

Article

# Adoucissement par précipitation à la chaux couplée avec le sulfate d'aluminium des eaux de l'albien d'Ain Sahara (Touggourt, Algérie)

Abdelkarim Mellah<sup>1\*</sup>, Fadia Bekiri<sup>1</sup>, Linda Hecini<sup>1</sup>, Wahida kherifi<sup>1</sup> and Miled Z. Rechachi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides, CRSTRA, Campus Universitaire Université Mohamed Khider, Biskra.

\* Correspondence: mellah.abdelkarim@yahoo.com

**Résumé :** Dans la région de Touggourt (Sud-Est Algérie), on exploite la nappe du Continental Intercalaire dite nappe de l'Albien. Ces eaux sont fortement minéralisées (1,8 à 2,5 g L<sup>-1</sup>) et ils ont une dureté très élevée (102 °f) ce qui cause un problème de formation de tartre qui est le responsable de la diminution des sections de passage de l'eau dans les conduites. L'objectif de ce travail est l'adoucissement de ces eaux par la chaux éteinte constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) couplé avec le sulfate d'aluminium Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. L'étude montre que la valeur de pH est atteinte l'équilibre au-delà d'un ajout de 220 mg de d'aluminium couplé avec la chaux pour se stabilise à une valeur de 7.64. La valeur de la conductivité électrique s'équilibre en formant un palier, pour des valeurs arrivent à 2,55 mS cm<sup>-1</sup> après une injection de 300 mg de sulfate d'aluminium couplé avec la chaux. Le choix du procédé de la précipitation chimique par le sulfate d'aluminium couplé avec la chaux a donné une bonne réduction des teneurs en calcium de forage d'Ain Sahara en respectant les normes de l'OMS le rendement de ce procédé atteindre le 32 %, ce qui est acceptable pour le traitement des eaux moins chargé en calcium.

**Keywords :** Adoucissement ; Entartrage ; Chaux ; Sulfate d'Aluminium.

Received : 03 March 2022  
Accepted : 23 June 2022

**Citation :** Mellah K., Bekiri F., Hecini L., kherifi W. and Rechachi M. Adoucissement par précipitation à la chaux couplée avec le sulfate d'aluminium des eaux de l'albien d'Ain Sahara (Touggourt, Algérie). Journal Algérien des Régions Arides 2022, 14 (2) : 6-17.

**Publisher's Note :** ASJP is an electronic publishing platform for Algerian scientific journals managed by CERIST, that is not responsible for the quality of content posted on ASJP.



**Copyright :** © 2022 by the CRSTRA. Algerian Journal of Arid Regions is licensed under a Creative Commons Attribution Non Commercial 4.0 (CC BY NC) license.

## 1. Introduction

Dans le Sud de l'Algérie, le réservoir aquifère du Continental Intercalaire est particulier par son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600.000 km<sup>2</sup> et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. La qualité physico-chimique de l'eau de ce réservoir à une influence considérable sur la durée de vie des ouvrages et les équipements hydrauliques [1,2], et sur les conductivités thermiques des matériaux [3]. L'inconvénient majeur de l'utilisation des eaux de la nappe de l'Albien est la précipitation du tartre dans les canalisations de distribution et les ouvrages de régulation et de refroidissement. La masse de tartre déposée annuellement est évaluée en moyenne à 40-50 tonnes par forage [4]. Les surcoûts de rénovation et de réfection des équipements touchés par ce phénomène nécessitent annuellement une enveloppe financière estimée à 10 milliards de centimes [5].

D'ailleurs, à l'état actuel des choses, la majorité des refroidisseurs se trouvent en arrêt et des dizaines de milliers de mètres de conduites sont obstruées. Ces dépôts peuvent avoir des conséquences préjudiciables et irréversibles sur les ouvrages et conduisent inévitablement à leur détérioration [6]. En effet, malgré les problèmes enregistrés que posent ces eaux durées, la nappe de l'Albien constitue toujours la source potentielle en eau particulière. La forte minéralisation de ces eaux, auxquelles s'ajoute de Touggourt condition favorable à formation et la précipitation du calcaire sont les contraintes majeures pour la

bonne gestion des ouvrages hydrauliques. En effet, la forte minéralisation et la forte température de l'eau nécessitent immédiatement la prise en charge de ce problème pour la maîtrise et la prévision des risques [6,7].

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 [8], vaccination acide [9], déminéralisation sur des résines échangeuses d'ions [10]. Pour les procédés physiques, il y a la micro-électrolyse de l'eau [11,12], 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 [13]. L'objectif de ce travail consiste à effectuer une étude de traitement de cette eau en utilisant le sulfate d'aluminium couplé avec la chaux afin d'obtenir une eau de dureté conforme aux normes de l'O.M.S.

