartrage provoqué par la polarisation cathodique. Le blocage progressif des sites actifs de la surface de l'électrode par des cristaux isolants de  $\text{CaCO}_3$  est détecté par la diminution du courant dans le temps [110].

La méthode d'entartrage électrochimique, dit entartrage accéléré, consiste essentiellement à réaliser l'électrodéposition du carbonate de calcium à la surface d'une électrode métallique portée à un potentiel suffisamment réducteur pour observer les réactions électrochimiques suivantes [111]:

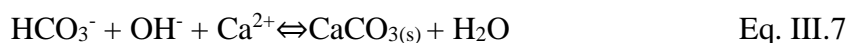
- Réduction de l'oxygène dissous.



- Réduction de l'eau

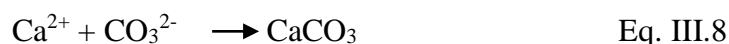


Lédion a montré que la présence d'oxygène est nécessaire si on opère à -1 V/ECS, ce qui privilège la réaction (Eq. III.5). Au voisinage de cette électrode, la présence des ions hydroxyles entraîne une augmentation du pH localement et les ions hydrogénocarbonates peuvent être alors transformés en ions carbonate selon la réaction suivante :

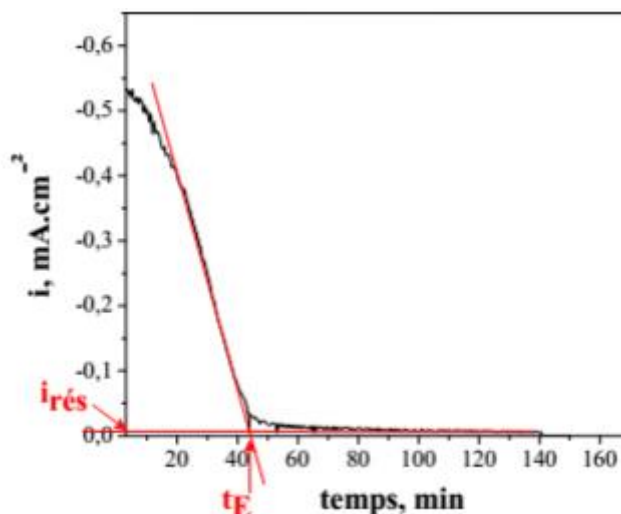


## Mise en œuvre expérimentale

L'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_3^{2-}$  entraîne alors la précipitation du carbonate de calcium à la surface de l'électrode.



La (figure II.5) donne l'allure de la courbe qui représente l'enregistrement de l'intensité du courant en fonction du temps dans le cas d'une eau entartrante.



**Figure III.6:** La courbe type d'entartrage accéléré.

La pente de la variation du courant en fonction du temps donne une bonne indication de formation de la couche bloquante. Les courbes chronoampéométriques sont normalisées par la valeur de courant à l'instant initial, noté  $I_0$ . Le courant résiduel  $I_{\text{RÉS}}$  dans la partie finale de la courbe  $I=f(t)$  nous renseigne sur le degré de recouvrement et/ou la compacité du dépôt. Plus le tartre est compact, moins il est poreux et plus le courant résiduel est faible. Une valeur de courant résiduel très élevée indique que le recouvrement de la surface de l'échantillon est très incomplet. L'intersection de la tangente au point d'inflexion et de l'axe des abscisses mesure le temps  $t_E$  qui est défini comme le temps de formation du dépôt, qui nous permet de comparer approximativement les différentes vitesses de déposition [112].

### III.5.2. Voltampérométrie :

La voltamétrie à balayage linéaire est la forme la plus simple de voltamétrie. Elle est généralement réalisée dans des solutions agitées ou à l'aide d'électrodes tournantes, ce qui permet d'obtenir un état stationnaire de diffusion convective. La méthode consiste à appliquer un potentiel sur l'électrode de travail par rapport à l'électrode de référence, qui varie linéairement dans le temps, et à enregistrer l'évolution temporelle de la densité de courant à l'électrode de travail [113]. Expérimentalement, les potentiostats n'appliquent pas un balayage

de potentiel linéaire, mais plutôt une série d'incrément de potentiel  $\Delta E$ , formant une rampe de potentiel étagée. Le courant est échantillonné à chaque étape, une analyse classique de ces courbes permet d'évaluer certaines propriétés du système étudié, comme le nombre d'électrons échangés lors d'une réaction électrochimique ou le processus de transport qui contrôle cette réaction [114].

### III.5.3. Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE) :

Les mesures d'impédance électrochimique sont basées sur la mesure des propriétés de la fonction de transfert d'un système électrochimique sous polarisation. Celui-ci est perturbé sinusoidalement par un potentiel bas à une fréquence donnée, puis une réponse en courant est obtenue. En déterminant les fonctions de transfert potentiel/courant à différentes fréquences d'interférence, il est possible de distinguer différents processus se produisant sur l'électrode de travail, tels que des phénomènes de charge dans la double couche électrique, la migration de substances en solution ou à l'intérieur. Couches minces, transfert sur différentes interfaces, adsorption d'espèces sur l'électrode de travail [115].

La spectroscopie d'impédance est basée sur l'application d'une petite tension sinusoidale (perturbation) superposée à la tension nominale et l'analyse de l'amplitude et du déphasage du courant de réponse (en revanche, le signal d'entrée peut être le courant et le signal de réponse, le potentiel). Le rapport de la grandeur tension/courant définit le module de l'impédance  $|Z|$  Le déphasage entre la tension et le courant complète l'information, permettant d'accéder aux parties réelles et imaginaires de l'impédance complexe  $Z$ . Lors d'une mesure, une gamme (généralement large) de fréquences ou de spectre est balayée. C'est de là que vient son nom spectroscopique. Cette méthode permet d'accéder à une variété d'informations. D'un point de vue électrique, il permet de modéliser les électrodes par un circuit dit équivalent. Les valeurs de conductance et de capacité peuvent être calculées, les matériaux isolants peuvent être distingués des matériaux conducteurs. L'exploitation des spectres d'impédance permet aussi l'obtention de nombreuses grandeurs telles que les paramètres cinétiques, les coefficients de diffusion, les conductivités, les capacitances, les constantes diélectriques [116].

### III.5.4. Spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier (FTIR) :

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou spectroscopie IRTF (ou encore FTIR) est une technique utilisée pour obtenir le spectre d'absorption, d'émission, la photoconductivité ou la diffusion Raman dans l'infrarouge d'un échantillon solide, liquide ou gazeux. Un spectromètre FTIR permet de collecter simultanément les données spectrales sur

## Mise en œuvre expérimentale

---

un spectre large. Ceci lui confère un avantage significatif sur les spectromètres à dispersion qui ne peuvent mesurer l'intensité que dans une gamme réduite de longueurs d'onde à un instant donné. Le principe de la spectroscopie IR consiste à sonder la matière au moyen d'un rayonnement IR (entre  $4000\text{ cm}^{-1}$  et  $660\text{ cm}^{-1}$ ) et à analyser en retour l'absorption du rayonnement émis par les molécules [117].

*Chapitre IV :*  
*Résultats et*  
*discussion*

## Chapitre IV

### Résultats et discussion

#### IV.1. Introduction :

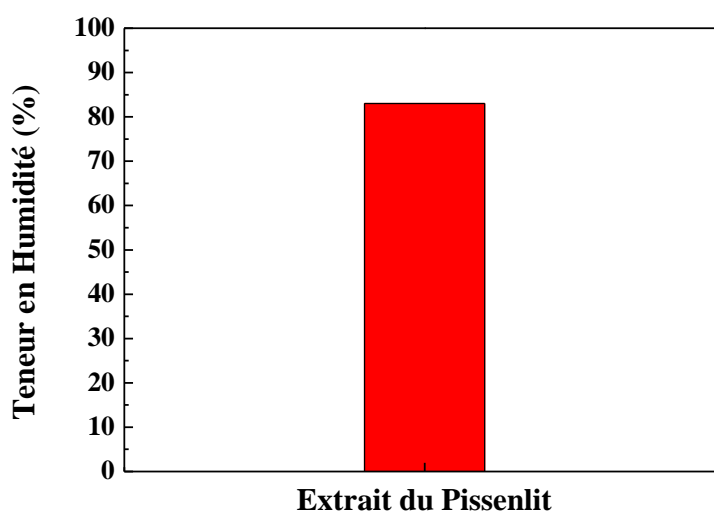
Le présent chapitre sera consacré à la présentation des principaux résultats et leur discussion. Le travail est subdivisé en trois parties :

- La première partie sera relative au traitement de la plante du pissenlit dans laquelle sera développée la composition du *Taraxacum officinale* déterminée par dosage des polyphénols, des flavonoïdes et des tanins. La détermination de la teneur en humidité et en matière sèche, le taux d'extraction et l'activité anti-oxydante seront abordés. La poudre d'extrait du pissenlit sera analysée par spectroscopie Infra-rouge à Transformée de Fourier (FTIR).
- La seconde partie concernera l'évaluation du pouvoir entartrant de l'eau de réseau de distribution de la Wilaya de Bejaia réputée pour sa dureté un peu élevée. Un entartage accéléré sera provoqué sur l'électrode de travail (Or) en imposant un potentiel permettant le dépôt du carbonate de calcium. Pour se faire plusieurs paramètres électrochimiques seront déterminés et fixés, à savoir la vitesse de balayage du potentiel et la vitesse de rotation de l'électrode de travail. La cinétique de précipitation du tartre sera ainsi évalué en absence d'inhibiteur.
- La dernière partie est une étude de l'effet de l'incorporation de différentes concentrations en extrait du pissenlit sur la cinétique de formation du carbonate de calcium. Cet effet sera évalué par trois méthodes électrochimiques : la Voltamétrie Linéaire (VL), la Chronoampérométrie (CA) et la Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE).

#### IV.2. Dosage de l'extrait de plante de pissenlit (*Taraxacum Officinale*) :

##### IV.2.1. Teneur en humidité :

La figure IV.1 représente la teneur en humidité de la poudre de plante du pissenlit (*Taraxacum Officinale*). Celle-ci contient une quantité très élevée en eau avec un taux de 83%, ce que signifie que plus de la moitié en poids de notre extrait est constitué par l'eau.



**Figure IV.1 :** Teneur en humidité du pissenlit.

Barimah J. et al. (2017) ont obtenu des résultats similaires en humidité dans les feuilles fraîches du pissenlit (86%). Ces auteurs ont aussi développés l'effet du temps et de la méthode de séchage [118].

D'autres valeurs très proches ont été obtenues par Biel W. (2017), qui ont trouvé un taux d'humidité de 88% [119].

Par contre, en utilisant d'autres méthodes et une autre variété du pissenlit, Dias M. I. et al. (2014) ont estimé un taux d'humidité légèrement inférieur relatif aux fleurs (77%) et à la partie végétale (79%) du pissenlit [120].

- **Taux de matières sèches :**

Le taux de la matière sèche mesuré pour la poudre de plante du pissenlit (*Taraxacum officinale*) est de 17%, ce qui révélera la richesse de dandelion en eau.

#### **IV.2.2. Taux d'extraction :**

Plusieurs facteurs possèdent un effet significatif sur le taux d'extraction à savoir la méthode utilisée, la nature chimique des composés, la granulométrie, le temps d'extraction,... etc [121,122].

L'extraction utilisée dans notre étude est de type solide-liquide (contact direct entre le solide et le solvant). Son principe consiste à la séparation des composés phénoliques solubles par diffusion à partir d'une matrice solide (poudre) en utilisant une matrice liquide (solvant). Le



## Résultats et discussion

solvant choisi pour l'extraction du pissenlit est l'eau compte tenu que celui-ci constitue le solvant universel par excellence.

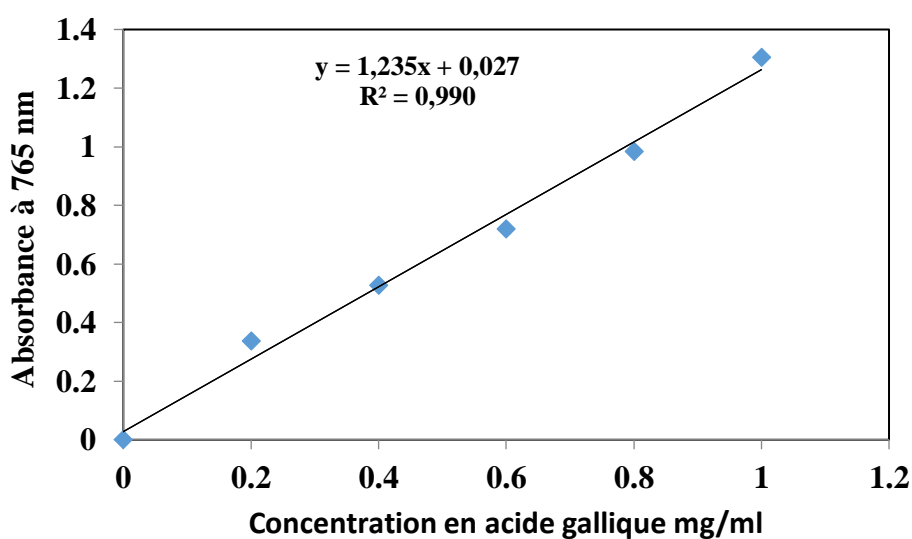
Le taux d'extraction mesuré est estimé à 34%.

