



المجلة الجزائرية للمناطق الجافة
Journal Algérien des Régions Arides (JARA)
Algerian Journal of Arid Regions

Research Paper

**Adoucissement par précipitation a la chaux et le carbonate de sodium
 des eaux de l'albien d'Ain Sahara (Touggourt – Algérie)**

Softening of the Albian water Ain Sahara (Touggourt - Algeria) using precipitation by
 lime and sodium carbonate

A. Mellah^{1*}, N. Bouchahm¹, W. Chaib¹, Y. Abdelhafid¹

1: Centre De Recherche Scientifique Et Technique Sur Les Régions Arides, CRSTRA, Compus Universitaire Université Mohamed Khider, Biskra.

Received: 30 October 2019 ; Accepted: 14 November 2019; Published: December 2019

Abstract

The aim of this work is to soften the water of Ain Sahara borehole of the Continental Intercalaire aquifer, which is located in the Touggourt region (South-East Algeria) using slaked lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and sodium carbonate (Na_2CO_3). This reservoir is particular by its considerable volume both its extension over more than 600,000 km² and its average thickness of several hundred meters. This underground water aquifer situated at an average temperature of 57 °C is an important reserve of thermal water. The exploitation of this Albian aquifer is done at a rate of 150 L s⁻¹, which equivalent of 12960 m³ / d and represents an operating capacity of 14.2 million m³/year. These waters are highly mineralized (1.8 to 2.5 g L⁻¹), with a very high level of hardness (102 °f). The bar chart has shown that the concentration of lime needed to reduce the carbonate carbon hardness of this water is equivalent to the concentration of bicarbonate ions (HCO_3^-) of 120 mg L⁻¹. According to the bar chart, the maximum efficiency is 9%, therefore the lime process should not be the right solution to scale problems in the Ain Sahara region. The parameters study such as pH and conductivity shows an increase in pH after 10 min of lime addition arriving to 10.15 followed by a slow decrease to 9.90 after 50 min. The conductivity study shows as well an increase after 10 min of lime addition followed by a decrease arriving to 2.69 $\mu\text{S cm}^{-1}$. In both cases, the pH increase is due to the enrichment of the water by the OH^- and Ca^{2+} ions. The treatment by sodium carbonate shows a very good softening efficiency compared to the lime with hardness removal efficiency greater than 54%.

Key words: Softening; Scaling; Lime; Sodium Carbonate.

* Corresponding author : **MELLAH Abdelkarim**

E-mail address: karim.epa2008@hotmail.fr

Résumé

Le présent travail a pour objectif, l'adoucissement des eaux du forage d'Ain Sahara du réservoir aquifère du Continental Intercalaire qui se trouve dans la région de Touggourt (Sud-est Algérie) en utilisant la chaux éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et le carbonate de sodium (Na_2CO_3). Ce réservoir est caractérisé par son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600.000 km^2 et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Cette nappe albien qui se trouve à une température moyenne de 57 °C est une importante réserve en eau thermale dont le débit d'exploitation est de 150 L s^{-1} , soit 12960 m^3/j , ce qui représente une capacité d'exploitation de 14.2 millions de m^3/an . Ces eaux sont fortement minéralisées (1.8 à 2.5 g L^{-1}) et d'une dureté très élevée (102 °f). Le diagramme à barre a montré que la concentration de la chaux nécessaire pour réduire la dureté carbonatée calcique de cette eau est équivalente à la concentration des ions bicarbonate (HCO_3^-) de 120 mg L^{-1} . D'après le diagramme l'efficace maximale est de 9% et par conséquent le procédé à la chaux ne doit pas être la bonne solution aux problèmes d'entartrage dans la région d'Ain Sahara. L'étude des paramètres tels que le pH et la conductivité électrique montre une augmentation du pH après 10 min de l'addition de la chaux atteint le 10.15 suivie d'une diminution lente jusqu'à 9.90 après 50 min. L'étude de la conductivité électrique montre aussi une augmentation après 10 min d'addition de la chaux suivie par une diminution qui arrive à 2.69 $\mu\text{S Cm}^{-1}$. Dans les deux cas l'augmentation du pH est due à l'enrichissement des eaux par les ions OH^- et Ca^{2+} . Le traitement avec le carbonate de sodium, montre une très bonne efficacité comparée avec celle du chaux d'adoucissement et avec un rendement d'élimination de la dureté supérieur à 54%.

Mots clés : Adoucissement ; Entartrage ; Chaux ; Carbonate de Sodium.

Introduction

L'un des problèmes majeures qui menace les ouvrages hydraulique et les conduites d'Alimentation en Eau Potable (AEP) dans le sud Algérien en particulier la cuvette de Touggourt est la diminution de la durée de vie des conduites d'AEP et la corrosion prématurée de ces conduites due à la présence des éléments responsable de la dureté (Ca^{2+} , Mg^{2+} , fer..) et des agents de corrosion (Cl^- , CO_2 , O_2 ...) dans les eaux de la nappe de l'Albien (Ouali, 2006). L'accumulation d'une épaisseur de tartre dans les équipements conduit à une diminution des sections de passage de l'eau, ce qui augmente les dépenses énergétiques des pompes et cause aussi le blocage des organes de manœuvre des robinetteries. Les tartres ont ainsi des conséquences thermiques et énergétiques à cause de ses conductivités thermiques très faibles en regard des matériaux utilisés dans la construction des échangeurs tels que l'acier et le cuivre (Hort, 1994).

La formation des tartres sont à l'origine de certaines maladies tels que les calculs rénaux et la calcification du système cardio-vasculaire (Baouia et Messaitfa, 2011). Il a été montré que les réservoirs, les réseaux d'alimentation d'eau et les points de puisage (tels que les robinets) des réseaux d'eau chaude sanitaire pourraient, s'ils étaient entartrés, être favorables à la prolifération de *Legionella*.

En effet, malgré sa dureté élevée, la nappe de l'Albien reste toujours la source potentielle en eau dans cette région. La formation et la précipitation du calcaire due à la forte minéralisation de ces eaux sont les contraintes majeures de la bonne gestion des ouvrages hydrauliques, ce qui nécessite le traitement de ces eaux à fin de réduire les différents types de risque (Tlili et Elfil, 2001).

