

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Université M'Hamed Bougara
-Boumerdès-

Faculté de technologie
Département de Chimie Spécialité : génie
chimique

MEMOIRE

**Pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

Thème

**Etude et suivi du processus de traitement de
l'eau de mer dans la centrale thermique
de Cap Djinet**

Présenté par :

CHAOU Khaoula

SADAOUI Achouak Hadjer

Devant le jury constitué de :

M^{me} :F.AISSAT Promotrice

2023/2024

Résumé

La centrale thermique de Cap Djinet, est une centrale thermique à vapeur, qui fait appel aux caractéristiques thermodynamiques de l'eau de mer dans un but de transformation d'énergie. La combustion s'opère à l'intérieur d'une chaudière dans laquelle des tubes assurent une circulation d'eau. La transformation de cette dernière en vapeur entraîne une turbine associée à un alternateur producteur d'énergie électrique.

L'eau de mer, de par sa nature, est très corrosive vis-à-vis des matériaux de construction. Elle est chargée en sels, en gaz dissous et en solides en suspension. Aussi, elle contient une variété très riche de flore et de faune. Par conséquent, si elle n'est pas traitée, son utilisation pose un certain nombre de problèmes opérationnels qui limitent l'efficacité des installations.

L'objectif de cette étude consiste à étudier les différents processus de fonctionnement de traitement de l'eau de mer présents dans la centrale thermique de Cap Djinet et de diminuer ou d'éliminer totalement ces particules pour la fabrication de l'électricité au niveau de cette station.

Le prétraitement est la première étape qui fait appel à une chloration et à une filtration. Après ce processus, on s'intéresse au procédé de dessalement par distillation à détentes successives qui produit une eau dessalée moins concentrée en sels, suivi par un procédé de déminéralisation à lit mélangé afin d'éliminer toute les sels. Enfin de compte, nous obtenons une eau déminéralisée très pure nécessaire pour l'alimentation des auxiliaires électriques.

Des analyses physico-chimiques sont réalisées sur les différentes qualités d'eau produites et sur l'inévitable saumure déchargée au niveau des unités de dessalement vers l'environnement marin.

Les résultats expérimentaux obtenus, montrent que la qualité de l'eau produite est de parfaite qualité ce qui dénote l'efficacité des procédés utilisés sans oublier l'absence d'impact de la saumure déchargée à la sortie de l'eau de refroidissement de la centrale électrique sur l'environnement marin.

Mots clés : Energie électrique, Eau de mer, Dessalement, Déminéralisation, Environnement.

ملخص

محطة الطاقة الحرارية ب كاب جنات هي محطة للطاقة البخارية، تستخدم الخصائص الديناميكية الحرارية لمياه البحر لغرض تحويل الطاقة. يتم الاحتراق داخل غلاية حيث تضمن الأنايبب دوران الماء. يؤدي تحويل الأخير إلى بخار إلى تشغيل توربين مرتبط بمولد كهربائي ينتج الطاقة الكهربائية

تعتبر مياه البحر بطبيعتها مادة أكالة للغاية لمواد البناء. وهي محملة بالأملاح والغازات الذائبة والمواد الصلبة العالقة كما أنها تحتوي على مجموعة غنية جداً من النباتات والحيوانات. ولذلك، إذا ترك دون علاج، فإن استخدامه يطرَح عدداً من المشاكل التشغيلية التي تحد من فعالية المنشآت

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة عمليات التشغيل المختلفة لمعالجة مياه البحر المتواجدة بالمحطة الحرارية ب رأس جنات و تخفيض أو القضاء على هذه الجزيئات بشكل كامل لإنتاج الكهرباء على مستوى هذه المحطة

المعالجة المسبقة هي الخطوة الأولى التي تنطوي على الكلورة والترشيح. بعد هذه العملية، نهتم بعملية التحلية عن طريق التقطير التوسعي المتتابع الذي ينتج مياه محلاة أقل تركيزاً في الأملاح، تتبعها عملية إزالة المعادن من الطبقة المختلطة من أجل التخلص من جميع الأملاح. وأخيراً، نحصل على مياه منزوعة المعادن نقية جداً ضرورية لتشغيل الأجهزة الكهربائية المساعدة.

يتم إجراء التحليلات الفيزيائية والكيميائية على الصفات المختلفة للمياه المنتجة وعلى المياه المالحة التي لا مفر منها والتي يتم تصريفها من وحدات التحلية إلى البيئة البحرية

وأظهرت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها أن نوعية المياه المنتجة هي ذات جودة مثالية، مما يدل على فعالية العمليات المستخدمة دون أن ننسى عدم تأثير المحلول الملحي الذي يتم تصريفه عند مخرج مياه التبريد من محطة توليد الكهرباء على البيئة البحرية

الكلمات الدالة : توليد الطاقة ، ماء البحر ، التحلية ، التنقية ، البيئة

Summary

The Cap Djinet thermal power plant is a steam power plant, which uses the thermodynamic characteristics of seawater for the purpose of energy transformation. Combustion takes place inside a boiler in which tubes ensure water circulation. The transformation of the latter into steam drives a turbine associated with an alternator producing electrical energy.

Sea water, by its nature, is very corrosive to construction materials. It is loaded with salts, dissolved gases and suspended solids. Also, it contains a very rich variety of flora and fauna.

Therefore, if left untreated, its use poses a number of operational problems that limit the effectiveness of the installations.

The objective of this study is to study the different operating processes of seawater treatment present in the Cap Djinet thermal power plant and to reduce or completely eliminate these particles for the production of electricity at the level of this station.

Pretreatment is the first step which involves chlorination and filtration. After this process, we are interested in the desalination process by successive expansion distillation which produces desalinated water less concentrated in salts, followed by a mixed bed demineralization process in order to eliminate all the salts. Finally, we obtain very pure demineralized water necessary for powering the electrical auxiliaries.