### IV.2.3. Dosage des polyphénols totaux :

La méthode de folin-ciocalteu a été employée pour déterminer la teneur des polyphénols totaux [123]. Le changement de couleur est le principal indicateur déterminé au spectrophotomètre à 765 nm provoqué par la réduction du réactif de folin-ciocalteu par des phénolates produits en présence du carbonate de sodium [124].

Une coloration bleue a été obtenue, après l'ajout du réactif de folin-ciocalteu et du carbonate de sodium, dont l'intensité varie en fonction de la concentration phénolique des extraits.

La figure IV.2 montre la courbe d'étalonnage établit en utilisant l'acide gallique comme référence et les résultats sont exprimés en mg équivalent d'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g MS). La courbe d'étalonnage est tracée avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,990$



**Figure IV.2 :** Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

La quantité de polyphénols totaux calculée à l'aide de l'équation de la droite d'étalonnage ( $Abs = 1,235[AG] + 0,027$ ) permet d'aboutir à 305 mg EAG/g ES  $\pm$  2.83. Des résultats antérieurs effectués sur l'extrait aqueux de feuilles du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) ont révélé la présence de plusieurs principes actifs : des saponines, des terpénoides, des tanins, des flavonoïdes et des sucres réducteurs [125,126].

La présence de polyphénols dans l'extrait du *Tarxacum officinale* est bénéfique pour son utilisation locale pour la gestion d'affection induit par le stress oxydatif. Les polyphénols possèdent un effet de rétention du potassium et possèdent donc une activité diurétique [127,128]. Ce sont des composés largement répandus dans le règne végétal pour leur rôle d'antioxydants naturels due à leurs propriétés redox qui leurs permettent d'agir soit comme des agents réducteurs (donneurs d'hydrogène), des piègeurs de l'oxygène singulier ou des chélateurs de métaux.

#### IV.2.4. Dosage des flavonoïdes :

En présence du chlorure d'aluminium ( $\text{AlCl}_3$ ), les flavonoïdes révèlent l'apparition de coloration jaune, qui est due à la formation d'un complexe entre le chlorure d'Aluminium et les atomes d'oxygènes présents sur les carbones des flavonoïdes [129].

La courbe d'étalonnage tracée pour déterminer la teneur en flavonoïdes est obtenue en prenant la Quercétine comme composé de référence. La courbe établie, présentée dans la figure IV.3 a un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,999$ . Les résultats obtenus sont exprimés en mg équivalent de quercétine par gramme de matière sèche (mg QE/g MS).

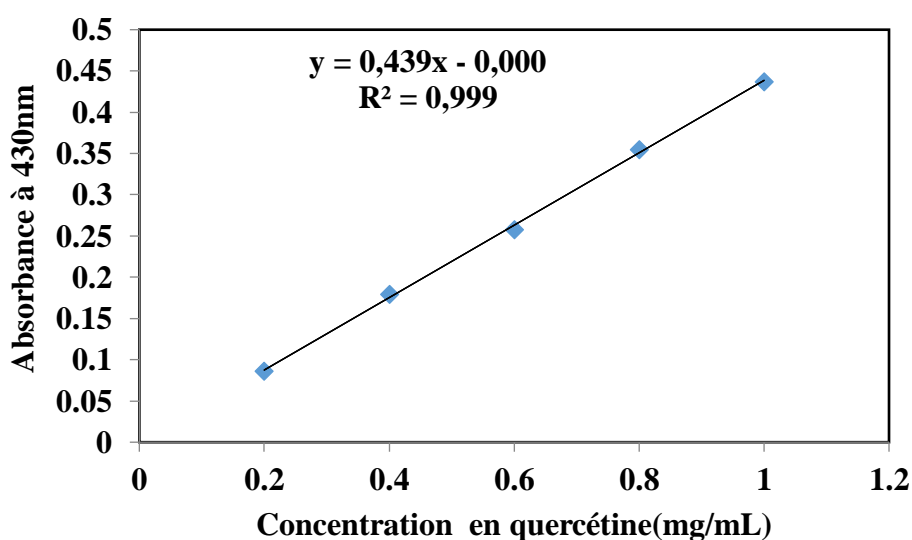


Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage de la quercétine.

La teneur en flavonoïdes calculée à l'aide de l'équation de la droite d'étalonnage ( $\text{Abs} = 0,439 [\text{QE}] + 0$ ) est de 95 mg QE/g MS.

Les flavonoïdes sont d'excellents antioxydants [130]. Outre leur pouvoir antioxydant, se sont des antiulcéreux, antitumoraux, antispasmodiques, antisécreteurs et antidiarrhéique [131].

## Résultats et discussion

Aussi, ce sont de parfaits antiallergiques, anti-inflammatoires, hypotenseurs et protègent du cancer [132].

### IV.2.5. Dosage des tanins :

La teneur en tanins a été déterminée à partir de la courbe d'étalonnage (figure IV.4) tracée en utilisant l'acide tannique comme standard.

Les résultats ont été déterminés à partir de l'équation de régression linéaire de la courbe d'étalonnage ( $\text{abs} = 0,107[\text{EAT}] + 0,027$ ) ayant un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,996$ . Le résultat est exprimé en mg d'acide tannique par gramme de matière sèche (mg EAT/G MS).

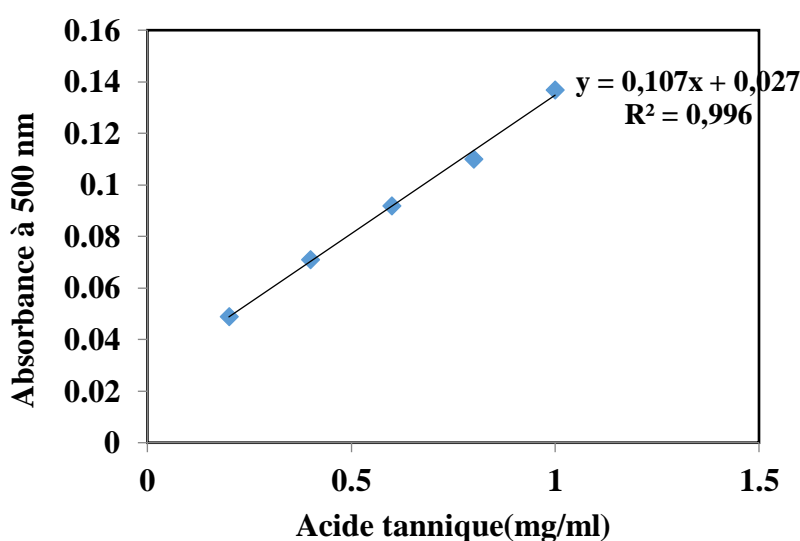


Figure IV.4 : Courbe d'étalonnage de l'acide tannique.

Le dosage révèle que l'extrait aqueux du Pissenlit (*Taraxacum officinale*) renferme une teneur de 65 mg EAT/g MS  $\pm 0,26$ . La présence de tanins dans la plante lui procure le pouvoir anti-diarrhéique et antihémorragique [133].

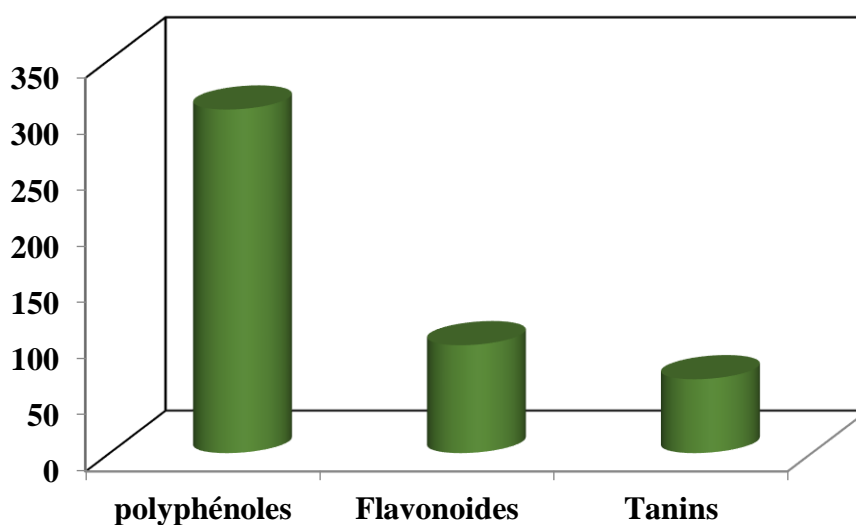
La figure IV.5 présente un récapitulatif des teneurs en polyphénols totaux, en flavonoïdes et en tanins.

La teneur en polyphénols totaux est largement supérieure à celle de flavonoïdes et des tanins, du fait que ces deux derniers font parties de la famille des polyphénols.

En comparaison des résultats trouvés avec ceux de la littérature, une différence est relevée pour les divers travaux, ce qui est due à la différence des méthodes d'extraction exploitées, au type de solvant utilisé, à la partie traitée de la plante,...etc. Concernant les polyphénols

totaux, une étude réalisée sur les feuilles de *Taraxacum officinale* rapporte des teneurs en composés phénoliques d'un extrait éthanolique obtenu par macération de  $130 \pm 1,53$  (mg EAG/g MS) [134]. Par contre, des études effectuées par Sengul et Mohan [135] sur le pissenlit ont relevés une teneur en polyphénols totaux dans l'extrait méthanolique obtenu par soxhlet de 15,5 mg EAG/g MS.

Dans notre cas, le solvant utilisé est l'eau et celui-ci permet d'augmenter la solubilité des polyphénols. L'eau joue un rôle important dans le gonflement de la matière végétale.



**Figure IV.5 :** Récapitulatif des teneurs en polyphénols, en flavonoïdes et en tanins.

Pour les flavonoïdes, les résultats de Brighente [136] ont montrés que la teneur en ces composés chez *Baccharis illinita*, de la même famille que *Taraxacum Officinale*, est  $61,82 \pm 0,02$  (mg QE / g MS) dans un extrait éthanolique obtenu par macération, tandis qu'elle est de  $44,70 \pm 0,16$  mg EQ /  $\mu$ g de l'extrait sec [137]. L'étude de Ara Jahan [138] sur l'extrait éthanolique de *Stevia rebaudiana*, espèce de la même famille que *taraxacum officinale*, obtenu par Soxhlet enregistre une teneur en flavonoïdes des  $125,64 \pm 1,07$  (mg QE / mg MS).

#### IV.2.6. Activité antioxydante :

L'activité antioxydante est déterminée par neutralisation du radical 2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyl (DPPH). Ce composé est largement utilisé pour évaluer la capacité des substances d'agir en tant que piègeurs de radical ou donateurs d'hydrogène [139]. Ce radical est stable à température ambiante et accepte un électron ou un hydrogène pour devenir une molécule diamagnétique stable.

L'analyse de la poudre de la partie sèche du Pissenlit (*Taraxacum officinale*) montre une activité antioxydant de 26% d'inhibition.

Cette activité antioxydante est proportionnelle à la teneur en polyphénols dans l'extrait. Dans notre cas, le Pissenlit est très riche en substances polyphénoliques (acide chicorique, acide caféique, acide p-coumarique, acide cinapique, acide firulique). Cependant, l'activité antioxydante n'est pas très élevée.

Nous pouvons attribuer cela à la dégradation de notre extrait lors de l'analyse vue que le test a été effectué à la fin de notre formation. Il serait souhaitable, par la suite de ce travail, de refaire ce dosage pour avoir des résultats plus cohérents.

#### IV.2.7. Analyse de la poudre du pissenlit par spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (FTIR):

Les résultats d'analyse de la poudre de plante du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) par spectroscopie Infrarouge à transformé de Fourier (FTIR) sont représentés sur la figure IV.6.

