



Université Kasdi Merbah Ouargla

**FACULTE DES SCIENCES
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**

N° d'ordre :
N° de série :

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En

Génie des procédés

Option : Génie chimie

Par : **MEDFOUNI Samir**

Thème

**ADOUCCISSEMENT DES EAUX GEOTHERMALES DE L'OUED
R'HIR. ETUDE COMPARATIVE DE DEUX TYPES DE CHAUX
(CaO et Ca (OH)₂)**

Soutenu publiquement le : 28 / 05 /2007

Devant le jury composé de :

Pr.	HALLILAT Med Tahar	Université de Ouargla	Président
Pr.	SAIDI Mokhtar	Université de Ouargla	Examineur
Pr.	DADAMOUSA Belkir	Université de Ouargla	Examineur
Dr.	SEGNI Ladjel	Université de Ouargla	Examineur
Dr	MESSAITFA Amar	Université de Ouargla	Rapporteur

Remerciements

Tout d'abord je remercie Dieu qui ma encourager à réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer nos profondes gratitudees à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Particulièrement mon encadreur. Dr Messaitfa Amar pour son aide et conseils qui m'a été très précieux.

Mes sincères remerciements aux membres de jury

Mes sincères remerciements à tous les responsables de laboratoire de recherche et développement (C.R.D).

Mes remerciements vont aussi à tout qui contribués de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Samir. M

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

*A mes chères parents qui ont fait de moi ce que je suis
maintenant.*

Pour leurs amours et leurs sacrifices.

A ma grand-mère.

A mes frères yazid et hamza

A mes soeurs Nora, Sara, sihem, fayrouze

A Samia et madjid

A toute la famille medfouni sans exceptionnelle

A mes amis:

El houcine, Tarek, charif, Adel, Djamel, Yacine

*Chawki, hassouna, hakim, gana Mohamed, Massoud, Djamel,
didine, abd el krim, Saad eddine, Saad, bakhti, Salah, ami Saleh,*

mabrouk, ainsi que tous les

Collègues de ma promotion de génie des procédés année 2003

Samir

ملخص

من بين المشاكل التي تسببها العسرة (112,08 °F) ودرجة الحرارة المرتفعة (60°C) لمياه الالبان في الجنوب الجزائري, نذكر ظاهرة الترسبات بكميات كبيرة داخل قنوات توزيع المياه و كذا منشآت التبريد. انطلاقا من هذا المشكل, نهتم في هذا البحث بإيجاد طريقة معالجة تقودنا إلى تخفيض عسرة مياه سيدي مهدي, و إعطاء حل مناسب يأخذ بعين الاعتبار الجانب الاقتصادي و غياب التأثيرات السلبية. الدراسة تعتمد على إجراء مقارنة بين المعالجة بإضافة هيدروكسيد الكالسيوم و أكسيد الكالسيوم.

الكلمات المفتاحية: عسرة, تعذيب, جير, مياه ساخنة, ترسب, كربونات, كيمياء

Résumé

Parmi les problèmes causés par la dureté (112,08°F) et la température élevée (60°C) de l'eau de l'Albien au sud Algérien, on cite le phénomène d'entartrage, causé par les précipitations en grandes quantités formées dans les conduites d'eau ainsi que dans les tours de refroidissement.

Face à ce problème, nous nous sommes intéressés à établir un traitement qui nous mène à réduire la dureté de l'eau de sidi mahdi, a fin de nous donner une solution adéquate qui tient en compte l'aspect économique et l'absence des effets néfastes. Le procédé comprend une étude comparative de traitement par l'oxyde de calcium et hydroxyde de calcium.

Mots clés: dureté, adoucissement, chaux, eaux géothermales, entartrage, carbonate, chimie.

Abstract

Among the problems caused by the hardness (112,08°F) and the high temperature (60°C) of the water of underground water in Algerian south, we can mention the phenomenon of furring by the precipitations big quantities formed in the water pipes as well as in the cooling towers.

To cope with this problem, we were interested to carry out a treatment leading to reduce the toughness of the water of sidi Mahdi, and to provide an adequate solution taking into account the economic aspect.

The process involves a comparative study of the treatment with calcium oxide and calcium hydroxide.

Key words: hardness, softening, limes, water geothermal, scaling, carbonate, chemistry

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------	-----------

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I Les principales caractéristiques de la vallée de l'Oued Rihir

1. Présentation de la cuvette de Touggourt	04
1.1 la géothermie	05
2. Caractéristiques des eaux géothermales	06
3. Procédés d' adoucissement des eaux	09
3.1. L'échange d'ions	09
3.2. Osmose inverse	09
3.3. Décarbonatations à la chaux	10
3.4. Décarbonatations à la soude	11

Chapitre II L' entartrage et ses conséquences

1. L'équilibre calco-carbonique	13
2. Conséquences de l'entartrage	15
2.1. Conséquences hydrauliques	15
2.2. Conséquences thermiques	17
2.3. Conséquences technologiques	18

Chapitre III La dureté des eaux et ses conséquences

1. Introduction	20
2. Les principaux éléments responsables de la dureté	20
3. Normes et recommandations	21
4. L'impact de la dureté sur les utilisations domestiques	22

PARTIE PRATIQUE

Chapitre IV

Matériels et Méthodes

1. Prélèvement des échantillons	26
2. Le traitement à la chaux	26
3. Le traitement à la soude	27
4. Appareillages d'analyse	28
4.1. Le pH-mètre	28
4.2. La conductimètre	28
4.3. La dureté totale des eaux	28
4.4. L'alcalinité de l'eau	28
4.5. Dosage de calcium et de magnésium	30
4.6. Dosage des ions de chlorures	30
4.7. Dosage de potassium de sodium	30
4.8. Dosage des ions sulfates	31

Chapitre V

Discussion des Résultats

Partie I: Adoucissement des eaux de sidi mahdi par l'addition de la chaux	33
I.1. Etude théorique	34
1.1.1. Déterminé la quantité de la chaux optimale	34
1.1.2. Précipitation de carbonates de calcium (CaCO_3)	35
Partie II: Adoucissement des eaux de sidi mahdi par addition du carbonate de sodium	40
I.1. Etude théorique	40
1.1.1. Quantité de carbonate de sodium optimale	40
1.1.2. Précipitation du carbonate de calcium	41
I.2. Etude pratique	42
CONCLUSION GENERALE	47
Bibliographie	

FIGURES ET TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques physiques des eaux des forages exploitant la nappe albienne dans la région de oued R'hir.

Tableau 2. Caractéristiques chimiques des eaux de forage de sidi mahdi

Tableau 3. Données thermiques de WEBER et COL concernant les transferts de chaleurs à travers les tartres

Tableau 4. Les concentrations admissibles dans l'eau potable

Tableau 5. Evolution du diamètre des canalisations transportant les eaux géothermales en fonction du temps et du pourcentage de bouchage.

Tableau 6. Principales caractéristiques de la chaux ($Ca(OH)_2$)

Tableau 7. Principales caractéristiques du carbonate de sodium (Na_2CO_3)

Tableau 8. Calcul de l'alcalinité de l'eau

Tableau 9. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'Albien de Touggourt

Tableau 10. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux ($Ca(OH)_2$)

Tableau 11. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux CaO

Tableau 12. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt au carbonate de sodium (Na_2CO_3)

LISTE DES DIAGRAMMES À BARRES

Diagramme à barre 1. L'eau brute de Sidi Mahdi

Diagramme à barre 2. L'addition de la chaux seule

Diagramme à barre 3. La transformation des bicarbonates en carbonates

Diagramme à barre 4. La précipitation de CaCO_3

Diagramme à barre 5. L'état final de l'eau de Sidi Mahdi traitée à la chaux Ca(OH)_2

Diagramme à barre 6. L'addition du carbonate de sodium Na_2CO_3

Diagramme à barre 7. La concentration de calcium précipitée

Diagramme à barre 8. L'addition de CO_2

Diagramme à barre 9. L'état final de l'eau du forage de Sidi Mahdi traitée au carbonate de sodium

Liste des figures

Figure 1. Délimitation de la nappe Continentale Intercalaire

Figure 2. Réfrigérateur utilisé dans la région de Sidi Mahdi

Diagramme 1. La répartition du gaz carbonique dans l'eau

Figure 3. Impact de l'entartrage sur les conduites d'eau potable à Touggourt

Diagramme 2. Conséquences du tartre sur les installations hydrauliques

Figure 4. Courbe étalon des ions de potassium

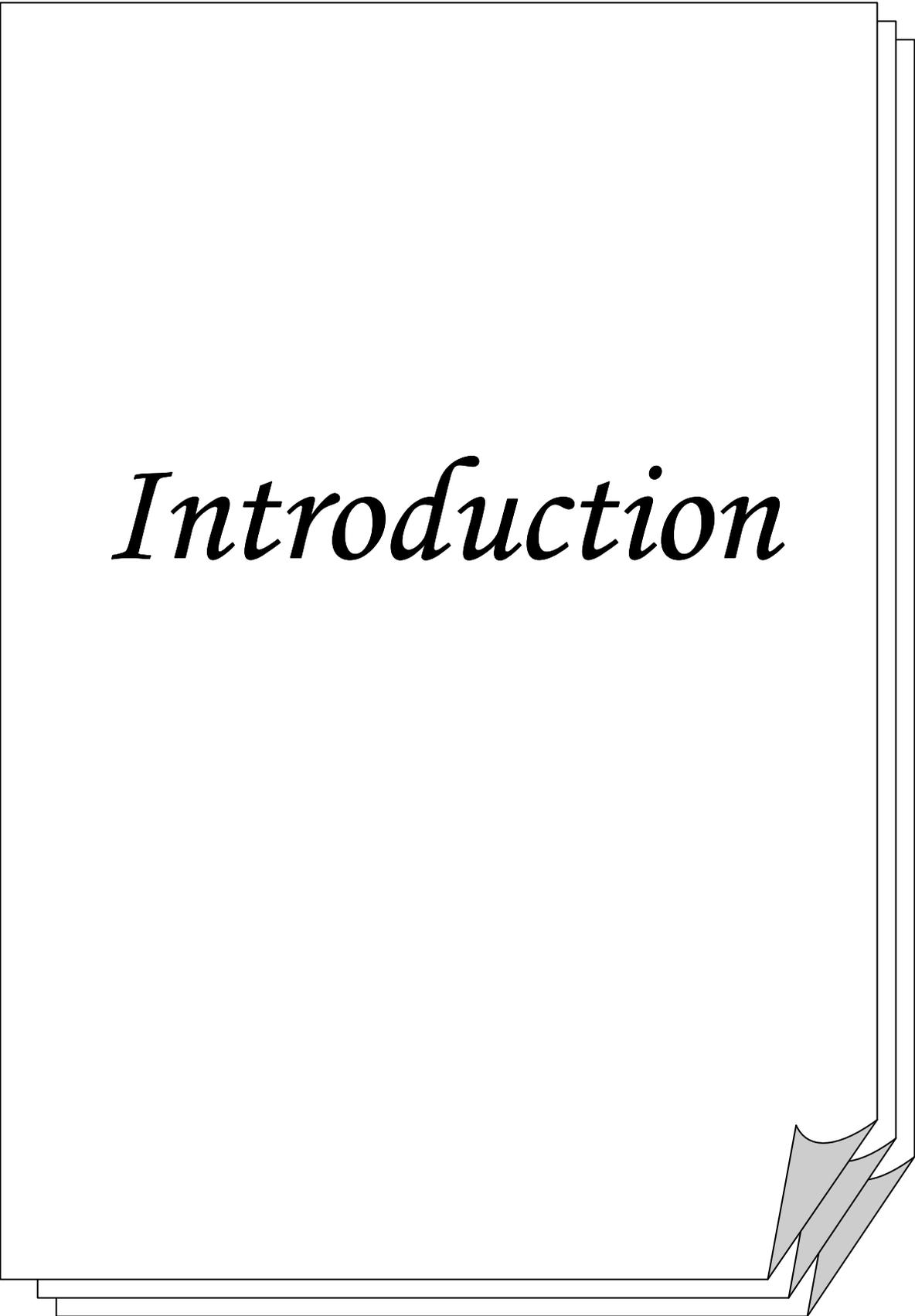
Figure 5. Courbe étalon des ions de sodium

Figure 6. Évolutions du pH des eaux au cours du traitement à la chaux.

