

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université du 20 Août 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences  
Département de Chimie



**Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

Filière : Chimie

Spécialité : Electrochimie - Corrosion

Thème :

**Expertise technique de l'Évaporateur TCD 6-8000 :  
diagnostic de la corrosion, de l'entartrage et  
Optimisation des performances**

Soutenu publiquement, le 22/09/2025

**Présenté par :**

M<sup>lle</sup> Ibtissem BOUAITA

**Encadrée par :**

**Dr Amel DELIMI**

**Année Universitaire : 2024-2025**

# *Dedicace*

*A la mémoire de ma chère grande mère. Qu'Allah lui accorde miséricorde.*

*A mon père et à ma mère, qui ont cru en moi, m'ont comblée de leur soutien et m'ont voué un amour inconditionnel.*

*A mon cher frère Moussa, mes deux chères sœurs Imen et Hasna, pour leur soutien, leur tendresse. Vous êtes pour moi un exemple de courage et de persévérance.*

*A toute ma famille, mes amis, mes collègues d'étude et de travail.*



*Ibtisseem*

# REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'achever ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à l'ensemble de membres de jury pour avoir accepté de juger mon travail de master.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice Docteur DELIMI Amel, Maître de conférences à l'Université de Skikda, pour avoir suivi et dirigé ce travail. Merci pour votre écoute, vos conseils, votre soutien, votre aide et surtout merci de m'avoir fait confiance.

Mes remerciements s'adressent à tous le personnel du Complexe Pétrochimique de Skikda CP2K (unité des utilités), et plus particulièrement au chef de service des utilités M<sup>r</sup> BARIOUT Hichem pour m'avoir facilité la réalisation de mon travail et également à Messieurs Raouf et Ali pour m'avoir transmis vos connaissances, pour leurs patiences et leurs encouragements. Vous trouverez ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Enfin, mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation et à l'aboutissement de ce travail.

*Merci.*

## **Résumé**

Le dessalement de l'eau de mer par distillation à thermocompression constitue une technologie essentielle pour répondre à la demande croissante en eau potable. Ce travail de fin d'études s'appuie sur l'expertise réalisée sur un évaporateur TCD 6-8000 afin d'évaluer ses performances et d'identifier les principaux mécanismes de dégradation. Les inspections et les analyses physico-chimiques et métallographiques ont révélé une baisse significative de la production, associée à des phénomènes de corrosion généralisée et localisée, d'entartrage carbonaté ( $\text{CaCO}_3$ ) et d'encrassement des cellules. Le dysfonctionnement du système GMV a également été identifié comme un facteur aggravant. Les résultats de l'expertise mettent en évidence la nécessité d'optimiser la maintenance préventive, améliorer le contrôle procédural, renouveler les produits chimiques de traitement et renforcer la formation du personnel. L'intégration de ces mesures permettra d'accroître la fiabilité et la durabilité de l'évaporateur.

**Mots clés** : Dessalement, eau de mer, évaporateur TCD 6-8000, expertise, inspection, analyses physicochimique, corrosion, entartrage, GMV.

## **Abstract**

Seawater desalination through thermal vapor compression distillation is a key technology to meet the growing demand for potable water. This final-year project is based on an expertise carried out on a TCD 6-8000 evaporator in order to evaluate its performance and identify the main degradation mechanisms. Inspections, together with physico-chemical and metallographic analyses, revealed a significant decline in production, associated with generalized and localized corrosion, carbonate scaling ( $\text{CaCO}_3$ ), and fouling of the cells. Malfunction of the GMV system was also identified as an aggravating factor. The results of this expertise highlight the need to optimize preventive maintenance, improve process control, update treatment chemicals, and strengthen staff training. The integration of these measures will enhance the reliability and durability of the evaporator.

**Keywords** : Desalination, seawater, TCD 6-8000 evaporator, expertise, inspection, physico-chemical analysis, corrosion, scaling, GMV.

## الملخص

يُعدّ تحلية مياه البحر عن طريق التقطير بالضغط البخاري الحراري تقنية أساسية لتلبية الطلب المتزايد على مياه الشرب. يستند هذا مشروع نهاية الدراسة إلى خبرة أُجريت على المبخّر TCD 6-8000 بهدف تقييم أدائه وتحديد آليات التدهور الرئيسية. وقد كشفت عمليات الفحص والتحليل الفيزيوكيميائية والمعدنية عن انخفاض ملحوظ في الإنتاج، مرتبط بظواهر التآكل العام والموضعي، وتكوّن القشور الكربوناتية ( $\text{CaCO}_3$ )، وتراكم الترسبات في الخلايا. كما تبيّن أنّ خلل نظام **GMV** كان عاملاً مُفاقماً. وتُبرز نتائج هذه الخبرة ضرورة تحسين الصيانة الوقائية، وتعزيز التحكم في التشغيل، وتجديد المواد الكيميائية المستعملة في المعالجة، إضافة إلى تقوية تكوين العاملين. إنّ دمج هذه التدابير من شأنه أن يعزز موثوقية ومتانة المبخّر.

## الكلمات المفتاحية

تحلية المياه، مياه البحر، خبرة، فحص، تحليل فيزيائي-كيميائي، تآكل، ترسّب، GMV، المبخّر TCD 6-8000

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **Partie théorique**

### **Chapitre I : Généralités sur le procédé de dessalement**

<b>I.1</b>	Généralités sur l'eau marine et la saumure .....	<b>3</b>
<b>I.1.1</b>	L'eau marine.....	<b>3</b>
<b>I.1.2</b>	La saumure.....	<b>3</b>
<b>I.2</b>	La composition de l'eau de mer .....	<b>4</b>
<b>I.2.1</b>	Les éléments principaux.....	<b>4</b>
<b>I.2.2</b>	Autres éléments minéraux.....	<b>5</b>
<b>I.2.3</b>	Teneur matière en suspension.....	<b>5</b>
<b>I.2.4</b>	Matière organique.....	<b>5</b>
<b>I.3</b>	Caractéristiques de l'eau de mer.....	<b>6</b>
<b>I.3.1</b>	Salinité.....	<b>6</b>
<b>I.3.2</b>	Température.....	<b>7</b>
<b>I.3.3</b>	Conductivité.....	<b>8</b>
<b>I.3.4</b>	Gaz dissous.....	<b>8</b>
<b>I.3.5</b>	pH .....	<b>8</b>
<b>I.4</b>	Qualité de l'eau produite.....	<b>9</b>
<b>I.4.1</b>	Critère de potabilité.....	<b>9</b>
<b>I.5</b>	Les principales technologies de dessalement des d'eaux marines.....	<b>10</b>
<b>I.6</b>	Procédé thermique.....	<b>11</b>

<b>I.6.1</b>	Les procédés de distillation.....	<b>11</b>
<b>I.6.1.1</b>	Distillation a simple effet.....	<b>12</b>
<b>I.6.1.2</b>	Distillation à effet multiple.....	<b>13</b>
<b>I.6.1.3</b>	Distillation multi-effets avec compression de vapeur.....	<b>14</b>
<b>I.6.1.3.1</b>	Compression mécanique de la vapeur.....	<b>14</b>
<b>I.6.1.3.2</b>	Thermocompression de la vapeur.....	<b>15</b>
<b>I.6.1.3.3</b>	Les avantages de la thermocompression.....	<b>16</b>
<b>I.6.1.4</b>	Le procédé de distillation par détente successives .....	<b>17</b>
<b>I.6.2</b>	Procédé de congélation.....	<b>18</b>
<b>I.7</b>	Procédé à membrane.....	<b>18</b>
<b>I.7.1</b>	Electrodialyse .....	<b>18</b>
<b>I.7.2</b>	Osmose inverse.....	<b>19</b>
<b>I.8</b>	Procédé chimique .....	<b>20</b>
<b>I.8.1</b>	L'échange d'ions .....	<b>20</b>
<b>I.8.2</b>	L'extraction par solvant .....	<b>21</b>
<b>I.9</b>	Les coûts du dessalement.....	<b>22</b>
<b>Chapitre II : Evaporation et les différents problèmes techniques</b>		
<b>II.1</b>	Notion d'évaporation.....	<b>23</b>
<b>II.2</b>	Que fait l'évaporateur? .....	<b>23</b>
<b>II.3</b>	Problèmes de l'évaporation.....	<b>24</b>
<b>II.3.1</b>	Problème de l'entartrage.....	<b>24</b>
<b>II.3.1.1</b>	Définition d'entartrage.....	<b>24</b>
<b>II.3.1.2</b>	Principaux dépôts de tartre rencontrés en dessalement.....	<b>25</b>
<b>II.3.1.2.1</b>	Le carbonate de calcium.....	<b>26</b>

<b>II.3.1.2.1.1</b>	Différentes formes du carbonate de calcium .....	<b>27</b>
<b>II.3.1.2.2</b>	Les sulfates .....	<b>30</b>
<b>II.3.1.2.3</b>	Les hydroxydes.....	<b>31</b>
<b>II.3.1.3</b>	Traitements antitartres.....	<b>31</b>
<b>II.3.1.3.1</b>	Traitement chimique.....	<b>32</b>
<b>II.3.1.3.2</b>	Traitement mécanique .....	<b>33</b>
<b>II.3.1.3.3</b>	Traitement physique .....	<b>33</b>
<b>II.3.2</b>	Problème de corrosion .....	<b>34</b>
<b>II.3.2.1</b>	Notions de corrosion des métaux.....	<b>34</b>
<b>II.3.2.2</b>	Différents types de corrosion.....	<b>34</b>
<b>II.3.2.2.1</b>	Corrosion uniforme.....	<b>35</b>
<b>II.3.2.2.2</b>	Corrosion localisée.....	<b>35</b>
<b>II.3.2.3</b>	Traitement de la corrosion.....	<b>37</b>
<b>II.3.3</b>	Problème de colmatage.....	<b>38</b>
<b>II.3.3.1</b>	Notion de colmatage.....	<b>38</b>
<b>II.3.3.2</b>	Traitement de colmatage.....	<b>38</b>
<b>II.3.4</b>	Problème de la mousse.....	<b>38</b>
<b>II.3.4.1</b>	Notion de moussage.....	<b>38</b>
<b>II.3.4.2</b>	Traitement de la mousse.....	<b>39</b>
<b>II.3.5</b>	Autres problèmes de l'évaporation.....	<b>39</b>
<b>II.4</b>	Contraintes de l'évaporation.....	<b>40</b>
<b>II.4.1</b>	Sélection des matériaux.....	<b>40</b>
<b>II.4.2</b>	Gaz incondensables .....	<b>40</b>

## **Chapitre III : Présentation de l'unité de dessalement TCD 6-8000**

<b>III.</b>	Description générale du complexe CP2K.....	<b>41</b>
<b>III.1</b>	Présentation du complexe.....	<b>41</b>
<b>III.2</b>	Découpage du complexe .....	<b>42</b>
<b>III.3</b>	Organisation du complexe .....	<b>42</b>
<b>III.4</b>	Présentation de l'unité des utilités.....	<b>44</b>
<b>III.4.1</b>	Unité d'eau.....	<b>44</b>
<b>III.4.1.1</b>	Prise d'eau de mer .....	<b>45</b>
<b>III.4.1.2</b>	Section de prétraitement.....	<b>45</b>
<b>III.4.1.3</b>	Station de pompage .....	<b>45</b>
<b>III.4.1.4</b>	Section de dessalement .....	<b>46</b>
<b>III.4.1.5</b>	Section déminéralisation.....	<b>47</b>
<b>III.4.1.6</b>	Traitement des effluents.....	<b>47</b>
<b>III.4.2</b>	Utilité d'énergie.....	<b>47</b>
<b>III.4.2.1</b>	Section chaudière.....	<b>47</b>
<b>III.4.2.2</b>	Section air/azote.....	<b>48</b>
<b>III.4.2.3</b>	Section d'énergie électrique.....	<b>48</b>
<b>III.5</b>	Description du procédé de dessalement.....	<b>48</b>
<b>III.5.1</b>	Description globale de L'évaporateur TCD6-8000.....	<b>48</b>
<b>III.5.2</b>	Plateaux d'arrosage.....	<b>50</b>
<b>III.5.3</b>	Séparateurs.....	<b>50</b>
<b>III.5.4</b>	Faisceau tubulaire.....	<b>51</b>
<b>III.5.5</b>	Condenseur.....	<b>52</b>
<b>III.5.6</b>	Thermo-compresseur.....	<b>52</b>

<b>III.5.7</b>	Système de mise sous vide.....	<b>54</b>
<b>III.5.8</b>	Traitement chimique de l'eau de mer.....	<b>55</b>
<b>III.6</b>	Principe de fonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000.....	<b>57</b>

### **Partie expérimentale**

#### **Chapitre IV: Expertise de l'unité de dessalement TCD 6-8000**

<b>IV.1</b>	Contexte et méthodologie.....	<b>59</b>
<b>IV.2</b>	Préparation et identification physique.....	<b>59</b>
<b>IV.2.1</b>	Identification de l'environnement opérationnel et analyse des matériaux...	<b>59</b>
<b>IV.2.2</b>	Paramètres de fonctionnement.....	<b>61</b>
<b>IV.3</b>	Analyse des données historiques et des Retours d'Expérience .....	<b>61</b>
<b>IV.4</b>	Inspection externe et interne de l'évaporateur et les équipements annexes .....	<b>61</b>
<b>IV.4.1</b>	Inspection externe.....	<b>62</b>
<b>IV.4.2</b>	Inspection interne.....	<b>62</b>
<b>IV.4.2.1</b>	Inspection des cellules de l'évaporateur.....	<b>65</b>
<b>IV.4.2.2</b>	Inspection des filtres.....	<b>69</b>
<b>IV.4.2.3</b>	Inspection des condenseurs et des réchauffeurs.....	<b>70</b>
<b>IV.5</b>	Test d'arrosage à pression atmosphérique.....	<b>71</b>
<b>IV.6</b>	Procédure de mise sous vide et démarrage .....	<b>72</b>
<b>IV.7</b>	Echantillonnage et analyse en laboratoire .....	<b>73</b>
<b>IV.7.1</b>	Analyse métallographique.....	<b>73</b>
<b>IV.7.1.1</b>	Analyse par diffractométrie des rayons X (DRX) .....	<b>73</b>
<b>IV.7.1.2</b>	Analyse par fluorescence des rayons X (FX) .....	<b>74</b>
<b>IV.7.2</b>	Analyse physico-chimique.....	<b>76</b>
<b>IV.8</b>	Lessivage chimique.....	<b>77</b>

<b>IV.9</b>	Evaluation et analyse des résultats.....	<b>78</b>
<b>IV.10</b>	Recommandation & Perspective.....	<b>80</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>83</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>86</b>

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>I.1</b>	principales techniques de dessalement .....	<b>11</b>
<b>I.2</b>	Distillation à simple effet.....	<b>13</b>
<b>I.3</b>	Distillation à multi effet (ici trois effet).....	<b>14</b>
<b>I.4</b>	Compression mécanique de vapeur (ici un seul effet).....	<b>15</b>
<b>I.5</b>	Thermocompression de la vapeur (ici à quatre effets).....	<b>16</b>
<b>I.6</b>	Schéma de principe d'un système de Distillation par détente successive (MSF) Tripoli, Libye.....	<b>16</b>
<b>I.7</b>	Distillation à détente successive à $n$ cellules.....	<b>17</b>
<b>I.8</b>	Dessalement d'une eau saline par électrodialyse.....	<b>19</b>
<b>I.9</b>	Principe de fonctionnement de l'osmose inverse.....	<b>19</b>
<b>I.10</b>	Schéma des étapes de l'échange anionique.....	<b>20</b>
<b>I.11</b>	Schéma des étapes de l'extraction par solvant.....	<b>21</b>
<b>II.1</b>	Résistance de chauffe-eau électrique entartée.....	<b>25</b>
<b>II.2</b>	Diagramme de prédominance des espèces carbonatées en fonction du pH . .....	<b>26</b>
<b>II.3</b>	Courbe d'équilibre solide/liquide de trois polymorphes du carbonate du calcium..	<b>28</b>
<b>II.4</b>	La calcite dans la nature.....	<b>28</b>
<b>II.5</b>	Aragonite sous forme d'aiguilles.....	<b>29</b>
<b>II.6</b>	La vaterite sous forme de lentille .....	<b>29</b>
<b>II.7</b>	Carbonate de calcium.....	<b>30</b>
<b>II.8</b>	Corrosion généralisée d'un support métallique.....	<b>35</b>

<b>II.9</b>	Corrosion localisée d'une bride (corrosion galvanique).....	<b>36</b>
<b>III.1</b>	Position géographique du complexe CP2K.....	<b>41</b>
<b>III.2</b>	Organigramme général du complexe CP2K.....	<b>43</b>
<b>III.3</b>	Collecteur des refoulements des pompes.....	<b>45</b>
<b>III.4</b>	L'évaporateur TCD 6-8000.....	<b>46</b>
<b>III.5</b>	Ioniseur de la section démirélaisation.....	<b>46</b>
<b>III.6</b>	Section des effluents.....	<b>47</b>
<b>III.7</b>	Schéma d'unité de dessalement par distillation.....	<b>49</b>
<b>III.8</b>	Schéma des plateaux d'arrosage.....	<b>50</b>
<b>III.9</b>	Les séparateurs (démisters).....	<b>51</b>
<b>III.10</b>	Faisceau tubulaire.....	<b>51</b>
<b>III.11</b>	Condenseur de l'évaporateur.....	<b>52</b>
<b>III.12</b>	Thermo-compresseur de l'évaporateur.....	<b>53</b>
<b>III.13</b>	Système de mise sous vide.....	<b>54</b>
<b>III.14</b>	Bacs de dosage des produits chimiques.....	<b>56</b>
<b>IV.1</b>	Fissuration du massif.....	<b>63</b>
<b>IV.2</b>	Dégradation du support de la plaque d'identification.....	<b>63</b>
<b>IV.3</b>	Sévère corrosion des brides et vannes.....	<b>63</b>
<b>IV.4</b>	Corrosion galvanique de la liaison support-tuyauterie.....	<b>63</b>
<b>IV.5</b>	Corrosion généralisée et localisée de la charpente métallique.....	<b>64</b>
<b>IV.6</b>	Corrosion et vieillissement de la peinture des viroles et couvercles des filtres.....	<b>65</b>

<b>IV.7</b>	Présence de tartre sur le faisceau des tubes.....	<b>66</b>
<b>IV.8</b>	Présence d'une couche de sel faisceau des tubes.....	<b>66</b>
<b>IV.9</b>	Entartrage du faisceau de la 2 <sup>ème</sup> cellule.....	<b>66</b>
<b>IV.10</b>	Présence d'une couche de sel sur le faisceau tubulaire.....	<b>67</b>
<b>IV.11</b>	Encrassement des démisters et du fond de la cellule.....	<b>68</b>
<b>IV.12</b>	Détachement et endommagement des démisters.....	<b>68</b>
<b>IV.13</b>	Couche de sel sur les plateaux.....	<b>69</b>
<b>IV.14</b>	Corrosion, encrassement et déchirure des cartouches des filtres.....	<b>69</b>
<b>IV.15</b>	Présence de la rouille et d'encrassement sur la paroi du faisceau tubulaire.....	<b>70</b>
<b>IV.16</b>	Irrégularité de la surface de l'anode et consommation plus de 50 % de son épaisseur.....	<b>71</b>
<b>IV.17</b>	Désintégration des anodes et corrosion des boulons d'encrage.....	<b>71</b>
<b>IV.18</b>	Echantillon d'un dépôt du tartre sur les tubes de l'évaporateur.....	<b>73</b>
<b>IV.19</b>	Diffractogramme de l'échantillon « dépôt évaporateur ». ....	<b>74</b>

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>I.1</b>	Concentration des éléments principaux pour une eau de mer de méditerranée.....	<b>4</b>
<b>I.2</b>	Concentration des différents éléments mineurs dont la concentration est supérieure au µg/l se trouvant sous forme dissoute, colloïdale, ou en suspension.	<b>5</b>
<b>I.3</b>	Composition standard de l'eau de mer océanique.....	<b>7</b>
<b>I.4</b>	Conductivité spécifique de l'eau de mer en (ms.cm <sup>-1</sup> ).....	<b>8</b>
<b>III.1</b>	Les pressions et les températures dans les cellules.....	<b>49</b>
<b>III.2</b>	Les dosages des produits chimiques utilisés dans le dessaleur.....	<b>56</b>
<b>IV.1</b>	Matériaux des différents composants de l'évaporateur.....	<b>60</b>
<b>IV.2</b>	Composition de l'eau de mer.....	<b>60</b>
<b>IV.3</b>	Les paramètres de fonctionnement de l'évaporateur.....	<b>61</b>
<b>IV.4</b>	Résultat d'analyse par DRX de l'échantillon « dépôt évaporateur ».....	<b>74</b>
<b>IV.5</b>	Composition chimique élémentaire exprimée en pourcentage massique (%) de l'échantillon « dépôt évaporateur ».....	<b>75</b>
<b>IV.6</b>	Résultat d'analyse par FX de l'échantillon « dépôt évaporateur ».....	<b>75</b>
<b>IV.7</b>	Les résultats des analyses physicochimiques de l'eau distillé .....	<b>76</b>
<b>IV.8</b>	Composition du dépôt de l'évaporateur.....	<b>77</b>

- FIR** : Force d'intervention et de réserve,
- CP1K** : Complexe Pétrochimique 1 de SKIKDA,
- CP2K** : Complexe Pétrochimique 2 de SKIKDA,
- DRX** : Diffraction des rayons X,
- FX** : Fluorescence des rayons X,
- ED** : Electro-Dialyse,
- GMV** : Groupe de Maintien de Vide,
- ISO** : Organisation Internationale de Normalisation,
- MES** : Matières en suspension,
- MED** : Multi Effect Distillation,
- MSF** : Multi-Stage Flash Distillation,
- OMS** : Organisation Mondiale de la Santé,
- PEHD** : Polyéthylène Haute Densité,
- RBI** : Risk Based Inspection,
- REX** : Retour d'Expérience,
- TCD** : Thermo-Compression Distillée.

# Introduction générale



# INTRODUCTION GENERALE

L'eau douce est une ressource vitale mais limitée, représentant à peine 2,5 % de l'ensemble des réserves hydriques de la planète. Avec l'accroissement démographique, le développement industriel et l'intensification des activités agricoles, la demande en eau ne cesse de croître alors que les ressources naturelles accessibles deviennent de plus en plus insuffisantes. Dans ce contexte, l'eau de mer, qui couvre plus de 70 % de la surface terrestre, constitue une alternative stratégique pour répondre aux besoins en eau potable et industrielle, à condition de la rendre exploitable par des procédés de dessalement.

Parmi les techniques de dessalement, on distingue principalement :

- ✓ Les procédés thermiques : qui exploitent l'évaporation et la condensation pour séparer l'eau des sels dissous, tels que la distillation multi-effets (MED) et la distillation multi-étagée (MSF).
- ✓ Les procédés membranaires : notamment l'osmose inverse, qui reposent sur la séparation de l'eau douce et des sels grâce à une membrane semi-perméable.

Ces procédés, largement utilisés dans les zones côtières arides, permettent de produire de grandes quantités d'eau potable, mais nécessitent une maîtrise rigoureuse de leurs paramètres de fonctionnement afin de garantir leur rentabilité et leur durabilité.

L'évaporation, en particulier, est l'un des principes thermiques les plus anciens et les plus efficaces utilisés dans le dessalement. Elle consiste à chauffer l'eau de mer afin de la transformer en vapeur, puis à condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce. Malgré son efficacité, ce procédé est confronté à plusieurs problèmes opérationnels : encrassement des surfaces d'échange, dépôts de tartre, corrosion, pertes énergétiques, augmentation de la conductivité du produit, ainsi qu'une diminution du rendement global de l'installation. Ces problèmes, lorsqu'ils ne sont pas rapidement identifiés et corrigés, entraînent une perte significative de production et une baisse de la performance des unités.