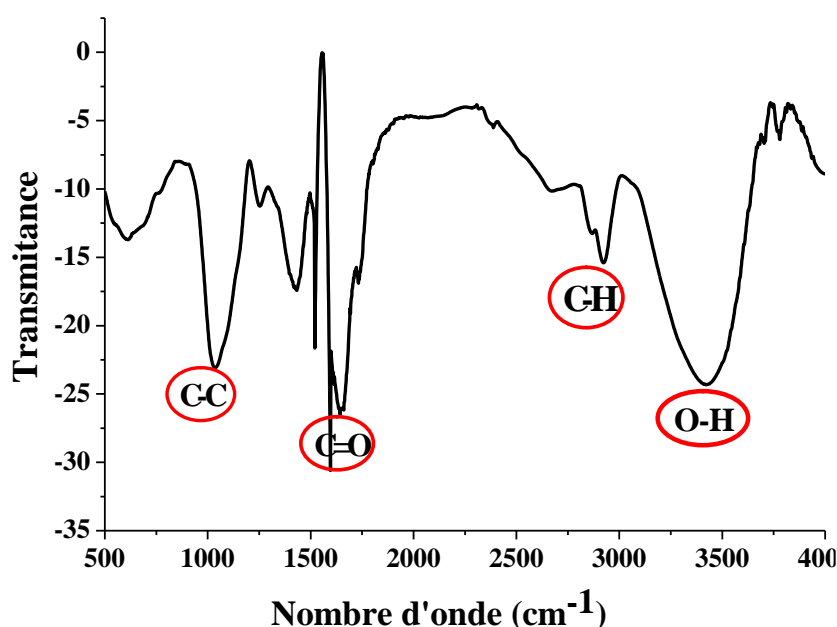


Figure IV.6 : Spectre FTIR de la poudre de pissenlit.

Une bande très large apparaît à  $3420\text{ cm}^{-1}$  attribuée aux vibrations d'élongation des groupements hydroxyles (O-H).

Deux bandes de moyennes intensités sont observées à  $2840$  et  $2910\text{ cm}^{-1}$  dues aux vibrations d'élongation symétrique et asymétrique des C-H aliphatiques. Une bande fine et intense apparaît à  $1650\text{ cm}^{-1}$  qui pourrait être attribué aux vibrations d'élongation C=O du

## Résultats et discussion

groupement carboxylique. Une autre bande de moyenne intensité apparaît à  $1420\text{ cm}^{-1}$  qui pourrait être liée à la vibration  $-\text{CH}_2$ . Enfin, la bande à  $1029\text{ cm}^{-1}$  pourrait provenir des vibrations d'élongation C-C (Tableau IV.1).

**Tableau IV.1** : Principales bandes d'absorption apparues sur le spectre IR.

Nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ )	Liaison	Mode de vibration
3200-3400	O-H <sub>lié</sub>	Elongation
2900-3030	C-H <sub>sp3</sub>	Elongation
1680-1710	C=O	Elongation
1000-1200	C=C	Elongation

Ces résultats sont en parfait accord avec ceux enregistrés lors du dosage des polyphénols, des flavonoïdes et des tanins (IV.2.3, IV.2.4 et IV.2.5). La plante du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) est très riche en composés phénoliques et carboxyliques [140,141], ce qui explique l'apparition des différentes bandes sur le spectre infrarouge.

### IV.3. Evaluation du pouvoir entartrant de l'eau de Bejaia :

Avant de tester l'efficacité de l'extrait du pissenlit en tant qu'inhibiteur de la précipitation du carbonate de calcium, il est primordial d'évaluer, d'abord, le pouvoir entartrant de notre électrolyte, c'est-à-dire, l'eau de Bejaia. Cette eau est réputée pour sa richesse en minéraux et sa dureté élevée ( $53^\circ\text{F}$ ).

Pour se faire la détermination et la fixation de certains paramètres électrochimiques est inévitable (vitesse de balayage du potentiel, la vitesse de rotation de l'électrode de travail ainsi que le potentiel imposé) pour la suite de notre travail.

#### IV.3.1. Choix des paramètres électrochimiques :

##### IV.3.1.1. Vitesse de balayage du potentiel :

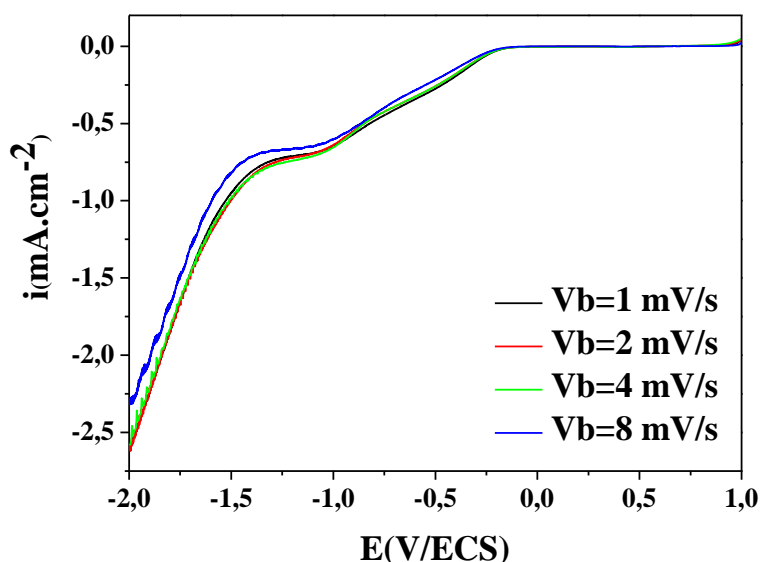
La méthode utilisée pour fixer la valeur de la vitesse de balayage est la voltamétrie linéaire. Cette technique permet le tracé des courbes  $i=f(E)$  enregistré sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia sans l'incorporation de l'inhibiteur, et ce, à différentes vitesses de balayage du potentiel (1, 2, 4 et 8 mV/s). Une large gamme de potentiel a été balayée (entre -2 et +1 V/ECS) afin de connaître le comportement électrochimique du substrat dans ce milieu d'étude.

## Résultats et discussion

Nous allons discuter, dans cette partie, l'effet qu'exerce la vitesse de balayage sur le procédé électrochimique que subit l'électrode. Quant à l'allure de courbes et aux différentes étapes de réactions, ils seront développés ultérieurement.

L'examen de la figure IV.7 montre que la vitesse de balayage du potentiel n'a pratiquement pas d'effet notable sur le palier de réduction de l'oxygène dessous situé entre -0,9 V/ECS et -1,3V/ECS car les courbes enregistrées sont superposables.

La valeur de la vitesse de balayage qui sera retenue pour le reste des tracés intensité-potentiel sera 1 mV/s. Ce choix est dicté par le fait que cette faible vitesse permettra de rester dans le domaine stationnaire et de donner le temps à toutes les réactions possibles d'avoir lieu. Aux vitesses plus élevées, certaines réactions peuvent être masquées ou superposées à d'autres.



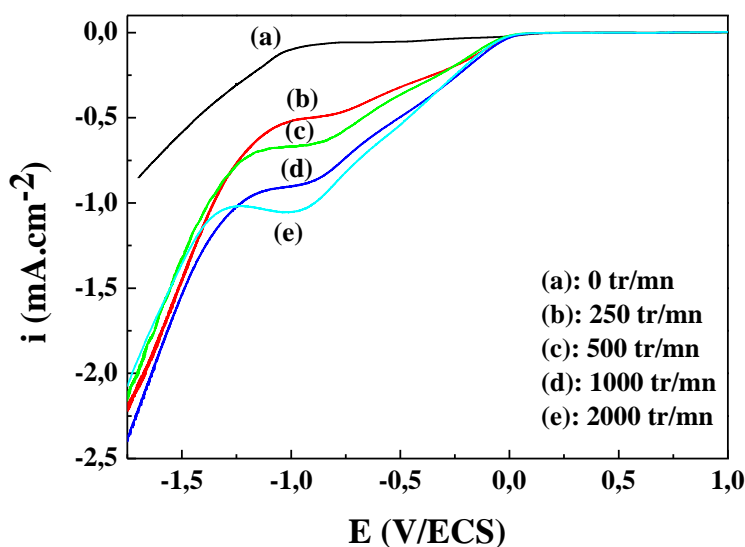
**Figure IV.7:** Courbes  $I=f(E)$  enregistrées sur l'électrode d'or à différentes vitesses de balayage de potentiel.

### IV.3.1.2. Vitesse de rotation de l'électrode de travail :

Ce paragraphe sera scindé aux deux volets. Le premier volet concernera l'interprétation des courbes voltamétriques obtenues et au choix du potentiel qui sera fixé pour les essais chrono ampérométriques. Quant au second volet, il sera consacré à l'influence qu'exerce la vitesse de rotation de l'électrode sur les phénomènes électrochimiques.

a. Détermination du potentiel imposé :

Le choix de la valeur du potentiel est très important pour assurer un bon dépôt de tartre dans les essais d'entartage accéléré. Ce potentiel sera déterminé par le tracé des courbes intensité-potentiel enregistré sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia en appliquant une vitesse de balayage de 1 mV/s. Plusieurs vitesses de rotation ont été utilisées (0, 250, 500, 1000, 2000 tr/min) et le résultat est montré sur la figure IV.8.



**Figure IV.8 :** Courbes intensité-potentiel enregistrées sur l'électrode d'or à différentes vitesses de rotation de l'électrode.

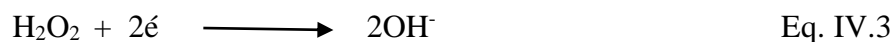
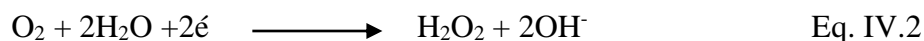
Trois comportements sont enregistrés sur les courbes obtenues de 0 à -1.7 V/ECS. Tout d'abord, une croissance progressive du courant entre 0 et -0.5 V/ECS, suivi d'une sorte de stabilisation où deux paliers apparaissent entre -0.5 et -1.2 V/ECS et enfin une augmentation accentuée du courant pour des polarisations importantes. Les deux paliers correspondent à la réaction de réduction de l'oxygène dissous (qui est principal moteur de l'entartage accéléré) tandis que l'accentuation des valeurs de courant au potentiel cathodique est liée à la réduction de l'eau.

Il y a lieu de signaler que les paliers enregistrés dans une solution aérée disparaissent en présence de dégazage par barbotage continu d'azote, ce qui permet de les attribuer sans équivoque aux réactions de réduction de l'oxygène dissous [142, 143]. Cette réaction se fait selon un processus global de transfert électronique à quatre électrons suivant la réaction :

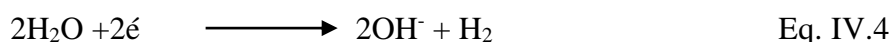




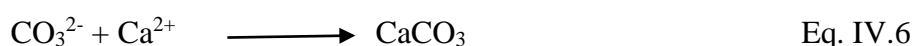
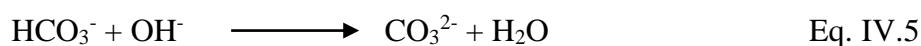
Cette réaction globale est en fait divisée en deux étapes mettant en jeu le transfert de deux électrons chacune :



Pour une polarisation cathodique importante, un dégagement d'hydrogène est observé due à la réduction de l'eau suivant la réaction ci-après :



Lorsqu'on impose le potentiel de réduction de l'oxygène dissous à une électrode, celle-ci fabrique des ions  $\text{OH}^-$  (selon l'équation Eq. IV.1) à l'interface et fait transformer les ions hydrogencarbonates présents dans l'électrolyte en ions carbonates et ces derniers formeront le carbonate de calcium selon :



Le potentiel de la réduction de l'oxygène dissous qui sera retenu pour les essais chronoampérométriques sera de -1 V/ECS qui se situe nettement sur le second palier. Il y a lieu de signaler qu'imposer un potentiel qui se situe dans la gamme -0.7 à -1.2 V/ECS permettra de former du carbonate de calcium. Cependant, des potentiels plus anodiques que -1V/ECS signifie une vitesse plus faible de formation du tartre (transfert de 2 électrons seulement) tandis que des potentiels plus cathodiques causeront une déposition moins homogène de  $\text{CaCO}_3$  pour cause d'éventuel dégagement d'hydrogène.

Le choix du potentiel imposé (-1 V/ECS) est en accord avec plusieurs travaux antérieurs effectués dans le domaine de l'entartrage accéléré [144-146].