## 2. Matériels et Méthodes

### 2.1. Produits

Les produits utilisés sont la chaux, le sulfate d'aluminium, acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA), acide sulfurique, et le Noir Eriochrome T (NET) sont achetés Sigma Aldrich. Les plus importantes propriétés chimiques de la chaux utilisée sont indiquées dans le tableau suivant :

**Tableau 1.** Propriétés chimiques de la chaux

La substance	Chaux (%)	Sulfate d'aluminium (%)
Assy (T)	96	-
Carbonate de calcium (CaCO <sub>3</sub> )	4	-
Fer (Fe <sup>+2</sup> )	0.05	0.002
Plomb (Pb <sup>+2</sup> )	0.005	0.002
Chlore (Cl)	0.02	0.01
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0.05	0.01
Sodium (Na <sup>+</sup> )	0.01	-
Zinc (Zn <sup>2+</sup> )	0.005	-
Potassium (K <sup>+</sup> )	0.02	-
Aluminium (Al <sup>2+</sup> )	-	99

### 2.2. Matériels :

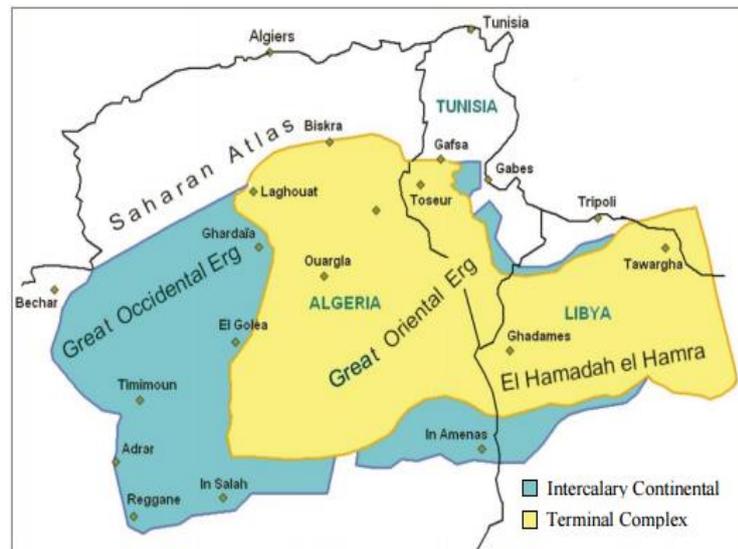
Pour les besoins des essais expérimentaux, on utilise pour l'agitation un Jar test de type VELD SCIENTIFICA FC4S. On utilise aussi une balance analytique de type KERN ABS 80-4, capacité 83 g, lisibilité 0.1 mg WTW Multi 3430 Meter, un agitateur magnétique chauffant céramique de type Stuart CB162, et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

### 2.3. 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), dans la zone hyper aride caractérisée par une température supérieure à 40 °C au mois de juillet, et une pluviométrie très faible et irrégulière moins de 67 mm/an. La nappe du Continentale Intercalaire (l'Albien), située à des profondeurs comprises entre 1758 m et 1799 m. Cette nappe constitue la source principale de l'alimentation en eau dans la région, avec une distribution de 14,2 millions de mètres cubes à Touggourt.

La nappe est d'une superficie de 600 000 km<sup>2</sup>, couvrant tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Figure 1). Sa capacité est évaluée à 50 000 milliards de mètres

cube [14], et elle est difficilement renouvelable [15]. 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 [16].



**Figure 1.** Les aquifères du Sahara Algérien ; Le Continental Intercalaire, Le Complexe Terminal [17].

#### 2.4. Mécanisme de formation du tartre

Le tartre (Figure 2) est constitué majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ . L'eau émergeant des forages sous pression est transportée en haut de la tour de refroidissement, mais du fait de la baisse brutale de la pression en haut de la tour et de la division de l'eau en gouttelettes fines à son entrée dans la tour, le dioxyde de carbone libre se dégage dans l'atmosphère, perturbe l'équilibre carbonique provoquant ainsi la précipitation du carbonate de calcium selon les réactions suivantes [5,7]:



Il est important de connaître la dureté calcique ou la dureté magnésienne d'une eau pour calculer la quantité de chaux nécessaire dans les procédés d'adoucissement par addition de chaux et de sulfate d'aluminium [18].



**Figure 2.** Phénomène d'entartrage à l'intérieur des conduites.

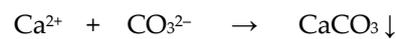
On peut classer la nature de l'eau suivant leur dureté, cette classification est représentée dans le tableau suivant:

**Tableau 2.** Classification de la nature de l'eau suivant la dureté [19].

La nature de l'eau	La dureté (méq L <sup>-1</sup> )
Eau très douce	0–1,5
Eau douce	1,5–3
Eau moyenne	3–6
Eau dure	6–10
Eau très dure	>10

### 2.5. Equilibre calco-carbonique dans les eaux

L'entartrage phénomène fréquent en distribution d'eau est caractérisé par l'apparition sur une surface métallique ou non d'un dépôt minéral constitué essentiellement de carbonate de calcium selon la réaction [9] :



Cet équilibre, dit calco-carbonique est régi par la loi d'action de masse qui établit entre les concentrations des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  la relation :

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = K_s \quad (1)$$

$K_s$  dépend de la température et de la force ionique de la solution.

Si l'eau n'est pas en équilibre thermodynamique avec le carbonate de calcium, on définit un coefficient  $\delta$  de sursaturation par :

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = \delta K_s' \quad (2)$$

$\delta < 1$  : l'eau est dite agressive, elle peut dissoudre du carbonate de calcium

$\delta > 1$  : l'eau est sursaturée, elle peut déposer du carbonate de calcium. Elle est dite calcifiante.

$\delta > 40$ : il y a précipitation spontanée du carbonate de calcium. Lorsque le dépôt de  $\text{CaCO}_3$  adhère fortement aux parois, les eaux sont dites incrustantes. On peut donc qualifier les eaux selon la Figure 3.

