



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. : HU38/2018

Présenté et soutenu par :
Aouaichia Abir

Le : lundi 25 juin 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

Jury :

M.	Rezeg Assia	MCA	Université de Biskra	Président
M.	Mimeche Leila	MCA	Université de Biskra	Examineur
M.	Youcef Leila	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Dédicace

A ma grand-mère que dieu est pitié de son âme et ma chère mère Fella affable, honorable, aimable :elle représente pour moi le symbole de la bonté par excellence , la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et prier pour moi .

A Monsieur Bensaadi Hocine pour ses sacrifices et ses encouragements et sa gentillesse sans égal et merci d'être toujours pour moi.

A mon père Hacene et mon grand-père Mohamed, ils sont toujours été présents pour les bons conseils et leur affection, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs Israa, Ranim, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mon seul cher frère Haithem pour leur appui et leur encouragement.

A ma proche amie Aissaoui Fatima pour leur encouragement et leur fidélité.

A mes cousines Chaima, Hadil , Ahlem , Omayma , Riheb , Wissal et Balkis.

A mes chères tontons Waheb, Mourad, Mounir et Amar.

A mes amis Hadjer, Marwa , Ibtissem , Bata , Souhir , Sabeah et Ahlem .

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS), à université de Biskra, sous la direction du professeur **GUERGAZI Saâdia** .

Que madame **GUERGAZI Saâdia**, professeur à l'université de Biskra, veuille accepter l'expression de mes sincères reconnaissances pour m'avoir accueilli au laboratoire.

Mes remerciements vont aussi à notre encadreur madame **YOUCEF Leila**, professeur à l'université de Biskra, département de génie civil et d'hydraulique, pour ses enseignements et l'aide très précieuse qu'elle m'a apporté.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie infiniment Messieurs : l'encadrant de stage **ABAINIA Mohamed** , chef service de dispatching fluides, **NEDJAIA Abed Al Waheb** et chef service de laboratoire **ZIAR Abed Al Hak**, Pour leur accueil au niveau de laboratoire et la zone Est , zone ouest et dispatching fluides de complexe sidérurgique d'El Hadjar et pour leur aide pour la réalisation de ce travail.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Résumé

L'objectif de cette étude a été de faire un suivi de la qualité des eaux avant et après traitement d'adoucissement (par utilisation des résines cationiques et par osmose inverse) des eaux destinées à l'alimentation des chaudières de production de la vapeur au niveau du complexe sidérurgique d'El Hadjar à Annaba.

Nous avons fait un suivi de la qualité physico-chimique y compris les paramètres de la dureté (TH, Ca^{2+} et Mg^{2+}) et de l'alcalinité (TAC) de l'eau de barrage de la Cheffia (ancien barrage de la Bou-Namoussa) au niveau des deux filières d'adoucissement des eaux de chaudières (échange ionique sur résine et osmose inverse).

Ce suivi nous a permis d'avoir une idée sur l'efficacité de l'adoucissement par les deux techniques de traitement des eaux. Les deux techniques ont permis de faire diminuer les paramètres de la minéralisation avec une efficacité variable selon l'élément minéral. La dureté totale de l'eau ainsi que la concentration en ions calcium et magnésium a subi 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 ($0,03 \text{ °F} < TH < 0,8 \text{ °F}$) que par utilisation de la résine ($2 \text{ °F} < TH < 10,2 \text{ °F}$). 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 ($0,3 \text{ °F} < TH < 0,5 \text{ °F}$).

Mots clés : Complexe El Hadjar, chaudières, Eau de barrage, Adoucissement, Résines, osmose inverse.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو اجراء متابعة لنوعية المياه قبل و بعد عملية إزالة عسر الماء (باستعمال الراتنجات الموجبة و الأسموز العكسي) لمياه موجهة لتغذية المراجل على مستوى مركب الحديد و الصلب الحجار بعناية. قمنا بمتابعة النوعية الفيزيائية و الكيميائية من ضمنها عناصر عسر الماء (TH, Ca^{2+}, Mg^{2+}) و القاعدية (TAC) لمياه سد الشفة (بوناموسة سابقا) على مستوى خطي إزالة عسر الماء التي تغذي المراجل (باستعمال الراتنجات الموجبة و الأسموز العكسي).

هذه المتابعة سمحت لنا بأخذ فكرة عن مدى فعالية إزالة عسر الماء بواسطة تقنيتي معالجة المياه. هتئين التقنيتين سمحتا بتخفيض معظم عناصر التمعدن بدرجة فعالية تختلف من عنصر معدني الى آخر. عسر الماء الكلي وكذا تركيز شوارد الكالسيوم و المغنيزيوم تعرضت للتناقص على طول مراحل عملية المعالجة. يجب أيضا التأكيد أن نسبة إزالة عسر الماء باستعمال الأسموز ($0,03 \text{ °F} < TH < 0,8 \text{ °F}$) العكسي أكبر من نسبة إزالتها باستعمال الراتنجات ($2 \text{ °F} < TH < 10,2 \text{ °F}$). و عليه يبدو ان إزالة عسر الماء بالأسموز العكسي يسمح بالحصول على مياه ذات عسر وفق متطلبات مياه تغذية المراجل ($0,3 \text{ °F} < TH < 0,5 \text{ °F}$).

الكلمات المفتاحية: مركب الحجار ، المراجل ، مياه السد ، إزالة عسر الماء ، الراتنجات، الأسموز العكسي.

Tableau 1 : Produits du complexe Sider El Hadjer.....	14
Tableau 2 : Relation entre la conductivité et la minéralisation des eaux naturelles.....	33
Tableau 3 : Classification de l'eau en fonction de la valeur de la dureté totale (TH (°F)).....	35

Figure 1 :	Résines échangeuses d'ions utilisées dans l'adoucissement des eaux...	8
Figure 2 :	Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.....	9
Figure 3 :	Image satellite du complexe.....	15
Figure 4 :	Racks conduites (vapeur – gaz – eau – air).....	16
Figure 5 :	Réserve de l'eau brute pour le complexe d'El Hadjar (Barrage de la Cheffia).....	17
Figure 6 :	Conduite d'arrivée d'eau.....	18
Figure 7 :	Salle EBS.....	18
Figure 8 :	La brise charge.....	19
Figure 9 :	Brise charge et décanteur.....	20
Figure 10 :	Le bac à chaux.....	20
Figure 11 :	Le bassin de coagulation floculation et de décantation.....	21
Figure 12 :	Eau débordante du décanteur.....	21
Figure 13 :	Filtre à sable au niveau du complexe.....	22
Figure 14 :	Salle de traitement des eaux.....	23
Figure 15 :	Intérieure de la salle de traitement.....	23
Figure 16 :	Installation de l'osmose inverse.....	24
Figure 17 :	Installation de l'adoucissement par résines.....	25
Figure 18 :	Chaudière zone Est.....	25
Figure 19 :	Points de prélèvement au cours des étapes d'adoucissement.....	26
Figure 20 :	pH mètre utilisé pour mesurer le pH des échantillons d'eau.....	27
Figure 21 :	Conductimètre utilisé au laboratoire.....	28
Figure 22 :	Spectrophotometre à flamme JENWAY/clinical PFP7.....	28
Figure 23 :	Détermination du TH par complexométrie à l'EDTA.....	29
Figure 24 :	Dosage du calcium par complexation à l'EDTA.....	30
Figure 25 :	Détermination de la concentration des chlorures (Cl ⁻).....	30
Figure 26 :	Photomètre PALINTEST.....	31
Figure 27 :	Spectrophotomètre multi paramètres HI 83200-02.....	31