Physico-chemical analyzes are carried out on the different qualities of water produced and on the inevitable brine discharged from the desalination units into the marine environment.

The experimental results obtained show that the quality of the water produced is of perfect quality, which denotes the effectiveness of the processes used without forgetting the absence of impact of the brine discharged at the outlet of the cooling water from the power plant on marine environment

Key words : Power generation, Seawater, Desalination, Demineralization, Environment.

Liste des tableaux

Partie Bibliographique

Chapitre 01 : Présentation de la centrale thermique de cap Djinet

Tableau n° 01: Caractéristiques de surchauffeur.

Tableau n° 02 : caractéristiques de resurchauffeur.

Tableau n° 03 : caractéristiques de désurchauffeur.

Chapitre 02 : Propriétés de l'eau de mer

Tableau n° 04 : concentration des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35%.

Tableau n° 05 : concentrations du différent élément mineur.

Tableau n° 06 : salinité de différentes mers fermes ou peu ouvertes.

Tableau n° 07 : conductivité spécifique de l'eau de mer.

Tableau n° 08 : solubilité des Seles dans l'eau pure.

Tableau n° 09 : viscosité relative de l'eau de mer en fonction de la température et de la salinité.

Tableau n° 10 : principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables.

Chapitre 03 : Dessalement de l'eau de mer

Tableau n° 11 : comparaison des procédés de dessalement.

Tableau n° 12 : impacts méfasses sur l'environnement associés aux procédés de dessalement.

Tableau n° 13 : caractéristiques principales des pompes centrifuges de traitement.

Tableau n° 14 : caractéristiques techniques des pompes de transfert d'eau de mer.

Tableau n° 15 : caractéristiques techniques des pompes d'éjection.

Tableau n° 16 : caractéristiques techniques des pompes doseuses.

Chapitre 04 : Déminéralisation de l'eau de mer

Tableau n° 17 : produits régénérant les plus utilisés.

Tableau n° 18 : les différents points de dosage de l'ammoniac (NH_3) et de phosphate de sodium (Na_3PO_4).

Partie expérimentale

Tableau n°1 : Les caractéristiques techniques de l'installation de dessalement MSF.

Tableau n° 2 : Les Caractéristiques techniques des équipements de la station de déminéralisation

Tableau n°3 : Les paramètres techniques de cycle de vapeur.

Tableau n°4 : Détermination des HCO_3^- et CO_3^{2-}

Tableau n° 5 : Détermination phosphate

Tableau n°6 : Dosage de phosphate

Tableau n° 7 : Détermination des nitrites

Tableau n°8 : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau de mer, l'eau dessalée et l'eau

Tableau n°9 : Résultats des analyses physico-chimiques de la saumure avant et après dilution Avec l'eau de refroidissement

Tableau n° 10 : analyse physico-chimique des différents échantillons.

Tableau n° 11 : les résultats des analyses effectuées au circuit eau –vapeur.

Liste des figures

Chapitre 01 : Présentation de la centrale thermique de Cap Djinet

Figure 01: Plan de masse de la centrale.

Figure 02 : Schéma générale de traitement de l'eau de mer dans la centrale thermique de Cap Djinet.

Figure 03: principales transformations d'énergie.

Chapitre 03: Dessalement de l'eau de mer

Figure 04 : Procédés industrialisés de dessalement.

Figure 05 : Schéma général d'une installation de dessalement.

Figure 06 : Principe de distillation à simple effet.

Figure 07: distillation à multiples effets.

Figure 08: Principe de fonctionnement d'un système par détente successive MSF.

Figure 09 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse.

Figure 10: Principe du dessalement par électrodialyse.

Chapitre 04 : Déminéralisation de l'eau de mer

Figure 11 : Principe de l'échange d'ions.

Figure 12: Echangeur d'ions.

Figure13: Modes de régénération.

Figure 14: déminéralisation partielle.

Figure 15: Principe de déminéralisation totale.

Figure 16: Déminéralisation totale avec chaînes (CF+AF).

Figure 17: Déminéralisation totale avec chaînes (CF+Af+AF).

Figure 18: Déminéralisation totale avec lit mélangé.

Figure 19: Étape n°1 de régénération des lits mélangés.

Figure 20: Étape n°2 de régénération des lits mélangés.

Figure 21: Etape n° 3 de régénération des lits mélangés.

Figure 22: Étape n°6 de régénération des lits mélangés.

Figure 23: Étape n°7 de régénération des lits.

Figure 24: Étape n°8 de régénération des lits.

Figure 25: Etape n° 9 de régénération des lits.

Figure 26: Principe de production de vapeur.

Partie expérimentale

Figure 01 : Station d'entrée d'eau de mer

Figure 02 : Installation de filtration d'eau de mer au niveau de la centrale

Figure 03 : Les différents points d'injection de chlore au niveau de la centrale

Figure 04 : Cycle eau-vapeur

Figure 05 : Evolution de pH en fonction de l'eau traité

Figure 06 : Evolution de température en fonction de l'eau traité

Figure 07 : Evolution de la salinité en fonction de l'eau traité

Figure 08 : Evolution de la conductivité en fonction de l'eau traité

Figure 09 : Evolution de la turbidité en fonction de l'eau traité

Figure 10 : Evolution de la dureté totale en fonction de l'eau traité

Figure 11 : Evolution de Taet TAC en fonction de l'eau traité

Figure 12 : Evolution de la chlorures et de sodium en fonction de l'eau traité

Figure 13 : Evolution de fer, de cuivre et de la silice en fonction de l'eau traité

