



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Hydraulique  
Hydraulique Urbaine

Réf. : HU 15/2019

---

Présenté et soutenu par :  
**BENRAYA FATNA**

Le : samedi 6 juillet 2019

## Adoucissement des eaux de la région de Biskra par précipitation chimique

---

### Jury :

Mme. MIMECHE Leila	Dr	Université de Biskra	Président
Mlle. GUERGAZI Saadia	Pr	Université de Biskra	Examineur
Mme. YUCEF Leila	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

# *Remerciements*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude avant tout à dieu qui ma aidé et donné le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur Madame YOUCEF Leila, professeur à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, pour la qualité de son encadrement de, son orientation méthodologique et pour les efforts qu'elle a fournis et ses conseils.

Mes sincères remerciements au Pr : GUERGAZI Saadia, enseignante à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, directrice du laboratoire de recherche en hydraulique de surface et souterraine (LARHYSS) à l'université de Biskra, pour la confiance qu'elle m'a donné en m'accueillant au sein de son laboratoire.

Mes sincères remerciements vont aux membres de jury qui ont accepté de juger objectivement mon travail

Je remercie Monsieur KHELIFA amine, ingénieur du laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique, de laboratoire et particulièrement, pour son aide et son entière disponibilité.

Je tiens aussi à exprimer toutes mes gratitudes et mes remerciements à tous les enseignants de département de génie civil et d'hydraulique de l'Université de Biskra.

Un grand merci encore est adressé a tous ceux qui d'une façon ou autre m'ont fait part de leurs aide, m'ont encouragé et participé de près ou de loin a la réalisation de ce travail.

A toutes les personnes qui n'ont pas hésité un seul instant à m'encourager même avec un sourire je vous remercie de tout mon cœur.

## *Remerciements*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude avant tout à dieu qui ma aidé et donné le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur Madame YUCEF Leila, professeur à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, pour la qualité de son encadrement de, son orientation méthodologique et pour les efforts qu'elle a fournis et ses conseils.

Mes sincères remerciements au Pr : GUERGAZI Saadia, enseignante à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, directrice du laboratoire de recherche en hydraulique de surface et souterraine (LARHYSS) à l'université de Biskra, pour la confiance qu'elle m'a donné en m'accueillant au sein de son laboratoire.

Mes sincères remerciements vont aux membres de jury qui ont accepté de juger objectivement mon travail

Je remercie Monsieur KHELIFA amine, ingénieur du laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique, de laboratoire et particulièrement, pour son aide et son entière disponibilité.

Je tiens aussi à exprimer toutes mes gratitudes et mes remerciements à tous les enseignants de département de génie civil et d'hydraulique de l'Université de Biskra.

Un grand merci encore est adressé a tous ceux qui d'une façon ou autre m'ont fait part de leurs aide, m'ont encouragé et participé de près ou de loin a la réalisation de ce travail.

A toutes les personnes qui n'ont pas hésité un seul instant à m'encourager même avec un sourire je vous remercie de tout mon cœur.

# Dédicace

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage pour achever ce  
modeste travail que je dédie :

A mon encadreur, mon guide, mon soutien.

A mon livre dans la grande école de vie, et grand cœur rempli d'amour de  
tendresse et de patience vous mes parents bien aimée. Vous été qui ont fait de  
moi ce que je suis maintenant. Pour leur amour et leurs sacrifices.

A ma grand- mère et mon grand-mère à qui je suis très reconnaissant pour leur  
esprit constrictif et qui représentent pour moi la source de confiance et  
tendresse.

A mon très chers frère MOHAMED et ma très chers sœur RANIA et HIBA,  
ABED EL FATAH.

A toute ma grande famille.

A mes formidables amis HOCINE, HOUDA, AYMEN, OMAR.

A tous les enseignants et les enseignantes qui ont participé à ma formation.

A mes collègues de ma promotion – 2019.

## Résumé

Une dureté élevée de l'eau distribuée engendre des problèmes de biofilms, de colmatage de conduites d'eau, tuyauteries et matériels domestiques (chaudières, machines à laver, fers à repasser...) et lavent un peu moins bien les textiles (car moussant moins).

L'objectif de cette étude a été de tester un traitement qui mène à réduire la dureté des eaux souterraines de la région de Biskra, afin de donner une solution adéquate qui tient en compte l'aspect économique et l'absence de ces effets néfastes.

Le procédé choisi est l'adoucissement par précipitation chimique à la chaux et par utilisation du carbonate de sodium.

Le suivi de l'évolution des paramètres de qualité physico-chimique après traitement par chaque réactif a permis de montrer que les doses de chaux ou du carbonate de sodium nécessaires pour atteindre une valeur résiduelle minimale de la dureté sont assez importantes.

La dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ont subi une diminution. L'augmentation du pH pour les trois eaux nécessitera une neutralisation ultérieure par l'ajout du CO<sub>2</sub>.

Pour les eaux de cette région, il serait préférable de combiner l'utilisation de la chaux et du carbonate de sodium pour éliminer à la fois la dureté temporaire et permanente.

**Mots clés :** Eaux souterraines, dureté, adoucissement, chaux, carbonate de sodium.

## المخلص

سبب الصلابة العالية للمياه الموزعة مشاكل ناتجة عن تشكل الأغشية الحيوية، انسداد قنوات المياه، الأنابيب والمعدات المنزلية (الغلايات، الغسالات، الحديد...) وفعالية أقل في غسل المنسوجات (لأن تشكل الرغوة أقل).

الهدف من هذه الدراسة هو اختبار طريقة معالجة تقلل من عسر المياه الجوفية في منطقة بسكرة، من أجل توفير حل مناسب يأخذ في الاعتبار الجانب الاقتصادي وغياب هذه الآثار الضارة.

الطريقة المختارة هي التليين بواسطة الترسيب الكيميائي باستخدام الجير وباستخدام كربونات الصوديوم.

وقد أظهرت مراقبة تطور معايير النوعية الفيزيائية والكيميائية للمياه بعد عملية المعالجة مع كل مادة أن كميات الجير أو كربونات الصوديوم اللازمة للوصول إلى الحد الأدنى من القيمة المتبقية للصلابة معتبرة للغاية. تم تخفيض عسر المياه وهذه المعايير. تتطلب زيادة الأس الهيدروجيني للمياه الثلاثة تحبيدًا لاحقًا بإضافة CO<sub>2</sub>.

بالنسبة لمياه هذه المنطقة، سيكون من الأفضل الجمع بين استخدام الجير وكربونات الصوديوم للتخلص من عسر الماء المؤقت والدائم.

**الكلمات المفتاحية:** مياه جوفية، عسر الماء، تليين المياه، جير، كربونات الصوديوم.

# Sommaire

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

## Partie Bibliographique

### Chapitre I: Qualité des eaux de la région de Biskra

I.1.Introduction.....	3
I.2. Paramètres de qualité physico-chimique des eaux.....	3
I.2.1. Température.....	3
I.2.2. pH.....	3
I.2.3. Conductivité électrique.....	4
I.2.4. Dureté totale.....	4
I.2.5. Alcalinité.....	4
I.2.6. Potassium.....	5
I.2.7. Sodium.....	5
I.2.8. Chlorures.....	5
I.2.9. Sulfates.....	6
I.3. Normes de potabilité et classification des eaux.....	6
I.4. Ressources en eau dans la région de Biskra.....	6
I.4.1. Etat de connaissance sur les ressources en eaux souterraines.....	8
a)Nappes superficielles.....	9
b)Nappe des sables.....	10
c)Nappe des calcaires.....	10
d)La nappe albienne.....	10
I.5. Qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Biskra	11
I.6. Conclusion.....	14

### Chapitre II: Impact des eaux dures sur la santé et les ouvrages hydrauliques et procédés d'adoucissement.

II .1 Introduction.....	15
II.2 Dureté de l'eau.....	15
II.2.1 Définition.....	15
II.2.2 Types de la dureté.....	16
a. Dureté carbonatée ou temporaire (TH(temp)).....	16
b. Dureté non carbonatée ou permanente (THp).....	16
II.2.3Conséquences de la dureté.....	16
II.2.3.1 Impacte de la dureté sur la santé.....	17
II.2.3.2 Impact de la dureté sur les utilisations domestiques.....	17
II.2.3.3 Formation de tartre.....	18
II.2.3.4 Paramètres de l'entartage.....	18
II.2.3.5Conséquences de l'entartage.....	18

a) Conséquences hydrauliques.....	18
b) Conséquences bactériologiques.....	19
c) Conséquences technologiques.....	19
II.2.4 Normes de potabilité vis-à-vis de la dureté de l'eau.....	20
II.3 Procèdes d'adoucissement des eaux.....	20
II.3.1 Echange ionique.....	21
a) Les résines d'adoucissement.....	21
b) Les résines d'adoucissement.....	22
II.3.1.1 Adoucisseur d'eau à l'échelle industriel.....	22
II.3.1.2 Avantages et inconvénients de l'utilisation d'une eau adoucie par résine.....	23
II.3.2 Osmose inverse.....	23
II.3.2.1 Osmose inverse.....	23
II.3.2.2 Principe de l'osmose inverse.....	23
II.3.3 Adoucisseur d'eau au CO <sub>2</sub> .....	25
II.3.4 Précipitation chimique.....	26
II.3.4.1 Utilisation de la soude caustique (NaOH).....	26
II.3.4.2 Utilisation de la chaux.....	26
II.3.4.2.1 Procédé par addition de chaux seulement.....	27
II.3.4.2.2 Procédé par addition d'un excès de chaux.....	28
II.3.4.4 Utilisation du carbonate de sodium.....	29
II.4. Conclusion.....	30

## Partie expérimentale

### Chapitre I: Méthodes et Matériels

I.1. Introduction.....	31
I.2. Préparation des solutions.....	31
I.2.1. Solutions mères de la chaux.....	31
I.2.2. Solution mère de carbonate de sodium.....	31
I.3. Caractéristiques physico-chimique des eaux traitée.....	31
I.4. Dosage des paramètres de la qualité physico-chimique de l'eau.....	32
I.4.1. pH.....	32
I.4.2. Conductivité.....	32
I.4.3. Titre alcalimétrique complet (T.A.C).....	33
I.4.4. Titre hydrométrique (TH).....	33
I.4.5. Dosage du calcium (Ca <sup>2+</sup> ).....	33
I.4.6. Mesure du Magnésium (Mg <sup>2+</sup> ).....	34
I.4.1 Dosage des chlorures (Cl <sup>-</sup> ).....	34
I.4.8. Dosage du sodium (Na <sup>+</sup> ) et potassium (K <sup>+</sup> ).....	34
I.4.9. Dosage des ions sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	35
I.5. Description des essais d'adoucissement.....	35
I.5.1. Caractéristiques de l'adsorbant utilisé.....	35
I.5.2. Essais d'adoucissement.....	36
I.5.3. Essais de la détermination du volume des boues.....	37
I.6. Conclusion.....	37

<b>II.1</b> Introduction.....	<b>38</b>
<b>II.2</b> Résultats et discussion.....	<b>38</b>
<b>II.2.1</b> Caractérisation des eaux traitées.....	<b>38</b>
<b>II.2.2</b> Diagramme à barre des eaux brutes.....	<b>39</b>
<b>II.2.3</b> Essais d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux.....	<b>41</b>
<b>II.2.3.1</b> Calcul des doses théoriques de la chaux nécessaire pour l'adoucissement.....	<b>41</b>
<b>II.2.3.1.1</b> Procédé par addition de la chaux seulement.....	<b>41</b>
<b>II.2.3.1.2</b> Traitement avec un excès de chaux.....	<b>43</b>
<b>II.2.3.2</b> Résultats et discussion des essais expérimentaux d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux.....	<b>45</b>
<b>II .2.4</b> Essais d'adoucissement par $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	<b>49</b>
<b>II .2.4.1</b> Détermination de la dose Théorique de $\text{Na}_2\text{CO}$	<b>49</b>
<b>II.2.4.2</b> Résultats et discussion des essais expérimentaux.....	<b>49</b>
<b>II.2.5</b> Comparaison entre les deux procédés d'adoucissement.....	<b>52</b>
<b>II.2.5.1</b> Dose des réactifs et qualité des eaux.....	<b>52</b>
<b>II.2.5.2</b> Volume des boues produites.....	<b>54</b>
<b>II.3</b> Conclusion.....	<b>55</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>56</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>58</b>
<b>Annexe 1.....</b>	<b>62</b>
<b>Annexe 2.....</b>	<b>68</b>



## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Localisation de la wilaya de Biskra Algérie.....	8
<b>Figure 2:</b> Volume soutiré de la wilaya de Biskra par secteur.....	9
<b>Figure 3:</b> Diagramme de Piper pour les eaux de la nappe du Moi-pliocène de la commune de Biskra.....	13
<b>Figure4:</b> Entartrage des appareils et des canalisation d'eau.....	17
<b>Figure 5:</b> Résines utilisées dans le domaine de l'adoucissement des eaux.....	20
<b>Figure 6:</b> Schématisation du principe d'adoucissement d'une eau par utilisation des résines.....	21
<b>Figure 7:</b> Schématisation du principe d'adoucissement d'une eau par utilisation des résines.....	21
<b>Figure 8:</b> Résines échangeuses d'ions utilisées dans l'adoucissement des eaux.....	22
<b>Figure 9:</b> Evolution de la dureté totale (TH) de l'eau avant et après chaque étape de traitement.....	24
<b>Figure 10:</b> Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	25
<b>Figure 11:</b> Principe de fonctionnement du système d'adoucissement par précipitation à la chaux.....	27
<b>Figure 12:</b> Etapes de déroulement du procédé par addition de chaux seulement...	28
<b>Figure 13:</b> Etapes de déroulement du procédé par addition d'un excès de chaux.....	29
<b>Figure14:</b> Solution mère de chaux sous agitation.....	31
<b>Figure 15:</b> pH mètre utilisé au cours des essais.....	32
<b>Figure16:</b> Conductimètre utilisé pour la mesure de la conductivité des échantillons d'eau.....	33
<b>Figure 17:</b> Détermination du TH par complexométrie à l'EDTA.....	33
<b>Figure 18:</b> Dosage du calcium par complexation à l'EDTA.....	34
<b>Figure 19:</b> Détermination de la concentration des chlorures (Cl-.....	34
<b>Figure 20:</b> Spectrophotomètre à flamme utilisé pour le dosage du sodium et du potassium.....	35

<b>Figure 21:</b> Palint est utilisé pour le dosage des sulfates.....	<b>35</b>
<b>Figure 22:</b> Essais d'adoucissement .....	<b>36</b>
<b>Figure 23:</b> Essais de détermination du volume des boues.....	<b>37</b>
<b>Figure24:</b> Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de chaux introduite.....	<b>46</b>
<b>Figure25 :</b> Comparaison entre la dose théorique de chaux et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.....	<b>48</b>
<b>Figure 26:</b> Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de carbonate de sodium introduite.....	<b>50</b>
<b>Figure 27:</b> Comparaison entre la dose théorique de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.....	<b>52</b>
<b>Figure 28:</b> Comparaison entre les doses des réactifs utilisés pour le traitement...	<b>53</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Localisation de la wilaya de Biskra Algérie.....	<b>8</b>
<b>Figure 2:</b> Volume soutiré de la wilaya de Biskra par secteur.....	<b>9</b>
<b>Figure 3:</b> Diagramme de Piper pour les eaux de la nappe du Moi-pliocène de la commune de Biskra.....	<b>13</b>
<b>Figure4:</b> Entartrage des appareils et des canalisation d'eau.....	<b>17</b>
<b>Figure 5:</b> Résines utilisées dans le domaine de l'adoucissement des eaux.....	<b>20</b>
<b>Figure 6:</b> Schématisation du principe d'adoucissement d'une eau par utilisation des résines.....	<b>21</b>
<b>Figure 7:</b> Schématisation du principe d'adoucissement d'une eau par utilisation des résines.....	<b>21</b>
<b>Figure 8:</b> Résines échangeuses d'ions utilisées dans l'adoucissement des eaux.....	<b>22</b>
<b>Figure 9:</b> Evolution de la dureté totale (TH) de l'eau avant et après chaque étape de traitement.....	<b>24</b>
<b>Figure 10:</b> Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	<b>25</b>
<b>Figure 11:</b> Principe de fonctionnement du système d'adoucissement par précipitation à la chaux.....	<b>27</b>
<b>Figure 12:</b> Etapes de déroulement du procédé par addition de chaux seulement...	<b>28</b>
<b>Figure 13:</b> Etapes de déroulement du procédé par addition d'un excès de chaux.....	<b>29</b>
<b>Figure14:</b> Solution mère de chaux sous agitation.....	<b>31</b>
<b>Figure 15:</b> pH mètre utilisé au cours des essais.....	<b>32</b>
<b>Figure16:</b> Conductimètre utilisé pour la mesure de la conductivité des échantillons d'eau.....	<b>33</b>
<b>Figure 17:</b> Détermination du TH par complexométrie à l'EDTA.....	<b>33</b>
<b>Figure 18:</b> Dosage du calcium par complexation à l'EDTA.....	<b>34</b>
<b>Figure 19:</b> Détermination de la concentration des chlorures (Cl-.....	<b>34</b>
<b>Figure 20:</b> Spectrophotomètre à flamme utilisé pour le dosage du sodium et du potassium.....	<b>35</b>

Figure 21: Palint est utilisé pour le dosage des sulfates.....	35
Figure 22: Essais d'adoucissement .....	36
<b>Figure 23:</b> Essais de détermination du volume des boues.....	37
<b>Figure24 :</b> Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de chaux introduite.....	46
<b>Figure25 :</b> Comparaison entre la dose théorique de chaux et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.....	48
<b>Figure 26 :</b> Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de carbonate de sodium introduite.....	50
<b>Figure 27 :</b> Comparaison entre la dose théorique de $\text{Na}_2\text{CO}_3$ et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.....	52
<b>Figure 28 :</b> Comparaison entre les doses des réactifs utilisés pour le traitement...	53

# **Conclusion générale**

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Classification des eaux d'après le traitement.....	<b>4</b>
<b>Tableau 2:</b> Relation entre la minéralisation de l'eau et la conductivité mesurée.....	<b>4</b>
<b>Tableau 3:</b> Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine.....	<b>7</b>
<b>Tableau 4 :</b> Classification de l'eau en fonction de la valeur de la dureté totale TH (°F)...	<b>7</b>
<b>Tableau 5 :</b> Données physico – chimiques de quelques points d'eau de la région de Biskra.....	<b>11</b>
<b>Tableau 6:</b> Dureté des eaux de la région d'étude.....	<b>12</b>
<b>Tableau 7:</b> Les différents paramètres d'analyses physico-chimiques des eaux de forages de la nappe du Moi-pliocène de la région de Biskra.....	<b>13</b>
<b>Tableau 8:</b> Valeurs limites des paramètres de la dureté de l'eau.....	<b>19</b>
<b>Tableau 9:</b> Caractéristiques physico-chimiques des eaux traitées.....	<b>32</b>
<b>Tableau 10:</b> Caractéristiques des produits utilisés pour les essais d'adoucissement.....	<b>36</b>
<b>Tableau 11 :</b> Caractéristiques physico-chimiques des eaux traitées.....	<b>39</b>
<b>Tableau 12 :</b> Conversion de la concentration des éléments mesurés en mg de CaCO <sub>3</sub> /L pour chaque eau testée.....	<b>40</b>
<b>Tableau 13 :</b> Résultats optima des essais expérimentaux d'adoucissement des eaux par précipitation à la chaux ( <b>B</b> : eau brute ; <b>T</b> : eau traitée).....	<b>47</b>
<b>Tableau 14:</b> Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux Ca(OH) <sub>2</sub> .....	<b>48</b>
<b>Tableau 15 :</b> Résultats optima des essais expérimentaux d'adoucissement des eaux par précipitation au carbonate de sodium ( <b>B</b> : eau brute ; <b>T</b> : eau traitée).....	<b>51</b>
<b>Tableau 16:</b> Comparaison entre les paramètres de qualité avant et après traitement.....	<b>54</b>
<b>Tableau 17 :</b> Comparaison entre les boues produites par les deux traitements.....	<b>54</b>

# Liste des abréviations

<b>Ca<sup>2+</sup></b> : Calcium.	<b>TH(temp)</b> : La Dureté Temporaire.
<b>Mg<sup>2+</sup></b> : Magnesium.	<b>THp</b> : La Dureté Permanente.
<b>Na<sup>+</sup></b> : Sodium.	<b>TH<sub>ca</sub></b> :La Dureté Calcique.
<b>K<sup>+</sup></b> : Potassium.	<b>CaSO<sub>4</sub></b> :Sulfate de Calcium.
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> : Sulfate.	<b>NaSO<sub>4</sub></b> : Sulfate de Sodium.
<b>Cl</b> :Chlorure.	<b>Ca(HCO<sub>3</sub>)</b> : Bicarbonate de Calcium.
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> : Bicarbonate.	<b>Mg(CO<sub>3</sub>)</b> : Carbonate de Magnesium.
<b>OH</b> : Hydroxyde.	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> : Sulfated'Hydrogene.
<b>pH</b> : Potentiel Hydrogène.	<b>CI</b> : Continentale Intercalaire.
<b>TAC</b> : Titre Alcalimétrique Complet.	<b>CT</b> : Complexe Terminal.
<b>TA</b> : TitreAlcalimitrique.	<b>ABHS</b> : Agence de Bassin Hydrographique de Sahara.
<b>TH</b> : Titre Hydrométrique ( <b>dureté total</b> ).	<b>ANRH</b> : Agence Nationale des Ressources Hydriques.
<b>°F</b> : Degré Français.	<b>ANAT</b> : Agence Nationald'Aménagement de Territoire.
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b> : Carbonate.	<b>CDTN</b> : Centre de Développement des Techniques Nucléaires.
<b>T°</b> : Température.	<b>ERESS</b> : Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional.
<b>AEP</b> : Alimentationen Eau Potable.	<b>JORA</b> : Journal Officiel de la République Algérienne.
<b>CE</b> : Conductivité Electrique.	<b>DPAT</b> : Direction de Planification et d'Aménagement de Territoire.
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b> : La Chaux.	
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b> : Carbonatede Sodium.	
<b>OMS</b> : Organisation Mondiale de la Santé.	
<b>C.E.E</b> : Communauté Economique Européen.	
<b>CaCO<sub>3</sub></b> : Carbonate de Calcium.	
<b>CO<sub>2</sub></b> : Dioxyde de Carbone.	
<b>Mg(OH)<sub>2</sub></b> : L'Hydroxyde de Magnésium	

# **Introduction générale**



## Introduction générale

Dans la ville de Biskra, l'alimentation en eau potable des habitants et l'irrigation des cultures reposent sur l'exploitation des eaux souterraines des aquifères du Sahara Septentrional. L'un des enjeux majeurs pour la durabilité de l'utilisation de cette ressource est la qualité des eaux de certains aquifères (Phréatique et Miopliocène). Ces dernières sont fortement minéralisées (entre 2 et 3 g·L<sup>-1</sup> de sel dissous) (Bouchahm, 2016).

Les eaux de ces nappes se caractérisent par une dureté excessive due principalement aux taux élevés en calcium et magnésium, ainsi que par de fortes teneurs en chlorures, sulfates et sodium (Bouchemal, 2017 ; Kheliel et al, 2018).

Cependant, une dureté élevée de l'eau distribuée engendre des problèmes d'ordre pratique à l'utilisateur, entartrage des circuits d'eaux chaudes et des canalisations, surconsommation des produits détergents et surdimensionnement des installations de déminéralisation (Desjardin, 1997 ; Mange, 2008).

On peut réduire la dureté d'une eau par utilisation des résines échangeuses d'ions, les procédés membranaires et en favorisant la précipitation des ions calcium et des ions magnésium en utilisant la chaux, le carbonate de sodium ou par combinaison entre la chaux et le carbonate de sodium (Degrèment, 1989 ; Desjardin, 1997 ; Mange, 2008).

Face à ce problème, nous nous sommes intéressés à tester un traitement qui nous mène à réduire la dureté des eaux souterraines de la région de Biskra, afin de donner une solution adéquate qui tient en compte l'aspect économique et des effets néfastes.

Le procédé choisi est l'adoucissement par précipitation chimique à la chaux et par utilisation du carbonate de sodium.

Notre travail sera présenté en deux parties:

- Une partie bibliographique comporte deux chapitres. Commencant par la présentation d'une synthèse bibliographique sur la qualité des eaux souterraines de la région de Biskra, et plus particulièrement sur le problème de l'excès de la dureté dans les eaux des nappes les plus exploitées. Une idée générale sera exposée sur la dureté des eaux, ses conséquences et les procédés d'adoucissement des eaux à l'échelle industriel.

- Une partie expérimentale, qui sera débutée par une présentation de la méthodologie mise en œuvre pour la réalisation des essais d'adoucissement. En commençant par une description des caractéristiques des solutions et des réactifs utilisés ainsi que les méthodes de dosage de différents paramètres physico-chimiques. Dans le deuxième chapitre, une présentation des résultats d'analyses et une discussion seront faites.

## **Chapitre I:**

Qualité physico-chimique des eaux de  
la région de Biskra

# **Partie Bibliographique**

## **1.1 Introduction**

Le principal objectif de ce chapitre est de donner un aperçu sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Biskra. Grâce à une synthèse bibliographique donnant une idée de la nature des eaux de la région orientale, aussi bien les eaux destinées à l'alimentation en eau potable que les eaux d'irrigation. Nous allons particulièrement attardés sur l'excès de la dureté dans les eaux de nappes les plus exploitées. Et avant d'entamer ce problème, nous allons présenter quelques notions générales sur les paramètres physico-chimiques nécessaires pour la classification d'une eau naturelle.

## **I .2 Paramètres de qualité physico-chimique des eaux**

Lors de l'analyse d'une eau en vue de la détermination de sa qualité physico-chimique on doit tenir compte de tout élément physique ou chimique constitutif de la structure naturelle d'une eau. Parmi ces paramètres on définit quelques paramètres qui nous ont utiles pour notre étude expérimentale.

### **I .2.1 Température**

La température est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman et al, 1996). Certes, toute variation brusque de ce paramètre entraîne une perturbation dans l'équilibre de l'écosystème aquatique.

### **I.2.2 pH**

C'est un facteur de mesure la concentration des ions  $H^+$ , il renseigne sur son acidité et alcalinité. Il influence la plus part des mécanismes chimiques et biologiques des eaux.

Le PH d'une eau naturelle dépend de l'origine de celle-ci et de la nature des terrains traverses.

Selon la valeur du pH, ce paramètre joue un rôle important dans :

- Les propriétés physico-chimiques (acidité, alcalinité) (Tableau 1).
- Les processus biologiques.
- L'efficacité de certains procédés de traitements comme la coagulation, l'adoucissement et la chloration (Ronald, 2003 ; Rodier, 1996).

**Tableau1:** Classification des eaux d'après leur pH (Rodier, 1996).

pH < 5	Acidité forte → présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles.
pH =7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée → majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH =8	Alcalinité forte, évaporation intense

### I.2.3 Conductivité électrique

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Nouayti et al, 2015). Le tableau 2 donne une relation entre la conductivité et la minéralisation des eaux naturelles.

