



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
Université Chadli Bendjedid – El Tarf
كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الكيمياء

Département de Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Chimie

Spécialité: Chimie Analytique

Thème

**Etude des phénomènes d'entartrage et de corrosion
des canalisations des eaux potables**

Présenté par:

Ngouemou Thomas

Devant le Jury :

Dr. LOURICI Leila	MCB	Univ Chadli Bendjedid El Tarf	Présidente
Dr. DJERIBI R.	MAA	Univ Chadli Bendjedid El Tarf	Rapportrice
Dr. AIT BARA Adel	MCA	Univ Chadli Bendjedid El Tarf	Examineur

Année Universitaire 2021-2022

Remerciement

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu, le tout puissant, le clément et le miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à Mme, Djeribi. R, pour son dévouement, ces conseils et son soutien moral tout le long de l'élaboration de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail

Je remercie également toute l'équipe pédagogique du département de chimie.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère défunte mère : Ndoulou Hélène.

A mon très cher défunt père : Ngouemou Thomas.

Aux membres de jury, Mme, Lourici ; Mr. Ait Bara Adel, qui ont acceptés de juger mon travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier

A ma famille pour leurs encouragements et leurs soutiens

A mes chers amis de près ou de loin.

A mes enseignants pour leurs efforts épargnés

A mes professeurs qui m'ont suivi pendant le cursus Universitaire

Résumé

L'eau est la plus importante pour l'existence de l'homme.

Tous les circuits alimentés par des eaux sont confrontés au problème de formation de dépôt calco-carbonique au niveau des parois en contact avec l'eau ainsi que le problème de corrosion.

L'objectif de mon travail est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux (pH, turbidité, T, Cl⁻, salinité, conductivité, Ca²⁺, TH, Mg²⁺, TAC et MO) par une comparaison des échantillons en amont (station) avec des échantillons en aval (chez l'abonné), qui sont généralement la cause des phénomènes d'entartrage et de la corrosion dans les circuits de distribution d'eau potable.

Pour une analyse courte du mois d'avril de tous les paramètres physicochimiques de l'amont (station) en aval (chez l'abonné), on observe que les valeurs trouvées en amont et en aval sont pratiquement identique et respecte les normes de potabilité algériennes et situe également dans les intervalles un proche aux normes de potabilisation dictée par l'Organisation Mondiale de Santé (OMS).

Mots clés : Eau, Entartrage, Corrosion, Caractéristiques physico-chimiques, pH, T, TH, TAC, MO.

Abstract :

Water is the most important for the existence of man.

All the circuits fed by water are confronted with the problem of formation of calco-carbonic deposit at the level of the walls in contact with the water as well as the problem of corrosion.

The objective of my work is to evaluate the physico-chemical quality of water (pH, turbidity, T, Cl^- , salinity, conductivity, Ca^{2+} , TH, Mg^{2+} , TAC and MO) by comparing upstream samples (station) with samples downstream (at the subscriber), which are generally the cause of scaling and corrosion phenomena in drinking water distribution circuits.

For a short analysis of the month of April of all the physicochemical parameters upstream (station) downstream (at the subscriber), we observe that the values found upstream and downstream are practically identical and respect the standards of potability Algerian and also places in the intervals a close to the drinking water standards dictated by the World Health Organization (WHO).

Keywords: Water, Scaling, Corrosion, Physico-chemical characteristics, pH, T, TH, TAC, MO.

ملخص

الإذسان لوجود الأهم هو الماء

مسد توى على الكالسيوم كربونيدية رواسبت كوين مشكلة المياه تغذيتها التي الدوائر جميع ت واجه
ال تآكل مشكلة وكذلك للماء الملامسة الجدران

ال تعكر ، الهيدروجيني الأس) للمياه والكيميائية الفيزيائية الجودة تقيم هو عملي من الهدف
المنبع عينات مقارنة خلال من (MO و TAC ، Mg^{2+} ، TH ، Ca^{2+} ، الموصلية ، الملوحة ، Cl^- ، T ،
وال تآكل التحجيم ظواهر سدب عام بشكل هي والتي ، (المشد ترك عند) المصبة عينات مع (المحطة)
ال شرب مياه توزيع دوائر في

المصبة (محطة) المنبع والكيميائية الفيزيائية المعلمات لجميع أرييل لشهر قد صدر لتدليل
معايير وتوحد عملياً متطابقة والمصبة المنبع في الموجودة التي للاحظن ، (المشد ترك عند)
التي الشرب مياه معايير من قريبة فترات في الأماكن أيضاً الجزائية للشرب القابلة
(WHO) العالمية الصحة منظمة تمل بها

الأس ، مياينة والكي الفيزيائية الخصائص ، ال تآكل ، التحجيم ، المياه :المفتاحية الكلمات
MO ، TAC ، TH ، T ، الهيدروجيني

Listes des figures

Titre	page
Figure N°01: Conséquence de l'entartrage	04
Figure N°02: Représentation schématique des échanges de matière avec les différentes interfaces et les réactions en phase liquide	05
Figure N°03: Diagramme de prédominance des espèces carbonatées en fonction du pH.	06
Figure N°04: Nature des eaux en fonction de δ et domaine thermodynamiques des entartrages.	08
Figure N°05: Comparaison des vitesses d'entartrage entre les différents types de matériaux constituant des canalisations	11
Figure N°06 : Entartrage comparatif, après 30 jours d'écoulement d'une même quantité d'eau, à 55°C	11
Figure N°07: Impact de l'entartrage sur les conduites de l'eau potable	13
Figure N°08 : opération de d'adoucissement de l'eau	19
Figure N°09 : les échanges des ions de l'eau dure dans l'eau douce	20
Figure N°10 : Corrosion de l'intérieure (attaques mixtes groupées, autant sur la partie supérieure, qu'inférieure)	23
Figure N°11: Conduite de diamètre 80 mm ayant subi une corrosion externe localisée (courants vagabonds, hétérogénéité du sol, ...)	24
Figure N°12 : Processus de corrosion du fer	25
Figure N°13: Exemple de corrosion électrochimique	26
Figure N°14: Colonie de <i>Desulfovibrio vulgaris</i> sur acier inoxydable	27
Figure N°15: La corrosion généralisée	27
Figure N°16: corrosion localisée d'un métal	28
Figure N°17: Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable	28
Figure N°18 : Représentation schématique de la piqûre de l'acier	29
Figure N°19: Corrosion inter-granulaire	29

Figure N°20: La corrosion par crevasse	30
Figure N°21: La corrosion par érosion	30
Figure N°22: Corrosion galvanique	31
Figure N°23: Influence du pH sur la vitesse de corrosion	33
Figure N°24: Principes de la protection par anodes sacrificielles	36
Figure N°25: Principe de la protection par courant imposé	37
Diagramme N°01: conséquences du tartre sur l'installation hydraulique	13

Liste des Tableaux

Titre	page
Tableau N°01: Plage des valeurs du titre hydrotimétrique	09
Tableau N°02 : Les principaux facteurs de corrosions	32
Tableau N°03 : Comparaison des éléments de systèmes P.C	37

Liste des photos

Titre	page
Photo N°01 : Echantillon de l'eau du barrage de Cheffia	42
Photo N°02 : Mesure de la turbidité (Thomas 2022)	44
Photo N°03 : Mesure de conductivité (Thomas 2022)	44
Photo N°04 : Mesure du pH (Thomas 2022)	46
Photo N°05 : Virage de la couleur bleu pour la détermination du TH (Thomas 2022)	47
Photo N°06 : Virage de couleur du violet pour la détermination de Ca ²⁺ (Thomas 2022)	48
Photo N°07 : Mesure de NH ₄ ⁺ et Cl ⁻ (Thomas 2022)	50
Photo N°08 : Détermination de matière organique (MO) (Thomas 2022)	51

Liste des abréviations

(CaCO₃) : Carbonate de calcium

Mg (OH) ₂ : Hydroxyde de magnésium

CaSO₄ : Sulfate de calcium

D₁ et D₂ : Diamètre

CO₂ : Dioxyde de carbone

H₂O : Eau

H₂CO₃ : Acide carbonique

HCO₃⁻ : Ion bicarbinaté

CO₃²⁻ : Ion carbonate

Ca²⁺ : Ion calcium

H⁺ : Cation hydrogène

OH⁻ : hydroxyde

PCR : Précipitation Contrôlée Rapide

TH : Titre Hydrotimétrique

P_{CO2} : Pression partielle du dioxyde de carbone.

pH : potentiel d'Hydrogène

δ: Coefficient de sursaturation

PER : Poly Ethylène Réticulé

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

TA : Titre Alcalimétrique

TDS : Taux du Sel Dissous

μS/cm : micro siemens par centimètre

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Acétique

NTA : Acide Nitrilo Triacétique

PVC : Poly Chlorure de Vinyle

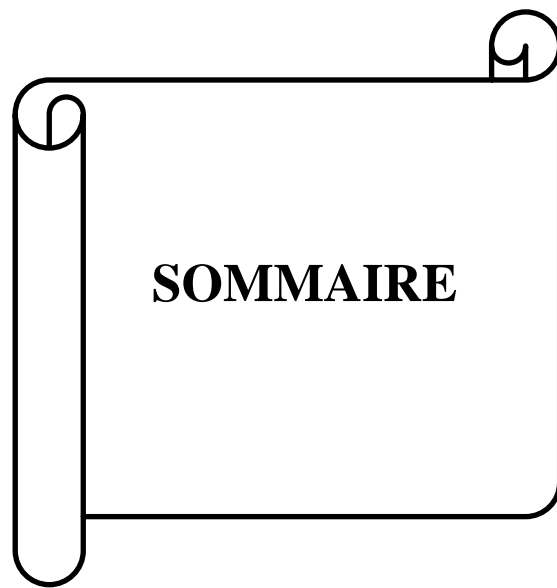
MON : Matière Organique Naturelle

ADE : Algérienne Des Eaux

e⁻ : Électron

Cl⁻ : Chlorure

NH₄⁺ : Ammonium



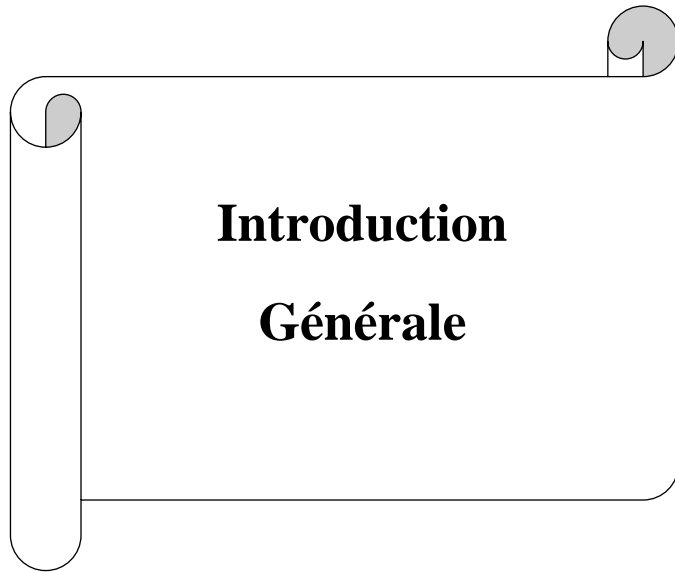
Sommaire

Introduction Générale.....	01
Chapitre I : Généralité sur l'entartrage	
Introduction.....	03
I.1. Définition de l'entartrage.....	04
I.2. Mécanisme de l'entartrage.....	04
I.3. Système calco-carbonique.....	04
I.4. Interactions gaz-liquide	05
I.4.1.Phase liquide	05
I.4.2. Interactions liquide-solide.....	07
I.4.3.. Sursaturation	07
I.4.4. Cristallisation du carbonate de calcium	08
I.4.5.La germination	08
I.4.6. La croissance cristalline	08
I.4.7. Facteurs influençant l'entartrage	09
I.4.8.Dureté de l'eau	09
I.4.9. Température de l'eau	09
I.4.10.Présence des éléments minéraux dans l'eau	10
I.5. Influence de la nature du matériau	10
I.5.1. Causes, Conséquences de L'Entartrage.....	12
I.5.2.Les Causes.....	12
I.5.3.Les Conséquences.....	12
I.5.3.1.Conséquences hydrauliques.....	12
I.5.3.2.Conséquences bactériologiques.....	14
I.5.3.3.Conséquences Technologiques.....	14
I.6.Conséquences Énergétiques et thermiques.....	14
I.7. Paramètres analytiques de l'eau.....	15
I.7.1. Principaux Paramètre de Tartre Rencontrés en Dessalement.....	15
✓ Cas de Carbonate de Calcium	15
✓ Cas de Sulfate de Carbone.....	16
✓ L'ortho Phosphates $Ca_3 (PO_4)_2$	16
✓ Cas de Silice.....	16

I.7.2. Solutions ou moyens de Lutte contre l'entartrage.....	16
I.7.3.Traitements physiques.....	16
I.7.4. Traitements chimiques.....	17
I.7.5. Vaccination acide.....	17
I.7.6. Décarbonatation à la chaux.....	18
I.7.7. Séquestration.....	18
I.7.8. Adoucissement.....	19
I.7.9. L'inhibition chimique de la formation du tartre.....	20
I.7.10. Conclusion.....	21
Chapitre II : Problème de Corrosion	
Introduction.....	22
II.1. Définition de la corrosion.....	22
II.2. Corrosion interne.....	23
II.3. Corrosion externe.....	24
II.4. La réaction de la corrosion.....	24
II.4.1. Types de corrosion.....	25
II.4.2. La corrosion chimique.....	25
II.4.3. Corrosion électrochimique.....	26
II.4.4. La Bio-corrosion.....	26
II.4.5. Les différentes formes de corrosion.....	27
II.5. La corrosion généralisée ou Uniforme.....	27
II.5.1. La corrosion localisée.....	28
II.5.2. La corrosion par piqûres.....	28
II.5.3. La corrosion inter-granulaire.....	29
II.5.3.1. La corrosion par crevasse.....	29
II.5.3.2. La corrosion par érosion.....	30
II.5.3.3. Corrosion galvanique.....	31
II.6. Facteurs de la corrosion.....	31
II.7. Les principales causes de la corrosion.....	32
II.7.1. Vitesse de la corrosion.....	32
II.7.2. Les facteurs influant sur la vitesse de corrosion.....	33
II.7.3. Influence du pH.....	33

II.7.4. Effet de la température.....	34
II.7.5. Influence de la teneur en CO ₂	34
II.7.6. Prévention de la corrosion des conduites souterraines.....	34
• Choix du matériel de fabrication des conduites.....	34
• Application de revêtements.....	34
• Application de la protection cathodique.....	34
• Utilisation des inhibiteurs de corrosion.....	34
II.7.7. Type de protection cathodique.....	35
A) Protection par anodes sacrificielles.....	35
B) Protection par courant imposé.....	36
II.7.8. Avantages et inconvénients des systèmes P.C.....	37
II.7.9. Conclusion.....	38
Chapitre III : Partie expérimentales	
Introduction.....	40
III.1. Objectif du travail.....	40
III.2. Présentation de l'Algérienne des Eaux.....	40
III.3. Présentation de laboratoire Algérienne des Eaux l'unité d'El-Tarf.....	41
III.4. Méthodes d'échantillonnage et d'analyses.....	41
III.4.1.L'échantillonnage.....	41
III.4.2. Les Paramètres physico-chimiques.....	42
III.4.3. Paramètres physiques.....	42
• Principes.....	43
a) Turbidité.....	43
Mode opératoire.....	43
b) Conductivité, Température, Salinité.....	44
c) Température.....	45
d) Salinité.....	45
• Mode opératoire.....	45
e) pH : Potentiel Hydrogène.....	45
Mode opératoire.....	46
III.4.4. Paramètres Chimiques.....	46
a) Dureté TH.....	46

• Principe.....	46
III.4.5. Détermination de Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}).....	47
a) Calcium (Ca^{2+}).....	47
• Principe.....	47
• Mode opératoire.....	47
b) Magnésium (Mg^{2+}).....	48
III.5. Détermination de TAC et TA.....	48
• Mode opératoire.....	49
III.5.1. La détermination de l'ammonium (NH_4^+) et le chlorure (Cl^-).....	49
• Mode opératoire.....	49
III.5.2. Détermination de la matière organique (MO).....	50
• Matériels.....	50
• Mode opératoire.....	51
• Résultat.....	51
III.5.3. Résultats et Discussion.....	52
Conclusions générale.....	53
ANNEXE.....	
Référence bibliographiques	



Introduction

Générale

Introduction générale

L'eau est la plus importante pour l'existence de l'homme. Elle est indispensable pour la survie et le développement de la société moderne.