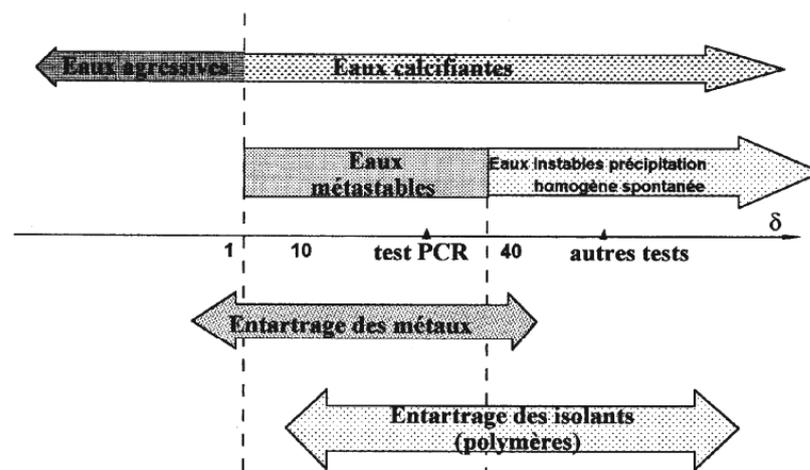


Figure 3. Domaines thermodynamiques des entartrages [20].

Le tableau suivant rassemble les concentrations admissibles dans l'eau potable :

**Tableau 3.** Les concentrations admissibles dans l'eau potable

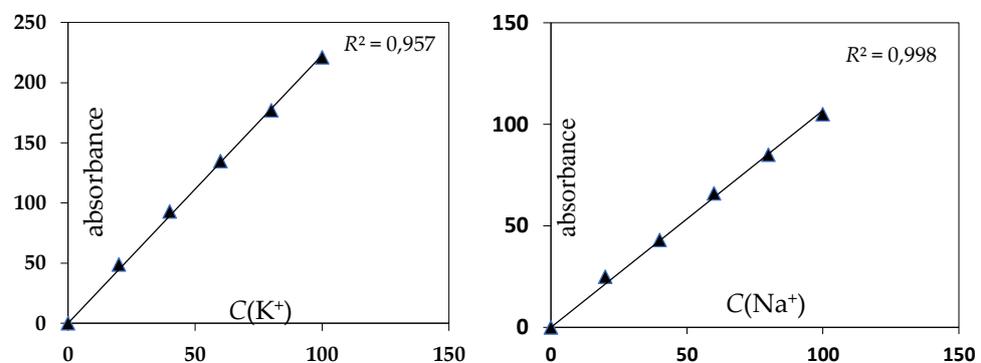
Eléments	Unité	OMS	CEE
pH	-	7-8.5	6.5-8.5
Conductivité	$\mu\text{S cm}^{-1}$	-	1250
dureté	$^{\circ}\text{F}$	-	10-35
Ca <sup>2+</sup>		200	100
Mg <sup>2+</sup>		150	50
Na <sup>+</sup>		-	100
K <sup>+</sup>		-	12
Al <sup>3+</sup>		-	0.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		200	250
Cl <sup>-</sup>		200	200
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	44	50
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		-	0.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		-	0.5

OMS : Organisation mondiale de la santé, et CEE : Commission économique pour l'Europe des Nations unies

### 3. Résultats & Discussion

#### 3.1. Courbe d'étalonnage de potassium

Les courbes d'étalonnage de potassium et de sodium sont présentées dans la Figure 4 :



**Figure 4.** Courbe d'étalonnage de potassium et de sodium

#### 3.2. 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. Les paramètres physico-chimiques de l'eau, avant et après traitement, ont été déterminés au laboratoire du centre de recherche (CRSTRA) de Biskra.

Les analyses des différentes caractéristiques physico-chimiques des eaux que nous avons étudiées ont été effectuées selon les méthodes standards d'évaluation de qualité décrites par [21,22].

- Dureté totale (TH) : méthode complexométrique par titrage à l'EDTA en présence de noir ériochrome T ;
- Dosage du calcium : par complexométrie à l'EDTA en présence d'un indicateur coloré (Murexide) ;

- Connaissant la dureté totale d'une part et la dureté calcique d'autre part, on peut calculer la dureté magnésienne par différence. Celle-ci peut être convertie en  $\text{mg L}^{-1}$
- Alcalinité : par volumétrie, en titrant par l'acide sulfurique (N/50) ;
- Dosage des sulfates : (méthode néphélométrique) par utilisation d'un spectrophotomètre Shimadzu UV 120-01 à une longueur d'onde de 420 nm.

La température, le pH, la conductivité (ou résistivité) doivent être plutôt mesurés in situ afin d'éviter toute altération due au transport des prélèvements (risque de dégazage, d'échanges avec l'air ambiant). Ceci est d'autant plus vrai pour les eaux douces et/ou très agressives.

Pour étudier la décarbonatation à la chaux pour la réduction de la dureté des eaux de l'Albien de Touggourt (Ain Sahara), nous avons commencé par les caractéristiques de ces eaux pour notre recherche au laboratoire. Basé sur les concentrations équivalentes des substances déjà analysés des eaux de forage d'Ain Sahara, et par application des de la relation suivante :

$$C_{(\text{CaCO}_3)} = \frac{C \times 50}{ME} \quad (3)$$

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

$$ME = \frac{M}{e} \quad (4)$$

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

ME : masse équivalente de l'ion. M : la masse molaire de l'élément ( $\text{g mol}^{-1}$ )

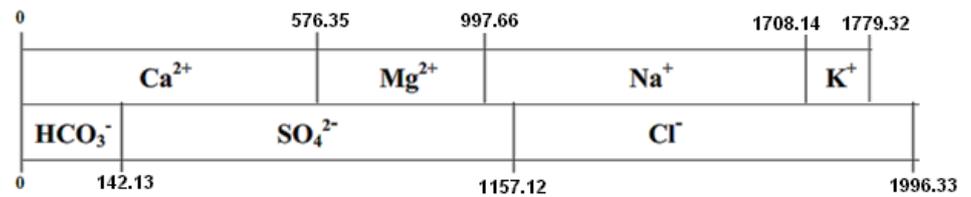
e : valence.