**Tableau 2:** Relation entre la minéralisation de l'eau et la conductivité mesurée (Rejsek,2002).

Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ )	Minéralisation de l'eau
< 100	Très faible
Entre 100 et 200	Faible
Entre 200 et 333	Moyenne
Entre 333 et 666	Moyenne accentuée
Entre 666 et 1000	Importante
>1000	Elevée

### I.2.4 Dureté totale (TH)

La dureté d'une eau ou son **titre hydrotimétrique (TH)** exprime sa concentration en sels de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). La dureté est liée à la nature des terrains traversés par une eau. Si l'eau présente une forte concentration de ces sels minéraux, on dit qu'elle est dure (c'est le cas des eaux provenant des sols calcaires). A l'inverse, si cette concentration est

faible, l'eau est dite douce, ce qui est le cas pour les eaux qui traversent des sols granitiques (Cardot et Gilles, 2013).

### I.2.5 Alcalinité (TAC et TA)

L'alcalinité correspond en majeure partie par anions ou des espèces moléculaires d'acides faibles, principalement l'hydroxyde, le bicarbonate et le carbonate. Le titre alcalimétrique complet (TAC) est exprimé par les concentrations de ces éléments en quantités équivalente de carbonate de calcium, de milliéquivalents ou en degré français.

$$\text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] = \text{TA} + [\text{HCO}_3^-]$$

$$\text{TA} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \text{ (titre alcalimétrique) , Le TA} = \text{O}^\circ\text{F Si le pH de l'eau} < 8,3$$

L'alcalinité d'une eau représente la capacité des milieux aqueux à réagir avec les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$ .

- b) Elle est due à l'existence des ions mono hydrogénocarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ).
- c) Elle est quantifiée par l'alcalinité composite notée AP ou par le TA (titre alcalimétrique) et par l'alcalinité total notée AT ou par TAC (titre alcalimétrique complet).

L'alcalinité d'une eau est étroitement liée à la valeur de sa dureté (Cardot et Gilles, 2013).

### I.2.6 Potassium ( $\text{K}^+$ )

Le potassium est un élément indispensable à la vie et notamment à la croissance des végétaux. La teneur en potassium est presque constante dans les eaux naturelles. Elle ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l (Rodier et al, 2009). Les teneurs élevées en  $\text{K}^+$  dans les eaux des nappes sont dues probablement à la dissolution des engrais potassium qui sont utilisées par les agriculteurs.

### I.2.7 Sodium ( $\text{Na}^+$ )

Le sodium ( $\text{Na}^+$ ) est un élément qui existe naturellement dans une eau. Il existe dans la totalité des eaux souterraines car la solubilité de ses sels est très élevée (Rodier et al, 2009). Des quantités importantes de NaCl donnent un goût salé à l'eau (Bremond et Vuichard, 1973). L'origine de sodium dans la nappe peut être due à la dissolution des minéraux salifères (NaCl) et par un échange de base contre le calcium de l'eau (Shoeller, 1962).

### **I.2.8 Chlorures (Cl<sup>-</sup>)**

Sont des ions inorganiques importants contenus en concentration variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl) , il sont souvent utilisés comme un indicateur de pollution.

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. L'origine peut être (Nouayti et al, 2015) :

- Percolation à travers des terrains sales.
- infiltration des eaux marines dans les nappes phréatique et profonde.
- Effet de l'activité humaine.
- Industries extractives et dérivées.

### **I.2.9 Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Les sulfates contenus naturellement dans l'eau souterraine sont fournis par la dissolution des minéraux contiennent du soufre, comme elles peuvent être d'origine anthropique par l'usage d'engrais ou des produits phytosanitaires, dans l'agriculture (Queneau et Hubert, 2009;Bremond et Vuichard, 1973). Sa présence dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypsifères (Sedrati, 2009).

## **I.3 Normes de potabilité et classification des eaux**

L'eau est un élément indispensable à la vie et l'état de santé de la population. Elle est liée à la qualité physico-chimique et bactériologique qu'elles consomment. L'élaboration des normes de potabilité est basée sur les études scientifiques montrant les effets nocifs sur la santé, des éléments physico-chimiques à partir d'une certaine concentration maximale à ne pas dépasser. Par sécurité la valeur de la norme sera largement inférieure à cette dose, afin d'éviter le développement de pathologie, malgré le dépassement du seuil (Rejsek, 2002).

L'eau potable doit être exempte de matières en suspension, micro-organismes et produits toxiques. Les recommandations quant aux concentrations en minéraux varient de pays à pays avec toutefois pour la plupart des minéraux une concentration maximale afin de garantir une eau équilibrée et agréable à boire ([www.Lenntech.fr](http://www.Lenntech.fr)).

Les normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine suivant le journal officiel de la république Algérienne qui date du 09 Mars 2014 sont présentés dans le tableau suivant:



**Tableau 3:** Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine.

Paramètre	Valeur limite
pH	6,5 < pH < 9 (JORA, 2014)
Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ )	2800 (JORA, 2014)
Sodium ( $\text{Na}^+$ ) (mg/l)	200 (JORA, 2014)
Potassium ( $\text{K}^+$ ) (mg/l)	12 (JORA, 2014)
Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (mg/l)	200 (JORA, 2014)
Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (mg/l)	Non indiquée par JORA et OMS. On adopte 50 mg/l selon CEE (1975)
TH ( $^{\circ}\text{F}$ )	50 (JORA, 2014)
Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) (mg/l)	500 (JORA, 2014)
Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (mg/l)	400 (JORA, 2014)
TAC ( $^{\circ}\text{F}$ )	6,5 (JORA, 2014) Pour les eaux dessalées ou déminéralisées (valeur minimale)

La potabilité d'une eau peut être estimée à partir des valeurs de son degré Hydrotimétrique. Selon la norme algérienne si le TH d'une eau dépasse 50  $^{\circ}\text{F}$  elle est classée comme étant une eau dure. D'autres législations comme le montre le tableau 4 ont donné plus de détail.

**Tableau 4:** Classification de l'eau en fonction de la valeur de la dureté totale (TH ( $^{\circ}\text{F}$ )).

(Rodier et al, 2009)		(Rejsek, 2002)	
TH ( $^{\circ}\text{F}$ )	Qualité de l'eau	TH ( $^{\circ}\text{F}$ )	Caractère de l'eau
0-7	Eau très douce	0 - 10	Eau très douce
7-14	Eau douce	10 - 20	Eau moyennement douce
14-22	Eau moyennement douce	20 - 30	Eau dure
22-32	Eau assez dure	>30	Eau très dure
32-54	Eau dure		
> 54	Eau très dure		

#### I.4 Ressources en eau dans la région de Biskra

La wilaya de Biskra est localisée au Sud-Est algérien (Figure 1) entre la région des Aurès et les Zibans et s'étend sur une superficie de près de 2 167,20 km<sup>2</sup>(wikipedia.org).

Le climat de la région est de type saharien, caractérisé par un faible taux des précipitations, des températures élevées, d'une évaporation importante et d'un rayonnement solaire excessif (Sedrati, 2011).



**Figure 1:** Localisation de la wilaya de Biskra en Algérie (google.com).

La wilaya de Biskra comprend trois grands sous bassins, la vallée d'oued Djedid, la cuvette d'El Outaya et la plaine de Biskra. Le potentiel total de la wilaya avoisine 2113,86 Hm<sup>3</sup>/an dont 2042,43Hm<sup>3</sup>/an, soit 96,6% des potentialités proviennent des forages et puits (ANRH, 2010).

La quantité d'eau consacrée à la wilaya de Biskra est de 1017 millions de m<sup>3</sup>, dont 22millions de surface, soit 2, 61% et 995 millions de m<sup>3</sup> d'eau souterraine ce qui représente 97,84 %.(Bouchemal, 2017).

La distribution des eaux souterraines exploitées dans la région est comme suit :

- 771millions de m<sup>3</sup> destinées à l'agriculture, soit 85%.
- 126 millions de m<sup>3</sup> destinées à l'alimentation en eau potable, présente 14%.
- 10 millions de m<sup>3</sup> destinées à l'industrie, soit 1%.

Il y a deux barrages dans la wilaya dirigés spécifiquement pour l'irrigation des terres agricoles.

- ❖ Barrage Foum El Gharza qui a une capacité de stockage initiale de 47 millions de m<sup>3</sup>. couvre les besoins de 130 000 palmiers d'une capacité annuelle régulière de 8 millions de m<sup>3</sup>.
- ❖ Barrage Fontaines des Gazelles d'une capacité de stockage initiale de 55,5 millions de m<sup>3</sup>, destiné à l'irrigation d'un périmètre de la commune d'El Outaya (la superficie de périmètre est de 90 hectares) d'une capacité annuelle régulière de 14 millions de m<sup>3</sup>(D.P.A.T, 2014).

#### **I.4.1 Etat de connaissance sur les ressources en eaux souterraines**

La wilaya de Biskra présente des ressources en eau souterraines très importantes, représentées par les nappes des deux systèmes aquifères du Sahara septentrional, le complexe terminal (CT) et le continental intercalaire (CI) (ERESS, 1972).

Ces ressources sont présentées par quatre unités aquifères (Haddoud, 2013) :

- Nappe phréatique du Quaternaire.
- Nappe des sables du Moi-pliocène.
- Nappe des calcaires de l'Eocène inférieur et du Sénonien.
- Nappe des grès du continental Intercalaire.

Les eaux souterraines représentent l'unique ressource en eau potable dans toute la région de Biskra. La mobilisation de ces eaux se fait généralement au moyen de forages peu profonds.

La wilaya de Biskra totalise 11440 point d'eau, dont 7861 forages, 3573 puits et 6 sources.

Le volume d'eau souterraine mobilisé est de 710,28 Hm<sup>3</sup>. La répartition des volumes par usages est représentée dans la figure 2.

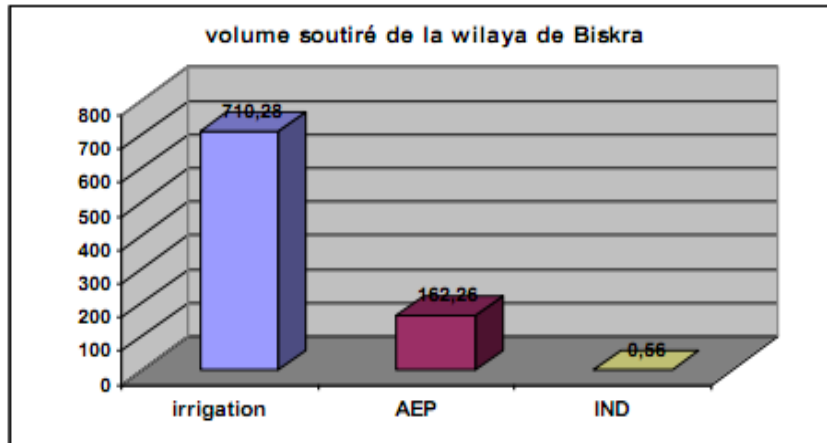


Figure 2: Volume soutiré de la wilaya de Biskra par secteur (ABHS, 2012).

La wilaya de Biskra présente depuis longtemps, une sur exploitation des ressources en eau souterraines est-ce par la prolifération des forages. Cet accroissement, rentre dans le cadre du développement agricole de la région. L'entretien et le suivi des ouvrages deviennent de plus en plus difficiles.

A l'exception des ouvrages étatiques, il est remarqué qu'un nombre important de forages et de puits appartenant aux privés, présentent des équipements inadéquats. On note aussi, que ces ouvrages, n'ont pas fait l'objet de suivi technique des travaux (A.N.A.T, 2003).

#### a) Nappes superficielles

Cette nappe se localise généralement dans les accumulations alluvionnaires, et c'est au niveau des palmeraies qu'elles sont le mieux connu avec une profondeur comprise entre 20 et 150 m et un débit de 5 à 10 l/s. Les nappes les plus importantes dans la wilaya, sont de l'Oued Biskra et de l'Oued Djedid. Leur alimentation est assurée par les précipitations atmosphériques, l'infiltration des eaux des oueds en période de crue et par les eaux d'irrigation (A.N.A.T, 2003).

#### b) Nappe des sables

Constituée par une alternance de niveau d'argile, sable et cailloutis d'âge Mio-pliocène, elle couvre une grande superficie de la wilaya. Cette nappe est fortement exploitée dans la partie Est de la wilaya et notamment dans la zone de M'Ziraa.

Du point de vue hydrodynamique, cette nappe présente un système très hétérogène représenté par des couches de diverses perméabilités. La profondeur de cette nappe est de 100 à 300 m, avec un débit moyen de 15l/s.

A l'Est de la wilaya de Biskra, cette nappe se subdivise en deux aquifères séparés par une épaisse couche d'argile et d'argile sableuse, l'un profond désigné sous le nom du Pontien et l'autre moyennement profond qui est la nappe du Mio-pliocène connue dans cette région.

Le sens d'écoulement principale de la nappe des sables est vers du chott Melghir (A.N.A.T, 2003).

### c) Nappe des calcaires

Elle est sollicitée dans les palmeraies des Ziban, ou elle est appelée (nappe de Tolga). La profondeur de cette nappe varie de 100 m dans la zone de Tolga à 500 m dans la zone de Lioua. Le débit varie de 10 l/s par pompage jaillissant (cas d'Ourlal et Lioua). Les différents sondages réalisés dans cette région montrent qu'il existe une continuité hydraulique entre la nappe de l'Eocène inférieur et celle du Sénonien supérieur sous-jacente. Par contre, dans la zone d'Oumache et M'lili, ces deux nappes sont séparées par une épaisse couche de marne et de marno-calcaire et sa profondeur est d'environ 900 m (ABHS, 2005; A.N.A.T, 2003).

### d) Nappe albienne

C'est un réservoir très important constitué essentiellement de grès et de marne d'âge Albienne et Barrémien, d'une profondeur comprise entre 1600 et 2500 m, et un débit moyen de 80 l/s jaillissant. Son exploitation est très coûteuse en raison de sa profondeur. En outre sa température excessive la rend difficilement utilisable aussi bien pour l'alimentation en eau que pour l'irrigation. Cette nappe est exploitée dans 19 forages dans la wilaya (A.N.A.T, 2003).

## I.5 Qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région de Biskra

Le tableau 5 présente les résultats d'analyses physico-chimiques de quelques points d'eau de la région de Biskra.

**Tableau 5 :** Données physico – chimiques de quelques points d'eau de la région de Biskra (Youcef, 1998; Achour et Youcef, 2001).

Point d'eau	Nature de la nappe	pH	TAC (°F)	TH (°F)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Conductivité (mS/cm)
M' cid N°1	Miopliocène (CT)	7,04	29	156	189	261	1999	700	6,32
Et Aliasud	Miopliocène (CT)	7,32	24	120	168	187	1799	833	5,12
Jardin London	Miopliocène (CT)	7,22	27	137	186	217	1799	366	5,34
Doucen	Eocène inférieur(CT)	7,39	12	214	632	134	1050	632	2,86
Ouled-Djellal	Albien (CI)	7,96	12	191	454	186	1549	1250	3,79
El-hadjeb	Alluvion (CT)	7,14	15	179	645	43	1100	1750	3,19

En se basant sur les résultats des analyses du tableau si dessus nous pouvons constater que:

- Sur l'ensemble des points d'eau, le pH est voisin de la neutralité et varie entre 6,5 et 8. De ce fait, l'alcalinité de ces eaux est de type bicarbonaté.
- Les conductivités sont variables selon la nappe considérée, diminue avec la profondeur de l'aquifère en allant de la nappe phréatique vers l'albien, mais sont globalement élevées, largement supérieures à 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , révélatrice d'une forte minéralisation totale. Les cartes de minéralisation dressées (CDTN, 1992; Tabouche, 1999), indiquent un accroissement dans le sens d'écoulement des eaux grâce à des phénomènes de dissolution et mise en solution des sels des roches.
- Les cations calcium et magnésium sont présents en fortes teneurs, ce qui révèle une dureté totale (TH) importante sur l'ensemble des eaux de forages et dépassant la norme (50 °F) (JORA, 2014). La grande différence qui existe entre la dureté totale (TH) et la dureté carbonatée (TAC) serait essentiellement liée à la présence de chlorures et de sulfates. Le sodium est un autre ion se trouvant en forte concentration dans les eaux des nappes les plus superficielles. Cela est dû surtout à l'effet d'une forte évaporation provoquant la concentration en sels de sodium.

L'étude réalisée par Bouchemal et al (2011) ayant pour objectif de donner un aperçu sur la qualité physico – chimique des eaux du complexe terminal de la région de Biskra a montré que les valeurs de la dureté observées, pour tous les échantillons des nappes de la région d'étude, sont classées en valeurs minimales, maximales et moyennes dans le tableau 6.

**Tableau 6:** Dureté des eaux de la région d'étude (Bouchemal et al, 2011).

Nappe	Valeur Min (°F)	Valeur Max (°F)	Valeur Moy (°F)
Phréatique	52	259	115,41
Moi pliocène	74	386	181,28
Eocène	24,5	82,38	46,35
Albien	33,36	191	68,93

D'après les normes de potabilité des eaux établies par JORA (2014), on remarque que pour les échantillons observées, le titre Hydrométrique moyen dépasse 50°F, ce qui montre que les eaux de cette région sont très dures, sauf ce qui concerne la nappe de l'éocène dont les eaux sont moins dures (46,35°F).

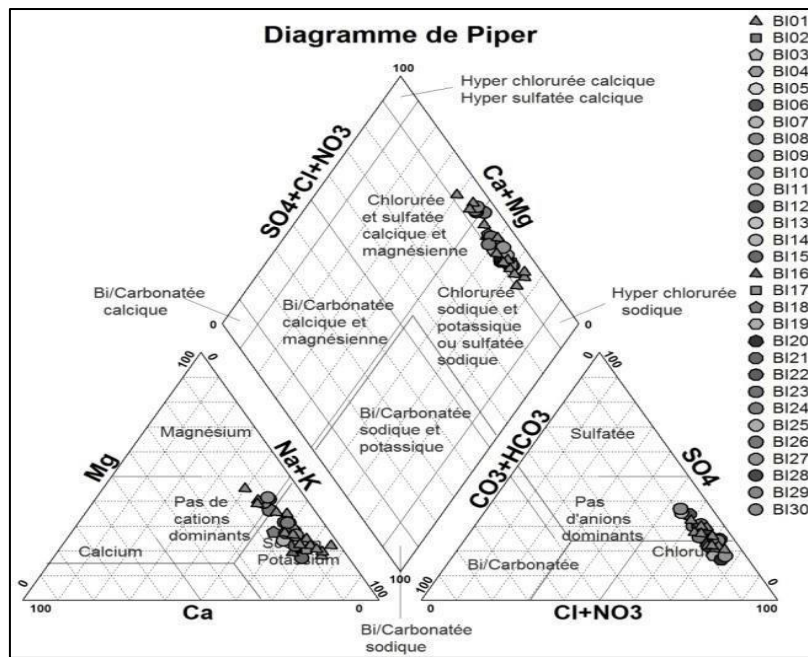
Les résultats obtenus des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe du Moi-pliocène de la commune de Biskra (Kheliel, 2018) ont montré une grande variation des concentrations des éléments chimiques. Ces résultats sont présentés dans le tableau 7.

L'utilisation des résultats d'analyses présentés dans le tableau 7 pour tracer le diagramme de Piper a permis de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. La figure 3 montre que les eaux de la nappe du Moi pliocène de la commune de Biskra présentent deux familles dominantes qui sont:

- ✓ Chlorurée sodique (88 %).
- ✓ Chlorurée calcique et magnésienne (12 %).

**Tableau7:** Les différents paramètres d'analyses physico-chimiques des eaux de forages de la nappe du Moi-pliocène de la région de Biskra.  
(Compagne d'échantillonnage : Janvier à Mars 2015) (Kheliel et al, 2018).

Paramètres physiques		Min	Moy	Max		
Mesure in situ	T° (°C)	16,20	22,50	24,70		
	pH	6,50	7,37	8,08		
	CE (µS/cm)	1990	3940	7100		
► CE : Conductivité électrique ► T° : Température						
Paramètres chimiques		Min	Moy	Mod	Max	Ecart-type
Mesure au laboratoire LADHYSS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	179,34	271,46	268,40	420,90	63,01
	Cl <sup>-</sup>	612,35	1474,83	1563,47	3333,45	539,30
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	15,24	55,79	101,36	124,49	32,49
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	450	783,26	680	1550	220,17
	Ca <sup>++</sup>	50,85	148,26	136,31	301,50	52,53
	Mg <sup>++</sup>	74,77	236,19	113	654,94	117,41
	Na <sup>+</sup>	419,61	996,22	955,65	2661,76	436,30
	K <sup>+</sup>	4,86	11,25	10,64	18,59	3,64



**Figure3:** Diagramme de Piper pour les eaux de la nappe du Moi-pliocène de la commune de Biskra (Kheliel et al, 2018).

## I.6 Conclusion

Il nous a été possible de donner la définition de quelques paramètres physico-chimiques d'une eau et donner un aperçu sur les ressources en eau dans la région de Biskra et l'évolution de la qualité physico-chimiques des eaux souterraines de cette région.

En particulier, les conductivités relevées correspondent à des minéralisations totales importantes diminuant avec la profondeur en passant de la nappe phréatique vers la nappe albiennaise.

Les ions dominants sont le plus souvent les chlorures et les sulfates ainsi que le calcium et le magnésium et sodium.

D'une façon générale, les caractéristiques minérales des eaux de la région d'étude sont apparues globalement médiocres avec des valeurs non-conformes aux normes de potabilité, notamment en ce qui concerne les nappes les plus exploitées (Nappes du complexe terminal). La plupart de ces eaux sont très dures.

Pour la majorité des eaux prélevées, le faciès le plus dominant dans la région est chloruré sodique.

La nappe superficielle du Moi-pliocène présente des eaux de qualité moyenne à mauvaise pour l'AEP.



## **Chapitre II:**

Impact des eaux dures sur la santé et les  
ouvrages hydrauliques et procédés  
d'adoucissement

# **Partie expérimentale**

# **Chapitre I:**

## Matériel et méthodes

## **Chapitre II :**

### Résultats des essais d'adoucissement

## II.1 Introduction

Selon la synthèse bibliographique que nous avons réalisé il semble que l'**adoucissement de l'eau** est un procédé de traitement initialement destiné à réduire la dureté de l'eau (due à la présence des sels alcalino-terreux: carbonates, sulfates et chlorures de calcium et de magnésium). Les eaux dures posent des problèmes de biofilms, de colmatage de conduites d'eau, tuyauteries et matériels domestiques (chaudières, machines à laver, fers à repasser...) et lavent un peu moins bien les textiles (car moussant moins).

L'objectif de ce chapitre est de tester l'efficacité de l'application d'un procédé d'adoucissement par précipitation chimique sur des eaux de la région de Biskra. Cette application vise à cerner les conditions d'application de ce type de traitement pour les eaux du sud Algérien qui souffrent du problème des eaux dures.

## II.2 Résultats et discussion

### II.2.1 Caractérisation des eaux traitées

Comme c'est indiqué dans le chapitre précédent, nous avons choisi trois eaux souterraines. Une eau provenant d'un forage de la région de M'Ziraa (située à l'Est de la wilaya de Biskra), une eau de forage (F1) provenant du champ captant de la ville de Biskra et une troisième eau provenant du robinet du laboratoire pédagogique, département de Génie civil et d'Hydraulique –Université de Biskra.

Après avoir comparé les résultats d'analyses physico-chimiques de ces eaux aux normes de potabilité, on peut constater que le TH des trois eaux dépasse la valeur limite exigée par le JORA (2014) étant 50 mg/l. Selon la classification du Tableau 11, Ces eaux sont très dures. De même pour les autres paramètres ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$ ) dans le cas des eaux des forages F1 et du laboratoire, les teneurs dépassent la norme.

**Tableau 11:** Caractéristiques physico-chimiques des eaux traitées.

Paramètre	Eau de M'Ziraa	Eau du robinet	Eau du forage F1	Norme de potabilité (JORA, 2014)
<b>pH</b>	7,57	7,10	7,8	6,5 < pH < 9
<b>Conductivité (ms/cm)</b>	1,2	4	3,46	2800
<b>TAC (°F)</b>	17,5	23	15	6,5 Pour les eaux dessalées ou déminéralisées (valeur minimale)
<b>TH (F°)</b>	55	106,5	78	50
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	213,5	280,6	183	Non indiquée
<b>Ca<sup>+2</sup> (mg/l)</b>	112	192	153,6	200
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	64,80	142,8	96,24	Non indiquée
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/l)</b>	400	570	520	400
<b>Cl (mg/l)</b>	124,96	877,22	737,27	500
<b>Na<sup>+</sup> (mg/l)</b>	57	651	609	200
<b>K<sup>+</sup> (mg/l)</b>	4	9	8	12

### II.2.2 Diagramme à barre des eaux brutes

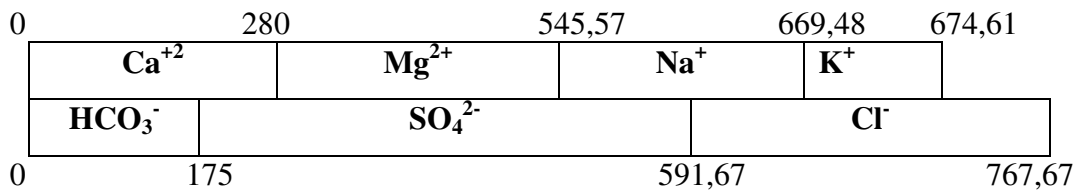
Afin de pouvoir calculer les doses théoriques de la chaux utilisées et des concentrations des éléments chimiques de l'eau après traitement pour les essais de précipitation nous devons passer par la conversion de la concentration des éléments mesurés en mg de CaCO<sub>3</sub> (Desjardins, 1997). Les résultats de calcul sont récapitulés dans le tableau suivant.