Figure 7. Évolutions de la conductivité des eaux au cours du traitement à la chaux.

Figure 8. Évolutions de la concentration de calcium dans les eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné

Figure 9. Évolutions de la conductivité des eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné.



Introduction

INTRODUCTION GENERALE

La ville de Touggourt est alimentée en eau potable à partir des forages exploitants la nappe albienne (Ain Sahra et sidi mahdi). Malgré sa disponibilité, cette eau présente un grand inconvénient : un pouvoir entartrant très élevé et une concentration en certains ions dépassant les valeurs recommandées par l'O.M.S. Elle constitue une préoccupation majeure des autorités locales et mobilise chaque année une importante enveloppe budgétaire. [1]

De nos jours le phénomène d'entartrage est l'un des plus grands problèmes qui menacent l'avenir des infrastructures hydrauliques. Cette menace est liée à la présence dans les eaux souterraines d'éléments responsables de la dureté (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} ,...) et aux conditions favorables à l'entartrage (température, pH) [2]

La solution nécessite la maîtrise des facteurs et les procédés adéquats pour réduire la dureté des eaux de la nappe albienne.

En dépit des méthodes efficaces pour la réduction de la dureté de l'eau (précipitation chimique, les échanges ioniques,...). Il nous incombe dans cette étude d'étudier la précipitation chimique par le traitement de la dureté de l'eau à la chaux, prenant en considération l'aspect économique et l'absence des effets néfastes. L'objectif de ce travail consiste à effectuer une étude comparative de traitement par l'oxyde de calcium (CaO) et par l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2). La seconde étape consiste au traitement de la dureté non carbonatée ou permanente par l'addition du carbonate de calcium (Na_2CO_3) afin d'obtenir une eau de dureté conforme à la norme de l'O.M.S.

Ce mémoire est réparti sur cinq chapitres:

Dans le premier chapitre on décrit les principales caractéristiques de la région de L'oued R'hir (Touggourt) et dans le deuxième chapitre on présente le phénomène d'entartrage et ses conséquences sur l'ouvrage hydraulique.

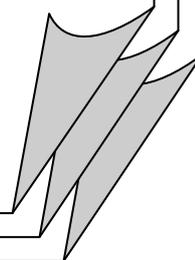
Le chapitre III décrit la dureté et ses conséquences économiques et scientifiques

Le chapitre VI présente les principaux matériels et méthodes utilisés dans cette étude.

Le dernier chapitre décrit la discussion des résultats obtenus dans cette étude.

CHAPITRE I:

*LES PRINCIPALES
CARACTERISTIQUES DE
LA REGION DE OUED
RHIR*



Chapitre I : Les principales caractéristiques de la vallée de Oued R'hir

1. Présentation de la cuvette de Touggourt

Située au Sud-Est de l'Algérie ($33^{\circ} 07'N$, $6^{\circ}04'E$, altitude ; 70 m), la cuvette de Touggourt appartient à l'étage bioclimatique hyper aride a été très chaude ($> 40^{\circ}C$ au mois de juillet) et une pluviométrie très faible et irrégulière (< 67 mm/ an). Les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement en eau potable et de l'irrigation de la cuvette. Les 14,2 millions de mètres cubes distribués annuellement à Touggourt, sont pompées de la nappe du Continentale Intercalaire «dite Albien », située à des profondeurs comprises entre 1758 et 1799 m. Cette dernière provoque une forte charge (pression) de la nappe sur tout le bassin oriental et une température de l'eau à la tête des puits jaillissants comprise entre 55 et $60^{\circ}C$. La nappe est d'une superficie de 600 000 km^2 , couvrant tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Figure.1). Sa capacité réservoir est évaluée à 50 000 milliards de mètres cubes [3] mais, difficilement renouvelable [4]. Le temps de renouvellement est estimé à 70 000 ans. Géologiquement, l'aquifère est contenu dans des formations sablo-gréseuse et argilo-sableuse accumulées dans des niveaux d'age variable selon les endroits. Le substratum est constitué des formations argilosableuses et argileuses, ou carbonatées d'age de plus en plus récent du Sud vers le Nord.

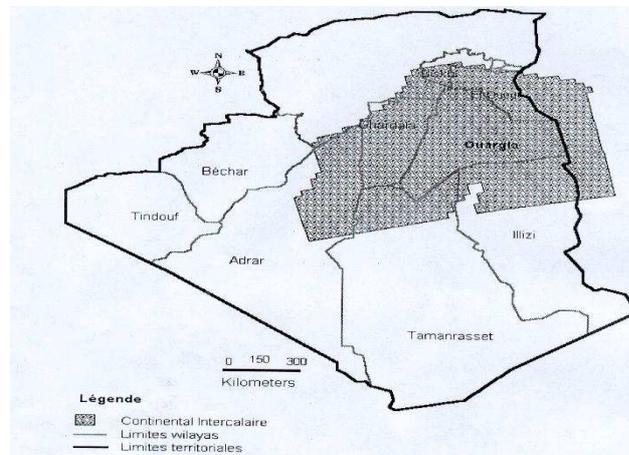


Figure 1. Délimitation de la nappe Continentale Intercalaire

La géothermie:

La géothermie permet de produire de l'énergie en utilisant la chaleur interne de la terre. Lorsque la température est supérieure à 150°C, on parle de géothermie à haute énergie.

Les eaux souterraines dont l'origine est liée au cycle de l'eau s'appellent vadoses. On les différencie des eaux juvéniles, eaux d'origine profondes provenant du refroidissement du magma granitique. L'importance de ces dernières est négligeable face aux eaux vadoses. Les eaux fossiles sont des eaux datant d'une période plus humide du quaternaire, par exemple dans le Sahara. On appelle eaux connées des eaux salées datant de l'époque de formation des sédiments. Les eaux géothermales sont généralement des eaux vadoses se réchauffant en profondeur.

2. Caractéristiques des eaux géothermales

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques physiques de trois forages exploitant la nappe albienne dans la région d'étude [5]

Tableau 1. Caractéristiques physiques des eaux des forages exploitant la nappe albienne dans la région de oued R'hir.

Caractéristiques \ Régions	Ain sahra	Sidi mahdi II	Sidi mahdi III
Date de réalisation	1978	1974	1992
Profondeur (m)	1799	1978	1758
Pression (bar)	20	24	24
Débit réel (l/s)	200	200	250
Débit exploité (l/s)	150	150	150
Température (°C)	57	55	60

La composition chimique des eaux géothermales de Touggourt est indiquée dans le tableau 2. Elle s'agit d'une eau très minéralisée (2,5 mg/L), de qualité passable, légèrement alcaline et de forte dureté (112,08 °F). Bien que les teneurs des eaux en calcium (273,19 mg/L) et en magnésium (106,81 mg/L), sont acceptables comparativement à la norme OMS (1974), respectivement 200 mg/L et 150 mg/L. Les concentrations en ces deux éléments sont suffisantes, dans les conditions de température (55 à 60 °C) des eaux, d'entraîner l'entartrage. En dix ans de mise en service, les diamètres des conduites ont été réduits à 50%, de 400 mm à la pose à 200 mm en 10 ans. Il apparaît que la température est le facteur important dans ces conditions locales d'entartrage :

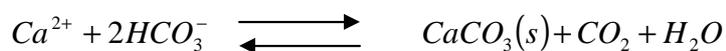


Tableau 2. Caractéristiques chimiques des eaux de forage de sidi mahdi

Elément	Unité	Forage de Sidi mahdi	O.M.S
Ca²⁺	mg/L	273,19	200
Mg²⁺		106,81	150
Na⁺		394,00	200
K⁺		42,00	20
Cl⁻		666,24	500
HCO₃⁻		157,14	-
SO₄²⁻		980,00	400
Dureté totale	Ppm(CaCO₃)	1120,80	500
Dureté totale	°F	112,08	50
pH	-	8,02	7-8.5
Minéralisation	mg/L	2,5	-

A Touggourt, les réseaux publics de la distribution d'eau potable, ont une longueur cumulée supérieure à 432 km, est font l'objet 4,2 millions de dinars Algérien d'investissement annuelle contre le problème d'entartrage.[6]

Depuis la première exploitation des eaux géothermales en 1974, aucun traitement n'a été entrepris pour résoudre le problème d'entartrage. La solution de refroidir l'eau a conduit les autorités locales en 1987 à la réalisation de trois chateaux refroidisseurs d'eaux (figure 2). Cependant l'entartrage rapide de ces ouvrages lui-même, font de ces derniers actuellement abandonnés. Le dimensionnement non adapté et la mauvaise gestion de ces refroidisseurs, semblent la conséquence de la non réussite du projet qui a coûté chère à l'état [6]. Pour résoudre ce problème, il existe plusieurs refroidisseurs dans la région de L'Oued R'hir, le premier a été réalisé l'an 1960 dans la région de sidi mahdi

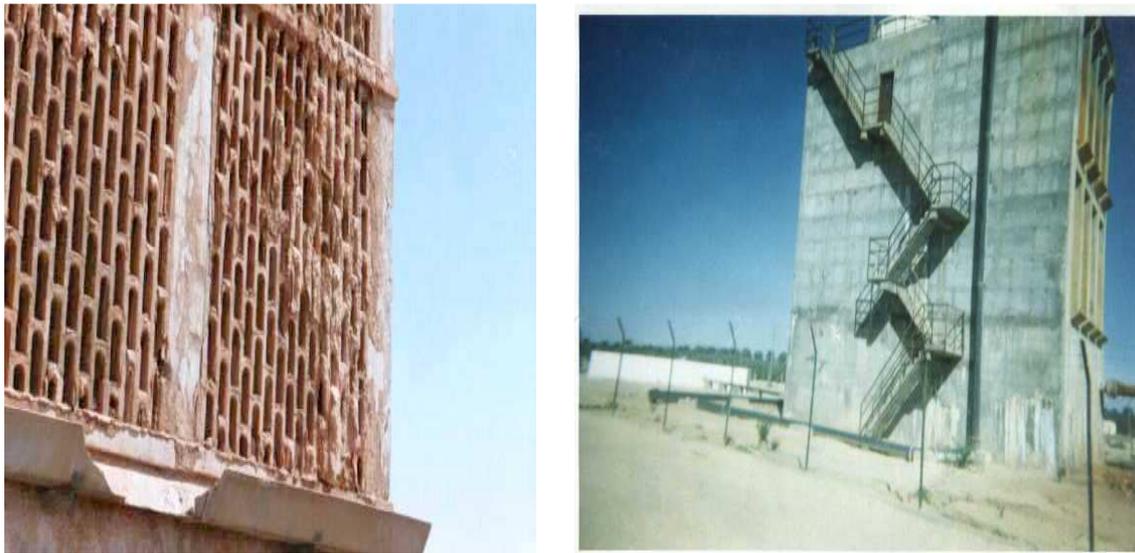


Figure 2. Refroidisseur utilisé dans la région de Sidi Mahdi

Pour refroidir cette eau, on utilise les tours de refroidissement dans lesquelles l'eau géothermale circule sur des systèmes de planches pour augmenter la surface de contact entre l'eau et l'atmosphère. L'air étant renouvelé par un ventilateur de grande taille entraîné par un moteur électrique. L'eau émergente du forage sous pression est transportée en haut de la tour sans qu'il soit nécessaire de la pomper [7, 8]. Mais, du fait de la baisse brutale de pression en haut de la tour et de la division de l'eau en pluie dans celle-ci, le dioxyde de carbone se dégage, le pH de l'eau augmente et le carbonate de calcium précipite selon la réaction:



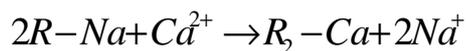
L'utilisation de l'inhibiteur, hexamétaphosphate, malgré son efficacité (Rossel, 1998), il n'est pas souhaitable, d'une part il est très coûteux et d'autre part par son risque sur la santé humaine.