L'expertise est un processus d'évaluation et de vérification. Il vise à s'assurer que les divers systèmes, structures et équipements sont sûrs et fonctionnent correctement. Ces évaluations sont cruciales pour prévenir les accidents, optimiser les performances des unités et garantir le respect des normes légales et réglementaires.

C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente expertise, réalisée suite au « dysfonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000 » utilisé dans le dessalement de l'eau de mer du Complexe CP2K à SKIKDA.

### **À ce niveau les questions suivantes s'imposent :**

Quelles sont les causes techniques et opérationnelles du dysfonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000, et comment peut-on les identifier afin de réduire les pertes de production, maîtriser l'augmentation de la conductivité et améliorer le rendement global de l'unité ?

Afin de répondre à cette problématique, ce travail s'articulera autour des objectifs suivants :

- Diagnostiquer les anomalies de fonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000,
- Identifier et analyser les causes de la perte de performance,
- Proposer des solutions correctives et préventives pour optimiser le rendement de l'unité,
- Mettre en place une méthodologie de suivi et de maintenance pour garantir la durabilité des améliorations.

Le présent manuscrit est réparti en deux grandes parties à savoir : une partie théorique et une partie expérimentale.

La partie théorique inclut trois chapitres : le premier comprend des généralités sur l'eau de mer et la présentation de différents procédés de dessalement ; le deuxième chapitre est consacré pour la technique d'évaporation et les différents problèmes rencontrés et le troisième chapitre présente une description générale du complexe CP2K précisant l'unité de dessalement TCD 6-8000.

La partie expérimentale comprend l'expertise du dessaleur TCD 6-8000 : inspection, test fonctionnel, des analyses en laboratoire avec évaluation et recommandation.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et une bibliographique.



# Partie théorique

# Génitalités sur le procédé de dessalement



La terre contient environ  $1.4 \times 10^9 \text{ Km}^3$  d'eau, qui couvre approximativement 70 % de la superficie de planète ; le pourcentage de l'eau salée en cela est de 97.5 %. Les autres 2.5 % est de l'eau douce avec 80 % de cette quantité congelée dans les calottes glaciaires ou combinée comme humidité du sol. Les deux formes ne sont pas facilement accessibles pour l'usage humain. La quantité restante, environ 0.5 %, est appropriée pour soutenir toute la vie sur terre. Malheureusement, cette eau n'est pas distribuée d'une manière ou elle sera suffisamment disponible sur tous les sites [1].

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années mais leur coût (de 1 à 2 euros /  $\text{m}^3$ ) limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant dans ces dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par  $\text{m}^3$  ont connu une forte diminution [2].

## **I.1 Généralités sur l'eau marine et la saumure**

### **I.1.1 L'eau marine**

L'eau de mer est une solution complexe qui contient tous les éléments indispensables à la vie (calcium, silicium, carbone, azote, phosphore, oligo-éléments), des matières organiques (teneur comprise entre 0.5 et 2mg) et naturellement à l'état dissous, les gaz présents dans l'atmosphère, L'eau de mer est faiblement alcaline, Son pH étant compris entre 7.5 et 8.4. La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g/L. Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées [3].

### **I.1.2 La saumure**

La saumure est un sous-produit du dessalement inévitable, déchargée généralement dans l'environnement marin. Les constituants présents dans ces eaux résiduaires rejetées par les usines de dessalement dépendent de la qualité de l'eau d'alimentation, de la qualité de l'eau douce produite et du procédé de dessalement adopté. Ces rejets ne comprennent pas seulement l'effluent de saumure concentrée, mais peut aussi contenir des désinfectants et des agents

antialissures, des eaux chaudes et des effluents aqueux tels que les distillats et condensats d'éjecteurs [4].

## I.2 La composition de l'eau de mer

### I.2.1 Les éléments principaux

L'eau de mer est principalement constituée de sodium, magnésium, potassium, chlorure et sulfates. Les proportions moyennes mesurées en mer Méditerranée sont données dans le (Tableau I.1). Elles correspondent à des mesures en surfaces. Cependant, la profondeur influe très peu sur leur concentration. Ces valeurs peuvent donc être considérées comme de bonnes estimations [5].

**Tableau I.1 :** Concentration des éléments principaux pour une eau de mer de méditerranée.

Constituants	Symboles	Concentration (g/l)
<b>Chlorure</b>	Cl <sup>-</sup>	<b>21.40</b>
<b>Sodium</b>	Na <sup>+</sup>	<b>11.06</b>
<b>Sulfate</b>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	<b>3.06</b>
<b>Magnésium</b>	Mg <sup>+2</sup>	<b>1.295</b>
<b>Calcium</b>	Ca <sup>+2</sup>	<b>0.416</b>
<b>Potassium</b>	K <sup>+</sup>	<b>0.390</b>
<b>Bicarbonates</b>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.145</b>
<b>Brome</b>	Br <sup>-</sup>	<b>0.066</b>
<b>Strontium</b>	Sr <sup>+2</sup>	<b>0.027</b>
<b>Bore</b>	B <sup>+3</sup>	<b>0.013</b>
<b>Fluore</b>	F <sup>-</sup>	<b>0.001</b>

### I.2.2 Autres éléments minéraux

L'eau de mer contient de nombreux autres éléments à des concentrations beaucoup plus faibles (Tableau I.2). Ces éléments, malgré leur faible concentration, ont une importance certaine dans des processus biologiques et organiques. Ils peuvent se trouver sous différentes formes : dissous, colloïdaux ou en suspension.

**Tableau I.2 :** Concentration des différents éléments mineurs dont la concentration est supérieure au  $\mu\text{g/l}$  se trouvant sous forme dissoute, colloïdale, ou en suspension.

Eléments	Concentration en $\mu\text{g/l}$	Eléments	Concentration en $\mu\text{g/l}$
<b>Li</b>	170	Cu	<b>3</b>
<b>Al</b>	10	Zn	<b>10</b>
<b>Si</b>	3 000	As	<b>3</b>
<b>P</b>	70	Rb	<b>120</b>
<b>Ti</b>	1	Mo	<b>10</b>
<b>V</b>	2	I	<b>60</b>
<b>Mn</b>	2	Ba	<b>30</b>
<b>Fe</b>	<b>10</b>	U	<b>30</b>

### I.2.3 Teneur matière en suspension

L'eau de mer est un milieu vivant, qui véhicule d'une part des matières minérale et d'autres part des organismes vivants souvent microscopique, en plein mer, le plancton prédomine près des côtes, la teneur en sables augmente, elle varie selon le courant et la profondeur des fond, la pollution par les rejets urbaine ou industrielle peut devenir prépondérants, le site de la prise d'eau et sa conception seront choisis pour éviter toute pollution et limité au mieux l'apport des matières en suspension [6].

### I.2.4 Matière organique

Les basses concentrations de matières organiques dans l'eau de mer rendent leur analyse chimique très compliquée. Les composés sont difficiles à isoler car dilués dans un milieu contenant beaucoup d'autres éléments à de plus fortes concentrations. Parmi les matières organiques dissoutes, on trouve des chlorophylles et caroténoïdes, de la vitamine B<sub>12</sub>, des monosaccharides, des amino-acides.

Les matières organiques particulières sont principalement constituées d'animaux et végétaux du zoo-plancton (ou leurs résidus). Elles peuvent représenter de 10 à 60 % de la matière en suspension.

### I.3 Caractéristiques de l'eau de mer

L'eau de mer est la matière première de l'usine de dessalement. Chacun peut observer ses changements de température, de limpidité d'un lieu ou d'un jour à l'autre ; les écarts de salinité sont moins connus. Salinité, température, et conductivité sont les paramètres majeurs du fonctionnement d'une unité de dessalement.

#### I.3.1 Salinité

La salinité mesure la concentration en sels dissous ; elle s'exprime en g/L. Du fait que les quantités de sels dissous sont souvent très inférieures aux grammes, l'unité communément.

La salinité de l'eau de mer peut varier suivant la localisation sur le globe terrestre : les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles. La quantité de sels dissous augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. Elle peut dépasser 50 g/L dans certaines zones, telles que la côte Est de l'Arabie Saoudite où la chaleur et les hauts-fonds favorisent l'évaporation.

Quelques valeurs moyennes de la salinité de l'eau de mer :

- ✓ Océan Atlantique : 35 g/L ;
- ✓ Mer Méditerranée : 38 g/L ;
- ✓ Mer Rouge : 40 g/L et plus ;
- ✓ Golfe Persique : 50 g/L et plus.

Le laboratoire hydrographique de Copenhague a défini la composition « moyenne » d'une eau de type Océan Atlantique. Le tableau I.3 précise la répartition des ions principaux [6].

<b>Tableau I.3 : Composition standard de l'eau de mer océanique.</b>			
<b>Cations</b>	<b>(mg/L)</b>	<b>Anions</b>	<b>(mg/L)</b>
<b>Sodium</b>	11 035	Chlorures	<b>19 841</b>
<b>Magnésium</b>	1 330	Sulfates	<b>2 769</b>
<b>Calcium</b>	418	Bicarbonates	<b>146</b>
<b>Potassium</b>	397	Bromures	<b>68</b>
<b>Strontium</b>	14	Fluorures	<b>1,4</b>
<b>Salinité totale .....36,047 g/L</b>			

En dehors du chlorure de sodium qui représente 85 % de la salinité totale, on note la présence des ions bicarbonates, calcium et sulfates. Ces ions sont des sources potentielles d'entartrage selon les conditions de température, de concentration et de pH. Or tout procédé de dessalement implique une concentration de l'eau. Il restera donc à l'opérateur le choix de la température et du pH pour limiter sinon éviter l'entartrage des appareils.

### 1.3.2 Température

La température de l'eau de mer peut varier de quelques degrés sur les côtes sous influence des courants polaires jusqu'à 35 °C autour de la péninsule arabique.

Une température élevée avantage la distillation, tout en observant que cet avantage est minime du fait que la capacité thermique massique de l'eau est très faible comparée à son enthalpie (sa chaleur latente) de vaporisation.

Pour l'osmose inverse le bénéfice est contrasté : la production des membranes d'osmose augmente de 3 % par degré Celsius. C'est un facteur important puisqu'une augmentation de 5 °C augmente la production par un facteur égal à  $1,03^5 = 1,159$ .

En contrepartie la qualité de l'eau produite diminue et, surtout, le vieillissement de la membrane s'accélère. L'expérience montre que l'optimum se situe autour de 25 °C.

On retiendra aussi la capacité d'une unité d'osmose inverse n'a de sens que si les valeurs minimale et maximale de la température de l'eau sont définies.

### 1.3.3 Conductivité

La conductivité c'est la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique, cette notion électrique est inversement proportionnelle à celle résistance électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Simens (S/Cm).

La conductivité des eaux de mer subit des variations importantes suivant la température et la salinité des océans (**Tableau I.4**) [7].

**Tableau I.4** : Conductivité spécifique de l'eau de mer en (ms.cm<sup>-1</sup>).

Salinité (‰)	Conductivité		
	à 25 °C	à 15 °C	à 5°C
<b>10</b>	17,345	13,967	<b>10,616</b>
<b>20</b>	32,188	25,967	<b>20,816</b>
<b>30</b>	46,213	37,351	<b>29,090</b>
<b>35</b>	<b>53,025</b>	<b>42,896</b>	<b>33,457</b>

### 1.3.4 Gaz dissous

L'eau contient toujours des gaz dissous dont les concentrations dépendent notamment de la température ainsi que de la composition et de la pression de l'atmosphère gazeux avec laquelle elle est en contact. La loi de HENRY appliquée à la solubilité des gaz dans l'eau pure, prévoit que, la concentration dissoute d'un composé gazeux dans l'eau est directement proportionnelle à la pression partielle de ce composé dans la phase gazeuse au contact de l'eau [5].

Les gaz dissous dans l'eau de mer ont plusieurs origines dont la principale sont les gaz de l'atmosphère principalement l'azote, l'oxygène et le dioxyde de carbone [8].

### 1.3.5 pH

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H<sup>+</sup> contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates.

L'eau de mer est faiblement alcaline et son pH moyen est de 8,2 avec des variations entre 7 et 8,4. Les variations de pH ont une certaine analogie avec celle de l'oxygène dissous ceci s'explique en considérant l'activité photosynthétique de certains organismes : une forte production d'oxygène s'accompagne d'une diminution de la teneur en CO<sub>2</sub> et par conséquent d'une augmentation du pH ; l'oxydation de la matière organique diminue la teneur en oxygène de l'eau en produisant du CO<sub>2</sub> et par conséquent abaisse le pH [8].

## **I.4 Qualité de l'eau produite**

### **I.4.1 Critère de potabilité**

Dans la grande majorité des cas, l'eau est exclusivement destinée à la consommation humaine et doit donc être conforme à la réglementation des eaux potables.

Cependant, une partie de la production peut être directement livrée à une usine à proximité. L'exemple le plus fréquent est celui de la centrale thermique, qui requiert une eau d'appoint complètement déminéralisée. La distillation, pouvant produire une eau contenant moins de 5 mg/L de sels dissous, aura donc un avantage certain face aux techniques membranaires qui ne peuvent égaler ce résultat en une seule étape.

Il arrive que certains pays n'aient pas de réglementation concernant la qualité des eaux potables. On se conformera alors aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), qui font référence au sein de la Communauté internationale.

L'OMS classe les critères de potabilité d'une eau en cinq groupes. Ceux qui intéressent le producteur d'eau dessalée concernent :

- ✓ l'aspect physique : température, limpidité, odeur, teneur en matières en suspension (MES) ;
- ✓ les caractéristiques chimiques : salinité, chlorures, pH, etc.

Pour chaque critère, l'OMS précise une valeur guide, par exemple :

- ✓ salinité inférieure ou égale à 1000 mg/L ;
- ✓ chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/L.

Le facteur clé du dessalement est évidemment la salinité. Au vu des recommandations de l'OMS, on pourrait l'estimer suffisant. Or, les chlorures représentent environ 45 % de la teneur en sels d'une eau de mer osmosée. On devra donc fixer un objectif de 500 mg/L pour la salinité totale, de façon à respecter l'objectif de 250 mg/L pour les chlorures [9].

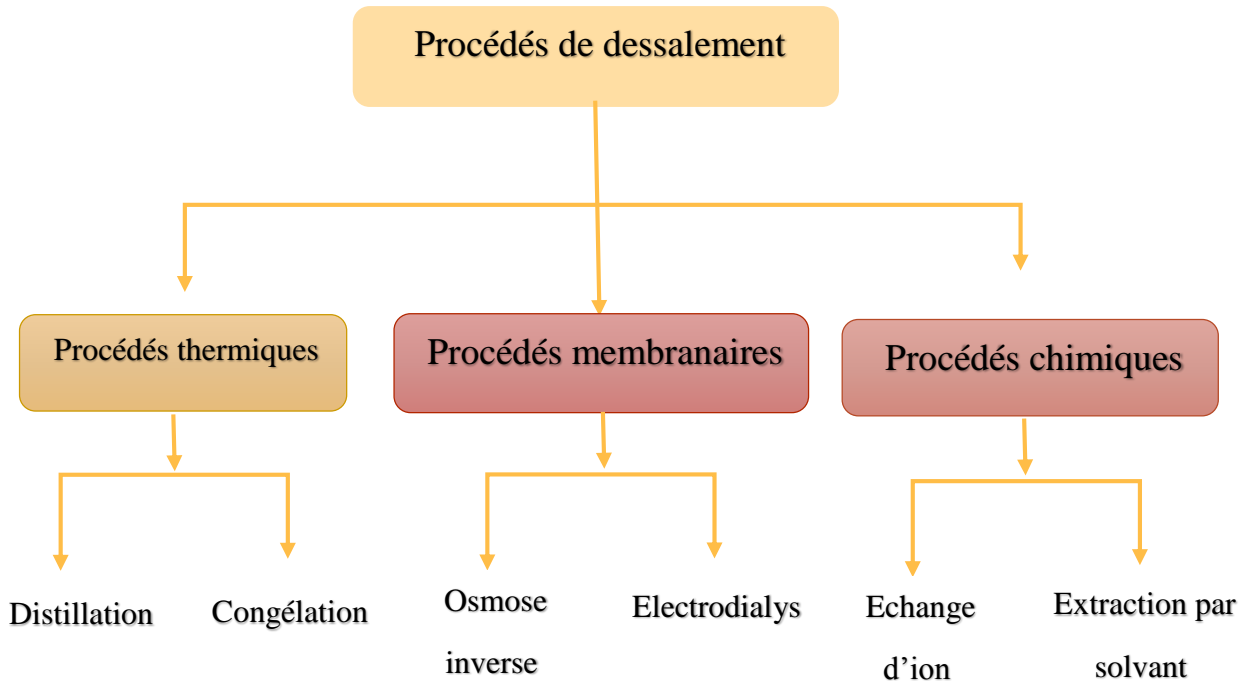
## I.5 Les principales technologies de dessalement des d'eaux marines

Il a été recensé 27 procédés différents de dessalement. Ces procédés peuvent être classés en trois grandes familles :

- Des procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation
- Des procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Des Procédés chimique consistent : échange d'ion et extraction par solvant.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés, généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent [2].

On peut classer les méthodes de dessalement de l'eau de mer comme suit :



**Figure I.1 :** principales techniques de dessalement.

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

1. Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
2. Un prétraitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
3. Le procédé de dessalement lui-même,
4. Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

À l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre [10].

## I.6 Procédé thermique

### I.6.1 Les procédés de distillation

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette

vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait de reproduire le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

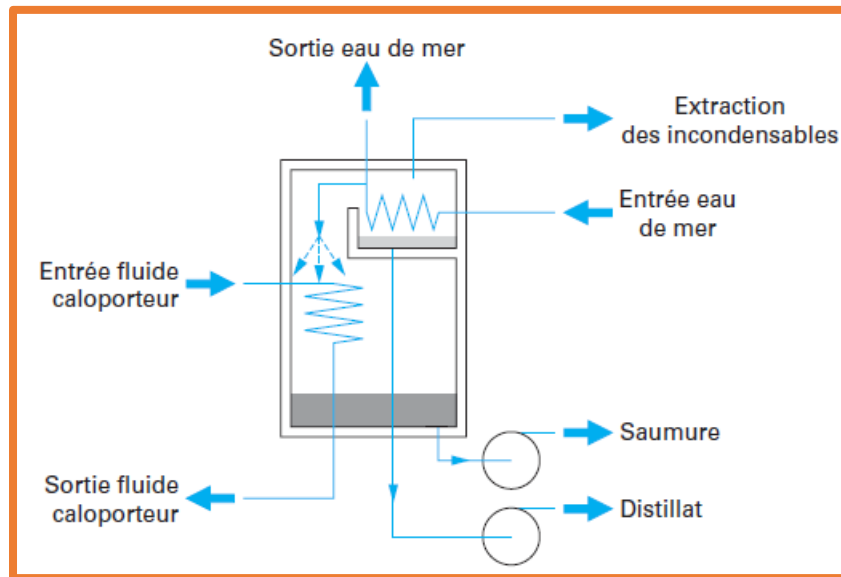
L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet, pour transformer un kg d'eau liquide en un kg d'eau vapeur à température constante, il faut environ 2250 kilojoules. Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point [2].

#### **I.6.1.1 Distillation à simple effet**

C'est un principe qui reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans un premier temps, l'eau de mer est portée à ébullition au contact d'un premier serpentin dans lequel circule un fluide caloporteur (**figure I.2**). Par le biais d'un second serpentin dans lequel circule de l'eau de mer froide, la vapeur ainsi produite se condense. Les sels dissouts n'étant pas vaporisables dans les mêmes conditions que l'eau, la vapeur ainsi obtenue est constituée d'eau pure.

Pour limiter au mieux l'entartrage en n'utilisant qu'un traitement antitartre simple, les constructeurs fixent la température maximale de ce procédé entre 60 et 65 °C. De plus, de telles températures limitent considérablement la corrosion.

Par cette méthode, on peut même obtenir une eau condensée très pure (jusqu'à 1 mg/L de sels) à l'aide de dispositifs spéciaux (filtres à gouttelettes) installés au-dessus de la zone de vaporisation.



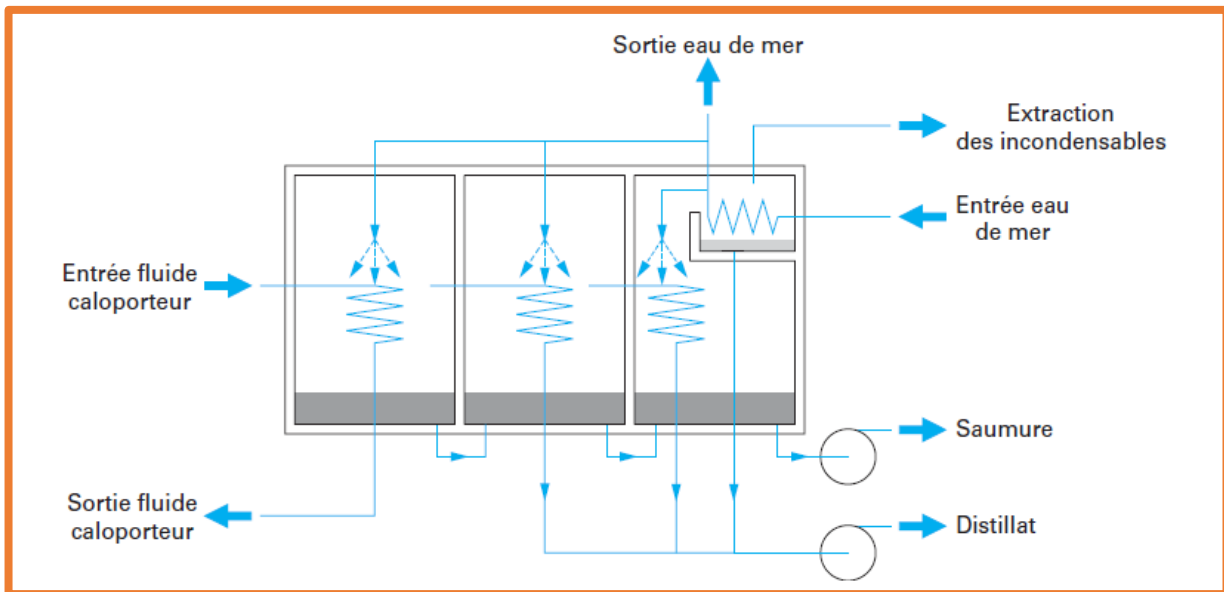
**Figure I.2** : Distillation à simple effet [10].

### I.6.1.2 Distillation à effet multiple

C'est un dispositif constitué par la juxtaposition de  $n$  cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (**figure I.3**).

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de  $n$  cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple.

Le fluide de réchauffage porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, qui est aussi la cellule où règne la température la plus haute et donc la pression est la plus élevée. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où le condenseur maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise une fraction de l'eau de mer présente dans la deuxième cellule. C'est le deuxième effet. On peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois, la limite basse étant donnée par la température de l'eau de mer froide.



**Figure I.3 :** Distillation à multi effet (ici trois effet) [10].

Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite).

### I.6.1.3 Distillation multi-effets avec compression de vapeur

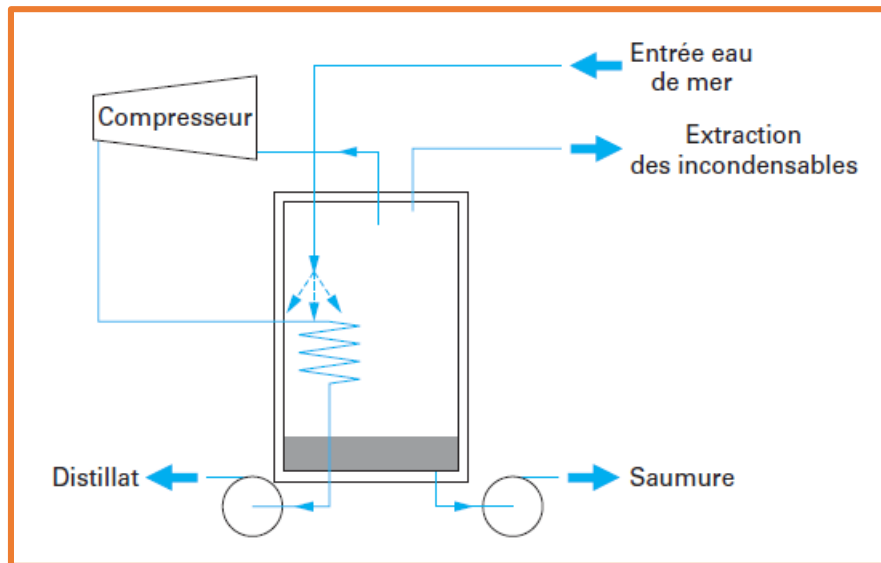
#### I.6.1.3.1 Compression mécanique de la vapeur

Pour améliorer la technique MED, on peut comprimer la vapeur produite et l'utiliser comme fluide caloporteur. Cette compression peut être mécanique ou thermodynamique.