Figure 28 :	Variation des paramètres de qualité de l'eau brute pendant la période de notre étude.....	32
Figure 29 :	Variation de la conductivité de l'eau brute pendant la période de prélèvement.....	33
Figure 30 :	Variation de la conductivité de l'eau brute (données du laboratoire SIDER).....	34
Figure 31 :	Variation des paramètres de la dureté et de l'alcalinité de l'eau brute pendant la période d'étude.....	35
Figure 32 :	Variation des paramètres de la dureté et de l'alcalinité de l'eau brute (données du laboratoire SIDER).....	36
Figure 33 :	Variation du pH de l'eau avant et après chaque étape de traitement	37
Figure 34 :	Evolution de la conductivité électrique avant et après chaque étape de traitement.....	38
Figure 35 :	Variation de l'alcalinité (TAC) avant et après chaque étape de traitement.....	39
Figure 36 :	Evolution de la dureté totale (TH) de l'eau avant et après chaque étape de traitement.....	40
Figure 37 :	Evolution de la teneur en Ca^{2+} avant et après chaque étape de traitement.....	41
Figure 38 :	Evolution de la teneur en Mg^{2+} avant et après chaque étape de traitement.....	42
Figure 39 :	Evolution de la teneur en SO_4^{-2} avant et après chaque étape de traitement.....	43
Figure 40 :	Evolution de la teneur en NO_2^- avant et après chaque étape de traitement.....	44
Figure 41 :	Evolution de la teneur en NO_2^- avant et après chaque étape de traitement.....	44
Figure 42 :	Evolution de la teneur en Fe^{+2} avant et après chaque étape de traitement.....	45
Figure 43 :	Evolution de la teneur des ions Na^+ avant et après chaque étape de traitement.....	46
Figure 44 :	Evolution de la teneur en K^+ avant et après chaque étape de traitement.....	47
Figure 45 :	Evolution de la teneur en Cl^- avant et après chaque étape de traitement.....	48

::

Sommaire

Introduction générale	1
Partie I : Etude bibliographique	
Chapitre I :Adoucissement des eaux	
2.1 Introduction.....	3
2.2 Dureté de l'eau.....	3
2.2.1 Définition.....	3
2.2.2 Types de la dureté.....	3
2.2.3 Les conséquences de la dureté d'une eau.....	3
2.2.3.1 Conséquences hydrauliques.....	3
2.2.3.2 Conséquences thermique.....	4
2.2.3.3 Conséquences technologiques.....	4
2.3 Techniques d'adoucissement.....	5
2.3.1 Précipitation chimique.....	5
2.3.1.1 Utilisation de la chaux.....	5
2.3.1.2 Utilisation du carbonate de sodium (Na_2CO_3).....	6
2.3.1.2 Utilisation de la soude caustique (NaOH).....	7
2.3.2 Les résines échangeuses d'ions.....	7
2.3.2.1 L'adoucisseur.....	8
2.3.3 Osmose Inverse.....	9
2.3.3.1. Principe d'osmose inverse.....	9
2.3.3.2 définition et types des membranes.....	9
2.3.3. Les modules d'osmose inverse.....	11
2.3.3.3 Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse.....	11
2.4. Conclusion.....	12
Chapitre II : Présentation du complexe d'El Hadjar Annaba	
2.1. Introduction.....	13
2.2. Historique.....	13
2.3. Situation géographique du complexe.....	14
2.4. Présentation de la division fluide (FLU).....	15
2.5. Etapes de production de l'eau industrielle.....	16
2.5.1. L'eau brute.....	16
2.5.2. Arrivée d'eau	17

2.5.3. Etape de la coagulation et floculation – décantation.....	19
2.5.4. Filtration sur sable.....	22
2.5.5. Adoucissement de l'eau destinée à alimenter les chaudières.....	23
2.6. Conclusion.....	25

Partie II : Etude Expérimentale

Chapitre I : Procédure expérimentale

1.1 Introduction.....	26
1.2 Prélèvement des échantillons d'eau.....	26
1.3 Méthodes de détermination des paramètres physico-chimiques des échantillons prélevés.....	27
1.3. 1 Détermination du pH.....	27
1.3. 2 Conductivité (CE).....	28
1.3. 3 Dosage du sodium (Na ⁺) et de potassium (K ⁺).....	28
1.3. 4 Titre alcalimétrique complet (T.A.C).....	28
1.3. 5 Titre hydrométrique (TH).....	29
1.3. 6 Dosage du calcium (Ca ²⁺).....	29
1.3. 7 Détermination de la concentration du Magnésium (Mg ⁺²).....	30
1.3. 8 Dosage des chlorures (Cl ⁻).....	30
1.3. 9 Dosage des sulfates (SO ₄ ⁻³).....	30
1.3. 10 Dosage de (PO ₄ ³⁻ , nitrites , Fer et nitrates).....	31
1.4. Conclusion.....	31

Chapitre II : Résultats du suivi des analyses physico chimiques au niveau des adoucisseurs

2.1. Introduction.....	32
2.2. Résultats et discussion.....	32
2.2.1. Variation de la qualité physico-chimique de l'eau brute	32
2.2.1.1. Conductivité électrique.....	33
2.2.1.2. Paramètres de la dureté et de l'alcalinité.....	34
2.2.2. Variation de la qualité physico –chimique avant et après traitement.....	36
2.2.2.1. Variation du pH de l'eau.....	36
2.2.2.2. Variation de la conductivité électrique de l'eau.....	38
2.2.2.3. Variation de titre alcalimétrique complet (TAC).....	39
2.2.2.4. Variation de la dureté totale (TH) de la concentration des ions Ca ²⁺ et Mg ²⁺ ...	40
2.2.2.5. Variation de la teneur des ions SO ₄ ⁻²	42

2.2.2.6. Variation de la teneur des ions nitrates et nitrites (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻).....	43
2.2.2.7. Variation de la teneur du Fer.....	44
2.2.2.8. Variation de la teneur des Na ⁺	45
2.2.2.9. Variation de la teneur des ions K ⁺	46
2.2.2.10. Variation de la teneur des ions Cl ⁻	47
2.2.3 Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49
Références.....	51

Introduction générale

Plusieurs procédés (physiques et chimiques) sont actuellement disponibles pour résoudre le problème d'entartrage. Les techniques d'adoucissement font appel à la précipitation chimique en utilisant la chaux, la soude ou le Na_2CO_3 soit par la combinaison entre ces réactifs (*Beaudry, 1984*). Parmi les procédés de d'adoucissement, on trouve également l'adoucissement sur résines échangeuses d'ions du type cationique carboxylique, régénérée par une solution de chlorure de sodium et l'utilisation des procédés membranaire tel que l'osmose inverse (*Beaudry, 1984*).

Le complexe sidérurgique d'El Hadjar traite d'importantes quantités d'eau quotidiennement, cette eau pompée du barrage de la Cheffia (ancien barrage de la Bou-Namoussa) doit suivre un cycle de traitement bien spécifique passant par les étapes classiques de clarification (Coagulation floculation, décantation et filtration) ensuite par une déminéralisation (échange d'ions sur résines ou osmose inverse). L'eau obtenue est soumise à la distillation dans les chaudières prévues pour la production de la vapeur.

L'eau arrivant à la chaudière doit impérativement être débarrassée au préalable de toutes les particules macroscopiques et microscopiques ainsi déminéralisées pour éviter l'entartrage et la corrosion au niveau des chaudières et assurer une longue durée du service des équipements (*Degrémont, 2005*).

L'entartrage et la corrosion des équipements font chuter et parfois dans une proportion désastreuse pour l'économie des activités du complexe, le niveau de production et provoquent même des arrêts momentanés ou prolongés de l'activité de complexe.

Ainsi l'objectif de notre étude est de faire un suivi de la qualité des eaux avant et après traitement d'adoucissement (par utilisation des résines cationiques et par osmose inverse) des eaux destinées à l'alimentation des chaudières de production de la vapeur au niveau du complexe. Ce suivi nous permettra de faire une comparaison entre l'efficacité de l'adoucissement des eaux par les deux procédés.