L'analyse de l'eau du forage de l'Albien d'Ain Sahara de Touggourt sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.** Caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'Albien de Touggourt

Elément	Concentration		
	$\text{mg L}^{-1}$	még	eq de $\text{CaCO}_3$
Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	231	11.55	576.35
Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	102.42	7.44	421.31
Sodium ( $\text{Na}^+$ )	326.68	14.20	710.48
Potassium ( $\text{K}^+$ )	55.66	1.43	71.18
Chlorure ( $\text{Cl}^-$ )	595	16.76	839.21
Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	972	20.24	1014.99
Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )	173.4	2.84	142.13
pH		7,21	
Conductivité en $\text{mS/cm}$		2,73	
Salinité totale en $\text{g L}^{-1}$		1.6	
Dureté totale en ppm de $\text{CaCO}_3$		997.66	
Dureté totale en degré français		99.77	
Titre alcalimétrique complet (TAC) en $\text{mg L}^{-1}$ de $\text{CaCO}_3$		132	
Titre alcalimétrique complet (TAC) en degré français		13.2	

Ces caractéristiques 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 :



### 3.3. Essais de Coagulation-Floculation

La coagulation suivie de la floculation, sont des étapes indispensables au traitement des eaux chargées en particules colloïdales, trop petites pour décanter sous l'effet de la gravité. L'étude des étapes de coagulation floculation se fait dans une installation appelée Jar test (dispositif qui contient 4 béchers de 01 litre) permettant la sélection du meilleur jeu de conditions opératoires en vue de l'étape de décantation.

La quantité de chaux, la quantité de sulfate d'aluminium, la vitesse d'agitation, le temps d'agitation sont autant de paramètres à optimiser [23,24]. Les différents essais de coagulation-floculation-décantation ont été effectués sur l'eau de forage d'Ain Sahara de la région de Touggourt au laboratoire de CRSTRA (Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides à Biskra) à  $(22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$  au moyen d'un appareil Jar-test (VELP SCIENTIFICA FC4S) selon le principe suivant :

Les échantillons d'eau à traiter (Bécher de 1 litre) sont préalablement homogénéisés avant d'être introduits dans le flocculateur avec les produits de traitement. La chaux, et le sulfate d'aluminium sont utilisés sous forme solide sans dissolution ni dilution [25].

Dans la série de flacons contenant l'eau à traiter, on introduit les agents coagulants dont les caractéristiques sont représentées dans les tableaux 4 et 7, à des doses croissantes pendant une période d'agitation de 30 min mais à une vitesse d'agitation rapide (200 tours par min) permettant d'assurer une très bonne diffusion des adjuvants et une bonne déstabilisation chimique des colloïdes. On agite doucement (40 tours par min) durant 15 min, afin de favoriser la mise en contact des particules contiguës et éviter de briser les flocs formés. Enfin, on laisse décanter ces flocons dans une période de repos de 20 min [26,27].

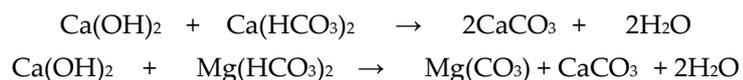
Les effluents décantés sont filtrés minutieusement dans des fioles à l'aide d'un papier filtre pour éviter toute passage du floc dans l'eau à analyser.

### 3.4. Procédé par addition de chaux et de sulfate d'aluminium

Le procédé, basé sur l'utilisation de la chaux seulement  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et de le sulfate d'aluminium  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , permet de réduire la dureté carbonatée et non carbonatée d'une eau.

#### 3.4.1. Détermination de la quantité de chaux optimale

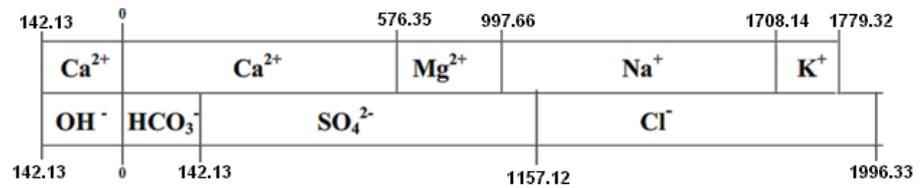
Ce procédé est employé lorsque la dureté carbonatée est due essentiellement aux ions  $\text{Ca}^{2+}$ . Pratiquement, l'addition de chaux entraîne la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  suite à l'augmentation du pH, la cinétique de cette réaction étant relativement lente, dont il peut s'accélérer en ajoutant des cristaux sur lesquels le carbonate de calcium s'agglomère (sable par exemple) [28,29] :



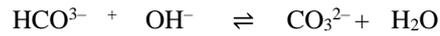
L'addition de chaux nécessite de prendre plusieurs précautions pour sa mise en œuvre : l'eau ne doit pas contenir de colloïdes en suspension pouvant gêner la cristallisation. Il est donc parfois nécessaire d'ajouter un coagulant. La décarbonatation doit comprendre une zone de clarification appropriée pour séparer les cristaux de  $\text{CaCO}_3$  de l'eau.