3. Procédés d'adoucissement des eaux

Plusieurs procédés (physiques et chimiques) sont actuellement disponibles pour résoudre le problème d'entartrage :

3.1. L'échangeurs d'ions

Procédé destiné à éliminer la dureté de l'eau par l'échange d'ions, l'eau dure passe sur un lit de résine cationique, préalablement saturé en sodium (Na), qui s'échange avec les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), responsables de la dureté de l'eau [1, 9] :



3.2. L'Osmose inverse

Les procédés membranaires (ultrafiltration, microfiltration, et osmose inverse) prennent une place importante et semblent être la technologie du futur pour ce type de traitement. En effet, ces procédés présentent les avantages suivants par rapport aux autres procédés [10]:

- Pas d'ajouts d'additifs chimiques et absence de boue.
- Réduction des frais d'exploitation (énergie, main-d'œuvre).
- Encombrement réduit
- Possibilité d'exploitation automatique du procédé.

Bien que ces techniques aient connu un développement industriel, leur essor est ralenti par les phénomènes intrinsèques aux techniques membranaires, du coût élevé des membranes, de la polarisation et du colmatage des membranes [11].

Principe de l'osmose inverse:

L'osmose inverse est un phénomène observé quand deux solutions de concentrations différentes sont séparées par une membrane. Celle-ci laisse passer le solvant vers la solution la plus concentrée et arrête le soluté. L'égalité des potentiels chimiques ne pouvant se rétablir par diffusion du soluté vers le solvant, celle-ci va alors diluer la solution; la pression correspondante est appelée pression osmotique de la solution (π), le solvant passera du milieu le plus concentré au milieu le moins concentré, ce qui se traduit par une inversion du flux osmotique, d'où le nom d'osmose inverse.[10]

Une membrane sélective, sous l'effet d'une force de transfert, va permettre ou interdire le passage de certains composants entre deux milieux qu'elle sépare.

Les caractéristiques principales d'une opération d'osmose inverse sont:

-Le taux de conversion (Y), qui est par définition, la fonction du débit de liquide qui traverse la membrane en régime continu:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_0}$$

Y est le rapport entre le volume de perméat et le volume de produit à traiter initial.

-La sélectivité de la membrane qui est en général définie comme le taux de rétention R de l'espèce (sel, particule,...) que la molécule est censée retenir:

$$R = \frac{C_r - C_p}{C_r} = 1 - \frac{C_p}{C_r}$$

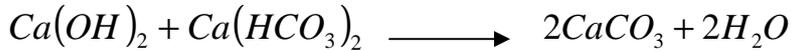
C_r : Concentration de l'espèce à retenir dans concentrât (rejet).

C_p : Concentration de la même espèce dans le perméat.

3.3. Décarbonatations à la chaux

Ce procédé est employé lorsque la dureté carbonatée est due essentiellement aux ions Ca^{2+} . Pratiquement, l'addition de chaux entraîne la précipitation du CaCO_3 (chaux seule) et $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (chaux en excès), suite à l'augmentation du pH. La cinétique de cette réaction étant relativement lente, le procédé est accéléré soit par une re-circulation des boues dans lesquelles se trouvent des germes de cristallisation

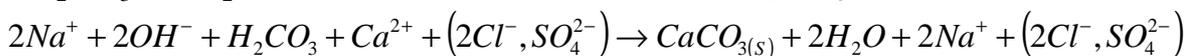
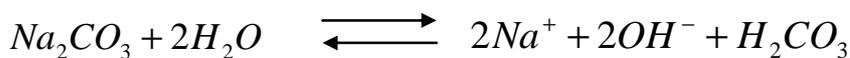
déjà formés, soit en ajoutant des cristaux sur lesquels le carbonate de calcium s'agglomère (sable par exemple) [12, 13] :



L'addition de chaux nécessite de prendre plusieurs précautions pour sa mise en oeuvre : l'eau ne doit pas contenir de colloïdes en suspension pouvant gêner la cristallisation. Il est donc parfois nécessaire d'ajouter un coagulant. La décarbonatation doit comprendre une zone de clarification appropriée pour séparer les cristaux de $CaCO_3$ de l'eau. Cette technique présente un inconvénient, à savoir la quantité de boues produites, mais celles-ci sont facilement déshydratées. Cependant, il ne faut pas oublier les avantages de ce procédé : aisé à mettre en oeuvre et ne nécessitant pas l'utilisation d'équipements spécifiques. De plus, il n'est pas contraignant en exploitation, si ce n'est les inconvénients inhérents à l'emploi de la chaux.

3.4. Décarbonatation au carbonate de sodium (Na_2CO_3)

Le carbonate de sodium a pour objectif de réduire la dureté permanente, c'est-à-dire, précipité le calcium lié aux chlorures et aux sulfates en solution :



CHAPITRE II:

*L'ENTARTRAGE ET SES
CONSEQUENCES*

Chapitre II : L'entartrage et ses conséquences

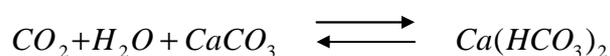
Le tartre, dépôt adhérent, est formé principalement par la précipitation du carbonate de calcium, environ 90 % du précipité global [7]. Il est soit alcalin, principalement des carbonates de calcium et d'hydroxyde de magnésium ou non alcalin, principalement le sulfate de calcium qui existe sous trois formes: CaSO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ces trois formes sont beaucoup plus solubles que le carbonate de calcium et l'hydroxyde de magnésium. Donc, ces tartres ne se forment que dans le cas où la solution serait sursaturée en sulfate de calcium à des températures élevées.

1. L'équilibre calco-carbonique

Les eaux naturelles, du fait de leur cheminement dans le sol et au contact avec l'atmosphère, contiennent un certain nombre d'éléments dissous:

- Des cations tels que Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+}
- Des anions tels que Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^- , HCO_3^- , NO_3^- , etc
- Des gaz dissous, essentiellement CO_2 et O_2
- Des colloïdes tel SiO_2 .

L'équilibre calco-carbonique permet de prévoir la tendance de l'eau à l'entartrage ou à la corrosion. Considéreront une eau contenant du CO_2 et mise en contact avec du carbonate de calcium solide en excès, au bout d'un certain temps, un équilibre physico-chimique se produit :



Le pH de l'eau dépend du rapport :

$$\frac{CO_2 \text{ libre}}{CO_2 \text{ deshydrogé nocarbonat e}}$$

Si la totalité du CO_2 contenue dans l'eau est supérieure à la concentration du CO_2 d'équilibre, son excès constitue le CO_2 agressif. Ce dernier, en détruisant les carbonates, empêche le dépôt carbonaté protecteur sur les parois métalliques en contact avec l'eau [14], comme l'indique le diagramme suivant :

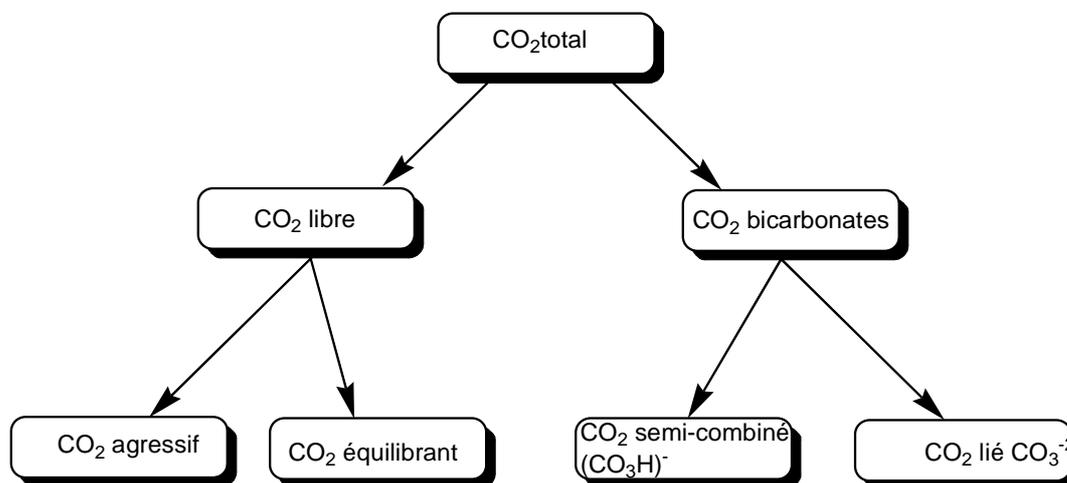


Diagramme 1. Répartition du gaz carbonique dans l'eau

- CO_2 libre $>$ CO_2 équivalent = présence de CO_2 agressif. Eau agressive.
- CO_2 libre = CO_2 équivalent = absence de CO_2 agressif. Eau en équilibre.
- CO_2 libre $<$ CO_2 équivalent = déficit en CO_2 agressif. Eau en incrustante.

2. Conséquences de l'entartrage

2.1. Conséquences hydrauliques

En réduisant les sections et en dégradant l'état des surfaces, ces tartres fortement adhérents, augmentent, à débit constant, les pertes de charge et par conséquent les dépenses énergétiques liées à la circulation des fluides. Déjà gênantes dans le cas de tuyauteries démontables et nettoyables, ces formations deviennent catastrophiques quand elles affectent les conduites enterrées. [15]

L'enquête sur site, nous à montrée, qu'en dix ans de mise en service, les diamètres des conduites ont été réduits à 50%, de 400 mm à la pose à 200 mm après 10 ans (figure 3). La masse de tartre produite est estimée à 1,58 g/L, soit 2243 tonnes annuelle pour une consommation d'eau de 14,2 millions de m³/an. La vitesse moyenne d'entartrage est de 1,1cm/an, avec un maximum de 1,4 cm/an enregistrée dans les tronçons situés au premier kilomètre de la source d'eau où la température de l'eau est proche de 60 °C. [6]

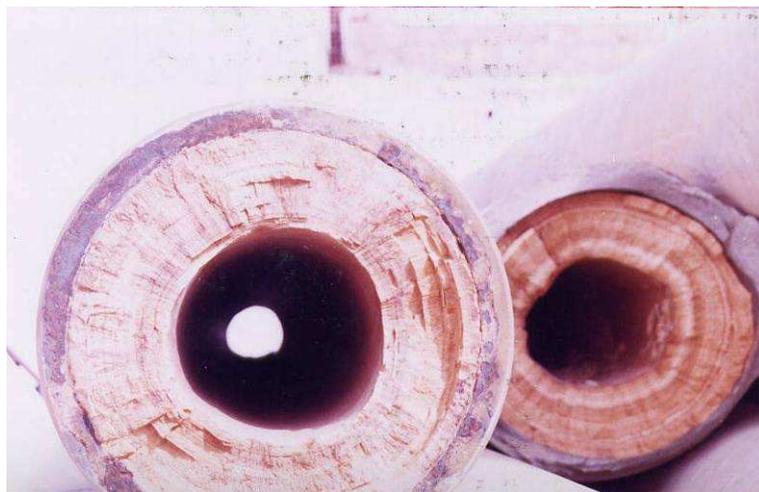


Figure 3. Impact de l'entartrage sur les conduites d'eau potable à Touggourt

Le tartre a également un pouvoir de corrosion (par aération différentielle) [16] :