Ainsi notre étude sera présentée en deux parties :

Une étude bibliographique composée de deux chapitres. Dans le premier chapitre on donnera une idée sur le phénomène d'entartrage et de la corrosion ainsi que les techniques de

traitement des eaux permettant d'éviter ce problème (Décarbonatation par précipitation chimique, par échange d'ions et par utilisation des procédés membranaires).

Le deuxième chapitre sera consacré à la description du complexe d'El Hadjar en insistant sur son historique, sa situation géographique et la constitution de la division fluide et de la division de production de l'eau industrielle. L'ensemble des données présentées dans ce chapitre seront regroupées en faisant une enquête personnelle sur le lieu où la consultation des documents disponible dans le complexe pendant la durée allant du mois de décembre 2017 au mois de Février 2018.

Une étude expérimentale qui sera présentée en deux chapitres. Dans le premier chapitre nous décrirons la procédure expérimentale suivie pour la réalisation des prélèvements des échantillons d'eau au niveau de la station de traitement des eaux et pour la réalisation des analyses physico-chimiques de ces échantillons d'eau. Dans le deuxième chapitre, une présentation des résultats d'analyse et une discussion seront faites.

2.1 Introduction

Au cours de ce chapitre nous allons donner un aperçu général sur la définition de la dureté de l'eau, de l'entartrage et des procédés existants à l'échelle industriels dont l'objectif est l'adoucissement des eaux, ces procédés se base sur la précipitation chimique, l'échange ionique ou les procédés membranaires.

2.2 Dureté de l'eau

2.2.1 Définition

Une eau est dite « dure » lorsqu'elle est fortement chargée en ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). A l'inverse, elle est dite « douce » lorsqu'elle contient peu de ces ions. Cette dureté s'exprime en degrés français ($^{\circ}\text{F}$), un degré français de dureté correspondant à une teneur en calcium et magnésium équivalente à 10 mg de carbonate de calcium (CaCO_3) par litre. La dureté de l'eau résulte de son contact avec les formations rocheuses lors de son passage dans le sous-sol. Elle varie donc en fonction de la nature de celui-ci et de la région d'où provient l'eau (*Tardat- Hery et Beaudry, 1984*).

2.2.2 Types de la dureté

- La dureté totale de l'eau (ou Titre Hydrotrimétrique, TH) exprime la minéralisation en sels d'acides faibles et forts, c'est-à-dire les carbonates, bicarbonates, sulfates et chlorures de calcium et magnésium.
- La dureté carbonatée exprime les sels d'acides faibles et les bases : carbonates et bicarbonates de calcium et magnésium.

2.2.3 Les conséquences de la dureté d'une eau

2.2.3.1 Conséquences hydrauliques

Lorsque l'eau est utilisée en distribution ou pour le refroidissement d'unités diverses, la moindre élévation de température provoque la décomposition de ces sels avec une formation, en particulier, de carbonate de calcium insoluble, générateur de dépôts, d'entartrage et finalement d'obstruction des tuyauteries.

En réduisant les sections et en dégradant l'état des surfaces, ces tartres fortement adhérents, augmentent, à débit constant, les pertes de charge et par conséquent les dépenses énergétiques liées à la circulation des fluides. Déjà gênantes dans le cas de tuyauteries démontables et nettoyables, ces formations deviennent catastrophiques quand elles affectent les conduites enterrées (*Bannoud, 1993*).

L'enquête sur site, a montré, qu'en dix ans de mise en service, les diamètres des conduites ont été réduits à 50%, de 400 mm à la pose à 200 mm après 10 ans. La masse de tartre produite est estimée à 1,58 g/L, soit 2243 tonnes annuelle pour une consommation d'eau de 14,2 millions de m³/an. La vitesse moyenne d'entartrage est de 1,1cm/an, avec un maximum de 1,4 cm/an enregistrée dans les tronçons situés au premier kilomètre de la source d'eau où la température de l'eau est proche de 60 °C (*Messaitfa et al, 2004*).

2.2.3.2 Conséquences thermiques

En chaudière, dans le cas d'un traitement de l'eau d'alimentation par simple adoucissement, les bicarbonates de sodium de l'eau permutée se décomposent en carbonate et en hydroxyde, d'où l'augmentation très rapide de l'alcalinité et par suite des purges de déconcentration, formation considérable d'une quantité d'acide carbonique qui attaque tous les circuits de vapeur et d'eau condensée, provoquant leur mise hors d'usage au bout d'un très bref laps de temps (*Tardat- Henry, 1984 ; Desjardins, 1997*).

Tout dépôt au contact d'une paroi au travers laquelle se fait un échange thermique mène à une résistance de transfert. Si on veut maintenir constant le flux thermique à travers cette paroi il est donc nécessaire d'augmenter la différence de température entre la surface interne entartrée et les parois métallique externe. C'est ainsi que pour une chaudière fonctionnant à 25 bars avec un taux de transmission de 100,000 cal/m².h, on évalue le surchauffe du métal à 200 °C pour une épaisseur de 3,5 mm de tartre sulfaté et à 400 °C pour une épaisseur de 1 mm de tartre siliceux (*Roques, 1990*).

2.2.3.3 Conséquences technologiques

On peut citer l'alourdissement des structures porteuses des tours de refroidissement, réservoirs, mais aussi l'alourdissement des équipements internes qui rendent plus difficile leur manutention. L'entartrage peut avoir pour conséquences technologiques (*Degrémont, 1989*) :

- Blocage des organes de manœuvre des robinetteries,
- Impossibilité d'obtenir l'étanchéité siège - clapet des robinetteries,
- Blocage des soupapes de sécurité,
- Diminution du volume utile des réservoirs,
- Dégradations des états de surface des appareils sanitaires,
- Entraînement de particules en suspension qui peuvent être abrasives,

2.3 Techniques d'adoucissement

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*).

2.3.1 Précipitation chimique

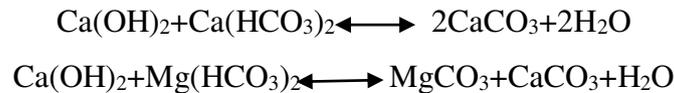
2.3.1.1 Utilisation de la chaux

L'adoucissement à la chaux peut également contribuer à l'élimination de la silice en utilisant généralement un procédé plus ou moins chaud la silice est absorbée sur magnésie précipitée au cours de la réaction de précipitation à la chaux ou en utilisant la dolomite comme agent d'adoucissement (*Degrémont, 1989*).

Ce procédé est employé lorsque la dureté carbonatée est due essentiellement aux ions Ca^{2+} , pratiquement, l'addition de chaux entraîne la précipitation du CaCO_3 (chaux seule) et $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (chaux en excès), suite à l'augmentation du pH.

La cinétique de cette réaction étant relativement lente, le procédé est accéléré soit par une recirculation des boues dans lesquelles se trouvent des germes de circulation déjà formés, soit

en ajoutant des cristaux aux lesquelles la carbonate de calcium s'agglomère (sable par exemple).

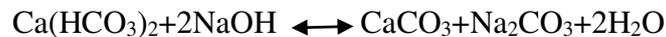


L'addition de chaux nécessite de prendre plusieurs précautions pour sa mise en œuvre. L'eau ne doit pas contenir de colloïdes en suspensions pouvant gêner la cristallisation. Il est donc parfois nécessaire d'ajouter un coagulant. La décarbonatation doit comprendre une zone de clarification appropriée pour séparer les cristaux de CaCO_3 de l'eau.

Cette technique présente un inconvénient, à savoir la quantité de boues produites, mais celles-ci sont facilement déshydratées. Cependant, il ne faut pas oublier les avantages de ce procédé : aisé à mettre en œuvre et ne nécessitant pas l'utilisation d'équipements spécifiques. De plus, il n'est pas contraignant en exploitation si ce n'est les inconvénients inhérents à l'emploi de la chaux (*Degrémont, 1989*).