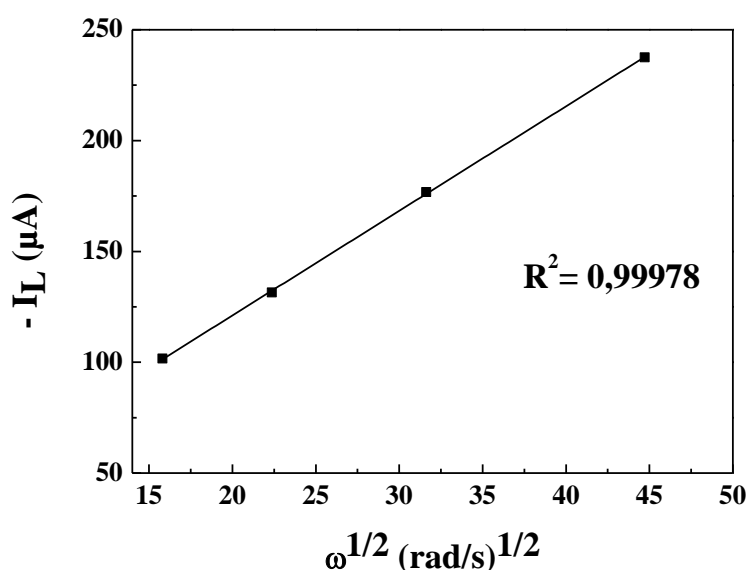
#### **b. Influence de la vitesse de rotation de l'électrode : Critère de LEVICH :**

La rotation de l'électrode signifie l'agitation de la solution. En plus du facteur d'homogénéisation qui est irréfutable, l'hydrodynamique joue un rôle essentiel dans l'acheminement des espèces qui réagissent dans le processus électrochimique jusqu'à la surface de l'électrode où s'effectue les échanges [147]. Ceci conditionne la nature, la vitesse et l'adhérence du dépôt formé vu que le pH interfacial est le moteur principal de l'entartrage électrochimique. Une vitesse de rotation élevée conduit à une faible épaisseur de la couche de

## Résultats et discussion

diffusion. Dans ces conditions, il y a un apport important d'oxygène, ramenant à une intense production d'ions  $\text{OH}^-$  (élévation du pH interfacial) impliquant un enrichissement des ions carbonates, ce qui va favoriser la précipitation de  $\text{CaCO}_3$ .

Pour mieux mettre en évidence l'effet de la vitesse de rotation de l'électrode de travail, l'évolution du courant limite de diffusion en fonction de  $\omega^{1/2}$  a été tracé pour l'or plongé dans l'eau de Bejaia (figure IV.9).



**Figure IV.9 :** Tracé de l'évolution du courant limite de diffusion en fonction de  $\omega^{1/2}$  sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia.

La courbe est une droite qui ne passe pas par l'origine dont l'équation peut s'écrire de la forme :  $I = K \omega^{1/2} + A$

Où :

A : une constante indépendante de la vitesse de rotation

$K\omega^{1/2}$  : la partie du courant qui varie linéairement avec  $\omega^{1/2}$  selon la loi de LEVICH :

$$I_{\text{lim}} = 0,62 * n * F * S * D^{2/3} * \nu^{-1/6} * C * \omega^{1/2} = K \omega^{1/2} \quad \text{Eq. IV.7}$$

Avec

n : nombre d'électrons échangés ;

F : constante de Faraday ( $F = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) ;

S : surface de l'électrode de travail ( $\text{cm}^2$ ) ;

D : coefficient de diffusion de l'espèce ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ;

$V$  : viscosité cinématique du milieu ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ;

$C$  : concentration de l'espèce en solution ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) ;

$K$  : constante de LEVICH ( $\text{A}/(\text{rad/s})^{1/2}$ ).

Nous pouvons attribuer la valeur de  $A$  au courant de réduction de l'eau et le terme  $K\omega^{1/2}$  à la réduction de l'oxygène. La valeur  $A$  est couramment appelée courant d'hydrogène.

Une vitesse de rotation de l'électrode tournante de 500 tr/min sera choisie et appliquée pour les essais chronoampérométriques. Ce choix est dicté par le fait que cette vitesse permet d'assurer un flux suffisant d'espèces vers l'électrode.

### IV.3.2. Cinétique de précipitation du tartre en absence d'inhibiteur :

Pour évaluer le pouvoir entartrant de l'eau de Bejaïa, un entartrage accéléré a été appliqué à l'électrode d'or en imposant le potentiel de réduction de l'oxygène dissous ( $-1\text{V}/\text{ECS}$ ) et une vitesse de rotation de l'électrode de 500 tr/min.

- **Chronoampérométrie :**

Tel qu'il est longuement expliqué plus haut, la réduction de l'oxygène dissous fournira les ions hydroxyles qui augmenteront le pH interfacial, ce qui entrainera la précipitation du carbonate de calcium selon la réaction suivant :

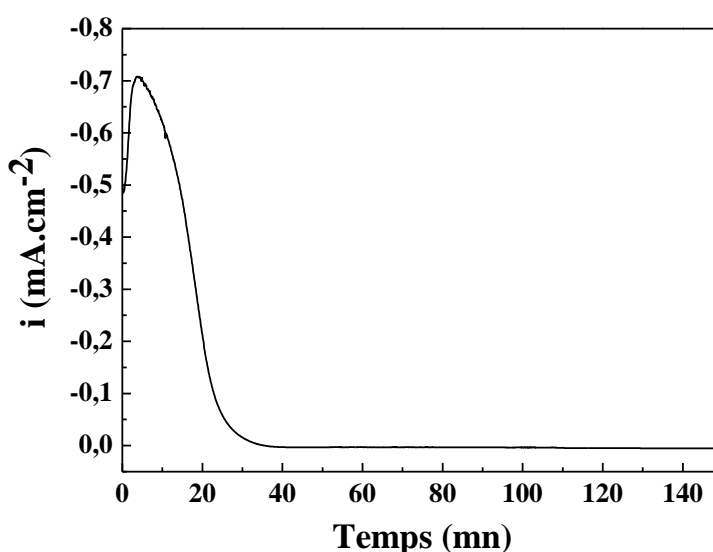


Au cours du temps, la quantité de tartre recouvrant la surface augmente et isole le métal de la solution. Le courant qui passe à travers l'électrode se voit diminué jusqu'à atteindre des valeurs infiniment petites appelées « courant résiduel » lorsque le dépôt devient compact.

La figure IV.10 représente la variation de la densité de courant en fonction de temps de l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaïa, on répose au potentiel imposé de  $-1 \text{ V}/\text{ECS}$ .

La courbe est constituée de trois parties :

- Une légère augmentation du courant dès les premiers instants de polarisation. Ce comportement est enregistré dans tous les travaux effectués sur l'or et le platine par entartrage électrochimique [146, 148-153]. Cela est peut être due à la réduction d'espèces ou d'impuretés sur la surface de l'électrode (malgré le bon prétraitement effectué avant chaque manipulation) ou bien cela peut être une particularité de ces métaux nobles.



**Figure IV.10 :** Courbe chronoampérométrique enregistrée sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia.

- Une décroissance progressive du courant reflétant le blocage progressif de la surface active de l'électrode par le tartre. C'est au cours de cette étape que ce produit la germination de  $\text{CaCO}_3$ . A ce stade, les premiers cristaux commencent à apparaître progressivement et recouvrent peu à peu l'or, ce qui explique la diminution du courant. Tant que le voisinage de l'électrode reste basique, la précipitation du tartre se poursuit.
- Une stabilisation du courant après 40min d'électrodéposition jusqu'en fin de la manipulation avec des valeurs de densité de courant quasiment nulles, ce qui signifie que le dépôt formé est compact et bloquant.

L'exploitation de la figure IV.10 permet de déterminer certains paramètres susceptibles d'évaluer le pouvoir entartrant d'une eau.

- Le temps d'entarage ( $t_E$ ) : il est défini comme étant l'intersection de la tangente au point d'inflexion de la courbe avec l'axe des temps. Plus  $t_E$  est faible, plus l'eau est entartrante.
- La densité de courant résiduelle ( $i_{res}$ ) ou le courant résiduel ( $I_{res}$ ) : c'est la valeur enregistrée au temps long d'électrodéposition. Plus  $i_{res}$  est faible, plus le dépôt est compact et isolant.

## Résultats et discussion

- L'indice d'entartrage ( $I_E$ ) : il mesure le degré d'agressivité de l'eau à analyser. Il est défini par [154]:

$$I_E = 1000/t_E \quad \text{Eq. IV.9}$$

La classification des eaux en fonction de  $I_E$  est comme suite :

Eau extrêmement entartrante :  $100 < I_E < 1000$

Eau très entartrante :  $15 < I_E < 100$

Eau moyennement entartrante :  $5 < I_E < 15$

Eau peu entartrante :  $0,5 < I_E < 5$

Cependant, Plusieurs paramètres conditionnent la valeur de  $I_E$  (nature de l'électrode, vitesse de rotation, potentiel imposé, température,...etc) [155].

L'indice d'entartrage n'a pas de signification absolue. Par contre, il peut nous renseigner sur l'efficacité d'un traitement antitartre ou de juger l'efficacité d'un appareil anti-dépôt.

Les paramètres caractéristiques de l'eau de Bejaia sont regroupés dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.2 :** Paramètres extraits de la courbe chronoampérométrique de la figure IV.10 :

$I_0$ ( $\mu\text{A}$ )	$I_{\text{res}}$ ( $\mu\text{A}$ )	$T_E$ (min)	$I_E$ ( $\text{min}^{-1}$ )
- 501	- 54	25	40

La valeur de l'indice d'entartrage estimé à  $40 \text{ min}^{-1}$  permet de classer l'eau de Bejaia parmi les eaux très entartrantes.

De plus, la valeur de temps d'entartrage et de la densité de courant résiduelle nous informe que notre eau est susceptible de former rapidement des dépôts de tartre et que ces dépôts sont très compact et adhérent à la surface de l'électrode.

- **Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE) :**

Le dépôt du carbonate de calcium formé par chronoampérométrie pendant une durée de 150 min a été caractérisé par spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) au potentiel à circuit ouvert. Cette mesure a été obtenue en mode potentiostatique avec une amplitude de signal de 10 mV. Le résultat est représenté sous forme de diagramme de Nyquist pour des valeurs de fréquences comprises entre 100 KHz et 10 mHz (Figure IV.11).

Deux boucles capacitatives relativement aplaties sont observées, qui correspondent à la réponse de l'interface métal / électrolyte. La première boucle à haute fréquence est liée au transfert de

## Résultats et discussion

charge à l'interface tandis que la deuxième boucle à basse fréquence correspond à la diffusion de l'oxygène.

L'analyse de ce diagramme est complexe du fait de la présence de réaction parallèles, à savoir celle de la réduction de l'eau.

Nous allons exploiter juste les paramètres qui nous permettent d'estimer le recouvrement de la surface et de connaître l'état de la surface active. L'un de ces paramètres constitue la capacité de double couche qui est un facteur indiscutable qui est directement proportionnel à la surface active de l'électrode de travail. Elle se calcule par la relation suivant :

$$C_{dc} = \frac{1}{2\pi f_{max} R_{tc}}$$

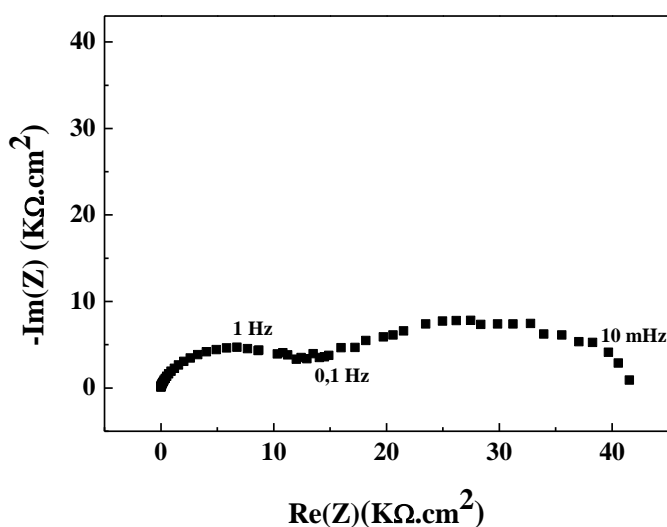
(Eq. IV.10)

Avec :

$C_{dc}$  : capacité de la double couche ( $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ) ;

$f_{max}$  : fréquence maximale correspondant au sommet de la première boucle (Hz) ;

$R_{tc}$  : résistance de transfert de charge  $\Omega.\text{cm}^2$ .



**Figure IV.11** : Diagramme d'impédance enregistré sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia.

Le tableau IV.3 regroupe les paramètres extraits du diagramme de Nyquist.

**Tableau IV.3** : Paramètres extraits de la figure IV.11.

$R_e$ ( $\Omega$ )	$R_{tc}$ ( $\Omega$ )	$C_{dc}$ ( $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ )
58	$15 \times 10^3$	1,25

La valeur de la capacité de double couche mesurée est extrêmement faible ce qui signifie que la surface active est très réduite. L'explication est que l'interface de l'électrode est pratiquement recouverte de dépôt de carbonate de calcium, ce qui est parfait accord avec les résultats chronoampérométriques.