D'après Raymond Desjardins [18], 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 ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans l'eau. Donc dans notre cas et selon le diagramme à barre des eaux brutes, la concentration de la chaux nécessaire pour réduire la dureté carbonatée calcique des eaux de l'Albien du forage d'Ain Sahara est de  $142.13 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ .

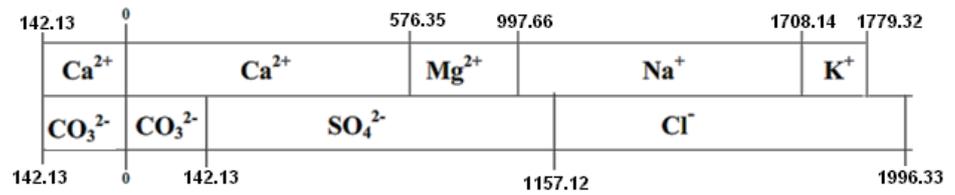
Par addition de cette concentration au diagramme à barre des eaux brute on trouve le diagramme suivant :



Suite à l'addition de la chaux, les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont réagîtés rapidement avec l'hydroxyde (OH<sup>-</sup>) issu de la chaux en donnant les carbonates (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) selon la réaction suivante :



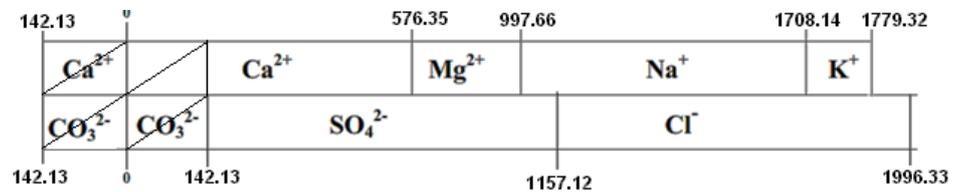
et le diagramme à barre précédent devient :



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'indiquent les résultats indiqués sur le diagramme à barre suivant :

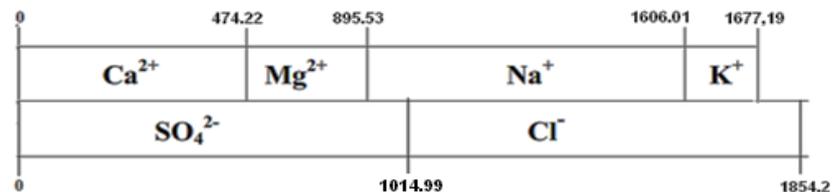
La masse de calcium précipitée si on considère que la totalité du calcium liée au carbonate, c'est-à-dire la dureté carbonatée calcique sera éliminé est de 240 mg (120 x 2).

- Précipitation de CaCO<sub>3</sub>



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 d'Ain Sahara traitée à la chaux Ca(OH)<sub>2</sub> seul

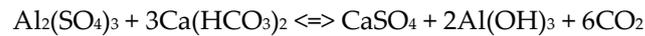


D'après le diagramme à barre la dureté totale de l'eau traitée est de l'ordre de 895.53 mg L<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> donc nous avons une diminution de 102.13 mg L<sup>-1</sup>. L'efficience maximale est de 10.2 %.

De ce résultat on déduit que la dureté dominante des eaux de Ain Sahara étudiées est de type non carbonatée et par conséquent le procédé à la chaux ne doit pas être la bonne solution au problème d'entartrage auxquels est confronté la région d'Ain Sahara. Par ailleurs et pour confirmer ce résultat.

### 3.4.2. Adoucissement par addition du sulfate d'aluminium couplé avec la chaux

Lors de l'hydrolyse du sel d'aluminium dans les solutions à traiter, il se produit un précipité blanc gélatineux  $\text{Al}_2(\text{OH})_3$  qui se forme, aux dépens de la dureté temporaire (bicarbonates) qui se trouve transformée en dureté permanente selon la réaction [30] :



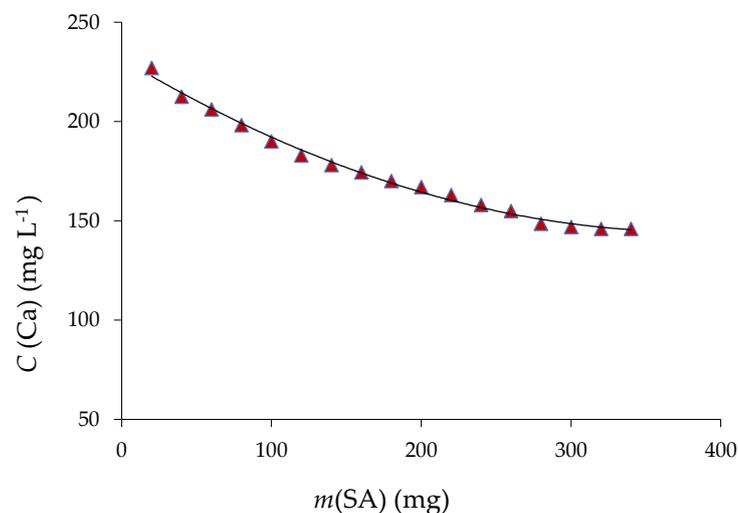
Par ailleurs, chaque  $\text{Al}^{3+}$  peut réagir avec  $3\text{OH}^-$  provenant de l'eau elle-même (réaction d'hydrolyse).