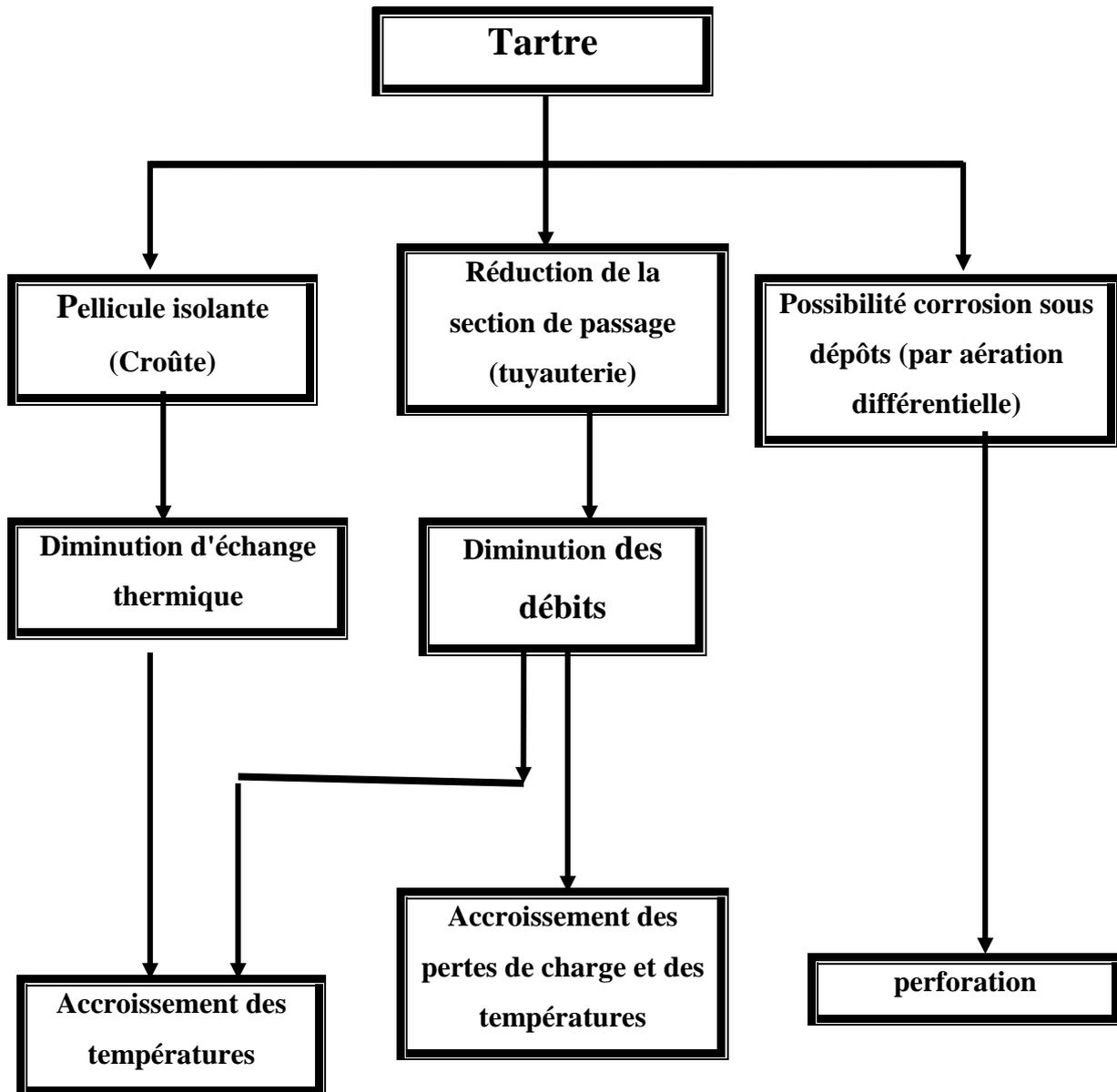


Diagramme 2. Conséquences du tartre sur les installations hydrauliques

2.2. Conséquences thermiques

Bien que le problème ne se pose pas dans la zone d'étude, il est important de le rappeler. Tout dépôt au contact d'une paroi au travers laquelle se fait un échange thermique mène à une résistance de transfert. Si on veut maintenir constant le flux thermique à travers cette paroi il est donc nécessaire d'augmenter la différence de température entre la surface interne entartrée et les parois métallique externe. C'est ainsi que pour une chaudière fonctionnant à 25 bars avec un taux de transmission de 100,000 cal/m².h, on évalue le sur-chauffe du métal à 200 °C pour une épaisseur de 3,5 mm de tartre sulfaté et à 400 °C pour une épaisseur de 1 mm de tartre siliceux (tableau 3)[17].

Tableau 3. Données thermiques concernant les transferts de chaleurs à travers les tartres.

Type de tartre	Conductivité thermique en w/m (°K)	Epaisseur de la couche de tartre (mm)	Perte d'efficacité (%)
CaCO₃	1,5 à 1,8	0,1	7
		0,25	15
		0,5	26
		1	41
CaSO₄	0,6 à 2,3	0,1	9
		0,25	20
		0,5	33
		1	50
SiO₂	0,08 à 0,18	0,1	50
		0,25	71
		0,5	83
		1	91

2.3. 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. L'entartrage peut avoir pour conséquences technologiques [18] :

- blocage des organes de manœuvre des robinetteries,
- impossibilité d'obtenir l'étanchéité siège - clapet des robinetteries,
- blocage des soupapes de sécurité,
- diminution du volume utile des réservoirs,
- dégradations des états de surface des appareils sanitaires,
- entraînement de particules en suspension qui peuvent être abrasives,

CHAPITRE III:

*LA DURETE DES EAUX ET
SES CONSEQUENCES*

Chapitre III : La dureté des eaux et ses conséquences

1. Introduction

Une eau est dite "dure" lorsqu'elle est chargée en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) et, par opposition, "douce" lorsqu'elle contient peu de ces ions. La dureté d'une eau s'exprime en degrés français ($^{\circ}\text{F}$). Un degré français correspond à une teneur en calcium et magnésium équivalente à 10 mg/L de CaCO_3 .

2. Les principaux éléments responsables de la dureté

La dureté d'une eau est due à la présence des ions métalliques bivalents, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} . Les plus abondants étant les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Les ions Fe^{2+} , Mn^{2+} et Sr^{2+} sont facilement oxydables et leurs impacts sur la dureté sont négligeables.

- **Le calcium** est un métal alcalino-terreux très répandu dans la nature. Les eaux potables de bonne qualité ayant des teneurs en calcium comprennent entre 100 et 140 mg/l. La directive de l'OMS recommande pour sa limite supérieure une teneur de 200 mg/L.

- **Le magnésium** est un des éléments aussi très répandus dans la nature, il constitue environ 2,5 % dans l'écorce terrestre. La directive de la communauté européenne recommande un niveau guide de 30 mg/l et l'OMS recommande pour sa limite supérieure une teneur de 85 mg/l.

Les eaux de surface peuvent contenir jusqu'à 1,5 mg/l de fer qui peut avoir pour origine la lixiviation des terrains traversés, ou les pollutions industrielles; dans les eaux de distribution, il provient le plus souvent de la corrosion des conduites d'aménagements. Le fer peut se rencontrer jusqu'à 10 mg/l dans les eaux de sondage [19].

En pratique on considère souvent que la dureté totale d'une eau de consommation est égale à la somme de sa dureté calcique et la dureté magnésienne:

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

On distingue deux types de dureté, carbonatée ou temporaire et non carbonatée ou permanente. L'eau peut être classé suivant son degré de dureté [2] :

- Eau douce, de 0 à 60 mg/l de CaCO₃,
- Eau modérément dure de 60 à <120 mg/l de CaCO₃,
- Eau dure, de 120 à <180 mg/l de CaCO₃,
- Eau très dure, 180 mg/l et plus de CaCO₃.

3. Normes et recommandations

Une eau potable doit présenter un certain nombre de caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et en outre répondre à des critères organoleptiques essentiels (incolore, insipide, inodore, fraîche) appréciés par le consommateur (tableau 4). 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 [18,19]

Tableau 4. Les concentrations admissibles dans l'eau potable [20,21]

Eléments	Unité	O.M.S	C.E.E
pH	-	7-8,5	6,5-8,5
Conductivité	$\mu\text{S}/\text{cm}$	-	1250
Dureté	$^{\circ}\text{F}$	-	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

4. L'impact de la dureté sur les utilisations domestiques

L'eau dure n'est pas mauvaise pour la santé. Au contraire, il semble que les populations alimentées en eau naturellement dure sont moins sujettes à l'infarctus du myocarde. En revanche, l'eau adoucie peut présenter certains inconvénients tel que pour des localités ayant des anciennes canalisations en plomb induit à la solubilité du Plomb.

L'utilisation domestique des eaux dures pose les principaux problèmes suivants:

- Entartrage des appareils et des canalisations d'eau.
- Consommation d'énergie
- Consommation de lessive

Depuis la première exploitation des eaux géothermales en 1974, aucun traitement n'a été entrepris pour résoudre le problème d'entartrage dans la région de Touggourt. La décarbonatation successivement à la chaux, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (traitement de la dureté carbonatée) et au carbonate de sodium, Na_2CO_3 (traitement de la dureté

non carbonatée), semble la plus appropriée. Elles sont d'application faciles, sûre et économique, comparativement à la résine échangeur d'ions, grand consommateur de produits chimiques de sa régénération [22]. L'osmose inverse, concurrente de la nanofiltration [23], est d'une perméabilité non sélective [22] et s'accompagne, comme l'électrodialyse, d'une forte consommation d'énergie [24]. Les inhibiteurs (l'hexamétophosphate), malgré leur efficacité [25], sont très coûteux et contenant des métaux lourds. Le recours à l'hydroxyde de sodium est déconseillé du fait de sa contamination par le mercure [26]. La décarbonatation au CO₂ [27] est très coûteuse si la source est industrielle alors que la source naturelle (air), moins chère, risque d'être polluée.

On évalué entre 40 à 50 tonnes, la masse de tartre formée annuellement par forage d'eau exploité [28] et en même temps, la précipitation de tartre continue à se produire dans les conduites d'alimentation en eau potable. Durant dix ans de mise en service des conduites ont été constaté que le diamètre de ces dernières a été réduit à 50 %.

Tableau 5. Evolution du diamètre des canalisations transportant les eaux géothermales en fonction du temps et du pourcentage de bouchage.

Diamètre initial de la conduite (mm)	Après une année: taux de bouchage (%)	Après deux années: taux de bouchage (%)	Après trois années: taux de bouchage (%)	Après quatre années: taux de bouchage (%)
150	13.3	40	60	86.7
200	11.3	30	45	65
250	8	24	36	52
300	6.7	20	30	43.3

La solution de refroidir les eaux a amené les autorités locales à réaliser en 1987 trois châteaux refroidisseurs; cependant la forte déposition du tartre, diminue rapidement leur efficacité rendre ces derniers inexploitable actuellement. La mauvaise gestion et la non adéquation du dimensionnement de l'ouvrage, semblent les principales causes de la non réussite de cette technique.

Il est à envisager de remplacer ces tours de refroidissement par des bassins où l'eau s'écoulerait en pluie à partir de conduites perforées. Le nettoyage de ces bassins pour en retirer le tartre déposé serait plus aisé que dans les hautes tours. Un inhibiteur d'entartrage serait alors ajouté à l'eau pour éviter que les dépôts aient lieu dans les conduites.

Les inhibiteurs les plus utilisés actuellement sont les phosphates moléculaires déshydratés, les phosphates bimétalliques à base de zinc, les orthophosphates et les produits à base de silicate. Ces produits sont utilisés seuls ou en mélange [29].

Il existe des publications sur les mêmes problèmes dans les pays limitrophes, telles que: Rousset Etal (2000) qui a utilisé le polyphosphate de sodium dans les réfrigérants au Sud de la Tunisie, pour réduire la sédimentation [30].

CHAPITRE IV:

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Chapitre IV : Matériels et Méthodes

1. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement d'eau est manuel, l'échantillon est prélevé dans un flacon en plastique. Avant son remplissage, le flacon est rincé plusieurs fois avec de l'eau de forage de sidi mahdi.

Les paramètres physico-chimiques de l'eau, avant et après traitement, ont été déterminés au laboratoire du centre de recherche et de développement (C.R.D) de Hassi Massoud et laboratoire (EPEG) de Ghardaïa. Les analyses ont été effectuées selon les méthodes décrites par [31, 32].