2.3.1.2 Utilisation du carbonate de sodium (Na_2CO_3)

La précipitation du carbonate de calcium par la soude est régie par la réaction suivante :



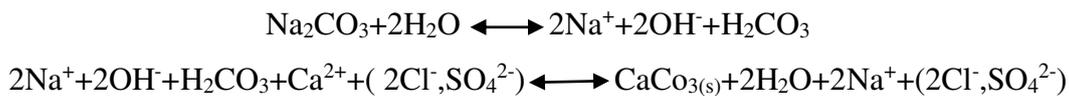
On constate la formation de carbonate de sodium qui réagira sur la dureté permanente, comme indiqué précédemment. L'introduction de micro-sable (0,2 à 0,4 mm) dans l'eau à traiter additionnée de chaux, permet d'obtenir un effet catalytique, c'est-à-dire que le carbonate de calcium précipite en se cristallisant à la surface des grains de sable pour obtenir des billes de 1 à 2 mm, à comparer à celui des cristaux de décarbonatation à la chaux qui n'excède pas 100 à 200 μm . Grâce au lestage des billes et à leur diamètre, on peut atteindre des vitesses de l'ordre de 80 à 120 m/h dans la zone de clarification. Les billes, dès l'obtention du diamètre optimum, sont évacuées en partie basse. Leur eau interstitielle est facilement éliminable par simple égouttage.

L'application de ce procédé est limitée par présence de composés ne cristallisant pas (colloïdes, fer, magnésie) et ne doit concerner que la précipitation du CaCO_3 , pour éviter la précipitation de la magnésie, le titre hydrométrique magnésien doit être faible. De plus ce procédé ne convient pas aux eaux présentant une concentration élevée en sodium, car il y

aurait alors des risques de dépassement de la référence de qualité (200mg/l), fixée par le code de la santé publique (*Memotec N°6, 2006*).

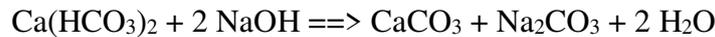
Le décarbonatation catalytique à la soude nécessite des réglages fins pour maîtriser la taille des billes, et donc des purges, le dosage de la soude, l'alimentation en micro-sable, ainsi que la vitesse de fluidisation (*Memotec N°6, 2006*).

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

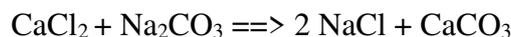
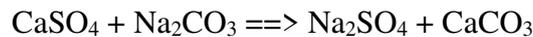


2.3.1.2 Utilisation de la soude caustique (NaOH)

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 :



2.3.2 Les résines échangeuses d'ions

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, 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.

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 (Na⁺), contre les ions calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺). Elles sont donc privilégiées dans le cas d'eaux peu chargées en ions sodium. [SOFTAZUR TMR]

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

-Les résines de décarbonatation : ces résines échangent leurs ions H^+ , contre les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ . On parle de décarbonatation car le recharge d'ions H^+ permet également de réduire les ions bicarbonates (*SOFTAZUR Tm R*).

Les substances échangeuse d'ions les plus utilisées sont connues sous le nom de résines. Il y a deux catégories de résines: les résines de type **gel** et les résines **macroporeuses**. Leur structure de base est identique, elle est obtenue dans les deux cas par copolymérisation. La différence entre les deux types de résines réside dans leur porosité.

2.3.2.1 L'adoucisseur

L'adoucisseur est un appareil branché sur la canalisation d'arrivée d'eau (Figure 1) et comprend (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.

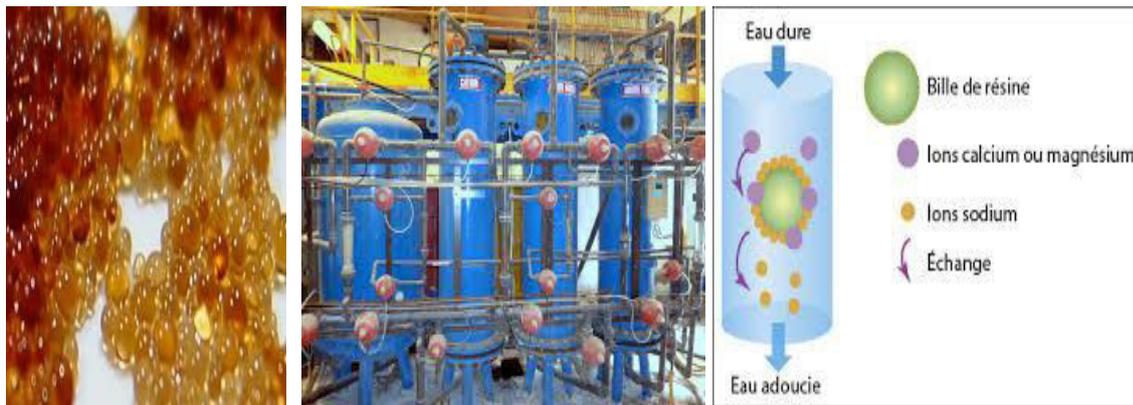


Figure 1 : Résines échangeuses d'ions utilisées dans l'adoucissement des eaux (Google image)

2.3.3 Osmose Inverse

2.3.3.1. Principe d'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 π (Figure 2). 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 2) (Memotech N° 37, 2006)

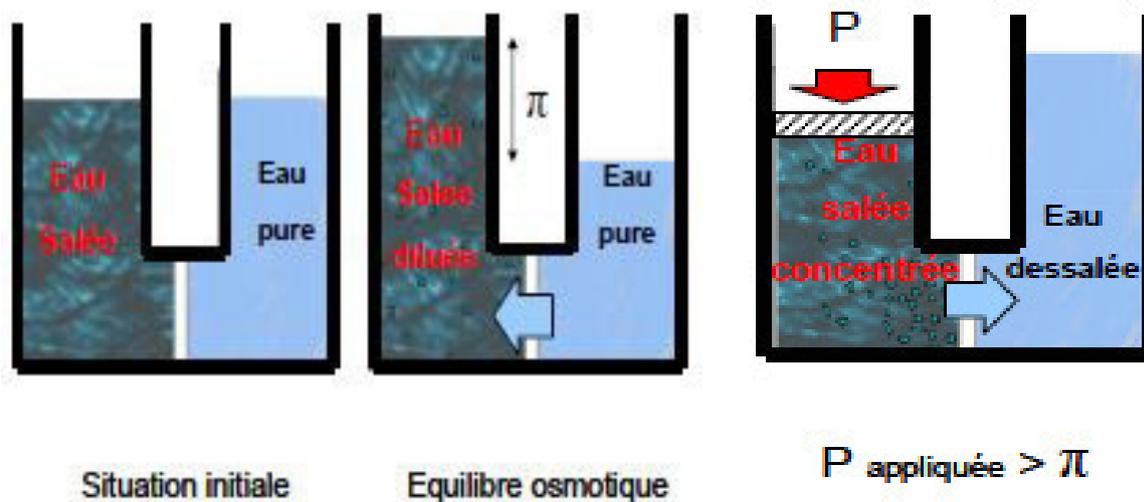


Figure 2: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

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).

2.3.3.2 définition et types des membranes

Une membrane peut être définie comme étant une couche mince de matière, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert (Tamas, 2004).

Une membranes semi- sélectives est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en interdisant d'autres, ou plus généralement, en favorisant certains par rapport à d'autres (*Baker, 2004*).

Les membranes d'osmose inverse sont composées d'une couche mince (couche active : peau) de faible épaisseur comprise entre 0,1 μm et 1,5 μm , composant des micropores. Cette couche active est supportée par une ou plusieurs couches, à la fois plus poreuses et mécaniquement plus résistantes (*Audinos, 2000*).