L'usage de l'eau implique l'utilisation de récipients, canalisations et mécanismes qui mettent en contact un matériau avec cette eau. Lorsqu'une paroi solide est en contact avec une eau naturelle douce ou salée, le développement d'une couche à l'interface est couramment observé: biofilm, dépôt calco-magnésien, tartre, produit de corrosion,....., provenant de la précipitation d'une espèce en solution et/ou de la dégradation de la paroi elle-même.

Tous les circuits alimentés par des eaux sont confrontés au problème de formation de dépôt calco-carbonique au niveau des parois en contact avec l'eau.

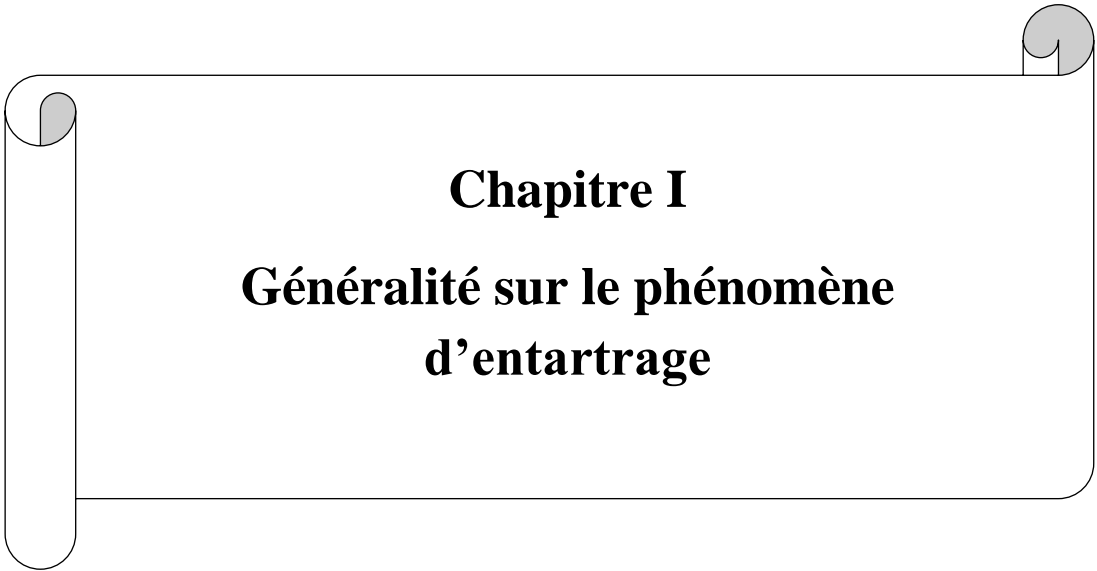
L'enjeu économique de ce problème est d'autant plus important qu'il touche beaucoup de secteurs différents.

L'objectif de notre étude est de comprendre les phénomènes qui se déroulent dans les circuits de distribution d'eau potable en amont (station) et en aval (chez l'abonné), en se basant sur les différents paramètres physico-chimiques responsable au problème de l'entartrage et de corrosion des conduites d'eau. Ces analyses sont suivies dans des laboratoires agréés, tels que le laboratoire algérien des eaux de la wilaya d'El-Tarf, la commune de Bouteldja. Il faut préciser que notre travail se base sur les caractéristiques physico-chimiques telles que la conductivité électrique, la température, le pH, la turbidité, la salinité, TH, TAC, le chlorure et la matière organique (OM).

Nous présenterons, au cours du premier chapitre, une généralité sur le phénomène d'entartrage.

Le deuxième chapitre est réservé au problème de corrosion.

Et enfin, nous terminerons par le chapitre expérimental.



Chapitre I
Généralité sur le phénomène
d'entartrage

Introduction

Le carbonate de calcium CaCO_3 est le constituant majeur du tartre que l'on trouve dans les canalisations d'eau potable ainsi que dans différents ouvrages en contact avec les eaux naturelles ou de distribution. Ces eaux sont riches en ions, sels minéraux et substances dissoutes ou en suspension. La dureté de l'eau a pour conséquence, lorsque certaines conditions sont remplies, l'apparition de précipités plus ou moins compacts et adhérents. En effet, des matières dissoutes peuvent se cristalliser en fonction de certains facteurs : augmentation de la température, un dégagement de dioxyde de carbone dissous, une augmentation de la concentration de certains sels dissous, une modification des équilibres chimiques. Une couche adhérente plus ou moins compacte et isolante de tartre est alors formée sur la surface de la conduite d'eau.

Ce phénomène peut provoquer, par exemple, la réduction de l'efficacité du transfert de chaleur dans les systèmes de refroidissement et l'obstruction des différentes composantes des canalisations. Les dépenses non productives liées à l'entartrage ont été estimées à 1,5 milliards d'euros par an en France [1]. Dans un article plus récent [2], les mêmes dépenses étaient d'environ 0,8 milliards \$ US en Grande-Bretagne, 3 milliards de \$ US au Japon et 9 milliards de \$ aux Etats-Unis. Ce problème est aussi observé d'une manière spectaculaire, dans certaines régions des pays du Maghreb qui exploitent des eaux géothermales extraites des nappes profondes [3].

La précipitation du carbonate de calcium et la formation à la surface des canalisations et des ouvrages domestiques ou industriels des dépôts de tartre, compacts et adhérents, ont de graves conséquences techniques et économiques. Un traitement antitartre pour réduire cette dureté est nécessaire [4].

Les procédés d'inhibition du phénomène d'entartrage sont nombreux. On peut distinguer :

Les procédés chimiques, par l'utilisation des inhibiteurs chimiques, vaccination acide, décarbonatation à la chaux. [5]

Les procédés physiques utilisés sont : la microélectrolyse de l'eau, la génération d'ondes électromagnétiques de haute fréquence [4].

I.1. Définition de l'entartrage :

L'entartrage est un problème des sels minéraux contenants dans l'eau qui a tendance à se former un dépôt de tartre sur les surfaces d'échanges et les parois des conduites. Les dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et du sulfate de calcium ($\text{Ca}(\text{SO}_4)$). Pour qu'il y ait dépôts de tartre sur les parois, deux conditions principales doivent être réunies :

- une condition thermodynamique : il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est-à-dire qu'il y ait sursaturation.

- une condition cinétique : il faut que la vitesse de déposition soit suffisamment rapide [6].



D1 : diamètre de conduite. D2 : diamètre après la formation l'entartrage.

Figure N°01: Conséquence de l'entartrage [6].

I.2. Mécanisme de l'entartrage

I.3. Système calco-carbonique

La précipitation du CaCO_3 au sein d'une eau naturelle est liée à son système calco-carbonique, c'est-à-dire aux ions calcium et aux espèces carboniques présentes. Ces espèces proviennent des carbonates naturels dissous mais aussi du dioxyde de carbone atmosphérique. On doit donc considérer simultanément trois phases (gazeuse, liquide et solide) en équilibre. Si on veut décrire correctement les équilibres et les cinétiques d'évolution de ce système, il est donc essentiel de le considérer comme un système polyphasique faisant intervenir trois phases simultanément en présence :

- Une phase gazeuse contenant le dioxyde de carbone CO_2 ;
- Une phase liquide où se déroulent toutes les réactions chimiques ;

- Une phase solide constituée par le dépôt en cours de formation lorsque les eaux conduisent à l'entartrage.

L'ensemble des interactions sont représentées par Dedieu et al, [7] sur la (fig 2).

L'équilibre calco-carbonique fait intervenir le dioxyde de carbone CO₂ atmosphérique. De ces équilibres résultent les différentes espèces en solution (CO₂), H₂O, H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Ca²⁺, H⁺, OH⁻). L'existence simultanée de trois phases implique l'existence de deux interfaces (gaz-liquide et liquide-solide).

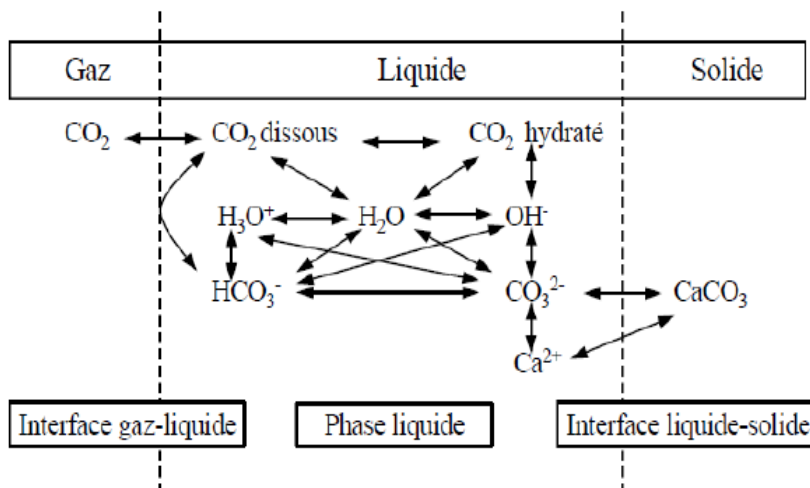


Figure N°02: Représentation schématique des échanges de matière avec les différentes interfaces et les réactions en phase liquide.

I.4. Interactions gaz-liquide :

L'interface gaz-liquide correspond à la cinétique d'échange de CO₂ entre les deux milieux. La solubilité en CO₂ dissous sous forme de gaz dans l'eau dépend de la pression et de la température régie par la loi de Henry :

$$P_{CO_2} = K_H [CO_{2(aq)}] \text{ en (mm Hg)} \tag{Eq.I.1}$$

Avec P_{CO₂} : Pression partielle du CO₂ (g) ; K_H : Constante d'Henry (qui dépend de la nature du gaz, de la température, et du liquide) ; [CO_{2(aq)}] : Concentration de dioxyde de carbone dissous en solution.

I.4.1.Phase liquide :

Le CO₂ dissous dans l'eau va s'hydrater (Eq.I.1.2) puis s'ioniser pour former HCO₃⁻ et CO₃²⁻ (Eq.I.1.3 et Eq.I.1.4) selon les réactions suivantes :





La loi d'action de masse permet de relier entre elles les activités des différents ions impliqués dans chaque réaction équilibrée selon les expressions suivantes :

$$K_1 = \frac{(\text{HCO}_3^-)(\text{H}^+)}{(\text{H}_2\text{CO}_3)} \quad (\text{Eq.I.5})$$

$$K_2 = \frac{(\text{CO}_3^{2-})(\text{H}^+)}{(\text{HCO}_3^-)} \quad (\text{Eq.I.6})$$

K_1 et K_2 sont, respectivement, les constantes d'équilibre de la 1^{ère} et 2^{ème} dissociation de l'acide carbonique. A partir de ces relations, la répartition des espèces issues du dioxyde de carbone en solution est estimée selon les équations suivantes :

$$(\text{CO}_2) \% = \frac{1}{1 + 10^{\text{pH}-K_1} + 10^{2\text{pH}-K_1-K_2}} \times 100 \quad (\text{Eq.I.7})$$

$$(\text{HCO}_3^-) \% = \frac{10^{\text{pH}-K_1}}{1 + 10^{\text{pH}-K_1} + 10^{2\text{pH}-K_1-K_2}} \times 100 \quad (\text{Eq.I.8})$$

$$(\text{CO}_3^{2-}) \% = \frac{10^{\text{pH}-K_1-K_2}}{1 + 10^{\text{pH}-K_1} + 10^{2\text{pH}-K_1-K_2}} \times 100 \quad (\text{Eq.I.9})$$

La figure (3) : présente la répartition des espèces carbonatées en fonction du pH, à 25°C.

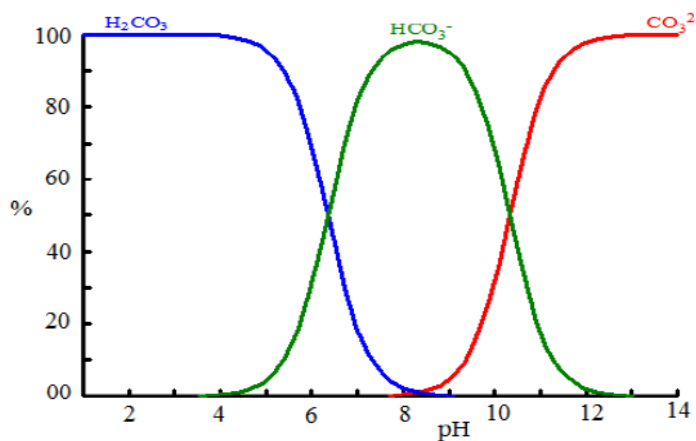


Figure N°03: Diagramme de prédominance des espèces carbonatées en fonction du pH.

La (Fig 3) montre qu'au-dessus d'un pH = 12,4, l'espèce prédominante est l'ion carbonate CO_3^{2-} . En dessous de pH = 8,3, l'ion CO_3^{2-} se trouve en quantité négligeable.

Dans les cas de milieux riches en ions étrangers, la notion de formation des complexes a été avancée [8] pour expliquer les anomalies constatées entre prédictions théoriques et observations expérimentales. Les complexes formés avec l'ion Ca^{2+} sont les plus étudiés. Le carbonate de calcium (CaCO_3) a fait l'objet de plusieurs études afin de mettre en évidence son influence sur les conditions d'équilibre [9]. Cette paire d'ions de charges opposées peut être considérée comme une entité thermodynamique, en équilibre avec les ions libres de la solution. L'équilibre étant défini par une constante thermodynamique K .



$$K = \frac{(\text{CaCO}_3)}{(\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})} \quad (\text{Eq.I.11})$$

D'autres complexes sont également signalés comme MgCO_3^+ et MgHCO_3^+ , NaHCO_3 , $\text{Na}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 , NaSO_4^- et le MgSO_4 [10].

I.4.2. Interactions liquide-solide

L'ion Ca^{2+} réagit avec les anions présents en solution (OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}) pour donner à l'interface liquide-solide l'un des trois précipités suivants : $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{HCO}_2)_2$, CaCO_3 .

I.4.3.. Sursaturation

Du point de vue thermodynamique, la précipitation de carbonate de calcium ne peut avoir lieu que si un degré de saturation de la solution est atteint. Une eau est dite en équilibre calco-carbonique quand les concentrations des espèces Ca^{2+} et CO_3^{2-} respectent l'équilibre suivant :



Cet équilibre est régi par la loi d'action de masse, qui établit la relation entre le produit de solubilité K_s et les concentrations des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} .

$$K_s = [\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] \quad (\text{Eq.I.13})$$

Le produit de solubilité K_s dépend de la température et de la force ionique de la solution. Elle dépend aussi de la variété cristallographique du CaCO_3 . A température ambiante, le produit de solubilité du carbonate de calcium dans l'eau vaut $K_s = 10^{-8,3}$ [11]. Si l'eau n'est pas en équilibre thermodynamique avec le carbonate de calcium, on définit un coefficient de sursaturation δ par :

$$\delta \times K_s = [\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] \quad (\text{E.I.14})$$

Selon les valeurs de δ , on peut déterminer la nature de l'eau et la probabilité de précipitation du CaCO_3 . Trois cas de figure peuvent être identifiés.

- $\delta < 1$: l'eau est dite « agressive », elle peut dissoudre le carbonate de calcium.
- $\delta = 1$: équilibre calco-carbonique, c'est un système stable.
- $1 < \delta < 40$: l'eau est sursaturée et dite « calcifiante », possibilité de précipitation hétérogène de carbonate de calcium.
- $\delta > 40$, l'eau est dite calcifiante sursaturée, la précipitation homogène et spontanée de carbonate de calcium est observée.

Le coefficient de sursaturation δ est un paramètre important, il conditionne tout le processus de cristallisation [12]. On peut donc qualifier les eaux selon le schéma récapitulatif comme le montre la (fig 4).