Des procédés physiques et chimiques sont utilisés actuellement pour éliminer le tartre et empêcher l'apparition des germes. Parmi les principaux procédés chimiques utilisés on peut citer les inhibiteurs chimiques (Ghizellaoui et al. 2011), vaccination acide (Mabrouk, 2011), déminéralisation sur des résines échangeuses d'ions (Bentley, 1949). Pour les procédés physiques, on trouve la microélectrolyse de l'eau (Bentley, 1949 ; Rosset et Douville, 1999), la génération d'ondes électromagnétiques de haute fréquence envoyées dans des antennes bobinées sur les canalisations, et le passage de l'eau à travers des aimants permanents (Rosset et al. 1997).

Dans la région d'Ouargla et Touggourt, les puits albiens sont nombreux. Ces puits débitent une eau géothermale avec un débit moyen de 200 L s^{-1} . Ces eaux sont caractérisées par une salinité assez importante, une agressivité élevée, et une température dépasse les 65 °C au niveau de la source. Par conséquent, ces conditions sont plus favorable à la formation des dépôts de tartres dans les conduites et les circuits du refroidissement en augmentant ainsi les pertes de charges en relation

directe avec des dépenses énormes en énergie, et pour remplacer les conduites et les équipements lorsqu'ils sont complètement bouchés (Belattar et al. 2018 ; Koriba, 2007).

L'objectif de ce travail consiste à effectuer une étude comparative de traitement à la chaux et par le carbonate de sodium afin d'obtenir une eau de dureté conforme à la norme de l'O.M.S.

1. Matériels et Méthodes

1.1. Site de l'étude

La cuvette de Touggourt située au Sud-Est de l'Algérie (33° 07'N , 6°04'E, altitude ; 70 m) (figure 1), elle appartient à l'étage bioclimatique hyper aride très chaude (> 40 °C au mois de juillet) et caractérisé par une pluviométrie très faible et irrégulière (< 67 mm/an). Sa superficie de 600 000 km² couvre tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Figure1). Sa capacité est évaluée à 50 000 milliards de mètres cubes (Katteb et al. 2001), et elle est difficilement renouvelable (Dahmani et Bithorel, 2007). 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'âge variable selon les endroits. Le substratum est constitué des formations argilo-sableuses et argileuses, ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du Sud vers le Nord

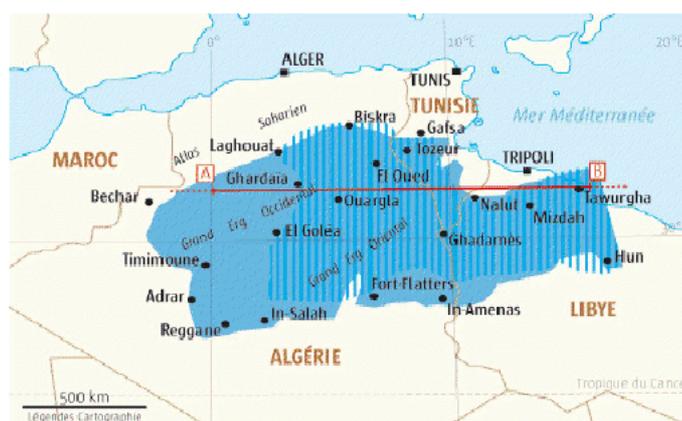


Figure 1. La nappe souterraine de l'albien en Algérie (Hamida et al. 2016).

Les 14,2 millions de mètres cubes distribués annuellement à Touggourt sont pompées de la nappe du Continental Intercalaire «dite de l'Albien », qui située à des profondeurs comprises entre 1758 –1799 m, où la température de l'eau à la tête des puits varie entre 55–60 °C. Ce pompage provoque une forte charge (pression) de la nappe sur tout le bassin oriental.

2.2. Formation de tartre :

Le tartre (figure 2) est constitué majoritairement de carbonate de calcium CaCO₃, il est fréquemment associé à un peu d'hydrogène ferrique lorsque l'eau circule dans des conduites en acier (Baouia et Messaitfa, 2011). La dureté d'une eau qui est le principal responsable du tartre est due à la présence d'ions métalliques bivalents tels que Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Sr²⁺.....etc, où les plus abondants sont les ions Ca²⁺ et Mg²⁺. En pratique, on considère souvent que la dureté totale d'une eau de consommation est égale à la somme de sa dureté calcique et de sa dureté magnésienne (Desjardin, 1997). Pour calculer la quantité de chaux nécessaire dans les procédés d'adoucissement par addition d'un excès de chaux ou par addition d'un excès de chaux et de soude, Il est important de connaître la dureté calcique et la dureté magnésienne de l'eau (Desjardin, 1997).

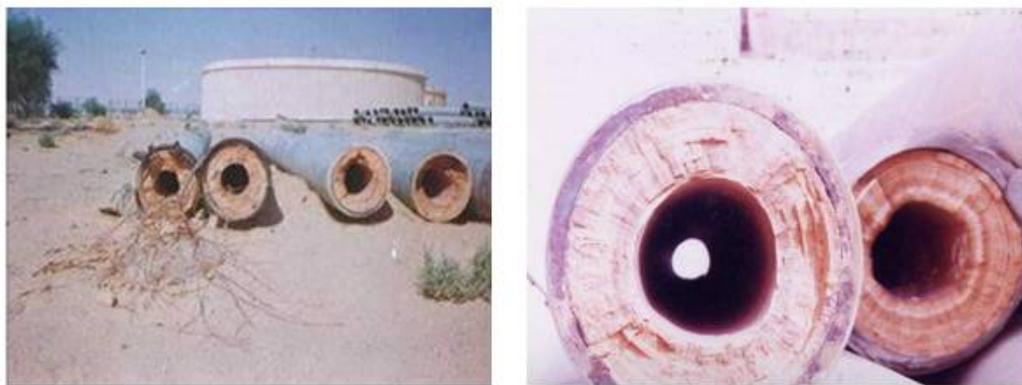
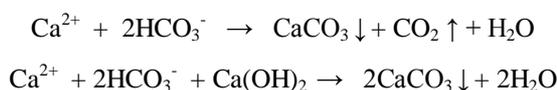


Figure 2. Phénomène d'entartrage à l'intérieur des conduites [4 ; 12].