Liste d'images

Image n°1 :Dégrilleur entraîné électriquement

Image n°2 : Tambours filtrants

Image n°3 : La station de Dessalement

Image n°4 : Les filtres a lis mélangés

Image n°5 : pH mètre

Image n°6 : CONDUCTIMÈTRE

Listes d'abréviations

HP Haute Pression

MP Moyenne Pression

BP Basse Pression

MSF Multi Stage Flash

MED Distillation à multiple effets

VTE Tubes verticaux arrosés

THE Tubes horizontaux arrosés

VC Compresseur de vapeur

RO Osmose inverse

ED Electrodialyse

E Impact de degré élevé

M Impact de degré moyen

F Impact de degré faible

TH Titre Hydrotimétrique

TAC Titre Alcalimétrique Complet

TA Titre Alcalimétrique

TAF Titre d'Acides Fortes

TSIO2 Teneur en silice

TCO₂ Teneur en gaz carbonique

Cf Cation moyennement ou faiblement acide

CF Cation Fortement acide

Af Anion moyennement ou faiblement basique

AF Anion Fortement basique

|CO₂| Elimination de CO₂

LM Lits Mélangés (Mixed-bed)

sommaire

Introduction générale	
Chapitre 01 : Présentation de la centrale thermique de cap Djinet	
Introduction.....	4
1-Historique de la centrale	4
2-Plan de masse.....	5
3- Description de les différents composants de la centrale	6
3-1- La turbine	6
3-2- La chaudière	6
3-3- Le condensateur	10
3-4- Les pompes	11
- Les pompes d'extraction	11
- Les pompes d'alimentation	11
3-5- Réchauffeurs	11
- Réchauffeurs à base pression	11
- Réchauffeurs à haute pression	12
3-6- Dégazeur	12
3.7- Bâche alimentaire	12
3-8- Les réfrigérant	12
- Réfrigérant d'été (Réfrigérant d'eau d'extraction)	12
- Réfrigérant d'hydrogène	12
3.9. Alternateur	13
4- Les différents circuits du cycle eau et vapeur	13
4-1- Le circuit d'extraction (RM)	12
4-2- Le circuit d'alimentation	12
4-3- Le circuit (RA)	12
4-4- Le circuit de condensation (RC).....	13
5- Les différents circuits auxiliaires de la centrale	14
5-1-Station de l'eau de mer	14
5-2- Station de pompage et de filtration de l'eau de mer	14
6- Système traitement des eaux	14
6-1- Station de Dessalement de l'eau de mer	14

6-2- Station de déminéralisation	15
7- Un pose de dépotage et transfert fuel	15
8- Evacuation de l'énergie	15
9- Commande et contrôle	15
9-1- Système de surveillance, d'alarme et d'analyse	15
9-2- Salle de commande centralisée	15
10- Fonctionnement d'une tranche de production	16

Chapitre 02 : Propriétés de l'eau de mer

Introduction.....	18
1- Composition de l'eau de mer	18
1-1- Les éléments	18
1-2- Autre élément minéraux	18
1-3- Composition en gaz dissous de l'eau de mer	19
1-4- Matières organiques	19
2- Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer	19
2-1- salinité	19
2-2- Conductivité	20
2-3- Densité	20
2-4- Solubilité	21
2-5- Température	21
2-6- pH de l'eau de mer	22
2-7- Viscosité	22
2-8- Dureté	23
2-9- Conductivité électrique	23
3- Paramètres organoleptiques	23
3-1- Couleur	23
3-2- Goûtes et odeurs	23
3-3- Turbidité	24
4- Paramètres microbiologiques	24

Chapitre 03 : Dessalement de l'eau de mer

Introduction.....	26
1- Les principales technologies de Dessalement	26

2- Procédés de Dessalement	26
3- Schéma général d'une installation de Dessalement	27
4- Procédés de distillation	28
4-1- Distillation à simple effet	28
4-2- Distillation à multiple effet	29
4-3- Distillation par détente successives (Multi stage Flash, MSF)	29
4-3-1- Le procédé de distillation à détente à cycle direct	29
4-3-2- Procédé Flash à recirculation	30
4-4- Distillation par compression de vapeur	30
5- Procédés à membrane	31
5-1- Osmose inverse	31
5-2- Électro dialyse	32
6 Autres procédés	33
7- Comparaison des procédés	33
8- Choix des procédés	34
9- Situation tendance du Dessalement de l'eau en Algérie	34
9-1- Les ressources en eau en Algérie	34
9-2- Les avantages et les inconvénients de Dessalement de l'eau de mer en Algérie	34
10 Aboutissement du Dessalement dans le pays	35
10-1- Économique	35
10-2- Sociale	35
10-3- Technologique	35
10-4- Environmental	35
11- Les impacts de Dessalement de l'eau de mer	35
11-1- Impact socio-économique	36
11-2- Impacts sur l'environnement	36
12- Les ajouts chimiques dans une station de Dessalement	38
12-1- Les coagulant	38
12-2- Agents antitartres	38
12-3- Agents antisilice	38
12-4- Agents anti mousse	38
13- Présentation de l'installation de Dessalement MSF de cap-Djinet	38
13-1- Station de pompage	39

13-2- Les différents organes de l'installation	39
13-3- Filtre de l'eau de mer	41
13-4- Système d'évacuation : mise sous vide	41
13-5- Equipement de surveillance	41
13-6- Injection des produits chimiques	42

Chapitre 04 : Déminéralisation de l'eau de mer

Introduction.....	45
1- Echangeurs d'ions	45
1-1- Définition et principe de base	45
1-2- Description d'un échangeur d'ions	45
1-3- Groupes fonctionnelle	46
2- Quelques propriétés des résines	47
2-1- Capacité d'échange	47
2-2- Gonflement	48
3- Loi d'équilibre	48
4- Régénération des résines	49
4-1- Régénération à co-courant	49
4-2- Régénération à contre-courant	50
4-3- Rendement de régénération	51
4-4- Les réactifs régénérant	51
5- Déminéralisation par échangeurs d'ion	52
5-1- La déminéralisation partielle	52
5-2- La déminéralisation totale	53
5-3- Chaîne CF+AF	53
5-4- Chaîne CF+Af+AF	54
5-5- Chaîne avec groupement Cf+CF et Af+AF	55
5-6- Lits mélangés (LM)	55
6- Installation comportant une chaîne de finition	56
6-1- Principe de calcul d'une chaîne de déminéralisation	56
7- Présentation de l'unité de déminéralisation à lits mélangés de la centrale de cap-djinet	57
7-1- Différents organes de l'installation	57