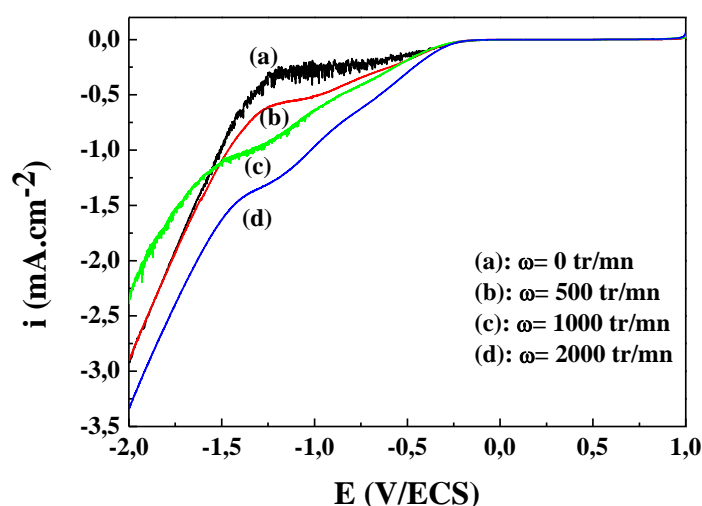
#### IV.4. Test de pouvoir anti-dépôt du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) :

Le pouvoir inhibiteur de l'extrait du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) sur la critique de précipitation du carbonate de calcium dans l'eau de Bejaia a été évalué par trois méthodes électrochimiques.

##### IV.4.1. Voltamétrie linéaire :

La voltamétrie linéaire est une méthode d'électrolyse qui se base sur la mesure du flux de courant résultant de la réduction ou de l'oxydation des composés présents en solution. Elle permet, dans notre cas, de donner des informations indicatives de l'effet que peut exercer notre inhibiteur.

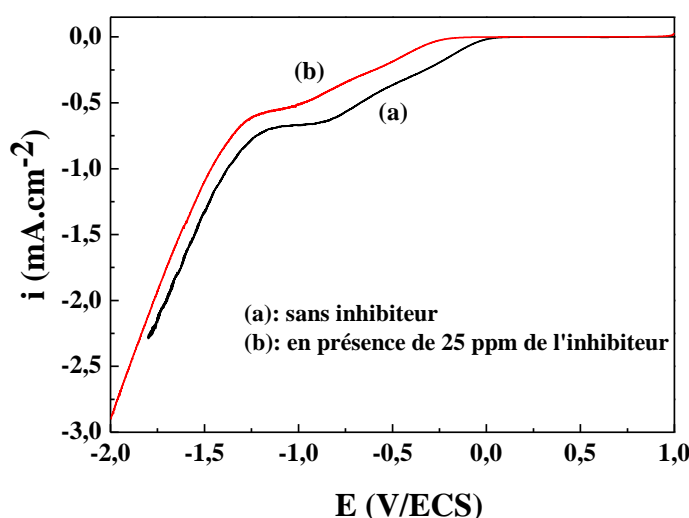
Pour se faire des courbes intensité-potential ont été tracées à différentes vitesses de rotation de l'électrode de travail d'or plongée dans l'eau de Bejaia contenant une concentration de 25 ppm (Figure IV.12). Cette concentration est la quantité optimale qui présente un meilleur effet inhibiteur du phénomène d'entartrage et qui sera déterminé dans la partie suivante de ce travail.



**Figure IV.12 :** Courbes intensité-potential enregistrées sur l'électrode d'or à différentes vitesses de rotation de l'électrode en présence de 25 ppm d'extrait du pissenlit.

L'ajout de l'extrait du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) à une teneur très petite permet d'observer des différences sur les courbes voltamétriques enregistrées. En comparant les deux figures IV.8 et IV.12 relatives au comportement de l'électrode de travail en absence et en présence de l'inhibiteur, nous remarquons un décalage des potentiels vers des valeurs cathodiques.

Pour mieux distinguer l'effet de l'extrait, une superposition de deux courbes intensité-potential enregistrées à 500 tr/mn en absence et en présence de 25 ppm du tartrifuge a été effectuée (figure IV.13). Un net décalage de la courbe vers des potentiels cathodiques a été observé.



**Figure IV.13 :** Superposition de deux voltamogrammes tracés en absence et en présence de 25 ppm d'extrait de pissenlit. .

Vu que le principal moteur de l'entartrage accéléré est le potentiel et que celui choisit pour effectuer les essais chronoampérométrique est de -1 V/ECS, prélevé sur le palier de diffusion de l'oxygène dissous alors si on impose le même potentiel en présence de l'inhibiteur, celui-ci ne permettra pas ou peu de déposer du tartre.

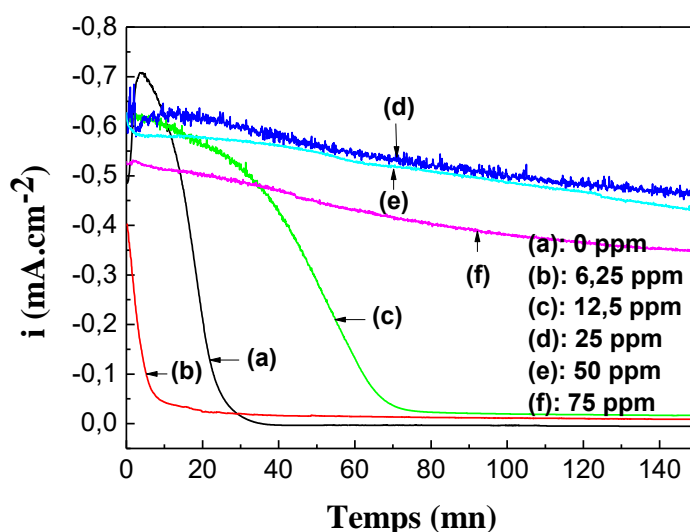
#### IV.4.2. Chronoampérométrie :

L'extrait de pissenlit (*Taraxacum Officinale*) a été ajouté à différentes concentrations (6.25, 12.5, 25, 50 et 75 ppm) à l'eau de Bejaia et évalué par enregistrement des courbes intensité-temps en imposant -1V/ECS pendant 150 min.



## Résultats et discussion

L'analyse détaillée de la figure IV.14 révèle la présence de plusieurs comportements qu'exerce l'extrait en fonction de la variation de la concentration :



**Figure IV.14 :** Courbes chronoampérométriques enregistrées sur l'électrode d'or plongée dans l'eau de Bejaia en présence de différentes concentrations en extrait de pissenlit

- L'incorporation de 6,25 ppm de l'inhibiteur vert ne ralentit pas la germination, ni la croissance des cristaux car le courant décroît rapidement dès les premiers instants d'électrode position. Cependant, il semble agir sur la texture et la compacité du dépôt car les valeurs des densités de courant résiduelles sont légèrement plus élevées en présence de cette teneur, ce qui signifie que le tartre formé est moins compact.
- L'effet inhibiteur du pissenlit est déjà notable à 12,5 ppm. A cette teneur, la densité de courant décroît plus lentement la première heure et le temps d'entartrage passe de 25 mn en absence d'inhibiteur à 71 mn après son incorporation. La germination et la croissance sont ralenties considérablement pour atteindre à la fin un dépôt beaucoup moins compact au regard des densités de courant résiduelles qui sont plus élevées.
- A 25, 50 et 75 ppm, le même comportement est enregistré. La germination n'est pas empêchée tandis que la croissance des cristaux est largement inhibée, ce qui donne des valeurs de densité de courant importantes stables tout au long de la manipulation. Ceci implique que la surface active de l'électrode est plus grande en présence de l'extrait du pissenlit.

Une autre propriété de cet inhibiteur est son action par effet de seuil. La hauteur des paliers augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur jusqu'à la teneur 25 ppm puis diminue. De ce fait, la concentration efficace de l'extrait du pissenlit (*Taraxacum officinale*) est de 25 ppm (Tableau IV.4).

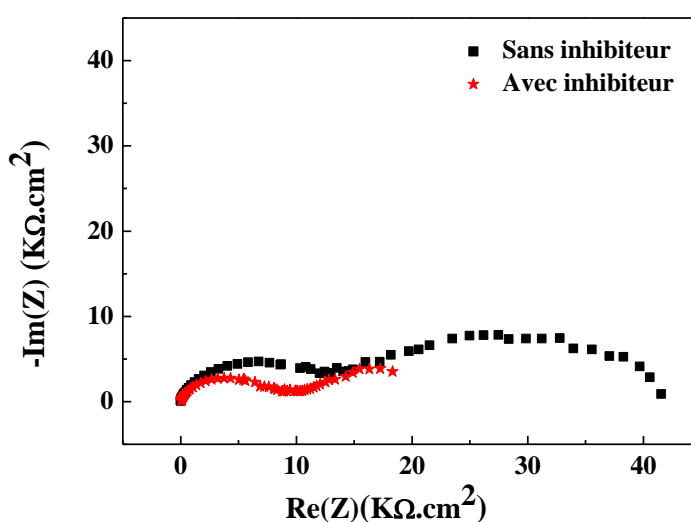
**Tableau IV.4 :** Valeurs des densités de courant résiduelles enregistrées en fonction de la concentration en extrait du pissenlit.

Concentration en extrait du pissenlit	0	0,25	12,5	25	50	75
$i_{res}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	- 54	- 86	- 167	- 461	- 430	- 349

Le pissenlit est très connu par ses propriétés anti-lithiasiques. Des études ont démontré la capacité inhibitrice d'un extrait aqueux du pissenlit sur la cristallisation de l'oxalate de calcium in-vitro [128]. De ce fait, une plante qui peut faire dissoudre un sel de calcium à l'intérieur de l'organisme humain pourra sans doute le faire à l'extérieur.

#### IV.4.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) :

L'effet de l'extrait du pissenlit (*Taraxacum Officinale*) a été évalué par spectroscopie d'impédance électrochimique. L'électrode soumise à une polarisation cathodique (-1V/ECS) pendant 150 mn en présence de 25 ppm de l'extrait a été caractérisée par SIE à circuit ouvert, dans les mêmes conditions que celles adoptées en absence d'inhibiteur (figure IV.15).



**Figure IV.15 :** Diagrammes d'impédances obtenus en absence et en présence de 25 ppm en extrait du pissenlit.

Le diagramme obtenu sur le plan Nyquist présente un autre comportement de l'électrode. Nous observons l'apparition d'une boucle en haute fréquence due à l'activation (processus de transfert de charge de l'oxygène et de l'eau) et une seconde boucle non complète.

La résistance de l'électrolyte est augmentée en présence de l'inhibiteur. Elle passe de  $58 \Omega$  à  $337 \Omega$ , ce qui est probablement due à l'ajout de la plante qui rend la solution plus chargée en ions.

La résistance de transfert de charge  $R_{tc}$  se voit nettement diminuée (de  $15 \text{ k}\Omega$  à  $10 \text{ K}\Omega$ ) en présence de la concentration efficace du pissenlit et le diamètre de la boucle en haute fréquence est réduit considérablement, ce qui signifie que le taux de recouvrement de l'électrode de travail a baissé.

L'extrait du *Taraxacum Officinale* présente, donc, de bonnes propriétés inhibitrices de la précipitation du carbonate de calcium, au regard des résultats obtenus.

#### IV.5. Conclusion :

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons conclure que :

- La partie aérienne de la plante du pissenlit est riche en eau, ce qui fait une teneur faible en matière sèche
- L'extrait du pissenlit est riche en polyphénols, en flavonoïdes et en tanins.
- La vitesse balayage n'a pas d'effet notable sur les courbes de polarisation.
- L'augmentation de la vitesse de rotation de l'électrode augmente le flux de matière vers l'électrode.
- Le potentiel imposé pour les essais chronoampérométriques est de  $-1 \text{ V/ECS}$ .
- L'ajout de petites quantités d'extrait du pissenlit (de l'ordre de quelques ppm) permet d'inhiber significativement la formation du tartre.
- L'inhibiteur agit par effet de seuil et la concentration efficace est de 25 ppm.

*Conclusion*  
*générale*

### Conclusion générale

Nous avons voulu à travers ce travail traiter deux aspects d'une importance primordiale, d'intérêts industriel et environnemental. Le premier réside dans le traitement anti-tartre pour trouver une solution raisonnable au fléau de la précipitation des dépôts incrustants de sels peu solubles et le deuxième est faire en sorte que cette solution soit respectueuse de l'environnement.

L'inhibition chimique par utilisation de substances vertes est l'un des grands challenges qu'ont relevé plusieurs chercheurs ces dernières années. Dans ce contexte, nous avons testé une plante, d'origine très abondante, en tant qu'inhibiteur de la précipitation du carbonate de calcium dans l'eau de Bejaia, réputée pour son caractère dur.

Trois différentes parties ont fait l'objet de cette étude :

- La première est relative à la plante testée qui est le Pissenlit (*Taraxacum Officinale*). Nous avons pu déterminer plusieurs de ses propriétés physico-chimiques et sa composition en métabolites secondaires.

Les résultats ont pu montrer que la teneur en humidité du pissenlit est estimée à 83 %, ce qui donne automatiquement une teneur en matières sèches de 17 %. Le taux d'extraction en utilisant l'eau comme solvant est évalué à 34 % et l'activité antioxydante est de 26 %.

La composition de la plante a été déterminée par la méthode de dosage spectrophotométrique UV-Visible. La teneur en polyphénols totaux est de 305 mg EAG/g ES  $\pm$  2.83 tandis que celle en flavonoïdes est estimée à 95 mg QE/g MS. Les tanins se trouvent dans la plante à une teneur de 65 mg EAT/g MS  $\pm$  0,26.