La dureté carbonatée correspond à la partie de la dureté totale chimiquement équivalente à la quantité de bicarbonates présents dans une eau. Puisque la mesure de la quantité de bicarbonates (exprimée en CaCO_3), correspond en général à l'alcalinité de l'eau. On peut dire que l'alcalinité de la plupart des eaux est égale à leur dureté carbonatée. Les ions bicarbonates sont nécessaires à la précipitation de Ca^{2+} sous forme de CaCO_3 à température élevée. Cette précipitation, qui a lieu dans des bouilloires, est régie par les équations suivantes (Desjardin, 1997):



On peut classer la nature de l'eau suivant sa dureté, cette classification est représentée dans le tableau suivant:

Tableau 1. Classification de la nature de l'eau suivant la dureté (Berné et al. 1991).

La nature de l'eau	La dureté (méq L^{-1})
Eau très douce	0 - 1,5
Eau douce	1,5 - 3
Eau moyenne	3 - 6
Eau dure	6 - 10
Eau très dure	>10

2.3. Procède par addition de chaux et de soude

Ce procédé est basé sur l'utilisation de la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de la soude Na_2CO_3 , ce qui permet de réduire la dureté carbonatée et non carbonatée de l'eau. Les concentrations admissibles dans l'eau potable selon les normes de l'OMS et les normes européennes de potabilité des eaux (CEE) sont rassemblées dans le tableau 4.

Tableau 4: Les concentrations admissibles dans l'eau potable.

Eléments	Unité	O.M.S	C.E.E
pH	-	7-8.5	6.5-8.5
Conductivité	$\mu\text{S cm}^{-1}$	-	1250
dureté	$^\circ\text{F}$	-	10-35
Ca^{2+}	mg L^{-1}	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

Les relations entre la dureté, l'alcalinité et les différents ions en solution sont illustrées par la figure suivante (figure 3) :

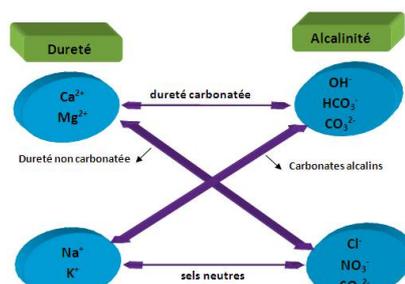
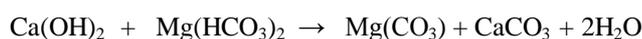
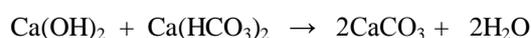


Figure 3 : Relations entre les divers ions présents dans l'eau.

2.4. Décarbonatations à la chaux

Ce procédé est employé lorsque la dureté carbonatée est due essentiellement aux ions Ca^{2+} . Pratiquement, l'addition de la chaux entraîne la précipitation du CaCO_3 (chaux seule) et du Mg(OH)_2 (chaux en excès), suite à l'augmentation du pH. La cinétique de cette réaction étant relativement lente, dont le procédé est accéléré soit par une recirculation 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 (Antoly, 2003 ; Brodsky et Zdenek, 1971) :



L'addition de la chaux nécessite plusieurs précautions lors de sa mise en œuvre, et l'eau ne doit pas contenir des colloïdes en suspension qui peuvent 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, ce procédé a plusieurs avantages tels qu'il est aisé à mettre en œuvre et ne nécessite pas l'utilisation d'équipements spécifiques, de plus, il n'est pas contraignant en exploitation.

2.5. Produits

Les produits utilisés sont la chaux, le carbonate de sodium, l'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA), l'acide sulfurique, et le Noir Eriochrome T (NET) achetés sigma Aldrich. Les plus importantes propriétés chimiques de la chaux utilisée sont indiquées dans le tableau 2. Les principales caractéristiques du carbonate de sodium sont citées dans le tableau 3.

Tableau 2. Propriétés chimiques de la chaux.

La substance	Le pourcentage (%)
Assy (T)	96
Carbonate de calcium (CaCO_3)	4
Fer (Fe^{+2})	0.05
Plomb (Pb^{+2})	0.005
Chlore (Cl)	0.02
Sulfate (SO_4^{2-})	0.05
Sodium (Na^+)	0.01
Zinc (Zn^{2+})	0.005
Potassium (K^+)	0.02

Tableau 3. Principales caractéristiques du carbonate de sodium (Na_2CO_3).

Eléments	Pourcentage
Fer (Fe^{2+})	0.002
Plomb (Pb^{2+})	0.002
Chlorure (Cl^-)	0.01
Sulfate (SO_4^{2-})	0.01
Sodium (Na^+)	99

2.6. Matériels

Pour les besoins des essais expérimentaux, on utilise un Jar test de type VELD SCIENTIFICA FC4S pour l'agitation, une balance analytique de type KERN ABS 80-4, capacité 83g, lisibilité 0.1mg WTW Multi 3430 Meter, un agitateur magnétique chauffant céramique de type Stuart CB162, et un conductimètre portable pour les tests de conductivité électrique.

3. Résultats et Discussion

3.1. Prélèvement des échantillons

Les prélèvements d'eau sont manuels et chaque échantillon est prélevé dans un flacon en plastique. Avant son remplissage, le flacon est rincé plusieurs fois avec de l'eau de forage. Les paramètres physico-chimiques de l'eau, avant et après traitement, ont été déterminés au laboratoire d'analyses d'eau au centre de recherche CRSTRA–Biskra (Tableau 5, 6). Les analyses ont été effectuées selon les méthodes décrites par (Rodier, 1987 ; Tardat, 1984). Pour notre recherche au laboratoire, nous avons commencé par les caractéristiques de ces eaux à fin d'étudier la décarbonatation à la chaux pour réduire la dureté de ces eaux. Le travail est basé sur les concentrations équivalentes de substances analysées des eaux et par l'application des relations suivantes :

$$C_{(\text{CaCO}_3)} = \frac{C \times 50}{ME} \quad (1)$$

On trace le graphe de bar pour les eaux étudiés, sachant que :

$$ME = \frac{M}{e} \quad (2)$$

$C_{(\text{CaCO}_3)}$: Concentration de l'élément (eq L^{-1}). C : Concentration de l'élément (mg L^{-1}).