7-2- Compartiment de l'acide HCl	58
7-3- Compartiment de la base NaOH	58
7-4- Description de l'installation	58
7-5- Les filtres à lits mélangés	58
7-6- La régénération	59
8- Le cycle eau-vapeur	64
8-1- Le générateur de vapeur	65
8-2- Fonctionnement de cycle	65
9- Inconvénients provoqués par les sels importés de l'eau	66
9-1- L'entartrage	66
9-2- La corrosion	67
9-3- La corrosion	67
9-4- L'entraînement dans la vapeur	67
10 Lutte contre les problèmes de circuits eau-vapeur	67
10-1- Le dégazage	68
10-2- Injection de l'ammoniac (NH ₃).....	68
10-3- Injection de phosphate trisodique (Na ₃ PO ₄)	68
11- Les besoins en eau de refroidissement et leur qualité	69
11-1- Principe de processus de refroidissement	69
11-2- Circuits de refroidissement au niveau de la centrale	69
11-3- Circuit de refroidissement principal	69
11-4- Circuit de refroidissement intermédiaire	70
12- Les besoins en eau de lavage	70

Partie expérimentale

Introduction.....	74
1- Technologie de traitement de l'eau de mer au niveau de la centrale	74
1-1- Prétraitement	74
1-2- Le traitement de Dessalement	77
1-3- Traitement de Déminéralisation	79
2- Production de l'électricité.....	80
2-1- Paramètres techniques de cycle	83
3- Les analyses	83

3-1- Prélèvement des échantillons	83
3-2- Mesure de pH	84
3-3- Mesure de température	85
3-4-- Mesure de la conductivité	85
3-5- Mesure de la salinité	86
3-6- Mesure de la turbidité	86
3-7- Determination de titre hydrométrique TH	87
3-8- Determination de titre hydrométrique calcique TH Ca ²⁺	87
3-9- Determination de l'alcanité	88
3-10 Determination des HCO ₃ ⁻ et CO ²	90
3-11- Determination de chlorures	99
3-12- Determination de sodium et de potassium	91
3-13- Determination des sulfates	92
3-14-- Determination des phosphates	93
3-15- Determination des nitrites	95
3-16- Determination des nitrates	97
3-17- Determination de fer	98
3-18- Determination de cuivre	99
3-19- Determination de silice	102
Résultats et discussion des analyses	102
1- Les analyses physico-chimiques de différentes échantillons	102
2- Interprétation des résultats	104
2-1- Le pH	104
2-2- La température	104
2-3- La conductivité et la salinité	105
2-4- La turbidité	106
2-5- La dureté totale (TH)	106
2-6- Le titre alcalimétriques TA et TAC	107
2-7- Le chlorures et le sodium	108
2-8- Le fer , le cuivre et la silice	109
2-9- Les autres paramètres	110
3- Les analyses dues à l'évaluation de l'impact environnementale	110
3-1- Les résultats	110

3-2- Interprétation des résultats	111
4- Contrôle de l'unité de Dessalement	111
4-1- Les résultats	111
4-2- Interprétation des résultats	112
4-2-1- Le pH	112
4-2-2- La conductivité	112
4-2-3- TA,TAC	113
4-2-4- Cuivre	113
5- Contrôle de circuits eau-vapeur	113
5-1- Résultats	113
5-2- Interprétation des résultats	114
5-2-1- Les eaux d'extraction (Condensés)	114
5-2-2- Les eaux d'alimentation	114
5-2-3- Les eaux de ballon chaudière	114
5-2-4- La vapeur surchauffée	115
5-2-5- La vapeur resurchauffée	115
Conclusion générale	117

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur de l'énergie est l'un des plus stratégiques pour l'économie. L'importance de son rôle dans le développement d'un pays est énorme. Pour cela, aucune nation ne saurait y prétendre sérieusement avant de se doter tout d'abord d'une source d'énergie aussi importante que celle de l'électricité.

Les centrales thermiques sont des installations qui transforment la chaleur fournie par une source d'énergie en énergie électrique. Cette dernière est produite par divers moyens, c'est ce qui différencie les centrales (centrale hydraulique, diesel, à charbon, à gaz, à vapeur, etc.), [1].

La centrale thermique de Cap Djinet est une centrale thermique à vapeur qui fait appel aux caractéristiques thermodynamiques de l'eau de mer dans un but de transformation d'énergie. La combustion s'opère à l'intérieur d'une chaudière dans laquelle des tubes assurent une circulation d'eau. La transformation de cette dernière en vapeur entraîne une turbine associée à un alternateur producteur d'énergie électrique.

L'eau de mer, de par sa nature, est très corrosive vis-à-vis des matériaux de construction. Elle est chargée de sels, de gaz dissous et de solides en suspension. Aussi, elle contient une variété très riche de flore et de faune. Par conséquent, si elle n'est pas traitée, son utilisation pose un certain nombre de problèmes opérationnels qui limitent l'efficacité des installations, [2].

L'objectif de ce traitement est de diminuer ou d'éliminer totalement ces particules en fonction de l'usage prévu pour l'eau.

L'eau de mer sera traitée de façons très différentes suivant qu'il s'agisse de fournir de l'eau de refroidissement ou de l'eau pour l'alimentation des chaudières à hautes pressions.

Notre étude consiste à définir les différents procédés de traitement des eaux de mer adaptés pour la centrale dans le but de produire de l'eau d'appoint destinée à l'alimentation des chaudières à haute pression. Nous allons nous baser sur l'étude de procédé de dessalement et de déminéralisation sur résine échangeuse d'ions. Cette étude sera soutenue par des analyses effectuées sur des échantillons prélevés dans différents endroits du circuit de l'eau.