**Tableau 12:** Conversion de la concentration des éléments mesurés en mg de CaCO<sub>3</sub>/L pour chaque eau testée.

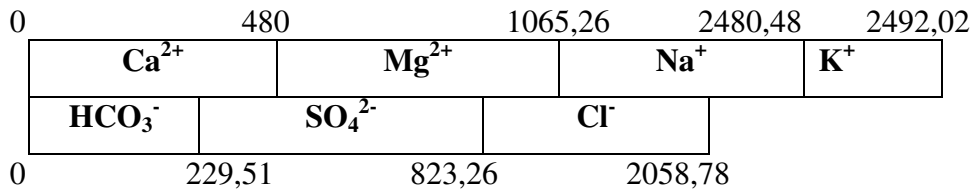
<b>Eau de M'ziraa</b>	
$\text{Ca}^{+2} : \frac{112 \times 50}{20} = 280 \text{ mg/l}$	$\text{HCO}_3^- : \frac{213.5 \times 50}{61} = 175 \text{ mg/l}$
$\text{Mg}^{2+} : \frac{64.80 \times 50}{12.2} = 265,57 \text{ mg/l}$	$\text{SO}_4^{2-} : \frac{400 \times 50}{48} = 416,67 \text{ mg/l}$
$\text{Na}^+ : \frac{57 \times 50}{23} = 123,91 \text{ mg/l}$	$\text{Cl}^- : \frac{124.96 \times 50}{35.5} = 176 \text{ mg/l}$
$\text{K}^+ : \frac{4 \times 50}{39} = 5,31 \text{ mg/l}$	
Total = 674,61 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )	Total = 767,67 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )
<b>Eau du robinet</b>	
$\text{Ca}^{+2} : \frac{192 \times 50}{20} = 480 \text{ mg/l}$	$\text{HCO}_3^- : \frac{280 \times 50}{61} = 229,51 \text{ mg/l}$
$\text{Mg}^{2+} : \frac{142,8 \times 50}{12.2} = 585,26 \text{ mg/l}$	$\text{SO}_4^{2-} : \frac{570 \times 50}{48} = 593,75 \text{ mg/l}$
$\text{Na}^+ : \frac{651 \times 50}{23} = 1415,22 \text{ mg/l}$	$\text{Cl}^- : \frac{877,22 \times 50}{35.5} = 1235,52 \text{ mg/l}$
$\text{K}^+ : \frac{9 \times 50}{39} = 11,54 \text{ mg/l}$	
Total = 2492,02 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )	Total = 2058,78 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )
<b>Eau Forage F1 (Oued El Hai)</b>	
$\text{Ca}^{+2} : \frac{153,6 \times 50}{20} = 384 \text{ mg/l}$	$\text{HCO}_3^- : \frac{183 \times 50}{61} = 150 \text{ mg/l}$
$\text{Mg}^{2+} : \frac{96,24 \times 50}{12.2} = 394,43 \text{ mg/l}$	$\text{SO}_4^{2-} : \frac{520 \times 50}{48} = 541,67 \text{ mg/l}$
$\text{Na}^+ : \frac{609 \times 50}{23} = 1323,92 \text{ mg/l}$	$\text{Cl}^- : \frac{737,27 \times 50}{35.5} = 1038,41 \text{ mg/l}$
$\text{K}^+ : \frac{8 \times 50}{39} = 10,26 \text{ mg/l}$	
Total = 2112,61 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )	Total = 1730,08 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )

Puisque les concentrations de tous les ions sont exprimées en équivalents de CaCO<sub>3</sub>, on peut additionner les valeurs et, à partir de là, construire le diagramme à barre pour chaque eaux choisis pour les essais d'adoucissement:

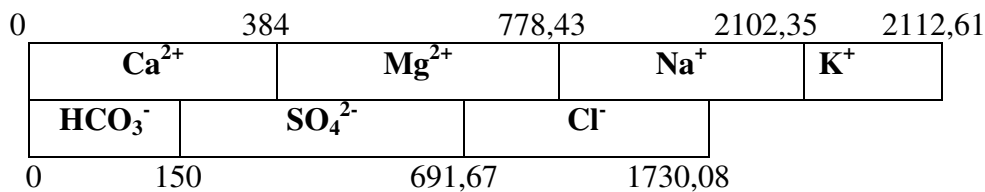
### 1. Diagramme à barre Eau brute de M'Ziraa



### 2. Diagramme à barre Eau brute du robinet



### 3. Diagramme à barre Eau Forage F1 (Oued El Hai)

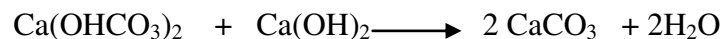


## II.2.3 Essais d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux

### II.2.3.1 Calcul des doses théoriques de la chaux nécessaire pour l'adoucissement

#### II.2.3.1.1 Procédé par addition de la chaux seulement

Rappelons que le procédé par addition de chaux seulement, basé sur l'utilisation de la chaux et qui permet de réduire la concentration d'ions calcium d'une eau, n'exerce aucune influence sur la dureté non carbonatée et sur la dureté magnésienne. L'équation chimique qui régit la réaction sur laquelle repose ce procédé est la suivante:



Selon le diagramme à barre (Desjardins, 1997), on présente les étapes de calcul nécessaire pour réduire la dureté totale et la dose de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nécessaire pour cette opération pour chaque eau testée. Les étapes de calcul sont les suivantes:

Selon les diagrammes à barre qu'on a dressée pour chaque eau testée (Voire annexe 1) on récapitule les résultats concernant la dose de chaux nécessaire ainsi que la concentration finale des éléments chimiques de l'eau après traitement.



**a) Eau de M'Ziraa**

**Addition de chaux** (Ajout de 175 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ce qui est équivalent à une dose de 129,5 mg/l de chaux).

175	0	280	545,57	669,48	674,61
$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$	
175	0	175	591,67		767,67

**Eau finale**

0	145	410,57	534,48	539,61
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$	
0	40	456,67		632,67

**b) Eau du robinet**

**Addition de chaux** (Ajout de 229,51 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  ce qui est équivalent à une dose de 169,83 mg/l de chaux).

229,51	0	480	1065,26	2480,48	2492,02
$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$		
229,51	0	229,51	823,2	62058,78	

**Eau finale**

0	290,49	875,75	2290,97	2302,51
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$		
0	40	633,75	1869,27	

**c) Eau Forage F1 (Oued El Hai)**

**Addition de chaux** (Ajout de 150 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  ce qui est équivalent à une dose de 111 mg/l de chaux).

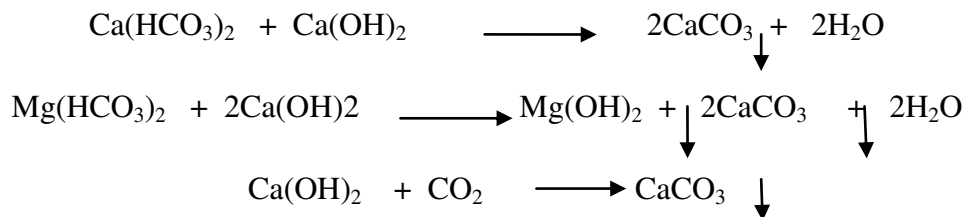
150	0	384	778,43	2102,35	2112,61
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$		
150	0	150	691,67	1730,08	

**Eau finale**

0	274	668,43	1992,35	2002,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>		<b>Na<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>		<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>K<sup>+</sup></b>
0	40	581,67	1620,08	

**II.2.3.1.2 Traitement avec un excès de chaux**

Rappelons qu'on utilise le procédé par addition d'un excès de chaux pour réduire la dureté des eaux affectées d'une dureté carbonatée associée à du calcium et à du magnésium. Lorsqu'on ajoute suffisamment de chaux, le magnésium se combine avec des hydroxydes pour former un précipité de Mg(OH)<sub>2</sub>. Après la précipitation du Mg(OH)<sub>2</sub>, on doit procéder à une carbonatation pour obtenir la précipitation de l'excès de chaux. Les principales réactions chimiques qui régissent les réactions sur lesquelles repose ce procédé sont les suivantes (Desjardins, 1997):



Selon les diagrammes à barre qu'on a dressée pour chaque eau testée (Voire annexe 2) on récapitule les résultats concernant la dose de chaux nécessaire ainsi que la concentration finale des éléments chimiques de l'eau après traitement.

**a) Eau de M'Ziraa**

Bicarbonates : 175 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 265,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux à introduire : **490,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l** ce qui est équivalent à une dose de 363,02 mg/l de chaux).

**Addition de chaux**

490,57	0	280	545,57	669,48	674,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>OH<sup>-</sup></b>		<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>
490,57	0	175	591,67		767,67

**Eau finale**

0	410,57	420,57	544,48	549,61
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	50	471,67	647,67	

Diminution de la dureté de 545,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l à 420,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l soit une efficacité de 22,92 %.

**b) Eau de robinet**

Bicarbonates : 229,51 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 585,26 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux : **864,77** mg CaCO<sub>3</sub>/l, ce qui est équivalent à une dose de 639,93 mg/l de chaux.

**Addition de chaux**

<b>864,77</b>	0	480	1065,26	2480,48	2492,02
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	
<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>		
<b>864,77</b>	0	229,51	823,26	2058,78	

**Eau finale**

0	875,26	885,75	2300,90	2312,52
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	50	693,75	1929,27	

Diminution de la dureté de 1065,26 mg CaCO<sub>3</sub>/l à 885,75 mg CaCO<sub>3</sub>/l soit 16,85 % d'efficacité.

**c) Forage F1 (Oued El Hai)**

Bicarbonates : 150 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 394,43 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux : **594,43** mg CaCO<sub>3</sub>/l, ce qui est équivalent à une dose de 439,88 mg/l de chaux.

**Addition de chaux**

594,43      0                      384      778,43                      2102 ,35    2112 ,61

$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	
594,43	0	150	691,67	1730,08

**Eau finale**

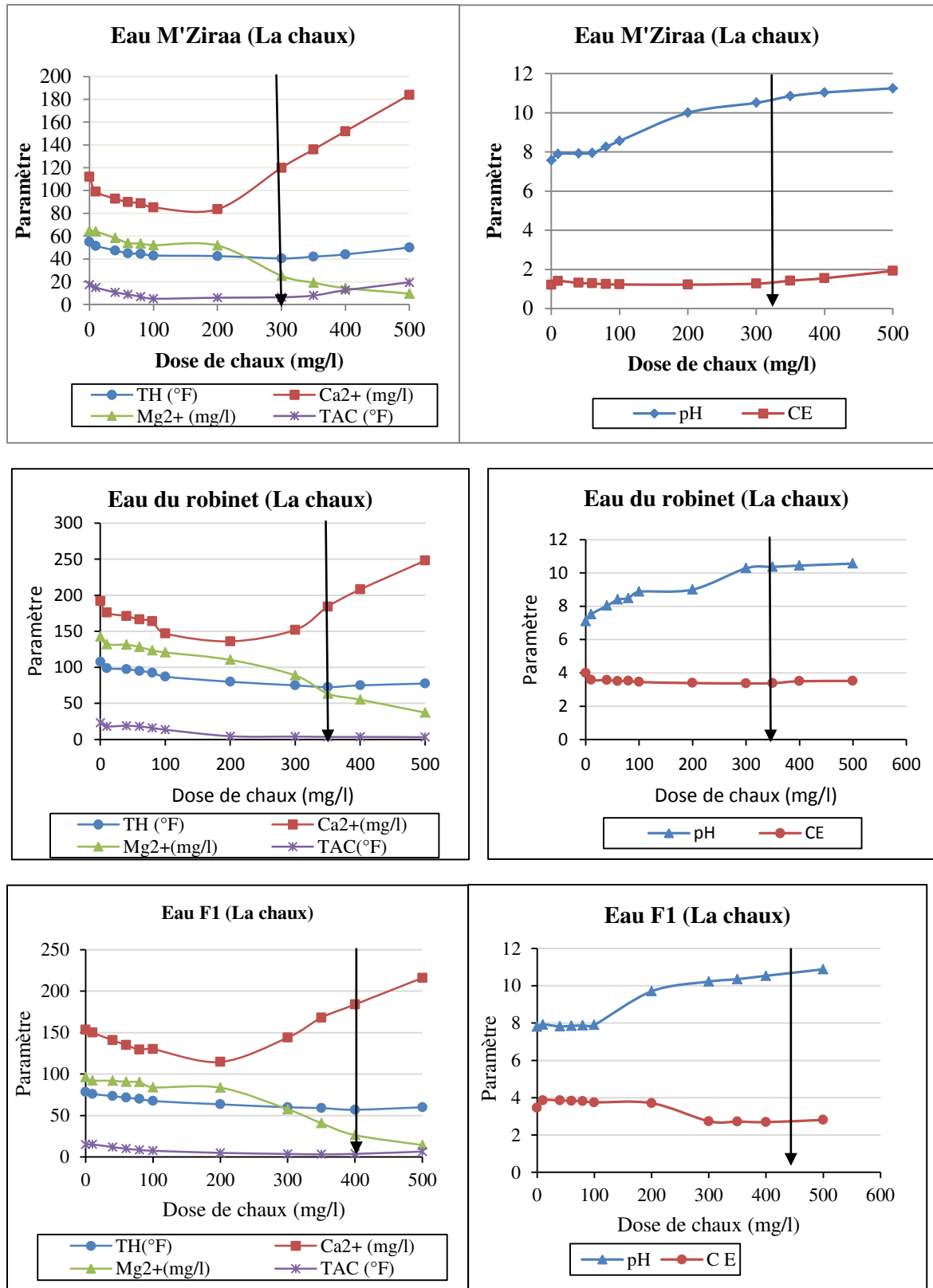
0                                      628,43    638,43                      1962,35    1972,61

$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	
0	50	591,67	1630,08

Diminution de la dureté de 778,43 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  à 638,43 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  soit une efficacité de 17,98 %.

### II.2.3.2 Résultats et discussion des essais expérimentaux d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux

Pour chaque eau traitée, cet essai a été réalisé en introduisant simultanément, dans chaque bécher de 500 ml, des doses variables de chaux (0 à 500 mg/l). Après décantation nous avons suivi l'évolution de quelques paramètres de qualité de chaque eau, comme le montre la figure 24. .



**Figure 24:** Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de chaux introduite.

Selon les résultats présentés dans la figure 24, nous avons considéré que les résultats optima de ces essais correspondent à la valeur minimale obtenue pour la dureté totale (TH). A l'optimum de traitement de chaque eau (Tableau 13), on peut remarquer que:

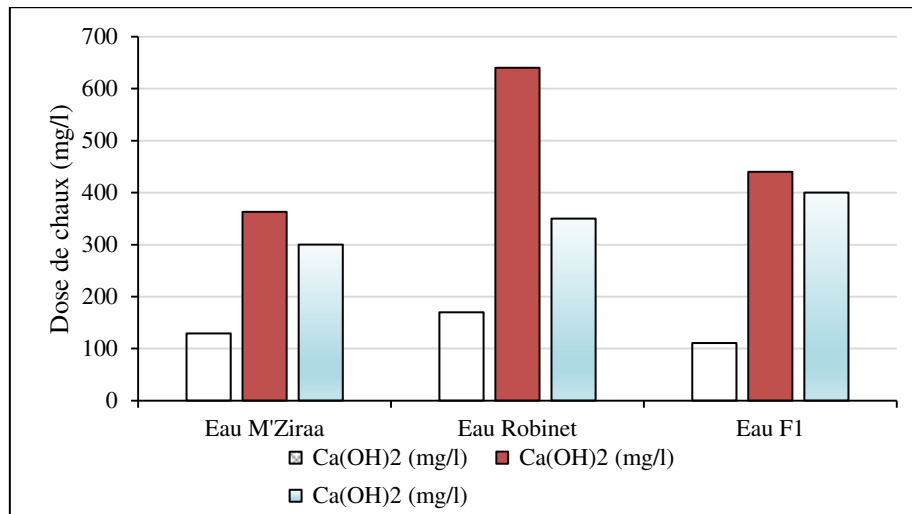
- Les doses de chaux sont assez importantes.
- La dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) ont subi une faible diminution, avec un pourcentage d'élimination qui varie de 26,36% et 32,56%. Ce qui signifie que la dureté dominante de ces eaux est en majorité non carbonatée.
- La diminution de la dureté est accompagnée par la diminution de la conductivité de l'eau et du TAC. Ceci s'explique par la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  et de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .
- En revanche le pH de l'eau dépasse 10 (Tableau 13). Cette augmentation du pH pour les trois eaux nécessitera une neutralisation ultérieure, en générale dans ce type de traitement par l'ajout du  $\text{CO}_2$  pour une carbonatation ultérieure.

Selon la même figure on peut remarquer une réaugmentation de la teneur des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et du TH qui est due aux grand apport des ions  $\text{Ca}^{2+}$  sous forme de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Ainsi qu'une réaugmentation de la valeur du TAC étant due à l'apport des ions  $\text{OH}^-$  sous forme de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

**Tableau 13:** Résultats optima des essais expérimentaux d'adoucissement des eaux par précipitation à la chaux (**B** : eau brute ; **T** : eau traitée)

Eau	Traitement à la chaux												
	Dose optimale	Paramètres											
		TH (°F)		TAC (°F)		$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)		$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)		pH		CE (mS/cm)	
		B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
<b>M'Ziraa</b>	300	55	40,5	17,5	6,4	112	120	64,8	25,2	7,5	10,5	1,2	1,3
<b>Robinet</b>	350	107,5	72,5	23	3,5	192	184	142,8	63,6	7,1	10,3	4	3,4
<b>F1</b>	400	78,5	57	15	3,8	153,6	184	96,2	26,4	7,8	10,5	3,5	2,7

On comparant la dose optimale de chaux obtenue par les essais expérimentaux aux doses théoriques calculées (Figure 25), nous pouvons conclure qu'elles sont toutes assez élevées et la dose expérimentale est moins élevée par rapport à celle calculée en utilisant un excès de chaux (nécessaire pour la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  et du  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Ceci revient aux caractéristiques physico-chimiques de chaque eau.



**Figure 25:** Comparaison entre la dose théorique de chaux et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.

Selon les résultats expérimentaux réalisés par Medfouni (2007) sur les eaux albiennes de Sidi Mahdi- Touggourt, les teneurs encalcium passent de 273,19 mg/l avant traitement à la teneur de 257,794 mg/l en utilisant la chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Ainsi, la dureté total passe seulement de 1120,8 à 835,05 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  pour l'hydroxyde de calcium (Tableau 14). Medfouni (2007) a constaté que ce procédé est par conséquent ne doit pas être la bonne solution aux problèmes d'entartrage auxquels est confronté la région de l'Oued R'hir. De ces résultats il est décidé d'orienter le traitement de la dureté des eaux de la région étudiée avec du carbonate de sodium.

**Tableau 14:** Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Medfouni, 2007)

Eléments	Unité	Eaux brute	Eau traitée à la chaux
$\text{Ca}^{2+}$	mg/l	273,19	257,79
$\text{Mg}^{2+}$		106,31	102,14
$\text{HCO}_3^-$		157,14	19,76
pH	-	8,02	8,90
Conductivité	$\mu\text{S}/\text{cm}$	3300	3340
Dureté	$^\circ\text{F}$	112,08	83,51

Diafi (2015), a fait la même remarque après avoir réalisé des essais de précipitation chimique à la chaux sur une eau de forage d'Ain El Houtz –Tlemcen. La dureté totale de l'eau brute a passé de 53,75 °F à 34,93 °F.

Les essais réalisés par Bouchahm et al (2016) sur l'eau de forage Boukhalifa, qui alimente la zone sud d'El Alia-Biskra, ont montré également que le TH de cette eau a passé de 128 °F à 68 °F avec un rendement d'élimination de 46,87 %. Avec 200 mg de chaux, on a obtenu un rendement de 80 % pour le magnésium.

## II .2.4 Essais d'adoucissement par $\text{Na}_2\text{CO}_3$

### II .2.4.1 Détermination de la dose Théorique de $\text{Na}_2\text{CO}_3$

La dose théorique de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pour réaliser un adoucissement efficace est donnée par la formule (Ouali, 2001):

$$\begin{aligned} \text{Dose de } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (en mg/l)} &= 10,6(\text{TH-TAC}) \quad (\text{TH et TAC en } ^\circ\text{F}) \\ &= 53 (\text{TH-TAC}) \quad (\text{TH et TAC en méq/l}) \end{aligned}$$

On utilisant les résultats d'analyse, on a déterminé la dose de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pour chaque eau comme suit:

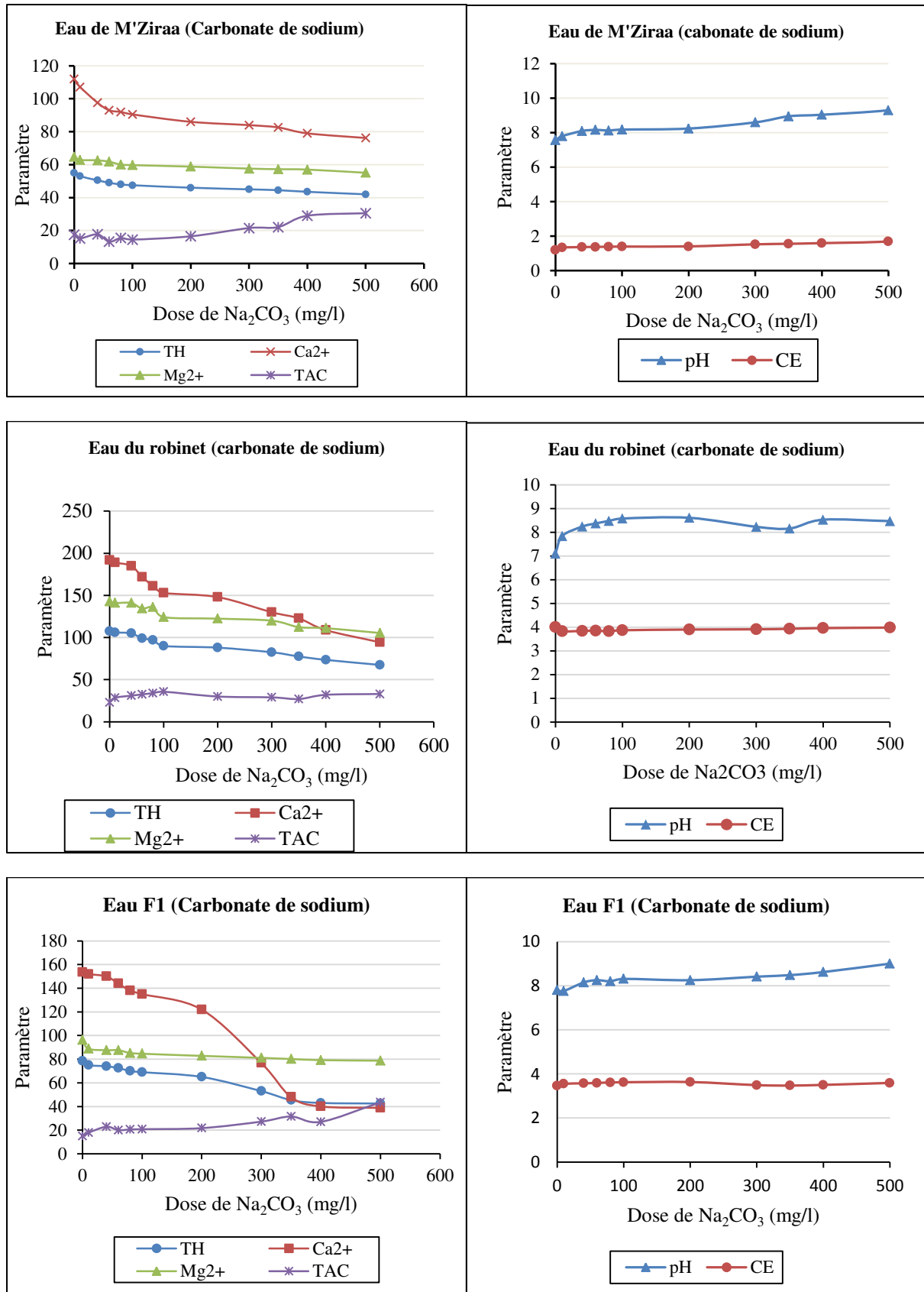
- Eau de M'Ziraa : 490,57 mg/l.
- Eau du robinet : 864,77 mg/l.
- Eau du forage Oued El Hai (F1) : 594,43 mg/l.

Il semble également, comme dans le cas de la chaux, que ces doses sont élevées.

### II.2.4.2 Résultats et discussion des essais expérimentaux

Pour chaque eau traitée, cet essai a été réalisé en introduisant simultanément, dans chaque bécher de 500 ml, des doses variables de carbonates de sodium. Après décantation nous avons suivi l'évolution de quelques paramètres de qualité de chaque eau, comme le montre la figure 26.





**Figure 26:** Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de carbonate de sodium introduite.

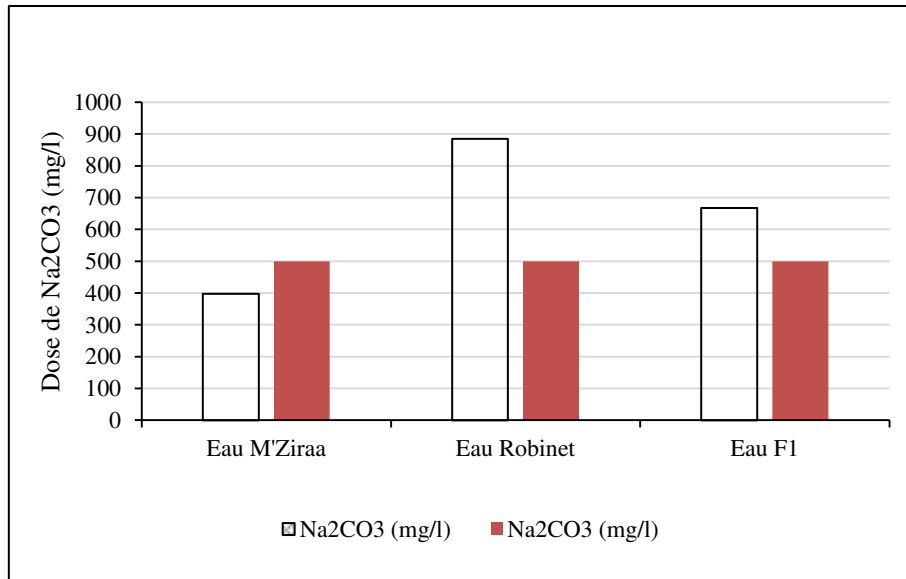
Selon les résultats présentés dans la figure 26, nous avons considéré que les résultats optima de ces essais correspondent à la valeur minimale obtenue pour la dureté totale (TH) étant 500mg/l. A l'optimum de traitement de chaque eau (Tableau15), on peut remarquer que :

- Les doses de carbonate de sodium sont assez importantes 500 mg/l.
- La dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) ont subi une diminution continue avec l'augmentation de la dose de carbonate de sodium, avec un pourcentage d'élimination qui varie de 23,64 % et 45,80 % pour une dose de 500 mg/l du réactif. Ce qui signifie que le réactif ajouté réagit avec les ions calcium et magnésium  $\text{Ca}^{2+}$  lié aux ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans l'eau brute.
- La diminution de la dureté est accompagnée par une augmentation de la conductivité de l'eau et du TAC. Ceci s'explique par l'apport du sodium et des carbonates (sous forme de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).
- En revanche le pH de l'eau dépasse 10 (Tableau 15). Cette augmentation du pH pour les trois eaux nécessitera une neutralisation ultérieure.

**Tableau 15:** Résultats optima des essais expérimentaux d'adoucissement des eaux par précipitation au carbonate de sodium (**B** : eau brute ; **T** : eau traitée).

Eau	Traitement au carbonate de sodium												
	Dose optimale	Paramètres											
		TH (°F)		TAC (°F)		$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)		$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)		pH		CE (mS/cm)	
		B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
<b>M'Ziraa</b>	500	55	42	17,5	30,5	112	76,5	64,80	55,1	7,6	9,3	1,2	1,7
<b>Robinet</b>	500	107,5	67,5	23	33	192	94,4	142,8	105,4	7,1	8,5	4	3,9
<b>F1</b>	500	78,5	42,5	15	43,5	153,6	38,8	96,24	78,7	7,8	9	3,5	3,6

En comparant la dose optimale de carbonate de sodium obtenue par les essais expérimentaux aux doses théoriques calculées (Figure27), nous pouvons conclure qu'elles sont toutes assez élevées et la dose expérimentale est en moyenne moins élevée par rapport à celle calculée en utilisant. Ceci revient aux caractéristiques physico-chimiques de chaque eau.