ME : Masse équivalente de l'ion. M : Masse molaire de l'élément (g mol^{-1}), e : valence.

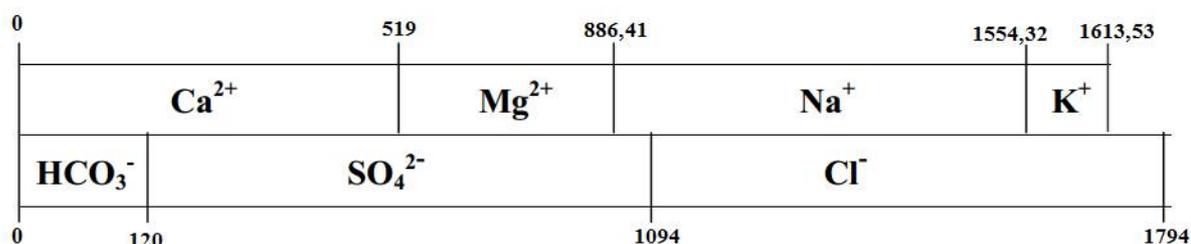
Tableau 5 : L'analyse de l'eau de l'albien d'Ain Sahara.

Les éléments	Concentration (mg L^{-1})	Concentration eq de CaCO_3
Ca^{2+}	208	519
Mg^{2+}	89.28	367.41
Na^+	307.24	667.91
K^+	46.3	59.21
Cl^-	497	700
HCO_3^-	146.4	120
SO_4^{2-}	936	974

Tableau 6. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'albien de Touggourt.

Elément	Concentration		
	mg L ⁻¹	méq	eq de CaCO ₃
Calcium (Ca ²⁺)	208	10.4	519
Magnésium (Mg ²⁺)	89.28	7.34	367.41
Sodium (Na ⁺)	307.24	13.63	667.91
Potassium (K ⁺)	46.3	1.19	59.21
Chlorure (Cl ⁻)	497	14.04	700
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	936	20.06	974
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	146.4	2.4	120
pH		7,13	
Conductivité en mS/cm		2,76	
Salinité totale en g L ⁻¹		1.4	
Dureté totale en ppm de CaCO ₃		886	
Dureté totale en degré français		88.6	
Titre alcalimétrique complet (TAC) en ppm de CaCO ₃		120	
Titre alcalimétrique complet (TAC) en degré français		12	

Les caractéristiques physico-chimiques ainsi mentionnées dans les tableaux 5 et 6 sont présentées sous forme d'un diagramme dit à barre des eaux brutes. Ce dernier a pour avantage de déduire directement la dureté totale et la dose optimale de la chaux nécessaire à l'élimination de la dureté carbonatée calcique :

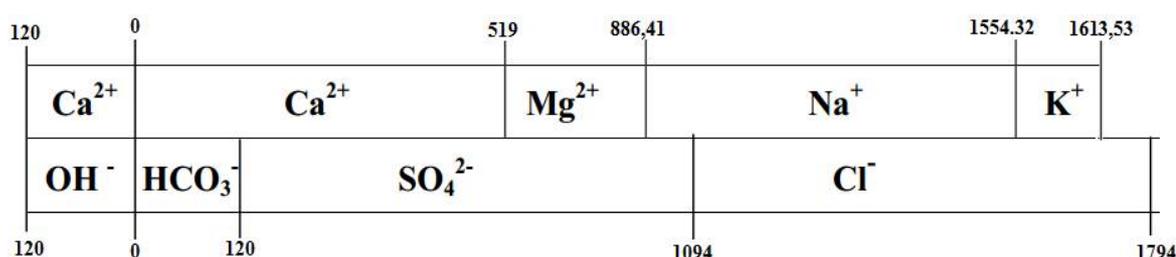


3.2. Étude théorique standard

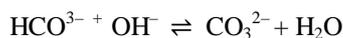
L'étude théorique du procédé d'adoucissement par addition de la chaux a pour objectifs de prévoir les résultats de traitement, orienté le procédé adéquat et de confronter les résultats théoriques avec les résultats expérimentaux.

3.2.1. Déterminer la quantité de la chaux optimale

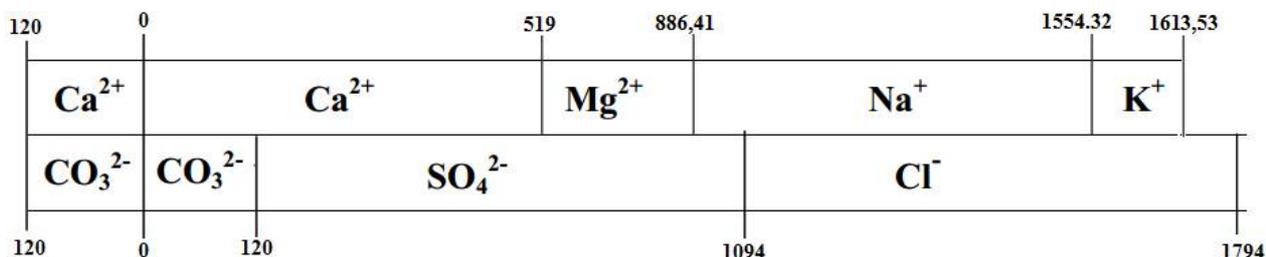
D'après Raymond Desjardins (Desjardins, 1997), la quantité nécessaire de la chaux seule est équivalente à la concentration des ions de bicarbonates (HCO₃⁻) dans l'eau. Selon le diagramme à barre des eaux brutes, dans notre cas, la concentration de la chaux nécessaire pour réduire la dureté carbonatée calcique des eaux de l'albien du forage d'Ain Sahara est de 120 mg L⁻¹ de CaCO₃. Par addition de cette concentration au diagramme on trouve le résultat suivant :



Suite à l'addition de la chaux, les bicarbonates (HCO_3^-) sont réagis rapidement avec l'hydroxyde (OH^-) issue de la chaux en donnant les carbonates (CO_3^{2-}) selon la réaction suivante :