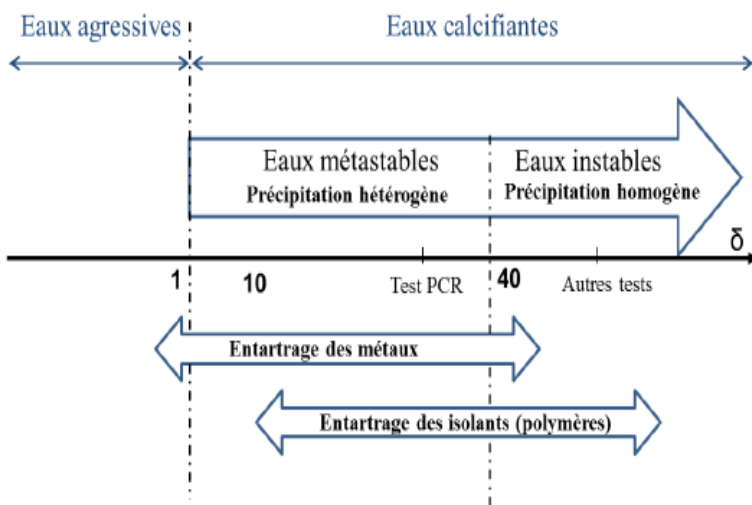


Figure N°04: Nature des eaux en fonction de δ et domaine thermodynamiques des entartrages.

I.4.4. Cristallisation du carbonate de calcium :

Le processus de cristallisation du carbonate de calcium se déroule en deux étapes : germination puis croissance cristalline [13].

I.4.5. La germination est un processus selon lequel les ions ou les molécules libres en solution se regroupe et s'organisent, et formant ce qu'il est convenu d'appeler un germe. La germination peut se dérouler selon deux processus différents: homogène si les germes se développent au sein de la solution ou hétérogène si les germes se forment sur un support.

I.4.6. La croissance cristalline est le développement des germes sur-critiques qui aboutit à des cristaux. Elle intervient en fin de processus, au niveau des échanges de matière à l'interface liquide/solide, après l'étape de germination [14].

I.4.7. Facteurs influençant l'entartrage :

Le transport d'une eau incrustante peut provoquer un entartrage des conduites de canalisation. La formation des dépôts de tartre a des répercussions sur la qualité de l'eau et sur son écoulement par la réduction de la section utile de la conduite. Plusieurs facteurs peuvent favoriser le phénomène d'entartrage : la dureté de l'eau, la température de l'eau, la présence des éléments favorisant dans l'eau et l'influence de la nature du matériau [15].

Ces différents facteurs vont être discutés en détail dans cette partie.

I.4.8. Dureté de l'eau

La présence de sels de calcium et de magnésium dans l'eau est le premier facteur qui contribue au caractère entartrant de l'eau. La dureté de l'eau, ou le titre hydrotimétrique (TH), est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. La dureté de l'eau varie selon la composition des roches du sol et du sous-sol traversés. Une eau de minéralisation moyenne ou élevée sera très souvent riche en ions Ca^{2+} ou Mg^{2+} . Les anions accompagnant les alcalino-terreux sont généralement les ions hydrogencarbonates HCO_3^- et les ions sulfates SO_4^{2-} . Le TH est mesuré en degré français ($^\circ\text{F}$), 1 degré français équivaut à 4 mg.L^{-1} de Ca^{2+} ou 10 mg.L^{-1} de CaCO_3 . Il est donné par la relation suivante :

$$\text{TH} = 10 ([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]) \quad (\text{Eq.I.15})$$

Le **tableau N°01** donne la qualité de l'eau en fonction de la valeur du TH.

Tableau N°01: Plage des valeurs du titre hydrotimétrique.

TH ($^\circ\text{F}$)	0 à 7	7 à 15	15 à 30	30 à 40	Plus que 40
Eau	Très douce	Douce	Plutôt dure	Dure	Très dure

Ainsi, plus la dureté de l'eau est élevée, plus la probabilité de précipitation du carbonate de calcium CaCO_3 sur les parois en contact avec l'eau est grande. Cependant la présence de sels de calcium dans l'eau n'est pas à elle seule suffisante pour provoquer l'entartrage. Plusieurs autres paramètres peuvent aider à déclencher le phénomène d'entartrage.

I.4.9. Température de l'eau:

La précipitation du carbonate de calcium est largement favorisée par l'élévation de la température qui accélère la formation du tartre solide. Les circuits d'eau chaude sanitaire représentent un terrain favorable à l'entartrage. On peut noter que les circuits de chauffage s'entartrent très peu malgré la température puisqu'il n'y a pas de renouvellement d'eau.

Lorsque la température dépasse 60 °C, le tartre affecte particulièrement les canalisations où circule de l'eau chaude [16]. Des essais effectués à différentes températures (25, 40 et 60°C) ont montré que la vitesse d'entartrage augmente fortement avec la température [17].

I.4.10. Présence des éléments minéraux dans l'eau :

La qualité physico-chimique de l'eau a une influence considérable sur la durée de vie des ouvrages et les équipements hydrauliques [18]. Le phénomène tient à la présence dans l'eau d'ions ou de composés en quantité infinitésimale susceptibles de déclencher le phénomène d'entartrage. La nature chimique des tartres varie en fonction des roches préalablement traversées par l'eau. En général, les dépôts de tartre les plus fréquemment rencontrés dans les installations sont les sels de calcium (CaCO_3 , CaSO_4), les sels de magnésium (MgCO_3 , Mg(OH)_2) et les silices et silicates (SiO_2 , CaSiO_3 , MgSiO_3) [19].

D'autres matières telles que les oxydes de fer, les matières en suspension, les matières organiques, les éléments métalliques à l'état de trace sont souvent renfermés dans ces dépôts de tartre. En revanche, la présence dans l'eau d'ions cuivre ou d'ions zinc freine le dépôt de tartre qui reste en suspension dans l'eau. Les quantités nécessaires sont très faibles, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de microgrammes par litre [20].

I.5. Influence de la nature du matériau:

La nature et l'état de surface du matériau en contact avec l'eau influent sur la cinétique d'entartrage. L'eau, selon son utilisation, circule dans des conduites de matières et de diamètres différents. Avec des canalisations en inox ou en polyéthylène réticulé (PER), il y a toujours amorçage de l'entartrage comme le montre la (**fig. 5**).

Les tuyauteries acier et acier galvanisé peuvent s'entartrer et se corroder. L'effet de l'inhibiteur d'entartrage varie selon le matériau. En revanche, avec des tuyauteries en cuivre (**Fig. 6**), dans le cas d'eaux moyennement ou peu entartrantes, le développement naturel du processus d'entartrage est bloqué. Cependant, si l'eau est très entartrante, le tartre peut se déposer sur la surface de cuivre. La nature de la surface du matériau peut donc avoir un effet inhibiteur.



Figure N°05: Comparaison des vitesses d'entartrage entre les différents types de matériaux constituant des canalisations [21].

Écoulement de l'eau chauffée à 52°C dans des échantillons de tubes démontables. On réalise la mesure de l'entartrage par l'augmentation de poids des échantillons de tubes au cours du temps. Ces mesures quantitatives d'apparition du tartre ont été faites dans ces conditions sur trois matériaux : le cuivre, le PER et l'inox [22].

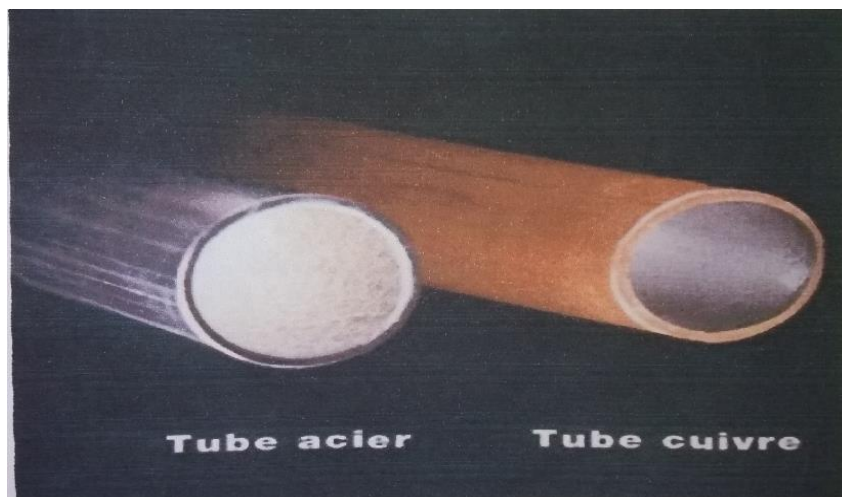


Figure N°06 : Entartrage comparatif, après 30 jours d'écoulement d'une même quantité d'eau, à 55°C [22].

I.5.1. Causes, Conséquences de L'Entartrage :**I.5.2. Les Causes :**

Pour qu'il y ait dépôt entartrant, deux conditions doivent réunies :

- 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 [23].

I.5.3. Les Conséquences :

L'entartrage est un phénomène fréquent et inévitable. Il touche plusieurs secteurs, à savoir les circuits de distribution d'eau potable, l'agriculture et l'industrie. Ses conséquences sont énormes du point de vue de l'efficacité :

- Hydrauliques
- Technologiques
- Bactériologiques
- Énergétiques et thermique.

I.5.3.1. Conséquences hydrauliques :

L'accumulation d'une épaisseur de tartre dans les équipements conduit à une diminution des sections de passage. Cela occasionnera une augmentation de la résistance hydraulique des réseaux ce qui conduira dans tous les cas à une augmentation de la dépense énergétique des pompes dans le cas de réseaux fermés ou surpressés et :

- Si la hauteur manométrique des pompes ou la charge disponible restent constantes, à une diminution du débit ;
- Si le débit est maintenu constant à une augmentation de la perte de charge, une vitesse accrue et donc un niveau sonore plus élevé

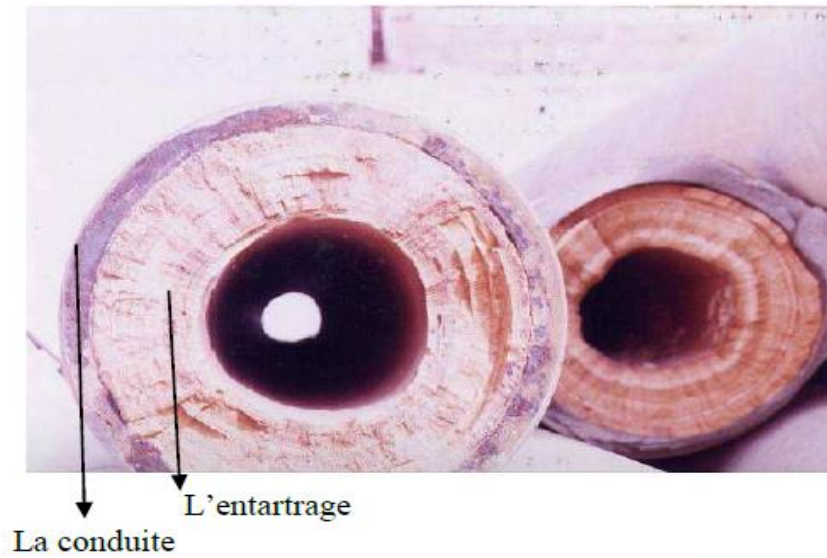


Figure N°07: Impact de l'entartrage sur les conduites de l'eau potable [24].

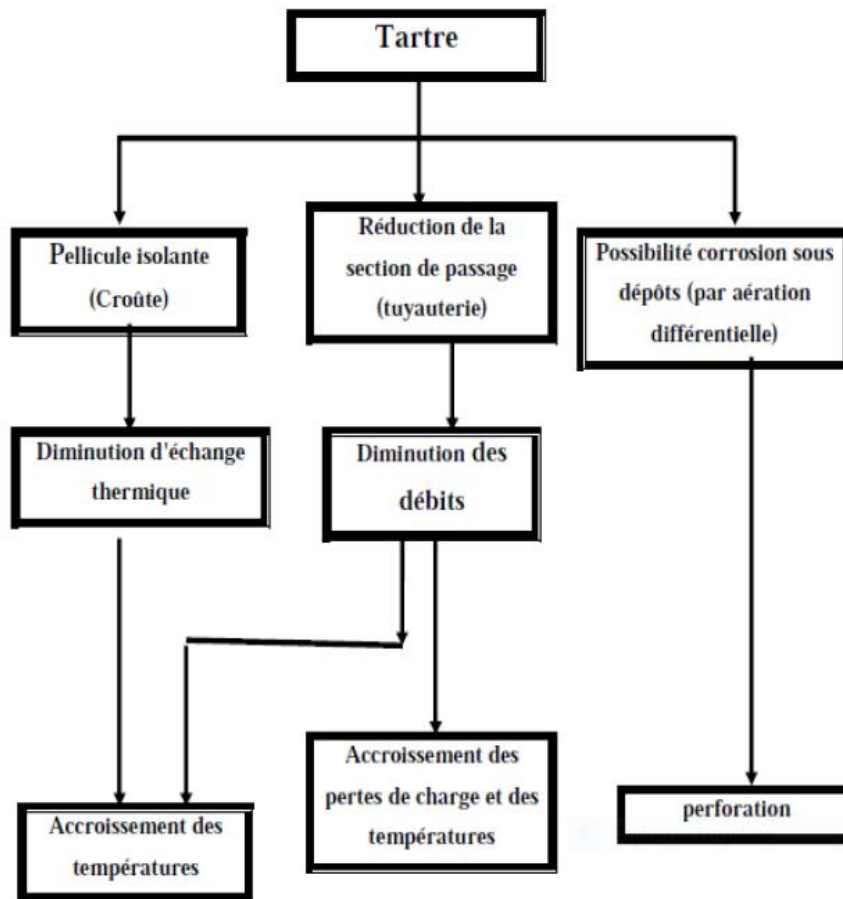


Diagramme N°01: conséquences du tartre sur l'installation hydraulique [24].

I.5.3.2. Conséquences bactériologiques :

Il a été montré que les réservoirs et les réseaux et les points de puisage (robinets, pommes de douche) des réseaux d'eaux chaude sanitaire pouvaient, s'ils étaient entartrés, être favorables à "l'accueil" et à la prolifération de *Legionella*.

En particulier les pommes de douche entartrées ont une section de passage plus faible ; l'eau a pour le même débit une vitesse de sortie plus élevée : la production d'aérosols est augmentée et donc le risque d'inhalation est augmenté. Ceci conduit à des opérations régulières de détartrage nécessaires avant toute désinfection.

I.5.3.3. Conséquences Technologiques:

On peut citer l'alourdissement des structures porteuses des tours de refroidissement, réservoirs,...

Mais aussi l'alourdissement des équipements internes qui rendent plus difficile leur manutention : Les épaisseurs de tartre peuvent même amener à ne plus pouvoir sortir les épaisseurs de production d'eau chaude sanitaire.

L'entartrage peut aussi avoir pour conséquences organes :

- Le blocage des organes de manœuvre des robinetteries,
- Le blocage des soupapes de sécurité,
- La diminution du volume utile des réservoirs,
- Des dégradations des états de surface des appareils sanitaires,...

De plus l'amorce de corrosion sous dépôt est possible.

I.6. Conséquences Énergétiques et thermiques :

Les tartres ont des conductivités thermiques très faibles en regard des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs : acier ou cuivre [22].

Les matériaux ne sont pas tous sensibles à l'entartrage de la même façon.

Pour qu'un entartrage puisse se produire il faut :

- Une précipitation de sels minéraux.
- Un accrochage des sels aux parois.

Ces raisons et les résultats jouent un rôle important dans la survenue d'un autre phénomène qui est en cours obstructive, où plus le taux de dépôt ne diminue avec le diamètre du tuyau jusqu'à ce que nous entrions dans la dernière embolie ($d = 0$) [25].

I.7. Paramètres analytiques de l'eau.

Outre les paramètres physiques tels que la température, le pH et la conductivité, l'eau est caractérisée par sa dureté, dite titre hydrotimétrique (TH), qui mesure la teneur en Ca^{2+} (en fait Ca^{2+} et Mg^{2+} si l'eau contient également du magnésium). Elle s'exprime en degré français ($^{\circ}\text{F}$). Un degré français correspond à 10 mg de CaCO_3 potentiellement dissous (ou à 4 mg de Ca^{2+}) par litre.

Si $\text{TH} < 15$ $^{\circ}\text{F}$, l'eau est dite "douce" ou de faible dureté.