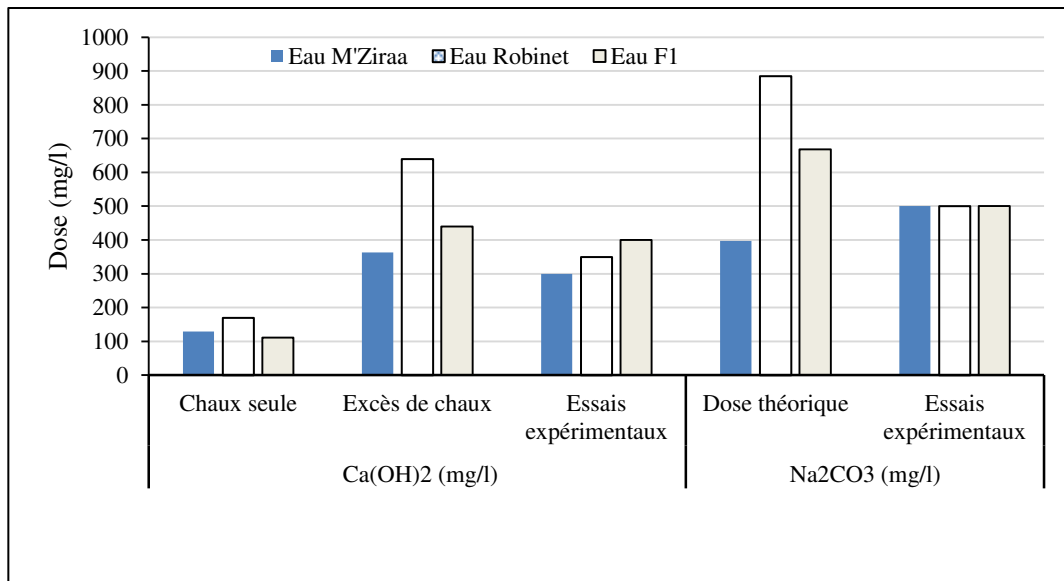
**Figure 27:** Comparaison entre la dose théorique de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.

Selon les travaux de Medfouni (2007) l'application du traitement sur une eau souterraine de Sidi Mahdi- Touggourt par addition de carbonate de sodium a montré une très bonne efficacité comparativement au traitement à la chaux. Le rendement d'élimination de la dureté est supérieur à 57 %. Cependant, il faut noter que le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a ajouté à l'eau traitée plus de 255 mg/l de sodium à la teneur initiale dans l'eau (394 mg/l). A noter également que la conductivité a passé de 3300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avant traitement à 3840  $\mu\text{S}/\text{cm}$  après traitement.

## II.2.5 Comparaison entre les deux procédés d'adoucissement

### II.2.5.1 Dose des réactifs et qualité des eaux

On faisant une comparaison entre les résultats obtenus par les deux réactif  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  il semble évident que les doses nécessaires pour aboutir à un traitement optimal de la dureté de l'eau sont importantes et plus élevées dans le cas du traitement avec le carbonate de sodium (Figure 28).



**Figure 28:** Comparaison entre les doses des réactifs utilisés pour le traitement.

L'utilisation de chaque réactif pour réduire la dureté de l'eau a touché d'autres paramètres de qualité (Tableau 16):

TH : Diminution sensible du TH avec une légère efficacité du carbonate de sodium par rapport à la chaux.

Ca<sup>2+</sup> : Diminution remarquable du calcium avec une plus grande efficacité du carbonate de sodium par rapport à la chaux.

Mg<sup>2+</sup> : Diminution remarquable du magnésium avec une plus grande efficacité de la chaux par rapport au carbonate de sodium.

pH et conductivité : L'apport de la chaux permet d'atteindre des pH plus basique qu'on utilisant le Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> par contre la conductivité électrique finale de l'eau est moins élevée.

Na<sup>+</sup> : possibilité d'un apport élevé en ions Na<sup>+</sup> après traitement au carbonate de sodium. Ce qui n'est pas favorable pour les eaux déjà chargées en cet élément.

**Tableau 16:** Comparaison entre les paramètres de qualité avant et après traitement.

Paramètre	Eau de M'Ziraa			Eau de robinet			Eau forage F1		
	Eau brute	Chaux	Carbonate de sodium	Eau brute	Chaux	Carbonate de sodium	Eau brute	Chaux	Carbonate de sodium
<b>TH (F°)</b>	55	40,5	42	107,5	72,5	67,5	78,5	57	42,5
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	112	120	76,5	192	184	94,4	153,6	184	38,8
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	64,8	25,2	55,1	142,8	63,6	105,4	96,2	26,4	78,7
<b>TAC (°F)</b>	17,5	6,4	30,5	23	3,5	33	15	3,8	43,5
<b>pH</b>	7,6	10,5	9,3	7,1	10,3	8,5	7,6	10,5	9,3
<b>CE (mS/cm)</b>	1,2	1,3	1,7	4	3,4	3,9	3,5	2,7	3,6

### II.2.5.2 Volume des boues produites

Comme on l'a décrit dans le chapitre 1 de cette partie expérimentale, pour chaque eau nous avons réalisé:

- Un essai d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux ( $[\text{Ca}(\text{OH})_2] = 350 \text{ mg/l}$ )
- Un essai d'adoucissement par précipitation chimique au carbonate de sodium ( $[\text{Na}_2\text{CO}_3] = 500 \text{ mg/l}$ ).

Après coagulation-floculation, chaque eau a été laissée en décantation dans des éprouvettes de 500 ml pendant 30 minutes. Le volume des boues dans chaque éprouvette a été noté après le temps de décantation (Tableau17). Nous avons constaté que les boues produites par précipitation chimique à la chaux étaient plus denses par rapport à celles produites par le carbonate de sodium (Figure23). En plus, elles sont plus volumineuses.

**Tableau 17:** Comparaison entre les boues produites par les deux traitements.

Eau	Rendement d'élimination de la dureté TH en %	La chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )		Rendement d'élimination de la dureté TH en %	Carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	
		Dose introduite (mg/l)	Volume de boues (ml)		Dose introduite (mg/l)	Volume de boues (ml)
<b>M'Ziraa</b>	26,36	350	18	23,64	500	2
<b>Robinet</b>	32,86	350	22	37,21	500	2,2
<b>F1</b>	24,84	350	14	45,85	500	2,5

La boue ainsi produite est stable et très peu coûteuse en termes de traitement, opération ou maintenance. Les boues produites dans le cas de l'utilisation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , contrairement aux boues d'un procédé par précipitation du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sont concentrées (teneur en solides de 90 %). Elles peuvent être recyclées et utilisées par l'industrie (comme produit de départ pour la fabrication de matériau de construction). Une telle valorisation est courante aux Pays Bas et au Royaume Uni par exemple (Mange, 2008).

### II.3 Conclusion

Les essais d'adoucissement que nous avons réalisés ont été consacrés au traitement de trois eaux souterraines de la région de Biskra. Les réactifs utilisés individuellement sont la chaux et le carbonate de sodium.

Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité d'adoucissement de chaque réactif dépend de plusieurs paramètres. Le suivi de la qualité des eaux après traitement a permis d'aboutir aux résultats suivants:

- L'adoucissement de ces eaux nécessite de fortes doses de réactif ce qui peut aboutir à des volumes de boues consistants en fin de traitement. Ce résultat est plus remarquable dans le cas du traitement à la chaux.
- L'élimination du TH est satisfaisante. Cette élimination est accompagnée par une diminution de la teneur en calcium et en magnésium. Elle sera plus remarquable par utilisation de la chaux si la dureté est carbonatée et par utilisation du carbonate de sodium si elle est permanente.
- Le pH final des eaux traitées est assez élevé. Ce qui nécessite un réajustement en fin de chaque traitement.
- La conductivité électrique de l'eau peut augmenter légèrement particulièrement en utilisant le carbonate de sodium. Vue l'apport des ions  $\text{Na}^+$ . Ce qui n'est pas bénéfique pour le traitement des eaux dures et fortement chargées en sodium.
- Pour les eaux de cette région, il serait préférable de combiner l'utilisation de la chaux et du carbonate de sodium pour éliminer à la fois la dureté temporaire et permanente.

## II.1 Introduction

Selon la synthèse bibliographique que nous avons réalisé il semble que l'**adoucissement de l'eau** est un procédé de traitement initialement destiné à réduire la dureté de l'eau (due à la présence des sels alcalino-terreux: carbonates, sulfates et chlorures de calcium et de magnésium). Les eaux dures posent des problèmes de biofilms, de colmatage de conduites d'eau, tuyauteries et matériels domestiques (chaudières, machines à laver, fers à repasser...) et lavent un peu moins bien les textiles (car moussant moins).

L'objectif de ce chapitre est de tester l'efficacité de l'application d'un procédé d'adoucissement par précipitation chimique sur des eaux de la région de Biskra. Cette application vise à cerner les conditions d'application de ce type de traitement pour les eaux du sud Algérien qui souffrent du problème des eaux dures.

## II.2 Résultats et discussion

### II.2.1 Caractérisation des eaux traitées

Comme c'est indiqué dans le chapitre précédent, nous avons choisi trois eaux souterraines. Une eau provenant d'un forage de la région de M'Ziraa (située à l'Est de la wilaya de Biskra), une eau de forage (F1) provenant du champ captant de la ville de Biskra et une troisième eau provenant du robinet du laboratoire pédagogique, département de Génie civil et d'Hydraulique –Université de Biskra.

Après avoir comparé les résultats d'analyses physico-chimiques de ces eaux aux normes de potabilité, on peut constater que le TH des trois eaux dépasse la valeur limite exigée par le JORA (2014) étant 50 mg/l. Selon la classification du Tableau 11, Ces eaux sont très dures. De même pour les autres paramètres ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$ ) dans le cas des eaux des forages F1 et du laboratoire, les teneurs dépassent la norme.

**Tableau 11:** Caractéristiques physico-chimiques des eaux traitées.

Paramètre	Eau de M'Ziraa	Eau du robinet	Eau du forage F1	Norme de potabilité (JORA, 2014)
<b>pH</b>	7,57	7,10	7,8	6,5 < pH < 9
<b>Conductivité (ms/cm)</b>	1,2	4	3,46	2800
<b>TAC (°F)</b>	17,5	23	15	6,5 Pour les eaux dessalées ou déminéralisées (valeur minimale)
<b>TH (F°)</b>	55	106,5	78	50
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>	213,5	280,6	183	Non indiquée
<b>Ca<sup>+2</sup> (mg/l)</b>	112	192	153,6	200
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	64,80	142,8	96,24	Non indiquée
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/l)</b>	400	570	520	400
<b>Cl (mg/l)</b>	124,96	877,22	737,27	500
<b>Na<sup>+</sup> (mg/l)</b>	57	651	609	200
<b>K<sup>+</sup> (mg/l)</b>	4	9	8	12

### II.2.2 Diagramme à barre des eaux brutes

Afin de pouvoir calculer les doses théoriques de la chaux utilisées et des concentrations des éléments chimiques de l'eau après traitement pour les essais de précipitation nous devons passer par la conversion de la concentration des éléments mesurés en mg de CaCO<sub>3</sub> (Desjardins, 1997). Les résultats de calcul sont récapitulés dans le tableau suivant.

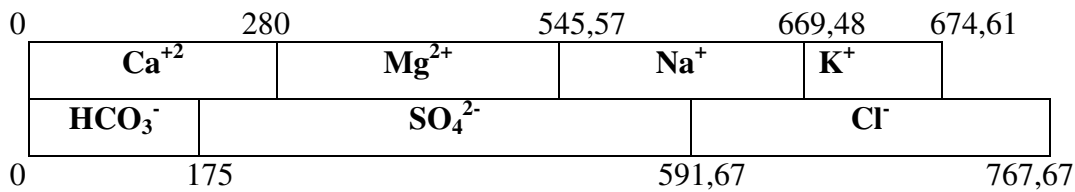


**Tableau 12:** Conversion de la concentration des éléments mesurés en mg de CaCO<sub>3</sub>/L pour chaque eau testée.

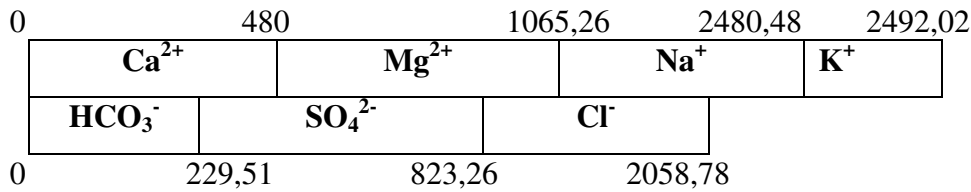
<b>Eau de M'ziraa</b>	
$\text{Ca}^{+2} : \frac{112 \times 50}{20} = 280 \text{ mg/l}$	$\text{HCO}_3^- : \frac{213.5 \times 50}{61} = 175 \text{ mg/l}$
$\text{Mg}^{2+} : \frac{64.80 \times 50}{12.2} = 265,57 \text{ mg/l}$	$\text{SO}_4^{2-} : \frac{400 \times 50}{48} = 416,67 \text{ mg/l}$
$\text{Na}^+ : \frac{57 \times 50}{23} = 123,91 \text{ mg/l}$	$\text{Cl}^- : \frac{124.96 \times 50}{35.5} = 176 \text{ mg/l}$
$\text{K}^+ : \frac{4 \times 50}{39} = 5,31 \text{ mg/l}$	
Total = 674,61 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )	Total = 767,67 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )
<b>Eau du robinet</b>	
$\text{Ca}^{+2} : \frac{192 \times 50}{20} = 480 \text{ mg/l}$	$\text{HCO}_3^- : \frac{280 \times 50}{61} = 229,51 \text{ mg/l}$
$\text{Mg}^{2+} : \frac{142,8 \times 50}{12.2} = 585,26 \text{ mg/l}$	$\text{SO}_4^{2-} : \frac{570 \times 50}{48} = 593,75 \text{ mg/l}$
$\text{Na}^+ : \frac{651 \times 50}{23} = 1415,22 \text{ mg/l}$	$\text{Cl}^- : \frac{877,22 \times 50}{35.5} = 1235,52 \text{ mg/l}$
$\text{K}^+ : \frac{9 \times 50}{39} = 11,54 \text{ mg/l}$	
Total = 2492,02 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )	Total = 2058,78 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )
<b>Eau Forage F1 (Oued El Hai)</b>	
$\text{Ca}^{+2} : \frac{153,6 \times 50}{20} = 384 \text{ mg/l}$	$\text{HCO}_3^- : \frac{183 \times 50}{61} = 150 \text{ mg/l}$
$\text{Mg}^{2+} : \frac{96,24 \times 50}{12.2} = 394,43 \text{ mg/l}$	$\text{SO}_4^{2-} : \frac{520 \times 50}{48} = 541,67 \text{ mg/l}$
$\text{Na}^+ : \frac{609 \times 50}{23} = 1323,92 \text{ mg/l}$	$\text{Cl}^- : \frac{737,27 \times 50}{35.5} = 1038,41 \text{ mg/l}$
$\text{K}^+ : \frac{8 \times 50}{39} = 10,26 \text{ mg/l}$	
Total = 2112,61 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )	Total = 1730,08 mg /l (CaCO <sub>3</sub> )

Puisque les concentrations de tous les ions sont exprimées en équivalents de CaCO<sub>3</sub>, on peut additionner les valeurs et, à partir de là, construire le diagramme à barre pour chaque eaux choisis pour les essais d'adoucissement:

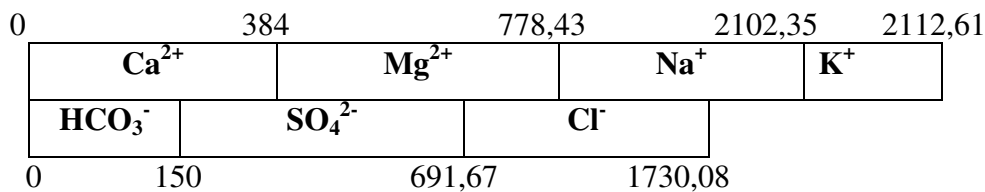
### 1. Diagramme à barre Eau brute de M'Ziraa



### 2. Diagramme à barre Eau brute du robinet



### 3. Diagramme à barre Eau Forage F1 (Oued El Hai)

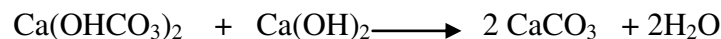


## II.2.3 Essais d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux

### II.2.3.1 Calcul des doses théoriques de la chaux nécessaire pour l'adoucissement

#### II.2.3.1.1 Procédé par addition de la chaux seulement

Rappelons que le procédé par addition de chaux seulement, basé sur l'utilisation de la chaux et qui permet de réduire la concentration d'ions calcium d'une eau, n'exerce aucune influence sur la dureté non carbonatée et sur la dureté magnésienne. L'équation chimique qui régit la réaction sur laquelle repose ce procédé est la suivante:



Selon le diagramme à barre (Desjardins, 1997), on présente les étapes de calcul nécessaire pour réduire la dureté totale et la dose de  $\text{Ca(OH)}_2$  nécessaire pour cette opération pour chaque eau testée. Les étapes de calcul sont les suivantes:

Selon les diagrammes à barre qu'on a dressée pour chaque eau testée (Voire annexe 1) on récapitule les résultats concernant la dose de chaux nécessaire ainsi que la concentration finale des éléments chimiques de l'eau après traitement.

**a) Eau de M'Ziraa**

**Addition de chaux** (Ajout de 175 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ce qui est équivalent à une dose de 129,5 mg/l de chaux).

175	0	280	545,57	669,48	674,61
$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$	
175	0	175	591,67		767,67

**Eau finale**

0	145	410,57	534,48	539,61
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$	
0	40	456,67		632,67

**b) Eau du robinet**

**Addition de chaux** (Ajout de 229,51 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  ce qui est équivalent à une dose de 169,83 mg/l de chaux).

229,51	0	480	1065,26	2480,48	2492,02
$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$		
229,51	0	229,51	823,2	62058,78	

**Eau finale**

0	290,49	875,75	2290,97	2302,51
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$		
0	40	633,75	1869,27	

**c) Eau Forage F1 (Oued El Hai)**

**Addition de chaux** (Ajout de 150 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  ce qui est équivalent à une dose de 111 mg/l de chaux).

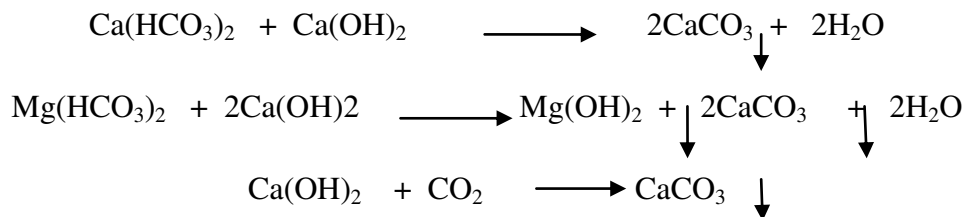
150	0	384	778,43	2102,35	2112,61
$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$		
150	0	150	691,67	1730,08	

**Eau finale**

0	274	668,43	1992,35	2002,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>		<b>Na<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>		<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>K<sup>+</sup></b>
0	40	581,67	1620,08	

**II.2.3.1.2 Traitement avec un excès de chaux**

Rappelons qu'on utilise le procédé par addition d'un excès de chaux pour réduire la dureté des eaux affectées d'une dureté carbonatée associée à du calcium et à du magnésium. Lorsqu'on ajoute suffisamment de chaux, le magnésium se combine avec des hydroxydes pour former un précipité de Mg(OH)<sub>2</sub>. Après la précipitation du Mg(OH)<sub>2</sub>, on doit procéder à une carbonatation pour obtenir la précipitation de l'excès de chaux. Les principales réactions chimiques qui régissent les réactions sur lesquelles repose ce procédé sont les suivantes (Desjardins, 1997):



Selon les diagrammes à barre qu'on a dressée pour chaque eau testée (Voire annexe 2) on récapitule les résultats concernant la dose de chaux nécessaire ainsi que la concentration finale des éléments chimiques de l'eau après traitement.

**a) Eau de M'Ziraa**

Bicarbonates : 175 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 265,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux à introduire : **490,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l** ce qui est équivalent à une dose de 363,02 mg/l de chaux).

**Addition de chaux**

490,57	0	280	545,57	669,48	674,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>OH<sup>-</sup></b>		<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>
490,57	0	175	591,67		767,67

**Eau finale**

0	410,57	420,57	544,48	549,61
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>		<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>
0	50	471,67	647,67	

Diminution de la dureté de 545,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l à 420,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l soit une efficacité de 22,92 %.

**b) Eau de robinet**

Bicarbonates : 229,51 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 585,26 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux : **864,77** mg CaCO<sub>3</sub>/l, ce qui est équivalent à une dose de 639,93 mg/l de chaux.

**Addition de chaux**

<b>864,77</b>	0	480	1065,26	2480,48	2492,02
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	
<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>		
<b>864,77</b>	0	229,51	823,26	2058,78	

**Eau finale**

0	875,26	885,75	2300,90	2312,52
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	50	693,75	1929,27	

Diminution de la dureté de 1065,26 mg CaCO<sub>3</sub>/l à 885,75 mg CaCO<sub>3</sub>/l soit 16,85 % d'efficacité.

**c) Forage F1 (Oued El Hai)**

Bicarbonates : 150 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 394,43 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux : **594,43** mg CaCO<sub>3</sub>/l, ce qui est équivalent à une dose de 439,88 mg/l de chaux.

**Addition de chaux**

594,43      0                      384      778,43                      2102,35    2112,61

$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	
594,43	0	150	691,67	1730,08

**Eau finale**

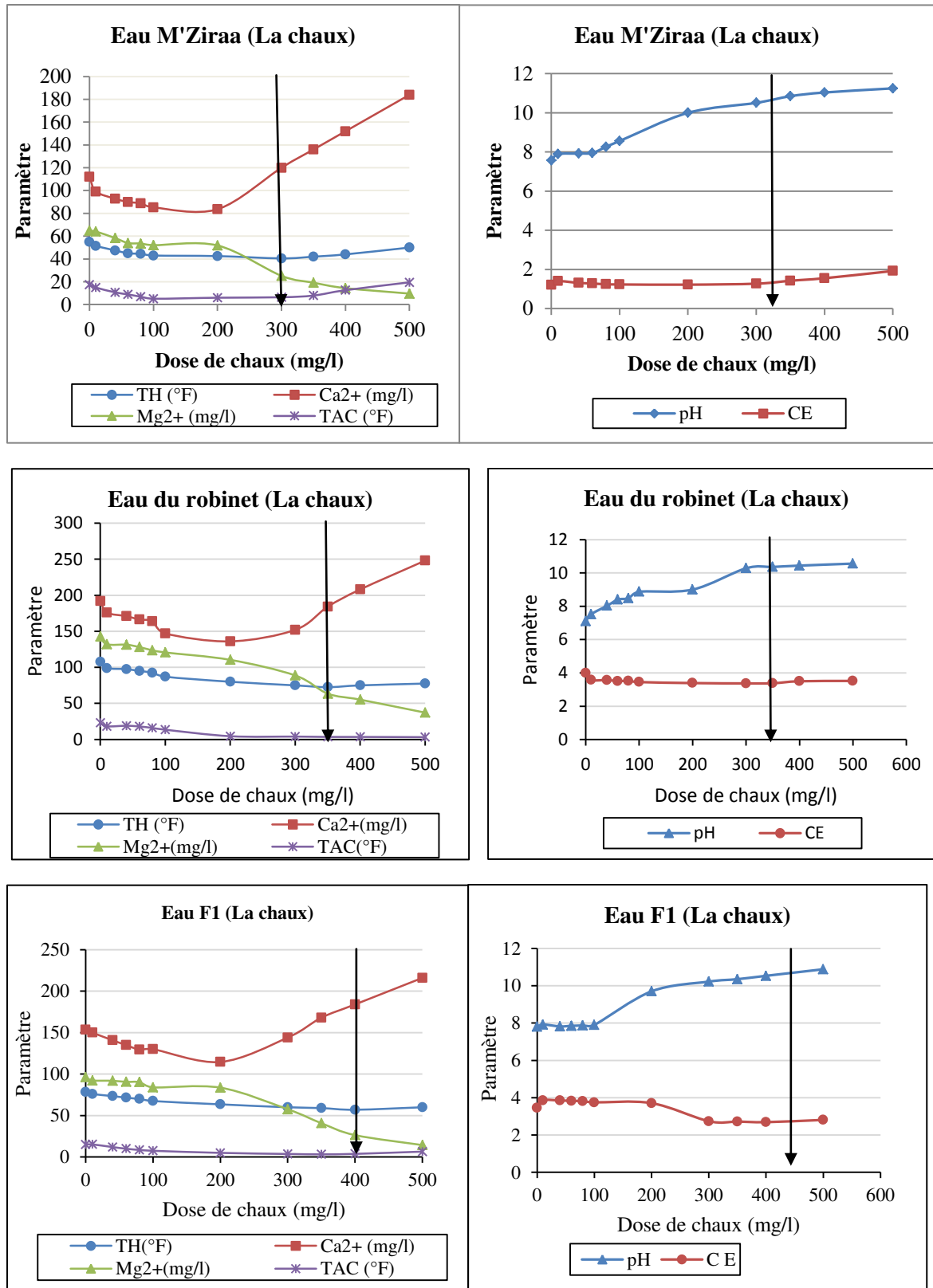
0                                      628,43    638,43                      1962,35    1972,61

$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	
0	50	591,67	1630,08

Diminution de la dureté de 778,43 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  à 638,43 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  soit une efficacité de 17,98 %.

### II.2.3.2 Résultats et discussion des essais expérimentaux d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux

Pour chaque eau traitée, cet essai a été réalisé en introduisant simultanément, dans chaque bécher de 500 ml, des doses variables de chaux (0 à 500 mg/l). Après décantation nous avons suivi l'évolution de quelques paramètres de qualité de chaque eau, comme le montre la figure 24. .



**Figure 24:** Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de chaux introduite.

Selon les résultats présentés dans la figure 24, nous avons considéré que les résultats optima de ces essais correspondent à la valeur minimale obtenue pour la dureté totale (TH). A l'optimum de traitement de chaque eau (Tableau 13), on peut remarquer que:

- Les doses de chaux sont assez importantes.
- La dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) ont subi une faible diminution, avec un pourcentage d'élimination qui varie de 26,36% et 32,56%. Ce qui signifie que la dureté dominante de ces eaux est en majorité non carbonatée.
- La diminution de la dureté est accompagnée par la diminution de la conductivité de l'eau et du TAC. Ceci s'explique par la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  et de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .
- En revanche le pH de l'eau dépasse 10 (Tableau 13). Cette augmentation du pH pour les trois eaux nécessitera une neutralisation ultérieure, en générale dans ce type de traitement par l'ajout du  $\text{CO}_2$  pour une carbonatation ultérieure.