### 3.4.3. Évolutions de la concentration de calcium en fonction de la teneur en sulfate d'aluminium et de la chaux additionnés

Les essais de coagulation floculation nous permettent de déterminer la dose optimum de sulfate d'alumine pour atteindre une meilleure diminution de la dureté de l'eau (figure 5).

La quantité du sulfate d'aluminium ajoutée (En fixant la concentration de la chaux ajoutée à  $120 \text{ mg L}^{-1}$ ) pour obtenir une valeur acceptable de la dureté totale de l'eau varie selon la qualité de l'eau. Pour l'eau d'Ain Sahara (Touggourt) qui a une dureté très important parmi les eaux d'autres forages de la région, la quantité de carbonate de sulfate d'aluminium est de l'environ de  $350 \text{ mg}$  ce qui confirme les résultats théoriques, cette dose permet d'obtenir une valeur de  $36.46^\circ\text{F}$  de la dureté totale de l'eau. Cette dernière valeur est trouvée dans la gamme des valeurs autorisées des normes internationales de l'eau potable [31].

On remarque que la concentration de calcium commence à diminuer juste après l'ajoute du sulfate d'aluminium jusqu'à la formation d'un palier après l'ajoute des quantités supérieures de  $280 \text{ mg}$  ce qui indique l'équilibre et la fin de la précipitation de la totalité du calcium lié aux bicarbonates ce résultat est similaire avec un travail d'adoucissement par le carbonate de sodium fait par Medfouni Samir [32].



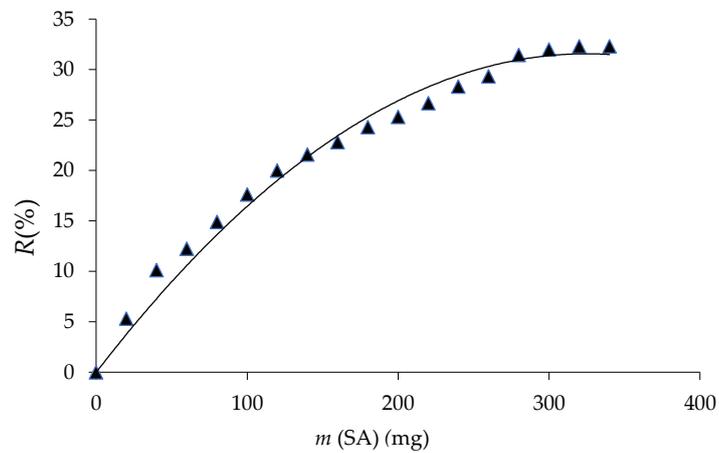
**Figure 5.** Variation de la concentration de calcium en fonction de la quantité de sulfate d'aluminium.

Le tracé du pourcentage de réduction en fonction de la concentration du sulfate d'aluminium et avec une quantité fixe de la chaux, a permis d'obtenir des courbes passant par un maximum correspondant à la valeur optimale de coagulant ( $350 \text{ mg L}^{-1}$ ) nécessaire pour une bonne déstabilisation des particules colloïdales présentées dans l'eau [33] (Figure 6) pour une concentration de  $350 \text{ mg L}^{-1}$ , le pourcentage de réduction de taux de calcium est de  $32.33\%$ . D'après le graphe on remarque que l'utilisation de sulfate d'aluminium est bonne pour le traitement des eaux moins dures, tel que le cas de l'eau de forage d'Ain Sahara ( $231 \text{ mg L}^{-1}$ ), dont il a donné une valeur dans normes internationales de l'eau potable [31].

Pour établir le graphe de rendement d'élimination de calcium par les quantités de sulfates d'aluminium en fixant la quantité de la chaux, on utilise la relation suivant [34]:

$$R\% = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100$$

$C_0$ ,  $C_f$  représentent respectivement les concentrations initiales et finales calcium en mg L<sup>-1</sup>.



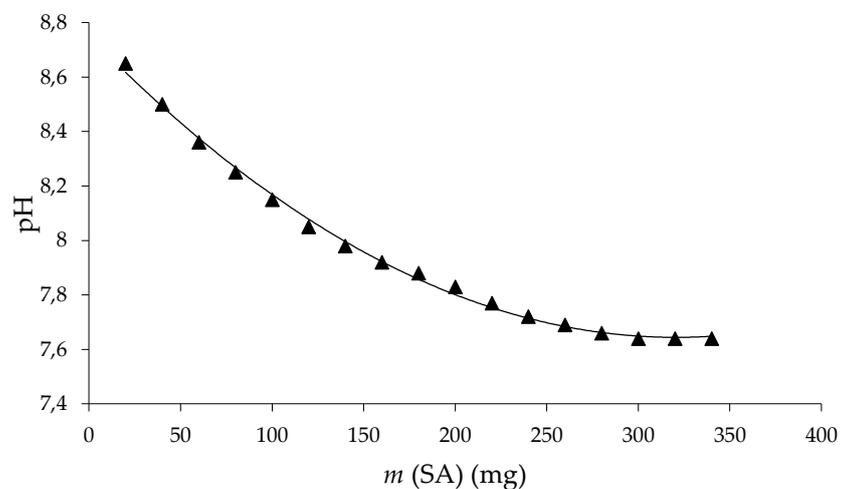
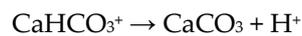
**Figure 6.** Rendement d'élimination de calcium en fonction des doses d' $Al_2(SO_4)_3$

#### 3.4.4. Évolutions de pH des eaux en fonction de la teneur en sulfate d'aluminium additionné.

Les résultats de valeurs relevées de pH nous permettent de tracer le graphe pH en fonction de la dose de sulfate d'aluminium injectée (figure 7).