Si $15 < \text{TH} < 25$ $^{\circ}\text{F}$, l'eau est de dureté moyenne.

Si $\text{TH} > 25$ $^{\circ}\text{F}$, l'eau est dite dure.

L'eau est également caractérisée par les paramètres suivants :

- titre alcalimétrique complet : $\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$
- titre alcalimétrique : $\text{TA} = 0.5 \cdot [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-]$,
- titre acidimétrique simple = $[\text{H}^+]$,
- titre acidimétrique complet = $[\text{H}^+] + [\text{CO}_2\text{libre}]$ [26].

I.7.1. Principaux Paramètre de Tartre Rencontrés en Dessalement:

- Les dépôts de tartre que l'on rencontre le plus fréquemment sont:
- Le carbonate de calcium CaCO_3 (calcite, aragonite).
- Le sulfate de calcium (anhydrite, hémi-hydrate, gypse).
- L'ortho phosphate $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.
- L'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$.
- Des silicates de calcium dont CaSiO_3 .
- Des silicates de magnésium dont MgSiO_3 .
- Le silico-aluminate de sodium (analcite).
- La silice SiO_2 .

✓ Cas de Carbonate de Calcium:

C'est le premier sel qui risque de se précipiter par l'influence de:

- L'élévation de la température.

- L'élimination de CO_2 .
- Concentration des sels dissous.

✓ **Cas de Sulfate de Carbone:**

La solubilité décroît quand la température augmente. Le tartre sulfaté dure et adhèrent.

Une fois formé, le sulfate de calcium ne se redissent que très lentement.

✓ **L'ortho Phosphates $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$:**

Dont le tartre poudreux et peut adhèrent à l'état pur, peut syncristalliser avec du carbonate de calcium en constituant un tartre dur.

✓ **Cas de Silice :**

La silice se trouve dans les eaux sous plusieurs formes SiO_2 ionisée, SiO_2 colloïdale, silico-aluminate de calcium ou de magnésium (argile).

La solubilité de silice dépend du pH et de la température, le tartre silicate est durs fortement adhèrent et isolants.

Formant un tartre très difficile à pulvériser, il n'est pas soluble dans l'acide chlorhydrique et est généralement très coloré (22].

I.7.2. Solutions ou moyens de Lutte contre l'entartrage:

Les procédés de prévention de la formation du tartre peuvent être classés en deux catégories :

- Les procédés physiques.
- Les procédés chimiques.

I.7.3. Traitements physiques

Les procédés physiques ont l'avantage de ne pas modifier ni la composition chimique de l'eau, ni ses propriétés physico-chimiques (pH, résistivité, dureté...), ni ses critères de potabilité et n'ont aucune influence sur l'environnement. Ils sont peu consommateurs d'énergie, demandent peu d'entretien et sont généralement peu onéreux en fonctionnement.

Cependant leur principe d'action est encore insuffisamment connu et cela limite leur développement. Ils sont de plusieurs types [27]. On peut citer:

- Les procédés électromagnétiques : la génération d'ondes électromagnétiques de moyenne fréquence (qq kHz) envoyées dans des antennes de bobines autour des canalisations,

Les procédés magnétiques : l'eau à traiter passe avec un mouvement hélicoïdale à travers une série d'aimants permanents disposés d'une manière adéquate.

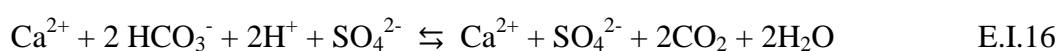
- Les procédés qui agissent par microélectrolyse de l'eau : l'eau à traiter passe à travers une cuve en acier inoxydable fonctionnant en cathode et traversée par une anode en titane. On applique aux bornes de cette cellule d'électrolyse une tension électrique.
- Les procédés ultrasoniques : L'étude fondamentale de tous ces procédés a suscité depuis 1940 des périodes successives d'engouement et de désaffection. Les bases scientifiques de leurs principes de fonctionnement ne sont pas totalement éclaircies et aucune théorie satisfaisante les concernant n'est disponible. L'inconsistance des notices commerciales concernant ce type de matériels leur confère une réputation ambiguë.

I.7.4. Traitements chimiques :

Les procédés chimiques sont très couramment employés. La précipitation de carbonate de calcium peut être empêchée de quatre manières: vaccination acide, décarbonatation à la chaux, séquestration et adoucissement [28].

I.7.5. Vaccination acide

Elle consiste simplement à transformer l'anion hydrogénocarbonate en dioxyde de carbone. On ajoute à l'eau que l'on veut traiter un acide fort (le plus souvent l'acide sulfurique). L'ajout de l'acide permet de déplacer l'équilibre $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_2$ vers la formation du dioxyde de carbone selon :



Le dioxyde de carbone produit s'échappe spontanément dans l'atmosphère, ce qui a pour conséquence de limiter la formation du carbonate de calcium.

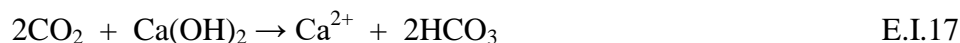
Le sulfate de calcium a une solubilité plus élevée que le carbonate de calcium (2g.L^{-1}) à la température ordinaire et il y a peu de risque de précipiter ce sel au cours du traitement. Ce traitement prévient la formation du dépôt de carbonate de calcium mais augmente la salinité.

En micro-irrigation, cette méthode consiste à injecter des solutions acides (acide nitrique) du commerce à une concentration de 0.2 à 0.5% en volume [29]. Ce traitement est efficace dans le cas du colmatage partiel. En cas d'obstruction totale, le traitement nécessite l'utilisation des solutions plus concentrées ou encore le changement complet des tuyaux ce qui impose l'arrêt de l'opération d'irrigation.

I.7.6. Décarbonatation à la chaux

Pour des raisons économiques et de commodité la chaux est le réactif alcalin le plus utilisé pour introduire des ions OH^- . Son addition provoque les réactions suivantes :

- Neutralisation de CO_2 agressif (vis avis du calcaire) selon la réaction :



- Précipitation du carbonate de calcium selon:



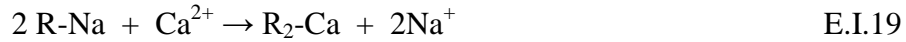
I.7.7. Séquestration :

Certaines molécules (ions) ayant des propriétés complexantes (séquestrantes) jouent un rôle dans la prévention de l'entartrage. Elles conduisent en présence du calcium à des complexes très stables du fait de l'effet chélate, empêchant ainsi la précipitation du carbonate de calcium.

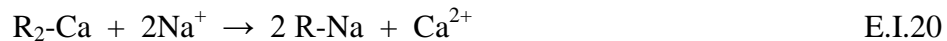
La famille des acides polyaminocarboxyliques fournit actuellement la quasi-totalité des complexants utilisés industriellement. Parmi eux, les plus connus sont : l'acide éthylènediaminetétracétique (EDTA) et l'acide nitrilotriacétique (NTA). Cependant, ce type de traitement ne peut être mis en œuvre que rarement pour des raisons économiques du fait des quantités importantes nécessaires à la complexation des ions Ca^{2+} et des problèmes liés à la toxicité de ces complexants pour l'environnement.

I.7.8. Adoucissement

C'est un procédé de traitement destiné à éliminer la dureté de l'eau par échange d'ions. L'eau dure passe sur un lit de résine cationique, préalablement chargée d'ions sodium (Na^+), qui échange les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), responsables de la dureté de l'eau, contre des ions sodium (Na^+) :



Lorsque la résine est saturée d'ions calcium et magnésium (substitués aux ions sodium) la régénération de celle-ci se déclenche et se déroule automatiquement selon un processus d'échange ionique à rebours :



La régénération de la résine saturée s'effectue avec du chlorure de sodium (NaCl) équivalent au sel de table mais présenté sous forme de pastilles.

Les ions sodium se fixent à nouveau sur la résine tandis que les ions calcium et magnésium sont évacués à l'égout sous forme de chlorure de calcium et de magnésium.

Le cycle se reproduit périodiquement en fonction d'intervalles de durées préétablies ou du volume d'eau que l'adoucisseur peut traiter.

Si l'on admet l'apparition des cristaux de carbonate de calcium comme fatal, les conséquences peuvent être minimisées par l'utilisation des inhibiteurs d'entartrage.

Les deux (fig 8) et (9) explique les échanges des ions dans l'état dure vers l'état douce.

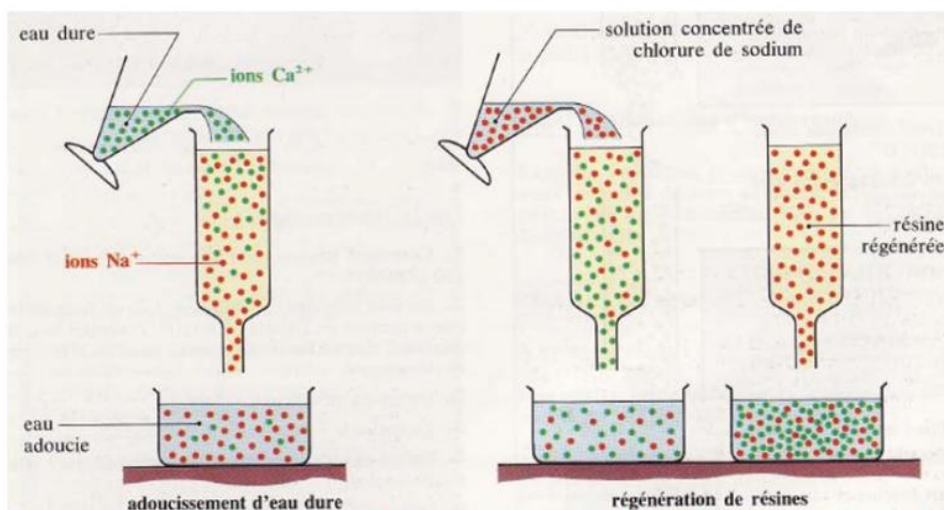


Figure N°08 : opération de d'adoucissement de l'eau

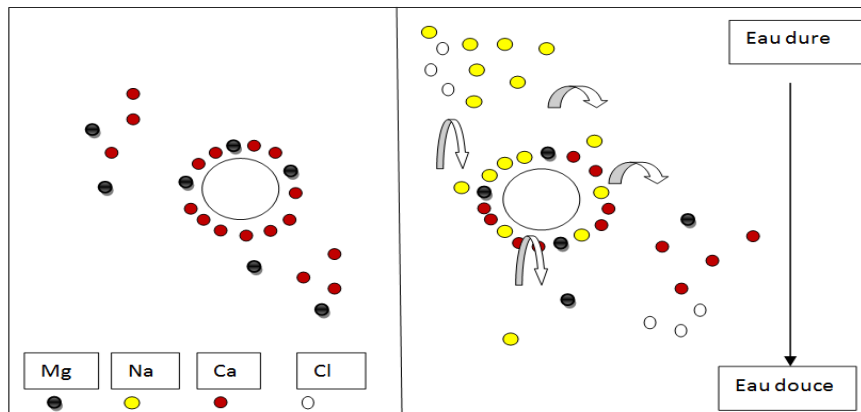


Figure N°09 : les échanges des ions de l'eau dure dans l'eau douce

I.7.9. L'inhibition chimique de la formation du tartre :

L'inhibition chimique est la procédure la plus utilisée pour prévenir la formation du tartre, elle est facile à manipuler et nécessite peu d'investissement. Son efficacité dépend des conditions opératoires, de la nature de l'inhibiteur et de sa concentration.

Les inhibiteurs utilisés sont :

- Deux organo-phosphates : l'acide 1-hydroxyéthane (1,1-diphosphonique) (HEDP) et l'acide nitrilotris (méthylène phosphonique) (NTMP). Ils présentent une faible biodégradabilité.
- Le tripolyphosphate de sodium $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (TPP). Le TPP est produit tunisien fabriqué par la société ALKIMIA. Son inconvénient majeur est qu'il participe à l'eutrophisation des lacs.

D'autres inhibiteurs (Flocon 260, RPI 3000 et Permatreat 191, POA), utilisés dans les stations de dessalement [30].

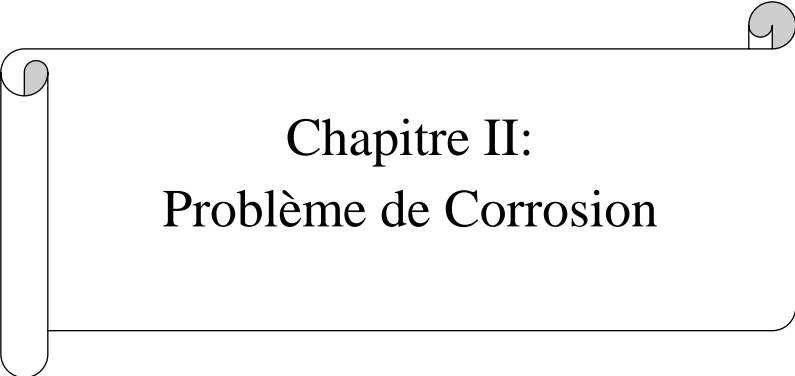
I.7.10. Conclusion :

L'entartrage est un phénomène complexe, il est caractérisé par la formation de dépôts adhérents sur les parois en contact avec les eaux dures. Ces dépôts de tartre sont constitués essentiellement de carbonate de calcium.

L'entartrage des canalisations et des ouvrages domestiques ou industriels ont de graves conséquences techniques et économiques: bouchage des canalisations, diminution du coefficient de transfert thermique lors de la formation du précipité dans les échangeurs de chaleur, réduction du diamètre des conduites d'eau.

En raison, de ses conséquences techniques et économiques désastreuses, l'entartrage a suscité de nombreuses recherches visant à réduire ses effets néfastes par différents procédés comme :

- La Décarbonatation à la chaud ;
- Adoucissement;
- L'utilisation des Inhibiteurs d'Entartrage.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow, containing the chapter title. The scroll is oriented horizontally and has a slight curve at the top and bottom edges.

**Chapitre II:
Problème de Corrosion**

Introduction

La corrosion touche entre le quart et la moitié des canalisations, en particulier les anciennes canalisations en fonte grise et en acier non revêtues/ acier dont le revêtement a été endommager [31].

La corrosion résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages. Les conséquences sont importantes dans divers domaines et en particulier dans l'industrie : arrêt de production, remplacement des pièces corrodées, accidents et risques de pollutions sont des événements fréquents avec parfois de lourdes incidences économiques [32]. Dans les réseaux de distribution d'eau potable, parmi les matériaux qui pourraient être affectés par la corrosion et relarguer des concentrations croissantes de contaminants, on retrouve les tuyaux et les raccords métalliques, le revêtement intérieur en ciment des conduites et les tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC). La corrosion des réseaux de distribution d'eau potable peut être causée par plusieurs facteurs, dont le type de matériau utilisé, l'âge des conduites et des raccords, la durée de stagnation de l'eau et la qualité de l'eau dans le réseau, y compris son pH. Les propriétés ayant le plus d'importance en ce qui concerne la corrosion des matériaux et le relargage de contaminants dans les réseaux de distribution sont le pH et l'alcalinité. La température et les teneurs en calcium, en chlore libre résiduel, en chloramines, en chlorure, en sulfate ou en matière organique naturelle (MON) constituent d'autres paramètres d'intérêt pour la qualité de l'eau potable. Toute modification du procédé de traitement de l'eau potable peut avoir un impact sur la corrosion dans le réseau de distribution et les systèmes de plomberie résidentiels [33].

II.1. Définition de la corrosion

La corrosion est définie comme une « interaction physico chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie ». Pour qu'il y ait corrosion, il faut que deux zones de la structure métallique soient en contact électrique et qu'elles aient un rôle différent, l'une anodique et l'autre cathodique ; on notera que ces zones peuvent parfois se superposer [34].

II.2. Corrosion interne

Liée à la qualité de l'eau et à ses différentes caractéristiques la corrosion interne peut provenir:

- ✓ du pH, du taux d'oxygène dissous, de l'écart par rapport à l'équilibre calco-carbonique;
- ✓ de l'oxydation d'ions ferreux en ions ferriques principalement avec une eau douce, acide ou désaérée. Ce phénomène, qui génère une eau rouge et des dépôts, est fréquemment constaté sur les conduites en fonte grise et en acier non revêtues. Une coloration noire de l'eau est liée à la présence de manganèse;
- ✓ du développement d'un biofilm bactérien sur les parois affectant inévitablement tous les types de conduites.