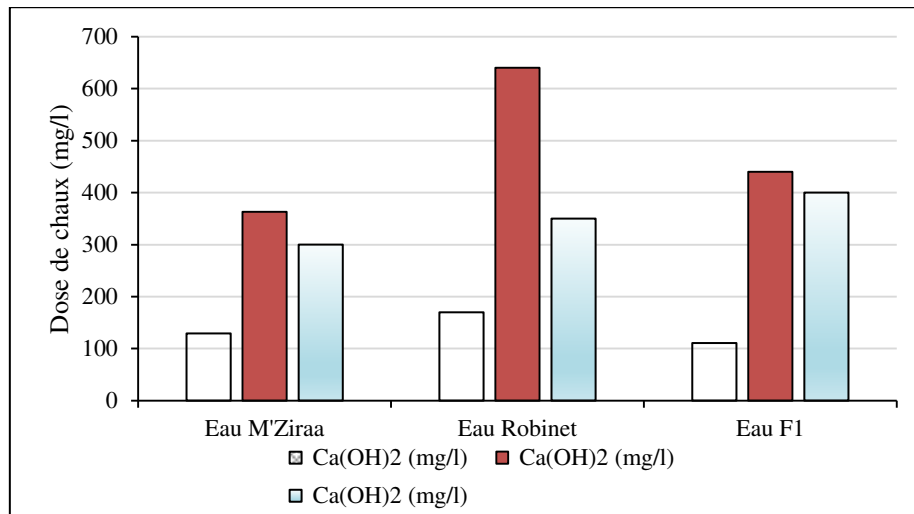
Selon la même figure on peut remarquer une réaugmentation de la teneur des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et du TH qui est due aux grand apport des ions  $\text{Ca}^{2+}$  sous forme de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Ainsi qu'une réaugmentation de la valeur du TAC étant due à l'apport des ions  $\text{OH}^-$  sous forme de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

**Tableau 13:** Résultats optima des essais expérimentaux d'adoucissement des eaux par précipitation à la chaux (**B** : eau brute ; **T** : eau traitée)

Eau	Traitement à la chaux												
	Dose optimale	Paramètres											
		TH (°F)		TAC (°F)		$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)		$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)		pH		CE (mS/cm)	
		B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
<b>M'Ziraa</b>	300	55	40,5	17,5	6,4	112	120	64,8	25,2	7,5	10,5	1,2	1,3
<b>Robinet</b>	350	107,5	72,5	23	3,5	192	184	142,8	63,6	7,1	10,3	4	3,4
<b>F1</b>	400	78,5	57	15	3,8	153,6	184	96,2	26,4	7,8	10,5	3,5	2,7

On comparant la dose optimale de chaux obtenue par les essais expérimentaux aux doses théoriques calculées (Figure 25), nous pouvons conclure qu'elles sont toutes assez élevées et la dose expérimentale est moins élevée par rapport à celle calculée en utilisant un excès de chaux (nécessaire pour la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  et du  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Ceci revient aux caractéristiques physico-chimiques de chaque eau.





**Figure 25:** Comparaison entre la dose théorique de chaux et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.

Selon les résultats expérimentaux réalisés par Medfouni (2007) sur les eaux albiennes de Sidi Mahdi- Touggourt, les teneurs en calcium passent de 273,19 mg/l avant traitement à la teneur de 257,794 mg/l en utilisant la chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Ainsi, la dureté totale passe seulement de 1120,8 à 835,05 mg/l de  $\text{CaCO}_3$  pour l'hydroxyde de calcium (Tableau 14). Medfouni (2007) a constaté que ce procédé est par conséquent ne doit pas être la bonne solution aux problèmes d'entartrage auxquels est confronté la région de l'Oued R'hir. De ces résultats il est décidé d'orienter le traitement de la dureté des eaux de la région étudiée avec du carbonate de sodium.

**Tableau 14:** Résultats d'adoucissement des eaux de Touggourt à la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Medfouni, 2007)

Eléments	Unité	Eaux brute	Eau traitée à la chaux
$\text{Ca}^{2+}$	mg/l	273,19	257,79
$\text{Mg}^{2+}$		106,31	102,14
$\text{HCO}_3^-$		157,14	19,76
pH	-	8,02	8,90
Conductivité	$\mu\text{S}/\text{cm}$	3300	3340
Dureté	$^\circ\text{F}$	112,08	83,51

Diafi (2015), a fait la même remarque après avoir réalisé des essais de précipitation chimique à la chaux sur une eau de forage d'Ain El Houtz –Tlemcen. La dureté totale de l'eau brute a passé de 53,75 °F à 34,93 °F.

Les essais réalisés par Bouchahm et al (2016) sur l'eau de forage Boukhalfa, qui alimente la zone sud d'El Alia-Biskra, ont montré également que le TH de cette eau a passé de 128 °F à 68 °F avec un rendement d'élimination de 46,87 %. Avec 200 mg de chaux, on a obtenu un rendement de 80 % pour le magnésium.

## II .2.4 Essais d'adoucissement par $\text{Na}_2\text{CO}_3$

### II .2.4.1 Détermination de la dose Théorique de $\text{Na}_2\text{CO}_3$

La dose théorique de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pour réaliser un adoucissement efficace est donnée par la formule (Ouali, 2001):

$$\begin{aligned} \text{Dose de } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (en mg/l)} &= 10,6(\text{TH-TAC}) \quad (\text{TH et TAC en } ^\circ\text{F}) \\ &= 53 (\text{TH-TAC}) \quad (\text{TH et TAC en méq/l}) \end{aligned}$$

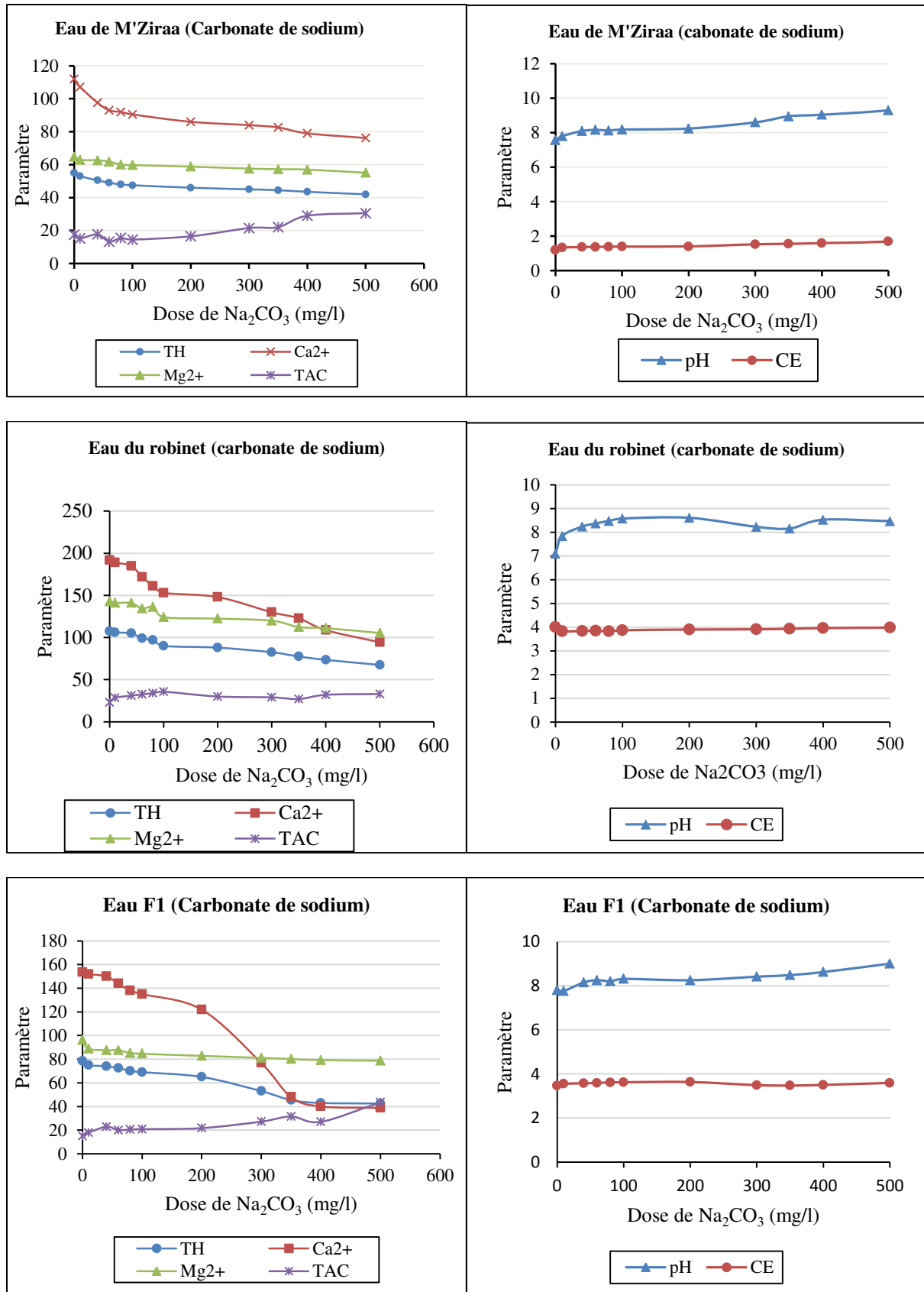
On utilisant les résultats d'analyse, on a déterminé la dose de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pour chaque eau comme suit:

- Eau de M'Ziraa : 490,57 mg/l.
- Eau du robinet : 864,77 mg/l.
- Eau du forage Oued El Hai (F1) : 594,43 mg/l.

Il semble également, comme dans le cas de la chaux, que ces doses sont élevées.

### II.2.4.2 Résultats et discussion des essais expérimentaux

Pour chaque eau traitée, cet essai a été réalisé en introduisant simultanément, dans chaque bécher de 500 ml, des doses variables de carbonates de sodium. Après décantation nous avons suivi l'évolution de quelques paramètres de qualité de chaque eau, comme le montre la figure 26.



**Figure 26:** Evolution des paramètres de qualité de l'eau en fonction de la dose de carbonate de sodium introduite.

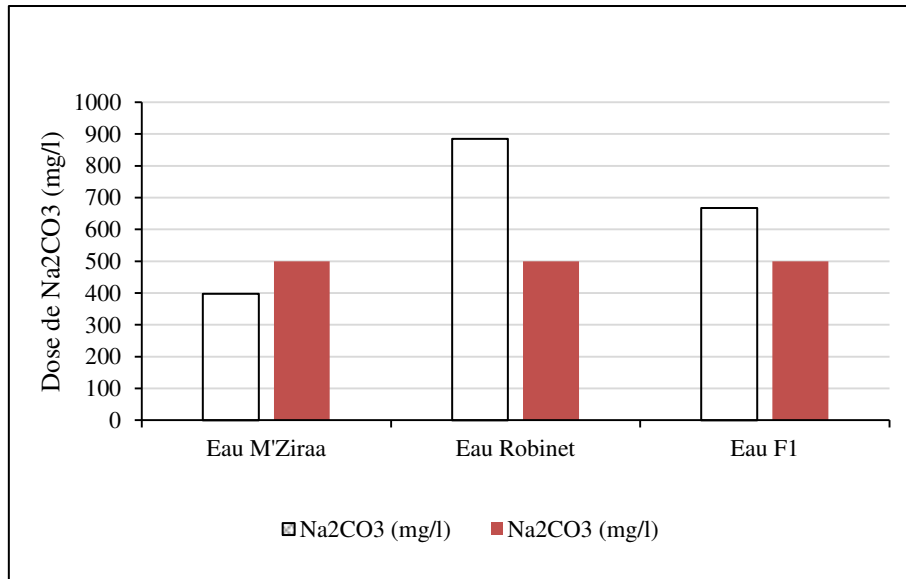
Selon les résultats présentés dans la figure 26, nous avons considéré que les résultats optima de ces essais correspondent à la valeur minimale obtenue pour la dureté totale (TH) étant 500mg/l. A l'optimum de traitement de chaque eau (Tableau 15), on peut remarquer que :

- Les doses de carbonate de sodium sont assez importantes 500 mg/l.
- La dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) ont subi une diminution continue avec l'augmentation de la dose de carbonate de sodium, avec un pourcentage d'élimination qui varie de 23,64 % et 45,80 % pour une dose de 500 mg/l du réactif. Ce qui signifie que le réactif ajouté réagit avec les ions calcium et magnésium  $\text{Ca}^{2+}$  lié aux ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans l'eau brute.
- La diminution de la dureté est accompagnée par une augmentation de la conductivité de l'eau et du TAC. Ceci s'explique par l'apport du sodium et des carbonates (sous forme de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).
- En revanche le pH de l'eau dépasse 10 (Tableau 15). Cette augmentation du pH pour les trois eaux nécessitera une neutralisation ultérieure.

**Tableau 15:** Résultats optima des essais expérimentaux d'adoucissement des eaux par précipitation au carbonate de sodium (**B** : eau brute ; **T** : eau traitée).

Eau	Traitement au carbonate de sodium												
	Dose optimale	Paramètres											
		TH (°F)		TAC (°F)		$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)		$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)		pH		CE (mS/cm)	
		B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B	T
<b>M'Ziraa</b>	500	55	42	17,5	30,5	112	76,5	64,80	55,1	7,6	9,3	1,2	1,7
<b>Robinet</b>	500	107,5	67,5	23	33	192	94,4	142,8	105,4	7,1	8,5	4	3,9
<b>F1</b>	500	78,5	42,5	15	43,5	153,6	38,8	96,24	78,7	7,8	9	3,5	3,6

En comparant la dose optimale de carbonate de sodium obtenue par les essais expérimentaux aux doses théoriques calculées (Figure 27), nous pouvons conclure qu'elles sont toutes assez élevées et la dose expérimentale est en moyenne moins élevée par rapport à celle calculée en utilisant. Ceci revient aux caractéristiques physico-chimiques de chaque eau.



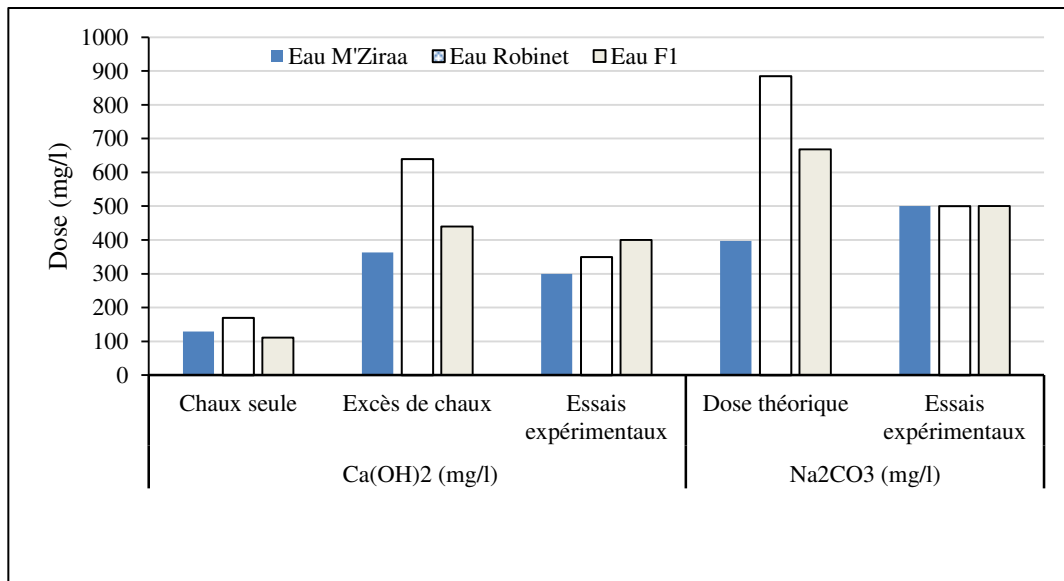
**Figure 27:** Comparaison entre la dose théorique de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et la dose expérimentale nécessaire pour l'adoucissement de chaque eau.

Selon les travaux de Medfouni (2007) l'application du traitement sur une eau souterraine de Sidi Mahdi- Touggourt par addition de carbonate de sodium a montré une très bonne efficacité comparativement au traitement à la chaux. Le rendement d'élimination de la dureté est supérieur à 57 %. Cependant, il faut noter que le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a ajouté à l'eau traitée plus de 255 mg/l de sodium à la teneur initiale dans l'eau (394 mg/l). A noter également que la conductivité a passé de 3300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avant traitement à 3840  $\mu\text{S}/\text{cm}$  après traitement.

## II.2.5 Comparaison entre les deux procédés d'adoucissement

### II.2.5.1 Dose des réactifs et qualité des eaux

On faisant une comparaison entre les résultats obtenus par les deux réactif  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  il semble évident que les doses nécessaires pour aboutir à un traitement optimal de la dureté de l'eau sont importantes et plus élevées dans le cas du traitement avec le carbonate de sodium (Figure 28).



**Figure 28:** Comparaison entre les doses des réactifs utilisés pour le traitement.

L'utilisation de chaque réactif pour réduire la dureté de l'eau a touché d'autres paramètres de qualité (Tableau 16):

TH : Diminution sensible du TH avec une légère efficacité du carbonate de sodium par rapport à la chaux.

Ca<sup>2+</sup> : Diminution remarquable du calcium avec une plus grande efficacité du carbonate de sodium par rapport à la chaux.

Mg<sup>2+</sup> : Diminution remarquable du magnésium avec une plus grande efficacité de la chaux par rapport au carbonate de sodium.

pH et conductivité : L'apport de la chaux permet d'atteindre des pH plus basique qu'on utilisant le Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> par contre la conductivité électrique finale de l'eau est moins élevée.

Na<sup>+</sup> : possibilité d'un apport élevé en ions Na<sup>+</sup> après traitement au carbonate de sodium. Ce qui n'est pas favorable pour les eaux déjà chargées en cet élément.

**Tableau 16:** Comparaison entre les paramètres de qualité avant et après traitement.

Paramètre	Eau de M'Ziraa			Eau de robinet			Eau forage F1		
	Eau brute	Chaux	Carbonate de sodium	Eau brute	Chaux	Carbonate de sodium	Eau brute	Chaux	Carbonate de sodium
<b>TH (F°)</b>	55	40,5	42	107,5	72,5	67,5	78,5	57	42,5
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	112	120	76,5	192	184	94,4	153,6	184	38,8
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/l)</b>	64,8	25,2	55,1	142,8	63,6	105,4	96,2	26,4	78,7
<b>TAC (°F)</b>	17,5	6,4	30,5	23	3,5	33	15	3,8	43,5
<b>pH</b>	7,6	10,5	9,3	7,1	10,3	8,5	7,6	10,5	9,3
<b>CE (mS/cm)</b>	1,2	1,3	1,7	4	3,4	3,9	3,5	2,7	3,6

### II.2.5.2 Volume des boues produites

Comme on l'a décrit dans le chapitre 1 de cette partie expérimentale, pour chaque eau nous avons réalisé:

- Un essai d'adoucissement par précipitation chimique à la chaux ( $[\text{Ca}(\text{OH})_2] = 350 \text{ mg/l}$ )
- Un essai d'adoucissement par précipitation chimique au carbonate de sodium ( $[\text{Na}_2\text{CO}_3] = 500 \text{ mg/l}$ ).

Après coagulation-floculation, chaque eau a été laissée en décantation dans des éprouvettes de 500 ml pendant 30 minutes. Le volume des boues dans chaque éprouvette a été noté après le temps de décantation (Tableau17). Nous avons constaté que les boues produites par précipitation chimique à la chaux étaient plus denses par rapport à celles produites par le carbonate de sodium (Figure23). En plus, elles sont plus volumineuses.

**Tableau 17:** Comparaison entre les boues produites par les deux traitements.

Eau	Rendement d'élimination de la dureté TH en %	La chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )		Rendement d'élimination de la dureté TH en %	Carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	
		Dose introduite (mg/l)	Volume de boues (ml)		Dose introduite (mg/l)	Volume de boues (ml)
<b>M'Ziraa</b>	26,36	350	18	23,64	500	2
<b>Robinet</b>	32,86	350	22	37,21	500	2,2
<b>F1</b>	24,84	350	14	45,85	500	2,5

La boue ainsi produite est stable et très peu coûteuse en termes de traitement, opération ou maintenance. Les boues produites dans le cas de l'utilisation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , contrairement aux boues d'un procédé par précipitation du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sont concentrées (teneur en solides de 90 %). Elles peuvent être recyclées et utilisées par l'industrie (comme produit de départ pour la fabrication de matériau de construction). Une telle valorisation est courante aux Pays Bas et au Royaume Uni par exemple (Mange, 2008).

### II.3 Conclusion

Les essais d'adoucissement que nous avons réalisés ont été consacrés au traitement de trois eaux souterraines de la région de Biskra. Les réactifs utilisés individuellement sont la chaux et le carbonate de sodium.

Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité d'adoucissement de chaque réactif dépend de plusieurs paramètres. Le suivi de la qualité des eaux après traitement a permis d'aboutir aux résultats suivants:

- L'adoucissement de ces eaux nécessite de fortes doses de réactif ce qui peut aboutir à des volumes de boues consistants en fin de traitement. Ce résultat est plus remarquable dans le cas du traitement à la chaux.
- L'élimination du TH est satisfaisante. Cette élimination est accompagnée par une diminution de la teneur en calcium et en magnésium. Elle sera plus remarquable par utilisation de la chaux si la dureté est carbonatée et par utilisation du carbonate de sodium si elle est permanente.
- Le pH final des eaux traitées est assez élevé. Ce qui nécessite un réajustement en fin de chaque traitement.
- La conductivité électrique de l'eau peut augmenter légèrement particulièrement en utilisant le carbonate de sodium. Vue l'apport des ions  $\text{Na}^+$ . Ce qui n'est pas bénéfique pour le traitement des eaux dures et fortement chargées en sodium.
- Pour les eaux de cette région, il serait préférable de combiner l'utilisation de la chaux et du carbonate de sodium pour éliminer à la fois la dureté temporaire et permanente.



# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'objectif de notre étude a été de tester un traitement de réduction la dureté des eaux souterraines de la région de Biskra, afin de donner une solution adéquate qui tient en compte l'aspect économique et des effets néfastes.

Le procédé choisi est l'adoucissement par précipitation chimique à la chaux et par utilisation du carbonate de sodium.

Notre travail a été commencé par la présentation d'un état de connaissance sur les ressources en eau dans la région de Biskra ainsi que sur la qualité physico-chimiques de ses eaux. Il semble que d'une façon générale, les caractéristiques minérales des eaux de la région d'étude sont apparues globalement médiocres avec des valeurs non-conformes aux normes de potabilité, notamment en ce qui concerne les nappes les plus exploitées (Nappes du complexe terminal). La plupart de ces eaux sont très dures. Les eaux dures posent des problèmes de biofilms, de colmatage de conduites d'eau, tuyauteries et matériels domestiques (chaudières, machines à laver, fers à repasser...) et lavent un peu moins bien les textiles (car moussant moins).

La réduction de la dureté (l'adoucissement) des eaux de consommation peut être effectuée par échange ionique, en utilisant les résines, des procédés membranaires comme l'osmose inverse et par précipitation chimique on utilisant la chaux, le carbonate de sodium ou la soude caustique.

L'étude expérimentale que nous avons réalisée a été structurée en deux chapitres. Nous avons commencé par la description de la préparation des solutions, les caractéristiques des réactifs utilisés, les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines que nous avons utilisées pour les essais d'adoucissement et les méthodes de dosage. Nous avons également décrit les différentes étapes des essais de précipitation chimique.

Les résultats des essais expérimentaux nous ont montré que:

- Les doses de chaux ou du carbonate de sodium nécessaires pour atteindre une valeur résiduelle minimale de la dureté sont assez importantes.
- Dans le cas du traitement à la chaux, la dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) ont subi une faible diminution, avec un pourcentage d'élimination qui varie de 26,36% et 32,56%. Ce qui signifie que la dureté dominante de ces eaux est en majorité

non carbonatée. La diminution de la dureté est accompagnée par la diminution de la conductivité de l'eau et du TAC. En revanche le pH de l'eau dépasse 10.

- Dans le cas du traitement par utilisation du carbonate de sodium, la dureté de l'eau ainsi que ces paramètres ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) ont subi une diminution continue avec l'augmentation de la dose de carbonate de sodium, avec un pourcentage d'élimination qui varie de 23,64 % et 45,80 % pour une dose de 500 mg/l du réactif. Ce qui signifie que le réactif ajouté réagit avec les ions calcium et magnésium  $\text{Ca}^{2+}$  lié aux ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans l'eau brute. La diminution de la dureté est accompagnée par une augmentation de la conductivité de l'eau et du TAC. Ceci s'explique par l'apport du sodium et des carbonates (sous forme de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Ce qui n'est pas bénéfique pour les eaux initialement chargées en ions  $\text{Na}^+$ . En revanche le pH de l'eau dépasse 10. Cette augmentation du pH pour les trois eaux nécessitera une neutralisation ultérieure.
- Les boues produites par précipitation chimique à la chaux étaient plus denses par rapport à celles produites par le carbonate de sodium. En plus, elles sont plus volumineuses.
- Pour les eaux de cette région, il serait préférable de combiner l'utilisation de la chaux et du carbonate de sodium pour éliminer à la fois la dureté temporaire et permanente.

## **Références bibliographiques**

### Références bibliographiques

- **A.N.A.T (2003)**. Schème directeur des ressources en eau de la wilaya de Biskra, Dossier 2, Agence nationale de l'aménagement du territoire. Algérie.
- **A.N.R.H (2010)**. Etude d'actualisation du plan National de l'eau, Ressources exploitables. Bassin de chott Melghir, rapport.
- **ABHS (2005)**. Banque de données des forages de Chott Melghir (wilaya de Biskra) .
- **ABHS (2012)**. Cadaster hydraulique du Bassin versant de Chott Melghir.
- **AOUAICHIA A (2018)**. Etude comparative entre l'adoucissement par osmose inverse et par résines des eaux destinées à l'alimentation des chaudières –complexe SIDER EL HADJAR-ANNABA. Mémoire de master en hydraulique urbaine, Université de Biskra.
- **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, p41 .
- **BOUCHEMAL F (2017)**. Diagnostic de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la région de Biskra. Thèse de doctorat en sciences en hydraulique, Université de Biskra.
- **BOUCHEMAL F, BOUCHAHM N AND ACHOUR S (2011)**. Quality of waters of aquifer webs of Biskra region. J Fundam Appl Sci. Vol 3, N°1, 35-46.
- **BREMOND R, VUICHARD R (1973)**. Paramètres de la qualité des eaux. Ministère de la protection de la nature et de l'environnement. SPEPE, Paris, France, 179 P.
- **C.D.T.N (1992)**. Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla, rapport.
- **CARDOT C, GILLES A (2013)**. Analyse des eaux, Génie de l'environnement, Réglementation statistique, Cours et exercices corrigés, TECHNOSUP. ELLIPSES EDITION MARKETING. PARIS.
- **CHAPMAN D, KIMSTACH V (1996)**. Selection of water quality variables. Water quality assessment: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2<sup>nd</sup> ed. E & FN Spon London, pp59-126 .
- **D.P.A.T (2014)**. Monographie de la wilaya de Biskra. Ed. Wilaya de Biskra. 280 P.