Chapitre I:Présentation de la centrale thermique de cap djinet

Introduction:[3]

La centrale thermoélectrique de CAP-DJINET est située à l'Est d'Alger dans la wilaya de Boumerdes. Elle occupe une superficie de 35 hectares, elle est construite par une société allemande (siemens) en 1985.

Le choix du site a été réalisé à partir d'une étude qui a montré que :

- La proximité des consommateurs importants situés notamment dans la zone industrielle REGAIA-ROUIBA.
- La centrale est située au bord de la mer (facilitant l'utilisation de grandes quantités d'eau de refroidissement).
- Condition de sous-sol favorable, ne nécessitent pas de fondations profondes.

La centrale de Cap-Djinet se compose de 4 tranches de type thermique-vapeur d'une puissance unitaire de 176 MW pour un régime de 100% (pleine charge) à la borne alternateur, la puissance totale délivrée par les 4 tranches est de 704 MW.

La consommation totale des auxiliaires est environ 32 MW, ce qui fait que la puissance nette fournie au réseau national est de 672 MW.

1. Historique de la centrale :[3]

La centrale à été construite par un consortium Austro-Allemand : SIEMENS-KWU-SGP.

KWU : KRAFTWERK-AG (RFA)

SGP : SIMMERING GRAZ PAUKER (Autriche)

SIEMENS (Autriche)

Qui avaient la responsabilité des études, de la supervision du montage et du contrôle de l'ouvrage, ainsi que d'une entreprise Espagnole (DRAGADOS) à laquelle a été confiée la réalisation de la prise d'eau de mer.

Les principales entreprises algériennes qui ont participé à la réalisation de la centrale sont les suivantes : ENCC, ETTERKIB, BATIMETAL, GENISIDER, INERGA, SNLB, PROSIDER, ENATUB, SNIC, GTP, SONATRAM, SOGEP.

Les principaux contrats de réalisation de cette centrale ont été signés en 1980, les travaux de terrassement ont démarré en Mars 1981 et le début du montage de la centrale est effectué le 17 Juin 1986. La mise en service des quatre groupes s'est effectuée comme suit :

Groupe 1: Couplage sur réseau le 17 Juin 1986.

Groupe 2: Couplage sur réseau le 17 Septembre 1986.

Groupe 3: Couplage sur réseau le 29 Novembre 1986.

Groupe 4: Couplage sur réseau le 21 Février 1987.

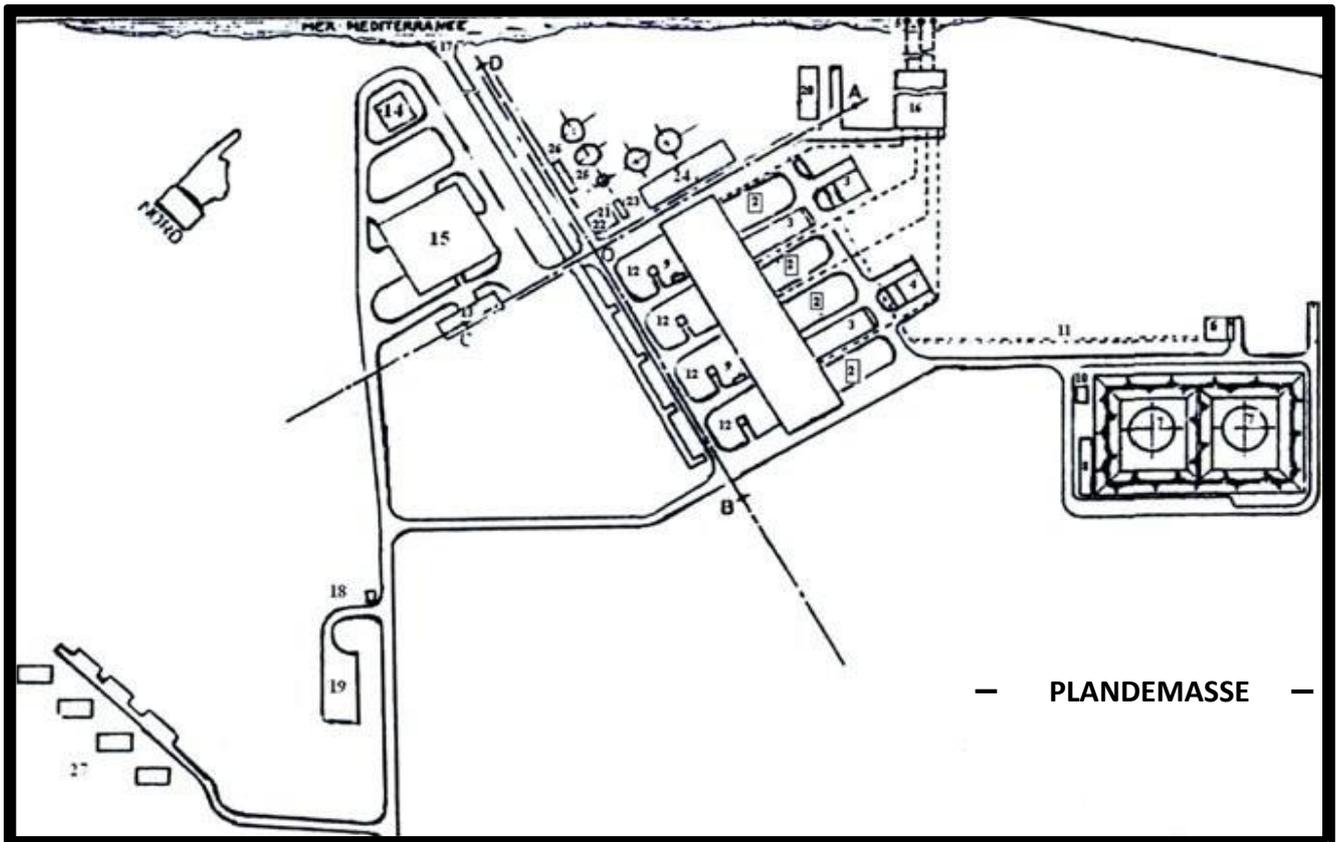


Figure01:Plan de masse de la centrale

2. Plan de masse :

Légende :