L'analyse de la poudre de pissenlit par spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier laisse apparaître plusieurs bandes relatives aux groupements phénoliques et carboxyliques dues à la présence des polyphénols dans la composition de l'extrait.

- La seconde partie de ce travail est consacrée à l'évaluation du pouvoir entartrant de l'eau de Bejaia par essai d'entartrage accéléré en imposant le potentiel de réduction de l'oxygène dissous. Plusieurs paramètres électrochimiques ont été déterminés : la vitesse de balayage, la vitesse de rotation de l'électrode de travail et le potentiel imposé.

Les résultats ont montré que la vitesse de balayage n'a eu aucun effet significatif sur les courbes de polarisation, ce qui nous a permis de choisir une valeur de 1 mV/s pour tracer les courbes intensité-potentiel qui assureraient des conditions stables.

L'augmentation de la vitesse de rotation de l'électrode permet de faciliter l'acheminement des espèces réactives vers l'électrode de travail, ce qui constitue un accélérateur de la réaction électrochimique. Le tracé du courant ( $I_{lim}$ ) en fonction  $\omega^{1/2}$  évolue linéairement, mais la droite obtenue ne passe pas par l'origine, ce qui signifie que l'on est dans un état de dynamique mixte, c'est-à-dire de échanges de diffusion et de transfert.

Une vitesse de rotation de l'électrode de travail de 500 tr/mn a été retenue et le potentiel imposé dans les essais d'entartrage accéléré est fixé à -1 V/ECS.

Le traitement de la courbe chronoampérométrique enregistrée dans l'eau de Bejaia exempte d'inhibiteur a révélé que cette eau possède un caractère très entartrant et que les dépôts formés sont très compacts et bloquants.

- La dernière partie a été dédiée au test de l'extrait de pissenlit (*Taraxacum Officinale*) en tant qu'inhibiteur d'entartrage. L'ajout de petites quantités de cette plante (environ quelques ppm) a montré un effet anti-dépôt très significatif. La voltampérométrie linéaire a révélé que l'extrait permet de déplacer la courbe de polarisation vers des valeurs plus cathodiques. La chronoampérométrie a pu montrer un net effet inhibiteur de la cinétique de précipitation du carbonate de calcium. En présence du pissenlit, la valeur du courant résiduel est significativement plus importante, ce qui indique que la surface active de l'électrode de travail est plus grande et que le site actif est plus libre. Cet inhibiteur agit par effet de seuil et la concentration efficace du pissenlit est de 25 ppm. Les résultats de la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) corroborent avec ceux trouvés par la voltamétrie linéaire et la chronoampérométrie.

En termes de perspectives, nous souhaitons :

- ✓ Faire des dosages plus poussés pour déterminer les différents principes actifs responsables de l'action inhibitrice.
- ✓ Caractériser les dépôts formés en absence et en présence du pissenlit par microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à l'analyse élémentaire EDX.
- ✓ Séparer les parties de plante et les tester séparément afin de mieux évaluer leurs effets.

*Références*

*bibliographiques*

### Références bibliographiques

- [1] : A. Hamdi, M. F. Abu-zeid, C. Lacirignola. Water crisis in the Mediterranean: agricultural water demand management. *Water Intern.* (1995), 20 (4), 176–187.
- [2] : H. Roques, F. Ismail, D. Mohammedi, B. Talhi, M. Djeha. Lutte contre l'entartrage de l'installation à multi-étages de dessalement d'eau de mer de l'ENIP-SKIKDA. *Revue des sciences et technologie. Université d'Annaba.* (1997), Synthèse N°02. p. 53-58. Juin.
- [3] : H. Roques. Fondement théoriques du traitement chimique des eaux. Volume I. *Technique et Documentation- Lavoisier, Paris* (1990).
- [4] : H. Elfil; « Contribution à l'étude des eaux géothermales du sud tunisien: Etude des mécanismes et de la prévention des phénomènes d'entartrage » ; Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, (1999).
- [5] : M. Ekor. L'utilisation croissante des plantes médicinales : enjeux concernant les effets indésirables et les défis de la surveillance sécurité. (2013), *Avant Pharmacol*; 4 : 177.
- [6] : M. Wichtl, N. G. Bisset. Médicaments à base de plantes et produits phytopharmaceutiques. *Medpharm, Stuttgart*, (1994), pp 596–600.
- [7] : K. Schütz, R. Carle, A.Schieber. Taraxacum--une revue sur son profil phytochimique et pharmacologique. *J Ethnopharmacol.* ; (2006) 107 : 313-323.
- [8] : B García-Carrasco, R Fernandez-Dacosta , A Dávalos , JM Ordovás , Rodriguez-Casado A. Hypolipidémique in vitro et les effets antioxydants des extraits de feuilles et de racines de taraxacum officinale. *Med Sci (Bâle)* (2015) ; 3 : 38-54.
- [9] : S Paduret, S Amariei, G Gutt , G Piscuc . L'évaluation des propriétés du pissenlit (*Taraxacum officinale*) comme ingrédient alimentaire précieux. *Rom Biotech Lett* 2016 ; 21: 11569-11575.
- [10] : A Nogaret, *La phytothérapie: Se soigner par les plantes*, Editions Eyrolles, 7 juil. 2011 - 192 pages.
- [11] : J Dybowski, *Guide de jardinage*, BnF collection ebooks, 5 août 2016.
- [12] : H Chun, D David . Kitts, Activités antioxydantes, prooxydantes et cytotoxiques des extraits de fleurs de pissenlit fractionnés au solvant (*Taraxacum officinale*) in vitro, *J. Agric. Food Chem.*, 2003, 51 (1), pp 301–310.



- [13] : C. Jalili et al., « Un aperçu des potentiels thérapeutiques de *Taraxacum officinale* (pissenlit) : une herbe traditionnellement précieuse avec un historique de portée », P19
- [14] : Z. Ali,. Plantes médicinales, Tehran University Press, Téhéran, Iran. (1989).
- [15] : A Collins,.Mémoire de phytothérapie : L'utilisation de la phyto-aromathérapie dans le cadre d'un régime hypocalorique, Edition Maloine (28 ème édition),( 2007). p : 8.
- [16] : JL August, M Loiseleur-Deslongchamps, 1819 ; Manuel des plantes usuelles indigènes, ou Histoire abrégée, (1819) Volume 1, p : 337,339, 340,410 et 453.
- [17] : E Yarnell.; K Abascal,. . Pissenlit (*Taraxacum officinale* et *Tmongolicum*). Médecine intégrative.(2009).8(2), 35-38.
- [18] : FI Milagro ; J Champion. & J.A Martinez. (2006). Gain de poids induit par une forte teneur en graisses l'alimentation implique une augmentation du stress oxydatif du foie. Obésité (Silver Spring). (2006), 14(7),1118-1123.
- [19] : B Sweeney, .;M Vora.; C Ulbricht. & E Basch. (2005). Systématique fondée sur des preuves examen du pissenlit (*Taraxacum officinale*) par une collaboration de recherche standard naturelle.Tourillon de phytothérapie. (2005), 5(1),79-93.
- [20] : M.F Gonzalez-Castejon ; A Visioli . & Rodriguez-Casado. Biologie diversifiée activités de pissenlit. Revues nutritionnelles (2012) 70(9), 534-547.
- [21] : V. U.S Ahmad.; Z Yasmeen .; M. A Ali,.; M. I Khan,.; F Choudhary ;G.A Akhtar; M Miana & Zahid. Taraxacin, a new guaianolide from *Taraxacum wallichii*. (2000). Journal of Natural Products63, 1010–1011.
- [22] : F Maggi. Pissenlit. Dans : Nabavi SM, Silva AS (eds). Suppléments nutritionnels non vitaminiques et non minéraux. presse académique ; San Diego : Elsevier Science & Technology, 2018, p. 203-204.
- [23] : I Trojanova, V Rada, L Kokoska, E Vlkova. L'effet bifidogène de la racine de *Taraxacum officinale*. Fitoterapia (2004); 75(7-8): 760-763.
- [24] : M Gonzalez-Castejon, B Garcia-Carrasco, R Fernandez-Dacosta, A Davalos, A Rodriguez-Casado. Réduction de l'adipogenèse et de l'accumulation de lipides par les extraits de *Taraxacum officinale* (pissenlit) dans les adipocytes 3T3L1 : une étude in vitro. Phytother Res 2014 ; 28(5): 745-752.

[25] : CA Williams, F Goldstone, J Greenham. Flavonoïdes, acides cinnamiques et coumarines des différents tissus et préparations médicinales de *Taraxacum officinale*. *Phytochimie* 1996; 42 (1): 121-127.

[26] : F Hanawa, M Kanauchi, S Tahara, J Mizutani. Lettucenin A en tant que phytoalexine de pissenlit et son élicitation dans des cultures de cellules de pissenlit. *J Fac Agric Hokkaido Univ* 1995; 66(2): 151-162

[27] :K Schütz, DR Kammerer , R Carle, A Schieber. Caractérisation des acides phénoliques et des flavonoïdes dans la racine et l'herbe de pissenlit (*Taraxacum officinale* WEB. ex WIGG.) par chromatographie liquide haute performance/spectrométrie de masse à ionisation électrospray. *Spectre de masse commun rapide* 2005 ; 19(2): 179-186.

[28] : M. Martinez a bP. Poirrier a,bR. Chamy bD. Prüfer c dC. Schulze-Gronover dL. Jorquera a bG. Ruiz a b , "Taraxacum officinale et espèces apparentées - Une revue ethnopharmacologique et son potentiel en tant que plante médicinale commerciale, Les liens d'auteur ouvrent le panneau de superposition " , *Journal d'ethnopharmacologie* , 1er juillet 2015, volume 169 , ,

[29] : C Manach., A Scalbert ., C Morand., L Jiménez., Polyphenols: food sources and bioavailability. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2004.79:727 - 747.

[30] : A Fleuriet., C Jay-Allemand, J.J Macheix., Composés phénoliques des végétaux un exemple des métabolites secondaires d'importance économique. *Presses polytechniques et universitaires romandes*, 2005. pp 121-216.

[31] : J.L Guignard, 1996. *Abrégé de biochimie végétale*, Ed. Masson, Paris, 1996. 160 p.

[32] : I Bouakaz, Mémoire de magister. Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2006.

[33] : De Rijke E., Out P., Niessen W M A., Ariese F., Gooijer C., Brinkman U A T., Analytical separation and detection methods for flavonoids. *Journal of Chromatography A* , 2006, 1112: 31 - 63.

[34] : G P Ribereau, *Les composés phénoliques des végétaux*. Dunod, Paris, 1968. 254 p.

[35] : J B Harbone., *Comparative biochemistry of the flavonoides*. Academic press. New York, 1967. 1-130 p.

[36] : R Brouillard, *The flavonoids Advances*. 1986. *Research science*: 525-538 p.

- [37] : J Wollgast., E Anklam., Review on polyphenols in Theobroma cacao: changes in composition during the manufacture of chocolate and methodology for identification and quantification. 2000. Food Research International 33: 423 - 447.
- [38] : L Dykes., LW Rooney., Sorghum and millet phenols and antioxidants. 2006. Journal of cereal Sciences 44: 236 - 241.
- [39] : l'eau dans les établissements de santé, comité technique régional de l'environnement hospitalier, Rhône alpes, 1995
- [40] : Y Hanaf., électrochimie de l'entartrage et inhibition par l'acide hydroxypropylenediphosphonique : cas de la pompe à vide de la papeterie de baba-ali mémoire magister. Université Boumerdas, (2005)
- [41] : R Aidoud., étude de l'effet de certains inhibiteurs sur le pouvoir entartrant de l'eau potable de la ville de Ain Kébira, thèse doctorat, Université F. Abbas, Sétif-1, 2017
- [42] : A.H Ban noud. Desalination, (1993). 93-545
- [43] : H. Elfil , « Étude des mécanismes, de la prévention, et de la prévention de l'entartrage par les carbonates et les sulfates de calcium ». Rapport de synthèse des travaux de recherche, École National d'Ingénieur de Gabes, (2005).
- [44] : S. Dekkouche B. Bechar Étude du phénomène d'entartrage et de son inhibition par un tartrifuge vert par la méthode de dégazage contrôlé du CO<sub>2</sub>, mémoire master, bejaia, 2014
- Références bibliographiques 83
- [45] : Antony, Alice, Low, Jor How, Gray, Stephen, et al. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: a review. Journal of membrane science, 2011, vol. 383, no 1-2, p. 1-16.
- [46] : M.M.H Al Omari, M. M. H., I.S Rashid., N.A Qinna., et al. Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology. 2016.
- [47] : A Louadj, simulation des phénomènes d'entartrage : étude du système calcocarbonique des eaux saumâtres, mémoire magister, université S. Dahleb Blida, (2009)
- [48] Z. Belarbi, « Entartrage par voie électrochimique et par dégazage contrôlé : Utilisation d'inhibiteurs verts ». Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira, Bejaia (2009).