- **DEGREMENT(1989)**. Mémento technique de l'eau, Tom I, 9<sup>ème</sup> édition. Paris.
- **DESJARDINS (1997)**. le traitement des eaux, technique et documentation, paris .
- **DIAFI (2015)**. L'adoucissement de l'eau par précipitation chimique. Mémoire de master en hydraulique. Université de Tlemcen.
- **E.R.E.S.S (1972)**. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Par UNESCO. Utilisation des modèles pour l'établissement des programmes d'exploitation. Vol 5. Nappe du continental intercalaire. Vol 2. Nappe du complexe terminal. Vol 3.
- **HADDOUD M (2013)**. Contribution à l'étude des éléments chimiques en traces dans les eaux souterraines profondes de la wilaya de Biskra-cas du cuivre et du zinc, Mémoire de Magister en Hydraulique. Université de Biskra, Algérie, 11 P.
- **JORA (Journal Officiel de la République Algérienne) (2014)**. Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine. Décret exécutif N° 13 du 7 Joumada El Oula1435; 9 mars 2014. Imprimerie Officielle. Les Vergers: Bir-Mourad Raïs. Alger.
- **KHELIEL O, YUCEF L, ACHOUR S (2018)**. Qualité des eaux souterraines de la nappe du Moi-pliocène de la région de Biskra et risque de la pollution par les nitrates. Courrier du Savoir, N°25, pp.135-142.
- **LENNTECH**.<https://www.lenntech.fr/applications/process/chaudiere/chaudiere/caracteristiques-eau-alimentation-chaudiere.htm>
- **MANGE P (2008)**. Dureté de l'eau. Adoucissement centralisée, GIS/SIT 2008 Forum suisse de la géo information, 10-12 Juin, Université Zurich-Irchel.
- **MEDFEUNI (2007)**. Adoucissement des eaux géothermales de l'oued R'HIR. Etude comparative de deux type de la chaux (Ca(OH)<sub>2</sub>).
- **MEMOTEC n°1 (2006)**. La nanofiltration, une technologie adaptée aux eaux difficiles.
- **MEMOTEC N°37 (2006)**. Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse.
- **MEMOTEC N°6 (2006)**. Les procédés d'adoucissement en traitement de l'eau

potable.

- **NORDINE NOUAYTI, DRISS KHATTACH, MOHAMED HILALI (2015).** Evolution de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut atlas central, Maroc). J. Mater, Environ , Vol 6, N° 4, pp 1068-1081.
- **OUALI MS (2001).** Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux, OPU, Alger.
- **PREVEDELLO C (2006).** **La qualité de l'eau de distribution.** Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon, S.A.AQUAWAL.
- **QUENEAU P, HUBERT J (2009).** Place des eaux minérales dans l'alimentation. Rapport de l'académie national de médecine. Société française de l'hydrologie et climatologie médicale. France, pp 175-220.
- **REJSEK F (2002).** Analyse des eaux. Aspects réglementaires et techniques, Collection biologie technique, Série Sciences et techniques de l'environnement. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine. Bordeaux, France.
- **RODIER J (1996).** L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7<sup>ème</sup> édition.
- **RODIER J, L EGUBE B, MERLET N & COLL (2009).** L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, 9<sup>ème</sup> édition (Entièrement mise a jour), Ed. Dunod, Paris, France.
- **RONALAD V (2003).** Eau, Environnement et santé publique, 2<sup>ème</sup> édition, Ed. TEC&DOC, Paris.
- **ROQUES H . (1990).** Fondements théoriques du traitement chimique des eaux, Vol I, Techniques et documentation LAVOISIER, PARIS. 519 p.
- **ROSSET R, NGUYEN F, WALHA K, BEN AMOR M. ET DAOUD A (1996) .** L'entartrage par les eaux géothermales du sud –Tunisien; TSM numéro 11, Novembre, p 67-73).
- **SCHOELLER H (1962).** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique, Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources. Paris, France, 642 P.

- **SEDRATI N (2011)**. Origines et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra sud-Est algérien. Thèse de doctorat en hydrogéologie. Université Annaba, Algérie.
- **SEDRATI N( 2011)**. Origines et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra Sud-Est algérien. Thèse de doctorat en hydrogéologie. Université Annaba.
- **SOFTAZUR <sup>Tm</sup> R, softazur-r-m-ep-003-fr-1410-web(1)**, décarbonatation / adoucissement par échange d'ions.
- **TABOUCHE N (1999)**. Etude de la répartition spatiale des teneurs en fluorures des eaux du Sahara septentrional, Thèse de Magister en sciences hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- **TARDAT-HENRY M, BEAUDRY J. P. (1984)**. Chimie des eaux, Ed. Le griffon d'Argile INC, Canada.
- [www.adoucisseur-eau.org/types/visite](http://www.adoucisseur-eau.org/types/visite) le 14/05/2015.
- **WWW.COMAP.fr**. Adoucisseur d'eau. Documentation Technique.
- **YOUCEF L (1998)**. Etude des possibilités d'élimination des fluorures des eaux souterraines par précipitation chimique à la chaux, Thèse de Magister en hydraulique, Université Biskra.
- **YOUCEF L, ACHOUR, S (2001)**. Défluoruration des eaux souterraines du sud algérien par la chaux et le sulfate d'aluminium. Courrier de Savoir –N°1, Novembre 2001, PP 65-71.



# **Annexe**

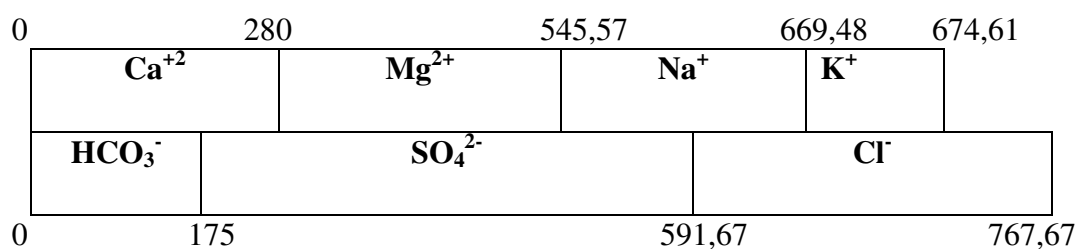
## Procédé par addition de la chaux seulement

### Calcul de la dose théorique de la dose de chaux

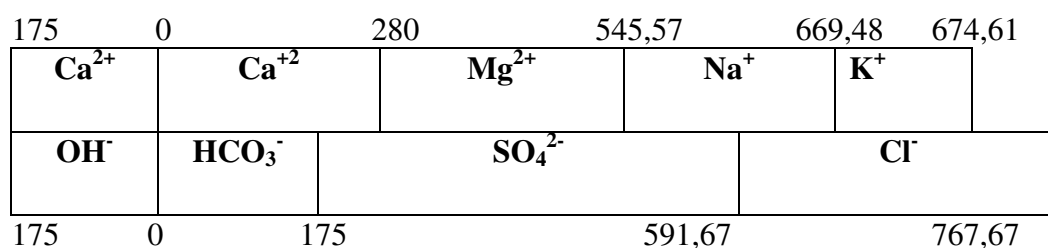
**Note:** Le calcul a été réalisé en suivant le protocole expliqué par Desjardins (1997).

#### a) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux - Eau de M'Ziraa

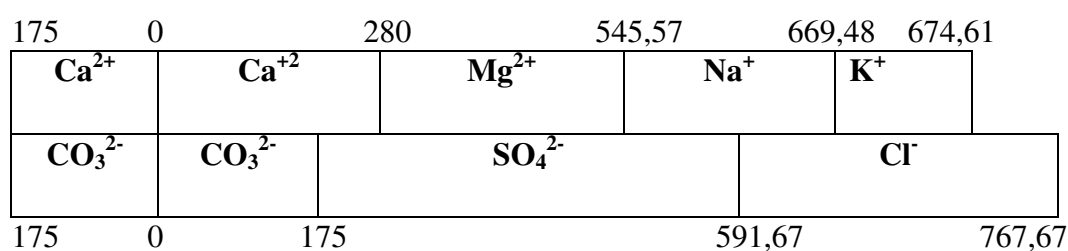
##### 1. Diagramme de barre Eau brute de M'Ziraa



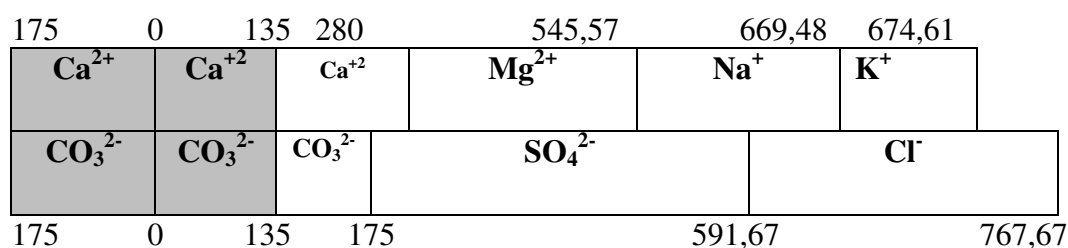
##### 2. Addition de chaux



##### 3. Transformation des bicarbonates en carbonates



##### 4. Précipitation

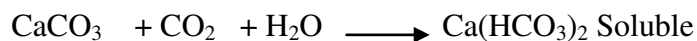


**5. Eau intermédiaire**

0	145	410,57	534,48	539,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>		<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>
0	40	456,67	632,67	

**6. Addition du CO<sub>2</sub> pour stabiliser le CaCO<sub>3</sub>**

40	0	145	410,57	534,48	539,61
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
40	0	40	456,67		632,67



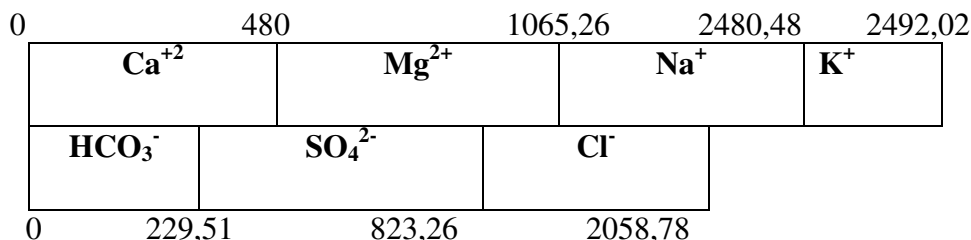
**7. Eau finale**

0	145	410,57	534,48	539,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	40	456,67		632,67

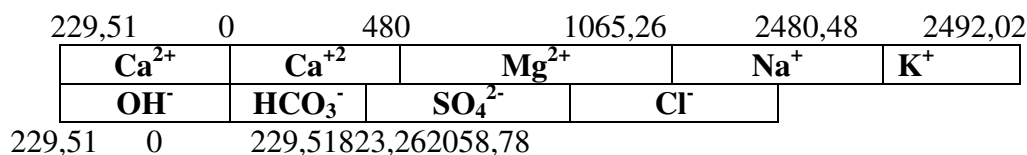
**8. Conclusion:** L'ajout de la chaux seul permet de réduire la dureté totale de l'eau de M'Ziraade 550 mg/l (CaCO<sub>3</sub>) (55°F) à 410,57 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (41 °F) pour ce faire en doit utiliser 175 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de Ca(OH)<sub>2</sub>. ce qui est équivalent à une dose de 129,5 mg/l de chaux. et 40 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub>

**b) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux - Eau du robinet**

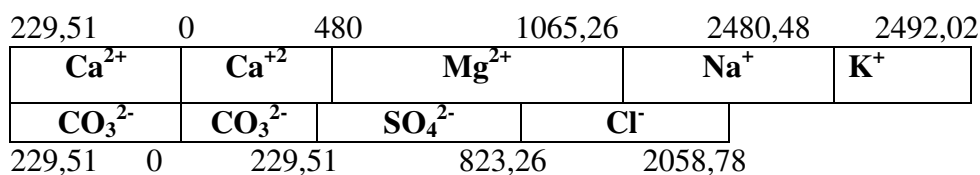
**1. Diagramme de barre eau du robinet**



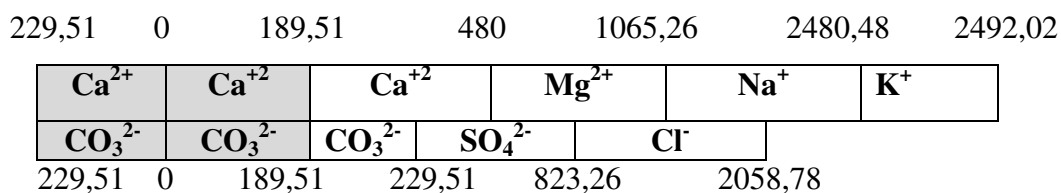
**2. Addition de chaux**



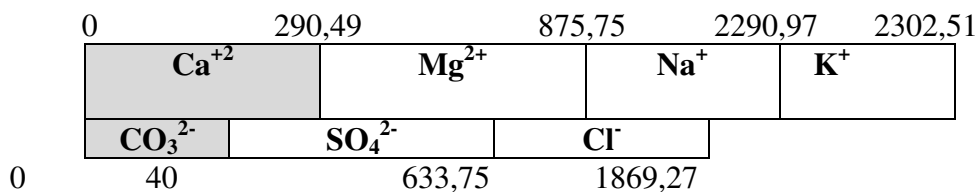
**3. Transformation des bicarbonates en carbonates**



**4. Précipitation**

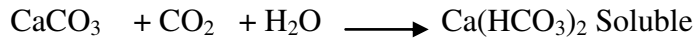


**5. Eau intermédiaire**



**6. Addition du CO<sub>2</sub> pour stabiliser le CaCO<sub>3</sub>**

	40	0	290,49	875,75	2290,97	2302,51
CO <sub>2</sub>	Ca <sup>+2</sup>		Mg <sup>+2</sup>		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>			
	40	0	40	633,75	1869,27	



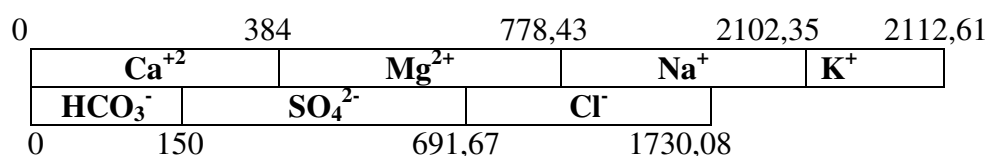
**7. Eau finale**

	0	290,49	875,75	2290,97	2302,51
	Ca <sup>+2</sup>		Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
	0	40	633,75	1869,27	

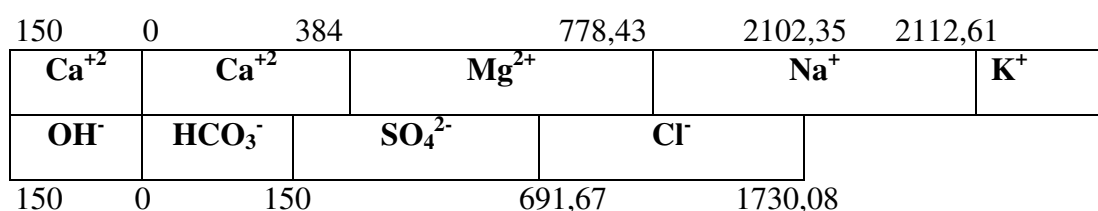
**8. Conclusion:** L'ajout de la chaux seul permet de réduire la dureté totale de l'eau de robinet de 1065,26 mg/l (CaCO<sub>3</sub>) (106,5°F) à 875,75 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (87,6 °F) pour ce faire en doit utiliser 229,51 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de Ca(OH)<sub>2</sub> ce qui est équivalent à une dose de 169,83 mg/l de chaux. et 40 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub>.

**c) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux - Eau Forage F1 (Oued El Hai)**

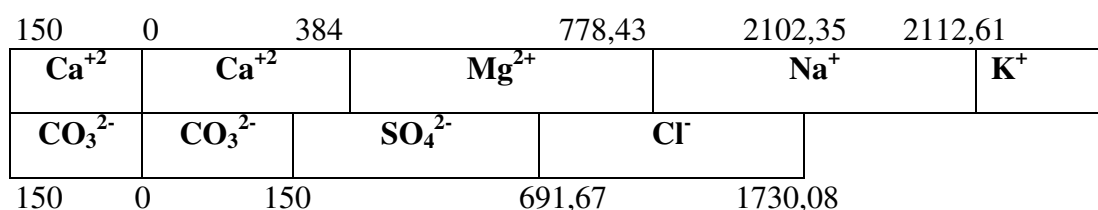
**1. Diagramme de barre Eau Forage F1 (Oued El Hai)**



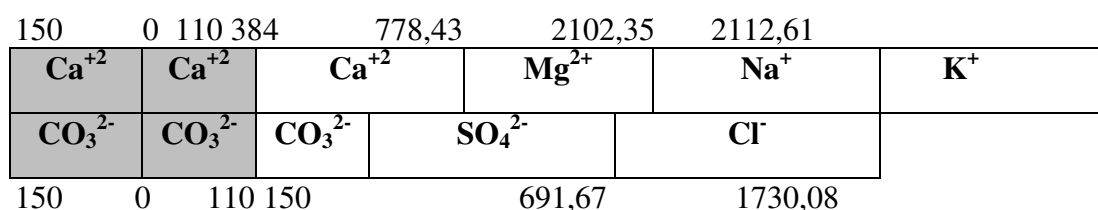
**2. Addition de chaux**



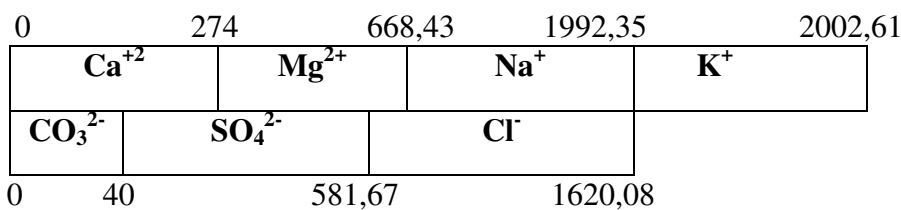
**3. Transformation des bicarbonates en carbonates**



**3. Précipitation**

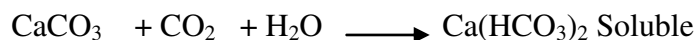


**4. Eau intermédiaire**



**5. Addition du CO<sub>2</sub> pour stabiliser le CaCO<sub>3</sub>**

40	0	274	668,43	1992,35	2002,61
CO <sub>2</sub>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
40	0	40	581,67	1620,08	



**6. Eau finale**

0	274	668,43	1992,35	2002,61
Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
0	40	581,67	1620,08	

**7. Conclusion:** L'ajout de la chaux seul permet de réduire la dureté totale de l'Eau Forage F1 (Oued El Hai) de 778,43 mg/l (CaCO<sub>3</sub>) (78°F) à 668,43 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (67 °F) pour ce faire en doit utiliser 150 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de Ca(OH)<sub>2</sub> ce qui est équivalent à une dose de 111mg/l de chaux. et 40 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub>

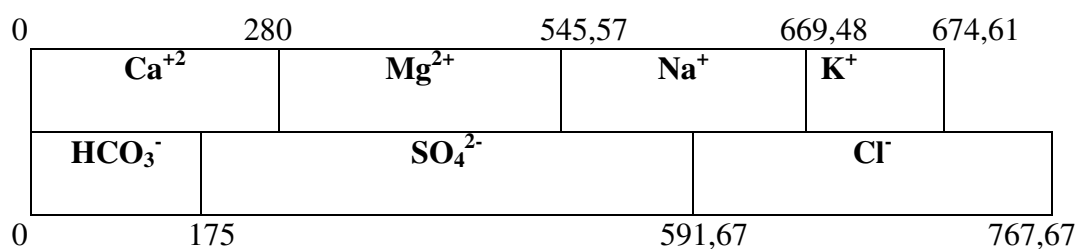
## Procédé par addition de la chaux seulement

### Calcul de la dose théorique de la dose de chaux

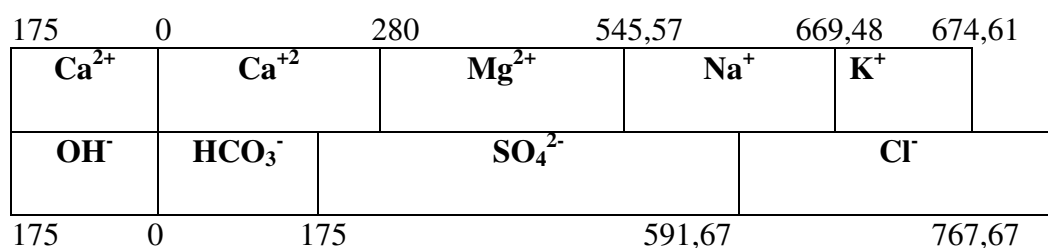
**Note:** Le calcul a été réalisé en suivant le protocole expliqué par Desjardins (1997)

#### a) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux - Eau de M'Ziraa

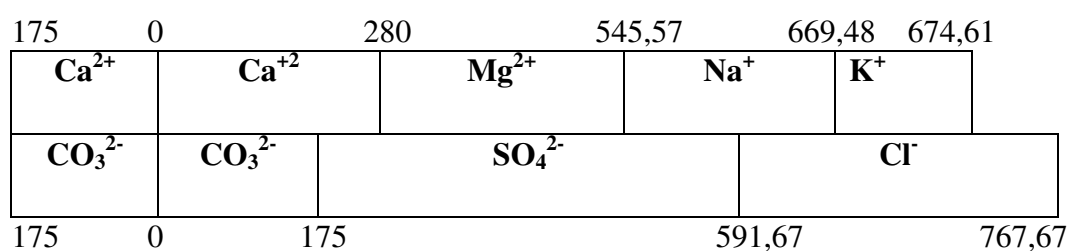
##### 1. Diagramme de barre Eau brute de M'Ziraa



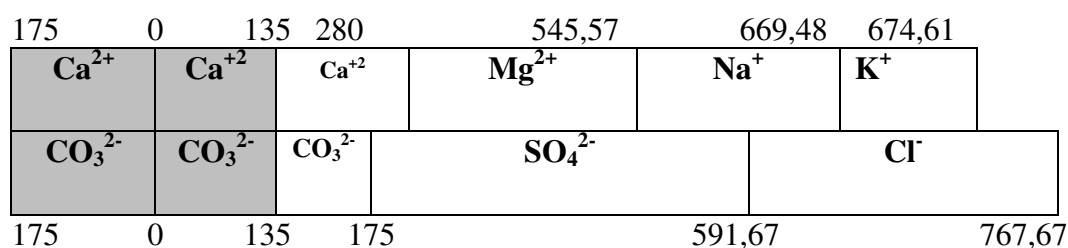
##### 2. Addition de chaux



##### 3. Transformation des bicarbonates en carbonates



##### 4. Précipitation



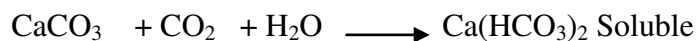


**5. Eau intermédiaire**

0	145	410,57	534,48	539,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	40	456,67	632,67	

**6. Addition du CO<sub>2</sub> pour stabiliser le CaCO<sub>3</sub>**

40	0	145	410,57	534,48	539,61
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
40	0	40	456,67	632,67	



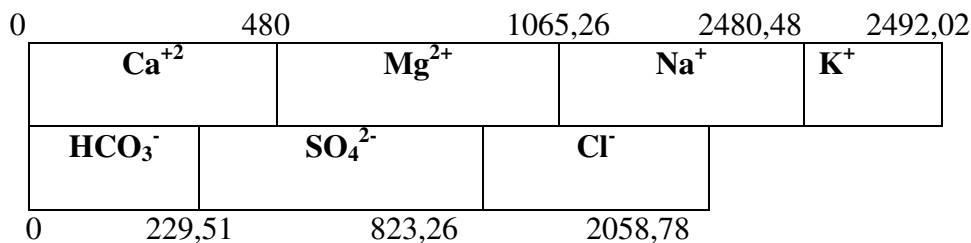
**7. Eau finale**

0	145	410,57	534,48	539,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	40	456,67	632,67	

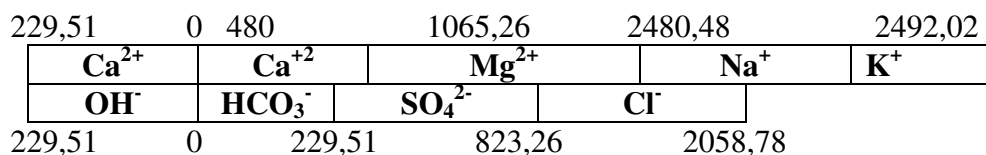
**8. Conclusion:** L'ajout de la chaux seul permet de réduire la dureté totale de l'eau de M'Ziraade 550 mg/l (CaCO<sub>3</sub>) (55°F) à 410,57 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (41 °F) pour ce faire en doit utiliser 175 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de Ca(OH)<sub>2</sub>. ce qui est équivalent à une dose de 129,5 mg/l de chaux. et 40 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub>

**b) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux - Eau du robinet**

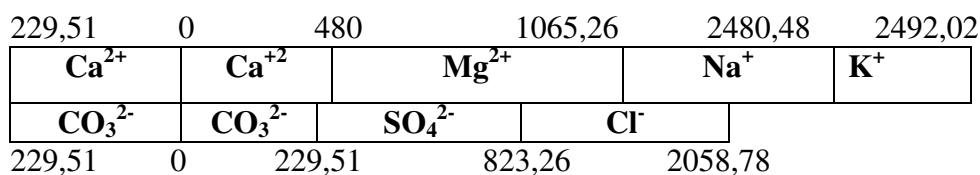
**1. Diagramme de barre eau du robinet**



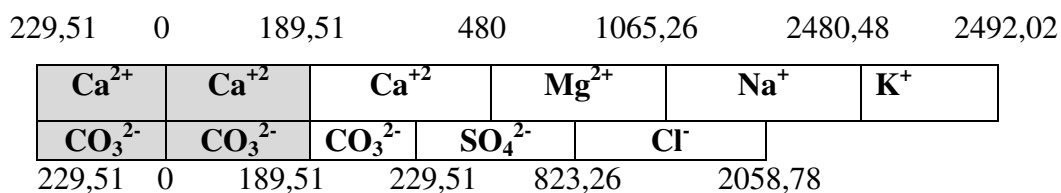
**2. Addition de chaux**



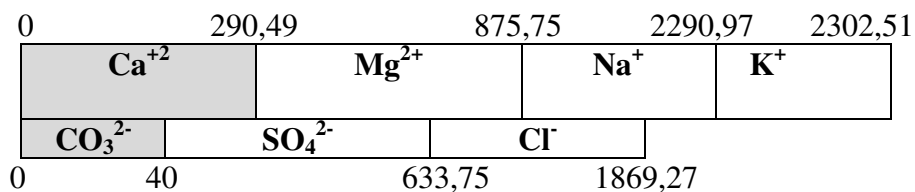
**3. Transformation des bicarbonates en carbonates**



**4. Précipitation**

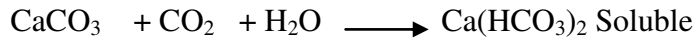


**5. Eau intermédiaire**



**6. Addition du CO<sub>2</sub> pour stabiliser le CaCO<sub>3</sub>**

	40	0	290,49	875,75	2290,97	2302,51
CO <sub>2</sub>	Ca <sup>+2</sup>		Mg <sup>+2</sup>		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>			
	40	0	40	633,75	1869,27	



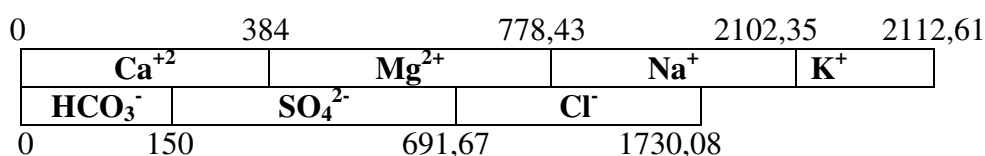
**7. Eau finale**

	0	290,49	875,75	2290,97	2302,51
	Ca <sup>+2</sup>		Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
	0	40	633,75	1869,27	

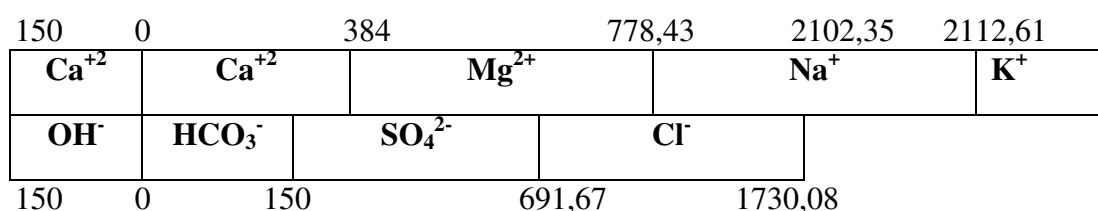
**8. Conclusion:** L'ajout de la chaux seul permet de réduire la dureté totale de l'eau de robinet de 1065,26 mg/l (CaCO<sub>3</sub>) (106,5°F) à 875,75 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (87,6 °F) pour ce faire en doit utiliser 229,51 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de Ca(OH)<sub>2</sub> ce qui est équivalent à une dose de 169,83 mg/l de chaux. et 40 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub>.