2. Le traitement à la chaux

Deux types de chaux ont été testés : la chaux vive (CaO) et la chaux éteinte (Ca(OH)₂).

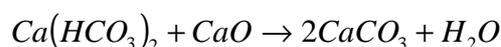
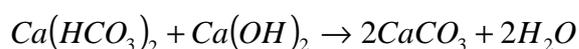
Les principales caractéristiques de la chaux éteinte utilisée sont représentées dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6. Principales caractéristiques de la chaux (Ca(OH)₂)

Eléments	Pourcentage (%)
Fer (Fe ²⁺)	0, 1
Plomb (Pb ²⁺)	0,005
Chlorure (Cl ⁻)	0,02
Sulfate (So ^{2-₄})	0,05
Calcium (Ca ²⁺)	97

Par contre aucune information n'est disponible concernant la chaux vive. Il s'agit d'un produit local de la région de Ghardaïa.

Le but de ce procédé est la réduction de la dureté temporaire en transformant les bicarbonates en carbonates et la précipitation du calcium sous forme $CaCO_3$ et le magnésium sous forme d'hydroxyde de magnésium $Mg(OH)_2$ [33]. Le procédé par l'addition de la chaux seule permet de réduire la concentration d'ions calcium et n'exerce aucune influence sur la dureté non carbonatée et sur la dureté magnésienne :



Pour une bonne réussite du traitement à la chaux, le procédé nécessite de suivre les étapes suivantes :

$$C_{mg / l de CaCO_3} = \frac{Cx50}{ME}$$

Ou C, la concentration des ions en (mg/l); ME, la masse équivalente des ions

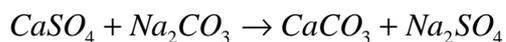
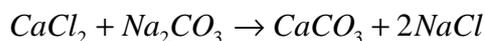
3. Le traitement au carbonate de sodium

Le carbonate de sodium, appelé communément "soude" (Na_2CO_3), est utilisé dans l'objectif de réduire la dureté non carbonatée, c'est-à-dire la précipitation du calcium et du magnésium liées aux Cl^- et aux SO_4^{2-} . Les principales caractéristiques du carbonate de sodium utilisé sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 7. Principales caractéristiques du carbonate de sodium (Na_2CO_3)

Eléments	Pourcentage
Fer (Fe^{2+})	0,0020
Plomb (Pb^{2+})	0,0020
Chlorure (Cl^-)	0,0100
Sulfate (SO_4^{2-})	0,0100
Sodium (Na^+)	99

Les équations chimiques qui régissent la réaction de se procéder sont les suivantes:



4. Appareillages d'analyse

4.1. Le pH-mètre

Le potentiel d'hydrogène est mesuré par un pH mètre digital, type 212 HANNAS équipée d'une électrode combinée et sensible.

4.2. Le conductimètre

La conductivité des eaux est mesurée par un conductimètre électrique, type Bio block WTW LF 315. La lecture des résultats est obtenue à 25 °C et exprimées en mS/cm.

4.3. La dureté totale des eaux

La dureté totale des eaux est déterminée en utilisant la méthode titrimétrique à l'EDTA (Éthylène Diamine Tétra Acétate) qui complexe quantitativement le Ca^{2+} et le Mg^{2+} . Le milieu est tamponné à pH compris entre 9,5 et 10 en présence du noir d'eriochrome T comme indicateur [31].

4.4. L'alcalinité de l'eau

Le titre alcalinitique simple (TA) est calculer à pH =8,3, on ajoute l'acide chlorhydrique à l'échantillon analysé en petite quantité jusqu'à atteindre la valeur de pH= 4,3 et on mesure le volume de l'acide ajouté V_1 .

Le titre alcalinitique complet (TAC) est calculé à pH=4,3, on mesure aussi le volume de l'acide ajouté pour atteindre le pH=4,3.

Les concentrations des ions (OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-) sont données par les expressions représentées dans le tableau suivant [31]:

Tableau 8. Calcul de l'alcalinité de l'eau

$[\text{HCO}_3^-] = (V_2 \cdot N \cdot 61.1000)/\text{Pe}$ $[\text{CO}_3^{2-}] = 0$ $[\text{OH}^-] = 0$	$V_1 = 0$
$[\text{HCO}_3^-] = [2(V_1 - V_2) \cdot N \cdot 61.1000]/\text{Pe}$ $[\text{CO}_3^{2-}] = [2V_1 \cdot N \cdot 60.1000]/\text{Pe}$ $[\text{OH}^-] = 0$	$V_1 < 1/2V_2$
$[\text{HCO}_3^-] = 0$ $[\text{CO}_3^{2-}] = [2V_1 \cdot N \cdot 60.1000]/\text{Pe}$ $[\text{OH}^-] = 0$	$V_1 = 1/2V_2$
$[\text{HCO}_3^-] = 0$ $[\text{CO}_3^{2-}] = [2(V_2 - V_1) \cdot N \cdot 60.1000]/\text{Pe}$ $[\text{OH}^-] = [(2V_1 - V_2) \cdot N \cdot 17.1000]$	$V_1 > 1/2V_2$
$[\text{HCO}_3^-] = 0$ $[\text{CO}_3^{2-}] = 0$ $[\text{OH}^-] = (V_2 \cdot N \cdot 17.1000)/\text{Pe}$	$V_1 = V_2$

Les titres alcalimétriques (TA) et (TAC) donnés comme suivent :

$$TA = (V_1 \cdot N \cdot 1000) / P_e \text{ (meq/l)}$$

$$TAC = (V_2 \cdot N \cdot 1000) / P_e \text{ (meq/l)}$$

Tel que :

P_e : Volume de l'échantillon (ml)

V_2 : Volume de l'acide ajouté pour le dosage de bicarbonates (ml)

V_1 : Volume de l'acide ajouté pour le dosage de carbonates (ml)

N : Normalité de l'acide

4.5. Dosage de calcium et de magnésium

Le dosage du calcium est basé sur le principe de la complexométrie de l'échantillon à l'EDTA à pH 12 et en présence d'un indicateur coloré. La méthode provoque la précipitation du magnésium sous forme $Mg(OH)_2$, afin d'éviter son intervention dans la mesure du calcium. Connaissant la dureté totale d'une part et la dureté calcique d'autre part, la dureté magnésienne est calculée [31].

4.6. Dosage des ions de chlorures

Selon la méthode de MOHR [8,18], les ions chlorures ont été dosés. Cette méthode est basée sur la précipitation des ions de chlorures par l'addition de nitrate d'argent ($AgNO_3$) en présence de bichromate de potassium (K_2CrO_4).

Pour 10 ml de l'échantillon d'eau à analysé, on ajoute quelque goutte de (K_2CrO_4) et on dose par ($AgNO_3$) jusqu'au changement de la couleur du jaune au rouge.

4.7. Dosage de potassium et du sodium

Les teneurs en sodium et en potassium ont été dosées par absorption atomique type "Perkin-Elmer 1100B". D'après les courbes d'étalonnage présentées sur la figure 4 et la figure 5 respectivement pour le potassium et au sodium, les concentrations en ces deux éléments, exprimés en mg/l, est directement déduites

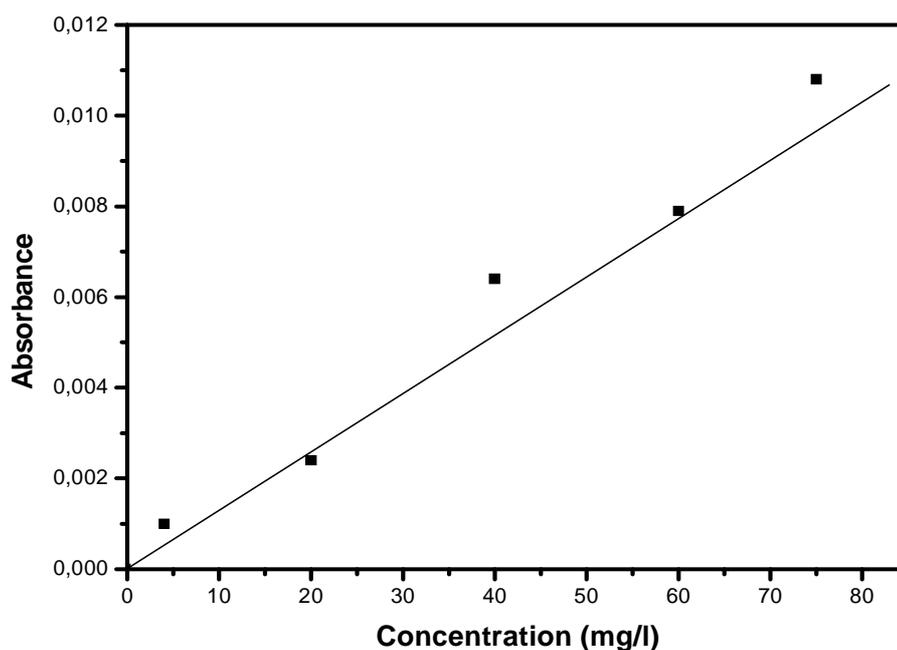


Figure 4. Courbe d'étalonnage des ions potassiums

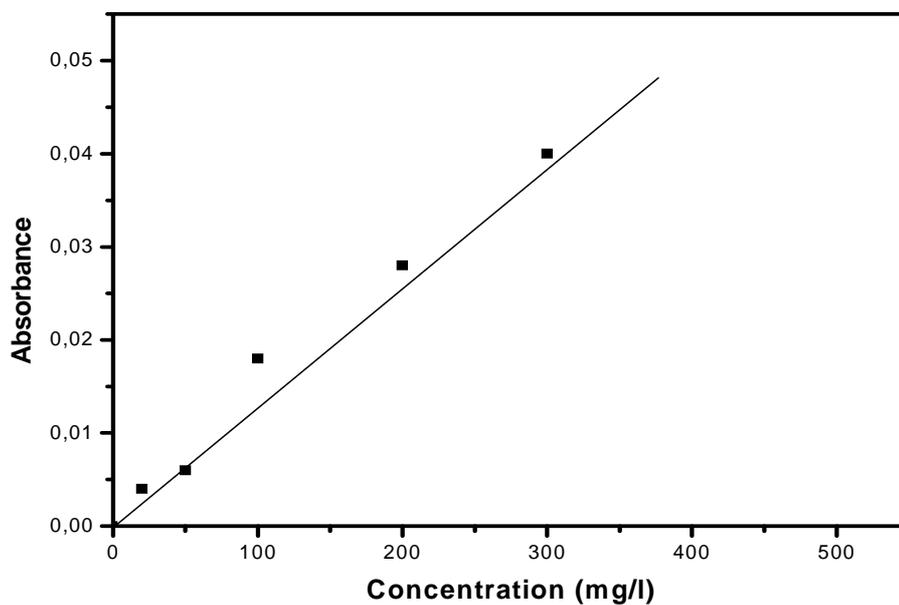
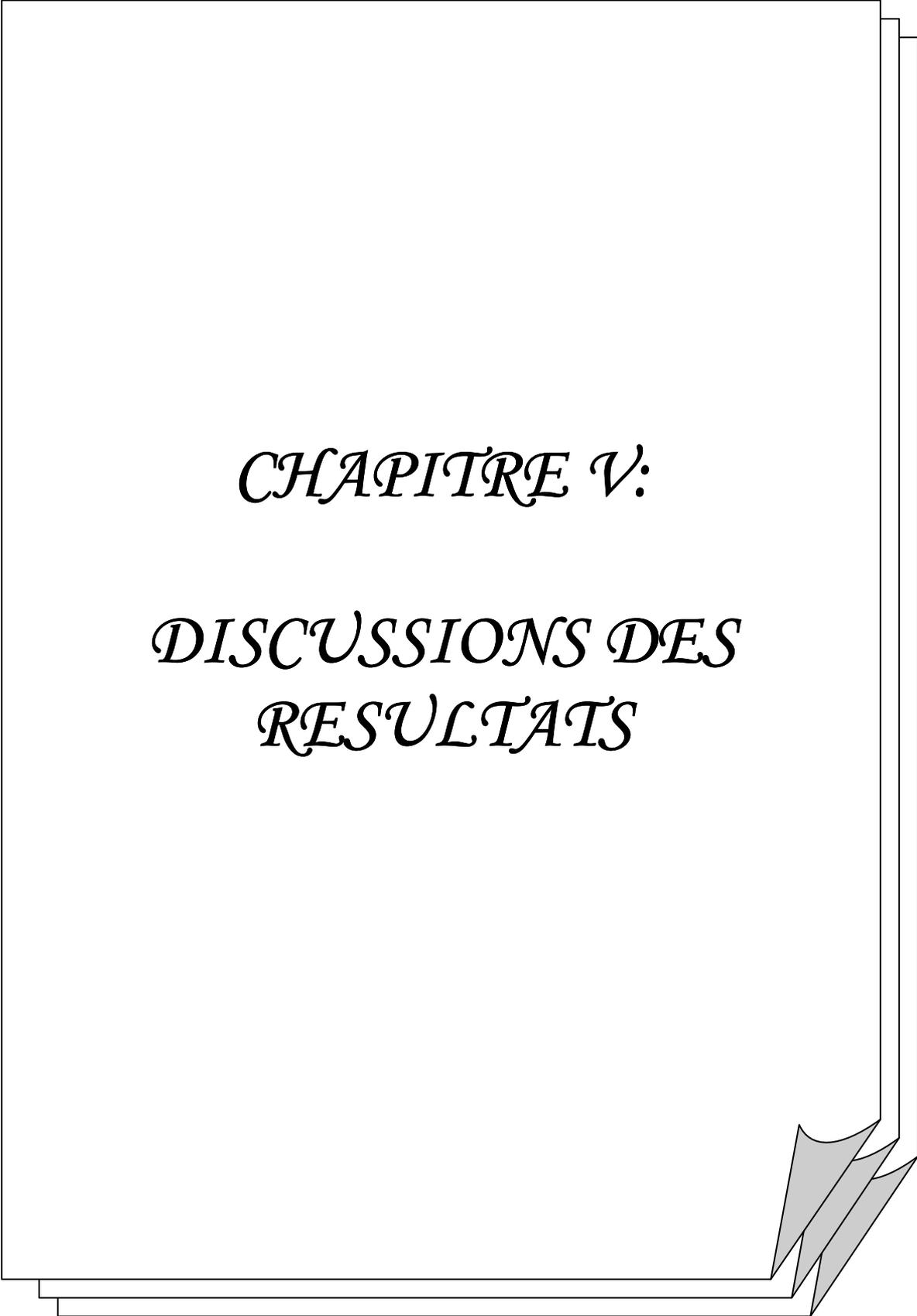