Dans une cellule de distillation, on constate que l'enthalpie de la vapeur émise est peu différente de celle utilisée pour le chauffage, d'où l'idée de comprimer la vapeur émise et de s'en servir comme fluide chauffant (**figure I.4**). Ce procédé fonctionne uniquement avec de l'énergie électrique. Cependant, on peut lui associer un échangeur thermique pour récupérer d'éventuelles calories « basses températures » disponibles sur le site.

On réchauffera ainsi à peu de frais l'eau de mer avant son admission dans l'évaporateur. La puissance nominale de ce compresseur est de l'ordre de 300 kW pour une unité capable de produire 600 m<sup>3</sup>/j. On comprend que ce procédé soit limité aux petites unités dans une fourchette de 100 à 1000 m<sup>3</sup>/j. On retiendra également que les meilleurs rendements sont

obtenus au-dessus de 200 m<sup>3</sup>/j pour alimenter des « petites communautés » telles que centres de vacances, îles, plates-formes offshore, et aussi certaines applications industrielles.



**Figure I.4** : Compression mécanique de vapeur (ici un seul effet) [10].

### I.6.1.3.2 Thermocompression de la vapeur

Dans ce cas, la vapeur produite par la cellule la plus froide est comprimée par un éjecteur à vapeur. Plus la pression de la vapeur motrice est élevée, plus l'enthalpie du mélange sortant est importante. Pour évaluer l'avantage de ce procédé, examinons le cas d'une unité comprenant quatre effets (**figure I.5**).

L'éjecteur introduit la vapeur dans la cellule la plus chaude. Elle se condense à l'intérieur du faisceau de tubes du fait du ruissellement d'eau de mer froide à l'extérieur. La condensation dégage la chaleur nécessaire à l'évaporation d'une partie de l'eau de mer.

La vapeur émise est transférée dans la deuxième cellule où elle se condense à son tour tout en évaporant un deuxième volume d'eau de mer. Le phénomène se reproduit dans la troisième et la quatrième cellule. À la sortie de la dernière cellule, une partie de la vapeur est condensée pour servir d'appoint à la chaudière. Le complément est recyclé après compression

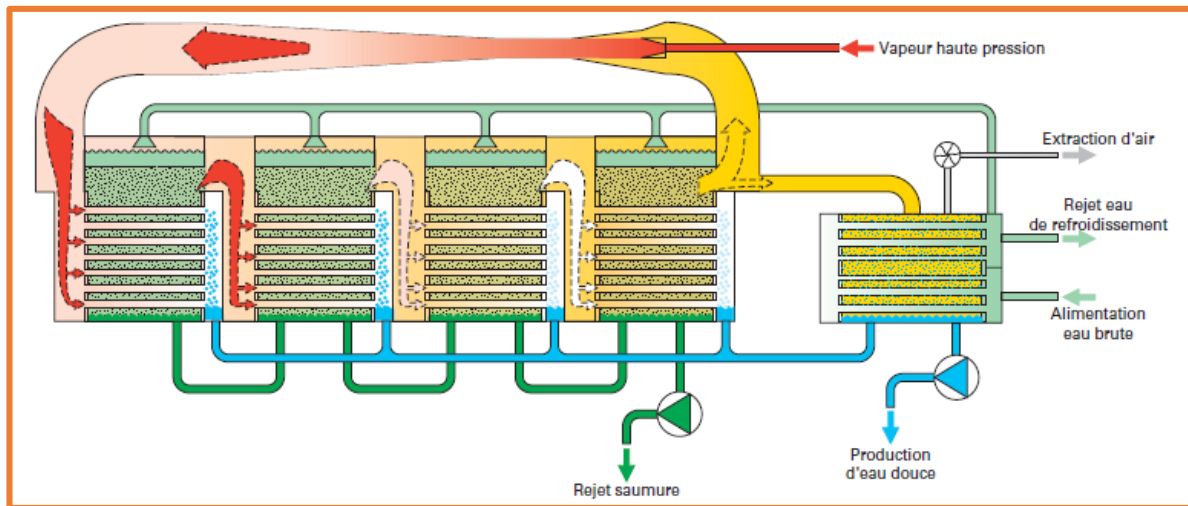


Figure I.5 : Thermocompression de la vapeur (ici à quatre effets) [10].

### I.6.1.3.3 Les avantages de la thermocompression

- à consommation de vapeur égale, une installation à multiples effets sans thermocompression produirait deux fois moins d'eau douce ;
- la pression de la vapeur motrice de l'éjecteur peut être choisie sur une large gamme de pression de 1,5 à 45 bars ;
- une unité à détentes successives aurait 16 à 20 étages pour obtenir le même rendement. Ces avantages expliquent le succès de cette technique, de nos jours, elle est utilisée dans des unités produisant 50 à 20 000 m<sup>3</sup>/j (figure I.6).



Figure I.6 : Schéma de principe d'un système de Distillation par détentes successives (MSF) Tripoli, Libye [10].

### I.6.1.4 Le procédé de distillation par détente successives (Multi-stage Flash distillation MSF)

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée « Flash ». Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible.

La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle [11].

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

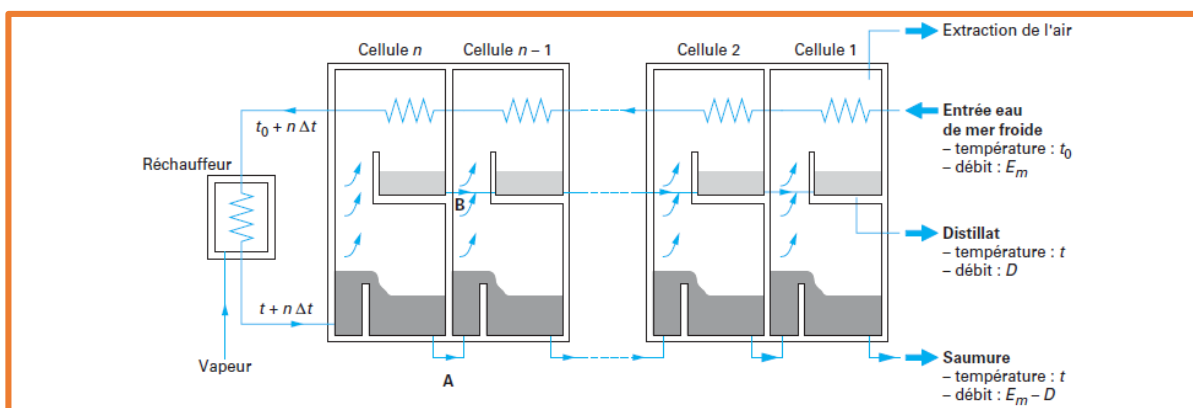


Figure I.7 : Distillation à détentes successives à  $n$  cellules [10].

## I.6.2 Procédé de congélation

C'est un procédé de dessalement qui se base sur la différence entre les points de congélation de l'eau douce et de l'eau salée. Lorsqu'on refroidit une eau de mer jusqu'à environ  $-2^{\circ}\text{C}$ , il y a formation de cristaux de glace constitués d'eau douce. L'eau de mer étant alors plus concentrée, elle résiste mieux à la congélation. Si on fait baisser davantage la température, la production de glace augmente. Signalons cependant que, à environ  $-9^{\circ}\text{C}$ , le sulfate de sodium décahydraté a tendance à précipiter. Pour produire de l'eau pure, il est donc préférable de ne pas refroidir l'eau au-dessous de cette température.

Le dessalement des eaux de mer par congélation est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau est souvent inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$ , car, dans ces conditions, on peut aménager des bassins à ciel ouvert. Lorsque la température est suffisamment basse, on remplit ces bassins sur une hauteur de 10 à 15 cm ; lorsque la couche de glace atteint une épaisseur de 1 à 1.5 cm, on enlève la saumure et on recueille la glace, qu'il ne reste plus qu'à laver et à faire fondre (il faut utiliser 30 à 50% de l'eau douce ainsi produite pour laver la glace et la débarrasser de sa pellicule d'eau de mer).

La production d'eau douce de ces bassins est de 40 à 50  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  lorsque la température de l'air est de  $-5^{\circ}\text{C}$ , et de 120 à 160  $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  lorsque cette dernière est de  $-20^{\circ}\text{C}$  [12].

## I.7 Procédé à membrane

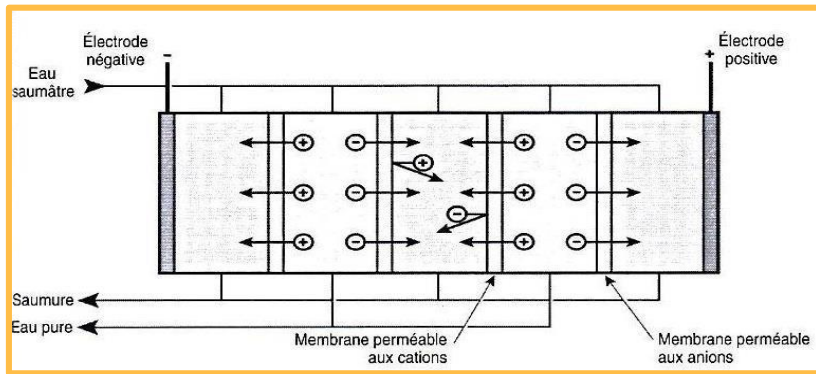
Dans la nature, les membranes jouent un rôle important pour séparer les sels. Des processus de dialyse et d'osmose se produisent dans les organismes vivants. Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants : l'électrodialyse (ED) et l'osmose inverse (OI).

### I.7.1 Electrodialyse

L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce. L'ED a été introduite sur le marché au début des années 1960.

C'est un procédé électrochimique qui permet l'extraction des ions solubles dans l'eau par migration à travers des membranes cationiques et anioniques. Ce procédé de séparation est

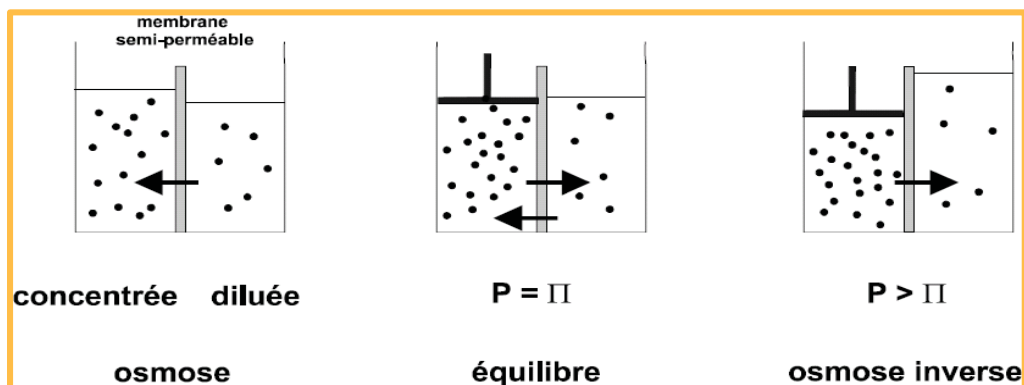
schématisé dans la figure ci-dessous **Figure I.8** ; sous l'action d'un champ électrique, les ions positifs traversent les membranes cationiques et les négatifs traversent les membranes anioniques. Ce procédé ne permet pas l'élimination des molécules organiques neutres. Le nettoyage des membranes est effectué automatiquement par inversion du courant électrique. En termes d'énergie ce traitement devient coûteux pour des eaux caractérisées par une salinité supérieure à 5 g/ [13].



**Figure II.8** : Dessalement d'une eau saline par électrodialyse.

### I.7.2 Osmose inverse

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentration différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Il est possible d'inverser l'opération en exerçant une pression sur la solution concentrée et faire migrer les plus petites molécules d'eau, c'est l'osmose inverse. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression. [11].



**Figure I.9** : Principe de fonctionnement de l'osmose inverse.

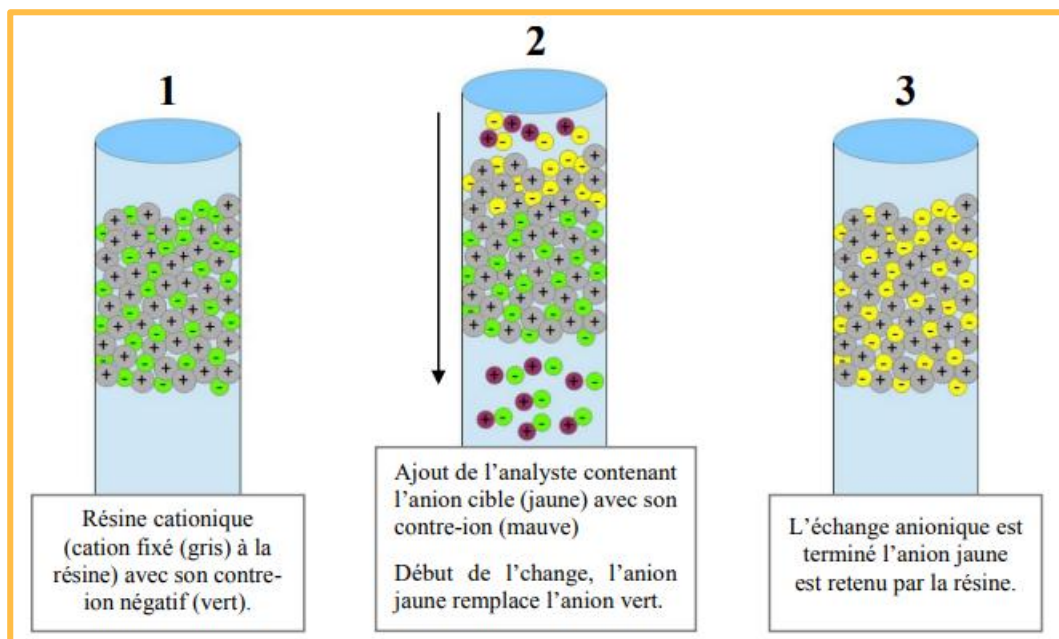
## I.8 Procédé chimique

Un procédé chimique est une méthode ou un ensemble d'opérations permettant de modifier la composition chimique d'une ou plusieurs substances. Ce procédé peut survenir naturellement ou être artificiellement créé. Les procédés chimiques les plus connus sont présentés ci-dessous :

### I.8.1 L'échange d'ions

L'échange d'ions est un processus qui élimine les sels dissous de l'eau en utilisant des substances insolubles appelées échangeurs d'ions pour échanger avec les ions présents dans l'eau (**Figure I.10**) [14].

Le procédé a longtemps été utilisé pour adoucir l'eau et est aujourd'hui utilisé pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer, où l'eau saumâtre est également utilisée dans de nombreuses zones industrielles et agricoles.



**Figure I.10** : Schéma des étapes de l'échange anionique.

Le principe est simple : l'eau contenant des sels dissous entre en contact avec un échangeur d'ions. Les ions présents dans l'eau sont échangés avec les ions présents sur l'échangeur.

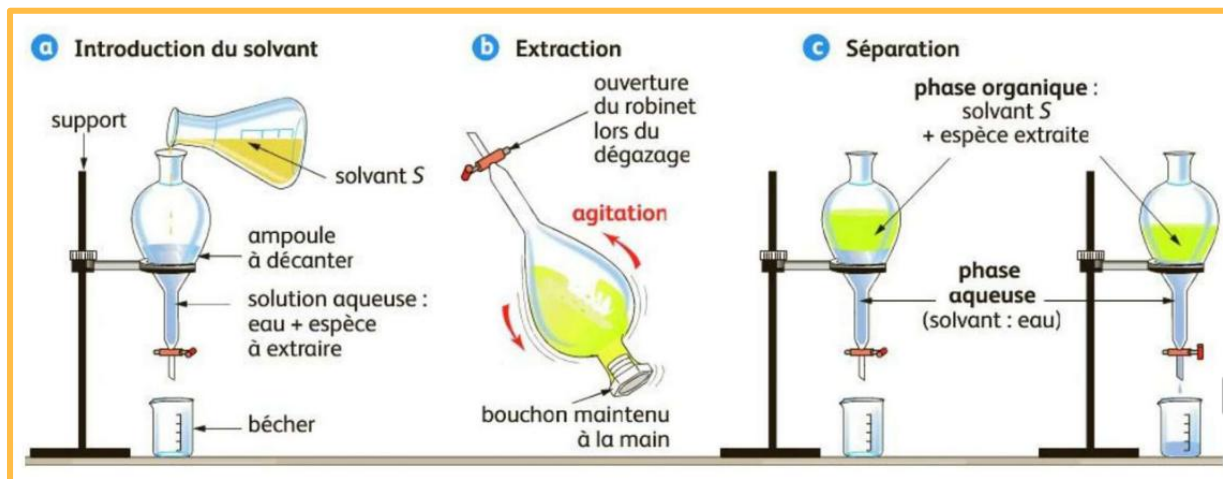
Afin d'obtenir de l'eau potable, un double échange d'ions doit se produire. Deux types d'échangeurs d'ions sont alors utilisés : les résines cationiques, qui absorbent les ions positifs, et les résines anioniques, qui absorbent les ions négatifs.

Après une certaine période d'utilisation, l'échangeur d'ions doit être régénéré pour restaurer sa capacité d'échange.

### I.8.2 L'extraction par solvant

L'extraction par solvant, en tant que méthode de dessalage, implique le transfert de solutés d'une solution liquide vers un solvant non miscible (**Figure I.11**). Ce procédé suit le principe de l'extraction liquide-liquide, aboutissant à un solvant enrichi en solutés et à une solution de départ appauvrie en solutés [15].

Une extraction par solvant peut être effectuée de différentes façons, telles que l'échange d'ions et le transfert de molécules ou d'agrégats d'ions neutres [14]. Dans le cas du dessalement de l'eau de mer, les méthodes d'extraction par solvant opèrent soit pour extraire l'eau jusqu'au solvant, soit pour extraire le sel. Afin d'assurer l'efficacité du processus, il est nécessaire de régénérer et de recycler le solvant en le chauffant, ce qui entraîne une modification importante de son pouvoir solvant en fonction de la température. La sélection du solvant est donc cruciale pour évaluer l'efficacité du processus de dessalement. Il est possible d'extraire l'eau en utilisant des amines secondaires et tertiaires, tandis que l'extraction du sel requiert l'emploi de solvants polymères.



**Figure I.11** : Schéma des étapes de l'extraction par solvant.

Cependant, cette dernière méthode n'est pas couramment utilisée en raison de l'exigence d'une immiscibilité totale entre le solvant et l'eau. Bien que l'extraction par solvant soit prometteuse en tant que technique de dessalement, elle n'a pas encore été largement utilisée

au niveau industriel à cette fin particulière. Néanmoins, il présente des possibilités intéressantes pour le traitement de l'eau et la production d'eau douce à partir de sources d'eau non traitées

### **I.9 Les coûts du dessalement**

Les coûts du dessalement exprimés en USD/m<sup>3</sup> d'eau douce produite dépendent de la technologie, de la taille de l'installation et de la teneur en sel de l'eau traitée. Les technologies membranaires peuvent produire de l'eau de bonne qualité à partir d'eau saumâtre avec un coût de 0,50 USD/m<sup>3</sup>. Les coûts, toutefois, sont plus élevés pour traiter l'eau de mer, le mètre cube produit à un coût estimé entre 0,5 et 1,1 USD pour l'osmose inverse et entre 0,65 et 1,8 USD pour la distillation. Les technologies thermiques tendent à être plus onéreuses que les technologies membranaires. Actuellement, les coûts des deux technologies affichent une tendance à la baisse. Elles peuvent bénéficier toutes les deux des économies d'échelle mais les coûts des technologies membranaires diminuent aussi en raison de leur développement incessant qui conduit à des gains d'efficacité [16].

# **Evaporation et les différents problèmes techniques**



L'évaporation est une technique, qui consiste à éliminer le solvant d'un échantillon en le vaporisant progressivement de l'état liquide à l'état gazeux, essentiel dans les procédés industriels comme le dessalement. Elle dépend de la température et de la pression, nécessite un apport de chaleur, et permet la séparation du solvant et du soluté. Comprendre ses mécanismes thermodynamique est crucial pour optimiser les évaporateurs et limiter les problèmes techniques tels que l'entartrage et la corrosion.

## **II.1 Notion d'évaporation**

L'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive. Lorsqu'il existe un volume libre au-dessus d'un liquide, une fraction des molécules composant le liquide est sous forme gazeuse. À l'équilibre, la quantité de matière sous forme gazeuse définit la pression de vapeur saturante dans le cas d'un liquide (solvant) pur, et qui dépend de la température. Cette pression peut être partielle ou totale.

Lorsque la pression partielle de la vapeur dans le gaz est inférieure à la pression de vapeur saturante et que celle-ci est elle-même inférieure à la pression totale ambiante, une partie des molécules passent de la phase liquide à la phase gazeuse : c'est l'évaporation, qui demande de fournir la chaleur latente correspondante, ce qui refroidit le liquide. On parle de déplacement vers l'équilibre, l'équilibre étant caractérisé par l'égalité simultanée de la pression partielle et de la pression de vapeur saturante du liquide d'une part, et des températures d'autre part (à l'équilibre, les bilans des flux de chaleur et de matière sont nuls, les masses et les températures sont constantes). Lorsque le solvant n'est pas pur, les liaisons entre solvant et soluté diminuent la pression de vapeur en équilibre avec la phase condensée ou adsorbée, l'équilibre étant toujours défini par un flux nul (chaleur et matière) : dit autrement, à une température donnée, la pression de vapeur en équilibre n'est plus forcément saturante dans ce cas. On parle alors d'une diminution d'activité du solvant [17].

## **II.2 Que fait l'évaporateur ?**

La conception d'un évaporateur se compose de trois éléments principaux :

- ✓ Un transfert thermique,
- ✓ Séparation liquide/vapeur,
- ✓ Efficacité d'énergie.

Dans la plupart des cas le dissolvant est l'eau, la chaleur est assurée en condensant la vapeur, et la chaleur est transférée par transfert thermique indirect à travers les surfaces métalliques.

Pour avoir un rendement optimal d'un évaporateur, l'équipement sélectionné et utilisé doit pouvoir accomplir tous ceux qui suivent :

1. Transférez un grand nombre de chaleur à la solution avec une minimum quantité de superficie. Cette condition, plus que tous d'autres facteurs déterminent le type, la taille et le coût du système d'évaporation.

2. Réalisez la séparation spécifique du liquide et de la vapeur en la faisant avec les dispositifs les plus simples. La séparation peut être importante pour plusieurs raisons : valeur du produit autrement perdu ; pollution ; encrassement de l'équipement en aval. La séparation insuffisante peut également avoir comme conséquence des problèmes de pompage ou une opération inefficace due au recyclage non désiré.

Aujourd'hui beaucoup de types d'évaporateur sont en service dans une grande variété d'application. Il n'y a aucune règle d'ensemble concernant la sélection des types d'évaporateur. Dans beaucoup de domaines plusieurs types sont employés d'une manière satisfaisante pour des services identiques.

La sélection finale et la conception peut souvent résulter de la tradition ou de l'expérience antérieure. La grande variation en solution les caractéristiques augmentent l'opération de l'évaporateur et conçoivent de transfert de chaleur simple à un art distinct [18].

## **II.3 Problèmes de l'évaporation**

Toutes les applications de l'évaporation ne peuvent pas être un seul type d'appareil. Il faut donc adapter les évaporateurs aux les problèmes spécifiques dont les principaux sont énumérés ci-après.