[49] : H. Semoneras, étude des méthodes d'évaluation et d'inhibition du pouvoir incrustant des eaux dures, thèse doctorat, université des frères Mentouri Constantine, 2018

[50] : S. Benslimane, « Etude chimique des eaux naturelles en Algérie (région de Batna) : développement de méthodes expérimentales et de calculs pour l'étude des propriétés (équilibre calcocarbonique, corrosion, dépôts,...) et du traitement (deminéralisation, conditionnement...) de ces eaux ». Thèse de doctorat, Université El-hadj Lakhdar-Batna, Algérie (2017).

[51] : Y. Boulahlib-bendaoud, contribution à l'étude des procédés électrochimiques d'adoucissement des eaux dures, thèse doctorat, université des frères Mentouri Constantine, 2015

[52] : K. Labiod, étude du caractère incrustant des eaux et son inhibition par des essais chimiques et d'électrodéposition, mémoire magister, université des frères Mentouri Constantine, (2010)

[53] : N Chhim. Effets d'additifs polymériques sur les cinétiques de précipitation de carbonate de calcium en présence de matières en suspension et de matériaux de corps d'échange thermique : applications aux circuits de refroidissement industriels. Thèse de doctorat, université Toulouse, 2019

[54] : C Garcia,. Etude de l'action d'un additif phosphoné sur l'entartrage et sur la corrosion de l'acier dans les conditions hydrodynamiques d'une cellule à canal. Thèse de doctorat. PhD thesis. University of Paris VI, France.2000

[55] : B. Ziani. L Haddadi, Etude comparative de l'effet de deux inhibiteurs (vert et commercial) sur la cinétique de précipitation du carbonate de calcium, Université Bejaia, 2014.

[56] : A.HADFI., M. El Hadek , and A. Driouiche. "Evaluation du pouvoir entartrant : méthode de dégazage contrôlé." Physical & chemical news 49 (2009): 88-92.

[57] : A Manzola. S El Fil., H Amor, M. Ben. Etude de l'entartrage par les eaux géothermales : influence du bois sur la précipitation de CaCO<sub>3</sub>. 2003, Journal-societe chimique de tunisie , vol. 5, no 1, p. 145-158.

[58] : M.M Tilili. Etude des mécanismes de précipitation du carbonate de calcium. Application à l'entartrage. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) ; Université de Sfax-Tunisie. 2002.

- [59] : M. Ben Amor, D. Zgolli, M. M. Tlili, A. S. Manzela « Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation »; Desalination, (2004) 166, 79-84.
- [60] : H Roques, Chemical water treatment: principles and practice.VCH,Inc. New York (1996).
- [61] : S. Dekkouche, B. Bechar Étude du phénomène d'entartrage et de son inhibition par un tartrifuge vert par la méthode de dégazage contrôlé du CO<sub>2</sub>, mémoire master, bejaia, 2014.
- [62] : Y. Ben Amor, L., Bousselmi, E., Sutter, et al. Apport de la microbalance à quartz dans l'étude de l'influence des ions sulfate, chlorure et magnésium sur la cinétique d'entartrage. Matériaux & Techniques, 2004, vol. 92, no 5-6, p. 53-61.
- [63] : B Salah, M.M Tlili, et M Ben Amor., Influence of foreign salts to the CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system and antiscalants on the adherence of calcium carbonate on the stainless steel. European journal of water quality, 2010, vol. 41, no 1, p. 51-66.
- [64] : S Medfouni, Adoucissement des eaux géothermales de l'oued r'hir. Étude comparative de deux types de chaux (CaO et Ca(OH)<sub>2</sub>), Mémoire magister, Université de Ouargla, (2007)
- [65] : H. Roques, fondements théoriques du traitement chimique des eaux, Volume 1, Edition lavoisier TEC et DOC (1989) 217-508.
- [66] : C. Geffroy, J. Persello, A. Foissy, B. Cabane, F.Tournilhac, The frontier between adsorption and precipitation of polyacrylic acid on calcium carbonate, Revue de l'institut française du pétrole vol. 52 (1997) 183-190.
- [67] : S. Boggavarapu, J. Chang, P. Calvert, Materials Science and engineering C 11. (2000)47-49.
- [68] S. Ghizellaoui, J. Lédion, A. Chibani, Etude de l'inhibition du pouvoir entartrant des eaux du Hamma par précipitation contrôlée rapide et par un essai d'entartrage accéléré, Desalination 166, (2004)315-327.
- [69] : R. W. Peters, J. D.Stevens, Effect of iron as a trace impurity on the water softening process, A.I.C.H.E Sympos. Ser. 78 (1982) 46-67.
- [70] : J. Ladel, P. Leroy, Mise en évidence de l'effet inhibiteur de métabolites d'algues planctoniques sur la précipitation du carbonate de calcium dans les eaux naturelles d'origine superficielle, J. Eur. Hydrol. 28 (1997) 69-86.

[71] : K. Walha, M. Ben Amor, R. Rosset, la lutte contre l'entartrage des eaux du forage d'El Mansoura, Journal de la société chimique de Tunisie, 4 (1998) 275-287.

[72] He. Shiliang, T.Amy, M. B.Thompson, Inhibition of calcium carbonate precipitation in NaCl brines from 25 to 90°C, Appl. Geochem.14 (1999) 17-25.

[73] : P. Leroy, mécanisme de précipitation du carbonate de calcium, Tribune de l'eau 573 (1995) 31-46.

[74] : D.Liu, Research on Performance Evaluation and Anti-ScalingMecanism of Green Scaleinhibitors by Static and DynamicMethods, Thèse de doctorat, L'école Nationale Supérieure d'art et Métiers Spécialité "Mécanique Matériaux" (PIMM), Paris Tech. France.Supérieure d'art et Métiers Spécialité "Mécanique Matériaux" (PIMM), Paris Tech. France. 2011.

[75]: R. A.Gross, and B. Kalra, Biodegradable polymers for the environment. Science, 2002. 297(5582),803-7.

[76] : D.Hasson, H., Shemer, and A Sher, 2011 State of the Art of Friendly "Green" Scale Control Inhibitors: A Review Article. Industrial& Engineering Chemistry Research, 2002.2011 50(12), 7601-7607

[77] : E.B. Ituen, JI. Ime-Sunday, « Inhibition of Oil field Scalesusing Plant Materials: Apeepinto green Future », Chemistry Research Journal, 2017, 2(5):284-292.

[78] : F.R.Johannsen, Toxicologie profile of carboxymethylinulin, food chem.Toxicol 14 2003, 49-59.

[79]: D. L., Verraest, J. A., Peters, H.Bekkum, and G. M. Rosmalen, Carboxymethylinulin: A new inhibitor for calcium carbonate precipitation. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1996. 73(1), 55-62

[80] : E Girasa, M Dewispelaere « Polyaspartate, a new alternative for the conditioning on the proprieties of water and stean in kyoto

[81] :A.L Kavitha, T.Vasudevan, H.GurumaleshPrabu « Evaluation of synthesizedantiscalants for cooling water system application » Desalination 268 30-45 2011.

[82] : C.Gabrulli, M.Keddam, H.Perrot, A.Khalil, R.Rosset, M.Zidoune « Characterisation of efficiency of antiscaletreatment of water .Part I: chemical process » J.appliedElectrochem 1996. 26, 1125-1132;

- [83] : M.Glode, T.Melin « Potentials and limitations of molecular modelling approaches for scaling and scale inhibiting mechanisms » *Desalination* 2006, 199, 26-28,
- [84] : N.Wada, K.Kanamura, T.Umegaki. Effect of carboxylic acid on the crystallisation of calcium carbonate. *J.Colloid interface Sci.*233, 2001, 365-370.
- [85] : M. M., Reddy, and A. R. Hoch, Calcite Crystal Growth Rate Inhibition by Polycarboxylic Acids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001 235(2), 365-370
- [86] : F.Manoli, E.Dalas, Calcium carbonate crystallisation in the presence of glutamic acid, *J.Cryst. Growth* 222; 2001, 293-297.
- [87]: P.Malkaj, J.Kanakis, E.Dalas. The effect of leucine on the crystal growth of calcium carbonate, *J.CrystGrowth* 266, 2004, 533-538.
- [88]: E.Dalas, A.Chalias, D.Gatos, K.Barlos, The inhibition of calcium carbonate crystal by cysteine-rich Mdm2 peptide, *J.Colloid Interface Sci.*300, 2006, 536-542.
- [89]: R.Menzri, S.Ghizellaoui, M.Tlili Calcium carbonate inhibition by green inhibitors: Thiamine and pyridoxine. *Desalination* 2017, 404, 2017.
- [90]: X.Yang, G.Xu. The influence of xanthan on the crystallization of calcium carbonate. *J.Cryst.Growth* 314, 2011, 231-238.
- [91]: B.Ekemini Ituen, I. Joy Ime-Sunday, Edidiong A. Essien. Inhibition of Oilfield Scales using Plant Materials: A Peep into Green Future. *Chemistry Research Journal*, 2017, 2(5):284-292
- [92]: G. Vasyliov, V. Vorobyova, and T. Zhuk. Raphanus sativus L. Extract as a Scale and Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Tap Water. *Hindawi Journal of Chemistry* Volume 2020, Article ID 5089758
- [93]: A. Hajizadeh, Tayebe Bagheri Lotfab ad, Manochehr Bahmaei. Assessment of aqueous extract of *Gypsophila arietoides* for inhibitory effects on calcium carbonate formation *Green Process Synth* 2019; 8: 464–473.
- [94]: Z. Belarbi, J. Gamby, L. Makhloufi, B.Sotta, B.Tribollet. Inhibition of calcium carbonate Precipitation by aqueous extract of *Paronychia argentea*. *J Cryst Growth*. 2014 386. 208 214,.
- [95] : A. Karar « Etude électrochimique et physicochimique des conduites d'eau potable » .Thèse de doctorat, université Ferhat Abbas-Sétif 2011.



[96] : E Khamis, E. El- Rafey, A.Abdel-Gaber, A.El-Hefnawy, M SalahEl-Din. Arghel Extract as an Environmentally Friendly Anti-Corrosion and Anti-Scalent in Industrial Water Systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 301, 2018, 012149.

[97]: A.M .Abdel-Gaber, B.A.Abd-El-Nabey, E. Khamis, D.E.Abd-El-Khaled .A natural extract as scale and corrosion inhibitors for steel surface in brine solution .Disalination 278, 2011, 337- 342.

[98]: A.M .Abdel-Gaber, B.A. Abd-El-Nabey, E. Khamis, H.Abd-El-Rhmann, H.Aglan, A.Ludwick. Green anti-scalant for cooling water systems .Int .J.Electrochem.Sci.7, 2012, 11930-11940

[99]: M Ramakuela, A Adeniyi, M Onyango, R Mbaya, O. A. Oyewo. Performance Evaluation of Orange Peels as Anti-Scaling Agent for Pretreatment of Water. 11th ICARD | IMWA | MWD Conférence – “Risk to Opportunity.

[100] : M., Al-Farsi, et al .Comparison of antioxidant activity, anthocyanins, caroténoids, and phenolics of three native fresh and sundrieddate (Phoenix dactylifera L.) Varieties grown in Oman. J. Agric .Food .Chem. (2005). 53: 7592- 7599.

[101] : V.L Singleton.; J. A Rossi.,( 1965). Colorimetry of total phenolics with.

phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. A merican Journal of Enology and Viticulture,16, 144-158. (1965)

[102] : T Bahorun, B Gressier..Activité de piégeage des espèces d'oxygène des extraits phénoliques d'organes de plantes fraîches Hawthorn etPréparations pharmaceutiques Arzneimittel-Forschung/Drug Research 1996 vol 46 n 11 p 1086-1089.

[103] : T Swain. Et W.E Hillis,(1959) Les constituants phénoliques de Prunus domestica. I.L'analyse quantitative des constituants phénoliques. Journal des sciences de l'alimentation et de l'agriculture, (1959) 10, 63-68.

[104] : Mazeriel. Développement de capteurs électrochimiques basés sur de la voltammétrie par échantillonnage de courant sur réseau d'électrodes. Thèse de doctorat. Université de rennes, France, (2016)

[105] : K Peter et R William. Heineman, Laboratory Techniques in Electroanalytical Chemistry, Second Edition, Revised and Expanded, CRC, 23 janvier 1996, 1008 p. (ISBN 978-0-8247-9445-3, lire en ligne [archive]).



[106] : Cynthia G. Zoski, Handbook of Electrochemistry, Amsterdam, Elsevier, 2007, 892 p. (ISBN 978-0-444-51958-0, lire en ligne [archive]).