Des risques de contamination sont à craindre lorsque le biofilm se développe ou lorsqu'une plus forte consommation de chlore est enregistrée.

Ces phénomènes de corrosion interne peuvent entraîner une diminution du diamètre intérieur de la paroi liée à l'existence de dépôts et une fragilisation de la structure interne de la canalisation.



Figure N°10 : Corrosion de l'intérieur (attaques mixtes groupées, autant sur la partie supérieure, qu'inférieure)

II.3. Corrosion externe

La corrosion externe correspond à un échange d'ions entre le sol et la paroi de la conduite, avec des origines diverses telles que :

- ✓ l'hétérogénéité du sol : plus la texture du sol est fine, plus il retient l'eau et plus la corrosion est importante. Une porosité élevée du sol est susceptible d'engendrer des échanges électrochimiques avec les conduites métalliques. La corrosivité du sol est définie ci-dessous;
- ✓ l'hétérogénéité de surface : lors de mauvaises conditions de pose des canalisations, une partie de la pellicule superficielle d'oxyde peut être enlevée, entraînant une discontinuité et la création d'un phénomène de pile électrique;
- ✓ l'hétérogénéité de contact : la présence de différents métaux, soit au niveau des raccordements de canalisation, soit au niveau des colliers et des vannes des branchements peut aussi générer des phénomènes de pile électrique.
- ✓ les courants « vagabonds » du sol, générés par la proximité d'installations électriques en courant continu¹, augmentent les risques de corrosion des canalisations métalliques qui sont d'excellents conducteurs. En l'absence de protection, le phénomène de corrosion externe est accéléré.



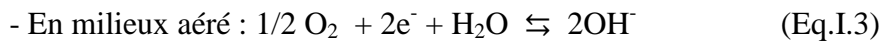
Figure N°11: Conduite de diamètre 80 mm ayant subi une corrosion externe localisée (courants vagabonds, hétérogénéité du sol, ...) [31].

II.4. La réaction de la corrosion

Le processus de corrosion est lié à deux demi-réactions d'oxydo-réduction. Une demi-réaction d'oxydation anodique pour laquelle le métal perd un ou plusieurs électrons avec formation d'ions positifs. Dans le cas de l'oxydation du fer, on a la réaction :



Elle est associée à une demi-réaction de réduction cathodique :



La vitesse de ces deux réactions dépend de la nature du métal et de la composition du milieu.

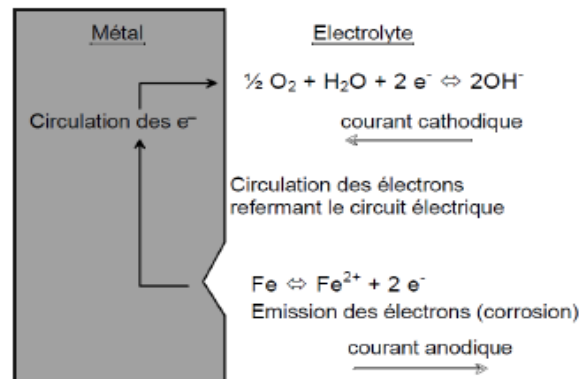


Figure N°12 : Processus de corrosion du fer.

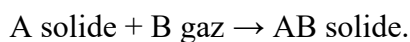
II.4.1. Types de corrosion

Le processus de corrosion consiste en une réaction hétérogène chimique ou électrochimique qui se produit à la surface de séparation matériau métallique – milieu ambiant. La corrosion est donc un mode de dégradation progressant à partir de la surface du matériau.

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion [35]:

II.4.2. La corrosion chimique

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action des gazeux (d' O_2 , H_2 et CO_2). Lorsque le réactif est gazeux ou cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée : Corrosion sèche ou corrosion à haute température [36].



II.4.3. Corrosion électrochimique

C'est la corrosion où les zones qui constituent les anodes sont attaquées, lorsqu'il existe un courant électrique circule entre anode et cathode. Ce type de corrosion peut être causé par l'hétérogénéité soit dans le métal, soit dans le réactif. L'existence de l'hétérogénéité détermine la formation d'une pile électrique. Les métaux ne sont en générale pas monophasés. Lorsqu'ils sont plongés dans un réactif, ils sont donc le plus souvent le siège d'une corrosion électrochimique [35,37].

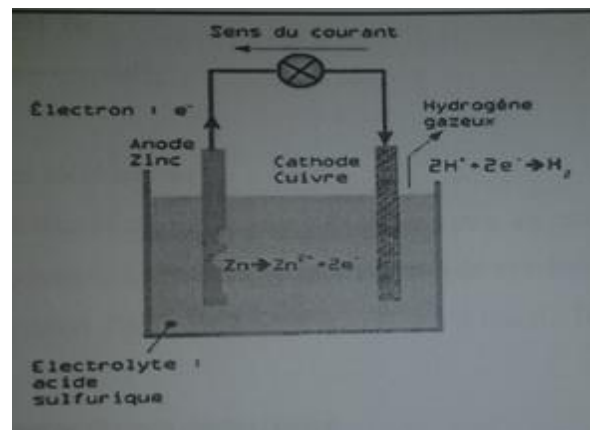


Figure N°13: Exemple de corrosion électrochimique [35]

II.4.4. La Bio-corrosion

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement (ex : production de H_2SO_4 par certains types de bactéries) [38].

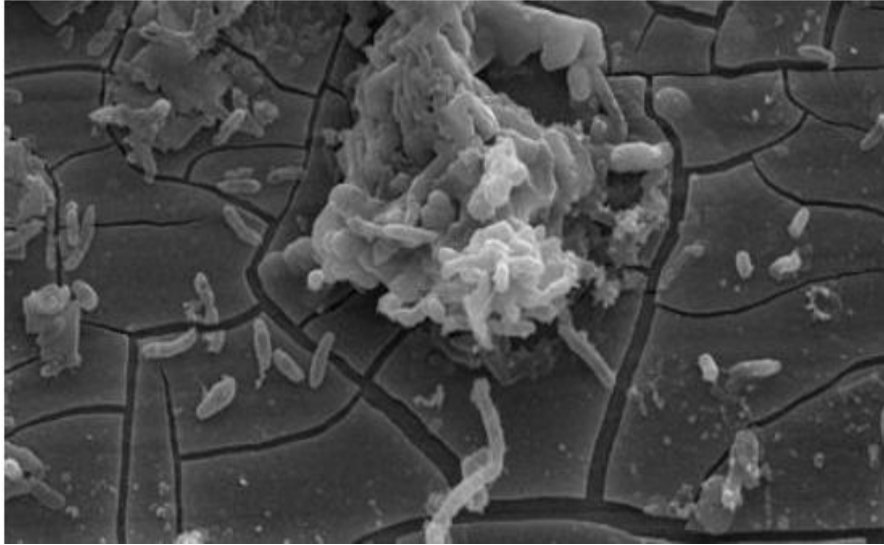


Figure N°14: Colonie de *Desulfovibrio vulgaris* sur acier inoxydable [38].

II.4.5. Les différentes formes de corrosion

La classification de la corrosion suit l'apparence du métal corrodé. Chaque forme peut être identifiée par simple observation visuelle quelque fois l'amplification est nécessaire.

Les formes les plus courantes de la corrosion sont indiquées ci-après [39].

II.5. La corrosion généralisée ou Uniforme

C'est la forme de corrosion la plus commune. On observe une attaque régulière du métal sur toute sa surface. La vitesse de corrosion est exprimée en perte d'épaisseur (mm/an ou μm ou en perte de masse ($\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{jour}^{-1}$). La vitesse de la corrosion n'est pas linéaire, elle diminue en général dans le temps [40].

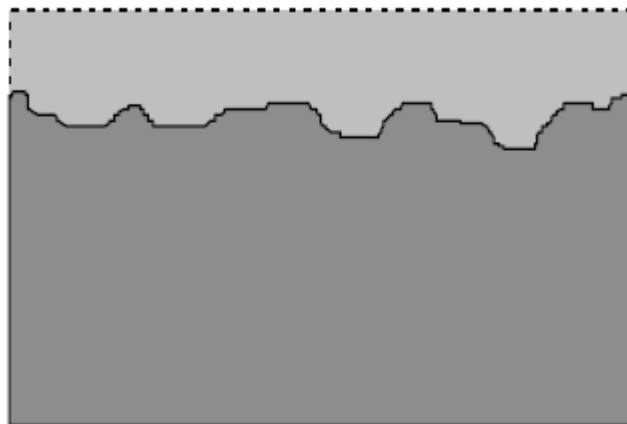


Figure N°15: La corrosion généralisée

II.5.1. La corrosion localisée

La corrosion localisée est la forme la plus insidieuse. Elle survient sur une partie du métal qui représente un lieu spécifiquement anodique, clairement distingué, dont la surface est très faible devant le reste de la structure métallique qui constitue la zone cathodique (Fig 16). En effet, pour une perte de poids minimale, ce type de corrosion peut être catastrophique [41].

La corrosion localisée est définie comme étant une attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques [42]. On distingue plusieurs types de corrosion localisée :

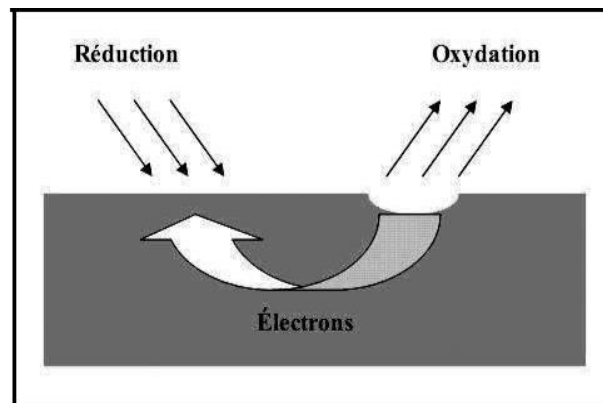


Figure N°16: corrosion localisée d'un métal

II.5.2. La corrosion par piqûres

C'est une forme de corrosion localisée produite par certains anions, notamment les halogènes et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre [43].



Figure N°17: Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable

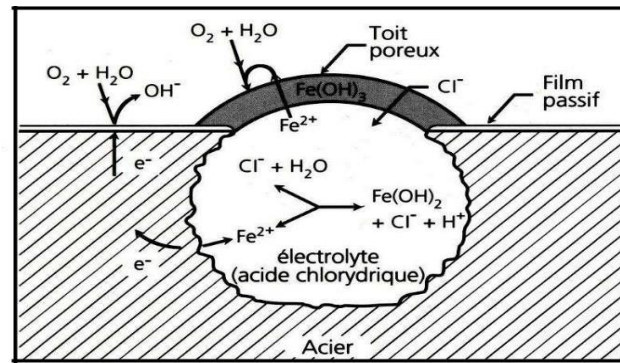


Figure N°18 : Représentation schématique de la piqûre de l'acier.

II.5.3. La corrosion inter-granulaire

C'est une forme de corrosion localisée s'attaquant aux joints de grains, rendant la Structure mécaniquement fragile.

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipitées lors d'un traitement thermique.

C'est un type de corrosion particulièrement dangereux car, bien que la quantité de métal attaque soit faible, les caractéristiques mécaniques du métal sont altérées car les fissures ainsi produites affaiblissent le métal. Par exemple ; l'acier inoxydable austénitique sensibilisées à chaud par précipitation du carbure de chrome aux joints des grains [44].

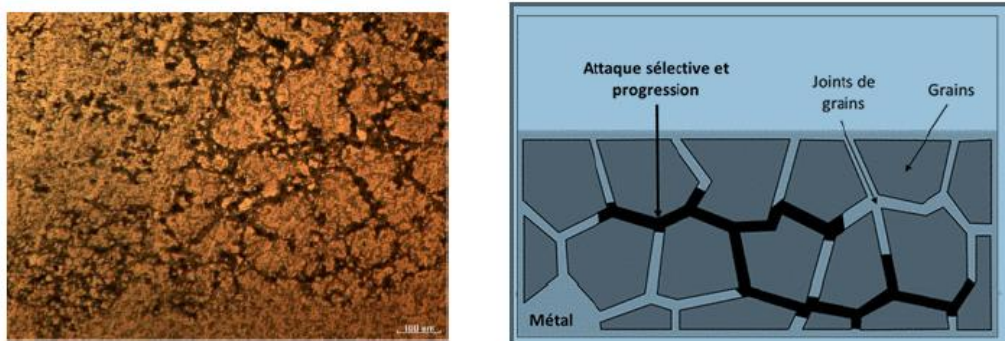


Figure N°19: Corrosion inter-granulaire [44]

II.5.3.1. La corrosion par crevasse

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène (Fig 20). [45]

Le processus de développement de la corrosion par crevasse (caverneuse) n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend sur la largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres. La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer [46].



Figure N°20: La corrosion par crevasse [45].

II.5.3.2. La corrosion par érosion

Est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide (Fig 21) [47].

La corrosion par érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...), elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière, elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide.

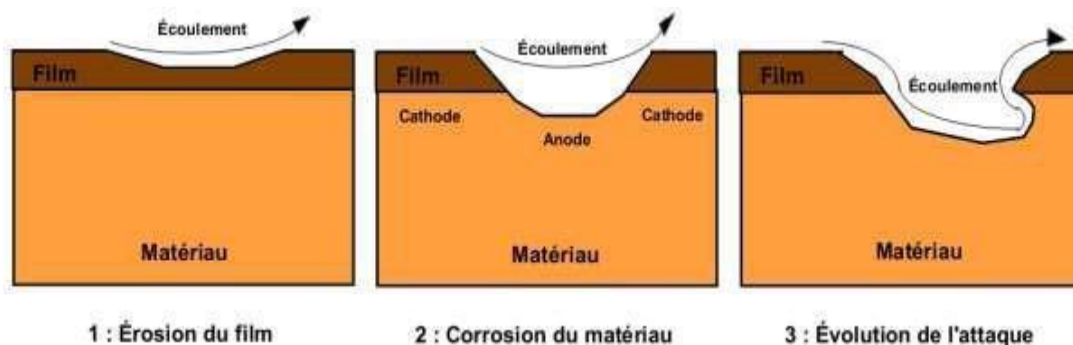


Figure N°21: La corrosion par érosion

II.5.3.3. Corrosion galvanique

C'est, en générale, lorsque deux métaux différents sont en contact ou reliés électriquement dans un milieu corrosif aqueux. La corrosion s'établit sur le métal le moins noble et s'arrête sur le métal le plus noble. Les sites anodiques et cathodiques sont distincts.

Mais elle se manifeste aussi lorsque les deux parties d'un objet métallique d'un même métal ne sont plus au même potentiel à cause d'une hétérogénéité ou à cause d'un âge différent [48].

L'attaque peut être considérée comme localisée à un endroit précis, mais la forme de l'usure est généralisée (Fig 22) [49].

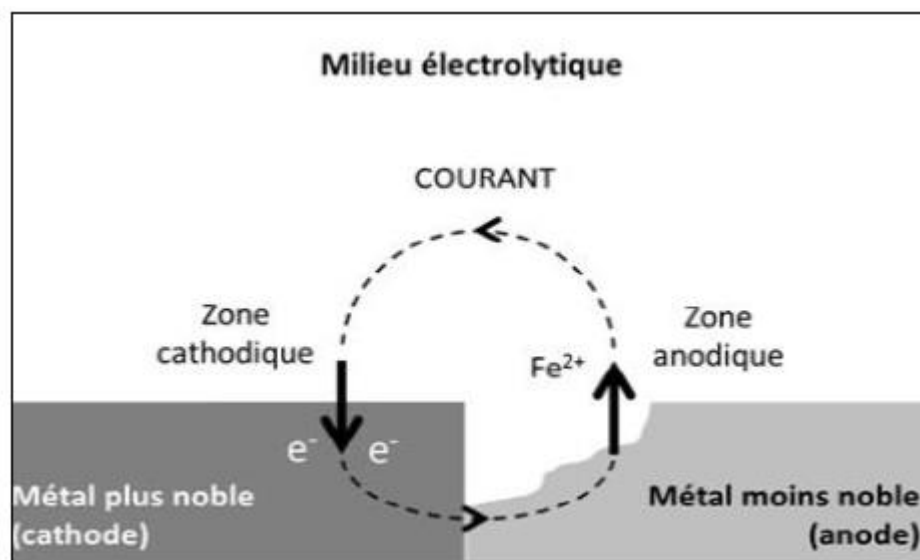


Figure N°22: Corrosion galvanique [48]

II.6. Facteurs de la corrosion

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux (tableau N°02) [50].