Figure 5. Courbe étalonnage des ions de sodium

4.8. Dosage des ions sulfates

Les ions sulfates sont dosés par volumétrie en utilisant du sulfate de baryum et en milieu alcoolique. L'alizarine sulfonate de sodium est utilisée comme indicateur. Les ions gênants sont éliminés par passage de l'échantillon sur une résine cationique [31].



CHAPITRE V:

DISCUSSIONS DES
RESULTATS

Chapitre V : Discussion des résultats

Partie I: Adoucissement des eaux de sidi mahdi par l'addition de la chaux

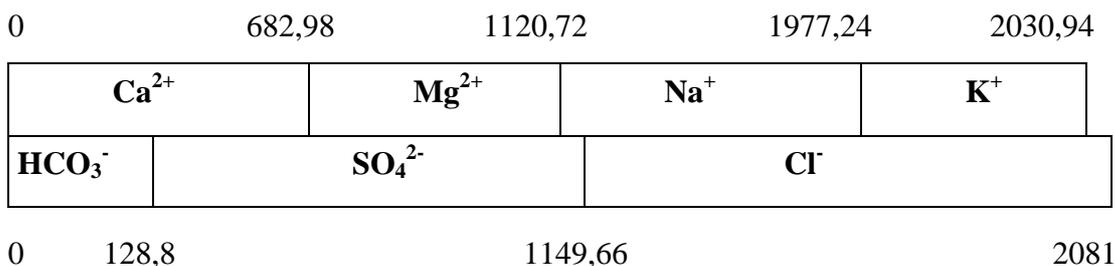
L'adoucissement à la chaux a été choisi en basant sur les critères suivants : disponibilité, faible coût de revient et par l'absence des effets secondaires. C'est une suite au travail déjà entamé par [34]. Notre travail est axé sur une étude comparative de l'efficacité d'adoucissement des eaux géothermales par deux types de chaux, l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) et l'oxyde de calcium (CaO).

Les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux albiennes du forage de Sidi Mahdi sont consignées dans le tableau 9 suivant.

Tableau 9. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'albien de Touggourt

Elément	Concentration		
	mg/L	méq	eq de CaCO_3
Calcium (Ca^{2+})	273,19	13,63	682,98
Magnésium (Mg^{2+})	106,31	8,78	437,745
Sodium (Na^+)	394,00	17,13	856,52
Potassium (K^+)	42,00	1,08	53,7
Fer (Fe^{2+})	0,13	0,00	-
Chlorure (Cl^-)	666,24	18,79	938,366
Sulfate (SO_4^{2-})	980,00	20,42	1020,833
Bicarbonates (HCO_3^-)	157,14	2,58	128,8
pH	8,02		
Conductivité en $\mu\text{S} / \text{Cm}$	3300,0		
Salinité totale en g/L	1,70		
Dureté totale en ppm de CaCO_3	1120,80		
Dureté totale en degré français	112,08		
Titre alcalimétrique complet (TAC) en ppm de CaCO_3	128,8		
Titre alcalimétrique complet (TAC) en degré français	12,88		

Ces caractéristiques sont présentées sous forme d'un diagramme dite à barre des eaux brutes. Ce dernier à pour avantage de déduire directement la dureté total et la dose optimale de la chaux nécessaire à l'élimination de la dureté carbonatée calcique :



1.1. Etude théorique

L'étude théorique de ce procédé à pour double avantage: de prévoir les résultats de traitement, orienté le procédé adéquat et de confronté les résultats théorique avec les résultats expérimentaux. Pour aboutir aux résultats escomptés on doit suivre les étapes suivantes :

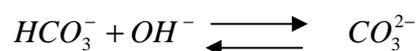
1.1.1. Déterminé la quantité de la chaux optimale

La quantité de la chaux nécessaire dans le cas de l'addition de la chaux seule est équivalente à la concentration des ions de bicarbonates (HCO₃⁻) dans l'eau [33]. Selon le diagramme à barre des eaux brutes, la concentration de la chaux nécessaire pour réduire la dureté carbonatée calcique des eaux albiennes du forage de sidi mahdi est de 128,8 mg/l de CaCO₃. On additionnant cette concentration au diagramme à barre des eaux brutes, ce dernier devient :

- Addition de la chaux seule

128,8	0		682,98	1120,72	1977,24	2030,94
Ca²⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺		
OH⁻	HCO₃⁻	SO₄²⁻		Cl⁻		
128,8	0	128,8		1149,66		2081

Après addition de la chaux, la réaction des bicarbonates (HCO₃⁻) et de l'hydroxyde (OH⁻) issue de la chaux est rapide et ce transforme en carbonates (CO₃²⁻) selon la réaction suivante:



et le diagramme à barre précédent devient :

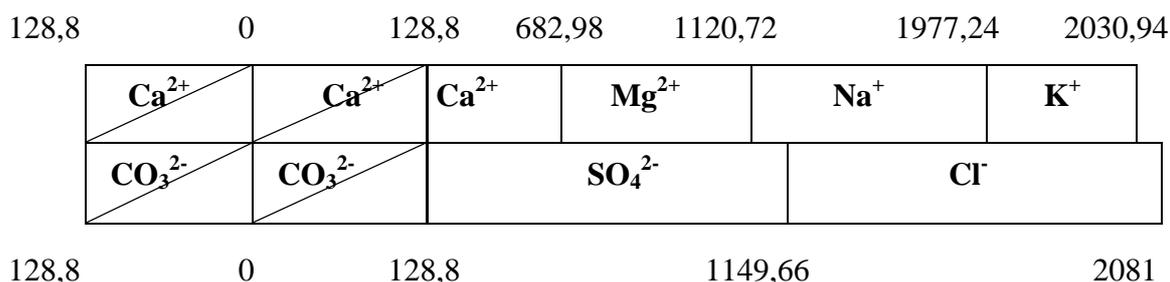
128,8	0		682,98	1120,72	1977,24	2030,94
Ca²⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺		
CO₃²⁻	CO₃²⁻	SO₄²⁻		Cl⁻		
128,8	0	128,8		1149,66		2081

1.1.2. Précipitation de carbonates de calcium (CaCO₃)

Selon le diagramme ci-dessus on observe que les conditions à la précipitation de calcium sont réunies et une zone de précipitation est clairement distincte comme l'indique les résultats indiquées sur le diagramme à barre suivant :

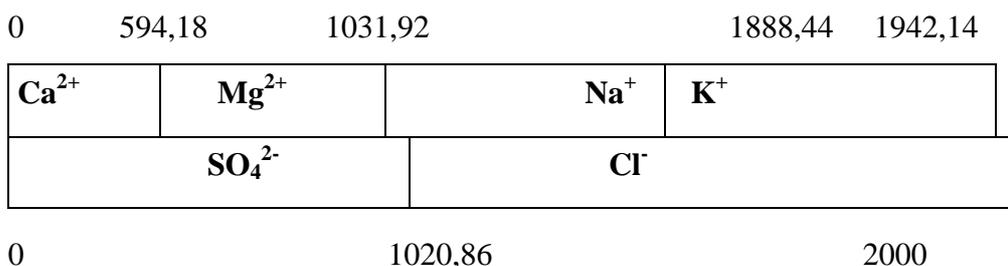
La masse de calcium précipitée si on considère que la totalité du calcium liée au carbonate, c'est-à-dire la dureté carbonatée calcique sera éliminé est de 257,6 mg (128,8 x 2).

- Précipitation de CaCO₃



Le résultat final théorique de traitement des eaux en utilisant la chaux seule est présenté dans le diagramme à barre suivant:

Qualité final des eaux de Sidi Mahdi traitée à la chaux Ca(OH)₂ seul



De ce diagramme on séduit que la dureté totale des eaux traitées est de 1031,92 mg/l de CaCO₃, soit une diminution de 88,8 mg/l de CaCO₃. L'efficience maximale est de 8%. De ce résultat on déduit que la dureté dominante des eaux de Sid Mahdi étudiées est de type non carbonatée et par conséquent le procédé à la chaux ne doit pas être la bonne solution aux problème d'entartrage auxquels est confronté la région de l'Oued R'hir. Par ailleurs est pour confirmer ce résultat, une

expérience au laboratoire avec de l'eau en question est réalisée on suivant les mêmes démarches abordées dans l'étude théorique. Le résultat comparatif avec la chaux vive et éteinte est consigné respectivement dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux Ca(OH)_2

Eléments	Unité	Eaux Brutes	Eaux traitée à la chaux	Les normes de l'OMS
Ca^{2+}	mg/L	273,19	257,79	200
Mg^{2+}		106,31	102,14	150
HCO_3^-		157,14	19,76	-
pH	-	8,02	8,90	7-8,5
Conductivité	$\mu\text{S} / \text{Cm}$	3300	3340	-
Dureté	$^\circ\text{F}$	112,08	83,51	50

Tableau 11. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux CaO

Eléments	Unité	Eaux Brutes	Eaux traitée à la chaux CaO	Les normes de l'OMS
Ca^{2+}	mg/L	273,19	263,89	200
Mg^{2+}		106,31	102,38	150
HCO_3^-		157,14	66,31	-
pH	-	8,02	7,85	7-8,5
Conductivité	$\mu\text{S} / \text{Cm}$	3300	3380	-
Dureté	$^\circ\text{F}$	112,08	107,92	50

De ces résultats expérimentaux on confirme que l'efficacité de traitement à la chaux (vive et éteinte) des eaux albiennes de Sidi Mahdi est faible. Les teneurs en calcium passent de 273,19 mg/l avant traitement à la teneur de 263,886 mg/l ou à 257,794 mg/l respectivement en utilisant la chaux vive (CaO) et la chaux éteinte (Ca(OH)_2). Ainsi, la dureté total passe de 1120,8 à 835,05 mg/l de CaCO_3 pour l'hydroxyde de calcium et à 1079,2 mg/l de CaCO_3 en utilisant l'oxyde de calcium. De ces résultats il est décidé d'orienter le traitement de la dureté des eaux de la région étudiée avec du carbonate de sodium.