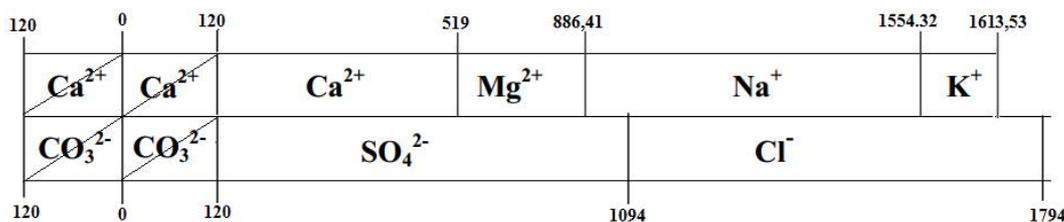
et le diagramme à barre précédent devient :



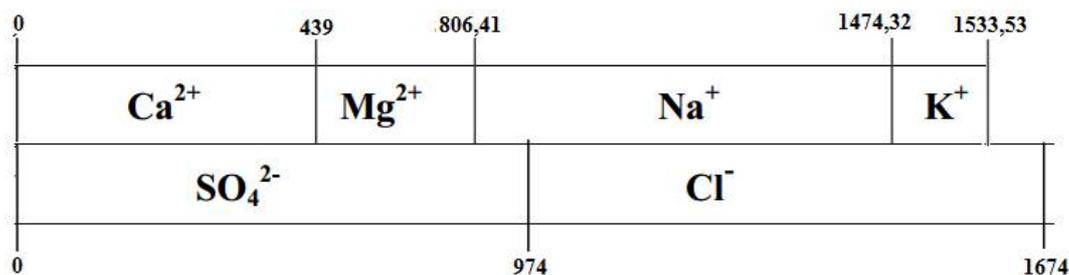
3.2.2. Précipitation de carbonates de calcium (CaCO_3)

Selon le diagramme à barre 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 sur le diagramme ci-dessus. La masse de calcium précipitée si on considère que la totalité du calcium sont liée au carbonate, c'est-à-dire la dureté carbonatée calcique sera éliminée, est de 240 mg (120×2).

- Précipitation de CaCO_3



Le résultat final théorique de la qualité de l'eau traitée d'Ain Sahara par la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ seule est présentée dans le diagramme à barre suivant :



D'après ce diagramme la dureté totale de l'eau traitée est de l'ordre de $806,41 \text{ mg L}^{-1}$ de CaCO_3 , ce qui est l'équivalent d'une diminution de 80 mg L^{-1} , où l'efficacité maximale atteint le 9 %. A partir de ce résultat on déduit que la dureté dominante des eaux d'Ain Sahara étudiées est de type non carbonatée et par conséquent le procédé à la chaux ne semble pas la bonne solution pour palier au problème d'entartrage auxquels est confronté cette région. Les résultats des expériences effectuées au laboratoire conformément aux démarches théoriques sont indiqués au tableau 7.

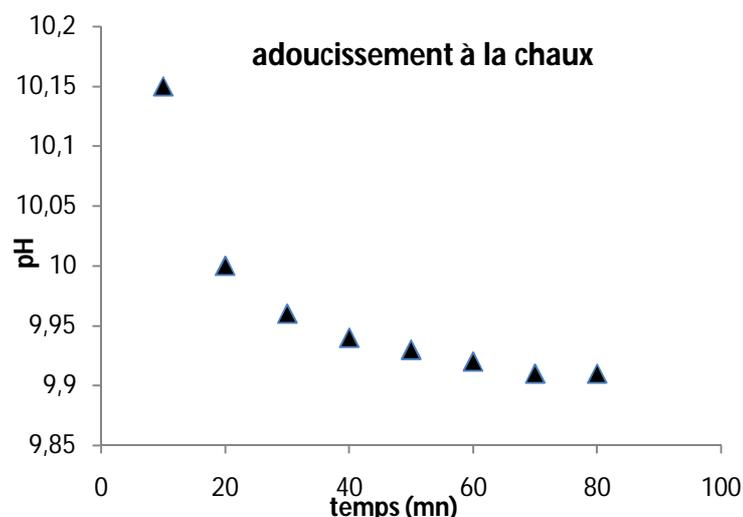
Tableau 7. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt (forage de Ain Sahara) à la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Eléments	Unité	Eaux Brutes	Eaux traitée à la chaux	Les normes de l'OMS
Ca^{2+}	mg L^{-1}	208	195.2	200
Mg^{2+}	mg L^{-1}	89.28	124.	150
HCO_3^-	mg L^{-1}	146.4	20	-
CO_3^{2-}	mg L^{-1}	0	12.8	-
pH	-	7.13	8.3	7-8,5
Conductivité	mS Cm^{-1}	2.76	2.63	-
Dureté	$^\circ\text{F}$	88.6	80	50

3.2.3. Évolutions du pH avec le temps

Le suivi de l'évolution du pH (figure 4) au cours de traitement avec la chaux (vive et éteinte) en fonction du temps montre qu'en dix minutes après l'addition de la chaux le pH augment pour atteindre le 10.15. Cela s'agit d'enrichissement des eaux par les ions OH^- et Ca^{2+} . L'effet du pH est facilement compréhensible: quand l'eau devient plus alcaline, l'équilibre calco-carbonique est déplacé vers une sursaturation plus forte et la probabilité de nucléation devient plus grande (Alimi et al. 1950).

Pour les pH, on constate qu'au-delà de 10 minutes de réaction, le potentiel d'hydrogène chute rapidement pour atteindre 10.15 comparé à 7.13 au début de la réaction (eau brute). Au bout de 40 minutes, pour la chaux éteinte, un palier apparaît indiquant l'équilibre et la fin de la précipitation de la totalité du calcium lié aux bicarbonates. Ce résultat est similaire avec ce qui est obtenu par Medfouni dans l'étude d'adoucissement à la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Medfouni, 2007).

**Figure 4:** Variation du pH en fonction du temps.

3.2.4. Évolutions de la conductivité électrique avec le temps :

Une augmentation de la conductivité électrique est remarqué après l'addition de la chaux de 2.73 mS cm^{-1} à 2.75 mS cm^{-1} et sa due principalement à l'augmentation de la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- dans l'eau traitée. Cette augmentation est suivie par une diminution jusqu'au bout de 60 minutes, et un palier apparaît indiquant l'équilibre et la fin de la précipitation du calcium (CaCO_3) (figure 5), ce résultat est similaire à un travail d'adoucissement à la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fait par Baouiya (Baouia, 2003).