**c) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux - Eau Forage F1 (Oued El Hai)**

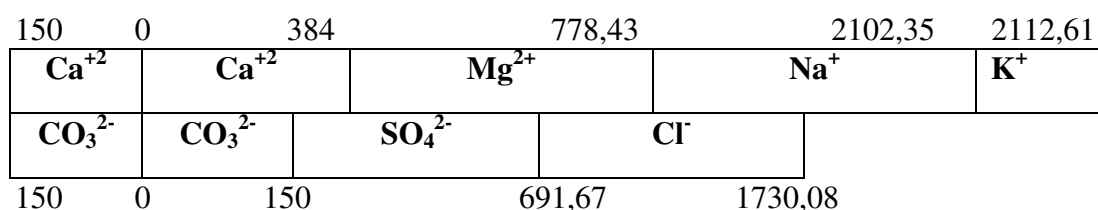
**1. Diagramme de barre Eau Forage F1 (Oued El Hai)**



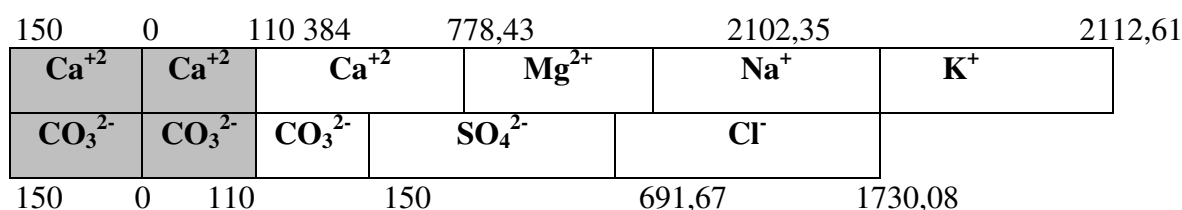
**2. Addition de chaux**



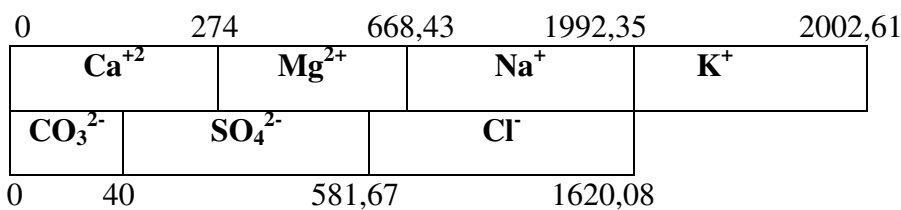
**3. Transformation des bicarbonates en carbonates**



**3. Précipitation**

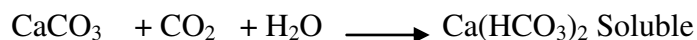


**4. Eau intermédiaire**



**5. Addition du CO<sub>2</sub> pour stabiliser le CaCO<sub>3</sub>**

40	0	274	668,43	1992,35	2002,61
CO <sub>2</sub>	Ca <sup>+2</sup>		Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
40	0	40	581,67	1620,08	



**6. Eau finale**

0	274	668,43	1992,35	2002,61
Ca <sup>+2</sup>		Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
0	40	581,67	1620,08	

**7. Conclusion :** L'ajout de la chaux seul permet de réduire la dureté totale de l'**Eau Forage F1 (Oued El Hai)** de 778,43 mg/l (CaCO<sub>3</sub>) (78°F) à 668,43 mg/l de CaCO<sub>3</sub> (67 °F) pour ce faire en doit utiliser 150 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de Ca(OH)<sub>2</sub> ce qui est équivalent à une dose de 111mg/l de chaux. et 40 mg/l de CaCO<sub>3</sub> de CO<sub>2</sub>

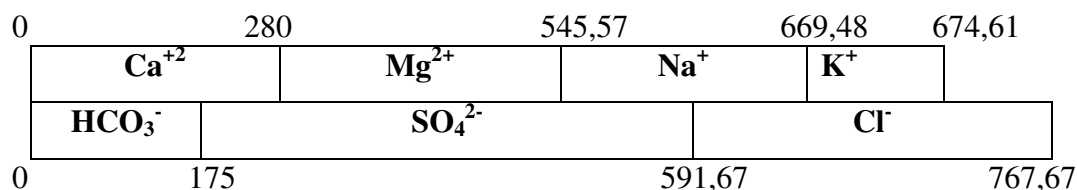
## Traitement avec un excès de chaux

### Calcul de la dose théorique de la dose de chaux en excès

**Note:** Le calcul a été réalisé en suivant le protocole expliqué par Desjardins (1997).

#### a) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux en excès - Eau de M'Ziraa

##### 1. Diagramme de barre Eau brute de M'Ziraa



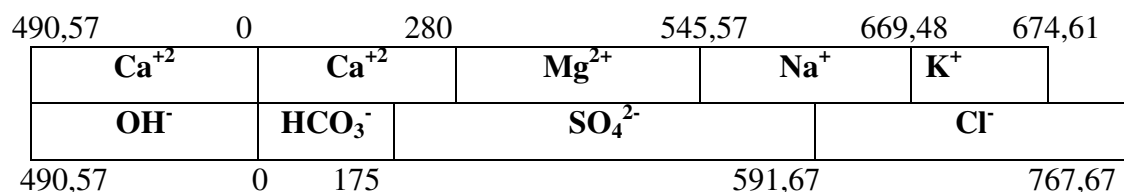
Bicarbonates : 175 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 265,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l

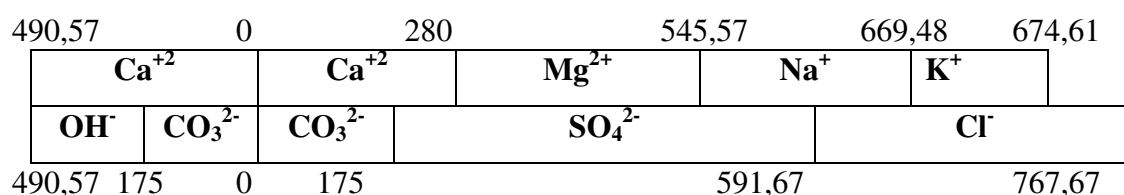
Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux à introduire : **490,57 mg CaCO<sub>3</sub>/l**

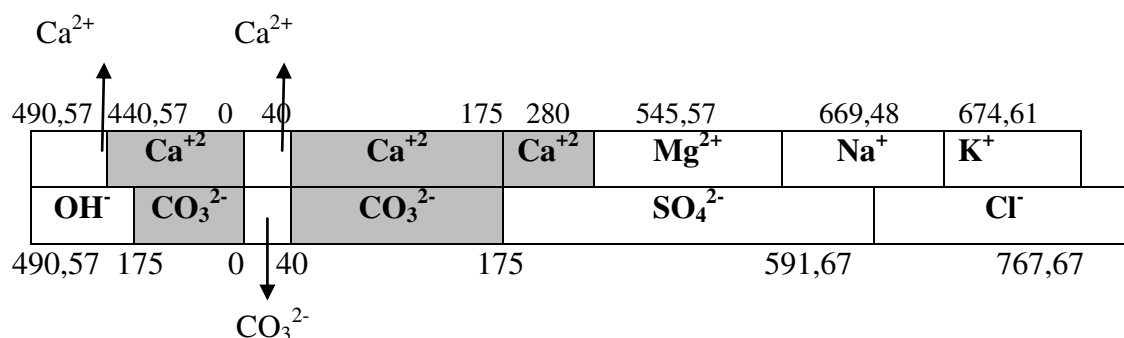
##### 2. Addition de chaux



##### 3. Transformation des bicarbonates en carbonates



##### 4. Précipitation de CaCO<sub>3</sub>



**5. Eau intermédiaire après précipitation de CaCO<sub>3</sub>**

0	460,57		726,14		850,05	855,18
<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>		<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	
<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>			<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	315,57	355,57	772,24		948,24	

**6. Précipitation de Mg(OH)<sub>2</sub>**

	0	10	265,57		726,14		850,05	855,18
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	←		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	
			<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
<b>OH<sup>-</sup></b>	←	0	10	15,57	355,57	772,24		948,2

**7. Eau intermédiaire après précipitation de Mg(OH)<sub>2</sub>**

0	10	470,57		594,48	599,61
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>OH<sup>-</sup></b>		<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	60	100	471,67	647,67	

**8. Première carbonatation**

On ajoute 50 mg/l de CO<sub>2</sub> soit 10 mg/l de moins que pour la concentration de OH<sup>-</sup> (60 mg/l)

50	0	460,57		470,57	594,48	599,61
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>		<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	
	<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
50	0	60	100	471,67	647,67	

**9. Précipitation de CaCO<sub>3</sub>**

0	50	90	460,57		470,57	594,48	599,61
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>		
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>		
0	50	90	100	471,67	647,67		

### 10. Deuxième carbonatation

On ajoute 50 mg de CO<sub>2</sub> soit 40 mg/l pour transformer CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et 10 mg/l pour transformer les OH<sup>-</sup>

50	0			410,57	420,57	544,48	549,61
CO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	OH <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>			
50	0	40	10	471,67		647,67	

### 11. Eau finale

0		410,57	420,57	544,48	549,61
Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>		
0	50	471,67		647,67	

### b) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux en excès - Eau de robinet

#### 1. Diagramme de barre Eau brute de Robinet

0	480	1065,26	2480,48	2492,02
Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>	
0	229,51	823,26	2058,78	

Bicarbonates : 229,51 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Magnésium : 585,26mg CaCO<sub>3</sub>/l

Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l

Dose de chaux : **864,77**mg CaCO<sub>3</sub>/l

#### 2. Addition de chaux

864,77	0	480	1065,26	2480,48	2492,02
Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
OH <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
864,77	0	229,51	823,26	2058,78	

#### 3. Transformation des bicarbonates en carbonates

864,77	0	480	1065,26	2480,48	2492,02
Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	
OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	
864,77	229,51	0	229,51	823,26	2058,78



#### 4. Précipitation de CaCO<sub>3</sub>

Ca <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup>									
864,77	814,77	0	40	480	1065,26	2480,48			2492,02
Ca <sup>2+</sup>			Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>			
864,77	229,51	0	40	229,51	823,26	2058,78			
			CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>						

#### 5. Eau intermédiaire après précipitation de CaCO<sub>3</sub>

0	925,75	1511,01	2926,24	2937,77
Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		K <sup>+</sup>
OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	
0	635,26	675,26	1269,01	2504,53

#### 6. Précipitation de Mg(OH)<sub>2</sub>

	0	10	585,26	11511,01	2926,24	2937,77
Mg <sup>2+</sup>	←		Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
OH <sup>-</sup>	←		OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
	0	10	635,26	675,26	1269,01	2504,53

#### 7. Eau intermédiaire après précipitation de Mg(OH)<sub>2</sub>

0	925,75	935,75	2350,98	2362,52
Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	
0	60	100	693,75	1929,27

#### 8. Première carbonatation

On ajoute 50 mg/l de CO<sub>2</sub> soit 10 mg/l de moins que pour la concentration de OH<sup>-</sup> (60 mg/l)

50	0	925,26	935,26	2350,98	2362,52
CO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
	OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	
50	0	60	10	0693,75	1929,27

#### 9. Précipitation de CaCO<sub>3</sub>

0 50 925,26 935,26 2350,982362,520

050 925,26935,26 2350,98 23620 50 90 100

<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>			<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	693,75
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>			

10.

**deuxième carbonatation**

On ajoute 50 mg de CO<sub>2</sub> soit 40 mg/l pour transformer CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et 10 mg/l pour transformer les OH<sup>-</sup>

50 0 875,26 885,26 2300,98 2312,52

<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>			<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
	<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b>	<b>OH<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>		
50	0	40	50	693,75		1929,27

**11. Eau finale**

0	875,26			885,75	2300,90	2312,52
	<b>Ca<sup>2+</sup></b>			<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>			<b>Cl<sup>-</sup></b>		
0	50	693,75			1929,27	

*c) Calcul de la dose théorique de la dose de chaux en excès - Eau Forage F1 (Oued El Hai)*

**1. Diagramme de barre Eau brute Forage F1 (Oued El Hai)**

0	384	778,43	2102,35	2112,61
	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>		<b>Cl<sup>-</sup></b>	
0	150	691,67	1730,08	

Bicarbonates : 150mg CaCO<sub>3</sub>/l  
 Magnésium : 394,43mg CaCO<sub>3</sub>/l  
 Excès de chaux : 50 mg CaCO<sub>3</sub>/l  
 Dose de chaux : **594,43mg CaCO<sub>3</sub>/l**

**2. Addition de chaux**

594,43 0 384 778,43 2102,35 2112,61

$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$		$\text{K}^+$
$\text{OH}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$			
594,43	0	150	691,67		1730,08		

**3. Transformation des bicarbonates en carbonates**

594,43                      0                      384                      778,43                      2102,35                      2112,61

$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$		$\text{K}^+$
$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$		
594,43	150	0	150	691,67		1730,08	

**4. Précipitation de  $\text{CaCO}_3$**

$\text{Ca}^{2+}\text{Ca}^{2+}$  (40mg/l)

594,43	544,43	0	150	384	778,43	2102,35	2112,61
$\text{OH}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$		$\text{K}^+$
594,43	150	0	150	691,67		1730,08	
	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$		

$\text{CO}_3^{2-}$  (40mg/l)

**5. Eau intermédiaire après précipitation de  $\text{CaCO}_3$**

0                      668,43                      1062,86                      2386,78                      2397,04

$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Mg}^{2+}$		$\text{Na}^+$		$\text{K}^+$
$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$		
0	444,43	484,43	1026,1		2064,51	

**6. Précipitation de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$**

0	10	394,43	1062,86	2386,78	2397,04	
$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$		$\text{Na}^+$		$\text{K}^+$
$\text{OH}^-$	$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$	
0	10	444,43	484,43	1026,1		2064,51

**7. Eau intermédiaire après précipitation de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$**

0		668,43		678,43		2002,35		2012,61	
$\text{Ca}^{2+}$				$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$			$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$					
0	50	90	631,67		1670,08				

### 8. Recarbonatation

On ajoute 40 mg/l de  $\text{CO}_2$  soit 10 mg/l de moins que pour la concentration de  $\text{OH}^-$  (50 mg/l)

40		0		668,43		678,43		2002,35		2012,61	
$\text{CO}_2$		$\text{Ca}^{2+}$				$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$			$\text{K}^+$	
$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$							
40	0	50	90	631,67		1670,08					

### 9. Précipitation de $\text{CaCO}_3$

0		40		668,43		678,43		2002,35		2012,61	
$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$				$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$			$\text{K}^+$		
$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{OH}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$						
0	40	80	90	631,67		1670,08					

↓

### 10. Deuxième carbonatation

On ajoute 50 mg de  $\text{CO}_2$  soit 40 mg/l pour transformer  $\text{CO}_3^{2-}$  et 10 mg/l pour transformer les  $\text{OH}^-$

50		0		628,43		638,43		1962,35		1972,61	
$\text{CO}_2$		$\text{Ca}^{2+}$				$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$		$\text{K}^+$		
$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{OH}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$							
50	0	40	50	591,67		1630,08					

### 11. Eau finale

0		628,43		638,43		1962,35		1972,61	
$\text{Ca}^{2+}$				$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$			$\text{K}^+$	
$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$		$\text{Cl}^-$						
0	50	591,67		1630,08					

## II.1 Introduction

Le corps humaine a besoin d'apports quotidiens en calcium et en magnésium, provenant de l'eau de boisson et des aliments.

Par contre si l'eau est dure fortement chargée en calcium et de magnésium, cela peut entraîner des inconvénients: dépôts de calcaire dans les réseaux de distribution, les chaudières et les machines à laver, dépenses supplémentaires en énergie, risque de développement bactérien, risque de dissolution de plomb des canalisations, d'où la nécessité d'adoucir l'eau pour enlever une partie de sa dureté (Degrèment, 1989; Desjardins, 1997).

Pour réduire la dureté de l'eau il y'a plusieurs méthodes comme l'échange d'ion, les procédés membranaires (l'osmose inverse, l'électrodialyse, la nano filtration,...) et l'adoucissement par précipitations chimique.

Au cours de ce chapitre nous allons donner une idée sur la définition de la dureté de l'eau, les types de la dureté, les risques provoqués par les eaux dures ainsi que les normes de potabilité concernant ce paramètre. Une synthèse bibliographique sera également présentée sur les procédés existants à l'échelle industrielle pour la réduction de la dureté de l'eau.

## II.2 Dureté de l'eau

### II.2.1 Définition

Une eau est dite **dure** lorsqu'elle est fortement chargée en ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) et par opposition une eau  **douce** lorsque contient peu de ces ions. En pratique on considère souvent que la dureté totale (TH) d'une eau de consommation est égale à la somme de sa dureté calcique et la dureté magnésienne:

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

La dureté de l'eau brute est uniquement dépendante de la nature de la géologie traversée. Lorsque l'eau traverse des roches carbonatées (Calcaires primaires, craies du crétacé....) ou dont un des composants est carbonates (grés calcarifères). Elle varie donc en fonction de la nature de la région d'où provient l'eau (Tardat-henry et Beaudry, 1984 ; Rodier et al, 1996).

La dureté de l'eau s'exprime en degré français (F°), un degré français de dureté correspond à une teneur en calcium et magnésium équivalente à 10mg de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) par litre. C'est à dire : 1 F° = 10 mg de CaCO<sub>3</sub>/l (Rodier et al, 1996).

### II.2.2 Types de la dureté

La dureté de l'eau correspond aux ions calcium Ca<sup>2+</sup> (dureté calcique) et de magnésium Mg<sup>2+</sup> (dureté magnésienne) liées en anions étranges (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Il peut être parfois important de connaître la dureté calcique ou la dureté magnésienne d'une eau. par exemple: pour le calcul de 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 (Desjardin, 1997).

Les ions calcium et magnésium sont positifs, donc dans l'eau ils peuvent se lier à d'autres ions négatifs, de ce fait on peut diviser la dureté en deux catégories :

**-Dureté carbonatée ou temporaire (TH(temp)):** elle disparaît après l'ébullition. Elle correspond aux carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium (Tardat-henry et Beaudry, 1984).

$$TH(temp) = TH - TH_p \text{ si } TH < TH_p$$

**-Dureté non carbonatée ou permanente (TH<sub>p</sub>):** Elle subsiste après l'ébullition de l'eau dans les conditions standardisées. Elle correspond aux chlorures et aux sulfates de calcium et de magnésium (Tardat-henry et Beaudry, 1984).

$$TH_p = TH - TAC \text{ si } TH > TAC$$

### II.2.3 Conséquences de la dureté

#### II.2.3.1 Impacte de la dureté sur la santé

La dureté n'a pas d'effet négatif sur la santé humaine. Son effet sur les calculs aux reins relève uniquement du mythe populaire.

Par contre une série d'études laisse sous-entendre une relation inverse entre l'occurrence des maladies cardio-vasculaires et la dureté de l'eau. Les principales conclusions du symposium de Baltimore (mai 2006) organisé par l'organisation mondiale de la santé et intitulé "Health Aspects of calcium Magnésium in Drinking Water" indiquent que le seul effet bénéfique sur

la santé scientifiquement démontre suite à la consommation d'une eau riche en calcium et magnésium est la diminution de la mortalité en cas d'accidents cardio-vasculaire. D'autres études sont actuellement en cours. L'OMS ne mentionne d'ailleurs pas de recommandation en ce qui concerne la dureté de l'eau, ni minimales, ni maximales (Prevedello, 2006).

### II.2.3.2 Impact de la dureté sur les utilisations domestiques

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

- Consommation d'énergie.
- consommation de lessive.
- Entartrage des appareils et des canalisations d'eau (Figure 3).



**Figure 3:** Entartrage des appareils et des canalisations d'eau (www.google.com).

### II.2.3.3 Formation de tartre

Les ions calcium peuvent sous certaines conditions (chaleur, dégazage ...) se combiner avec les ions hydrogencarbonates ( $\text{HCO}_3^+$ ) pour constituer le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) solide aussi appelé calcaire ou tartre.

Ce solide se fixe naturellement sur les parois (tuyauteries, résistances de chauffe, ballons d'eau chaude, robinetterie) et réduit les échanges thermiques, conduisant à des surconsommations énergétiques, des vieillissements prématurés des appareils et installations favorisant également les développements bactériens sous les couches de tartre (exemples: légionnelles).

### **II.2.3.3 Paramètres de l'entartage**

Il existe quelques paramètres qui contribuent à la précipitation des sels, ces paramètres sont les suivants (Rosset et al, 1996 ; Koriba, 2007):

- Présence de sels de calcium et, dans une moindre mesure, de magnésium dans l'eau est le premier facteur qui contribue au caractère entartant de l'eau.
- La température de l'eau: La réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium est largement favorisée par l'élévation de la température.
- Influence de la nature de la canalisation: Dans le cas des eaux moyennement ou peu entartant, le cuivre peut empêcher l'apparition des premières traces de tartre et bloquer ainsi le développement naturel du processus d'entartage.

### **II.2.3.4 Conséquences de l'entartage**

Les conséquences d'un entartage sont (Roque, 1990):

- Hydrauliques
- Bactériologiques
- Technologiques

#### **a) Conséquences hydrauliques**

L'accumulation d'une épaisseur de tartre dans les équipements conduit à une diminution des sections de passage. Cela occasionnera une augmentation de la résistance hydraulique des réseaux ce qui conduira dans tous les cas à une augmentation de la dépense énergétique des pompes dans le cas des réseaux fermes ou sous pression (Roque, 1990).



**b) Conséquences bactériologiques**

Il a été montré que les réservoirs, les réseaux et les points de puisage des réseaux d'eau chaude pouvaient, s'ils étaient entartrés, être favorables à l'accueil et à la prolifération de *Legionella*. En particulier les pommes de douche entartrées ont une section de passage plus faible. La production d'aérosols est augmentée et donc le risque d'inhalation est augmenté. Ceci conduit à des opérations régulières de détartrage nécessaires avant toute désinfection (Roque, 1990).

**c) Conséquences technologiques**

On peut citer l'alourdissement des structures porteuses des tours de refroidissement comme les réservoirs. Mais aussi l'alourdissement des équipements internes qui rendent plus difficile leur manutention: les épaisseurs de tartre peuvent même amener à ne plus pouvoir sortir les épingles de réchauffage de ballons de production d'eau chaude. L'entartrage peut aussi avoir pour conséquences (Degrèment, 1989) :

- Le blocage des organes de manœuvre des robinetteries.
- L'impossibilité d'obtenir l'étanchéité siège-clapet des robinetteries.
- Le blocage des soupapes de sécurité.
- La diminution du volume utile des réservoirs.
- La dégradation des états de surface des appareils.
- L'augmentation dans de forte proportion des dépôts entraînent une augmentation de la résistance thermique des parois des échangeurs et donc une diminution du coefficient d'échange.

**II.2.4 Normes de potabilité vis-à-vis de la dureté de l'eau**

Vue les conséquences de l'utilisation des eaux dures dans les différents domaines de la vie de l'être humain. Il est devenu une nécessité de se préconiser d'une eau dont la teneur de la dureté totale et de ces paramètres est conforme aux normes.

Les normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine suivant le journal officiel de la république Algérienne qui date du 09 Mars 2014 sont présentés dans le tableau 8 suivant (extrait du tableau 3, chapitre I).

**Tableau 8:** Valeurs limites des paramètres de la dureté de l'eau.

Paramètre	Valeur limite	
	(JORA, 2014)	(OMS, 2006)
Calcium (Ca <sup>2+</sup> )(mg/l)	200	100
Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )(mg/l)	Non indiquée par JORA et OMS. On adopte <b>50 mg/l</b> selon CEE (1975)	
TH (°F)	50	20

### II.3 Procédés d'adoucissement des eaux

L'adoucissement concerne la réduction des duretés carbonatées et non carbonatées. Selon le procédé utilisé, nous aurons donc:

- Une diminution de la dureté totale (TH) et du TAC (exprimant principalement les carbonates et bicarbonates).
- Une diminution des sels de calcium et de magnésium (diminution du TH, le TAC ne change pas).

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

Les techniques d'adoucissement font appel à trois procédés, à savoir la décarbonatation qui n'élimine que les ions calcium et magnésium liés aux bicarbonates. Il s'agit alors d'un adoucissement partiel, et l'adoucissement total qui élimine l'ensemble des ions calcium et magnésium mais sans modifier l'alcalinité de l'eau.

Le troisième procédé est représenté par la nano filtration qui élimine partiellement les ions calcium, magnésium et bicarbonates; parmi les procédés de décarbonatation on trouve: la décarbonatation à la chaux, la décarbonatation à la soude, la décarbonatation sur résines échangeuses d'ions du type cationique carboxylique, régénérée par une solution de chlorure de sodium (Memotec n°01, 2006).