[107] : Irkham, Watanabe, Fiorani et Valenti, « Co-reactant-on-Demand ECL: Electrogenerated Chemiluminescence by the in Situ Production of S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> at Boron-Doped Diamond Electrodes », Faraday Discuss, 2016. vol. 138, no 48, p. 15636–15641.

[108] : T Attar . Dosage des éléments traces dans le sang humain par voltampérométrie à redissolution anodique et /ou cathodique. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen. 2014

[109] : L Chapus. Organisation de nanoparticules de métaux nobles : application à la spectroscopie Raman exaltée de surface et à l'électrochimie. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, France. 2018

[110] : H Maskill, L'étude des réactions organiques et leurs mécanismes, Wiley-Blackwell, 2006 ISBN 1-4051-3142-X

[111] : W. Lin. 1991. Caractérisation du pouvoir entartrant d'une eau et de sa modification par un procédé électrolytique. Thèse de doctorat. Université de Paris VI, France. 1991

[112] : H Semine ras. Etude des méthodes d'évaluation et d'inhibition du pouvoir incrustant des eaux dures. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 2018

[113] : S Dellile. Détection électrochimique du nitrométhane pour un détecteur de traces d'explosifs par concentration en milieu liquide. Thèse de doctorat. Université François – Rabelais de Tours, France. 2013

[114] : M Gibilaro . Co-réduction électrochimique de l'aluminium et des lanthanides en milieu fluorures fondus ; application au traitement pyrochimique des effluents nucléaires. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France. 2008

[115] : E. H Aglzim Caractérisation par spectroscopie d'impédance complexe d'une pile à combustible en charge « Evaluation de l'influence de l'humidité ». Thèse de doctorat. Université de Nancy, France. 2009

[116] : Y Chao. Détermination du pouvoir entartrant de l'eau d'un circuit via l'utilisation d'une microbalance électrochimique à quartz ultrasensible. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, France. 2013

- [117] : P. Griffiths et J.A. de Hasseth, Fourier Transform Infrared Spectrometry, Wiley-Blackwell, 2007, 2e éd. (ISBN 978-0-471-19404-0 et 0-471-19404-2, lire en ligne [archive]).
- [118] : J Barinah, P Yanney, D Lareya, C Quarcoo. Effet of Drynig Methods as phytochimica,Antioxidants activity and total Phénlic Content of DANDLION leaver-American Journal of Food and Nutrition.2017 Vol.5.N<sup>0</sup><sub>4</sub>:136-141
- [119] : W Biel.,A Joroszewska., E Lyson., A Telesinski. The chimical Compotion and antixidant properties of common dandlion leaves compared with sea bwkthorm .Can.J.PLANT Sci .2017 79 :1165-1174
- [120] : M.I Dias, L Barras .,R.C Alves., M Beatriz., P.P Olivera., Santas-Buelya C.,Ferveira C.F.R.(2014)Nututional composition ,antixidant Phynolic composition of wild taraxacum sect.RUDERAL.Food Research International.(2014) 56 :266-271.
- [121] : M.M Corvan. Plant products as antimicrobial agent. Cliniel Microbiology Reviues. (1999) 12 (4) : 565,568-571
- [122] : E Levizou., Y Petroupoulu , Y Manetas. Total carotenoide amirint in crude twig extracts may be ouverestimated due to interference by high contents of co-extracted phenolics .photosynthetica. (2004) 42(2) : 295-297.
- [123] : V.L Singleton., J.A.Rossi .colorimetry of total phenolicaurth phosphomolibdic phsphotungstic acide reagent .Am .J.Enol. viticul., (1965) 16° : 144-158
- [124] : I Hasbay Adil ., H.I Cetin, M.E Yener, Baymdirh A.Suberitical (carbon dioxide +ethanol) extraction of polyphenols from apple and peache pomaces Y.and determination of the antioxidant activities of the extracts.J.of Supercal fluids , 43.55-57
- [125] : F.Z Lifa, S Lifa L'effet de l'extrait aqueux du traxacum officinale sur les paramétres plasmatique et tissulaires chez des rats rendebèses par régime cafétéria. Mémoire de Master. Université d'el-oued (2019).
- [126] : M.N Jassim., A.S Safanah., Noori O.M. (2012). Identification of Dandelion Taraxacum officinale Leaves Components and study Its extracts Effect on Different Microorganisms. Journal of Al-Nahrain University 15 (3) : 7-14.
- [127] : G. V Lazurevskii., I.V Terntieva . A.A Shamshurere. Pakticheskie raboty po chimii prirodnyx soedinenii soedinenii (traduit en russe). Mascore.(1966) 335.

## Références bibliographiques

---

- [128] : L Frangne, intérêts des plantes contenant des polyphenols dans les troubles réneux et urenaires chez les anemmax . thèse de doctorat. Ecole Nationale Vétérinaire de toulouse (frana).(2020)
- [129] : N Zeghad. Etude du contenu phénolique de deux plantes médicinales d'intérêts économique (thymus vrillages, Rasmarinus officinales) et évaluation de leur activité antibactérienne. Mémoire de Magister. Universités de Constantine. (2009)
- [130] : J Torel, J Cillard., P Cillard, (1986). Antioxydant activity of flavonoïdes and reactivity coith peraxy radical.vphytochemistry. (1986) 25(2) : 383-385.
- [131] : G dicarlo., N Mascolo., A.A Izzo, F Capasso. (1999). Flavonoïdes : Old and new aspecte of a class of natural therapeutic drugs. Life Sciences.(1999) 65(4) : 337-353
- [132] : J Bruneton. Pharmacognosie, photochimie, plants médicinales.4<sup>ème</sup> Edentions. Lavoisier, Paris, (2009) 1288.
- [133] : M Blumenthal, W, R Busse, A Goldbery (1998) Austin : American Botanical Council and Boston :Integrative Mesecine Communication The Comlete Germen Commission Monegraphs : Therapeutie Guide to Herbal Medecines : (1998) 1-28
- [135] : H.H Lee, S.H Lee. (2008) Cytotoxic and antioxidant effect of taraxacumcoreanum Nokai. And T officinale WEB extracts korean Journal of Medicinal Crop science. (2008)16(2) : 79-85
- [136] : M Sengul. et al Total phenolic content , antioxidant and antimicrobial activités of some medicinal plants Pakistan Journal of Pharmaceucal sciences.(2009) 22(1)
- [137] : I Brighente , et al Antioxydant activity and total phenolic content of somme Brazilian species Pharmaceucal Biology (2007) 45(2) :156-161
- [138] : N Chahmi et al (2015) Antioxydant activities ande total phenolic content of Inula viscosa extracte selected from ther region of Moro Qsian Paxific Journal of Tropical Biomedicine.(2015)5(3) :228-
- [138] : I.A Jahan. et al (2010) Antioxydant activity of stevia rebaudiana Bert. leaves from Bangladesh Pharm J.(2010) 13(2) :67-75

- [139] : G Genova, P Iacopriné., M Baldi., A Ranieri., P Srorché., L Sebastiani. (2012). Temperature and storage effects on antioxdant activity of juice from red and white grapes. Internatinal journal of food science and technology.(2012). 47 : 13-23
- [140] : D.C Vodnar, O.L.C POP, Socaciu.(2012) Moutoring Lactic Acid Fermentation in Media containtorg Dandlion(taraxacum officinal) by FTIR Spectroscopy.not Bot Horti Agrobo. (2012), 40(1).65-68
- [141] : A Martinic, A Kalusevic , S Levic ., V Nedovie.,Karlonc .Microencapsulation of Dandelion (taraxacum officiInale) Leaf Extract by Spray Drying dood technology and and Big technology. 2022. 60(2).
- [142] : M.M Tlili. Etude des mécanismes de precipitation de carbonate de calcium. Application a l'entartrage. Thèse de doctorat. Université de Sfax, Tunisie.2002
- [143] : M Zidoune. Contribution à la connaissance des mécanismes d'entartrage par diverses méthodes électrochimiques. Thèse de doctorat. Université de Paris VI, France. 1996
- [144] : C.E Barchich.. Caractérisation et cinétique de formation de dépôt calcomagnésiens sur l'acier en eau de mer artificielle. Thèse de doctorat. Université de la Rochelle, France.2004
- [145] : R Jaouhari. Etude de l'entartrage électrochimique et du traitement magnétique des eaux. Thèse de doctorat. Université de Rabat, Maroc. 2000
- [146] : H. Teghidet. Etude de la cristallisation contrôlée de la calcite par voie électrochimique. Effet des ions étrangers au système calco-carbonique sur la nucléation-croissance de la calcite. Thèse de doctotat. Université de Paris VI , France et Université de Béjaia, Algerie. 2012
- [147] : K Bakhti,. Prévention et lutte conte le phénomène d'entartrage dans les conduites d'eaux dans la région de Ouargla-Touggourt : étude sur site. Thèse de doctorat. Université de Ouargla. 2007
- [148] : N. Brinis, M. Kechadi. Influence des ions sulfates sur l'entartrage en milieu calcique et rôle des phosphates dans le processus d'inhibition. Mémoire d'Ingénieur d'état. Université de Béjaia, (2006).
- [149] : S. Bara, N. Ait Ouakli. Influence de l'argile de Maghnia sur l'entartrage électrochimique. Mémoire d'Ingénieur d'état. Université de Béjaia, (2007).

## Références bibliographiques

---

[150] : S. Belkacemi, L. Moudjeb. Protection de la corrosion du cuivre dans le milieu NaCl 3% par une couche de  $\text{CaCO}_3$  déposé électrochimiquement. Mémoire d'Ingénieur d'état. Université de Béjaia, (2009).

[151] : L. Haddadi, B. Ziani. Etude comparative de l'effet de deux inhibiteurs (vert et commercial) sur la cinétique de précipitation du carbonate de calcium. Mémoire de Master. Université de Béjaia, (2014).

[152] : S. Alouache, S. Yahiaoui. Etude de l'effet inhibiteur de l'extrait du Grenadier (*Punica Granatum*) sur la cinétique de précipitation du carbonate de calcium. Mémoire de Master. Université de Béjaia, (2019).

[153] : Y. Hannat, H. Benbellil. Evaluation du pouvoir inhibiteur de l'extrait de feuilles de Persil (*Petroselinum Crispum*) vis-à-vis du phénomène d'entartrage. Mémoire de Master. Université de Béjaia, (2021).

[154] : Ledion J., Leroy P., Labbé J. P. 1985. Détermination du pouvoir incrustant d'une eau par essai d'entartrage accéléré. TSML'eau. p 323-328.

[155] : Labiod K. 2010. Etude du caractère incrustant des eaux et son inhibition par des essais chimiques et d'électrodéposition. Mémoire de magister. Université de Constantine.

### Résumé

L'objectif de notre travail présente un grand intérêt tant sur le plan industriel qu'écologique. Le but de notre étude est de tester une substance verte à base de plante en tant qu'inhibiteur de la précipitation des sels peu solubles qui conduisent à des dépôts très incrustants dans les installations industrielles qui causent beaucoup de désagréments et occasionnent des surcoûts économiques considérables. La plante testée est le Pissenlit (*Taraxacum Officinale*) et ce choix est orienté par ces grandes vertus thérapeutiques en tant qu'anti-lithiasiques.

L'analyse de l'extrait du pissenlit montre que ce végétal renferme une teneur en humidité de 83 %, ce qui fait que la teneur en matières sèches correspond à 17 %. Le solvant d'extraction choisit est l'eau et le taux d'extraction est estimé à 30 %. Par ailleurs, l'activité antioxydante du pissenlit se révèle être de 26 %. Le dosage spectrophotométrique du *Taraxacum Officinale* donne une composition de 305 mg EAG/g ES  $\pm$  2.83 en polyphénols totaux, 95 mg QE/g MS en flavonoïdes et 65 mg EAT/g MS  $\pm$  0,26 en tanins, ce qui globalement confirmé par spectroscopie Infrarouge (IRTF).

Les résultats de la voltamétrie linéaire et de la chronoampérométrie ont permis de fixer plusieurs paramètres électrochimiques à travers desquels le pouvoir entartrant de l'eau de Bejaia a été évalué. La vitesse de balayage, la vitesse de rotation de l'électrode de travail ainsi que le potentiel imposé ont été fixés à 1 mV/s, 500 tr/mn et -1 V/ECS respectivement. Le test d'entartrage accéléré a révélé que l'eau de Bejaia possède un caractère dur et elle est classée parmi les eaux très entartrantes.

L'effet inhibiteur du Pissenlit (*Taraxacum Officinale*) a été déterminé par l'analyse des résultats des méthodes électrochimiques (VL, CA et SIE). Cet extrait présente un remarquable effet anti-tartre ajouté à de très faibles concentrations et semble agir par effet de seuils. La concentration efficace du pissenlit est estimée à 25 ppm.

**Mots clés :** Pissenlit, *Taraxacum officinale*, polyphénols totaux, flavonoïdes, tanins, carbonate de calcium, Entartrage, inhibition.