Parmi les membranes d'osmose inverse utilisées, on peut citer :

a) Membranes organiques

Les premières membranes organiques ont été réalisées à partir de dérivés cellulosiques et de polyamides aromatiques. La trop grande sensibilité de ces matières vis-à-vis des bactéries leur a fait préférer les matériaux suivants : Acétate de cellulose, Polysulfone, Aramide, Polyacrylonitrile, Polypropylène. Leur méthode de fabrication est basée sur un mélange de polymère et de solvant. L'évaporation de ce collodion permet de distinguer des zones riches en polymère donnant la membrane et des zones creuses donnant les pores. Les membranes organiques sont assez sensibles au pH acide et aux fortes températures (*Lachhabe, 2004*).

b) Membranes minérales ou inorganiques

Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux, principalement les matières céramiques, le métal fritté et le verre. Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique (*Arzate, 2008*).

c) Membranes composites

Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état (*Pontié, 2008*).

Elles peuvent être organiques, organo-minérales ou minérales.

d) Membranes à charge électrique

Ces membranes peuvent être denses ou poreuses. Les parois des pores sont chargées d'ions positifs ou négatifs. Les membranes chargées positivement favorisent le passage de cations, celles chargées négativement favorisent le passage d'anions. Donc la séparation avec des

membranes chargées est basée principalement sur la répulsion d'ions de même charge, mais aussi par la taille des pores. La séparation est contrôlée par la charge et la concentration des ions (*Bouranene, 2008*).

2.3.3. Les modules d'osmose inverse

Les appareils unitaires de séparation, mettant en œuvre des membranes, sont appelés «cartouche » ou « modules ». Leur conception est différente suivant la forme de la Membrane et doit, à la fois, assurer une circulation suffisante à la surface de celle-ci et présenter une bonne compacité. Ils sont aussi conçus en fonction de l'application à venir et doivent satisfaire aux facilités d'exploitation (montage, démontage, nettoyage) (*Lachhabe, 2004*).

Il y a 4 types de modules sont commercialisés (<http://www.hydranet.net>):

- **Les modules tubulaires :** Technologie simple, facile d'utilisation et de nettoyage, grands consommateurs d'énergie pour une très faible surface d'échange par unité de volume (compacité réduite).
- **Les modules fibres creuses :** Faisceau de fibres creuses de diamètre inférieur au micromètre, forte densité d'écoulement par module.
- **Les modules plans :** Simples, les membranes sont empilées en mille-feuilles séparés par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides.
- **Les modules spirales :** Une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multi couches où le permets s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

2.3.3.3 Les avantages et inconvénients de l'osmose inverse

a) Les avantages (Site dessalement)

- Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%).
- Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5Kwh/m3) .
- Une flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau .
- Un coût d'investissement relativement bas.
- Une durée de mise en œuvre réduite.
- Après l'osmose inverse on obtient une eau très pure possédant des mesures bio

électroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles :

- pH légèrement acide de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibre de pH du sang généralement trop toxique).
- Résistivité élevée 20000 à 30000 ohms, ce qui permet une parfaite élimination des toxines par les reins .

b) **Les inconvénients**

Malgré les avantages, il y a aussi des inconvénients comme:

Les inconvénients de l'osmose inverse sont (*Wikipédia*) :

- Le coût des membranes qui se dégradent (notamment à cause des phénomènes de colmatage), lors du dimensionnement d'une installation d'osmose inverse, on tient compte en moyenne d'une durée de vie des membranes de l'ordre de 3 ans. Le coût des membranes tend à diminuer.
- L'énergie consommée par la pompe de gavage.
- Les pertes en eau. En effet, le concentrat qui contient tous les sels qui n'ont pas traversé la ou les membranes, représente environ 25 % du débit entrant, pour des installations industrielles. Cette eau contient alors trop de sel, le taux d'eau rejetée oscille entre 3 l d'eau pour 1 l d'eau pure et cela peut monter à 15 l pour 1 l d'eau selon la pression osmotique

2.4. Conclusion

La vaporisation de l'eau dans la chaudière et dans les tubes entraîne nécessairement la précipitation des sels que peut contenir l'eau d'alimentation de la chaudière. L'entartrage peut se propager dans les conduites de vapeur et dans les dispositifs qui y sont exposés. Un paramètre essentiel de qualité qui provoque l'entartrage 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, procédé de précipitation par utilisation de la chaux de la soude ou du carbonate de sodium ainsi que l'échange ionique par utilisation des résines et un procédé membranaire étant l'osmose inverse. 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, la coûts des réactifs et les conditions d'exploitation.

2.1. Introduction

Le complexe sidérurgique (l'entreprise Arcelor-Métal d'Annaba) constitue une des plus importantes Entreprises d'AFRIQUE dans le secteur de la sidérurgie, au plan national c'est une des entreprises phares de l'Est algérien.

Dans ce chapitre il nous a été indispensable de donner une idée sur le complexe d'El Hadjar en insistant sur son historique, sa situation géographique et la constitution de la division fluide et de la division de production de l'eau industrielle. L'ensemble des données présentées dans ce chapitre sont regroupées en faisant une enquête personnelle sur le lieu ou la consultation des documents disponible dans le complexe pendant la durée allant du mois de décembre 2017 au mois de Mars 2018.

2.2. Historique

L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée par la société bônoise (SBS) en 1959 suite à la mise en application du plan de Constantine.

Après l'indépendance, celle-ci devient SNS et ceci dans le cadre de la récupération des richesses du pays.

La SNS a bénéficié des différents plans de développement et devient enfin « Entreprise Nationale de Sidérurgie », suite à la restructuration des sociétés nationales.

L'E.N.S a développé en 1969 un pôle sidérurgique à El-Hadjar pouvant répondre à une gamme de produit très variés et enfin elle est devenue SIDER. Le complexe intégré d'El-Hadjar depuis 1969 avait un domaine d'activités pour se développer au fil des années afin de répondre à la demande sans cesse croissante des produits sidérurgiques pour la réalisation de plusieurs plans de développement (unités pétrolières etc.).

Après avoir passé la dure phase de la sidérurgie en Algérie, le complexe entre dans la phase finale, celle de l'extension de la capacité de production de 400 000 tonnes/an à 2000 000 de tonnes/an.

Le complexe d'EL-HADJAR, principal support économique de notre pays dans l'industrie lourde, occupe l'un des premiers rangs des facteurs de développement, sa mission principale consiste à valoriser le minerai de fer qui se trouve à L'OUENZA situé à 150 km du complexe.

Le produit sidérurgique aussi bien que le semi-produit sont évacués par voie ferrée vers tous le pays et vers le port pour l'exportation. Ces produits sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Produits du complexe Sider El Hadjer

Installation	Produit
Cokerie	Coke
HF1 et HF2	Fonte
ACO1	Brames
Aciérie électrique «ACE»	Lingots
Laminoir à chaud «LAC»	Bobines , Ebauches
Laminoir à froid «LAF»	Bobines , Tôles
Ligne de galvanisation à chaud	Bobines galvanisées, Tôles galvanisées
Laminoir à fil rond «LFR»	Fil machine
Laminoir à rond à béton «LRB»	Rond à béton

Le progrès et l'évolution de l'industrie à l'échelle mondiale aussi la mondialisation et la fusion des petites entreprises en un regroupement à intérêt, ont eu un effet néfaste et ont causé beaucoup de pertes aux petites industries. Ceci a poussé l'Etat à opter pour le partenariat.

Ainsi on enregistre la venue d'un géant de la sidérurgie mondiale, l'entreprise ISPAT comme partenaire de SIDER puis en 2001 l'arrivée sider El-Hadjar société intégré dont 30% des actions détenues par SIDER et 70% par holding indien MITTAL avec une capacité de production: 1,8 million de tonnes de produits sidérurgiques par ans.

2.3. Situation géographique du complexe

Le complexe sidérurgique sider El-Hadjar Annaba est situé à l'est du pays dans la zone industrielle d'Annaba et à 15 km au sud de la ville (Figure 3). Il occupe une superficie de 800Ha. À l'intérieur, il y a près de 60 km de voies ferrées permettant la circulation libre de la matière et près de 100 km de route permettant la circulation des engins.