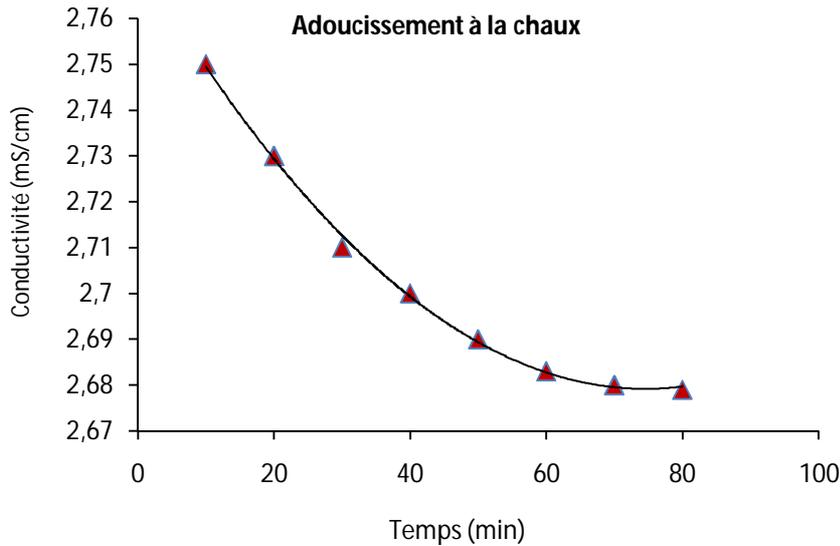
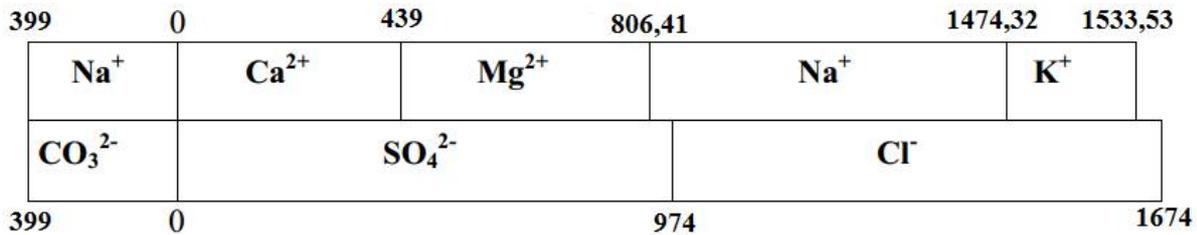


Figure 5 : Variation de la conductivité électrique en fonction du temps.

3.3. Adoucissement par addition du carbonate de sodium

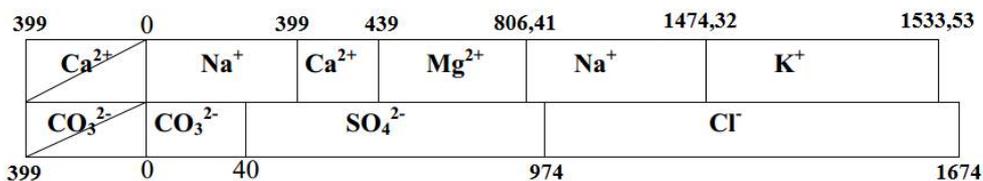
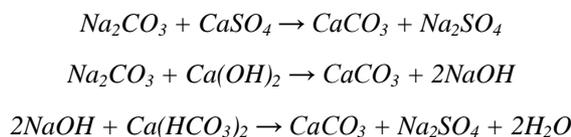
3.3.1. Quantité de carbonate de sodium optimale

La quantité de Na_2CO_3 en mg L^{-1} nécessaire à l'élimination de la dureté non carbonatée associée au calcium est de 399 mg L^{-1} 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 :

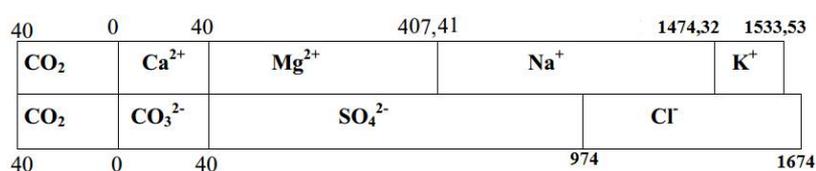


3.3.2. Précipitation du carbonate de calcium

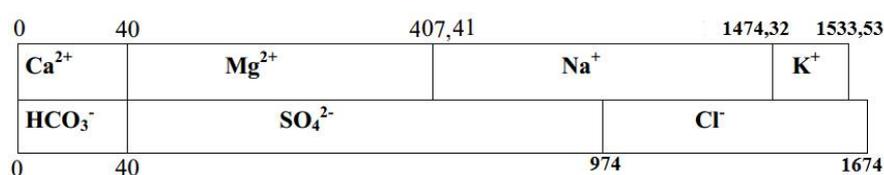
Comme l'indique le diagramme suivant, la précipitation du carbonate de calcium est spontanée après l'addition du carbonate de sodium. Par ce procédé l'ensemble du calcium lié au chlorure et au sulfate sera précipité. Les réactions chimiques régissant ce phénomène sont les suivantes:



Par ailleurs, pour éviter l'agressivité des eaux traitées et pour prévoir le phénomène de la corrosion des conduites, on laisse 40 mg L^{-1} du calcium précipité et ce par barbotage d'un volume du CO_2 équivalent à la concentration du calcium résiduel, soit 40 mg L^{-1} . Le CO_2 additionné à pour but de re-solubiliser une masse de CaCO_3 précipité à la forme soluble dans l'eau ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). 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 CO_2 sont présentés sur le diagramme à barre ci-dessous :



Les caractéristiques finales des eaux traitées par le Na_2CO_3 présentées sur le diagramme à barre suivant:



D'après ce diagramme on déduit que la dureté totale finale de l'eau est de l'ordre de 407.41 mg L^{-1} de CaCO_3 . L'efficacité de traitement est de plus de 54%. La dureté passe de 886.41 mg L^{-1} de CaCO_3 avant traitement à 407.41 mg L^{-1} de CaCO_3 à l'équilibre.