### **II.3.1 Problème de l'entartrage**

#### **II.3.1.1 Définition**

L'entartrage est un phénomène redouté dans les installations de dessalement, il est généralement associé à la production d'un solide cristallin, formé lors de la précipitation de sels

inorganiques (calcium, magnésium, bicarbonate, sulfate) dans un fluide en écoulement, avec une sursaturation issue d'un chauffage ou d'un refroidissement du fluide [19].



**Figure II.1 :** Résistance de chauffe-eau électrique entartrée.

### II.3.1.2 Principaux dépôts de tartre rencontrés en dessalement

Les dépôts de tartre que l'on rencontre le plus fréquemment dans les installations de dessalement sont :

- ✓ Le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  (calcite, aragonite).
- ✓ Le sulfate de calcium (anhydrite, hemihydrate, gypse).
- ✓ L'hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (brucite).
- ✓ Des silicates de calcium dont  $\text{CaSiO}_3$ .
- ✓ Des silicates de magnésium dont  $\text{MgSiO}_3$ .
- ✓ Le silico-aluminate de sodium (analcite).
- ✓ Le ferro silicate de sodium (acmite).
- ✓ La silice  $\text{SiO}_2$ .

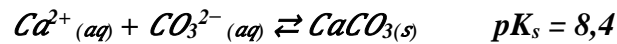
Des matières occluses (oxydes de fer, matières en suspension, matières organiques, sels peu solubles d'autres métaux) sont souvent renfermées dans ces dépôts de tartre.

La composition des dépôts dépend de la température :

- En dessous de 85°C, le dépôt de CaCO<sub>3</sub> presque pur.
- De 85°C à 120°C, il y a prédominance de Mg (OH)<sub>2</sub>.
- Au-dessus de 120°C il y a prédominance de CaSO<sub>4</sub> [5]

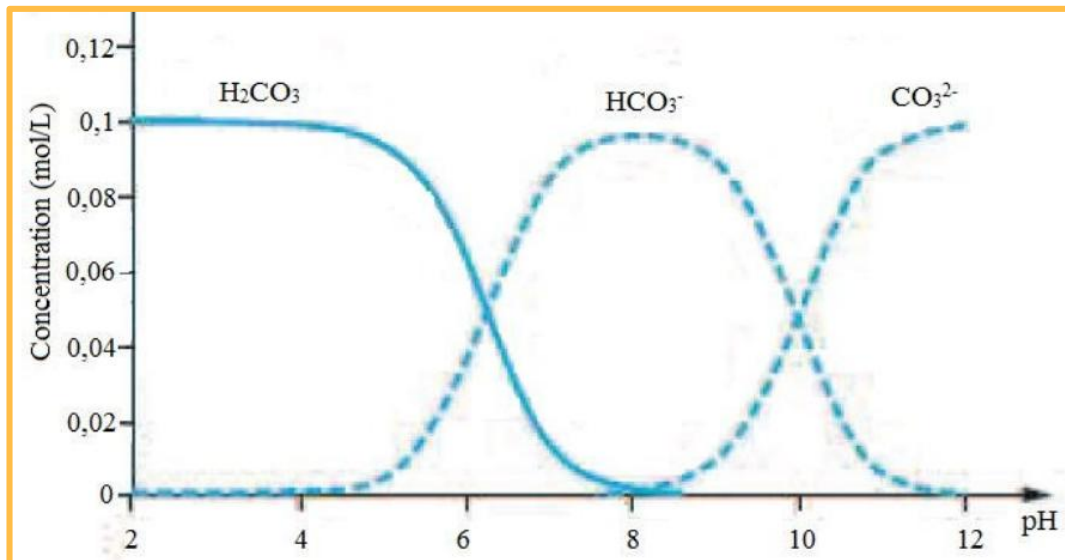
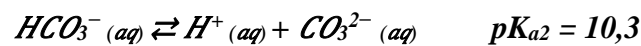
### II.3.1.2.1 Le carbonate de calcium

Le carbonate de calcium est le minéral le plus répandu dans les précipités minéraux. C'est le responsable principal de l'entartrage. Il se forme selon la réaction suivante :



Le carbonate de calcium est un composé insoluble avec un produit de solubilité minimal K<sub>s</sub> de 3,36×10<sup>-9</sup> relatif à la calcite, forme polymorphique la plus stable d'un point de vue thermodynamique, donc la plus insoluble et aussi la plus entartrante.

La formation de CaCO<sub>3</sub> est fortement impactée par le pH du milieu en raison du caractère di-basique des carbonates, comme le montre les deux équations suivantes et la figure (II.2).



**Figure II.2 :** Diagramme de prédominance des espèces carbonatées en fonction du pH [20].

La teneur en calcium, en carbonate ainsi que le pH impactent donc la formation du tartre, tout comme la température qui constitue un paramètre majeur. En effet, la solubilité du carbonate de calcium décroît avec la température (solubilité inverse), et les cinétiques de

nucléation et de croissance augmentent. Le carbonate de calcium est donc propice à se former dans une eau de refroidissement qui passe au sein d'un échangeur, ou dans une eau froide que l'on souhaite chauffer.

Le degré  $\beta$  de sursaturation traduit l'écart à l'équilibre thermodynamique, et se quantifie de la manière suivante :

$$\beta = \frac{C}{C_{eq}}$$

Avec,

$\beta$  : degré de sursaturation

$C$  : concentration initiale du soluté dans la solution

$C_{eq}$  : solubilité

Ainsi, si le degré de sursaturation est supérieur à 1, le solide se formera. S'il est inférieur à 1, une dissolution du solide sera favorisée thermodynamiquement.

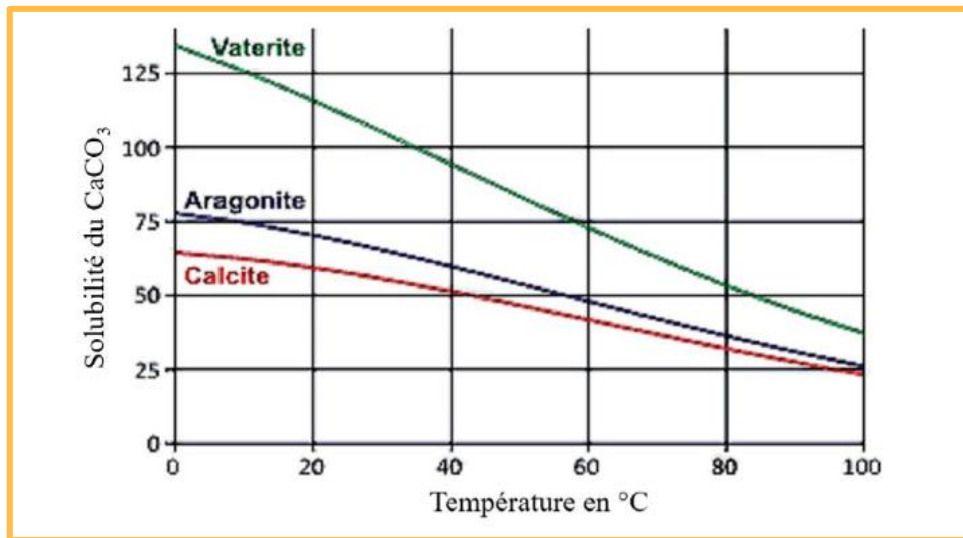
La précipitation de  $\text{CaCO}_3$  dans l'eau est liée à son équilibre calco-carbonique, en particulier aux ions calcium et aux espèces carboniques. La cristallisation s'effectue en deux étapes successives [21] :

- Nucléation ou germination qui correspond à la naissance des cristaux.
- Croissance cristalline qui correspond à la croissance des cristaux.

#### II.3.1.2.1.1 Différentes formes du carbonate de calcium

##### a. Le carbonate de calcium cristallin

Pour les sels qui présentent une solubilité inverse, c'est au contact de la paroi chauffante, où la température sera maximale, que la solubilité sera minimale, comme le montre la courbe de solubilité de trois polymorphes du carbonate de calcium dans la **figure III.3** en résulte une précipitation du carbonate du calcium sur la paroi d'échange, ainsi que dans l'eau qui est chauffée.



**Figure II.3 :** Courbe d'équilibre solide/liquide de trois polymorphes du carbonate de calcium.

La précipitation du carbonate de calcium peut s'effectuer sous trois formes polymorphiques différentes. La composition chimique est la même, mais la stabilité thermodynamique et la structure cristalline sont différentes.

On distingue :

- **La calcite :** C'est la variété thermodynamiquement stable à la température ambiante et la plus fréquemment observée dans la nature. Sa maille élémentaire est rhomboédrique à faces centrées, c'est la forme cristallographique la moins soluble (**Figure III.4**).



**Figure II.4 :** La calcite dans la nature.

- **L'aragonite** : Elle cristallise dans le système orthorhombique et se présente en général sous forme d'aiguilles (**Figure II.5**). Elle est métastable à la température ordinaire et se transforme en calcite.



**Figure II.5** : Aragonite sous forme d'aiguilles.

- **La vaterite** : Elle cristallise dans le système hexagonal. Du fait de sa grande instabilité au contact avec l'eau à température ambiante, ses caractéristiques sont mal connues. Le faciès le plus couramment observé est dit en lentilles (**Figure III.6**) mais on rencontre aussi des faciès en forme de « fleur » ou en forme « de roses des sables ».



**Figure II.6** : la vaterite sous forme de lentille.

**b. Le carbonate de calcium amorphe**

Il est obtenu facilement par précipitation très rapide du carbonate de calcium. Par exemple, par évaporation rapide à basse température de solution de carbonate de calcium, on obtient un précipité blanc gélatineux, très hydraté et instable, qui évolue rapidement vers la calcite (**figure II.7**).



**Figure II.7** : carbonate de calcium.

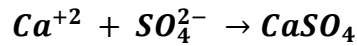
**II.3.1.2.2 Les sulfates**

Les dépôts de sulfates sont dus généralement au mélange d'eaux incompatibles, mais ils peuvent également précipiter par concentration comme les autres sels.

Dans l'eau de mer, les teneurs en  $Ba^{2+}$  et  $Sr^{2+}$  sont très faibles du fait de la forte teneur en sulfate et de la faible solubilité des sulfates de baryum et de strontium. Par contre, la teneur en  $Ca^{2+}$  étant beaucoup plus élevée, il y aura un risque de précipitation de sulfate de calcium par chauffage et/ou concentration de l'eau de mer.

La précipitation du sulfate anhydre  $CaSO_4$  (anhydrite) conduit à la formation d'un dépôt dur, compact, avec des grains fins. La solubilité de  $CaSO_4$  dépend principalement de la température, de la pression et d'autres composés dissous.

Les sulfates hydratés de calcium  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (gypse) et  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  (hémihydrate) précipitent sous forme d'un dépôt compact avec des cristaux allongés. Leurs solubilités dépendent des mêmes paramètres que celle du sulfate anhydre. La réaction de précipitation est la suivante [8] :

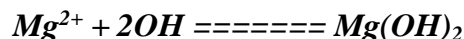
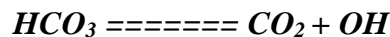
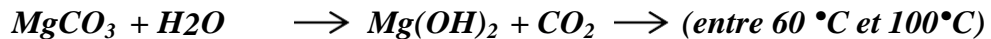


$$K_s = a_{\text{Ca}^{2+}} * a_{\text{SO}_4^{2-}}$$

### II.3.1.2.3. Les hydroxydes

L'hydroxyde le plus courant est l'hydroxyde de magnésium, mais on ne le rencontre pas aussi souvent que les sulfates et les carbonates.

La précipitation de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  se produit souvent dans les bouilleurs/ évaporateurs par suite d'un traitement insuffisant de l'eau. L'évaporation de l'eau de mer à des températures élevées et/ou à des pH élevés entraîne la précipitation selon les réactions suivantes :



Il s'agit donc de la décomposition des carbonates ou des ions bicarbonates qui conduit à l'alcalinisation de l'eau et ensuite à la précipitation de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

### II.3.1.3 Traitements antitartres

Le  $\text{CaCO}_3$  cristallisé sur la surface d'échange ne peut être éliminé sans une action conséquente sur l'installation. C'est un phénomène qui concerne un grand nombre d'équipements industriels, notamment ceux impliquant des surfaces d'échange thermique.

Les différents traitements envisagés sont les suivants :

### II.3.1.3.1 Traitement chimique

Le traitement chimique est couramment utilisé pour inhiber la formation du tartre. Il bloque la germination et/ou il empêche la croissance du tartre déjà formé. Généralement, les inhibiteurs de base chimique sont classés en fonction de leur formulation en trois catégories :

#### ✓ Inhibiteurs naturels

Plusieurs groupes de recherche ont testé le pouvoir inhibiteur de produits naturels à base de plantes ou encore de produits de synthèse. L'avantage de ces produits est qu'ils sont biodégradables, écologiques et peu onéreux [22,23]. Les arbres qui poussent dans des conditions de sols calcaires ont par exemple une forte capacité à accumuler le calcium. De plus, ces plantes sont riches en polyphénols et en polysaccharides. Les groupements hydroxyles et carboxyles de ces molécules peuvent complexer les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , ce qui leur confèrent un rôle antitartre relativement intéressant [24].

#### ✓ Inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques sont des inhibiteurs à base de phosphore, généralement utilisés dans les installations industrielles et dans les stations de dessalement d'eau de mer. Ces inhibiteurs tels que les polyacrylates, polysulfonates, polyacrylamides et polyacrylonitriles peuvent être appliqués en cours de fonctionnement, et agissent au sein de l'eau soit par réaction chimique à travers une complexation des cations précurseurs du tartre, soit par inhibition des étapes de germination et de croissance cristalline. Dans le même temps, la surface du métal ne subit aucun traitement [25].

De très faibles concentrations de polycarboxylate ou d'acide polyaspartique peuvent inhiber la formation du tartre. Ils sont largement connus dans le domaine industriel pour leur action antitartre. Une concentration de  $1,4 \text{ mg.L}^{-1}$  de polycarboxylate est suffisante pour empêcher la précipitation de carbonate de calcium [25].

#### ✓ Inhibiteurs minéraux

L'utilisation des inhibiteurs minéraux consiste à injecter des substances minérales dans l'eau à traiter. Ces minéraux ont notamment un effet sur le polymorphisme des germes de carbonate de calcium, ce qui conduit à une diminution de la vitesse de croissance des cristaux. Cette technique a donc un effet direct sur le type de germination.

Wada et al ont montré que la présence des cations  $Zn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  et  $Cd^{2+}$  dans le milieu réactionnel favorise la formation de l'aragonite au lieu de la calcite.

Une autre étude a montré que la présence de  $SO_4^{2-}$  favorise la précipitation de carbonate de calcium sous forme de vaterite et inhibe partiellement la formation de calcite. Quant à Rosset et al. (Rosset R. et al. 1999), ils ont confirmé que la présence du triphosphate de sodium à une concentration de  $0,75 \text{ mg.L}^{-1}$  permet d'inhiber la formation du carbonate de calcium [25].

### II.3.1.3.2 Traitement mécanique

Traitement mécanique des équipements nécessite une force mécanique pour décoller les dépôts épais est très dure. Il est basé aussi sur un nettoyage avec de l'eau à haute pression, qui peut aller jusqu'à 3 000 bars assurent un nettoyage efficace.

D'autres méthodes ont récemment vu le jour pour l'auto-nettoyage mécanique des équipements pendant leur fonctionnement. Ces systèmes utilisent les sorties de température dans une simulation et un contrôleur Digital Twin pour identifier le moment où l'encrassement atteint un certain seuil et déclencher une réponse de nettoyage. La décision finale de nettoyage est prise de manière autonome en fonction de l'état de l'équipement. Des systèmes intelligents sont nécessaires pour reconnaître automatiquement le seuil d'encrassement et prendre des mesures pour éliminer l'encrassement mou, sans intervention humaine, par des jets d'eau. Mais ces systèmes sont encore complexes à mettre en œuvre, et avec une forte demande en eau [26].

Les méthodes actuelles de traitement de l'encrassement des installations, qu'elles soient chimiques ou mécaniques, consistent soit à surdimensionner l'équipement, soit à appliquer des traitements pendant son fonctionnement [25].

### II.3.1.3.3 Traitement physique

#### ✓ Ultrasons

Les ultrasons font partie des ondes mécaniques sonores qui provoquent des perturbations mécaniques de l'état d'équilibre d'un milieu, produisant une variation des propriétés physiques locales. Elles se propagent dans plusieurs milieux élastiques (gaz, liquide ou solide). Leur gamme de fréquence se situe entre 16 kHz et 1 GHz.

Le traitement du tartre par ultrasons dans l'industrie repose sur la cavitation acoustique, un phénomène où des micro-bulles se forment et implosent violemment.

### ✓ Champ électromagnétique

Une onde électromagnétique est le résultat de la vibration couplée d'un champ électrique et d'un champ magnétique variables dans le temps. L'utilisation d'une onde électromagnétique dans un liquide comme l'eau est connue pour prévenir l'entartrage.

On connaît par exemple des systèmes qui utilisent des bobines pour protéger des conduites d'eau domestique ou industrielle pour éviter leur entartrage, ces bobines sont enroulées autour des conduites afin de transmettre un champ électromagnétique à l'eau qu'elles contiennent, pour but de changer les propriétés chimiques et physiques des ions de calcium et magnésium dissous dans l'eau de façon à ce qu'ils restent dans la solution même si l'eau traitée est chauffée.

## II.3.2 Problème de corrosion

### II.3.2.1 Notions de corrosion des métaux

Le terme de corrosion provient du latin corroder, qui signifie ronger, attaquer. Il est défini selon la norme ISO 8044, étant que : « interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs ».

La corrosion métallique est le phénomène suivant lequel les métaux et alliages ont tendance, sous l'action de réactifs chimiques ou d'agents atmosphériques, à retourner vers leur état original d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable dans le milieu ambiant [27].

### II.3.2.2 Différents types de corrosion

Le processus de corrosion des métaux prend de nombreuses formes, qui sont classées principalement selon la forme qui se manifeste à la surface corrodée :

- La corrosion uniforme,
- La corrosion localisée.

### II.3.2.2.1 Corrosion uniforme

La corrosion uniforme ou généralisée est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface (**figure II.8**). Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif. Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques. Les concepteurs d'appareillages peuvent en tenir compte en prévoyant des surépaisseurs consommables par la corrosion. Ce type de corrosion est donc souvent peu dangereux même s'il peut être très couteux.



**Figure II.8** : Corrosion généralisée d'un support métallique.

### II.3.2.2.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée survient sur une partie du métal à un taux bien supérieur au reste de la surface (**Figure II.9**), elle peut avoir plusieurs formes, De façon globale, Si la progression de la corrosion s'accomplit à une vitesse uniforme en tout point de la surface, on parle de corrosion uniforme. Si la progression des vitesses de corrosion est non homogène, on parle de corrosion localisée.



**Figure II.9 :** Corrosion localisée d'une bride (corrosion galvanique).

Les principales formes de la corrosion localisée et leur prévention :

#### **A. Corrosion Galvanique**

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif subit une corrosion accélérée par l'autre métal.

##### **❖ Prévention**

- Sélectionner des métaux très près les uns des autres dans l'échelle galvanique ;
- Éviter de présenter une petite surface anodique en regard d'une grande surface cathodique ;
- Isoler deux métaux dissemblables ;
- Utiliser des inhibiteurs.

#### **B. Corrosion Caverneuse**

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.

##### **❖ Prévention**

- Les assemblages soudés sont préférables aux assemblages boulonnés ;
- Inspecter et enlever les dépôts régulièrement ;

- Augmenter la vitesse de circulation des fluides ;
- Affiner l'état de surface.
- 

### **C. Corrosion Par Piqures**

C'est une forme de corrosion localisée produite par certains anions, notamment les halogènes et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.

#### **❖ Prévention**

- Augmenter la vitesse de circulation des fluides ;
- Affiner l'état de surface.

### **D. Corrosion Sous-Contrainte**

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action conjointe d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

#### **❖ Prévention**

- Abaissement des contraintes par se recuit ou relaxation des contraintes résiduelles ;
- Elimination de l'élément corrosif dans l'environnement ;
- La protection cathodique est efficace quand la fissure se propage par dissolution d'ions métalliques.

### **II.3.2.3 Traitement de la corrosion**

La protection contre la détérioration des métaux peut se faire en agissant soit sur la nature du milieu exemple l'eau, soit sur la nature du métal. Les méthodes de protection et de prévention contre la corrosion sont les suivantes :

- Electrochimique ;
- Protection par les inhibiteurs de corrosion ;
- Protection par revêtement ;
- Prévention par un choix judicieux des matériaux ;
- Prévention par une forme adaptée des pièces.

### II.3.3 Problème de colmatage

#### II.3.3.1 Notion de colmatage

Les eaux de mer ou eaux saumâtres contiennent la plupart du temps des matières organiques en suspension qui vont avoir tendance à se déposer sur les surfaces d'échange et à les colmater. Il va en résulter une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production de l'installation. Le développement de microorganismes, dans les parties des installations où les conditions physico-chimiques le permettent, peut accentuer le phénomène par suite de la formation de films biologiques sur les surfaces de transfert (biofouling).

#### II.3.3.2 Traitement de colmatage

Depuis longtemps, les composés de chlores sont utilisés pour désinfecter les systèmes d'apport d'eau de mer et l'usine située en amont, afin de prévenir les salissures. Habituellement, on ajoute du chlore à raison de 2 ppm. Un procédé bien conduit vise à obtenir une concentration de chlore nulle à l'émissaire [28].

D'autres biocides comme les sels de cuivre ont été essayés avec un succès variable et en de nombreux sites, le rejet de cuivre dans la saumure est très inférieur à 1 mg. Cependant, ce niveau est encore peu satisfaisant en raison du dommage qui peut en résulter pour l'environnement par suite de l'accumulation du métal.

### II.3.4 Problème de la mousse

#### II.3.4.1 Notion de moussage

Il est admis qu'une solution contenant une impureté qui abaisse la pression de vapeur par rapport à celle du solvant pur a tendance à produire une mousse stable si l'on dégaze ou si l'on fait bouillir cette solution. L'évaporateur est donc l'appareil idéal pour provoquer la formation de mousses persistantes (moussage).

Dans le processus d'évaporation, il est indispensable de veiller à ce que la vapeur séparée entraîne avec elle le moins de liquide possible. Si le liquide traité mousse, la vapeur séparée se présente sous forme de bulles discontinues enfermées dans une pellicule de liquide. Ces bulles, très légères, sont entraînées et la quantité de liquide qui accompagne ainsi la vapeur peut être si importante qu'elle rende l'évaporateur inapte au service demandé.

La mousse est détruite si la pellicule constituant l'enveloppe des bulles est soumise à une contrainte supérieure à sa limite élastique [29].

#### II.3.4.2 Traitement de la mousse

Les moyens de combattre le phénomène de moussage peuvent être répartis en trois méthodes :

- **Mécanique** : tout choc mécanique (brise-mousses, pulvérisation, arrosage, ondes soniques, effet de vitesse) appliqué à une bulle peut en provoquer la rupture si la contrainte qui en résulte est suffisante ;
- **Thermique** : la surchauffe de la couche de mousse par un serpentin de vapeur, qui se trouve au-dessus du niveau de liquide, conduit à l'éclatement de la bulle
- **Chimique** : l'utilisation des agents antimousse (produits tensioactifs), quand ils sont adaptés, peuvent avoir une action rapide et durable sur la production de mousse [29].

#### II.3.5 Autres problèmes de l'évaporation

##### ➤ Sensibilités à la température

Certains produits, les corps organiques principalement, sont décomposés s'ils sont soumis à une température trop élevée. L'évaporation de ce type de solutions doit être réalisée de telle sorte que les conditions critiques (température / temps) de décomposition ne soient pas atteintes. Ainsi, si la paroi d'échange est à température élevée, il faut veiller à ce que le temps de séjour du liquide au contact de cette paroi soit limité [30].