L'usine est alimentée en minerai par voie ferrée à partir des mines de l'Ouenza et Boukhara (au Sud Est du pays à 15 Km du complexe) et en charbon à partir du port de Annaba auquel il

est relié par une voie ferrée double. Les produits du complexe sont évacués par voie ferrée vers tous le pays et vers le port pour l'exportation.



Figure 3 : Image satellite du complexe

2.4. Présentation de la division fluide (FLU)

La division fluide du complexe s'occupe principalement de la distribution des différents fluides à travers le complexe et d'assurer la protection à partir d'un réseau de conduite (le rack (Figure 4)) tout diamètre confondu qui s'étend à plus de 25 Km.

Ce service nous assure la fourniture de plusieurs fluides qu'on site ci-dessous

- La distribution et la protection de l'eau industrielle.
- La distribution et la protection de l'air service.
- La distribution et la protection de la vapeur saturée.
- La distribution et la protection du gaz naturel.
- La distribution et la protection de l'eau potable.



Figure 4: Racks conduites (vapeur – gaz – eau – air).

2.5. Etapes de production de l'eau industrielle

L'eau industrielle est l'eau utilisée pour produire la vapeur de refroidissement au niveau des chaudières. Dans les paragraphes qui suivent on va décrire le processus de convection de l'eau brute en eau industrielle.

2.5.1. L'eau brute

Le réseau d'eau qui alimente l'usine provient du barrage de la Cheffia (ancien barrage de la Bou-Namoussa) (Figure 5) vers la station de pompage qui se trouve a SIDI AMAR, cette dernière alimente l'usine gravitairement avec des conduites de 1050 mm et une pression de 4 bars et un débit de 2000m³/heure.



Figure 6 : Conduite d'arrivée d'eau



Figure 7 : Salle EBS

L'eau qui arrive dans cette conduite arrive avec une grande pression donc elle se dirige directement dans un bassin amortissant appelé aussi le brise charge (Figure 8). Le rôle de ce dernier est de casser les grande charge de l'eau qui arrive du barrage et essayer de les freiné.



Figure 8 : La brise charge

2.5.3. Etape de la coagulation et floculation - décantation

La **coagulation** est la déstabilisation de particules colloïdales par addition d'un réactif chimique appelé coagulant (Beaudry, 1984)

La **Floculation** est l'agglomération de particules déstabilisées en microfloc et ensuite en flocons plus volumineux que l'on appelle flocs. On peut rajouter un autre réactif appelé floculant ou adjuvant de floculation pour faciliter la formation de flocs (Beaudry, 1984).

La décantation : est une technique de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-floculation. Cette technique est très répandue dans les usines d'épuration et de traitement des eaux (Beaudry, 1984).

Au niveau de la station de traitement des eaux, l'eau passe dans le décanteur (figure 9) à travers une conduite souterraine. On ajoute des produits chimiques (Figure 10) tels que des adjuvants (le polymère SP6), de la chaux et du chlorure ferrique au niveau de la brise charge pour purifier l'eau dans le but d'avoir une eau industrielle de très bonne qualité.



Figure 9: Brise charge et décanteur



Figure 10 : Le bac à chaux

Donc pour réaliser la coagulation floculation puis la décantation des floccs formés, on utilise un bassin circulaire qu'on appelle le décanteur (Figure 11) qui reçoit les eaux de la brise charge. Cet ouvrage possède un bras pivotant, et ayant un fond conique. Le bras rotatif est muni d'un racleur qui pousse la boue dans le cône positionné au fond c'est là où se passe la coagulation-floculation et on sépare l'eau traité de la boue qui s'échappe d'un autre conduit.



Figure 11 : Le bassin de coagulation floculation et de décantation

Après avoir été traité, l'eau déborde (Figure 12) dans un canal qui va suivre un autre traitement étant la filtration pour être de bonne qualité possible.



Figure12 : Eau débordante du décanteur

2.5.4. Filtration sur sable

La filtration lente consiste à faire passer l'eau à traiter à travers un lit de matériau filtrant.. Le matériau filtrant le plus utilisé est le sable. Au cours de ce passage, la qualité de l'eau s'améliore considérablement par l'élimination de matières en suspension et colloïdales (Beaudry, 1984).

Donc l'eau qui déborde du decanteur se dirige vers des bassins de filtration sur sable (Figure 13) afin d'obtenir une eau industrielle exempt de matières en suspensions.



Figure 13 : Filtre à sable au niveau du complexe

Après que l'eau soit filtrée au sable elle se dirige vers la salle de traitement des eaux. Cette salle contient des bâteaux à eau souterraines ou est stockée de l'eau industrielle qui sort des bassins à sable (Figure 14). Au niveau de cette salle il y a différentes pompes ou chacune a un rôle bien précis, dont les pompes de lavage qui servent à laver les filtres (Figure 15).



Figure14 : Salle de traitement des eaux



Figure 15 : Intérieure de la salle de traitement

2.5.5. Adoucissement de l'eau destinée à alimenter les chaudières

Au niveau du complexe on dispose de deux installations d'adoucissement alimentant les chaudières :

- Installation d'osmose inverse alimentant la chaudière de la zone Est du complexe (Figure 16).
- Installation d'adoucissement par résine alimentant la chaudière de la zone Ouest du complexe (Figure 17).

A noter qu'au niveau du complexe on n'a pas pu avoir des détails sur les caractéristiques de l'osmoseur ou de la résine

Ce type de traitement de l'eau permettra d'éviter le problème d'entartrage, une fois utilisée dans les chaudières.

La chaudière est un dispositif qui permet de chauffer de l'eau afin de produire de la vapeur sous pression, cette dernière va être utilisée sous différent domaine dans le complexe. :

- Echappement des huiles
- Sèche air
- Refroidissement haute température > 1600 °C
- Compression pour assurer une fermeture ou ouverture des mécanismes à l'aide de la pression de la vapeur
- Chauffer l'eau dans les douches des ouvriers.

A titre d'exemple, dans la **zone Est** , il y a 2 chaudières :

Chaudière n°1 : de marque **bobcoke wanson** . avec une capacité de 20T/H.

Chaudière n°2: celle qu'on peut voir sur la figure 18. Les caractéristiques de cette chaudière sont :

- Température d'alimentation : 105°C
- Température maximale du fluide : 201°C
- Débit : 15T/H
- Pression maximale : 15 BAR



Figure 16 : Installation de l'osmose inverse



Figure 17 : Installation de l'adoucissement par résines



Figure 18 : Chaudière zone Est

2.6. Conclusion

L'étude descriptive réalisée dans ce chapitre, nous a permis de donner une idée sur le grand complexe de sidérurgie d'El Hadjar situé à Annaba à l'Est de l'Algérie.

Au niveau du complexe il existe plusieurs ateliers de production sidérurgique. Cette production fait appel à une filière fluide. Nous avons donné une idée sur la production de l'eau qui va être utilisée pour la production de la vapeur d'eau de refroidissement au niveau des chaudières. Les étapes de production de cette eau seront achevées par un système d'adoucissement par osmose inverse ou par utilisation des résines.

1.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous présenterons la procédure expérimentale suivie lors de la réalisation des essais concernant notre étude. Nous décrirons la position des points de prélèvement dans le schéma de déroulement du procédé d'adoucissement des eaux de barrage de la Cheffia (ancien barrage de la Bou-Namoussa) (wilaya Taref). Une idée détaillée sera exposée sur les méthodes de dosage des paramètres physico-chimiques des échantillons prélevés.

1.2 Prélèvement des échantillons d'eau

Afin de suivre la performance de l'adoucissement de l'eau du barrage de la Cheffia (ancien barrage de la Bou-Namoussa) par osmose inverse d'une part et par résine d'autre part, nous avons suivi la qualité de l'eau brute et de l'eau traitée après plusieurs étapes de traitements (avant et après adoucissement) (Figure 19).