- 1-Salle des machines
- 2- Chaudière.
- 3- Locaux des auxiliaires électriques.
- 4- Locaux des auxiliaires mécaniques.
- 5- Tour de prise d'eau de mer.
- 6- Station de détente de gaz.
- 7- Réservoir stockage fuel.
- 8- Station pompage et dépotage fuel.
- 9- Station de production H
- 10- Poste d'incendie à mousse.
- 11- Rack à tuyauterie.
- 12- Air des transformateurs.
- 13- Bâtiment administrative.
- 14- Cantine.
- 15- Atelier magazine.
- 16- Station de pompage.

- 17- Canal et rejet d'eau de mer
- 18- Poste de garde.
- 19- Parking.
- 20- Station de chloration.
- 21- Préparation d'eau potable.
- 22- Déminéralisation
- 23- Fosse de neutralisation.
- 24- Dessalement d'eau de mer.
- 25- Station des pompes d'incendie.
- 26- Pompes d'eau déminéralisée
- 27- Logements d'exploitation.

3. Description des différents composants de la centrale :[3]

3.1. La turbine :

Introduction :

La turbine est une machine qui convertit l'énergie thermique de vapeur en énergie mécanique, plus généralement, c'est un organe permettant la détente d'un fluide en recueillant son énergie sous forme mécanique. Pour générer de l'énergie mécanique dans des applications industrielles, la turbine doit être puissante et avoir un meilleur rendement, la turbine à vapeur est la plus appropriée pour rencontrer ces exigences.

a) La turbine de la centrale de Cap-Djinet:

C'est l'élément le plus essentiel dans la centrale, elle transforme l'énergie thermique contenue dans la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre, le travail mécanique obtenu sert à entraîner l'alternateur.

Cette turbine est une machine à une ligne d'arbres, composée de corps HP (Haute Pression), MP (Moyenne Pression), et BP (Basse Pression) séparés.

Elle comporte (06) soutirages qui alimentent (03) réchauffeurs (BP), et (02) réchauffeurs (HP) et la bâche alimentaire. Les rotors de la turbine et de l'alternateur sont accouplés rigidement.

b) Caractéristiques de la turbine :

- Longueur : 16,125 m.
- Largeur : 13 m.
- Poids : 500.10^3 kg.
- Vitesse de rotation : 3000 tr/min.
- Puissance : 176 MW (pleine charge).

3.2. La chaudière : (générateur de vapeur)

La chaudière utilisée est de type à circulation naturelle. Le rôle du générateur de vapeur est de faire passer l'eau d'alimentation de l'état liquide à l'état vapeur surchauffée à haute pression afin d'alimenter la turbine. C'est l'un des éléments essentiels de circuit thermique.

a) Description et principe :

La chaudière livrée pour Cap-Djinet est de type « circulation naturelle ». L'eau d'alimentation est refoulée par les pompes d'eau d'alimentation directement jusqu'à l'économiseur. L'eau réchauffée est ensuite refoulée dans le ballon de la chaudière.

Le ballon constitue le réservoir effectif des écrans de la chaudière. Du ballon l'eau coule par les colonnes de descente jusqu'aux collecteurs des écrans. Les tubes écrans sont étanches au gaz et forment la chambre de combustion. Dans les tubes-écrans se forme un mélange de bulles de vapeur et d'eau, qui a un poids spécifique plus faible que l'eau froide.

Ce mélange monte jusqu'au ballon chaudière par gravité et différence de densité (circulation naturelle); Dans le ballon s'opère une séparation de l'eau et de la vapeur et celle-ci est conduite aux surchauffeurs.

b) Caractéristiques du générateur de vapeur :

- Capacité de vaporisation : 540 t/h.
 - Température de l'eau alimentation : 246°C.
 - Pression de service : 160 bars.
 - Débit vapeur : 523 t/h.
 - Température de sortie de la fumée : 118°C.
 - Température dans le foyer : 900°C.
- Les dimensions du générateur de vapeur :
 - hauteur : 17000 mm.
 - longueur : 9675 mm.
 - largeur : 9375 mm.
 - puissance du générateur de vapeur :
 - débit de vapeur minimale : $Q_{\min} = 130 \rightarrow P_t = 443 \text{ MW}$.
 - débit de vapeur maximale : $Q_{\max} = 530 \text{ t/h} \rightarrow P_m = 176 \text{ MW}$.
 - débit de vapeur nominale : $Q_{\text{nom}} = 523,9 \text{ t/h} \rightarrow P_n = 176 \text{ MW}$.

c) Fonctionnement de la chaudière :

Pour simplifier la description du fonctionnement de la chaudière, nous allons d'abord repartir les circuits en deux sections principales :

- circuit d'eau.
- circuit de vapeur.

Circuit d'eau :

Le circuit d'eau est constitué d'un économiseur, d'un ballon, de colonnes de descente et d'écrans vaporisateurs.

a) Economiseur :

L'économiseur a un rôle important au démarrage de la chaudière, il reçoit de l'eau froide sur une surface large de 2080 m² environ, de type tuyauterie en forme de serpentín qui se trouve à la fin de parcours des gaz de combustion qui permet de réchauffer l'eau destinée au ballon de la chaudière.

a.1) Caractéristiques de l'économiseur :

- Température d'eau à l'entrée : 246,3°C.
- Température d'eau à la sortie : 284,7°C.
- pression de service (entrée): 164,3 bars.
- débit de fumée traversant l'économiseur : 550 – 650 t/h.
- débit d'eau d'alimentation : 523 t/h.
- volume d'eau : 10,5 m³.

b) Ballon :

L'eau d'alimentation réchauffée dans l'économiseur arrive au ballon chaudière où elle sera conduite aux écrans vaporisateurs par les colonnes de descente, le volume du ballon chaudière est de 26,9 m³.