Le suivi de l'évolution du pH (figure 6) et de la conductivité électrique (figure 7) au cours de traitement avec la chaux (vive et éteinte) en fonction de temps montre qu'en dix minutes après l'addition de la chaux le pH et la conductivité des eaux augmentent. Il s'agit d'enrichissement des eaux par les ions OH^- et Ca^{2+} . Pour le pH, on constate (figure 6) qu'au-delà de 10 minutes de réaction le potentiel d'hydrogène chute rapidement et au bout de 40 minutes, pour la chaux éteinte et après 30 minutes pour la chaux vive, un palier apparaît indiquant l'équilibre et la fin de la précipitation de la totalité du calcium lié aux bicarbonate.

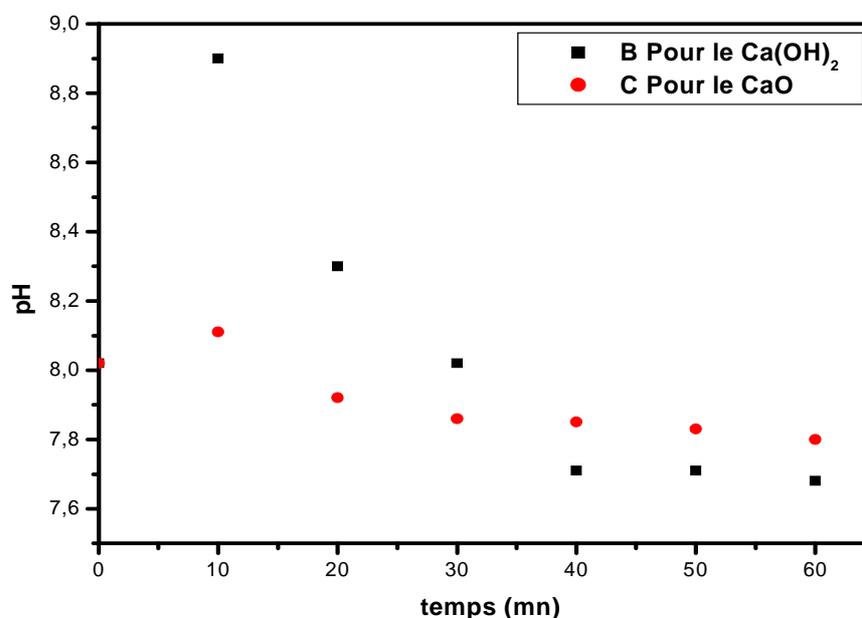


Figure 6. Évolutions du pH des eaux au cours du traitement à la chaux.

Les observations précédentes restent valables pour le cas de l'évolution de la conductivité électrique (figure 7), avec une différence la diminution de la conductivité électrique dans le cas de l'utilisation de la chaux vive est retardée de 10 minutes comparativement à celle observée avec la chaux éteinte. Ce comportement semble être expliqué à la cinétique de la réaction entre les OH^- et HCO_3^- qui aboutit à la formation du CO_3^{2-} .

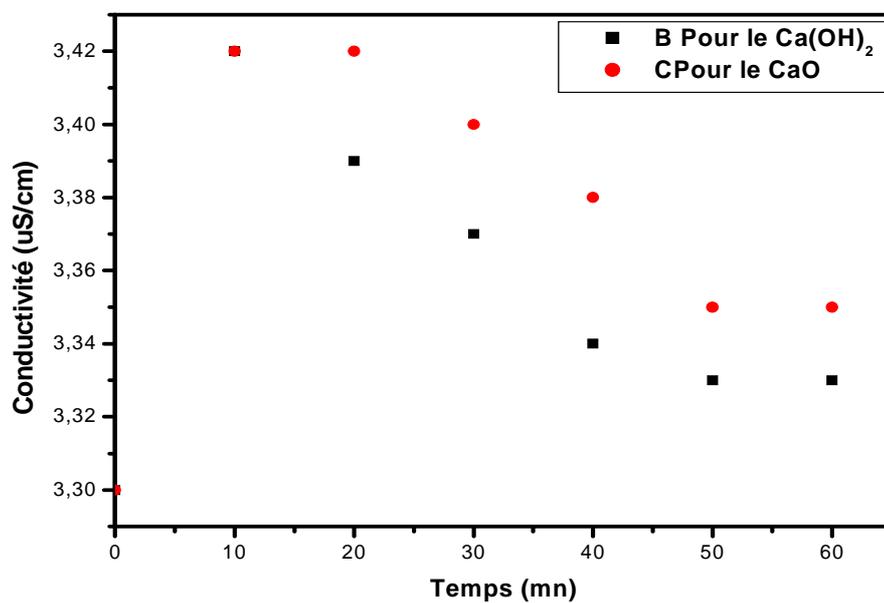


Figure 7. Évolutions de la conductivité des eaux au cours du traitement à la chaux.

Partie II: Adoucissement des eaux de sidi mahdi par addition du carbonate de sodium

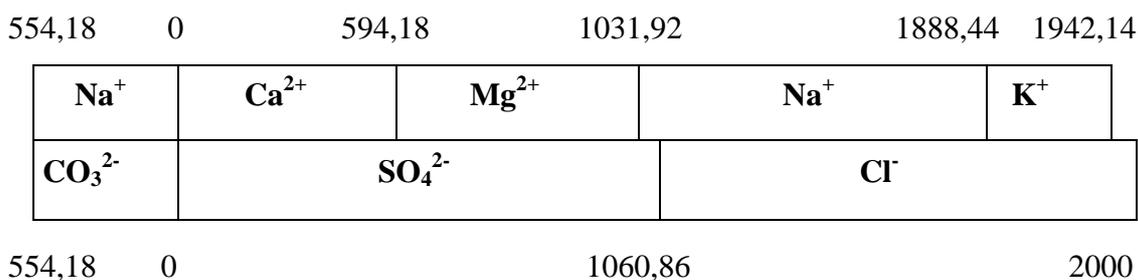
La décarbonations à la chaux (Ca(OH)_2 et CaO), montre que la dureté des eaux de la région de Touggourt est de type non carbonatée et le carbonate de sodium (Na_2CO_3) est la solution pour ce type de dureté. Cette partie de notre travail est réservée à l'étude de l'efficacité du carbonate de sodium sur l'amélioration de la dureté des eaux. Le procédé est basé sur la précipitation du calcium liées aux Cl^- et SO_4^{2-} .

I.1. Etude théorique

Comme dans le cas de traitement de la dureté carbonatée des eaux à la chaux, on suivre les étapes suivantes:

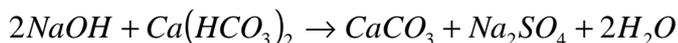
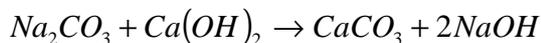
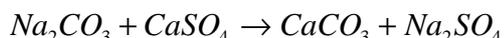
1.1.1. Quantité de carbonate de sodium optimale

La quantité de Na_2CO_3 en mg/l de CaCO_3 nécessaire à l'élimination de la dureté non carbonatée associé au calcium est de 554,18 mg/l de CaCO_3), soit équivalente à la concentration du calcium résiduel restant en solution après traitement à la chaux. La caractéristique des eaux brutes est présentée sur le diagramme à barre suivant :



1.1.2. Précipitation du carbonate de calcium

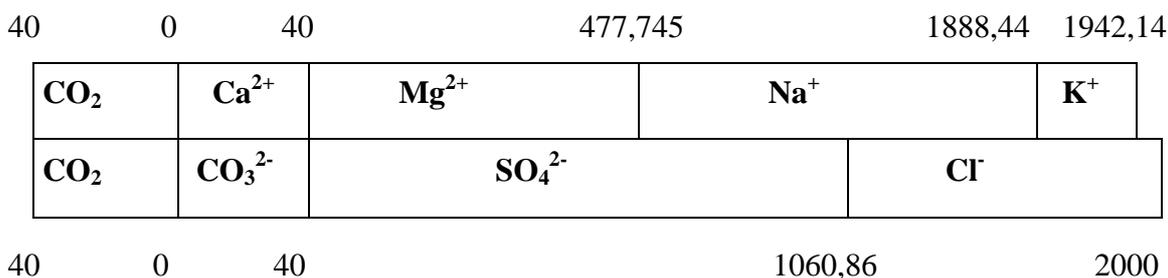
Comme l'indique le diagramme suivant, la précipitation du carbonate de calcium est spontanée après l'addition du carbonate de sodium. Par ce procédé l'ensemble du calcium lié au chlorure et au sulfate sera précipité. Les réactions chimiques régissant ce phénomène sont les suivantes :



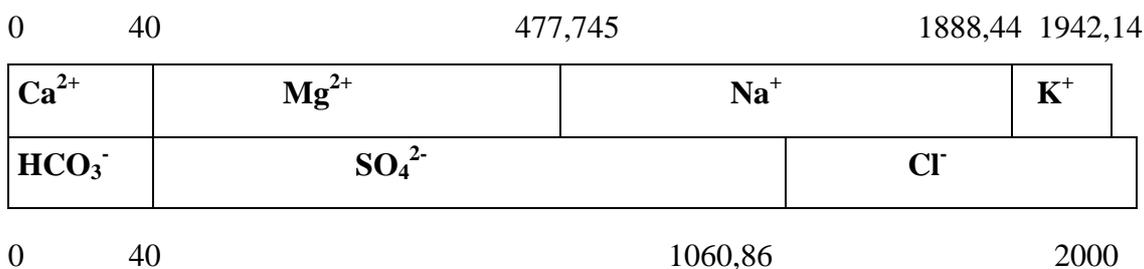
554,18	0	554,18	594,18	1031,92	1888,44	1942,14
Ca²⁺	Na⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	
CO₃²⁻	CO₃²⁻	SO₄²⁻		Cl⁻		
554,18	0	40	1060,86		2000	

Par ailleurs, pour éviter l'agressivité des eaux traitées et prévoir le phénomène de la corrosion des conduites, on laisse 40 mg/l du calcium précipité et ce par barbotage d'un volume du CO₂ équivalent à la concentration du calcium résiduel, soit 40 mg/l.

Le CO₂ additionné à pour but de re-solubiliser une masse de CaCO₃ précipité à la forme soluble dans l'eau (Ca(HCO₃)₂). Cette dernière est suffisante dans le temps de provoquer la précipitation d'une mince couche de carbonate de calcium sur les parois des conduites et par conséquent isole la conduite des eaux transportées. Le mécanisme et l'action du CO₂ sont présentés sur le diagramme à barre ci-dessous :



Les caractéristiques finales des eaux traitées par le Na₂CO₃ présentée sur le diagramme à barre suivant:



De ce diagramme on déduit que la dureté total finale de l'eau est de l'ordre de 478 mg/l de CaCO₃. L'efficience de traitement est de plus de 57 %. La dureté passe de 1120,8 mg/l de CaCO₃ avant traitement à 477,7 mg/l de CaCO₃.

I.2. Etude pratique

Après l'étude pratique par l'addition du carbonate de sodium, le tableau (12) a été établi d'après les résultats d'analyses chimiques fournis par laboratoire de Ghardaia.