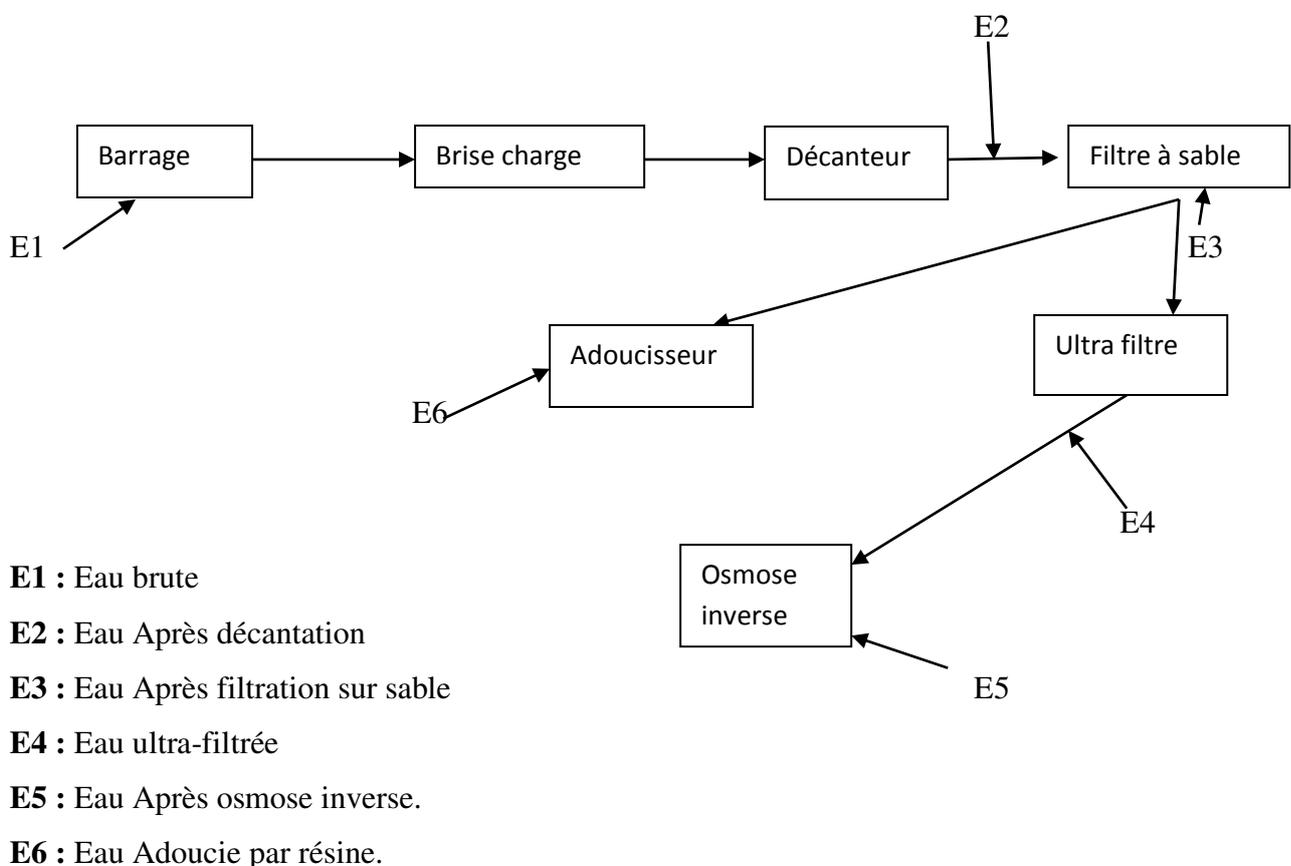


Figure 19: Points de prélèvement au cours des étapes d'adoucissement

Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en plastique des eaux minérales de 1,5 L rincées par l'eau traitée puis remplis jusqu'au bout. Le bouchon est placé de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport.

Dans chaque point de prélèvement, nous avons réalisé un échantillonnage en trois reprises:

1. Le 27 Décembre 2017
2. Le 29 Janvier 2018
3. Le 27 février 2018

1.3 Méthodes de détermination des paramètres physico-chimiques des échantillons prélevés

Les méthodes de dosage que nous avons utilisé et qui sont décrite dans les paragraphes qui suivent ont été réalisées au niveau du laboratoire LARHYSS et sont décrites par Rejsek (2002), Rodier (2009), Tardat-Henry et Beaudry (1984) ou par les catalogues des appareils utilisés.

1.3.1 Détermination du pH

On a mesuré le pH des échantillons d'eau à l'aide d'un pH mètre INOLAB instruments modèle pH 7310P (Figure 20). Avant chaque essai, nous procédions à l'étalonnage de cet appareil à l'aide des solutions tampons 4 et 7.

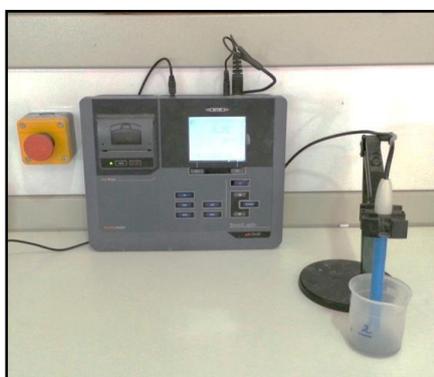


Figure 20: pH mètre utilisé pour mesurer le pH des échantillons d'eau.

I.3. 2 Conductivité (CE)

Elle est mesurée au moyen d'un conductimètre électrique de type «Biobloc scientifique LF 315» (Figure 21), donnant des mesures en $\mu\text{s}/\text{cm}$ et en ms/cm . Elle est également en fonction de la température de l'eau, et proportionnelle à la minéralisation.



Figure 21 : Conductimètre utilisé au laboratoire

I.3. 3 Dosage du sodium (Na^+) et de potassium (K^+)

Le dosage de ces deux ions (Na^+ , K^+) se base sur la méthode de spectrophotométrie à flamme (PHOTOMETER FLAME/JENWAY/clinical PFP7)(Figure 22). Le principe consiste à réaliser une courbe d'étalonnage de l'élément à doser avec des concentrations connues, puis évaporer dans la flamme du photomètre l'eau à analyser et déterminer la teneur de Na^+ ou K^+ .



Figure 22: Spectrophotometre à flamme JENWAY/clinical PFP7.

I.3. 4 Titre alcalimétrique complet (T.A.C)

L'échantillon d'eau à analyser est additionné de quelques gouttes (2 à 3) de méthylorange puis titré à l'aide d'acide sulfurique jusqu'au virage du jaune à l'orange. Le

TAC est exprimé en milliéquivalents par litre ou en degrés français (Tardat-Herny et Beaudry, 1984).

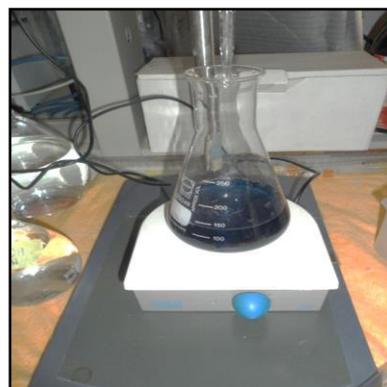
I.3. 5 Titre hydrométrique (TH)

La dureté totale ou hydrométrique (TH) est la somme des concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Le mode opératoire consiste à prélever 100 ml d'eau à analyser, ajouter 5 ml de solution tampon (pH = 10) et une pincée d'indicateur coloré (Noir Eriochrome T). Enfin, on verse la solution d'EDTA jusqu'au virage du rouge vieux au bleu vert, ce volume versé correspond à la dureté totale (en °F) (Rodier, 2009) (Figure 23).



Avant titrage



Après titrage à l'EDTA

Figure 23: Détermination du TH par complexométrie à l'EDTA

I.3. 6 Dosage du calcium (Ca^{2+})

Les ions Ca^{++} sont dosés par complexométrie dans un milieu alcalin à pH = 12, en présence de la soude (NaOH) avec le Murexide comme indicateur coloré. Nous titrons par l'EDTA (N= 0,02 éq/l) jusqu'au virage pourpre, ce volume versé correspond à la dureté calcique (en °F) (Rodier, 2009) (Figure 24).