Tableau N°02 : Les principaux facteurs de corrosions.

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emplois	Facteurs dépendant du temps
- Concentration du réactif - Teneur en oxygène - pH du milieu - Température - Pression	- Composition de l'alliage - Procédé d'élaboration - impureté - Traitement thermique - Traitement mécanique	- Etat de surface - Formation des pièces - Emploi d'inhibiteurs - Procédé d'assemblage	- Vieillessement - Tension mécanique - Modification des revêtements protecteurs

II.7. Les principales causes de la corrosion

- La présence d'oxygène « non évacué » favorise la formation d'oxydes qui corrodent les parois métalliques des conduites, échangeurs, robinetterie ...
- De l'oxygène peut être libéré « depuis » les gaz dissous (air) dans l'eau suite à des changements de température et de pression
- Vitesse d'eau trop faible
- installations « non conformes aux règles de l'art »
- mélange de matériaux
- surdimensionnement des canalisations
- pas de mise à la terre des canalisations
- Utilisation d'inhibiteurs de corrosion pas toujours appropriés
- Pas d'inhibiteur de corrosion derrière un adoucisseur [51].

II.7.1. Vitesse de la corrosion

Considérons une lame de fer immergée dans une solution acide.

Ces deux électrodes sont en court-circuit (constituées par la même lame de fer) et forme une électrode mixte. La vitesse de dissolution des ions Fe^{2+} (Libération des e- est égal à la vitesse de réduction des ions H^+ Consommation des e-) soit :

$$E_{\text{anode}} = E_{\text{cathode}} = E_{\text{corrosion}}$$

Et

$$I_{\text{oxydation}} = I_{\text{réduction}} = I_{\text{corrosion}}$$

$I_{\text{corrosion}}$: Courant de corrosion

E_{anode} et E_{cathode} : Electron à la l'anode/cathode

La vitesse de la corrosion de la lame de fer est donnée par la relation de Faraday :

$$\rho_{\text{corr}} = \frac{M i_{\text{corr}}}{N F}$$

ρ : Vitesse de corrosion (g/sec.cm²)

M : Masse atomique (kg)

i_{corr} : Densité de courant de corrosion (A/cm²)

N : Nombre d'électron mis en jeu

F : Faraday (96500 coulombs).

II.7.2. Les facteurs influant sur la vitesse de corrosion

Dans la pratique, la vitesse de corrosion varie selon plusieurs facteurs tels que : la valeur du pH, la température du milieu,.....etc. [52]

II.7.3. Influence du pH

Dans les milieux très acides c'est-à-dire en dessous du (pH = 4.5), la vitesse de corrosion augmente très rapidement, avec un pH compris entre 4.5 et 8.5 la vitesse de corrosion est pratiquement indépendante de ce dernier. (Voir fig 23). Ce n'est que dans les milieux très alcalins (à partir d'un pH = 8.5 jusqu'à 12) que la vitesse de corrosion diminue considérablement d'autant plus que le pH augmente.

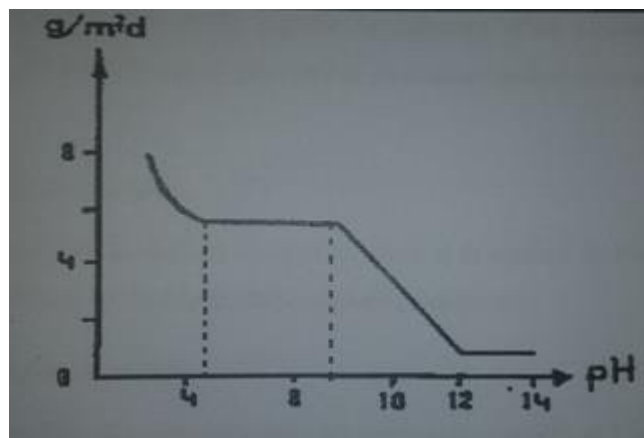


Figure N⁰23: Influence du pH sur la vitesse de corrosion [52].

II.7.4. Effet de la température

La température affecte à la solubilité de CO_2 dans l'eau et la stabilité des couches de carbonate. On estime que les taux de corrosion maximum se rencontrent dans la fourchette 60-80°C. [52]

II.7.5. Influence de la teneur en CO_2

La vitesse de corrosion par CO_2 dépend de la teneur en CO_2 c'est-à-dire de la pression partielle de CO_2 dans les gaz associés : [52]

$$P_{\text{CO}_2} = P_{\text{totale}} \times \text{pourcentage molaire de } \text{CO}_2$$

On admet généralement que :

- Pour $P_{\text{CO}_2} < 0.5$ bar : pas de corrosion.
- Pour $0.5 \text{ bar} < P_{\text{CO}_2} < 2$ bar : corrosion possible.
- $P_{\text{CO}_2} > 2$ bars : corrosion rapide.

II.7.6. Prévention de la corrosion des conduites souterraines

La large utilisation mondiale des aqueducs en fonte est due à sa bonne résistance à la pression interne et à la corrosion dans les différents types de sol [53].

Cependant, la présence permanente de la conduite dans un sol corrosif et une eau agressive augmente les probabilités d'activité des cellules de corrosion. C'est ainsi que l'application des procédures de protection contre l'évolution de la corrosion sur les conduites des réseaux est indispensable. En terme de prévention, il existe quatre moyens pour lutter contre la corrosion, à savoir :

- **Choix du matériel de fabrication des conduites** : Cette étape vient en priorité du fait qu'elle donne l'avantage au réseau de mieux résister aux conditions opérationnelles et environnementales.
- **Application de revêtements** : Ce type de protection a pour but d'isoler la conduite électriquement et d'éliminer tout contact direct avec le milieu environnant. Ainsi, ce revêtement anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface de la conduite.
- **Application de la protection cathodique** : La technique de protection repose sur l'injection d'un courant électrique continu permettant d'abaisser le potentiel de la structure métallique à protéger jusqu' à la zone d'immunité.
- **Utilisation des inhibiteurs de corrosion** : Ce type de protection est destiné à la protection des surfaces internes de la conduite métallique. Ils forment une couche

passive sur la paroi interne avant d'empêcher la production des cellules de corrosion [53].

II.7.7. Type de protection cathodique

La transformation d'une surface métallique corrodée à une surface protégée cathodiquement nécessite de ramener le potentiel naturel de celle-ci vers celui de la zone d'immunité. Pour y parvenir, on doit procéder à une installation d'un système de protection par courant continu dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système requiert l'application de l'un des deux types d'anodes suivants :

1. Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel plus électronégatif que le métal à protéger.
2. Anodes branchées à un générateur électrique assurant la protection par courant imposé.

L'utilisation de l'un ou l'autre type d'anode est souvent justifié par les conditions environnementales (résistivité du sol, température, présence de bactéries, etc.) en plus des critères d'ordre économique tels que la conception de design, les spécifications des équipements et le mode d'installation ainsi que la maintenance et la consommation en matière d'énergie [54].

A) Protection par anodes sacrificielles

Le principe de protection par anodes sacrificielles est basé sur la connexion d'une anode ou une série d'anodes sacrificielles avec la structure à protéger en présence d'un milieu électrolytique conducteur (sol ou eau) comme le montre la (fig 24). La structure se polarise négativement jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau de potentiel suffisant et uniforme qui assure l'immunité de la surface contre l'activité de corrosion. Le courant généré par les anodes sacrificielles du système de protection est la source du processus de polarisation de la structure métallique.

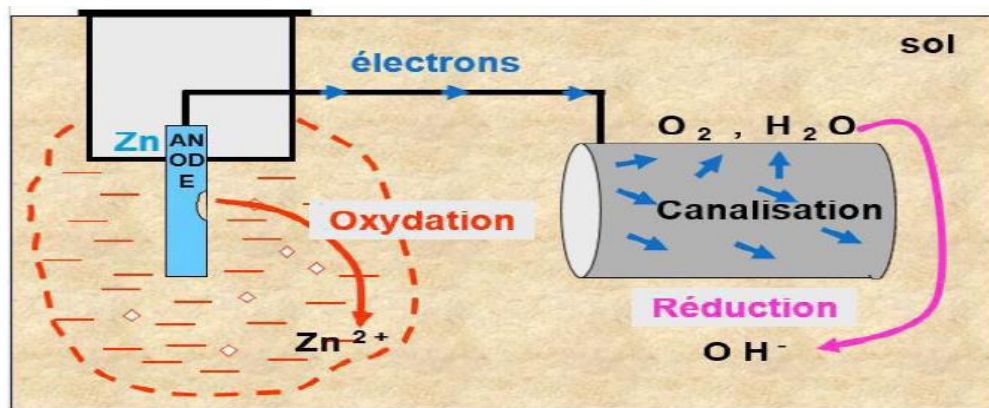


Figure N°24: Principes de la protection par anodes sacrificielles [54].

B) Protection par courant imposé

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale. Cette situation est souvent rencontrée dans les cas de longues conduites ayant un grand diamètre et de conduites présentant un problème d'isolation. De même, certaines conditions environnementales peuvent parfois être à l'origine de ce genre de problèmes. Devant des circonstances pareilles, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé.

La protection cathodique par courant imposé d'une structure métallique enterrée dans le sol repose principalement sur l'injection d'un courant continu à l'aide d'un générateur de courant. Comme le montre la (fig.25), le circuit d'un système de protection cathodique par courant imposé est constitué principalement des éléments suivants :

- Un lit d'anodes ;
- Un générateur de courant;
- Un Conducteur électrolytique (sol ou eau);
- La structure à protéger.

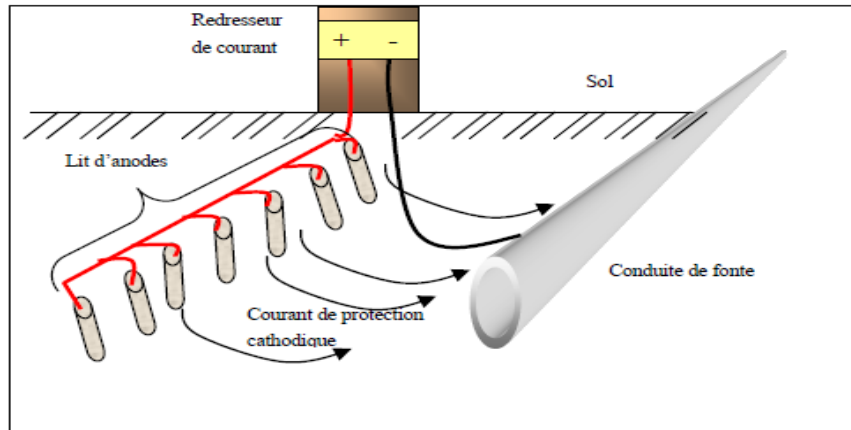


Figure N°25: Principe de la protection par courant imposé [54].

II.7.8. Avantages et inconvénients des systèmes P.C.

Quoique l'utilisation d'un système de protection cathodique est toujours bénéfique, le la sélection du système à adopter demeure généralement assujetti à des conditions environnementales, énergétiques et économiques. À cet égard, une étude comparative doit être établie par l'ingénieur de design afin de mettre en relief les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes de protection. À titre d'exemple, le tableau 3 donne un aperçu sur les éléments comparatifs en question [54].

Tableau N°03 Comparaison des éléments de systèmes P.C

	Anode galvanique ou sacrificielle	Système à courant imposé
Complexité de l'installation	Simple	Complexe
Source d'énergie	Non nécessaire	Nécessaire
Distribution du courant sur la structure	Homogène	Souvent hétérogène
Poids de la structure	Importante surcharge en poids pour des longues durées de vie	Peu d'accroissement
Influence de la résistivité du milieu	Non envisageable si la résistivité du milieu est trop grande	Pas de difficulté
Débit par anode	Faible	Élevé

Nombre d'anode	Important	Faible
Facilité d'adapter le courant consommé en fonction de la demande	Adaptation possible à travers une liaison résistante	Adaptation Facile
Risque de surprotection	Pratiquement aucune	Possible
Interférence avec d'autres structures	Non	Possible
Risques humains	Non	Possible (poste de soutirage)
Surveillance	Aisée et occasionnelle	Surveillance fréquente requise par un spécialiste

II.7.9. Conclusion

La corrosion exerce une action destructrice sur les infrastructures souterraines. En se présentant sous différentes formes, cette avarie pose de nombreux problèmes techniques et économiques et environnementaux. Ainsi, le diagnostic de ce processus nécessite un temps énorme et une capacité de maîtrise très élevée.

Dans le but de réduire l'impact de la corrosion, la recherche et le développement de la technologie a rendu disponible sur le marché trois classes de protection contre la corrosion: la première repose sur l'application d'un type de revêtement approprié. Cette catégorie est généralement désignée pour la protection des surfaces métalliques de l'extérieur. La deuxième classe est basée sur les principes électrochimiques d'oxydoréduction. Cette technique est connue sous le nom de protection cathodique. La troisième classe est destinée à être appliquée sur les surfaces internes des conduites. Cela se réalise par l'utilisation des inhibiteurs de corrosion [55].

Malgré l'efficacité des procédures préventives appliquées sur la conduite métallique, la corrosion peut se manifester sous d'autres formes. Cette forme destructive touche particulièrement la paroi interne de la conduite (corrosion interne). Ce type de corrosion est souvent provoquée par la qualité de l'eau transportée, de la concentration de certains éléments chimiques dissouts dans l'eau (oxygène, chlorures, sulfates, matières organiques, solides en suspension), le pH, l'alcalinité et la dureté [56].

À ce stade, les indices de risque de défaillance deviennent élevés pour nécessiter l'utilisation des inhibiteurs de corrosion. Ce mode de traitement d'anticorrosion est

généralement fabriqué à base de phosphate (polyphosphate, l'orthophosphate, le zinc, l'orthophosphate de zinc, métaphosphate, et le phosphate bimétallique sous forme de sodium-zinc ou de potassium-zinc phosphate. D'autres inhibiteurs en silicates sont également utilisés pour les aqueducs.

es inhibiteurs à base de phosphate sont des outils utilisés pour permettre aux conduites de distribution d'eau en fonte de résister à la corrosion [57].

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the chapter title.

Chapitre III :

Etude des paramètres physico-chimiques

Introduction

Le présent chapitre consiste à présenter : la région d'étude de mon travail, ainsi que le matériel et les méthodes d'analyse utilisés.

En vue d'examiner les paramètres physicochimiques suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NH_4^+ , pH, conductivité électrique (CE), la salinité, la turbidité, la dureté (TH), titre alcalimétrique (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC), la matière organique (MO) de deux zones en amont (station) et en aval (chez l'abonné).

III.1. Objectif du travail :

Notre travail a pour objectif de faire une étude sur les phénomènes qui se déroulent à l'intérieur des canalisations en se basant sur les différents paramètres physico-chimiques responsable à l'entartrage et à la corrosion des canalisations lors du cheminement d'eau potable, de l'amont (station) vers l'aval (chez l'abonné).

III.2. Présentation de l'Algérienne des Eaux :

L'ADE compte 42 unités de distribution regroupée en 15 zones, chaque zone gère deux à quatre unités. En plus des unités de distribution, les zones d'Annaba, Constantine, Oran, Sétif et Souk-Ahras comprennent des unités de production et des unités travaux qui leur sont directement rattachées.

L'ADE est actionnaire dans quatre sociétés par action (filiales), créées par des capitaux conjoints entre l'Algérienne des Eaux (ADE) et l'Office National de L'Assainissement (ONA) :

- La SEAAL (Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger)
- La SEOR (Société des Eaux et de l'Assainissement d'Oran)
- La SEACO (Société des Eaux et de l'Assainissement de Constantine)
- La SEATA (Société des Eaux et de l'Assainissement d'Annaba et El-Tarf)

L'ADE est dotée d'un conseil d'Orientation et de Surveillance (COS), elle est dirigée par un Directeur Général, chargé de mettre en œuvre les orientations et les délibérations du COS, le conseil d'orientation et de surveillance (COS) se compose de membre représentant les différents départements ministériels.