Pour les variations de pH en fonction de la dose de sulfate d'aluminium injectée, on remarque une diminution un peu rapide de pH de 8.65 jusqu'à 7.83 dans un intervalle allant d'une dose de 20 mg jusqu'à 200 mg, pour la suite on remarque que les valeurs de pH démunie légèrement au-delà d'injection des doses supérieures à 220 mg de sulfate de d'aluminium pour atteindre un équilibre et une valeur stable de pH égale à 7.64.

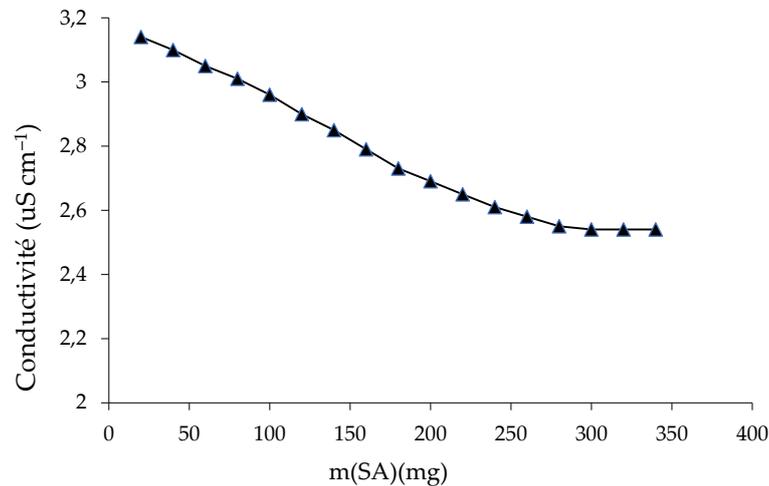
La diminution de pH est due essentiellement à la précipitation du carbonate de calcium [9] selon la réaction suivante :



**Figure 7.** Variation de pH en fonction des doses de  $Al_2(SO_4)_3$

### 3.4.5. Évolutions de la conductivité des eaux en fonction de la teneur en sulfate d'aluminium additionné.

On remarque aussi que la conductivité électrique de l'eau varie suivant la dose de sulfate d'aluminium ajoutée (Figure 8). D'après les analyses l'eau d'Ain Sahara possède une valeur importante de la conductivité électrique, on constate une valeur de  $3,17 \text{ mS cm}^{-1}$  dans le cas initial, c'est-à-dire avant le traitement des eaux par le sulfate d'aluminium. Après l'injection des premières doses de sulfate d'aluminium, on remarque une diminution légère dans la valeur de la conductivité électrique jusqu'à une valeur maximale  $3,14 \text{ mS cm}^{-1}$ , puis elle se stabilise en formant un palier, pour des valeurs arrivent à  $2,55 \text{ mS cm}^{-1}$  après une injection de  $300 \text{ mg}$  de sulfate d'aluminium.



## 4. Conclusions

D'après les analyses physico-chimiques des eaux de 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. On peut citer ces facteurs comme suite :

- La température de l'eau (dépasse  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),
- Le pH basique de l'eau,
- La dureté totale très élevée,
- Les concentrations des ions métalliques, comme le calcium  $\text{Ca}^{2+}$  et le magnésium  $\text{Mg}^{2+}$ , 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 des bicarbonates au carbonate et la libération du  $\text{CO}_2$  et non à la teneur en Ca et en Mg. Ces derniers en comparaison avec la norme de l'O.M.S.,  $200 \text{ mg L}^{-1}$  et  $150 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivement, sont acceptables. Cependant, il semble que dans ces conditions de température et de pression, les concentrations en ces deux éléments ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) sont suffisantes de provoquer l'entartrage et le bouchage des conduites des eaux.

D'après les résultats expérimentaux, on peut dire que le procédé chimique d'adoucissement par le sulfate d'aluminium couplé avec la chaux est plus efficace pour les eaux moins dures (pour les concentrations de calcium au voisinage de  $230 \text{ mg}$ ).

Toutefois, nous avons orienté notre choix du procédé vers la précipitation chimique par le sulfate d'aluminium et la chaux puisqu'elle a permis une réduction des teneurs en calcium bien dans ce cas de forage d'Ain Sahara en deçà des normes de l'O.M.S., tels que le rendement de ce procédé atteindre le  $32,33 \%$ , un résultat acceptable pour le traitement des eaux moins chargées en calcium.

De plus, cette méthode est particulièrement adaptée et économique pour des eaux naturellement chargées en calcium et en magnésium. Par ailleurs, le sulfate d'aluminium peut présenter l'inconvénient d'augmenter notablement la teneur finale des eaux en

sulfates, voire en aluminium et il sera obligé de faire un autre procédé pour palier à ce problème dans les cas où les quantités dépassent les normes de l'OMS.