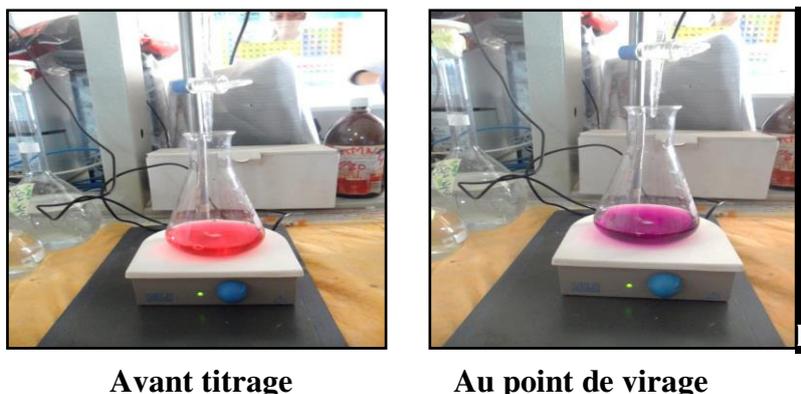


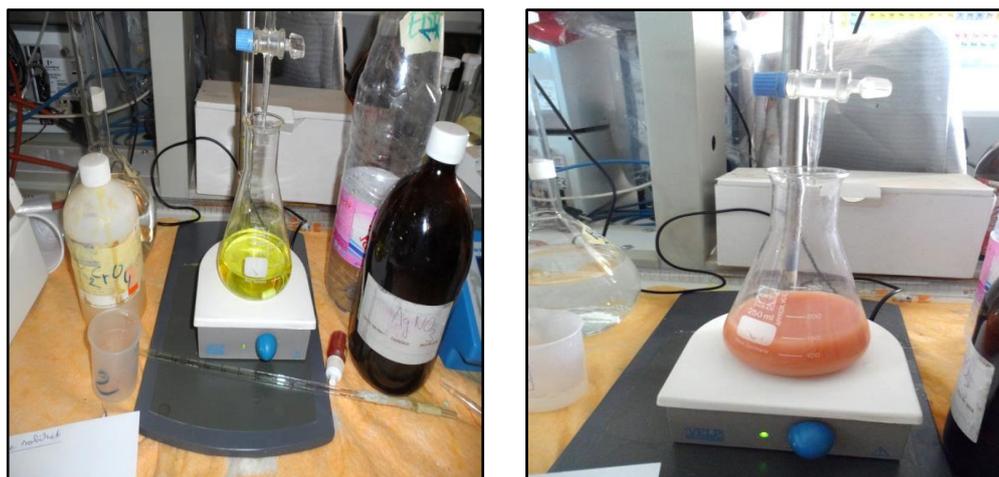
Figure 24: Dosage du calcium par complexation à l'EDTA

I.3. 7 Détermination de la concentration du Magnésium (Mg^{+2})

La différence entre la dureté totale et la dureté calcique donne directement la dureté magnésienne (la teneur en magnésium), exprimée en degrés français (Rodier, 2009).

I.3. 8 Dosage des chlorures (Cl^-)

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent ($AgNO_3$), en présence de chromate de potassium (K_2CrO_4) jusqu'à apparition d'une coloration rouge brique, c'est le principe de la méthode de Mohr (Rodier, 2009) (Figure 25).



Avant titrage

Après titrage par nitrate d'argent

Figure 25: Détermination de la concentration des chlorures (Cl^-)

I.3. 9 Dosage des sulfates (SO_4^{2-})

Le dosage est effectué grâce à un photomètre PALINTEST (Figure 26) réglé à une longueur d'onde de 520 nm, la gamme de mesure varie de 0 à 200 mg/l.



Figure 26:Photomètre PALINTEST

I.3. 10 Dosage de (PO_4^{3-} , nitrites , Fer et nitrates)

Le dosage de chaque élément a été réalisé sur un spectrophotomètre multi paramètres de type HI 83200-02 (Figure 27). Le mode opératoire de la détermination de la concentration de chaque élément a été décrit par le catalogue de l'appareil.

- **PO_4^{3-}** : dans une gamme basse de mesure de 0 à 2,5 mg/l, à une longueur d'onde de 610 nm.
- **Nitrites** : dans une gamme basse de mesure de 0 à 0,35 mg/l à une longueur d'onde de 525 nm.
- **Le fer** : dans une haute gamme de mesure de 0 à 5 mg/l à une longueur d'onde de 525 nm.
- **Nitrates** : de mesure de 0 à 30 mg/l à une longueur d'onde de 525 nm.



Figure 27: Spectrophotomètre multi paramètres HI 83200-02

1.4.Conclusion

A travers ce qui a été présenté dans ce chapitre, nous avons essayé de donner une idée sur les méthodes de dosage et le matériel utilisé lors de la réalisation de notre étude expérimentale.

Conclusion générale

L'objectif de notre étude a été de faire un suivi de la qualité des eaux avant et après traitement d'adoucissement (par utilisation des résines cationiques et par osmose inverse) des eaux destinées à l'alimentation des chaudières de production de la vapeur au niveau du complexe sidérurgique d'El Hadjar à Annaba.

Notre travail a été commencé par la présentation des procédés d'adoucissement des eaux surtout ceux appliqués pour l'adoucissement des eaux de chaudières (adoucissement par utilisation des résine et l'osmose inverse. Il en ressort également de cette partie de l'étude que la vaporisation de l'eau dans la chaudière et dans les tubes entraîne nécessairement la précipitation des sels que peut contenir l'eau d'alimentation de la chaudière. L'entartrage peut se propager dans les conduites de vapeur et dans les dispositifs qui y sont exposés. Un paramètre essentiel de qualité qui provoque l'entartrage est la dureté de l'eau qui nécessite un adoucissement préalable.

Nous avons également donné une idée sur le grand complexe de sidérurgie d'El Hadjar situé à Annaba à l'Est de l'Algérie. Au niveau du complexe il existe une unité de production de l'eau qui va être utilisée pour la production de la vapeur d'eau de refroidissement au niveau des chaudières.

Au niveau du complexe 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.

Nous avons fait un suivi de la qualité physico-chimique y compris les paramètres de la dureté (TH, Ca^{2+} et Mg^{2+}) et de l'alcalinité (TAC) de l'eau de barrage au niveau des deux filières d'adoucissement des eaux de chaudières (échange ionique sur résine et osmose inverse).

Ce suivi nous a permis d'avoir une idée sur l'efficacité de l'adoucissement par les deux techniques de traitement des eaux.

- Il semble évident que le traitement par osmose inverse permet d'avoir une eau avec une minéralisation (Conductivité) très faible, une élimination d'une grande partie de la dureté et de l'alcalinité de l'eau ainsi que des chlorures et des sulfates dont leurs

présence en fortes concentration un effet négative sur le fonctionnement des chaudières destinée à la production de la vapeur au niveau du complexe.

- La concentration de potassium n'a subi une légère diminution qu'à la sortie de l'adoucisseur ou de l'osmose inverse
- Après traitement par osmose inverse, la concentration résiduelle en sodium est très faible par contre on a remarqué une augmentation de la teneur de cet élément à la sortie de l'adoucisseur par résine. Ceci est due au faite que la résine utilisée est une résine cationique, elle échange les ions Na^+ qui se trouvent dans sa structure avec les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau.
- L'abattement de la teneur des nitrates et des nitrites par osmose inverse et par utilisation des résines est appréciable
- Le traitement de l'eau par osmose inverse a abouti à une élimination totale des ions SO_4^{2-} par contre l'élimination de cet élément a été de l'ordre de 5,36 % par résine
- 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 ($0,3 \text{ °F} < \text{TH} < 0,5 \text{ °F}$).