L'ADE a pour mission de garantir la distribution de l'eau aux citoyens par l'exploitation, la gestion et la maintenance des systèmes et installations en assurant les opérations suivantes :

- La production, le transport, traitement, le stockage et l'adduction.
- La distribution, la facturation de l'encaissement.
- L'approvisionnement en eau potable et industrielle.
- Le développement des infrastructures.
- La surveillance et contrôle de la qualité de l'eau distribuée.
- La décentralisation de la gestion de l'eau pour permettre aux structures déconcentrées d'être plus opérationnelles et plus efficaces dans la mise en œuvre des programmes de développement.

III.3. Présentation de laboratoire Algérienne des Eaux l'unité d'El-Tarf

Le laboratoire est situé dans la commune de Boutheldja la wilaya d'El-Tarf. Elle occupe une superficie de 100 m², le laboratoire est composé de trois cellules :

- Une cellule pour les analyses physico-chimiques ;
- Une cellule pour les analyses bactériologiques ;
- Une cellule pour les analyses volumétriques.

Plus un bureau du chef de laboratoire ainsi qu'un magasin pour le stockage des réactifs et les produits chimiques.

L'activité principale de laboratoire est la réalisation de trois types d'analyses, des analyses physico-chimiques telle que : la température, la turbidité, la conductivité, le pH et la salinité par l'utilisation de trois appareils, la conductivimètre ; le pH-mètre ; le turbidimètre.

Les analyses volumétriques : TH, MO et le TAC.

Pour les laborantins elles sont de huit (08) personnes : un responsable principal (chef de service), deux chefs d'équipe, et cinq laborantins.

III.4. Méthodes d'échantillonnage et d'analyses :

III.4.1.L'échantillonnage :

Pour les analyses physico-chimiques de l'eau de la station de Cheffia, 02 échantillons ont été prélevés durant l'année courante 2022 (Avril).

Une bouteille d'eau en plastique de 500ml a été utilisée. Celle-ci doit être idéalement neuve et vidée de son contenu initial de façon à ce que l'intérieur de la bouteille et de son bouchon n'ait pas été contaminé par une substance pouvant interférer avec les résultats d'analyse. Ces derniers doivent être remplis et rincer 3 fois avant de procéder au véritable échantillonnage.

Elles doivent être bien identifiées c'est-à-dire muni d'une étiquette qui comporte le lieu de chaque source, la date et l'heure de prélèvement.

Les échantillons prélevés sont transporter dans des glacières à l'abri de la lumière solaire et sont conserver à des températures inferieur à plus de 4°C et transporté aux laboratoires dans les 6 heures qui suivent.



Photo N°01 : Echantillon de l'eau de la station de Cheffia

Chez les abonnés, l'échantillon a été prélevé du l'eau de robinet du laboratoire de l'ADE, unité Boutheldja par les laborantins.

III.4.2. Les Paramètres physico-chimiques :

III.4.3. Paramètres physiques :

- la turbidité NTU (unité de turbidité néphélométrique)
- La conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- La température °C
- La salinité (mg/l)
- Le potentiel d'hydrogène pH

- **Principes :**

a) Turbidité [58] :

La turbidité de l'eau est d'autant plus forte que celle-ci contient les colloïdes en suspension.

Dans la pratique, la turbidité est mesurée à l'aide de néphélométrie qui mesure la lumière diffusés latéralement par échantillon.

L'unité de mesure de la turbidité (NTU) qui correspond environ à 1mg/l de matière de colloïdes en suspension.

- Turbidité < 5 NTU → eau claire.
- Turbidité < 30 NTU → eau légèrement trouble.
- Turbidité < 50 NTU → eau trouble.

- **Mode opératoire :**

- Simple agitation d'eau.
- Après rinçage avec l'eau distillée ou l'eau à analyser remplie la cuve, tube spéciale de l'appareil, par l'eau à analyser jusqu'au tiré de cuve.
- Il faut la présence de la bille d'air.
- La touche de la cuve se fait vers le bas pour éviter la contamination
- Sécher bien la cuve avec un papier hygiénique avant de l'introduire dans l'appareil.
- Mettre la cuve dans l'appareil et attendre quelques secondes pour lire le résultat.



Photo N°02 : Mesure de la turbidité (Thomas 2022).

b) Conductivité, Température, Salinité [59] :

La conductivité représente la résistance qu'une eau oppose au passage d'un courant électrique. La conductivité est proportionnelle à la minéralisation de l'eau est riche en sels minéraux ionisés, plus la conductivité est élevée. La conductivité varie également en fonction de la température. La conductivité à la plus part du temps, une origine naturelle due au lessivage des terrains lorsqu'il pleut.



Photo N°03 : Mesure de conductivité (Thomas 2022).

c) Température [60] :

L'élévation de la température accélère l'entartrage, (il n'y a pas ou très peu d'entartrage sur les canalisations d'eau froide) ; notamment en augmentant la mobilité des ions, et diminue en générale la solubilité des sels dans la pratique l'effet est plus complexe car la température a aussi une influence sur l'équilibre calco-carbonique, qui elle peut déplacer dans les sens d'un caractère entartrant accru.

d) Salinité [61] :

La présence de sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température de la maximale densité), d'autre (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencée de manière signification. En fin certain sont essentiellement déterminer de par la qualité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).

• Mode opératoire :

- Rincez la sonde de conductivimètre avec de l'eau distillée ou l'eau à analyser.
- Immerger la sonde dans le bécher contenant de l'eau à analyser.
- Cliquer sur le bouton entré.
- Cliquer sur chaque paramètre d'analyse et lire le résultat (conductivité, température, salinité). Le même appareil nous a permis de mesurer au même temps la température, la salinité.

e) pH : Potentiel Hydrogène [62] :

Le pH mesure la concentration en ions H^+ , il sert à exprimer le degré d'acidité ou d'alcalinité dans une solution. Il s'évalue sur une échelle de 0 à 14. Un pH de 7 est dit neutre ; inférieur à 7, acide ; et supérieur à 7, basique. Le pH de l'eau conditionne les équilibres physico chimiques.

Selon les recommandations sur la qualité de l'eau potable, les valeurs acceptables pour le pH sont comprises entre 6.5 et 8.5. Parce que à un faible pH peut conduire à la corrosion des canalisations, et à pH élevé peut entraîner des dépôts incrustant dans les circuits de distributions.

- **Mode opératoire :**

- Rincez la sonde de pH-mètre avec l'eau distillée ou l'eau à analyser.
- Immerger la sonde dans le bécher contenant de l'eau à analyser.
- Cliquer sur le bouton entré.
- Quelques minutes, la valeur du pH s'affiche sur l'écran du pH-mètre.



Photo N°04 : Mesure du pH (Thomas 2022)

III.4.4. Paramètres Chimiques :

a) Dureté TH [63] :

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations en cations métalliques (calcium, magnésium, aluminium, fer et strontium) présents dans l'eau. Les deux premiers cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) sont généralement les plus abondants.

Une eau à titre hydrotimétrique élevée est dite « dure ». Dans le cas contraire, il s'agit d'une eau douce.

- La détermination du mg/l de dureté est donnée par la formule suivante :

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

- **Principe :**

Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont dosés avec une solution aqueuse d'EDTA à pH tamponné 10. Ce dosage se fait en présence de NET.

L'EDTA réagit d'abord avec les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} libres puis avec les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} combiné avec l'indicateur coloré, qui va de la couleur rose à la couleur bleue.



Photo N°05 : Virage de la couleur bleu pour la détermination du TH (Thomas 2022)

III.4.5. Détermination de Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+})

a) Calcium (Ca^{2+}) [64]:

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous formes de carbonates.

C'est aussi un composant majeur de la dureté de l'eau. Les eaux de bonne qualité renferment de 200 à 250 mg/L en CaCO_3 .

- **Principe**

Le calcium est dosé avec une solution aqueuse d'EDTA à pH compris entre 12 et 13. Ce dosage se fait en présence de MUREXIDE. L'EDTA réagit d'abord avec les ions calcium libres, puis avec les ions calcium combiné avec l'indicateur coloré, qui va alors de la couleur rouge à la couleur violette.

- **Mode opératoire :**

- ✓ prendre 10 ml de l'échantillon (l'eau) à analyser ;
- ✓ ajouter 5 goûte de la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) ;

- ✓ ajouter une pincée de MUREXIDE ;
- ✓ titrer avec l'EDTA jusqu'au point d'équivalence, (couleur violette).

Expression des résultats: La détermination du mg/l de Calcium est donnée par la formule suivante :

$[Ca^{2+}] = V_{\text{éq}} * 40$. Au point équivalent en note le volume ($V_{\text{éq}} = 4,1 \text{ ml}$).



Photo N°06 : Virage de couleur du violet pour la détermination de Ca^{2+} (Thomas 2022)

b) Magnésium (Mg^{2+}) [63,64] :

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature, il peut être d'origine naturelle ou industrielle. Il constitue un élément significatif de la dureté de l'eau.

La valeur normale du magnésium selon l'OMS (2004) est égale à 50 mg/L.

La détermination du mg/l de Magnésium est donnée par la formule suivante :

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

III.5. Détermination de TAC et TA :

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonates, et hydroxydes.

$$TA = [OH^-] + \frac{1}{2} [CO_3^{2-}]$$

$$TAC = [OH^-] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$$

Le TA = 0 pour les eaux naturelles (généralement l'eau naturelle à $pH \leq 8,3$).

- Si le PH de l'échantillon est inférieur à 8.3 : le TA=0.
- Si le PH de l'échantillon est supérieur à 8.3.

TA = exprime le titre alcalimétrique en milliéquivalent par litre.

- **Monde opératoire :**

- 100ml de l'eau à analysée
- Solution d'acide sulfurique (H_2SO_4)
- Méthylorange

La détermination du mg/l de TAC est donnée par la formule suivante :

$$TAC = V_{\text{éq}} - 0,5.$$

III.5.1. La détermination de l'ammonium (NH_4^+) et le chlorure (Cl^-) :

Il est présent sous deux formes en solutions, l'ammoniaque (NH_3^+) et l'ammonium (NH_4^+) dont les proportions dépendent du pH et de la température. L'azote ammoniacal provient des excréments animaux et de la décomposition bactérienne des composés organiques azotés.

La valeur normale de l'azote ammoniacal est fixée à 4 mg /L [65].

L'eau contient presque toujours des chlorures mais en proportions très variables. La teneur en chlorures augmente généralement avec le degré de minéralisation d'une eau. La présence des chlorures dans l'eau est liée principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi elle peut être attribuée à des sources naturelles, aux eaux ou à des intrusions salines.

La valeur maximale des chlorures dans les eaux superficielles est fixée à 600 mg/L [66].

La mesure de NH_4^+ et Cl^- a été réalisée à l'aide d'un multi-paramètre.

- **Mode opératoire :**

- Rincez les sondes de multi-paramètre avec l'eau distillée ou l'eau à analyser.
- Immerger la sonde dans le bécher contenant de l'eau à analyser.
- Quelques minutes, la valeur de NH_4^+ et de Cl^- s'affiche sur l'écran du multi-paramètre.



Photo N°07 : Mesure de NH_4^+ et Cl^- (Thomas 2022)

III.5.2. Détermination de la matière organique (MO) [67] :

Les matières organiques susceptibles d'être rencontrées dans les eaux sont constituées par des produits de décomposition d'origine animale ou végétale, élaborés sous l'influence des microorganismes. L'inconvénient des matières organiques est de favoriser l'apparition de mauvais goût qui peut augmenter après chloration. Une eau riche en matière organique doit toujours être suspectée de contamination bactériologique ou chimique.

Selon la classification :

- Une eau est très pure pour des valeurs inférieures à 1mg/L.
- Une eau est dite potable pour des valeurs comprises entre 1 et 2mg/L.
- Une eau est suspecte pour des valeurs comprises entre 2 et 4mg/L.
- Une eau est mauvaise pour des valeurs supérieures à 4mg/L.

- **Matériels**

Bain marie

Burette graduée

Matériel courant de laboratoire (fioles, pipettes, béchers, etc.)

- **Mode opératoire**

Introduire dans un erlenmeyer 25 ml d'eau à analyser

Ajouter 5 ml d'acide sulfurique

Chauffer pendant 10 mn à 90°C

Après 10 mn de chauffage, ajouter 5 ml de KMnO_4 à un volume de 2mmol/l, puis chauffer encore pendant 10 mn.

Après 10 mn, retirer l'échantillon du bain marie et ajouter 5 ml d'oxalate de sodium à 5 mmol/l.

- **Résultat :**

- Si la couleur rose apparaît donc la MO = 0
- Si la couleur est transparente, en titre avec le KMnO_4 jusqu'à obtenir une couleur rose et on note le volume (V_1). D'où la formule est la suivante :

$$C = \frac{v_1 - v_0}{v_2} * 16$$

V_1 : Volume titré de l'échantillon

V_0 : Volume du KMnO_4 de la première étape (couleur blanc)

V_2 : Volume du KMnO_4 de la deuxième étape (couleur blanc)



Photo N°08 : Détermination de matière organique (MO) (Thomas 2022).

III.5.3. Résultats et Discussion :

	T°C	pH	Cond ($\mu\text{S/cm}$)	Sal (mg/l)	Turb (NTU)
Amont (Station)	20,2	8,11	2200	1,1	3,33

	T°C	pH	Cond ($\mu\text{S/cm}$)	Sal (mg/l)	Turb (NTU)
Aval Chez l'abonné	20,8	8,09	2190	1,1	3,00

Paramètres	TH (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	MO (mg/l)	TAC (méqg/l)
Eau de Station	650	164	486	0,45	432	0	28,1
Eau chez l'abonné	650	164	486	0,45	432	0	28,1

Pour une analyse courte du mois d'avril de tous les paramètres physicochimiques de l'amont (station) en aval (chez l'abonné), on observe que les valeurs trouvées en amont et en aval sont pratiquement identiques et respectent les normes de potabilité algériennes et situées également dans les intervalles proches des normes de potabilisation dictées par l'Organisation Mondiale de Santé (OMS).

Vous trouverez dans l'annexe, les tableaux de normes algériennes et celle de l'OMS.



Conclusion Générale

Conclusions générale

L'entartrage des conduites est un phénomène assez complexe et son étude nécessite un suivi ponctuel durant plusieurs années. L'accroissement des dépôts de tarte au cours du temps dépend d'un certain nombre important de paramètres:

Les caractéristiques physico - chimiques de l'eau transportée qui ont une influence considérable sur cet accroissement ainsi que de nos jours s'impose des problèmes de corrosion des canalisations d'eau potable, donc :

L'objectif de mon travail est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux (pH, turbidité, T, Cl⁻, salinité, conductivité, Ca²⁺, TH, Mg²⁺, TAC et MO) par une comparaison des échantillons en amont (station) avec des échantillons en aval (chez l'abonné), qui sont généralement la cause des phénomènes d'entartrage et de la corrosion dans les circuits de distribution d'eau potable.

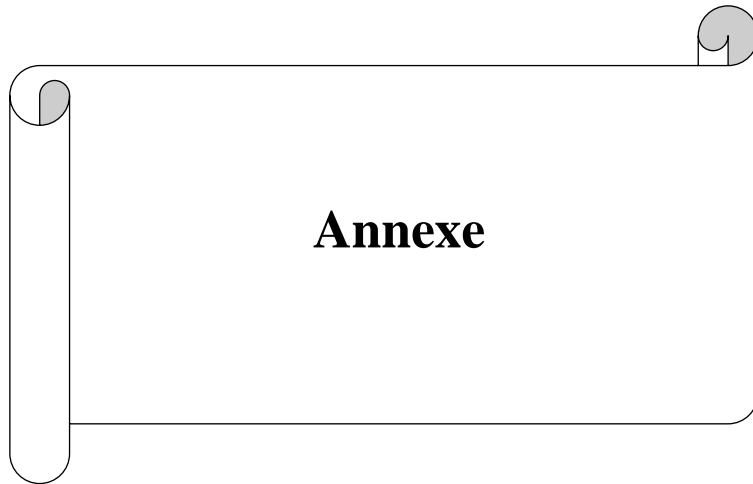
Cette analyse a été réalisée au niveau du laboratoire d'analyse physico-chimique de la wilaya d'El-Tarf (commune de Bouteldja).