## References

1. Hadfi, A. Evaluation du pouvoir entartrant des eaux du secteur agricole du grand agadir et mise en évidence de l'effet inhibiteur de quelques engrais phosphatés. Thèse de doctorat. Université Ibn-Zohr, Agadir. Morocco, 2012.
2. Ouali, S. Etude géothermique du sud de l'Algérie, Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, Algérie, 2006.
3. Roques, H. Fondements théoriques du traitement chimique des eaux ; *Technique et Documentation* – Paris, France, 1990.
4. Bouchekima, B. Prévention et lutte contre l'entartrage par les eaux géothermales du sud Algérien, Journées Techniques, p264, Touggourt, Algérie 27-29 Avril 2002.
5. Fartas, T.; Boutaoutaou, D.; Zeggane, H. Etude de l'évolution de l'entartrage dans les conduites de distribution d'eau de la vallée de Oued R'hir, 1er Séminaire International sur la Ressource en eau au Sahara : Evaluation, Economie et Protection, p436-437, Ouargla, Algérie, 2011.
6. Baouia, K.; Messaitfa, A. 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, Algérie, 2011.
7. Hort, C. 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, France, 1994.
8. Tlili, M.; Elfil, H.; Ben Amor, M. L'inhibition chimique de l'entartrage : détermination de la concentration efficace d'inhibiteurs par les techniques LCGE et CEG, DOI : 10.1051/asees/20010601029, 2001.
9. Ghizellaoui, S.; Lédion, J.; Ghizellaoui, S.; Chibani, A. Etude de l'inhibition du pouvoir entartrant des eaux du Hamma par précipitation contrôlée rapide et par un essai d'entartrage accéléré, *Desalination*, 2004; 166 pp. 315-327.
10. Mabrouk, A. 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, France, 2012.
11. Bentley, R. An apparatus for the micro-electrolysis of water, *Biochem J.*, 1949; 45(5) pp. 591–592.
12. Rosset, R.; Douville, S.; Ben Amor, M.; Walha, K. Inhibition de l'entartrage par les eaux géothermales du sud Tunisien, *Rev. Sci. Eau*, 1999; 12(4) pp. 753 - 764.
13. Rosset, R.; Mercier, D.; Douville, S. La mesure du pouvoir entartrant des eaux par des méthodes électrochimiques et les procédés antitartrés, *Ann. Fals. Exp. Chim*, 90 N° 938, 1997; pp. 41- 65. Mars.
14. Kettab, A. Les ressources en eau en Algérie : stratégie, enjeux et vision, *Désalination*, 2001 ; pp.136 : 25-33.
15. Dahmani, B.; Bithorel, C. Déminéralisation des eaux saumâtres de Brédéah dans la région du bassin hydrographique Oranie-Chott-Chergui. Partie I : Hydrogéologie de la nappe Brédéah. *Desalination*, 2001; 137 pp. 297-309.
16. Mihoub, A.; Helimi, S.; Mokhtari, S.; Halitim, A. Evaluation of method for estimating water requirements of crops grown in saline environment (case of date palm), *Revue Agriculture*. 2016 ; Numéro spécial 1 pp. 189 – 197.
17. UNESCO, Recherche et formation en matière d'irrigation avec les eaux salées. Tech. Rpt / UNESCO / UNDP. TUN5. 243p. 1972.
18. Desjardin, R. Le traitement des eaux ; *Technique et Documentation*, Paris, France, 1997.
19. Berné, F.; Cordonnier, J. Traitement des eaux. *Editions Technic*, Paris, France, 1991.
20. Yannick, J. Influence des suspensions d'argile sur l'entartrage. PFE N° 56, *ENSAM*, 2002; pp. 27, Paris, France.
21. Rodier, J. L'analyse de l'eau, 7ème édition, 2-04-015615-1. Paris, France, 1984.
22. Tardat, H.M. Chimie des eaux, édition de griffon d'argile, I.N.C, Canada, 1984.
23. Hamidi, A.A.; Salina, A.; Mohd, N.; Adlan, F.; Asaari, A.H.; Mohd Shahrir, Z. Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. *Bioresource Technology*, 2007; volume 98, pp. 218.
24. Shilpi, V.; Basheshwar, P. Indra M.M. Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics, *J. Hazardous Mater.*, 2010; pp. 178-1055.
25. Ayeche, R.; Balaska, A. Caractérisation et traitement par coagulation-floculation d'un effluent de laiterie. *J.Soc.Alger.Chim.*, 2010; 20(2), pp. 83-93.
26. Amiratharajah, A.; Mills, K.M. Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation. *J. Am. Water Works Assoc.*, 1982; April.
27. Lahouassine-turcaud, V.; Wiesner, M.; Bottero, J.Y.; Mallevialle, J. Coagulation-floculation with aluminium salts: influence on the filtration efficacy with microporous membranes, *Wat. Res.*, 1992; Volume 5, pp. 695-702.
28. Antoly, N. 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, 2003; p 102.
29. Brodsky, A. ; Zdenek, V. Possibilité décarbonatations des eaux à la chaux la technique de l'eau et l'assainissement, 1971; pp. 333-40.
30. Youcef, L.; Achour, S. defluoruration des eaux souterraines du sud Algérien par la chaux et le sulfate d'aluminium, *Courrier du Savoir – N°01*, 2001; pp. 65-71.
31. ANRH, Rapport technique : les forages. 2017.
32. Medfouni, S. Adoucissement des eaux géothermales de l'oued R'hir. Etude comparative de deux types de chaux (CaO et Ca(OH)<sub>2</sub>), Mémoire de Magister. Algérie, 2007.
33. Cherifi, S. Traitement des eaux de projets de l'unité ceramit (Tenés). Memoire de Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef. Algérie, 2007.
34. Semine, ras, H. Contribution à l'évaluation et l'inhibition du pouvoir entartrant des eaux dures par plusieurs procédés, Mémoire de Magister, université de Constantine, Algérie, 2009.