Tableau 12. Résultats d'adoucissement des eaux au carbonate de sodium

Eléments	Unité	Eaux Brutes	Eaux traitée par (Na ₂ CO ₃)	Les normes de l'OMS
Ca ²⁺	mg/L	273,19	62.52	200
Mg ²⁺		106,31	75.09	150
Na ⁺		394,00	670	-
K ⁺		42	50	-
Conductivité	μS / Cm	3300	3840	-
Dureté	°F	112,08	46,5	50

Le traitement avec le carbonate de sodium, montre (tableau 12) une très bonne efficacité d'adoucissement comparativement au traitement à la chaux. Le rendement d'élimination de la dureté est supérieur à 57 %. La dureté des eaux albiennes du forage de Sidi Mahdi devient après traitement de l'ordre de 46,50 °F soit inférieure à la valeur guide recommandée par l'organisation Mondiale de la Santé (50 °F).

Cependant, il faut noter que le Na₂CO₃ a ajouté à l'eau traitée plus de 255 mg/L le sodium à la teneur initiale dans l'eau (394 mg/L). Ainsi, bien qu'on n'ait pas établi de rapport direct entre le sodium et la santé humaine, la norme « eau potable » concernant le sodium (150 mg/L) serait dépassée. Le tableau 12 montre que la concentration de sodium passe de 394 mg/L avant traitement à la valeur 670 mg/L après traitement.

L'évolution de la concentration du calcium (figure 8) et de la conductivité (figure 9) en fonction de la concentration du carbonate de sodium ajoutée montre que la teneur optimale en sodium nécessaire pour réduire la dureté de 1120,8 à 477,7 mg/l de CaCO₃ et de 200 mg/l en Na₂CO₃. Par ailleurs, la conductivité électrique des eaux montre une évolution linéaire en fonction du carbonate de sodium. La conductivité passe de 3300 μS/cm (avant traitement à 3840 μS/cm après traitement.

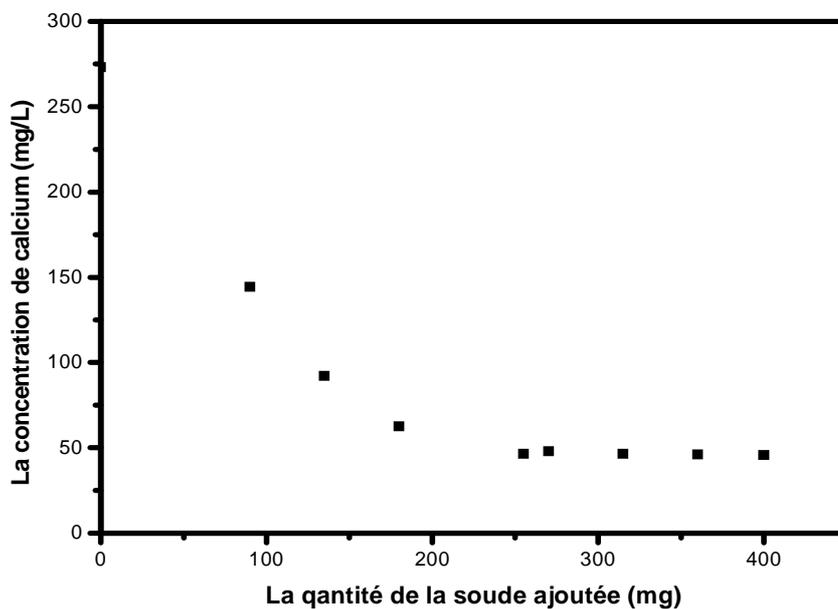


Figure 8. Évolutions de la concentration de calcium dans les eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné

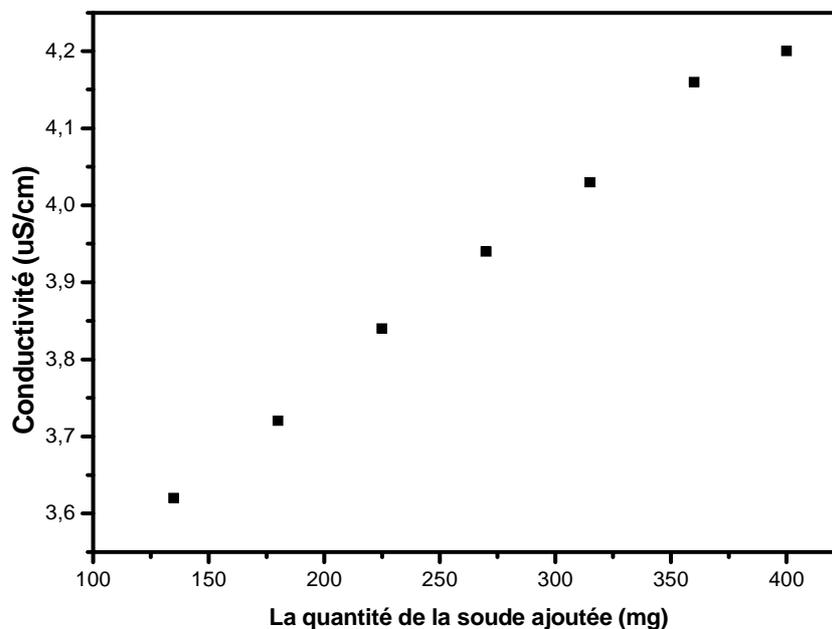


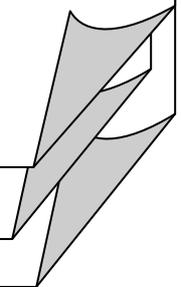
Figure 9. Évolutions de la conductivité des eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné.

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

L'étude de traitement de la dureté des eaux de la vallée de l'Oued R'hir montre que le phénomène d'entartrage des conduites, est essentiellement due aux conditions de température (55 à 60 °C) très favorables. Cette dernière conjuguée à la forte pression des eaux provoque la transformation des bicarbonate au carbonate et la libération du CO₂ et non à la teneur en calcium et en magnésium. Ces derniers en comparaison avec la norme de l'OMS, respectivement 200 et 150 mg/l sont acceptable. Cependant, il semble que dans ces conditions de température et de pression, les concentrations en ces deux éléments (Ca²⁺ et Mg²⁺) sont suffisantes de provoquer l'entartrage et le bouchage des conduites des eaux. L'observation sur site montrent que les conduites situées dans le premier kilomètre, de la tête de puits jaillissant, sont les plus touchées par le phénomène d'entartrage, ou la température et la pression sont très élevées et favorables. Le procédé de décarbonatation des eaux géothermales, met en évidence que la dureté des eaux est de type non carbonaté. L'efficacité de traitement par la chaux est très faible (< 10 %) comparativement à l'adoucissement avec le carbonate de sodium qui présente une efficacité de traitement (> à 57%). Ce résultat montre que la dureté dominante des eaux est de type non carbonatée.

Bibliographie



Bibliographie

- [1]-**BEN-MAAMAR. Y** (2003). L'adoucissement et la déminéralisation: développement théorique et diagnostic technique. ENIP, Skikda. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 269
- [2]- **Environnement Canada** (1977). Qualité des eaux de surface au Canada- un Aperçu. Direction de la qualité des eaux. Direction des eaux intérieures
- [3]- **KATTEB. A**, (2001). Les ressources en eau en Algérie: stratégie, enjeux et vision, Désalination, 136, 25-33.
- [4]-**DAHMANI. B, BITHOREL. C**, (2001), Déminéralisation des eaux saumâtres de Brédéah dans la région du bassin hydrographique Oranie-Chott-Chergui. Partie I: Hydrogéologie de la nappe Brédéah. Desalination, 137, 297-309.
- [5]-**Document de l'ANRH**. (Rapport technique: les forages)
- [6]- **MESSAITFA. A, BAOUIA. K, SAIDI. M, MEGHEZZI. A, HADJAJ. M** (2003), adoucissement des eaux géothermales de la cuvette de Touggourt (Sud-est Algérie): Procédé à la chaux et au carbonate de sodium.
- [7]-**BESSA. N** (2003). Monographie de la vallée de Oued R'hir. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 5
- [8]- **HASSANINE. C** (2003). Entartrage de canalisations et équipements, constats et solutions. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 74
- [9]- **TOUIL. Y** (2003). Qualité des eaux d'alimentation de la ville de Ouargla et procédés de traitement. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 73
- [10]-**BELKCEMI. M, BENSEDDOUK. K, NEZZAL. G** (2003). Traitement par osmose inverse d'une eau de forage, Beb Azzouer Algérie. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 41

- [11]- **ARROUCHE. S, HAKIM. H** (2003). Etude du colmatage d'une membrane d'osmose inverse, Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 99
- [12]- **ANTOLY. N** (2003). Les méthodes employées pour l'adoucissement la décarbonatation et le dessalement des eaux. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 102
- [13]-**BRODSKY. A, ZDENEK. V** (1971). Possibilité décarbonatations des eaux à la chaux la technique de l'eau et l'assainissement, 3.33-40
- [14]- **CLAUDE. C** (1999), les traitements des eaux
- [15]- **BAN NOUD. A.H,** (1993). Desalination, 93-545.
- [16]- **MEGDOUD. M** (2003). Qualité des eaux du Sahara septentrional. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 42
- [17]- **HENRY. R** (1990), fondements théoriques au traitement chimiques des eaux volume I, p 519
- [18]- Mémento technique de l'eau (1989). Tom I, 9^{ème} édition.
- [19]- **ROLAND. V** (2000). Eau, environnement et santé publique
- [20]- **ناصر الحابك** (1989). طرق تحليل المياه ديوان المطبوعات الجامعية الجزائر, ص 173
- [21]- **Organisation mondiale de la santé** (1984). Eaux de boisson: teneur en sodium, teneur en chlorures et conductivité.
- [22]- **BANNOUD. A.H** (2001). Elimination de la dureté et des sulfates contenus dans les eaux par nanofiltration, Desalination, 137, 133-139
- [23]- **RUMEAU. M, et PONTIE. M,** (1998). Potabilisation d'une eau saumâtre hyperfluoruré du Sénégal par déminéralisation sélective, Hydrotop, Marseille, 21-23 Avril 1998.
- [24]- **POITIE. M, et al.** (1995). Nanofiltration: a new method against fluoride ion poisoning in Senegal, Euromembrane 1995, Bath (R.U)m 8-20 September, 1995.
- [25]-**ROSSET. R, SOK. P, POINDESSOUS. G, BEN AMOR. M,** (1998). Caractéristiques de la compacité des dépôts de carbonate de calcium d'eaux géothermales du Sud tunisien par impédancemétrie, C/R/Acad. Sci. Paris, t. 1, Série II c, 571-759.

- [26]- **MESSAITFA. A.** (1997). Transfert d'eau, des sédiments et des polluants associés sur le bassin de l'III: cas de mercure, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg-France, 210 p.
- [27]- **El FIK. H, MANZOLA. A. S, BEN AMOR. M.**, (2003). Decarbonation of geothermal waters by seeding with aragonite crystals coupled with air bubbling. Applied Geochemistry, 18, 1137-1148.
- [28]- **BOUCHKIMA. B** (2003). L'eau de la nappe albienne du Sud algérien, Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 39
- [29]-**ROSSIT. R, DOUVILLEI. S, BENAMOR.M et WALHA.K** (1999). L'inhibiteur de l'entartrage par les eaux géothermales du sud tunisien. Etude sur site. Revue des sciences de l'eau, 12/4, 753-764
- [30]- **NOWEIR. A, RADWAN. S** (2003). Des solutions pour les problèmes des eaux du Sud algérien. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud, p 98
- [31]-**RODIER. J** (1984). L'analyse de l'eau, 7^{ème} édition, 2-04-015615-1, Paris.
- [32]-**TARDAT H .M** (1984). Chimie des eaux, édition de griffon d'argile, I.N.C, Canada
- [33]- **ROYMOND. D** (1990). Le traitement des eaux, 2^{ème} édition, p 133
- [34] - [باوية قيس (2003), معالجة عسرة مياه وادي ريغ, مذكرة ماجستير, جامعة ورقلة