### II.3.1 Echange ionique

On utilise des résines qui sont des substances insolubles comportant dans leur structure macroporeuse des ions positifs ou négatifs. Elles se présentent dans la majorité des cas sous forme de billes (Figure 4). Elles ont la capacité de permuter, sans modification physique et sans altération, leurs ions A contre des ions B de même signe se trouvant dans l'eau brute.



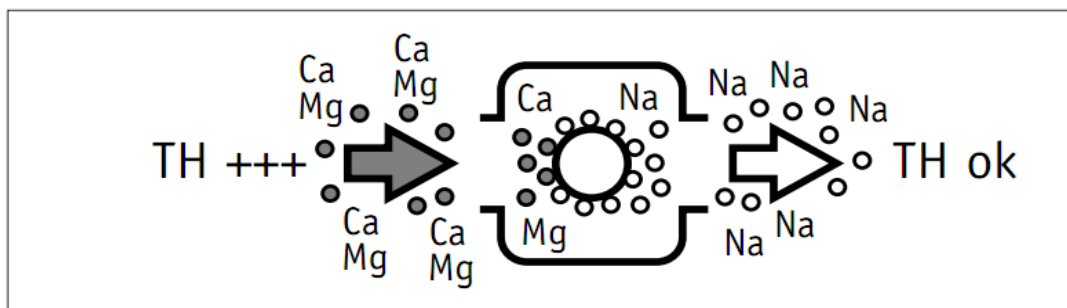
**Figure 4:** Résines utilisées dans le domaine de l'adoucissement des eaux ([www.google.com](http://www.google.com)).

Dans le cas d'une eau dure, deux résines peuvent être employées en fonction de la composition initiale de l'eau et des objectifs de traitement attendus.

**-Les résines d'adoucissement:** ces résines échangent leurs ions sodium ( $\text{Na}^+$ ), contre les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (Figure 5). Elles sont donc privilégiées dans le cas d'eaux peu chargées en ions sodium (SOFTAZUR<sup>™</sup>R).

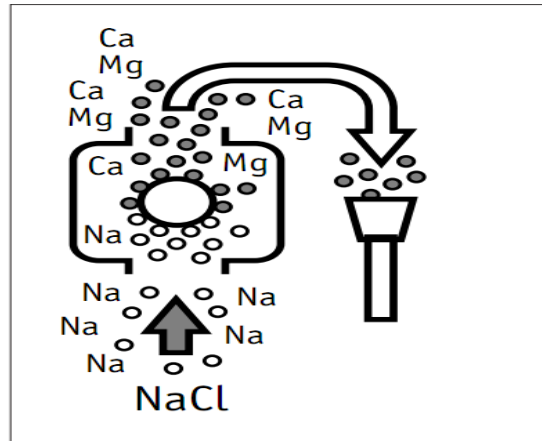
L'eau dure passe sur un lit de résine cationique, préalablement chargée de sodium ( $\text{Na}^+$ ) qui échange les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) responsables de la dureté de l'eau, contre des ions de sodium ( $\text{Na}^+$ ) (Memotec n°6, 2006).

**-Les résines de décarbonatation:** ces résines échangent leurs ions  $\text{H}^+$ , contre les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ . On parle de décarbonatation car la recharge d'ions  $\text{H}^+$  permet également de réduire les ions bicarbonates (SOFTAZUR<sup>™</sup>R).



**Figure 5:** Schématisation du principe d'adoucissement d'une eau par utilisation des résines ([www.comap.fr](http://www.comap.fr)).

Au fur et à mesure du passage de l'eau, les résines se saturent en calcium et en magnésium. L'adoucisseur nécessite alors une "régénération " de façon à recharger ses résines en ions sodium à partir d'une solution de chlorure de sodium ou saumure (sel et eau) qu'il puise dans le bac à sel (Figure 6).



**Figure 6:** Schématisation du principe d'adoucissement d'une eau par utilisation des résines ([www.comap.fr](http://www.comap.fr)).

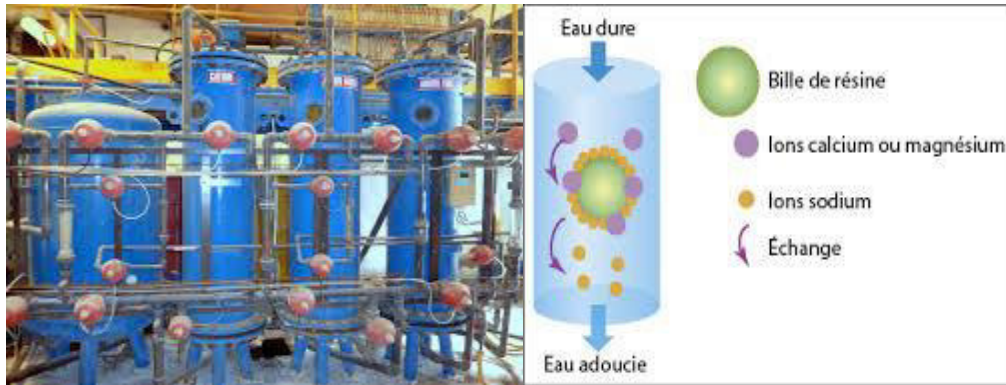
Bien que relativement facile à mettre en œuvre, car totalement automatisable, l'utilisation des résines comporte certains inconvénients, dont notamment (Memotec n°6, 2006):

- La nécessité de traiter une eau exempte de matières organique, car celles-ci peuvent entraver les échanges ioniques.
- Le risque de précipiter le fer et le manganèse, ce qui conduit à un empoisonnement des résines.
- Le devenir des éluas de régénération qui sont très concentrés.

### II.3.1.1 Adoucisseur d'eau à l'échelle industriel

L'adoucisseur est un appareil branché sur la canalisation d'arrivée d'eau (Figure 7) et comprend ([www.Lenntech.fr](http://www.Lenntech.fr)):

- Un ou plusieurs réservoirs contenant les résines.
- Un bac à sel où est élaborée la saumure.
- Une tête de contrôle commandant l'alternance automatique des phases d'adoucissement et de régénération.



**Figur 7:** Résines échangeuses d'ions utilisées dans l'adoucissement des eaux.  
(Google image)

### II.3.1.2 Avantages et inconvénients de l'utilisation d'une eau adoucie par résine

L'adoucisseur à résine protège les équipements contre les méfaits du tartre, prolonge la durée de vie des tuyaux des chaudières et de tout autre appareil. Par contre, l'eau adoucie favorise la corrosion des installations et n'est pas destinée pas pour un usage alimentaire et nécessite des contrôles réguliers (Diafi, 2015).

### II.3.2 Osmose inverse

Les procédés membranaires (ultrafiltration, microfiltration, la nano filtration, l'électrodialyse 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 (Belkcemi et al, 2003):

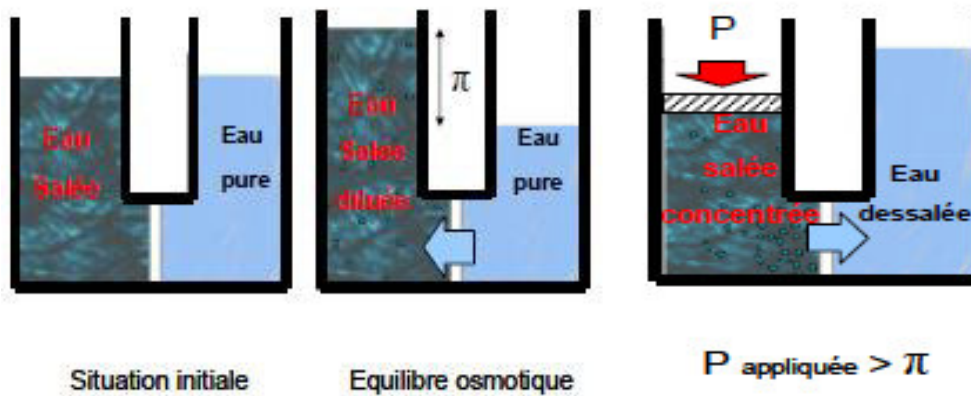
- Pas d'ajouts d'additifs chimiques et absence de boue.
- Réduction des frais d'exploitation (énergie, main d'œuvre).
- Encombrement réduit.
- Possibilité d'exploitation automatique des procédés.

Bien que ces technique aient connu un développement industriel, leur essor est ralenti par les phénomènes intrinsèques aux techniques membranaires, du cout élève des membranes, de la polarisation et du colmatage des membranes ([www.lenntech.fr](http://www.lenntech.fr)).

#### II.3.2.1 Osmose inverse

### II.3.2.1 Principe de l'osmose inverse

Lorsque l'on place une membrane semi-perméable entre deux compartiments remplis d'eau de concentration en sels dissous différents, les molécules d'eau ont tendance à migrer de l'eau la moins concentrée vers la plus concentrée de façon à diminuer sa salinité. Le phénomène est appelé « osmose directe ». Cette migration s'arrête lorsque la différence des niveaux des deux compartiments a atteint une valeur correspondant à la pression osmotique  $\pi$  (Figure 8). Pour réduire la concentration en sels dissous d'une eau il suffit de lui appliquer une pression supérieure à la pression osmotique afin de forcer les molécules d'eau à travers la membrane semi-perméable. Il s'agit alors d'osmose inverse (Figure 8) (Memotec N° 37, 2006).



**Figure 8:** Principe de l'osmose directe et de l'osmose inverse (Memotec N° 37, 2006).

Ce procédé abouti à de très bons résultats, car il peut éliminer de 95 à 99% des particules solides dissoutes et 99% des micro-organismes ([www.lenntech.fr](http://www.lenntech.fr)).

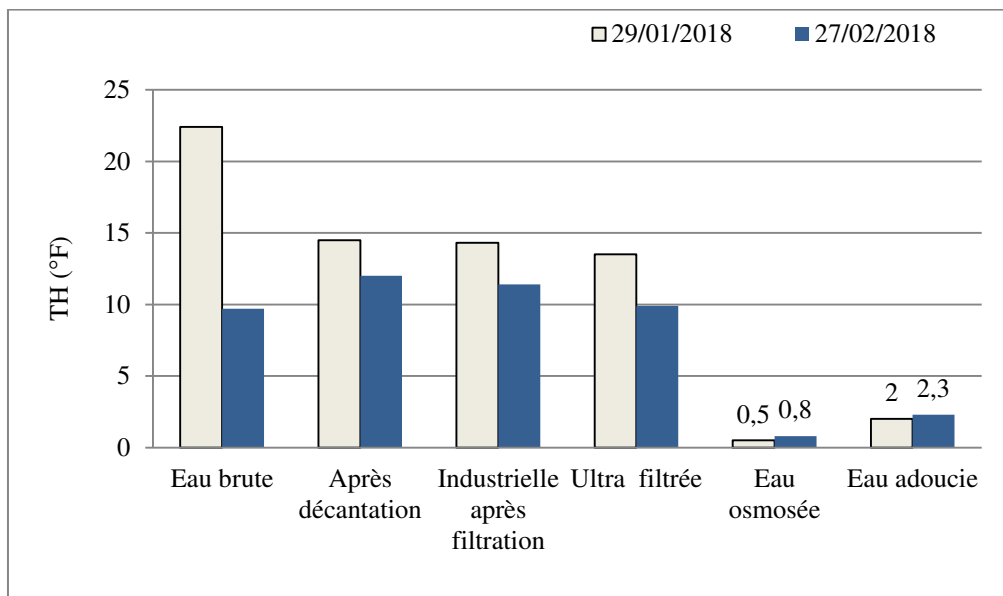
Selon Aouaichia (2018), au niveau du complexe sidérurgique d'El Hadjar– Annaba on dispose de deux installations d'adoucissement alimentant les chaudières:

- Installation d'osmose inverse alimentant la chaudière de la zone Est du complexe.
- Installation d'adoucissement par résine alimentant la chaudière de la zone Ouest du complexe.

Un suivi de l'évolution de certains paramètres de qualité de l'eau à différentes étapes des deux filières de traitement de l'eau de barrage afin d'avoir une idée sur l'efficacité de l'adoucissement par les deux techniques de traitement des eaux.

Les dépôts calcaire dans la chaudière, empêche le transfert thermique, et l'efficacité thermique. Dans les cas graves peut mener à la brûlure ou à la rupture des tuyaux de la chaudière ([www.lenntech.fr](http://www.lenntech.fr)).

Selon les résultats présentées sur la figure 9 il est évident que la dureté totale de l'eau ainsi que la concentration en ions calcium et magnésium a subit une diminution le long de la filière de traitement. A signaler également que l'élimination de la dureté est plus poussée par utilisation de l'osmose inverse ( $0,03 \text{ °F} < \text{TH} < 0,8 \text{ °F}$ ) que par utilisation de la résine ( $2 \text{ °F} < \text{TH} < 10,2 \text{ °F}$ ). De ce fait, il semble que l'adoucissement de l'eau par osmose inverse permet d'aboutir à une eau dont la dureté est conforme aux exigences d'une eau d'alimentation des chaudières ( $0,3 \text{ °F} < \text{TH} < 0,5 \text{ °F}$ ) (Aouaichia, 2018).



**Figure 9:** Evolution de la dureté totale (TH) de l'eau avant et après chaque étape de traitement (Aouaichia, 2018).

### II.3.3 Adoucisseur d'eau au CO<sub>2</sub>

C'est un adoucisseur qui permet, par injection de fines bulles de CO<sub>2</sub>, d'adoucir l'eau que l'on reçoit chez soi. Il permet ainsi de transformer l'eau courante du robinet ou de la douche en eau douce beaucoup moins agressive pour la peau et surtout sans calcaire.

Ce type d'adoucisseur consiste donc à injecter une grande quantité de CO<sub>2</sub> dans l'eau avant son utilisation dans la maison. Le CO<sub>2</sub> stocké dans de grosses bouteilles de 10 kg.

Il est composé en tout de 3 modules indépendantes. Il y a le module hydraulique qui comprend un compteur hydraulique mais également un manomètre. Il permet de favoriser l'ajout de CO<sub>2</sub> dans l'installation mais permet aussi de la sécuriser grandement.

Il y a aussi le module qui comprend la bouteille de CO<sub>2</sub>. Il permet de réguler la pression en CO<sub>2</sub> et permet de doser la quantité de CO<sub>2</sub> envoyé dans l'installation à un instant.

Il y a enfin un boîtier de contrôle qui gère l'ensemble de l'installation.

Ce type d'adoucisseur possède les avantages suivants:

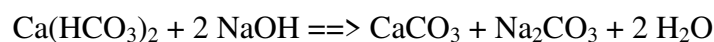
- Peu de place qu'il prend dans la maison. Même si il y a bien 3 modules bien distincts, il prend très peu de place dans la maison.

- Le rendement de cette installation reste très bon en comparaison avec les autres adoucisseurs d'eau car il ne coûte finalement que le rendement de la bouteille de CO<sub>2</sub> qui peut traiter jusqu'à 150 mètres cube d'eau ([www.adoucisseur-eau.org](http://www.adoucisseur-eau.org)).

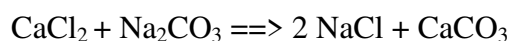
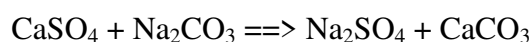
### II.3.4 Précipitation chimique

#### II.3.4.1 Utilisation de la soude caustique (NaOH)

Ce traitement permet d'éliminer les deux types de dureté (temporaire et permanente). La première réaction (réaction de base) consiste en un ajout de soude pour réagir avec les hydrogénocarbonates de calcium (Ouali, 2001):



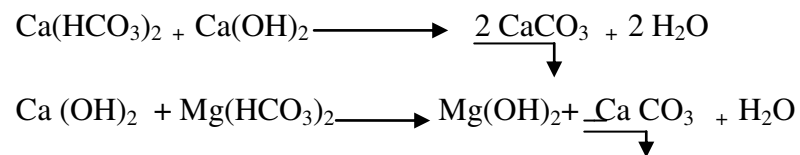
La précipitation du carbonate de calcium s'accompagne de la formation de carbonate de sodium qui réagira sur la dureté permanente suivant les réactions du paragraphe précédent:





### II.3.4.1 Utilisation de la chaux

Ce procédé permet la réduction de la dureté temporaire en transformant les bicarbonates en carbonates et la précipitation du calcium sous forme  $\text{CaCO}_3$  et le magnésium sous forme d'hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  suite à la augmentation du pH comme le montre les réactions chimiques suivantes :



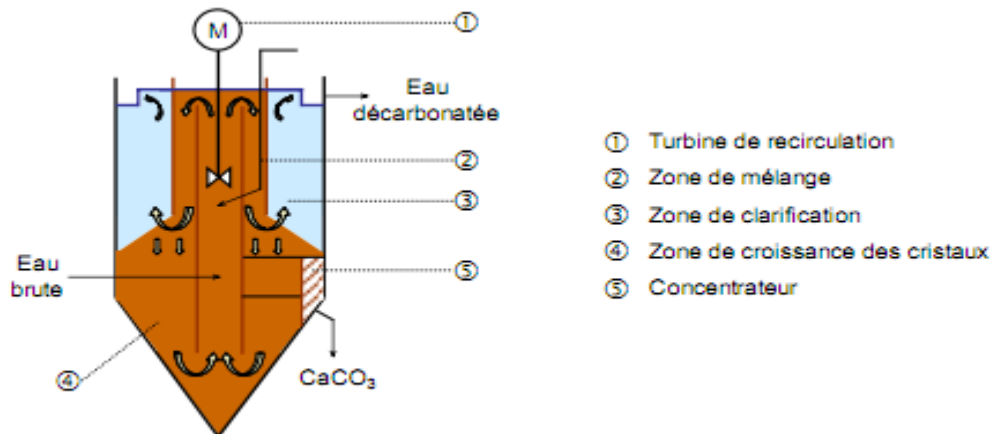
La cinétique de cette réaction étant relativement lente, le procédé est accélère soit par une recirculation des boues dans lesquelles se trouve des germes de cristallisation déjà formés. Pour cela l'appareil de décarbonatation ou d'adoucissement doit une zone où s'effectue le mélange de cristaux recirculés avec de l'eau à traitée additionnées de chaux (Figure 10) soit en ajoutant des cristaux sur lesquels le carbonate de calcium s'agglomère.

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.

L'emploi d'un coagulant ( $\text{FeCl}_3$ ) et /ou d'un flocculant permet d'améliorer la séparation des cristaux et de l'eau (Memotec N°6, 2006).

Cette technique présente un inconvénient, à savoir la quantité de boues produit, mais celles-ci sont facilement déshydratées .

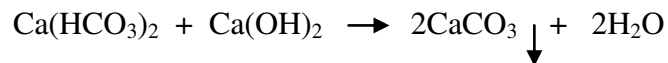
Cependant, il ne faut pas oublier les avantages de ce procédé: Facile à mettre en œuvre et ne nécessitant pas l'utilisation d'équipement spécifique.



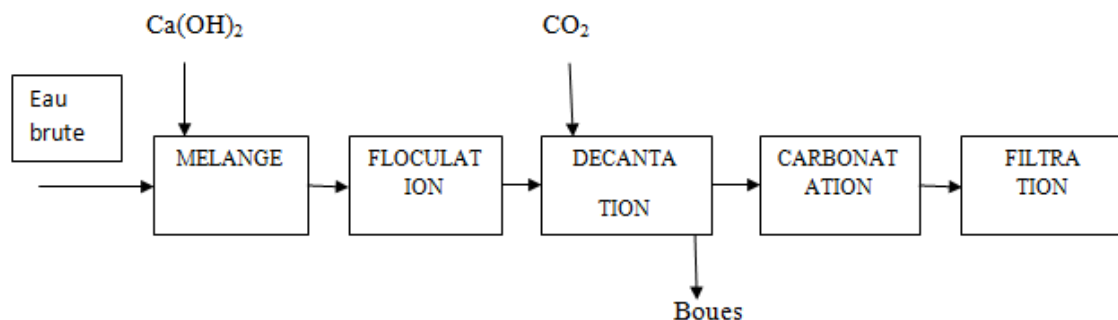
**Figure 10:** Principe de fonctionnement du système d'adoucissement par précipitation à la chaux (Memotec N°6, 2006).

#### II.3.4.1.1 Procédé par addition de chaux seulement

Le procédé par addition de chaux seulement, basé sur l'utilisation de la chaux et qui permet de réduire la concentration d'ions calcium d'une eau, n'exerce aucune influence sur la dureté non carbonatée et sur la dureté magnésienne. L'équation chimique qui régit la réaction sur laquelle repose ce procédé est la suivante (Desjardins, 1997):



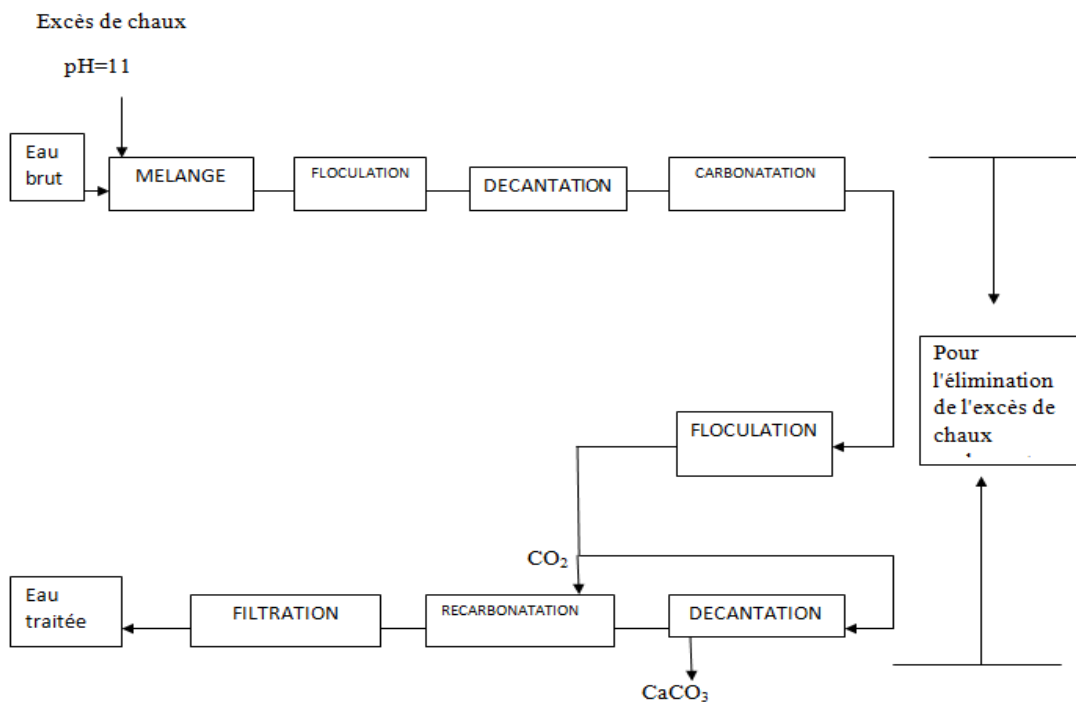
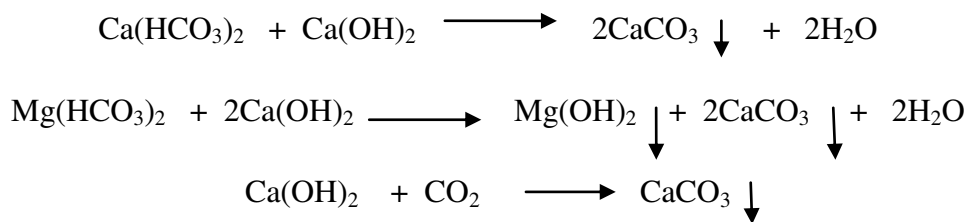
Le diagramme qui utilise ce procédé est présent par la figure 11.



**Figure 11:** Diagramme d'écoulement: procédé par addition de chaux seulement (Desjardins, 1997).

### II.3.4.1.2 Procédé par addition d'un excès de chaux

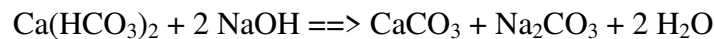
On utilise le procédé par addition d'un excès de chaux pour réduire la dureté des eaux affectées d'une dureté carbonatée associée à du calcium et à du magnésium (Figure 12). Lorsqu'on ajoute suffisamment de chaux, le magnésium se combine avec des hydroxydes pour former un précipité de  $Mg(OH)_2$  est d'environ 15 mg/L ( $CaCO_3$ ) lorsque le pH de l'eau est voisine de 9 l'addition d'un excès de chaux, puisqu'elle élève le pH à 11, permet de réduire la solubilité du  $Mg(OH)_2$  à environ 2,5 mg/L. En pratique, on considère que la concentration résiduelle de  $Mg(OH)_2$  est de 10mg/L. Après la précipitation du  $Mg(OH)_2$ , on doit procéder à une carbonatation pour obtenir la précipitation de l'excès de chaux. Les principales chimiques qui régissent les réactions sur lesquelles repose ce procédé sont les suivant (Desjardins, 1997):



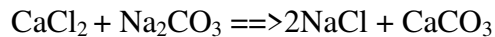
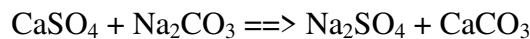
**Figure 12:** Diagramme d'écoulement : procédé par addition d'un excès de chaux. ( Desjardins, 1997).

### II.3.4.2 Utilisation de la soude caustique (NaOH)

Ce traitement permet d'éliminer les deux types de dureté (temporaire et permanente). La première réaction (réaction de base) consiste en un ajout de soude pour réagir avec les hydrogénocarbonates de calcium (Ouali, 2001):



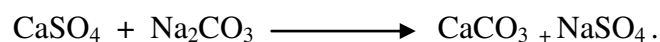
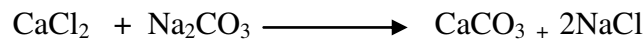
La précipitation du carbonate de calcium s'accompagne de la formation de carbonate de sodium qui réagira sur la dureté permanente suivant les réactions du paragraphe précédent:



### II.3.4.3 Utilisation du carbonate de sodium

Le carbonate de sodium est utilisé dans l'objectif de réduire la dureté non carbonatée, c'est à dire la précipitation du calcium et du magnésium liées aux  $\text{Cl}^-$  et aux  $\text{SO}_4^{2-}$ .

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



## II.4. Conclusion

Un paramètre essentiel de qualité qui provoque l'entartage est la dureté de l'eau qui nécessite un adoucissement préalable.

Nous avons donné une idée générale sur ce paramètre et fait une synthèse sur les procédés d'adoucissement des eaux, l'échange ionique par utilisation des résines et un procédé membranaire étant l'osmose inverse. Procédé de précipitation par utilisation de la chaux de la soude ou du carbonate de sodium. Il en ressort que chaque procédé a ces avantages et ces inconvénients. Le choix de la technique d'adoucissement la mieux adaptée à une eau donnée, se fait sur la base de nombreux critères, à savoir: la nature et composition de la dureté, le coût des réactifs et les conditions d'exploitation.