D'après les résultats obtenus à notre étude, indiquent que l'eau de la station et chez l'abonné à des valeurs du pH, chlorure et de conductivité, qui ne dépassent pas respectivement 8,09, 432 mg/L et 2200 µS/cm sont dans l'énorme, la valeur de turbidité est inférieur ou égale à 5NTU.

Sur ce qui concerne, la température moyenne, qui est la température ambiante de la région, elle est égale à 20.2 °C.

Le TH a une forte relation avec [Ca²⁺] et [Mg²⁺] indique une valeur constante (164 mg/L).

Enfin tous nos résultats obtenues indiquent que cette eau est de bonne qualité, et les canalisations de distribution de cette eau est loin de problème d'entartrage et de corrosion. En concluons que l'eau de la station de Cheffia distribuée à la population est dans le respect des normes de potabilités appliquées par les autorités responsables.



Annexe

ANNEXE

Normes et recommandations :

Une eau potable doit présenter un certain nombre des caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et en outre répondre à des critères organoleptiques essentiels (incolore, insipide, inodore, fraîche) appréciés par le consommateur (tableau N°07).

L'organisation mondiale de la santé a édicté des normes internationales pour l'eau de boisson, qui comprennent un exposé général des normes bactériologiques, physiques, chimiques biologiques et radiologiques

Tableau (N°04). Les concentrations admissibles dans l'eau potable.

Eléments	Unité	O.M.S	C.E.E
pH	-	7-8,5	6,5-8,5
Conductivité	µS/cm	-	1250
Dureté	°F	-	10-35
Ca ²⁺	mg/L	200	100
Mg ²⁺		150	50
Na ⁺		-	100
K ⁺		-	12
Al ³⁺		-	0,2
SO ₄ ²⁻		200	250
Cl ⁻		200	200
NO ₃ ⁻		44	50
NO ₂ ⁻		-	0,1
NH ₄ ⁺		-	0,5

Selon les normes algériennes :

Groupe de paramètres	Paramètres	Unité	Valeurs limites		
			Eau de surface	Eau souterraine	Eau traitée
Paramètres de pollution	Nitrates	mg/l	50	50	50
	Nitrites	mg/l	*	*	0.2
	Ammonium	mg/l	4	0.5	0.5
	Phosphores	mg/l	10	5	5
Paramètres indésirable	Fer	mg/l	1	0.3	0.3
	Aluminium	mg/l	*	*	0.2

IT-LAB
Version 2
Page 1/1

NORMES DE POTABILITE

Groupe de paramètres	Paramètres	Unité	Valeurs limites		
			Eau de surface	Eau souterraine	Eau traitée
	Calcium	mg/l	*	*	200
	Dureté totale	mg/lCaCO ₃	*	*	500
	Mgnisium	mg/l	*		150
	Chlorures	mg/l	500	500	500
	Indice de permanganate	mg/l	*	*	<3

NORMES DE POTABILITE

CELLULE ELECTROCHIMIQUE

Groupe de paramètres	Paramètres	Unité	Valeurs limites		
			Eau de surface	Eau souterraine	Eau traitée
Paramètres physico-chimiques	pH	Unité pH	6,5 -9	6,5 -9	6,5 -9
	Conductivité à 20°C	µs/cm	2800	2800	2800
	Oxygène dissous	%O ₂	30	>70	*
	Température	°C	25	25	25
Paramètres organoleptiques	Couleur	mg/l Échelle Pt	200	20	15
	Turbidité	NTU	*	*	5

* Capture rectangulaire

Référence bibliographique

- [1]. Rosset R., Les procédés physiques antitartres : mythe ou réalité, Actual. Chim. (1992) 125–148.
- [2] MacAdam J., Parsons. S.A., Calcium carbonate scale formation and control, Rev Environ. Sci. Biotechnol, 3 (2004) 159-169.
- [3] Elfil H., Etude des mécanismes, de la prévision et de la prévention de l'entartrage par les carbonates et les sulfates de calcium, Habilitation universitaire en Génie Chimique (2005).
- [4] Rosset R., Les procédés physiques antitartres : mythe ou réalité, Actual. Chim. (1992) 125–148.
- [5] Ghizellaoui S., Euvrard M., Ledion J., Chibani A., Inhibition of scaling in the presence of copper and zinc by various chemical processes, Desalination, 206 (2007) 185–197.
- [6] Mme Semine Ras Hadda, Etude Des Methodes D'evaluation Et D'inhibition Du Pouvoir Incrustant Des Eaux Dures, Universite Des Freres Mentouri, Pg 01, 2018
- [7] Dedieu L., Hort C., Dominiguez A. M., Rola M., Roques H., Contribution à l'étude des phénomènes d'entartrage. Partie I : Généralités et méthode d'étude LCGE. La tribune de l'eau, 571(1994) 3–19.
- [8] GHETTAS, B. *contribution à l'étude qualitative et quantitative des phénomènes de corrosion et l'entartrage causés par les eaux géothermales dans les conduites d'AEP*. Mémoire de licence : université kasdi Merbah : Ouargla, 43p, 2011
- [9]] hmf.enseeiht.fr/travoux/bei/beiere/content/entartrage-et-colmatage Janvier 2015
- [10] Garrels R. M., Christ C. L., Équilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses, Paris (1967).
- [11] Gal J.Y., Gache N., Fovet Y., Mechanism of scale formation and temperature influence, Journal Européen d'Hydrologie, 30 (1999) 47–64.
- [12]. Dorange G., Marchand A., Le guyader M., Calcite solubility product and dissociation constants of CaHCO_3^+ and CaCO_3° between 5 and 75 °C, Revue des sciences de l'eau, 3 (1990) 261–275.
- [13]. Charlot G., Les réactions chimiques en solution aqueuses et la caractérisation des ions, 7^{ème} édition, Masson, Paris (1983).
- [14]. Abouali E., Jean O., Lédion J., Influence de cuivre et du zinc sur le pouvoir entartrant de l'eau, Journal Européen d'Hydrologie, 27 (1996), 109–126.
- [15]. Girou A., Roques H., Etude des cinétiques de précipitation des carbonates de calcium. Bulletin de l'Association de géographes français, N°389-390, 48e (1971) 227–233.

Référence bibliographique

- [16]. Mohamed Mouldi Tlilti, étude des mécanismes de précipitation du carbonate de calcium. Application à l'entartrage..Université Paris VI et de l'université de SFAX, Pg.11, 2002
- [17] Walha. K., Ben Amor. M., Rosset. R., Géothermales du sud Tunisien. Influence de la température, Journal de la Société Chimique de Tunisie. Vol. IV, N°2, (1997).
- [18] Fartas T., Boutaoutaou D., Zeggane H., Etude de l'évolution de l'entartrage dans les conduites de distribution d'eau de la vallée de l'oued r'hir, 1er Séminaire International sur la Ressource en eau au Sahara : Evaluation, Economie et Protection, ouargla, (2011).
- [19] Chang R., Kim S., Lee S., Choi S., Kim M., Park Y., Calcium carbonate precipitation for CO₂ storage and utilization: A review of the carbonate crystallization and polymorphism, *front. Energy Res*, 5 (2017) 1–12.
- [20] Walha. K., Ben Amor. M., Rosset. R., Géothermales du sud Tunisien. Influence de la température, Journal de la Société Chimique de Tunisie. Vol. IV, N°2, (1997).
- [21] Labioda K., Ghizellaoui S., Contribution to the inhibitors methods study of the scaling: chemical, electrochemical processes in the presence of Ca(OH)₂, Na₂CO₃ and KH₂PO₄, *Energy Procedia*, 18 (2012) 1541–1556.
- [22] Deslouis C., Doncescu A., Festy D., Gil O., Maillot V., Touzain S., Tribollet B., Kinetics and characterisation of calcareous deposits under cathodic protection in natural sea water, *Materials science Forum vols*, 289-292 (1998) 1163–1180.
- [23] Abouali E., Jean O., Lédion J., Influence de cuivre et du zinc sur le pouvoir entartrant de l'eau, *Journal Européen d'Hydrologie*, 27 (1996), 109–126.
- [24] DINEPA, Guide technique : Réhabilitation/remplacement des réseaux d'eau potable l'Office International de l'Eau (OIEau), (2013).
- [25]. : Ladjeroud Yamina, approche théorique sur le problème d'entartrage des chaudières, université de Jijel, 8,9,10,11pg, 2008
- [26] HANAFAI, Y.2005.*caractérisation électrochimique de l'entartrage et inhibition par l'acide hydroxypylenedi phosphomique cas de la pompe à vide de la papeterie de BABAALI* : université m'hamed bougarrie – boumerdes.35p.
- [27] MEDFOUNI, S. 2007, *Adoucissement des eaux géothermales de l'oued R'HIR.Etude comparative de deux types de chaux (Cao et Ca(OH) 2)*. Mémoire de licence université kasdi Merbah : Ouargla, 57 P
- [28]. Abdallah Hadfi, Evaluation Du Pouvoir Entartrant Des Eaux Du Secteur Agricole Du Grand Agadir Et Mise En Evidence De L'effet Inhibiteur De Quelques Engrais Phosphatés, Université Ibn Zohr, Faculté Des Sciences Agadir, Pg. 14,15,16, 21, 22, 2012.
- [29] R. ROSSET, "Procèdes antitartre, mythe ou réalité" l'Actualité Chimique, janvier février

Référence bibliographique

1992, p.125-148.

[30] W. LIN, P. COMBAZ, C. HEBERT et C. PERICHON; L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances; 1995; n° 180; 4p.

[31]. GUIDE TECHNIQUE Réhabilitation / remplacement des réseaux d'eau potable, République d'HAITI, (DINEPA) Direction Nationale de L'Eau Potable et de L'Assainissement, 9,10 et 11Pg, 2013

[32]. Mohamed el Mokhtar MANSOURI, Thème: Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs, MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra, 1Pg, année 2020.

[33]. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/document-conseils-contrôle-corrosion-reseaux-distribution-eau-potable/page-3-document-conseils-contrôle-corrosion-reseaux-distribution-eau-potable.html>

[34]. Laidi BABOURI, Etude De La Résistance A La Corrosion Des Alliages De Cuivre En Milieu Salin, Mémoire de magister, université du 20 aout 1955 – Skisda, Pg.29, 30, année 2008.

[35]. A. Zeghloul ; Mécanismes D'endommagement des Structures, Unité de Formation et de Recherche, Université-Mez.

[36]. R. Mehibil. Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium. Université de Skikda, 2008.

[37]. A. Zeghloul ; Mécanismes D'endommagement des Structures, Unité de Formation et de Recherche, Université-Mez.

[38]. A.Jarrah « Développement de méthodes statiques et probabilistes en corrosion par piqûres pour l'estimation de la profondeur maximale-application de l'Aluminium A5. Ecole nationale supérieure d'arts et matières. Thèse Doctorat. Paris tech. 2009.

[39]. Cherfouh Samir. Thème (centre universitaire Ouargla 1996). (Corrosion bactérienne des ouvrages pétroliers). Pg : 1, 3, 4, 5.

[40]. Aragon, cour-de-corrosion Université du Sud Toulon-Var -Institut de sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, 29 Pg, 30/09/05

[41]. O. Belahssen., mémoire de magister, Université de Annaba, (2008).

Référence bibliographique

- [42]. Commission exploitation, Corrosion et inhibition des puits et collectes, chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, Edition Technip, Paris, 1981.
- [43]. R. Mehibil. Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium. Université de Skikda.
- [44]. Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie - Formation IFP, France, 2005.
- [45]. E. Nouicer, « Comportement électrochimique et propriétés mécaniques de l'alliage de Titane Ti6Al14V. Effet des traitements de surface », Thèse de Doctorat, Université Constantine, 2009.
- [46]. Ketcham, S.J., Shaffer, I.S. Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys, ASTM, STP 516, pp.3-16, (1972).
- [47]. J. Leconte, " Tuyauterie : protection contre la corrosion", Technique de l'ingénieur, Traité Génie mécanique, A830, (1981).
- [48]. A.Marif. « Etude sur la méthode de maintenance par protection cathodique - Cas de la ligne de pipeline GZ1 40'' ». Mémoire Pour l'obtention du diplôme du master génie mécanique. Université Abou Bekr Belkaid–Tlemcen. 2014.
- [49]. J.J. Lamoureux, "Précis de corrosion", Edition » ns MASSON, (1994).
- [50]. (Doc) corrosion de la zone Ourhoud – Academia.edu
https://www.academia.edu/11288806/corrosion_DE_LA_ZONE_Ourhoud
- [51]. Les causes et les conséquences du calcaire, de la corrosion et de l'embouage dans les sous-stations hydrauliques. Pg. 1. www.edya.fr
- [52]. B. Boufatah ; Efficacité des eaux inhibiteurs de corrosion dans les unités GPL a Hassi Messaoud ; Mémoire d'ingénieur IAP; P (6 – 10), 2008.
- [53]. Cast Iron Soil Pipe Institute.Cast Iron Soil Pipe History: Uses and Performance of ASTM Standards, 10th éd. Coll. « Cast Iron Soil Pipe and Fetting Handbook ». United States of America: Cast Iron Soil Pipe Institute, 552 p, 2006.
- [54]. Nguyen-Thuy, LE. 2008. Badoris-document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS): Protection cathodique. Coll. « Rapport technique de l'INERIS», INERIS-

Référence bibliographique

DRA-PREV-01/2008. Paris, (FR) Institut National de l'environnement industriel et des risques, p.41, 2008.

[55]. Rajani, B. and Kleiner, Y. Protection of Ductil Iron Water Mains Against External Corrosion: Review of Methods and Case Histories. Coll. «Rapport technique de NRCC», NRCC-45225. Ottawa, (ON) Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 45 p, 2003.

[56]. Judy Thomson, L., Barry, E., Scheetz, M. R. Schock, D., A. Lytle and Patrick J. Delaney. «Sodium Silicate Corrosion Inhibitors: Issues of Effectiveness and Mechanism ». In Water Quality Technology Conference (Denver, 9-12 novembre 1997). Valley Forge: PQ Corporation, 1979.

[57]. Mc Neil Laurie S., Edwards M. Marc. 2000. « Phosphate Inhibitors and Red Water in Stagnant Iron Pipes ». En ligne. <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07102000-12010045/unrestricted/ch2.pdf>>. Consulté le 26 octobre 2010.

[58]. Aliabbou S et Benmlouka M ;caractéristique physicochimique des eaux embouteillées algérienne et vérification d'étiquetage ; (2013).

[59]. F. Berné, J. Cordonnier, traitement des eaux, Edition technique ; (1991).

[60]. Merzoug, Seyf Eddine, Etude de la qualité microbiologique et physicochimique de l'eau de l'écosystème, université 8 mai 1945-Guelma, 2009.

[61]. Banton, O. et Bangoy, L.M. Transferts de masse et d'énergie. Dans Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines. Éditeurs: PUQ/AUPELF. Sainte-Foy, Québec, pp. 460. 1999.

[62]. Dominico, P.A., et Schwartz, F.W. Chemical reactions. Dans Physical and Chemical Hydrogeology. Éditeurs: John Wiley & Sons, Inc., New York, seconde édition, pp. 506. 1998.

[63]. Henada Sihem et Hemaïdia Nouha. Etude de la qualité physico-chimique des eaux industrielles du complexe sidérurgique d'El-Hadjar-Annaba, Université Badji Mokhtar-Annaba, 20, 21, 22 et 23p. 2019.

[64]. Henada Sihem et Hemaïdia Nouha. Etude de la qualité physico-chimique des eaux industrielles du complexe sidérurgique d'El-Hadjar-Annaba, Université Badji Mokhtar-Annaba, 20, 21, 22 et 23p. 2019.

Référence bibliographique

[65]. Henada Sihem et Hemaïdia Nouha. Etude de la qualité physico-chimique des eaux industrielles du complexe sidérurgique d'El-Hadjar-Annaba, Université Badji Mokhtar-Annaba, 20, 21,22 et 23p. 2019.

[66]. Henada Sihem et Hemaïdia Nouha. Etude de la qualité physico-chimique des eaux industrielles du complexe sidérurgique d'El-Hadjar-Annaba, Université Badji Mokhtar-Annaba, 20, 21,22 et 23p. 2019.

[67]. Mouaz N. Bentchich KH. Caractérisation physico-chimique et bactériologique de l'eau de l'oued de cheliff ; mémoire de fin d'étude ; Université de KHemis-Miliana, 2016, p07.