Après l'échauffement un mélange eau-vapeur monte vers le ballon, Dans le ballon, il se produit une séparation entre la vapeur et l'eau par des séparateurs cyclones.

b.1) Caractéristiques du ballon chaudière :

- pression de service : 160 bars.
- température : 347,5°C
- volume d'eau : 26,9 m³.

c) Colonne de descente et écrans vaporisateurs :

Les colonnes de descente sont raccordées à la partie inférieure du ballon et conduisent l'eau à la partie inférieure de l'écran vaporisateur.

c.1) Caractéristiques des colonnes de descente et tubes écrans :

- Surface de chauffe : 1980 m²
- Timbre : 172 bars.
- Pression de service : 160 bars.
- Volume d'eau : 37 m³.
- Nombre de colonnes de descente : 4.

Circuit de vapeur :

a) surchauffeur:

Il existe trois surchauffeurs montés en lignes séparées parallèles, on trouve deux désurchauffeurs après le premier et la deuxième surchauffeur qui servent à la protection de ce dernier contre des températures plus élevées et de garder la même température de sortie dans la chaudière.

La vapeur qui sort du ballon de la chaudière passe par les surchauffeurs pour augmenter le rendement de l'installation. Débit de vapeur surchauffée : 523,9 t/h.

a.1) Caractéristiques de la surchauffeur :

tableau n°01 :caractéristiques de surchauffeur.

Caractéristiques	Surchauffeur 1 ^{ère}	Surchauffeur 2 ^{ème}	Surchauffeur 3 ^{ème} (finale)
Nombre de files	2*128	4*64	2*128
Diamètre extérieur [mm]	38	33,7	33,7
Epaisseur [mm]	3,6 - 4,5	4 - 5	4,5 – 5
Surface de chauffe [m ²]	1565	581	538
Pression de service [bar]	160	150	145,7
Timbre [bar]	172	172	172
Température d'entrée [°C]	360	394	471
Température de sortie [°C]	427	485	540

b) Resurchauffeur:

Après la première détente dans le corps HP (turbine à haute pression) la vapeur traverse les tubes du resurchauffeur où la température de celle-ci augmente une seconde fois, mais garderont la pression de détente constante. La vapeur sera envoyée dans la deuxième partie de la turbine (corps MP et BP). Débit de vapeur resurchauffée : 467,9 t/h.

b.1) Caractéristiques du resurchauffeur :

tableau n° 02 : caractéristiques du resurchauffeur.

Caractéristiques	Resurchauffeur 1 ^{ère}	Resurchauffeur 2 ^{ème}
Surface de chauffe [m ²]	1832	929
Volume d'eau [m ³]	18,96	10,11
Pression de sortie [bar]	39	37
Timbre [bar]	48	48
Température d'entrée [°C]	357	436
Température de sortie [°C]	428	540

c) Désurchauffeurs:

Pour stabiliser la température de la vapeur surchauffée qui sort de la chaudière par l'injection des gouttelettes d'eau (pulvérisation), ils sont disposés entre les surchauffeurs et même entre les resurchauffeurs.

c.1) Caractéristiques du désurchauffeur :

tableau n° 03 : caractéristiques du désurchauffeur.

Caractéristiques	Désurchauffeur 1 ^{ère}	Désurchauffeur 2 ^{ème}
Debit d'eau [t/h]	35,7	4,6
Pression d'entre [bar]	165,4	60

3.3. Le condenseur :

Introduction :

Le condenseur de la turbine fait partie du circuit de condensation qui avec le circuit d'eau de circulation et les circuits auxiliaires assure la condensation de la vapeur d'échappement de la turbine et sa détente à une contre pression basse.

Il existe deux types de condenseur :

- **condenseur par surface.**
- condenseur par mélange.

Le condenseur de la centrale de Cap-Djinet est un condenseur de type **par surface**.

a) Fonction :

Le condenseur utilisé dans l'installation est un échangeur à échange par surface. Il est placé sous la turbine à basse pression. La vapeur se condense au contact des parois des tubes, dans lesquelles passe l'eau de mer de refroidissement.

Les principales fonctions de condenseur sont:

- D'assurer la condensation de la vapeur d'eau évacuée du corps (BP) de la turbine et de réintroduire le condensat dans le circuit eau-vapeur (poste d'eau).
- D'augmenter la chute d'enthalpie de la vapeur détendue en établissant une dépression, afin d'obtenir un rendement de la turbine aussi élevé que possible.
- De dégazer le condensat et d'évacuer les incondensables (en majorité de l'air).
- Reçoit également le condensat des réchauffeurs (BP).
- Recevoir des différentes purges et de la vapeur de contournement (by-pass BP).

b) Caractéristiques du condenseur:

- Pression dans le condenseur : 0,07 bar absolue.
- Capacité du puits entrée/sortie : eau de mer 6° à 8°c.
- Surface d'échange : 10101 m²
- Masse de condenseur à vide : 258,5 tonnes.
- Matériau de tube : titans.
- Vitesse de l'eau dans les tubes : 1,8 m/s.
- Débit vapeur : 98,25 kg/s.
- Débit d'eau de refroidissement : 6500 kg/s (eau de mer).
- Nombre de tubes : 14850.

- Longueur des tubes : 11490 mm.
- La température de sortie : 32,9°C.
- La pression de sortie : 0,05 bars.