##### ➤ Viscosité élevée

Si les solutions soumises à l'évaporation sont le plus souvent assez fluides, il arrive que l'on ait affaire à des solutions qui, par concentration, atteignent une viscosité telle que le produit s'écoule difficilement. Il se pose alors :

- Le problème de séparation de la vapeur, qui est résolu par un agencement convenable du séparateur (pas nécessairement une augmentation de section) ;
- le problème de l'homogénéité de la solution, surtout pour éviter la surconcentration de produit au contact de la paroi chauffante, qui ne peut être résolu que par augmentation de la turbulence au contact de cette paroi (circulation forcée, ou évaporateur à film agité. L'élévation

de température des solutions permet de diminuer la viscosité dans bien des cas, mais il arrive que les solutions soient à la fois visqueuses et sensibles à la température [18].

➤ **Précipitation des sels**

Lorsque l'évaporation provoque une cristallisation, il faut veiller à ce que les appareils permettent d'éviter le dépôt de sel cristallisé sur les surfaces d'échange ou sur les parois du cristalliseur. Contrairement au phénomène d'entartrage, il s'agit là d'un simple dépôt qui peut être évité par une agitation suffisante [09].

## **II.4 Contraintes de l'évaporation**

### **II.4.1 Sélection des matériaux**

L'eau de mer est un milieu naturellement très corrosif. L'élévation de sa température augmente encore la vitesse de corrosion. Le choix des matériaux doit donc être fait avec soins : durée de vie de l'installation, frais de maintenance et même qualité de l'eau en dépendent.

Pour les parties en contact avec l'eau de mer, il faut envisager au minimum des aciers inoxydables bas carbone voire pour les zones en contact avec de l'eau de mer chaude, ou les incondensables des alliages plus nobles tels que les aciers duplex, les cupronickels, le titane... [1].

### **II.4.2 Gaz incondensables**

Ces gaz (air, CO<sub>2</sub>...) sont normalement dissous dans l'eau de mer. Ils sont libérés grâce au vide partiel maintenu dans chaque cellule. Comme ils interfèrent avec les transferts de chaleur, le constructeur prévoit leur évacuation par pompe ou par éjecteur. Dans le cas du traitement antitartre par injection d'acide, le volume de dioxyde de carbone libéré est assez important pour qu'une étape de dégazage soit prévue en amont de la distillation.

Nota : ce dioxyde peut être récupéré et utilisé dans l'étape de reminéralisation de l'eau [17].

# **Présentation de l'unité de dessalement TCD 6-8000**



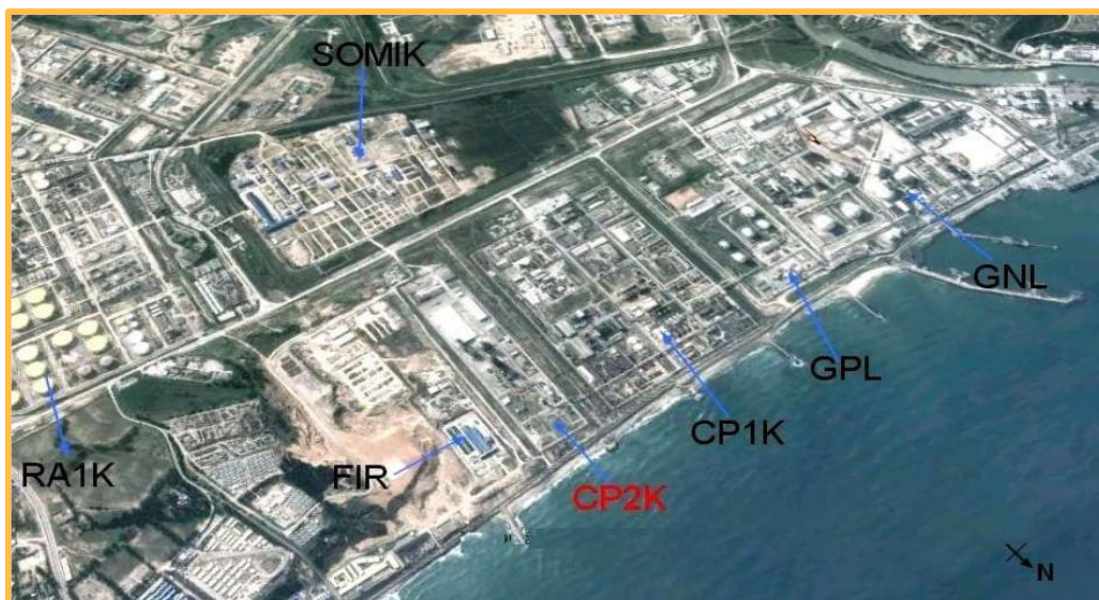
La présente unité de dessalement, de type TCD 6-8000, est un composant essentiel de la gestion durable des ressources en eau dans le complexe CP2K où l'accès à l'eau distillée est limité. Ce chapitre se propose d'examiner en détail l'architecture, le fonctionnement et les annexes de cette installation, soulignant son rôle crucial dans la production d'eau déminéralisé pour alimenter les chaudières.

### III. Description générale du complexe CP2K

#### III.1 Présentation du complexe

Le complexe PEHD (polymed ou cp2/k) est implanté à l'intérieure de la zone industrielle de Skikda, d'une superficie de 16,68 hectares dont 10% bâtis. Le projet PEHD se trouve sur la cote à 06 km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Skikda et à une hauteur moyenne d'environ 06 m au-dessus de la mer (**Figure III.1**). La Position géographique limitée comme suit :

- **Au Nord** : la mer Méditerranée
- **Au sud** : la route principale de la zone industrielle.
- **A l'Est** : FIR (La force d'intervention et de réserve).
- **A l'Ouest** : CP1K (complexe matière plastique).



**Figure III.1** : Position géographique du complexe CP2K.

### III.2 Découpage du complexe

Le complexe est composé de 04 zones importantes :

- ❖ **La zone off-site :** Elle regroupe les utilités telles que : les chaudières, l'air, l'azote, l'eau distillée, l'eau anti incendie, l'eau potable, ainsi que les installations auxiliaires telles que : la torche, le stockage de l'isobutane et de l'hexane, le traitement des eaux et l'activation du catalyseur.
- ❖ **La zone humide :** Elle comporte le réacteur, les différents traiteurs et les compresseurs.
- ❖ **La zone sèche :** Elle est composée de l'extrudeuse, des soufflantes, des silos de stockage des produits finis (poudre et granulé) ainsi que de la partie de l'ensachage
- ❖ **La zone bâtiment :** Elle comprend le bloc administratif et des finances, la cantine et les vestiaires, le bloc sécurité et infirmerie, le magasin des pièces de rechanges et l'atelier de maintenance, la sous station haute et basse tension ainsi que la salle de contrôle et le laboratoire [01].

### III.3 Organisation du complexe

Un organigramme résumant l'organisation du CP2K est présenté ci-dessous

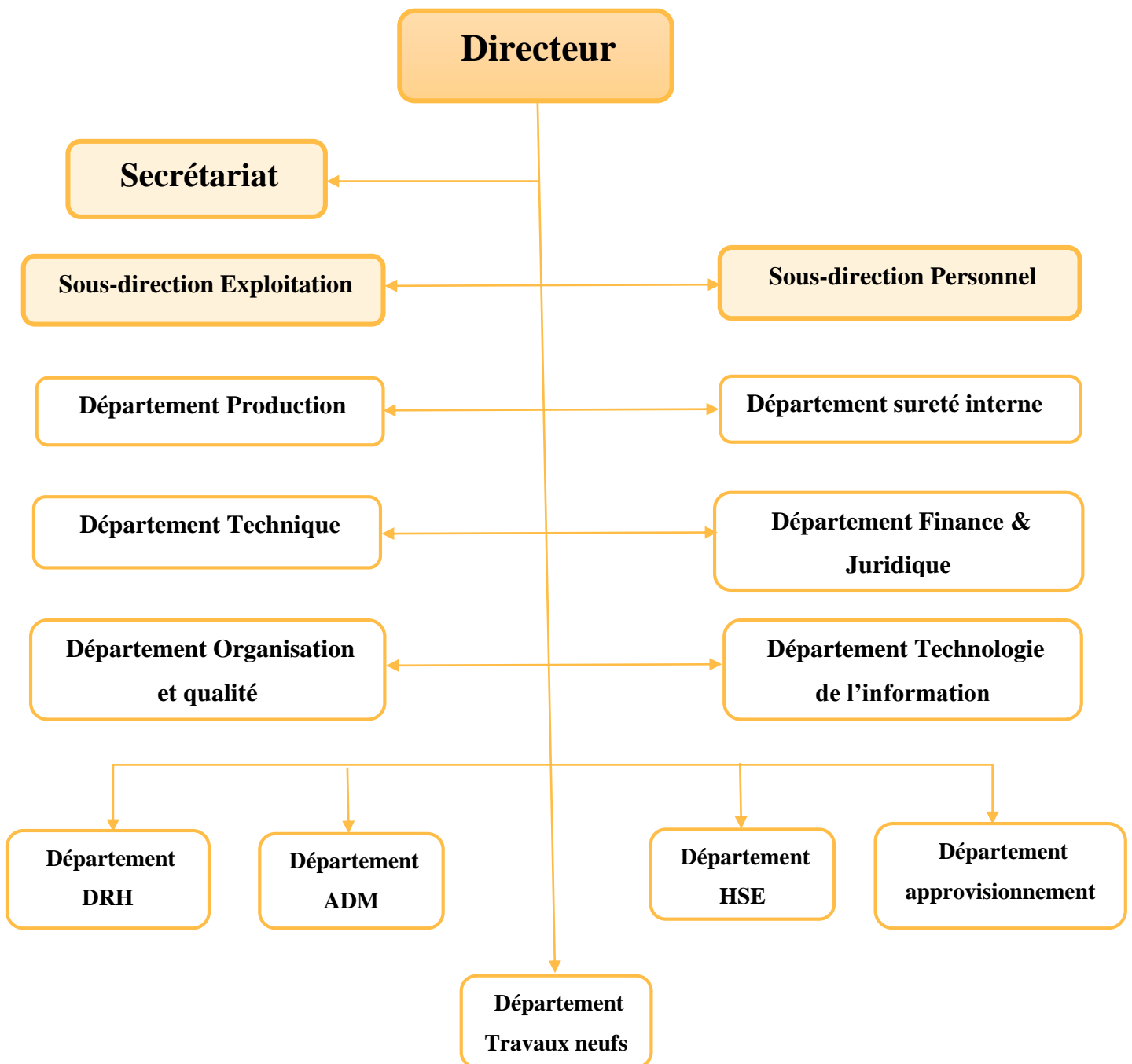


Figure III.2 : Organigramme général du complexe CP2K.

### III.4 Présentation de l'unité des utilités

Cette unité a démarré septembre 1977, son but est d'alimenter les autres unités par différents types de l'eau (l'eau de mer, l'eau distillée, l'eau déminéralisée) et de vapeur (haute, moyenne et basse pression).

Elle comprend sept 07 sections divisées en deux sous unités ;

- Unité d'eau pour la production d'eau distillée et déminéralisée.
- Unité d'énergie pour la production de la vapeur.

#### III.4.1 Unité d'eau

Elle se compose essentiellement de 6 sections :

- ✓ Prise d'eau de mer ;
- ✓ Section de prétraitement ;
- ✓ Station de pompage ;
- ✓ Section de dessalement ;
- ✓ Section de déminéralisation ;
- ✓ Section traitement des effluents.

##### III.4.1.1 Prise d'eau de mer

Cette section est constituée de :

- **Tête de prise**

La prise d'eau de mer doit permettre d'obtenir à l'entrée de l'usine de dessalement une eau de la meilleure qualité possible, avec un batardeau pour fermer/ouvrir le canal. Les spécifications générales de l'eau de mer sont les suivantes : une température de 28°C au maximum, une densité de 1.03 et une viscosité de 2 Cp. L'eau de mer d'alimentation du complexe est prétraitée par les unités de filtration.

- **Canal d'eau de mer**

C'est un canal de longueur d'environ 850 m et diamètre 3,5 m, destiné pour le transport d'eau de mer jusqu'à le bassin par gravitation, avec batardeau à l'entrée du bassin pour couper

l'eau de mer dans le cas on fait le nettoyage du bassin, dans ce bassin on trouve 4 batardeaux pour couper l'eau aux filtres rotatifs.

#### **III.4.1.2 Section de prétraitement**

Il y a 4 grilles fixées pour ne pas laisser passer les grandes déchets (les saches, bouteilles, ...), après chaque grille fixée il y a des filtres rotationnelles pour éliminer les déchets qui passent sur les grilles fixées. Ces derniers sont nettoyés automatiquement avec l'eau de mer en utilisant des pompes à l'énergie électrique, avec deux installations pour injecter les produits chimiques ( $Cl_2$  et  $NaOCl$ ) pour le traitement chimique.

#### **III.4.1.3 Station de pompage**

Il existe 3 pompes qui utilisent l'énergie électrique et une turbine, ces pompes aspirent l'eau du bassin et alimenter le collecteur, et 2 pompes contre l'incendie l'un électrique et l'autre diesel, chaque semaine on démarrer ces pompes 15-20 minutes.



**Figure IV.3 :** Collecteur des refoulements des pompes.

#### **III.4.1.4 Section de dessalement**

L'unité utilise la méthode TCD (Thermo-Compression Distillée) se composent de 6 cellules, avec production total de  $333\text{ m}^3/\text{h}$  de l'eau distillé et stocker dans 4 bacs.



**Figure IV.4 :** L'évaporateur TCD 6-8000.

#### III.4.1.5 Section déminéralisation

La section de déminéralisation sert à purifier 60 % de l'eau qui provient des retours de condensats et 40 % de celle en provenance de l'unité de dessalage pour avoir une eau de conductivité inférieure à  $1\mu\text{s}/\text{cm}$ . La déminéralisation de l'eau consiste à l'utilisation de deux ioniseurs remplis de résine, l'une cationique et l'autre anionique. Chaque ioniseur est relié avec un système de régénération automatique qui s'effectue par l'acide HCl et la soude (NaOH). Cette opération aura lieu lorsque le volume d'eau de production atteint  $19200\text{ m}^3$  où la conductivité est supérieure à  $1\mu\text{s}/\text{cm}$ , l'eau déminéralisée sera stocker dans deux bacs (WFB201 A, WFB201B)



**Figure IV.5 :** Ioniseur de la section déminéralisation.

### III.4.1.6 Traitement des effluents

Cette installation de traitement des effluents d'égouts est conçue pour traiter tous les effluents du complexe, afin de permettre l'élimination des substances flottantes ou celle en suspension et des matières dangereuses avant leur rejet vers la mer afin d'éviter toute éventuelle pollution du milieu naturel.



**Figure IV.6 :** section des effluents.

### III.4.2 Utilité d'énergie

Cette unité comprend :

#### III.4.2.1 Section chaudière

Avant l'utilisation de l'eau déminéralisée dans les chaudières il faut le traiter, parmi les traitements on a le dégazage, l'injection de  $N_2H_4$  (l'hydrazine) et le phosphate de sodium.

Les chaudières sont des équipements statiques destinées à :

- Produire de la vapeur à partir de l'énergie calorifique du combustible (gaz naturel, fuel, ...)
- Modifier les températures des fluides d'une température à une température désirée.

#### III.4.2.2 Section air/azote

Cette section est conçue pour produire de l'azote et de l'oxygène par un procédé de liquéfaction, elle produit  $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ , mais actuellement l'unité est en arrêt.

**III.4.2.3 Section d'énergie électrique**

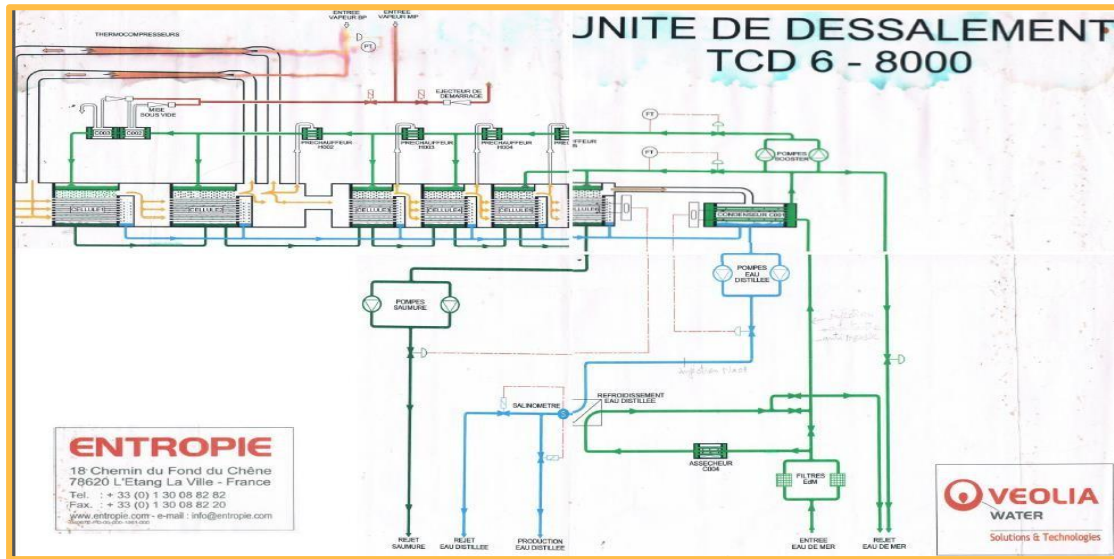
Cette section fournit toute l'énergie électrique au complexe pour fonctionner. Elle est constituée de deux ligne provenant de SONALGAZ d'une puissance de 64 KV, chacune est d'un turbo générateur fonctionnant à la vapeur haute pression qui produit de l'électricité de 18,7 KW relié en parallèle avec le réseau de SONALGAZ.

**II.5 Description du procédé de dessalement [28]****III.5.1 Description globale de L'évaporateur TCD 6-8000**

Les unités de dessalement de type TCD utilisent des évaporateurs tubulaires horizontaux arrosés. Afin d'assurer la production d'eau distillée avec un minimum de maintenance, elles sont construites avec des matériaux de haute qualité. L'espace autour des unités de dessalement doit être suffisant pour assurer le bon fonctionnement des machines ainsi que leur maintenance.

L'évaporateur est monté sur un châssis conçu pour supporter toutes les charges en fonctionnement et pendant les tests ce qui inclut les contraintes de dilatation, le vent et le poids de l'eau pendant le test hydrostatique.

L'évaporateur dispose d'ouvertures (trous d'homme ou trous de poing), de passerelles et d'échelles ou d'escaliers, pour permettre l'inspection, la maintenance, le remplacement des séparateurs, le nettoyage des plateaux d'arrosage ainsi que le rinçage des autres internes. Les cellules sont équipées de doigts de gant pour mesurer la température d'évaporation/condensation.



**Figure III.7 :** Schéma d'unité de dessalement par distillation

Toutes les internes de l'évaporateur (déflecteurs, tuyauteries, piquages ...) sont réalisées avec des matériaux résistants à l'eau de mer et à la saumure. L'acier n'est jamais utilisé pour les internes ou les surfaces en contact avec l'eau de mer, la saumure, l'eau distillée ou les gaz incondensables. Les surfaces internes en acier inoxydable sont passivées.

L'évaporateur et les échangeurs tubulaires qui y sont rattachés, sont conçus pour supporter les conditions maximales de pression ou de vide qui peuvent survenir pendant les tests ou en fonctionnement.

Un disque de rupture est monté sur l'unité de dessalement pour la protéger contre une pression excessive. Des anneaux de renforts extérieurs en acier sont sous l'évaporateur pour le renforcer. Le calcul et la construction se font suivant le code mentionné dans le document « TCD main codes and standards ».

**Tableau III.1 :** les pressions et les températures dans les cellules.

Cellule	1	2	3	4	5	6
T (°C)	68	64	57	51	45	39
P (bar.g)	<b>-0.7</b>	<b>-0.76</b>	<b>-0.82</b>	<b>-0.87</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.93</b>

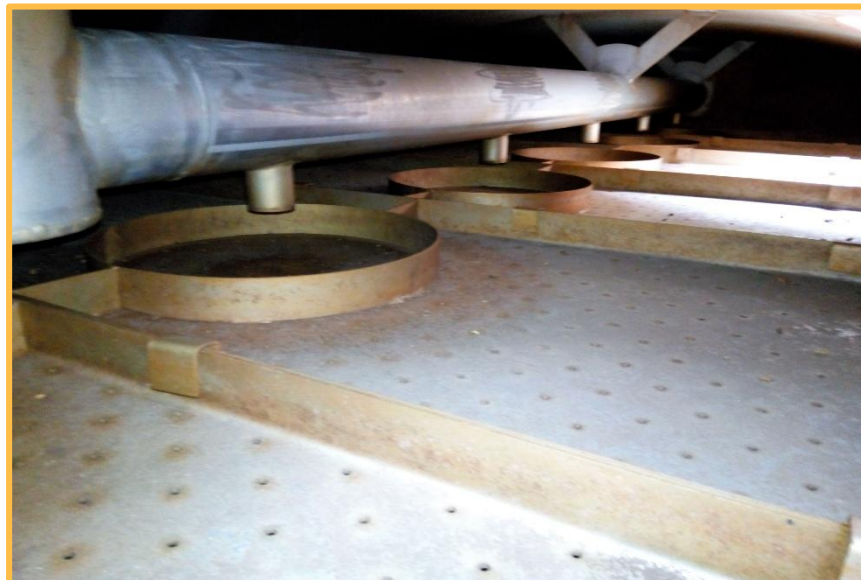
### III.5.2 Plateaux d'arrosage

Le système d'arrosage est fait de plateaux perforés qui sont installés au-dessus de chaque faisceau tubulaire et qui sont conçus pour permettre un arrosage régulier des tubes.

Ce système permet un mouillage homogène du faisceau tubulaire et permet d'éviter les zones mal arrosées qui sont sujet à l'entartrage.

De plus, la vitesse de l'eau de mer arrosant les rangées supérieures est bien inférieure à celle qui prévaut avec l'utilisation de buses, ce qui évite les problèmes d'érosion des rangées supérieures.

Pour empêcher le colmatage des trous des plateaux par la matière, l'alimentation d'eau de mer est habituellement filtrée dans un tamis des mailles de 1mm.



**Figure III.8** : Schéma des plateaux d'arrosage.

### III.5.3 Séparateurs

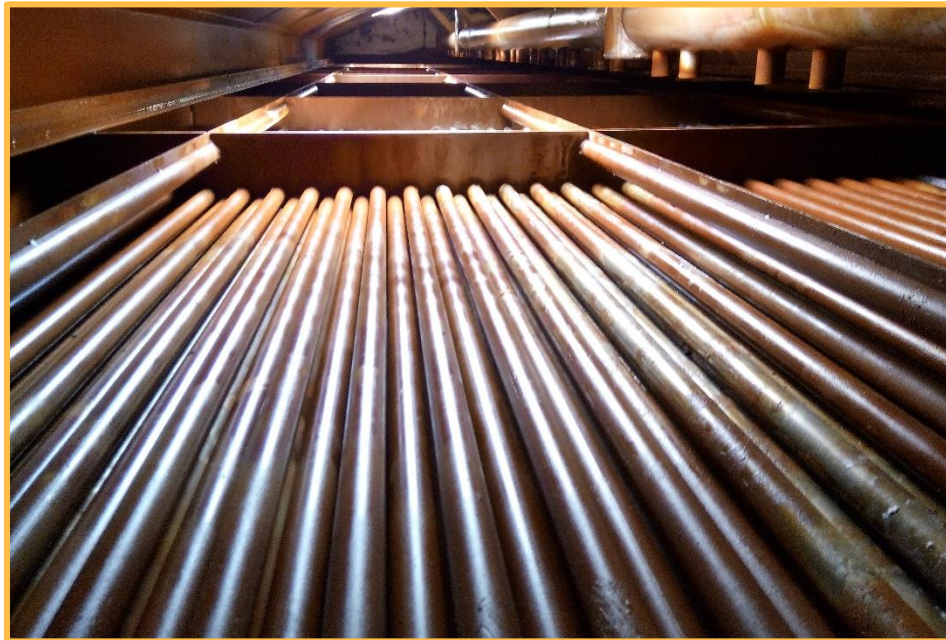
Entre les cellules et en amont de l'aspiration vapeur du thermo-compresseur, des séparateurs en métal tissé sont montés de façon à éviter l'entraînement de gouttelettes d'eau de mer qui augmenteraient la salinité de l'eau distillée produite. Les séparateurs sont montés de façon à limiter les fuites de vapeur et permettre leur démontage pendant les phases de maintenance.