Tableau 8. Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt (forage d'Ain Sahara) par le carbonate de sodium.

Eléments	Unité	Eaux Brutes	Eaux traitée à la chaux	Les normes de l'OMS
Ca^{2+}	mg/L	208	79.2	200
Mg^{2+}	mg/L	89.28	61.46	150
HCO_3^-	mg/L	146.4	65.6	-
CO_3^{2-}	mg/L	0	3.2	-
pH	-	7,13	8.46	7-8,5
Conductivité	mS/Cm	2.76	2.92	-
Dureté	°F	88.6	46	50

3.3.3. Évolutions de la concentration de calcium dans les eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné :

La concentration du carbonate de sodium ajoutée pour obtenir une valeur acceptable de la dureté totale de l'eau varie selon la qualité de l'eau. Pour l'eau étudié qui a une dureté très importante en comparant avec les eaux d'autres forages de la région, la quantité de carbonate de sodium suffisante est dans l'environ de 400 mg ce qui confirme les résultats théoriques, cette dose permet d'obtenir une valeur de 46 °F de la dureté totale de l'eau (figure 6). Cette dernière valeur est trouvée dans la gamme des valeurs autorisées des normes internationales de l'eau potable (ANRH, 2007).

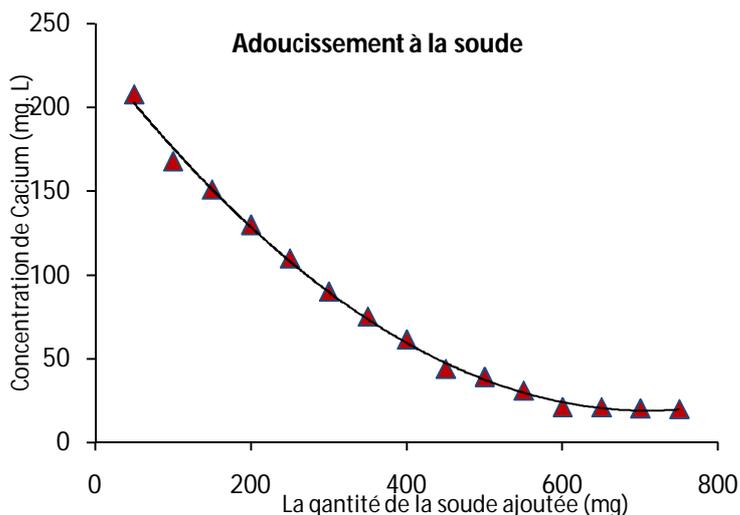


Figure 6 : Variation de la concentration de calcium en fonction de la quantité de soude.

On remarque que la concentration de calcium commence à diminuer juste après l'ajoute du carbonate de sodium jusqu'à la formation d'un palier après l'addition des quantités supérieures à 600 mg, ce qui indique l'équilibre et la fin de la précipitation de la totalité du calcium lié aux bicarbonates. Ce résultat est similaire au travail d'adoucissement par le carbonate de sodium fait par Medfouni (Medfouni, 2007).

3. Évolutions de pH des eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné.

Pour les variations de pH en fonction de la dose de carbonate de sodium injectée (figure 7), on remarque une augmentation légère allons de 8.1 jusqu'à 8.4 dans un intervalle d'une dose allons de 30 mg jusqu'à 230 mg, pour la suite on remarque que les valeurs de pH augmente rapidement au delà d'injection des doses supérieures à 250 mg de carbonate de sodium est atteinte une valeur égale à 9.4.

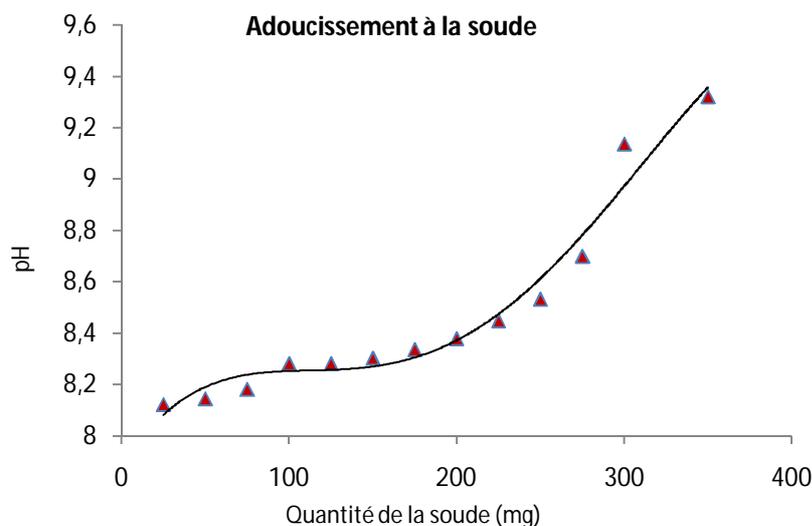


Figure 7 : Variation du pH en fonction du temps.

4. Évolutions de la conductivité électrique des eaux en fonction de la teneur en carbonate de sodium additionné.

La conductivité électrique de l'eau varie aussi suivant la dose de la soude ajoutée (figure 8). D'après les analyses, l'eau d'Ain Sahara possède une valeur importante de la conductivité électrique, où on a constaté une valeur de 2.76 mS cm^{-1} dans le cas initial avant le traitement des eaux par le carbonate de sodium. Après l'injection des premières doses de carbonate de sodium, on remarque une augmentation légère dans la valeur de la conductivité électrique jusqu'à une valeur maximale 2.9 mS cm^{-1} , puis elle se stabilise en formant un palier. La conductivité électrique, ensuite, commence à augmenter rapidement pour des injections supérieures à 500 mg de la soude pour atteindre une valeur de 3.3 mS cm^{-1} après une injection de 750 mg de carbonate de sodium.