**Figure III.9** : Les séparateurs (démisters).

#### III.5.4 Faisceau tubulaire

Le faisceau tubulaire composant chaque effet est horizontal et fixé aux plaques tubulaires par dagueonnage. Le pas des tubes est choisi de façon à permettre un bon mouillage des surfaces tubulaire et pour permettre une bonne évacuation de la vapeur.



**Figure III.10** : Faisceau tubulaire.

### III.5.5 Condenseur

Le condenseur est un échangeur tubulaire horizontal dans lequel la vapeur se condense à l'extérieur et où l'eau de mer circule à l'intérieur. Le détubage du faisceau est possible.

Afin d'éviter toute corrosion galvanique avec l'eau de mer aérée, les boîtes à eau sont équipées d'anode sacrificielle.



**Figure III.11** : Condenseur de l'évaporateur.

### III.5.6 Thermo-compresseur

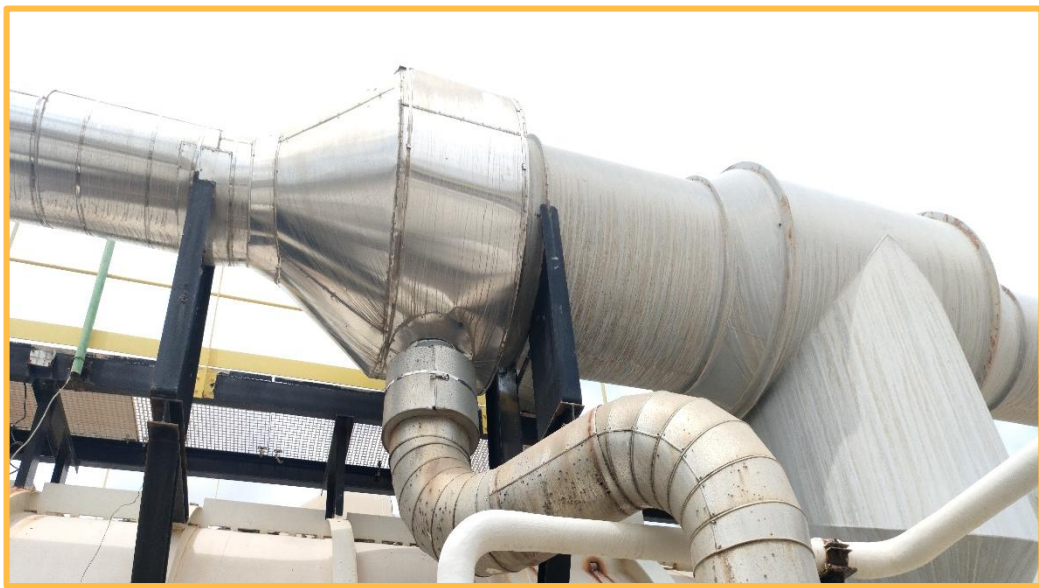
Afin d'améliorer l'efficacité de la distillation multi-étage, les unités de type TCD sont équipées de thermo-compresseur, qui sont des éjecteurs à vapeur, sans pièce mobile. En comparaison d'un simple MED de même surface d'échange et de même production, le TCD a une consommation de vapeur beaucoup plus faible.

Le but du thermo-compresseur est d'aspirer la vapeur d'une cellule à faible température (La cellule 2) puis la mélanger à la vapeur motrice ensuite la réinjecter au niveau de la première cellule (celle fonctionnant à la température la plus haute).

Le thermo-compresseur est composé de :

- ✓ Une ou plusieurs tuyères d'admission de la vapeur motrice ;
- ✓ Une chambre de mélange ;
- ✓ Un convergent/divergent.

A la sortie de la tuyère, la vapeur motrice est détendue et se mélange avec la vapeur aspirée, lui communiquant ainsi de l'énergie cinétique, qui se transforme en pression dans le convergent/divergent.



**Figure III.12** : Thermo-compresseur de l'évaporateur.

Le « rendement » du thermo-compresseur est le rapport entre la quantité de vapeur aspirée et la quantité de vapeur motrice requise. Ce rendement dépend en particulier de la pression de la vapeur aspirée, de la pression de la vapeur motrice et de la pression de refoulement requise à la sortie du thermo-compresseur.

Chaque TCD est équipé d'un thermo-compresseur conçu de manière à obtenir le débit d'eau distillée requis avec les conditions de vapeurs existantes. Le thermo compresseur est également conçu pour permettre de faire fonctionner l'unité de dessalement à charge réduite, en déduisant la pression de vapeur motrice.

### III.5.7 Système de mise sous vide

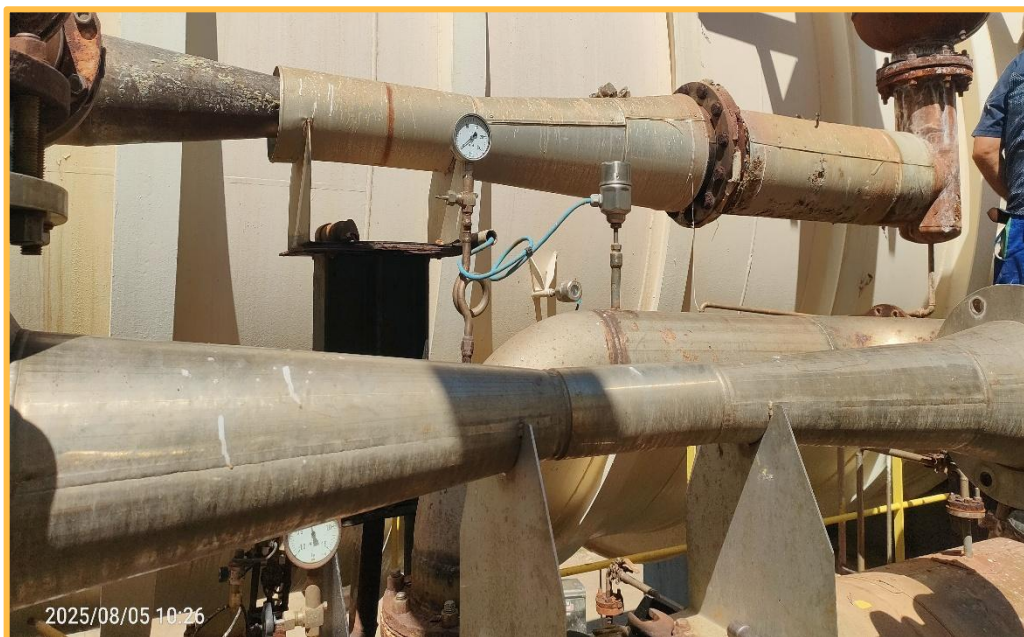
Le procès utilise la distillation sous vide. Pour ce faire il est nécessaire dans un premier temps d'évacuer l'excès d'air présent dans l'unité, et ensuite les incondensables résultant du dégazage de l'eau de mer et des petites fuites diverses.

Le système de mise sous vide se compose de 2 éléments :

- *L'éjecteur de démarrage*, utilisé pour préparer le vide dans l'unité.
- *Le groupe de maintien de vide (GMV)* pour compenser en cours de fonctionnement les faibles entrées d'air dues au dégazage de l'eau de mer d'appoint et aux légères fuites inévitables aux joints des équipements.

A l'intérieur de l'évaporateur, le système de ventilation est conçu de façon à éviter les concentrations d'incondensables sur les surfaces tubulaires. Les incondensables de chaque cellule sont transférés jusqu'au condenseur d'où on les extrait par un système de mise sous vide par éjecteurs de vapeur.

Les éjecteurs sont montés en cascade et refoulent sur des condenseurs d'éjecteur. Ils permettent de maintenir le vide dans l'unité. Les condenseurs d'éjecteur sont refroidis avec l'eau de mer qui va arroser la première cellule. En complément, un éjecteur de démarrage est utilisé pour évacuer l'air au démarrage de la mise sous vide.



**Figure III.13** : Système de mise sous vide.

**III.5.8 Traitement chimique de l'eau de mer**

Les unités de type TCD fonctionnent à basse température (température maximale de saumure (< 70 °C) et à faible concentration en sels (<1.5). Ceci permet de limiter les problèmes d'entartrage.

Les composants entartrant de l'eau de mer sont essentiellement composés de sulfate et de carbonate qui précipitent et entartrant à haute température et forte concentration. Grâce à la limitation en température de l'eau de mer, aucun traitement complexe n'est requis, seule une injection d'antitartre sur l'eau de mer d'arrosage est nécessaire.

Il est important de :

- ✓ Injecter de l'antitartre en fonction des résultats des analyses chimiques de l'eau de mer (concentration requise 4ppm)
- ✓ vérifier régulièrement l'état du faisceau pour augmenter le dosage si nécessaire.
- ✓ Tous les mois, il faut pendant 24h tripler le dosage d'antitartre. L'eau de mer d'arrosage est également additionnée d'anti-mousse.

L'unité de dessalement est équipée d'un système de dosage, conçu pour permettre un remplissage et un nettoyage facile. Pour chaque produit chimique a injecté, ce système comprend :

- ✓ un bac de dosage avec couvercle
- ✓ un agitateur
- ✓ deux pompes de dosage, avec ajustement manuel, filtre à l'amont et soupape interne
- ✓ une bouteille de niveau avec une alarme de niveau bas se déclenche en cas de niveau insuffisant du bac.



**Figure III.14** : Bacs de dosage des produits chimiques.

Il ne faut jamais faire tourner un dessaleur sans antitartre car cela peut provoquer un entartrage très rapide. Le **tableau III.2** résume les noms des produits anti tartre et anti mousse utilisé ainsi que les taux de dosage recommandé.

**Tableau III.2** : Les dosages des produits chimiques utilisés dans le dessaleur.

Produit chimique	Pompe d'injection	Nom du produit recommandé	Taux de dosage recommandé
Anti mousse	P07 et P08	Belite M8	0,1 ppm
Anti tartre	P09 et P10	Belgard EV2030	4 ppm

**III.6 Principe de fonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000**

- L'évaporateur est alimenté par l'eau de mer à partir de la prise avec un débit de 2100 m<sup>3</sup>/h, passe ensuite par deux filtres, le 1<sup>er</sup> en service et le 2<sup>ème</sup> en standby. On mesure la pression avant et après les filtres. Si  $\Delta p > 0,5$  donc le filtre est poché, on ouvre la vanne du 2<sup>ème</sup> filtre et on ferme la vanne du 1<sup>er</sup> filtre pour le nettoyage.
- Ensuite, il est nécessaire d'injecter les produits chimiques antitartre et anti-mousse dans le canal de l'eau de mer avant l'entrée de l'évaporateur.
- 292 m<sup>3</sup>/h sont utilisés pour refroidir l'eau distillée, tandis que le reste est passé au condenseur pour chauffer l'eau de mer.
- En sortant du condenseur, une partie est dirigée vers le rejet et l'autre partie est approvisionnée en 980 m<sup>3</sup>/h pour alimenter les six cellules.
- La 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> cellule sont alimentées par un débit de 300 m<sup>3</sup>/h. tandis que les cellules 3, 4, 5 et 6 sont alimentées par un débit de 95 m<sup>3</sup>/h.
- La 5<sup>ème</sup> et la 6<sup>ème</sup> reçoivent de l'eau de mer par gravitation, tandis que les autres cellules utilisent deux pompes, l'une en service et l'autre en Standby.
- L'eau de mer avant d'entrer dans les cellules est chauffée dans les préchauffeurs avec les vapeurs non condensables pour éviter le choc thermique.
- Au début, l'éjecteur de démarrage exploite la vapeur à pression moyenne (MP) pour produire le vide. L'éjecteur prélève l'air de l'unité, le dirige vers des conduits et le relâche dans l'atmosphère. Par la suite, il arrête et relance l'éjecteur de maintien afin de stabiliser la pression au sein de l'unité.
- La vapeur à basse pression (BP) entre dans la 1<sup>er</sup> cellule, et passe dans les tubes, ces derniers sont arrosés par l'eau de mer.
- La vapeur est condensée et collectée dans un canal spécial (tube en U). Une portion de l'eau de mer s'évapore et traverse une trame métallique qui retient les gouttelettes et les particules en suspension.
- La vapeur issue de la 1<sup>ère</sup> cellule entre dans la seconde, tandis que les vapeurs non condensées sont dirigées vers le préchauffeur.
- A la sortie de la 2<sup>ème</sup> cellule, le thermo-compresseur aspire une partie de la vapeur à faible température, en la mélangeant avec de la vapeur motrice et en la réinjectant au niveau de la 1<sup>ère</sup> cellule afin d'augmenter l'efficacité de la distillation. L'autre partie de la vapeur entre dans la 3<sup>ème</sup> cellule, et ainsi de suite.

- L'eau distillée et la saumure passent d'une cellule à une autre par des tubes en U jusqu'à la 6<sup>ème</sup> cellule.
- Si la conductivité de l'eau distillée dépasse 10  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , elle sera orientée vers le rejet ; si elle est inférieure à 10  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , elle sera dirigée vers les bacs de stockage, avec l'ajout de NaOH si le pH est acide.
- La saumure est dirigée vers le rejet.

A decorative orange frame with a wavy, ribbon-like shape, containing the text.

# **Partie expérimentale**

# **Expertise de l'unité de dessalement TCD 6-8000**



## IV.1 Contexte et méthodologie

L'évaporateur TCD 6-8000 est mis en service en 2007, l'unité a initialement atteint une production de 370 t/h avec une conductivité inférieure à 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Elle a fonctionné de manière satisfaisante jusqu'à 2015, mais a connu une baisse progressive du débit de production au cours de cette période. De 2015 à 2018, le temps d'utilisation et la production ont diminué, pour atteindre 130 t/h en 2018.

Après 2018, suite à un arrêt prolongé de la production du PEHD, puis à la crise du COVID-19, l'unité a été très peu utilisée. Les derniers fonctionnements avec une conductivité sous le seuil d'acceptabilité ont abouti à une très faible production de 80 t/h.

*Quelles sont les causes techniques et opérationnelles du dysfonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000, et comment peut-on les identifier afin de réduire les pertes de production, maîtriser l'augmentation de la conductivité et améliorer le rendement global de l'unité ?*

La présente expertise vise à fournir des solutions précises en vue de résoudre ces problèmes et donner des bonnes pratiques afin d'améliorer le rendement de l'unité.

Le processus d'expertise suit généralement plusieurs étapes :

- ✓ Préparation et planification,
- ✓ Retour d'expérience (REX),
- ✓ Inspection visuelle,
- ✓ Tests fonctionnels,
- ✓ Analyse des résultats,
- ✓ Recommandation et perspective,
- ✓ Rédaction d'un rapport détaillé.

## IV.2 Préparation et identification physique

### IV.2.1 Identification de l'environnement opérationnel et analyse des matériaux

Nous débutons cette expertise par une analyse détaillée du site, des installations où on a fait notre étude, identification des composants importants et retour d'expérience, dans le but est de cerner les enjeux spécifiques et d'identifier les points de vigilance.

➤ **Inventaire détaillé des matériaux**

Le **Tableau IV.1** résume les matériaux des différents composants importants dans l'évaporateur.

**Tableau IV.1** : Matériaux des différents composants de l'évaporateur.

Equipement	Matériau
<b>Cellule de l'évaporateur</b>	
<b>Tube</b>	Titane Gr 2
<b>Virole</b>	316 L selon EN 10088
<b>Plaque tubulure</b>	316 L selon EN 10088
<b>Condenseur</b>	
<b>Tube</b>	Titane gr 2
<b>Virole</b>	316 L selon EN 10088
<b>Anode sacrificielle</b>	Acier doux
<b>Réchauffeur</b>	
<b>Tube</b>	Titane gr 2
<b>Virole</b>	316 L selon EN 10088
<b>Anode sacrificielle</b>	Acier doux
<b>Système d'arrosage (plateaux)</b>	316 L selon EN 10088

➤ **Caractéristiques de l'environnement**

Des échantillons de l'eau de mer sont prélevés à partir de la prise d'eau de mer afin d'avoir leur composition avant qu'elles entrent dans l'évaporateur. Les résultats sont résumés dans le **Tableau IV.2** :

**Tableau IV.2** : Composition de l'eau de mer.

<b>Composition de l'eau de mer</b>	
Elément	Concentration (mg/l)
<b>Chlorure (Cl<sup>-</sup>)</b>	19676
<b>Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	1667
<b>Bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	120

<b>Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)</b>	1762
<b>Calcium (Ca<sup>2+</sup>)</b>	437
<b>Potassium (K<sup>+</sup>)</b>	470
<b>Sodium (Na<sup>+</sup>)</b>	10500
<b>Bromure (Br<sup>-</sup>)</b>	67
<b>Florure (F<sup>-</sup>)</b>	3
<b>Bore (B)</b>	4
<b>TAC</b>	136
<b>pH</b>	8.3
<b>Conductivité</b>	49 ms/cm

#### IV.2.2 Paramètres de fonctionnement

Le **Tableau IV.3** montre les différents paramètres opératoires de l'évaporateur TCD 6-8000 recommandé par le constructeur ainsi les paramètres réels lors de fonctionnement de l'équipement.

**Tableau IV 3 : Les paramètres de fonctionnement de l'évaporateur.**

<b>Paramètres</b>	<b>Design</b>	<b>Au cours de fonctionnement</b>
<b>Température</b>	< 70C°	65-75 C°
<b>Pression</b>	-0,7 à -0,9 mbar	219-300 mbar
<b>Débit</b>	375 M <sup>3</sup> /h	150 M <sup>3</sup> /h
<b>Conductivité</b>	< 10 µs/cm	>10 µs/cm
<b>Vapeur LS</b>	P : 2,5 Bar T : 175 C°	P : 3,5 Bar T : 300 C°
<b>Vapeur MS</b>	P : 15 Bar T : 205 C°	P : 17-20 Bar T : 175 C°

#### IV.3 Analyse des données historiques et des Retours d'Expérience

L'exploitation des rapports d'inspection précédents, des historiques de maintenance et des retours d'expérience est une source d'information précieuse pour identifier les zones critiques et les modes de défaillance récurrents ainsi que pour construire une base de données de REX accessible pour des analyses futures et prévenir la récurrence des mêmes problèmes.

L'annexe I résume les diverses anomalies rencontrées par l'équipement ainsi que leurs recommandations [29].

#### **IV.4 Inspection externe et interne de l'évaporateur et les équipements annexes**

Une inspection visuelle est réalisée afin de détecter les anomalies apparentes comme les fuites, corrosion, ou déformations mécaniques, et à révéler ce qui suit :

##### **IV.4.1 Inspection externe**

L'inspection externe a ressorti plusieurs dégradations affectant divers composants de l'installation. On cite :

- La plaque d'identification de l'évaporateur présente un support et des boulons légèrement corrodés.
- Le support de l'évaporateur est dans un état préoccupant, avec un massif fortement fissuré, des boulons d'ancrage très corrodé, une peinture dégradée et un support de tuyauterie sévèrement détérioré, représentant un risque de rupture.
- Les échelles sont sévèrement dégradées tandis que les marches des escaliers restent en bon état ; les garde-corps présentent des zones de décollement de la peinture.
- L'état des boîtes de cellules de distillation et les tubulures de connexion montrent également des signes de corrosion : peinture partiellement dégradée au niveau du couvercle de trou d'homme, calorifuge non étanche, brides et boulonnerie sévèrement corrodée.
- Les tuyauteries externes sont dans état général dégradé, avec brides détériorées, clapets manquants, vannes non fonctionnelles ou remplacées par des brides pleines.
- Blocage de la vanne vapeur du système sous vide.
- La tuyauterie de distillât qui ne peut être drainée à cause des vannes non fonctionnelles, couplée à la présence d'eau de mer dans cette dernière, crée des situations favorables à l'apparition de corrosion.



**Figure IV.1** : Fissuration du massif.



**Figure IV.2** : Dégradation du support de la plaque d'identification.



**Figure IV.3** : Sévère corrosion des brides et vannes.



**Figure IV.4** : Corrosion galvanique de la liaison support-tuyauterie.



**Figure IV.5** : Corrosion généralisée et localisée de la charpente métallique.

- Groupe de mise sous vide : les clapets de sortie incondensables et à l'aspiration de l'éjecteur de démarrage sont endommagés et leurs joints toriques nécessitent un remplacement.
- Au niveau des pompes, les garnitures sont fuyardes et une attention doit être portée au niveau de l'accouplement entre le moteur et la pompe.
- Au niveau de l'instrumentation, certains indicateurs de température d'eau de mer, les débitmètres de la désurchauffe des thermocompresseurs, l'affichage des débitmètres

d'arrosage ainsi que les mesures de différences de pression au niveau des filtres sont hors service.

- Au niveau des filtres : vieillissement de la peinture de la virole, couvercle et forte corrosion du support.
- Au niveau des condenseurs et préchauffeurs : présence d'une légère corrosion sous la peinture des renforts des viroles.



**Figure IV.6 :** Corrosion et vieillissement de la peinture des viroles et couvercles des filtres.

#### IV.4.2 Inspection interne

##### IV.4.2.1 Inspection des cellules de l'évaporateur

###### ➤ Cellule N° 01

- Présence du tartre sur le faisceau des tubes ainsi sur le fond de la virole (on a prélevé un échantillon afin de l'analyser),
- Légère déformation de la partie supérieure de la plaque tubulaire,
- Corrosion par piqure sur la paroi côté SUD.



**Figure IV.7 :** Présence de tartre sur le faisceau des tubes.

➤ **Cellule N° 02**

- Faisceau tubulaire légèrement entartré.
- Présence d'une légère couche de sel sur la paroi des tubes.



**Figure IV.8 :** Présence d'une couche de sel faisceau des tubes.



**Figure IV.9 :** Entartrage du faisceau de la 2<sup>ème</sup> cellule.

➤ **Cellules N° 03 et N° 04**

- Aucune anomalie n'est détectée, absence du tartre ou du sel sur le faisceau ou la paroi des deux cellules.

➤ **Cellule N° 05**

- Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord,
- Démisters légèrement encrassés,
- Présence de sel au niveau des tubes,
- Légère encrassement du fond,
- Corrosion par piqûres sur la paroi côté Nord.



**Figure IV.10** : Présence d'une couche de sel sur le faisceau tubulaire.

➤ **Cellule N° 06**

- Encrassement du fond de la cellule.
- Démisters légèrement encrassés.
- Endommagement des démisters coté EST et OUEST de la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> rangée a compté du bas vers le haut.
- Déplacement et déformation de quelques tiges de fixation des démisters du bas, côté EST et OUEST.



**Figure IV.11:** Encrassement des démisters et du fond de la 6<sup>ème</sup> cellule.



**Figure IV.12 :** Détachement et endommagement des démisters.

➤ Plateaux d'arrosage d'eau de mer de l'évaporateur

- Présence d'une couche de sel sur les plateaux.



Figure IV.13 : Couche de sel sur les plateaux.

#### IV.4.2.2 Inspection des filtres

- Les cartouches des filtres fortement corrodés.
- Les mailles des cartouches fortement encrassées avec la présence des déchets et de la boue sur les parois internes.
- Encrassement et détérioration des démisteurs.
- Détérioration des joints d'étanchéités.



Figure IV.14 : Corrosion, encrassement et déchirure des cartouches des filtres.

#### IV.4.2.3 Inspection des condenseurs et des réchauffeurs

##### ➤ Inspection des faisceaux tubulaires et des boîtes de distribution

- Présence des dépôts de la rouille et d'encrassement sur les parois internes des calandres, boîtes de distributions et surfaces externe des faisceaux tubulaires.
- Détérioration des joints d'étanchéités.