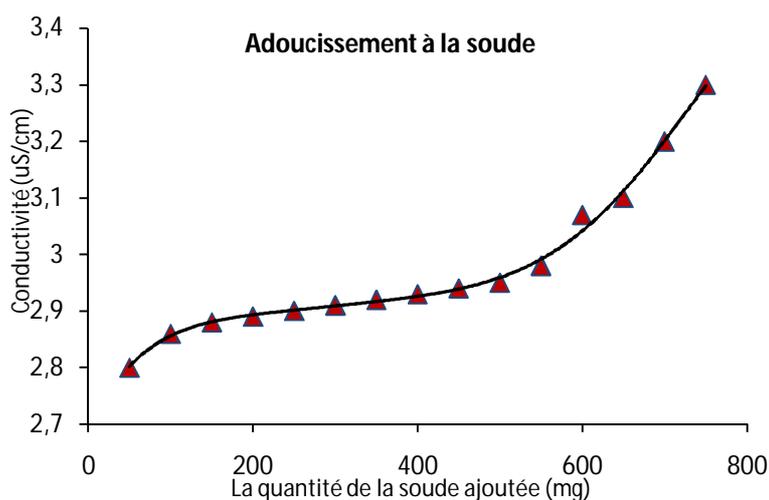


Figure 8 : Variation de la conductivité électrique en fonction du temps.

Conclusion

D'après les analyses physico-chimiques des eaux pour le forage d'Ain Sahara, il est clair que tous les facteurs sont favorables pour la formation de tartre dans les conduites et les dispositifs de distribution. Ces facteurs sont la température de l'eau (dépassé $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$), le pH basique de l'eau, la dureté totale très élevée, et les concentrations des ions métalliques, comme le calcium Ca^{2+} et le magnésium Mg^{2+} sont très élevées.

L'étude de traitement de la dureté des eaux de l'albien d'Ain Sahara montre aussi que le phénomène d'entartrage des conduites, est essentiellement dû aux conditions de température (55 à $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$) très favorables. Cette dernière, conjuguée à la forte pression des eaux, provoque la transformation de bicarbonate au carbonate et la libération du CO_2 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^{-1} sont acceptables. Cependant, il semble que dans ces conditions de température et de pression, les concentrations en ces deux éléments (Ca^{2+} et Mg^{2+}) sont suffisantes de provoquer l'entartrage et le bouchage des conduites des eaux.

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 ($< 9\%$) comparativement à l'adoucissement avec le carbonate de sodium qui présente une efficacité de traitement $> 54\%$. Ce résultat montre que la dureté dominante des eaux est de type non carbonatée.

D'après les résultats expérimentaux, on peut dire que le procédé chimique d'adoucissement par le carbonate de sodium est plus efficace que le procédé d'adoucissement par précipitation à la chaux sur le phénomène d'entartrage.

Références

- Alimi F, Tlili M, Gabrielli C, Georges M, Ben AM (2006) Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate, *Water Research* 40:1941–1950.
- ANRH (2017) Rapport technique : les forages.
- 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.
- Baouia K (2003) Traitement d'adoucissement de l'eau de ouade righe. Magistère université de Ouargla.
- Baouia K, Messaitfa A (2011) Adoucissement des eaux de l'albien de l'oued r'hir bilan de traitement et possibilité d'optimisation, 1er Séminaire International sur la Ressource en eau au Sahara : Evaluation, Economie et Protection, p332, Ouargla.
- Belattar M, Hadfi A, Ben Aazza S, Mohareb S, Hafid N, Driouiche A (2018) Characterization of scale deposits formed in sanitary hot water pipelines in the northern tourist zone of Agadir city, *Mediterranean Journal of Chemistry*, 7(2):86-92.
- Bentley R (1949) An apparatus for the micro-electrolysis of water, *Biochem J.*, 45(5): 591–592.
- Berné F, Cordonnier J (1991) Traitement des eaux ; Editions Technic – Paris.
- Brodsky A, Zdenek V (1971) Possibilité décarbonatations des eaux à la chaux la technique de l'eau et l'assainissement, 3:33-40
- 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.
- Desjardin R, (1997) Le traitement des eaux, Technique et Documentation –Paris.
- Ghizellaoui S, Labiod K (2011) La mesure du pouvoir incrustant des eaux dures du Hamma et inhibition de l'entartrage par Na_2CO_3 et KH_2PO_4 , *J. Mater. Environ. Sci.* 2 (S1) 477-484.
- Hamida H, Belkhatir A, Tchouar N (2016) Les aléas physico-chimiques de l'activité de séquestration de CO_2 Etat de l'art et retours d'expériences du site pilote de Krechba (In Salah), *Actualité Chimique*, Reference de l'article : Ac R2043.
- Hort C (1994) Contribution à l'étude des phénomènes d'entartrage : influence des solides en contact avec le liquide sur la cinétique de précipitation ; Thèse de doctorat INSA Toulouse.
- Katleb A (2001) Les ressources en eau en Algérie: stratégie, enjeux et vision, *Désalination*, 136 :25-33.
- Koriba B (2007) Prévention et lutte contre le phénomène d'entartrage dans les conduites d'eau dans la région de Ouargla – Touggourt : étude sur site ». mémoire de Magister, université de Ouargla.
- Mabrouk A (2012) Caractérisation des résines échangeuses d'ions d'intérêt pour les réacteurs à eau sous pression : Application et validation d'un modèle dédié, Thèse de doctorat, université de Paris.
- 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 Magister, p39-40, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- Ouali S (2006) Etude géothermique du sud de l'Algérie, Mémoire de Magister, Université de Boumerdes.
- Rodier J (1984) L'analyse de l'eau, 7^{ème} édition, 2-04-015615-. Paris.
- Rosset R, Douville S, Ben Amor M, Walha K (1999) Inhibition de l'entartrage par les eaux géothermales du sud Tunisien, *Revue des sciences de l'eau*, Rev. Sci. Eau 12(4)753 - 764.
- Rosset R, Mercier D, Douville S (1997) La mesure du pouvoir entartrant des eaux par des méthodes

électrochimiques et les procédés antitartres, Ann. Fals. Exp. Chim, 90(938) 41 - 65.

Roques H (1990) Fondements théoriques du traitement chimique des eaux ; Technique et Documentation – Paris.

Tardat H, M (1984) Chimie des eaux, édition de griffon d'argile, I.N.C, Canada.

Tlili M, Elfil H, Ben Amor M (2001) L'inhibition chimique de l'entartrage : détermination de la concentration efficace d'inhibiteurs par les techniques LCGE et CEG, DOI: 10.1051/asees/20010601029.