##### ➤ Inspections des anodes sacrificielles

- Corrosion généralisé significative, avec la présence de tubercule de rouille et des piqures visibles.
- Les anodes présentent des usures évidentes et changement dans l'apparence,
- La surface des anodes est fortement irrégulière,
- Les anodes sont consommées plus que 50% de son épaisseur initiale et la consommation est relativement inégale,
- Les anodes sont totalement désintégrées, présence de résidus friables et les goujons visibles,
- Boulons d'encrage très corrodés,
- Décollement partiel des anodes de son support,
- Présence de quelques petites incrustations d'encrassement et une fine couche d'algue.



**Figure IV.15 :** Présence de la rouille et d'encrassement sur la paroi du faisceau tubulaire.



**Figure IV.16 :** Irrégularité de la surface de l'anode et consommation plus de 50 % de son épaisseur.



**Figure IV.17 :** Désintégration des anodes et corrosion des boulons d'encrage.

#### IV.5 Test d'arrosage à pression atmosphérique

Avec un débit d'arrosage du fonctionnement normal de l'unité, nous observons :

- Cellules 01 et 02 : Un débordement léger pour environ 25% des plateaux.
- Cellules 03, 04 et 05 : tous les plateaux semblent fonctionner normalement.
- Cellule 06 : l'ensemble des plateaux de la cellule 06 débordent.

##### ➤ Fuites détectées lors de l'arrosage à pression atmosphérique

- Cellule 01 : Fuite d'un tube de la 3<sup>ème</sup> rangée de la cellule.

- Cellule 02 : Fuite potentiel, a été repéré indirectement par une goutte à goutte du tube en J dans la seconde passe.
- Cellule 03 : Aucune fuite détectée.
- Cellule 04 : Un tube de réchauffeur potentiellement fissuré.
- Cellule 05 et 06 : Aucune goutte significative a été identifiée.

#### IV.6 Procédure de mise sous vide et démarrage

La mise sous vide à l'aide de l'éjecteur de démarrage a permis d'atteindre 205 mbar, ce résultat confirme le bon fonctionnement de la mise sous vide de l'unité.

Cependant, l'éjecteur de maintien a permis d'identifier le non fonctionnement du silencieux, ce dernier devra être remplacé.

Une fois le vide établi, la procédure d'établissement de la boucle de régulation du niveau de saumure a été lancée :

- Démarrage de l'arrosage et ouverture des vannes d'isolation des pompes saumure : elle a permis d'observer une montée très importante du niveau de saumure dépassant le 100% de l'indicateur de niveau, causant un arrêt de la procédure de démarrage.

Cette augmentation est multifactorielle :

- Absence des clapets sur les pompes de saumure.
- Vanne de la ligne de recirculation ouverte.
- Différence de pression entre l'intérieur de l'unité et la pression de l'eau de mer.

Lors du démarrage suivant, un arrêt automatique de l'unité est survenu lors de l'ouverture de la vanne On/Off du groupe de mise sous vide. Cette observation a permis d'identifier la cause de cet arrêt automatique : le capteur PTAH003. La pression dans la première cellule étant inférieure au seuil de déclenchement de l'arrêt, un potentiel blocage du capteur est sûrement à l'origine de l'alarme.

La vanne manuelle de la ligne de vapeur du groupe de mise sous vide étant bloquée, un nouveau démarrage a été effectué avec un fonctionnement utilisant uniquement l'éjecteur de démarrage.

La conductivité du "distillat" alors produit dépassait les **20 000  $\mu\text{S}/\text{Cm}$** .

Après vérification physique de capteur PTAH003 et son fonctionnement, ainsi que le déblocage de la vanne, il a été possible de lancer une procédure de démarrage dans des conditions

normales. Il a alors été observé une chute rapide de la conductivité passant de plus de **20 000** à moins de **300  $\mu\text{S}/\text{Cm}$**  en 30 minutes et aurait atteint minimum à **50  $\mu\text{S}/\text{Cm}$**  avant son arrêt. Le fonctionnement normal de l'unité a permis de générer la vapeur dans toutes les cellules et ainsi de réchauffer l'eau de mer d'arrosage.

## IV.7 Echantillonnage et analyse en laboratoire

### IV.7.1 Analyse métallographique

#### IV.7.1.1 Analyse par diffractométrie des rayons X (DRX)

##### ➤ Prélèvement de dépôt

L'échantillon est un dépôt d'entartrage prélevé sur une surface métallique (tube en titane) exposée à l'eau de mer dans un système d'évaporation.



**Figure IV.18** : Echantillon d'un dépôt du tartre sur les tubes de l'évaporateur.

##### ➤ Objectif de l'analyse

Identifier les phases minérales présentes dans le dépôt afin de comprendre la nature du tartre formé et son impact potentiel sur le fonctionnement du système.

##### ➤ Résultat de l'analyse minéralogique

Les résultats de l'analyse par radiocristallographie du dépôt récupéré au niveau de l'évaporateur sont représentés sur la **Figure IV.19**.

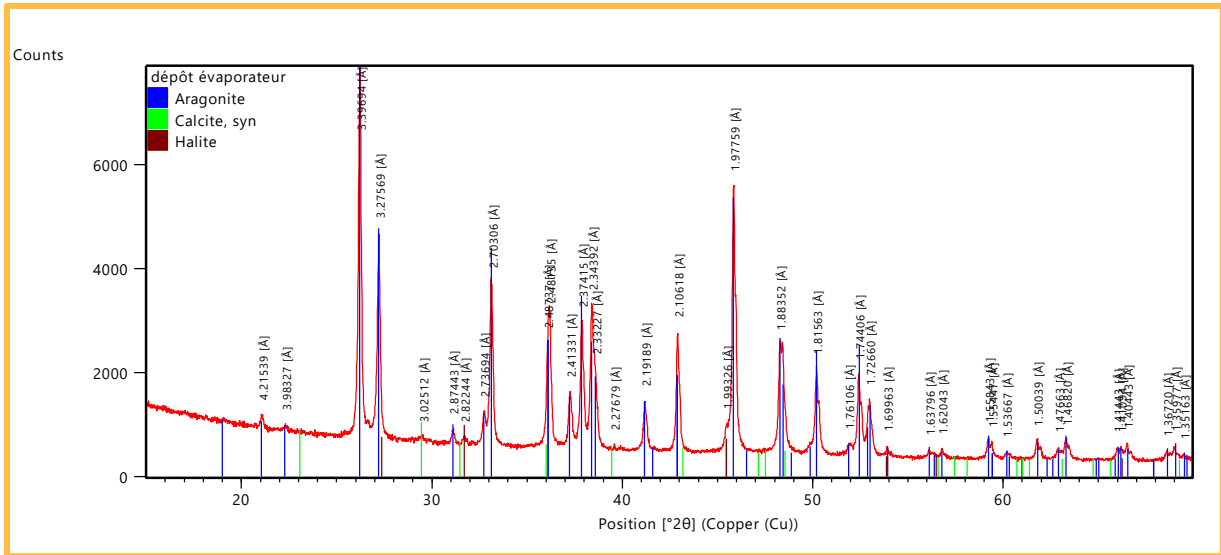


Figure IV.19: Diffractogramme de l'échantillon « dépôt évaporateur ».

Le **Tableau IV.4** résume les principaux résultats de diffractogramme.

**Tableau IV.4** : Résultat d'analyse par DRX de l'échantillon « dépôt évaporateur ».

Pic (°2θ)	Intensité relative (A°)	Phase identifiée	Formule chimique
<b>26.1</b>	3.39694 très forte	<b>Aragonite</b>	CaCO <sub>3</sub>
<b>29.5</b>	3.02512 forte	<b>Calcite</b>	CaCO <sub>3</sub>
<b>31.5</b>	2.82244 faible	<b>Halite</b>	NaCl

D'après les résultats d'analyse, le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) est le composé dominant, ce qui est classique dans les eaux de mer riche en calcium et bicarbonates.

Le dépôt est principalement constitué de l'**Aragonite**, avec présence de **Calcite** et de traces d'**Halite**.

#### IV.7.1.2 Analyse par fluorescence des rayons X (FX)

➤ **Objectif de l'analyse**

Déterminer la composition élémentaire du dépôt d'entartrage afin de :

- Comprendre son origine (carbonate, sulfate, silice ?)
- Identifier la présence éventuelle d'impuretés ou de contaminants (Fe, Mg, etc...)
- Evaluer l'interaction avec le substrat métallique (tube en titane).

## ➤ Résultats de l'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique exprimés en pourcentage massique (%) de l'échantillon du dépôt récupéré au niveau de l'évaporateur, sont portés sur le **Tableau IV.5**.

**Tableau IV.5** : Composition chimique élémentaire exprimée en pourcentage massique (%) de l'échantillon « dépôt évaporateur ».

		% éléments chimiques																												
N°	Désignation	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	CuO	ZnO	Rb <sub>2</sub> O	SrO	ZrO <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub>	BaO	PbO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CoO	WO <sub>3</sub>	Br	Cl	PAF	TOTAL
1	Dépôt évaporateur	0,93	0,30	0,13	0,31	0,03	1,05	0,04	59,22	<0,01	<0,01	0,25	<0,001	<0,001	0,0041	0,0084	0,0200	<0,001	0,7700	0,1000	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0100	0,0100	<0,01	0,53	36,82	100,00

Le **Tableau IV.6** résume les principaux résultats de l'analyse par radiocristallographie.

**Tableau IV.6** : Résultat d'analyse par FX de l'échantillon « dépôt évaporateur ».

Elément	Symbole	Teneur massique (%)
Oxyde de calcium	CaO	59.22
Trioxyde de soufre	SO <sub>3</sub>	1.05
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	0.93
Oxyde de magnésium	MgO	0.30
Hémalite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25
Trioxyde de silicium	SiO <sub>3</sub>	0.31

D'après les résultats de l'analyse chimique on remarque que :

- Le dépôt est principalement constitué de carbonate de calcium (aragonite/calcite),
- Les traces de soufre peuvent venir de sulfates dissous dans l'eau.
- Le silicium pourrait provenir de fines particules de silice ou d'argiles.
- La présence de fer indique soit une contamination par des conduites métalliques soit des traces de corrosion.

Donc, l'analyse XRF confirme que le dépôt est un tartre carbonaté, à base de CaCO<sub>3</sub>, avec des impuretés minérales (Mg, Si, Fe, S). Cela suggère que l'origine du dépôt est bien liée à

une eau de mer. Ce type de dépôt peut réduire le rendement thermique et doit être maîtrisé par traitements anti-tarte.

#### IV.7.2 Analyse physico-chimique

##### ➤ Analyse de l'eau produite « l'eau distillé »

Pour déterminer la composition de l'eau produite par l'évaporateur, des analyses physico-chimiques sont effectuées et les résultats sont consignés dans le **Tableau IV.7**.

**Tableau IV.7** : Les résultats des analyses physicochimiques de l'eau distillé.

Analyse	Valeur obtenue	Normes
TA	Trace	Trace
TAC	1,4042 mg/l	/
Mg <sup>2+</sup>	<b>5,0554 mg/l</b>	0.2
Ca <sup>2+</sup>	Trace	0.03
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	<b>4,848 mg/l</b>	0.4
Fe	<b>0,15 mg/l</b>	0.04
Cu <sup>2+</sup>	0,02 mg/l	0.03
Cl	Trace	2.6
SiO <sub>2</sub>	0,16 mg/l	0.1
Conductivité	<b>14,2 µS/cm</b>	< 10 µS/cm
pH	6,72	6,5 – 7,5

En comparant les résultats obtenus par les normes, on remarque que la valeur des éléments : **Mg<sup>2+</sup>**, **SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>**, **Fe** et **la conductivité** ont dépassé les normes tandis que le reste des éléments sont dans les normes.

##### ➤ Analyse du dépôt de l'évaporateur

L'objectif est d'identifier la composition chimique du tartre, les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.8** : Composition du dépôt de l'évaporateur.

Élément à analyser	Résultat
<b>pH</b>	9,57
<b>Conductivité (µS/cm)</b>	90,4
<b>Salinité (mg/l)</b>	0
<b>TDS (mg/l)</b>	90
<b>Ca<sup>+2</sup> (mg/l)</b>	735,8
<b>Mg<sup>+2</sup> (mg/l)</b>	1140,4
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (mg/l)</b>	149,76

Les analyses indiquent que le dépôt est principalement composé de **Ca<sup>+2</sup>** et de **Mg<sup>+2</sup>** en grandes proportions, tandis que la présence de **TDS** et **SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>** est relativement faible.

Ces résultats indiquent qu'il est indispensable de procéder à un lessivage chimique afin de nettoyer l'évaporateur.

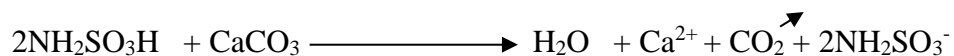
#### IV.8 Lessivage chimique

Le traitement chimique a pour objectif de nettoyer et d'éliminer le tartre accumulé dans l'évaporateur, d'améliorer la production et de prolonger la durée de vie du dessaleur.

L'opération du lessivage chimique de l'évaporateur s'est déroulée, selon la procédure du constructeur Entropie.

Il utilise de l'acide sulfamique passivé à **10 %**, de façon à dissoudre le dépôt de carbonate sans attaquer les tubes.

Le détartrage s'effectue selon la réaction chimique suivante :



- Le contrôle de la réaction s'effectue par la mesure de pH de la solution acide ainsi que la teneur en calcium, le détartrage est terminé quand les teneurs en calcium se stabilisent au cours du temps avec un pH inférieur à 2.

Après achèvement de l'opération un rinçage à l'eau de mer a été effectué.

- Le dernier lessivage était en 2021, les résultats sont dans **l'annexe II**.

Une inspection interne de l'évaporateur et des analyses physico-chimique été faite afin d'avoir l'efficacité de ce traitement.

- L'inspection a révélé la présence du dépôt au niveau des tubes du fond (1<sup>ère</sup> cellule).
- Les résultats des analyses de la masse des composants du dépôt mettent en évidence la présence d'une quantité de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et de magnésium  $\text{MgO}$  avec des traces de sulfates.
- Démarrage de l'évaporateur avec une production d'environ **140 à 150 T/h** soit un taux de production de **45 à 50 %** ce qui est inférieur à l'objectif fixé.

## IV.9 Evaluation et analyse des résultats

En adoptant une approche méthodique et multidisciplinaire, combinant l'analyse des matériaux, la compréhension de l'environnement, les techniques d'inspection et l'expérience, il est possible d'évaluer d'une manière approfondie la fiabilité de l'évaporateur TCD 6-8000.

### ➤ **Évaluation des mécanismes de corrosion potentiels**

L'inspection externe et interne de l'évaporateur révèle la présence des différents types de corrosion : généralisée et localisée (corrosion galvanique, par crevasse et par pique), qui affecte directement l'intégrité de l'équipement.

L'apparition de ce phénomène due à l'eau de mer et l'environnement marin corrosif qui accélèrent la corrosion par sa forte conductivité électrique, sa teneur élevée en chlorures et son agressivité.

Les chlorures présents dans l'eau de mer provoquent des piques et des perforations, elles sont exacerbées par des conditions d'aération différentielle.

### ➤ **Evaluation des méthodes de protection**

- **Protection par inhibiteur :**

La quantité du tartre et de la mousse formée dans les cellules de l'évaporateur est assez élevée malgré l'injection quotidienne des inhibiteurs antitartres et anti-mousse avec les quantités recommandées par le constructeur, cela signifie que le dosage de ces inhibiteurs n'est pas suffisant ou ces produits ne sont pas efficace (périmés).

**- Protection par des anodes sacrificielles :**

La dégradation et la consommation des anodes sacrificielles influent sur la protection des condenseurs et préchauffeurs, elle conduit à la corrosion et à la formation du tartre, cela réduit le coefficient de transfert thermique et par conséquent, l'efficacité de l'échangeur et le rendement de l'unité.

**- Protection par revêtement :**

La dégradation de la peinture des équipements et de la charpente métallique est un indicateur de vieillissement du revêtement. Elle conduit à l'apparition de la corrosion qui affaiblit la structure, réduit la durée de vie des installations et cause des pertes de confinements.

La perte d'efficacité des anodes et le vieillissement de la peinture sont dus principalement au manque d'entretien par l'utilisateur et à la nature du matériau des anodes.

**➤ Evaluation des paramètres de fonctionnement**

- La mauvaise qualité de la vapeur d'alimentation introduite dans le thermo-compresseur (vapeur surchauffée) qui est utilisé pour la distillation de l'eau de mer entraîne une augmentation de la température au niveau l'évaporateur (température supérieure au design  $> 70\text{C}^\circ$ ). Cette augmentation de la température favorise la formation du tartre malgré l'injection des produits chimique et ce qui est prouvé par les analyses métallographique et physico-chimique. Ce tartre provoque une perte d'efficacité thermique de l'évaporateur et influe sur la qualité de l'eau produite (augmentation de la conductivité).
- De même pour la 1<sup>ère</sup> cellule, la mauvaise qualité de la vapeur réinjectée par le thermo-compresseur induit une diminution de la production au lieu du contraire, ce qui conduit à un faible rendement.
- Le dysfonctionnement du système GMV est responsable de la présence d'air et la perturbation de la pression au sein de l'évaporateur. Il l'amène à des pressions au-dessus de la norme qui est de l'ordre de 300 mbar. Cette augmentation de la pression est liée à l'augmentation de la température qui provoque la formation du tartre et entrave le transfert thermique et par conséquent diminué la production donc le rendement de l'unité.
- La haute température enregistrée au sein de l'évaporateur est due à l'insuffisance du débit de l'eau de mer, à l'encrassement des filtres et à l'entartrage au niveau des cellules et tubes des condenseurs.

- L'augmentation de la conductivité a plusieurs causes d'où :
  - La qualité de la vapeur produite,
  - L'augmentation du niveau de saumure,
  - L'air et la pollution au niveau de l'évaporateur généré par le GMV,
  - Des fuites au niveau du faisceau tubulaire,
  - Déplacement des démisters qui provoque des ouvertures même si très faibles peut générer un fort taux de sel dans l'eau distillé.

## IV.10 Recommandation & Perspective

Au vu des constats relevés lors de l'expertise de l'évaporateur TCD 6-8000, il est recommandé d'adopter une approche intégrée de maintenance et d'optimisation opérationnelle, articulée autour des axes suivants :

### 1. Fiabilisation des équipements critiques :

- Réhabiliter ou remplacer les éléments dégradés (tuyauteries, brides, calorifuges, vannes, filtres, démisters).
- Procéder au remplacement systématique des anodes sacrificielles et assurer un suivi périodique de leur état.
- Effectuer un lessivage chimique régulier des cellules afin de limiter l'entartrage et maintenir les performances thermiques.

### 2. Amélioration du contrôle procédural :

- Optimiser la qualité de la vapeur alimentant le thermo-compresseur en veillant au respect des paramètres de design (<70 °C) afin de réduire la formation de tartre.
- Vérifier périodiquement la performance du système GMV pour garantir une pression conforme (300 mbar) et un fonctionnement stable.

### 3. Renforcement de la stratégie de maintenance préventive :

- Déployer un programme structuré d'inspections externes et internes (périodicité trimestrielle/annuelle selon criticité).
- Introduire un suivi rigoureux par instrumentation fonctionnelle (capteurs, débitmètres, indicateurs de température et de pression).

- Mettre en place un plan d'entretien prédictif basé sur le retour d'expérience (REX) et les données historiques de défaillances.

#### **4. Gestion chimique adaptée**

- Utiliser des produits chimiques récents et validés (antitartres, anti-mousse, acide sulfamique passivé) en ajustant les dosages selon les résultats des analyses physico-chimiques.

- Mettre en place une procédure stricte de suivi des réactifs afin d'éviter l'usage de produits périmés ou inefficaces.

#### **5. Renforcement des compétences et de la culture maintenance :**

- Assurer une formation continue du personnel sur la gestion de la corrosion, l'utilisation optimale des inhibiteurs, et les bonnes pratiques de démarrage/arrêt de l'évaporateur.

- Développer une base de données interne des incidents et interventions afin de capitaliser sur les retours d'expérience et réduire la récurrence des problèmes.

#### **❖ Perspective**

- ✓ Développement de nouveaux inhibiteurs chimiques plus performants et spécifiques pour limiter l'entartrage et la corrosion en milieu marin.
- ✓ Mise en place des techniques de surveillance en temps réel (capteurs intelligents pour la température, pression, conductivité, corrosion et dépôts).
- ✓ Étude comparative de traitements chimiques et physico-chimiques (détartrage par acides verts, inhibiteurs biodégradables, traitements électrochimiques).
- ✓ Optimisation du design et des conditions opératoires (contrôle de la qualité de la vapeur, gestion des débits d'eau de mer, amélioration du système GMV).
- ✓ Application de la maintenance prédictive : Inspection basé sur la criticité (Risk Based Inspection RBI) et le retour d'expérience (REX) pour anticiper les défaillances.
- ✓ Utilisation des anodes sacrificielles en magnésium (Mg) ou en zinc (Zn) de manière à être en contact avec l'eau de mer, agissent comme des "pieux" qui protègent les surfaces métalliques de l'évaporateur en empêchant la formation de corrosion sur celles-ci. Cela permet de prolonger la durée de vie des équipements en réduisant l'usure liée à la corrosion.

- ✓ Intégration d'énergies renouvelables (solaire thermique ou photovoltaïque couplé à l'évaporation) pour réduire la dépendance énergétique de l'unité.

# Conclusion générale



L'eau douce étant une ressource rare et vitale, le dessalement de l'eau de mer constitue aujourd'hui une solution incontournable pour répondre aux besoins croissants des populations et des industries, en particulier dans les zones arides. Parmi les procédés de dessalement, l'évaporation occupe une place centrale en raison de sa robustesse et de son efficacité. Cependant, son exploitation industrielle demeure complexe et sujette à de nombreux problèmes opérationnels, tels que l'encrassement, la corrosion, l'augmentation de la conductivité et la baisse de rendement.

L'inspection des évaporateurs au sein des unités de dessalement revêt une importance capitale pour garantir la continuité de production, préserver l'efficacité énergétique et prolonger la durée de vie des installations. Les phénomènes de corrosion, d'entartrage et d'encrassement représentent des défis techniques majeurs, susceptibles d'affecter la performance et la fiabilité du procédé.

Dans ce contexte, le recours à un rapport d'expertise s'avère être une technique primordiale. En effet, il constitue non seulement un support méthodologique pour le diagnostic précis de l'état de l'équipement, mais aussi un outil d'aide à la décision pour les responsables de maintenance et d'exploitation. Grâce à une analyse rigoureuse, documentée et structurée, le rapport d'expertise permet d'orienter efficacement les choix en matière de réparations, de remplacement des pièces, ou encore d'optimisation des plans de maintenance.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés au cas spécifique du « dysfonctionnement de l'évaporateur TCD 6-8000 ». L'expertise technique a permis d'analyser en détail les symptômes constatés, de diagnostiquer les causes probables du mauvais fonctionnement et de mettre en lumière leurs impacts sur la production et la performance globale de l'unité.

Les principaux facteurs identifiant le dysfonctionnement de l'évaporateur sont :

- ✓ Les inhibiteurs antitartres et anti-mousse se sont révélés peu efficaces, laissant persister un encrassement important des cellules,
- ✓ la dégradation des anodes sacrificielles a compromis la protection des condenseurs et réchauffeurs, favorisant la corrosion et réduisant le rendement thermique,
- ✓ Le vieillissement des revêtements (peintures des équipements et charpentes métalliques), lié au manque d'entretien, a accentué la vulnérabilité des structures,

- ✓ l'analyse des paramètres de fonctionnement a montré que l'utilisation d'une vapeur surchauffée dans le thermo-compresseur a entraîné une élévation de température au-delà du seuil de conception ( $>70$  °C), favorisant la formation du tartre et la dégradation de la qualité du distillat (conductivité élevée),
- ✓ Le dysfonctionnement du système GMV et la présence d'air ont accentué les problèmes en réduisant le transfert thermique et la production,
- ✓ Des facteurs aggravants tels que l'insuffisance du débit d'eau de mer, l'encrassement des filtres, les fuites dans les faisceaux tubulaires et le déplacement des démisters ont également contribué à la baisse de performance globale.

À la lumière de ce diagnostic, des solutions correctives et préventives ont été proposées. Elles s'articulent sur les points suivants :

- ✓ Réhabiliter ou remplacer les éléments dégradés (tuyauteries, brides, calorifuges, vannes, filtres, démisters),
- ✓ Renouveler et suivre régulièrement les anodes sacrificielles,
- ✓ Utiliser des produits chimiques récents et adaptés (antitartres, anti-mousse, acide sulfamique),
- ✓ Effectuer un lessivage chimique régulier des cellules afin de limiter l'entartrage et maintenir les performances thermique,
- ✓ Optimiser la qualité de la vapeur alimentant le thermo-compresseur en veillant au respect des paramètres de design,
- ✓ Contrôler et entretenir le système GMV pour stabiliser la pression,
- ✓ Introduire un suivi rigoureux via une instrumentation fonctionnelle (capteurs, débitmètres, indicateurs de température et pression).
- ✓ Mettre en place un programme d'inspections préventives et prédictives,
- ✓ Assurer une formation continue du personnel sur la gestion de la corrosion, l'utilisation des inhibiteurs et les bonnes pratiques de maintenance,
- ✓ Exploiter les retours d'expérience (REX) pour anticiper les défaillances.

Ces recommandations visent non seulement à rétablir le rendement nominal de l'évaporateur, mais aussi à prolonger sa durée de vie et à garantir une exploitation durable.

En perspective, ce travail encourage la mise en place de solutions durables et adaptées aux conditions réelles de fonctionnement, contribuant ainsi à une meilleure maîtrise du procédé de dessalement. Parmi les solutions on cite :

- ✓ Étude comparative de traitements chimiques et physico-chimiques (détartrage par acides verts, inhibiteurs biodégradables, traitements électrochimiques),
- ✓ Développement de nouveaux inhibiteurs chimiques plus performants et spécifiques pour limiter l'entartrage et la corrosion en milieu marin,
- ✓ Application de la maintenance prédictive : Inspection basé sur la criticité (Risk Based Inspection RBI) et le retour d'expérience (REX) pour anticiper les défaillances,
- ✓ Mise en place des techniques de surveillance en temps réel (capteurs intelligents pour la température, pression, conductivité, corrosion et dépôts).

# Références bibliographiques



## *Références bibliographiques*

- [1] : Abu-Eid, Z.M., et Fakhoury, A.G., quelques caractéristiques de conception spéciales des usines du Koweït MSF. *Dessalement*, 23(1974)263-284.
- [2] : Moudjeber Djamel-Eddine, Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l'Algérie, Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Génie mécanique, 2015, 01p
- [3] : Mansour Mohamed, Zireg Hanene , La Performance de la station de dessalement Chatt El-Hillal-Béni-Saf, Mémoire de master, Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Sécurité industrielle et environnement, 2019, page ...
- [4] : Dawoud, M.A & Al Mulla, .M, Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study, *International Journal of Environment and Sustainability* | Vol. 1 No. 3, 2012, p 22-37.
- [5] : J, Rodier, B, Legube, N, Merlet et Coll, l'analyse de l'eau, 9eme édition, Dunod, Paris, 2009, 1579p.
- [6] : P, Danis, Dessalement de l'eau de mer, *Techniques de l'Ingénieur*, J 2700, Juin 2003, 18p.
- [7] : Y, Mandri, Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, Thèse de doctorat, université de Mohammed V– AGDAL, génie des procédés, 2011, 171p.
- [8] : Wladimir Alechine, Claude Aubert, Paul Couget, Pierre Courvoisier, Claude Duffau, Damien Feron, Pierre Glomot, Mustapha Gunaltun, Roger Legrand, Lionel Lemonie, Yvon Morizur, Marcel Roche, Jean-Pierre Samaran et Gérard Tripony, *circuit eau de mer traitement et matériaux*, éditions technique, paris, 1993, 393p.
- [9] : ALOUANA BASLIMANE.Y , BABEKER.A , Etude et simulation d'un évaporateur simple effet pour le dessalement de l'eau de mer, Mémoire de Master, université LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, Génie chimique, 2015.
- [10] : J-M, ROVEL, Dessalement de l'eau de mer, *Techniques de l'Ingénieur*, J 5700, février 2010, p23.

- [11] : BIYOUNE, M.G., Techniques de reminéralisation des eaux dessalées. Univ Européenne, 2017.
- [12] : Desjardins, R., Traitement des eaux (Le), 2eme édition revue et enrichie. Presses internationales Polytechnique, Montréal, 1997.
- [13] X Mehtougui.S, Etude de la qualité et impacts du dessalement d'eau de mer sur les écosystèmes cas de la station de Honaine Wilaya de Tlemcen, UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, Géologie ,2020, p27.
- [14] : Bachelier, F. (2017). Chromatographie à échange d'ions. Wikipédia. <https://fr.wikipedia>.
- [15] : YOUSFLA, CHEDIK.L, Étude des rejets de saumures des usines de dessalement de l'eau de mer en utilisant l'imagerie satellite, Mémoire de master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU,Mécanique,2024, p8.
- [16] : MORSLI MEBARKA SOUMIA ; «Impact des Arrêts Techniques de L'usine de Dessalement de L'eau de Mer sur L'entreprise et L'environnement» ; mémoire de magister ; université d'Oran, 2013.
- [17] :COSTON.H.M, LINDSEY E.E, Selection and application of evaporator equipment (Choix et application de l'équipement d'évaporation), Chem. Eng. Progress, 52, no 2, fév, 1956.
- [18] : Coates, J., and Pressburg, B. A.,How Heat Transfer Occurs In Evaporators.Chemical Engineering, Feb. 22, 1960, pp. 139-144.
- [19] : Rodier, J. 1971. "L'analyse Chimique et Physicochimique de l'eau." Editions Dunod.
- [20] : Hassan Ez-Aaki. 2016.Valorisation de sous-produits marins dans l'élaboration de mortiers composites à base de sédiments et de coquillage. [https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-predominance-des-especes-carbonatees-en-fonction-du-pH-63\\_fig8\\_344440811](https://www.researchgate.net/figure/Diagramme-de-predominance-des-especes-carbonatees-en-fonction-du-pH-63_fig8_344440811)
- [21] : Kannan, Aravindaraj G., Namita Roy Choudhury, and Naba K. Dutta. 2007. "Synthesis and Characterization of Methacrylate Phospho-Silicatehybrid for Thin Film Applications." polymer.
- [22] : M., Chaussemier et al. "State of Art of Natural Inhibitors of Calcium Carbonate Scaling." Desalination, 2015,356: 47–55

[23] : D., Hasson, Shemer H., and Sher A. “State of the Art of Friendly ‘Green’ Scale Control Inhibitors.” *Industrial & Engineering Chemistry Research* . 2011,50: 7601–7607.

[24]: Abdel-Gaber A.M., Abd-El-Nabey B.A., Khamis E., and Abd-El-Khaled D.E. “Investigation of Fig Leaf Extract as a Novel Environmentally Friendly Antiscalant for CaCO<sub>3</sub> Calcareous Deposits.” *Desalination*.2008, 230: 314–328

[25] : KAMAR, N. Maîtrise de l'entartrage dans des échangeurs de chaleur via l'utilisation de traitements physiques. Thèse de doctorat, Université de LORRAINE, Génie des procédés, 2022.

[26]: Brooks, Sam, and Rajkumar Roy. “International Journal of Heat and Mass Transfer Design and Complexity Evaluation of a Self-Cleaning Heat Exchanger.” *International Journal of heat and Mass Transfer*. 2022 ,191: 122725.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122725>.

[27] : Lavisse L., Elaboration, caractérisation physico-chimique et simulation thermo-cinétique de couche d'oxyde de titane sous faisceau laser Nd-YAG impulsif, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2002.

[28] : Entropie, Manuel de formation, Unité de dessalement d'eau de mer, ENIP SKIKDA, 2007.

[29] : A. SBIHI, H. BOUGLOUF, I. BOUAITA, Rapports d'inspections, Complexe Pétrochimiques de Skikda 2, 2014-2024.

# Annexes



## Annexe I

## HISTORIQUE DE L'EVAPORATEUR TCD 6-8000

Date	Constat	Recommandation
15/06/2014	<p>Après ouverture des trous d'homme de la 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> cellule, et les trappes de visite des plateaux d'arrosage, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Jointure en très mauvaise état des trappes de visites des plateaux d'arrosage</li> <li>➤ Plateaux peu encrassés par les déchets d'eau de mer</li> </ul> <p><b><u>1<sup>ère</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Léger encrassement du fond</li> </ul> <p><b><u>2<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Couche de tartre observé au niveau des tubes internes</li> <li>➤ Démisters légèrement encrassés</li> </ul> <p><b><u>4<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> </ul> <p><b><u>5<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel importante sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Démisters légèrement encrassés</li> </ul> <p><b><u>6<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel d'environ 8÷10mm d'épaisseur adhérente sur la paroi de séparation et les zones mort côté Nord</li> <li>➤ Une ouverture non importante a été observée sur le démister du bas côté Est</li> <li>➤ Déplacement de quelques tiges de fixation du démister du bas côté Ouest</li> <li>➤ Les démisters du bas côté Ouest endommagés</li> <li>➤ Corrosion par piqûre sur la paroi côté Sud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Décollement de cette couche de sel qui est formée sur la paroi (nettoyage au jet de vapeur suivi d'un faible martelage)</li> <li>✓ Réparation du démister du bas côté Est (6<sup>ème</sup> cellule)</li> <li>✓ Réparation des tiges de fixation du démister côté Ouest (6<sup>ème</sup> cellule)</li> <li>✓ Changement des démisters du bas côté Est de la 6<sup>ème</sup> cellule</li> <li>✓ Nettoyage des tubes du condenseur</li> <li>✓ Nettoyage chimique</li> <li>✓ Prévoir le changement des joints des trappes de visite des plateaux d'arrosage</li> <li>✓ Nettoyage des plateaux d'arrosage</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tartre observé côté tube de condenseur</li> </ul>	
08/03/2015	<p>Après ouverture des trous d'homme de la 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> cellule, termo compresseur 1 et les trappes de visite des plateaux d'arrosage, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <p><b><u>Termo compresseur 1 :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une légère couche de sel sur la paroi</li> </ul> <p><b><u>Plateaux d'arrosage :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Jointure en très mauvaise état des trappes de visites des plateaux d'arrosage</li> <li>➤ Plateaux peu encrassés par les déchets d'eau de mer et de la boue</li> <li>➤ Presence des couches de calcaire au niveau des tubes</li> </ul> <p><b><u>1<sup>ère</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Léger encrassement du fond</li> </ul> <p><b><u>2<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une léger Couche de tartre au niveau des tubes internes</li> <li>➤ Démisters légèrement encrassés</li> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Léger encrassement du fond</li> </ul> <p><b><u>4<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> </ul> <p><b><u>5<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel importante sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Démisters légèrement encrassés</li> </ul> <p><b><u>6<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi de séparation et les zones mortes côté Nord</li> <li>➤ Une ouverture non importante a été observée sur le démister du bas côté Est</li> <li>➤ Déplacement de quelques tiges de fixation du démister du bas côté Ouest</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prévoir le changement des joints des trappes de visite des plateaux d'arrosage</li> <li>✓ Nettoyage des plateaux d'arrosage</li> <li>✓ Nettoyage mécanique des tubes</li> <li>✓ Décollement de cette couche de sel qui est formée sur la paroi (nettoyage au jet de vapeur suivi d'un faible martelage)</li> <li>✓ Réparation des démisters du bas côté Est (6<sup>ème</sup> cellule)</li> <li>✓ Réparation des tiges de fixation du démister côté Ouest (6<sup>ème</sup> cellule)</li> <li>✓ Changement des démisters du bas côté Ouest de la 6<sup>ème</sup> cellule</li> <li>✓ Nettoyage du fond de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> cellules</li> <li>✓ Nettoyage des tubes du condenseur</li> <li>✓ Nettoyage chimique</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Les démisters du bas côté Ouest endommagés</li> <li>➤ Corrosion par piqûre sur la paroi côté Sud</li> <li>➤ Tartre observé côté tube de condenseur</li> </ul>	
17/05/2016	<p>Après ouverture des trous d'homme de la 1<sup>ère</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> cellule, thermo compresseur 1,2, préchauffeur 2 et les trappes de visite des plateaux d'arrosage, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <p><b><u>Plateaux d'arrosage :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Jointure en très mauvaise état des trappes de visites des plateaux d'arrosage</li> <li>➤ Plateaux peu encrassés par les déchets d'eau de mer côté Ouest</li> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Est</li> </ul> <p><b><u>Thermo compresseur J1 :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Sud</li> </ul> <p><b><u>Thermo compresseur J2 :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une légère couche de sel sur la paroi côté Sud</li> </ul> <p><b><u>Préchauffeur H002 :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche importante du tartre et de la boue dans la boîte de distribution, des tubes et de la plaque tubulaire.</li> </ul> <p><b><u>1<sup>ère</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Encrassement du fond (présence des déchets)</li> </ul> <p><b><u>Côté tube :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Sud et Ouest</li> </ul> <p><b><u>5<sup>ème</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Démisters légèrement encrassés</li> <li>➤ Encrassement du fond (présence des déchets)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Changement des joints des trappes de visite des plateaux d'arrosage</li> <li>✓ Nettoyage des plateaux d'arrosage et élimination des couches de sel</li> <li>✓ éliminer les couches de sel (thermo compresseur 1 et 2)</li> <li>✓ Nettoyage mécanique de la boîte de distribution, des tubes et de la plaque tubulaire (préchauffeur 2)</li> <li>✓ Réparation des démisters du bas côté Est et Ouest (6<sup>ème</sup> cellule)</li> <li>✓ Réparation des tiges de fixation des démisters côté Ouest (6<sup>ème</sup> cellule)</li> <li>✓ Nettoyage du fond de la 1<sup>ère</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> cellules</li> <li>✓ Éliminer les couches de sel de la 1<sup>ère</sup>, 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> cellules</li> <li>✓ Nettoyage des tubes du condenseur</li> </ul>

	<p><b>6<sup>ème</sup> cellule :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Nord</li> <li>➤ Présence d'une couche importante du tartre et de la boue dans les démisters du bas côté Est et Ouest</li> <li>➤ Une ouverture importante et détachement a été observée sur les démisters du bas côté Est et Ouest</li> <li>➤ Déplacement de quelques tiges de fixation du démister du bas côté Ouest</li> <li>➤ Les démisters du bas côté Est et Ouest endommagés</li> <li>➤ Corrosion par piqûre sur la paroi côté Sud</li> <li>➤ Tartre observé côté tube de condenseur</li> </ul>	
21/05/2017	<p>Après le nettoyage chimique qui réalisé au niveau de l'évaporateur, et après l'ouverture du trou d'homme de la première cellule, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <p><b>Plateaux d'arrosage :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Jointure des trappes de visite des plateaux d'arrosage : en très mauvais état.</li> <li>➤ Plateaux d'arrosage de la 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> cellule peu encrassés.</li> </ul> <p><b>1<sup>ère</sup> cellule :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Encrassement du fond</li> <li>➤ Tubes du fond légèrement encrassés</li> <li>➤ Démisters légèrement encrassés.</li> <li>➤ Légère couche de sel sur les parois coté Sud- Est et coté Sud- Ouest</li> <li>➤ Corrosion par piqûres sur la paroi côté Sud.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Changement des joints des trappes de visite des plateaux d'arrosage.</li> <li>✓ Nettoyage des plateaux d'arrosage de la 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> cellule.</li> <li>✓ Eliminer les couches de sel sur les parois de la 1<sup>ère</sup> cellule.</li> <li>✓ Nettoyage mécanique du fond</li> <li>✓ Nettoyage des démisters</li> </ul>
11/02/2020	<p>Après ouverture des deux couvercles de condenseurs et des préchauffeurs, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <p><b>Condenseur C002 :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche du tartre et de la boue dans les boites de distribution et des plaques tubulaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nettoyage mécanique des boites de distribution, des tubes et des plaques tubulaires</li> <li>✓ Mise en place de nouvelles anodes sacrificielles</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Détérioration des anodes sacrificielles (04)</li> </ul> <p><b><u>Préchauffeur H002 :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de tartre et de la boue dans les boites de distribution, des tubes et des plaques tubulaires</li> <li>➤ Détérioration des anodes sacrificielles (04)</li> </ul> <p><b><u>Préchauffeur H004 :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de tartre dans les boites de distribution et des plaques tubulaires</li> <li>➤ Détérioration des anodes sacrificielles (06)</li> </ul>	
10/11/2021	<p>Après le nettoyage chimique et l'ouverture de trou d'homme de la 1<sup>ère</sup> cellule de l'évaporateur, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <p><b><u>1<sup>ère</sup> cellule :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence des couches de tartre et calcaire au niveau des tubes et fond côté bas</li> <li>➤ Encrassement du fond</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Décollement des couches de tartre et calcaire formées sur les tubes et fond de la 1<sup>ère</sup> cellule</li> <li>✓ Nettoyage de fond de la cellule</li> </ul>
16/08/2022	<p>Après l'ouverture de trou d'homme de la 1<sup>ère</sup> cellule de l'évaporateur, une inspection visuelle a été réalisée et a fait ressortir ce qui suit :</p> <p><b><u>1<sup>ère</sup> cellule :</u></b></p> <p><b><u>Coté démisters :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fond fortement encrasser</li> <li>➤ Présence d'une couche de sel sur la paroi côté Sud-Est/Ouest</li> <li>➤ Présence d'une couche de calcaire côté tube et fond</li> </ul> <p><b><u>Coté tubes :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Présence d'une couche de sel côté paroi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nettoyage de fond de la cellule</li> <li>✓ Décollement de cette couche de sel qui est formée sur les parois (côté démisters et tubes)</li> <li>✓ Décollement des couches de calcaire formées sur les tubes et fond de la cellule.</li> </ul>
21/07/2024	<p>Après l'ouverture des trous d'homme de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> cellule de l'évaporateur D-EC-101D, une inspection visuelle a été réalisée et nous a donné les constatations suivantes :</p> <p><b><u>1<sup>ère</sup> cellule :</u></b></p> <p><b><u>A) Coté démisters :</u></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Nettoyage du fond de la 1<sup>ère</sup> cellule.</li> <li>✓ Eliminer la couche de sel sur la paroi de la 1<sup>ère</sup> cellule, côté sud – ouest.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Présence d'une légère couche de sel sur la paroi, côté sud – ouest.</li><li>➤ Deux ouvertures observées sur les démisters du bas, côté ouest.</li><li>➤ Démisters gonflés, de la 1ere rangée, coté Est et Ouest.</li></ul> <p><b>B) Côté tubes :</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Encrassement du fond</li><li>➤ Gondolement de la partie supérieure de la plaque tubulaire.</li><li>➤ Un test de fuite a été réalisé, au niveau de la 1<sup>ère</sup> cellule, coté calandre (plateaux d'arrosage), et nous a donné ce qui suit :</li></ul> <ul style="list-style-type: none"><li>- Cinq (05) fuites sur la plaque tubulaire, localisées sur la partie supérieure de la plaque.</li><li>- Total de tubes isolés (anciens) : 17.</li></ul> <p><u>2<sup>ème</sup> cellule :</u></p> <p><b><u>Côté tubes :</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Total de tubes isolés (ancien) : 01.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Assurer le bon emplacement et la fixation des démisters de la 1<sup>ère</sup> cellule.</li><li>✓ Elimination des fuites au niveau de la plaque tubulaire, par soudage.</li></ul>
--	--

## Annexe II

## SUIVI DE L'OPERATION DU LESSIVAGE CHIMIQUE DE L'EVAPORATEUR - TDC6-800

Conditions	1,5 < PH < 2 & Concentration du Ca+2 et Mg+2 est stable							
	BS12 : l'acide sulfamique passivé à 10%				La réaction : $2\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + 2\text{NH}_2\text{SO}_3^-$			
Date	Heure	pH	Ca <sup>+2</sup> (mg/l)	Mg <sup>+2</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)	Quantité d'acide versée (Kg)	Cumule de la quantité de l'acide versée (Kg)	Observations
26/09/2021	20:30	8,88	2044,08	/	47,8	/	0	avant Injection de l'acide
27/09/2021	10:15	/	/	/	/	400	400	Injection de l'acide
	11:15	3,10	/	/	/	/		/
	12:15	5,65	2044,08	991,64	433	/		/
	13:30	/	/	/	/	600	1000	Injection de l'acide
	14:45	3,32	3271,53	2281,18	408	/		/
	15:15	5,00	/	/	/	/		/
	15:45	/	/	/	/	600	1600	Injection de l'acide
	16:45	2,35	/	/	/	/		/
	17:45	3,75	3679,34	/	499	/		/
	18:15	/	/	/	/	400	2000	Injection de l'acide
	19:15	5,52	/	/	/	/		/
	20:30	5,18	2044,08	1983,28	503	/		/
	22:30	/	/	/	/	800	2800	Injection de l'acide
	23:00	2,74	/	/	/	/		/
	23:30	3,07	/	/	/	/		/
0:30	3,79	5723,42	743,73	501	/	3000	/	
1:30	/	/	/	/	200		Injection de l'acide	

	3:00	3,51	/	/	/	/		/
	5:00	5,55	7563,09	1118,59	494	/		/
<b>28/09/2021</b>	8:30	5,86	5723,42	743,73	461	/		/
	10:50	5,64	4496,98	991,64	461	/		/
	11:20	/	/	/	/	1100		/
	11:45	2,58	/	/	/	/		/
	12:30	2,33	/	/	/	/		/
	13:00	2,19	/	/	/	/		/
	13:45	2,28	/	/	/	/		/
	14:00	2,41	5891,76	2859,27	461	/		/
	14:30	2,60	/	/	/	/		/
	14:45	2,70	/	/	/	/		/
	15:15	2,83	/	/	/	/		/
	15:30	2,98	5302,58	1071,85	461	/	4100	/
	16:00	3,20	/	/	/	/		/
	16:30	3,38	/	/	/	/		/
	17:00	3,57	/	/	/	/		/
17:30	3,75	/	/	/	/		/	
21:00	5,75	5723,24	991,64	451	/		/	
<b>29/09/2021</b>	8:00	6,09	/	/	/	/		/
	10:00	6,20	/	/	/	/		/
	14:30	6,16	5723,34	1239,55	443	/		/
	20:00	6,22	4805,79	743,73	443	/		/
<b>03/10/2021</b>	13:00	1,13	/	/	/	1200		Injection de l'acide
	13:30	3,80	/	/	/	/	5300	/
	14:00	2,13	6949,87	643,73	443	/		/

	14:30	2,20	/	/	/	/	/
	15:00	2,29	/	/	/	/	/
	15:30	2,38	/	/	/	/	/
	16:00	2,12	/	/	/	200	Injection de l'acide
	16:30	2,14	/	/	/	/	/
	17:00	2,31	7358,69	743,7	450	/	/
	19:30	2,52	/	/	/	/	/
	20:00	2,62	/	/	/	/	/
	20:30	2,73	/	/	/	/	/
	21:00	/	/	/	/	200	Injection de l'acide
	22:00	2,36	/	/	/	/	/
	22:30	2,34	/	/	/	/	/
	23:00	2,38	/	/	/	50	Injection de l'acide
	23:30	2,32	/	/	/	/	/
	0:00	2,37	/	/	/	/	/
04/10/2021	8:00	3,68	/	/	/	/	Lessivage terminer pour les cellule 1,2, pour une quantité d'acide versé de 5750 Kg
	10:00	3,75	/	/	/	/	balancement de la solution vers les cellules 3,4,5,6
	11:20	/	/	/	/	250	Injection de l'acide
	12:20	2,10	7385,69	991,64	/	/	/
	13:20	2,20	6949,87	991,64	/	/	/
	14:20	2,23	/	/	/	/	/
	14:45	2,20	/	/	/	/	Fin de l'opération de lessivage
	15:30	/	/	/	/	/	Vidange de l'évaporateur
	16:00	/	/	/	/	/	Rinçage de l'évaporateur