3.4. Les pompes :

Il existe dans la centrale de CAP-DJINET : (02) pompes d'extraction et (03) pompes d'alimentation et des pompes de circulation.

a) Pompe d'extraction :

Les pompes d'eau d'extraction à pour rôle d'acheminer le condensat principal à la sortie du condenseur jusqu'à la bache alimentaire en passant par les réchauffeurs basse pression, les réfrigérants d'été, les réfrigérants d'hydrogène.

a.1) Caractéristiques des pompes d'extraction:

- Type de pompe : centrifuge à 3 étages.
- Température d'entrée : 32,9°C
- Pression de service (hauteur totale) : 16,8 bars.
- Pression (hauteur à débit nul) : 19,7 bars.
- Débit nominale : 414 m³/h.
- Température de sortie : 33°C.

b) Pompe d'alimentation :

Les pompes alimentaires servent à alimenter le générateur de vapeur (chaudière) avec de l'eau nécessaire en passant par les réchauffeurs haut pression (HP) du poste d'eau (le poste d'eau est l'ensemble des appareils qui transfère l'eau du cycle depuis le condenseur jusqu'à la chaudière) et l'économiseur du générateur de vapeur.

Les pompes alimentaires doivent fournir la quantité d'eau nécessaire pour maintenir le niveau de l'eau dans le réservoir de la chaudière entre deux limites bien définies.

b.1) Caractéristiques des pompes d'alimentation :

- Type : pompe centrifuge
- Température de l'eau : 151,4°C
- Débit nominale : 261,6 m³/h.
- Pression aspiration : 5,6 bars.
- Pression refoulement : 177 bars.

3.5. Réchauffeur :

a) Réchauffeurs à Basse Pression :

Le rôle de ces trois réchauffeurs de BP est de réchauffer le condensât lors de son transfert dans la bache alimentaire. Ils sont alimentés par les soutirages qui viennent du corps BP de la turbine. Le débit dans les réchauffeurs : 114,415 kg/s.

b) Réchauffeurs à Haute Pression :

Le rôle de ces deux réchauffeurs est de réchauffer l'eau d'alimentation lors de son transfert dans la chaudière. Ils sont alimentés par des soutirages provenant: l'un du corps MP et l'autre du corps HP.

3.6. Dégazeur:

Le dégazeur a pour rôle d'éliminer les gaz des eaux. Il contient une chambre de mélange pour les condensats à dégazer, une plaque de dégazeur et un collecteur horizontal, zone de collecte et d'évacuation des incondensables.

3.7. Bâche alimentaire:

La bâche alimentaire a un rôle de réchauffeur et conditionne la pression à l'aspiration de la pompe alimentaire.

C'est un réservoir cylindrique combiné avec un dégazeur. Il reçoit de l'eau à partir des pompes d'extraction, eau qui traverse un certain nombre de réchauffeurs.

Il reçoit également de la vapeur à partir du soutirage (S4) qui vient du corps MP (moyen pression).

L'eau se réchauffe jusqu'à la température de saturation correspondant à la pression du soutirage, en condensant la vapeur qui est prélevée à la turbine.

Le dégazeur et la bâche alimentaire sont protégés par des soupapes de sécurité installées sur la tuyauterie.

a) Caractéristiques de la bâche alimentaire:

- Le volume total : 163 m³
- Diamètre de l'enveloppe : 3,6 m.
- La longueur de la bâche : 16,5 m
- Température à la sortie de la bâche : 150-151°C.
- Pression : 4,9 - 5 bars.
- Le débit : 145,34 kg/s.
- Température d'entrée : 114°C.

3.8. Les Réfrigérants :

a) Réfrigérants d'été (Réfrigérants d'eau d'extraction) :

Les réfrigérants d'été servent à refroidir l'eau d'extraction dans le cas de température élevées dans le circuit (généralement en été d'où le nom de réfrigérants d'été).

Les deux réfrigérants d'été utilisent l'eau de mer comme source froide.

Débit eau de mer : (2 x 215 m³/h).

b) Réfrigérants d'hydrogène :

Le réfrigérant d'hydrogène sert à refroidir l'hydrogène contenu dans l'alternateur.

Les quatre réfrigérants d'hydrogène (H₂) (4*25%) sont logés horizontalement à l'intérieur de l'enveloppe de l'alternateur. C'est des échangeurs par surface qui refroidissent l'H₂ chaud par la méthode des courants croisés. L'échange de chaleur entre l'H₂ et l'eau de refroidissement s'effectue par l'intermédiaire de tubes à ailettes parcourus par l'eau.

3.9. Alternateur :

L'alternateur est une machine transformatrice, c'est pour cela qu'il transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

a) Caractéristiques de l'alternateur:

- La puissance maximale produite est de 176 MW.
- La tension : 15,5 KV.
- La fréquence : 50 Hz.
- L'intensité du courant : 8195 A.

4. Les différents circuits du cycle eau et vapeur :

4.1. Le circuit d'extraction (RM) :

Les pompes d'extraction aspirent le condensât à partir de condenseur à une pression de 0,05 bar et une température de 33°C. Elle refoule l'eau vers les réchauffeurs BP1, BP2 et BP3 où l'augmentation de la température s'effectue comme ceci:

- 52°C à la sortie du réchauffeur BP1.
- 84°C à la sortie du réchauffeur BP2.
- 113°C à la sortie du réchauffeur BP3.

L'eau est prise à la bache alimentaire où se passe le dégazage, sa température est de 151°C et sa pression est de 170 bars.

4.2. Le circuit d'alimentation (RL):

L'eau de la bache alimentaire est aspirée par les pompes alimentaires qui l'envoient vers les réchauffeurs HP1 et HP2 où on constate que la température augmente comme ceci :

- 200°C à la sortie du réchauffeur HP1.
- 246°C à la sortie du réchauffeur HP2.

L'eau chaude comprimée arrive au Ballon chaudière, elle traverse les parois tubulaires qui tapissent la chambre de combustion où elle arrive jusqu'à la température d'ébullition et même jusqu'à la température de vaporisation.

La moitié supérieure du ballon chaudière contient de la vapeur saturée celle-ci est dirigée vers les trois surchauffeurs, où la température va augmenter jusqu'à 540°C, dans le cas où la température est plus élevée que ceci, les désurchauffeurs se déclenchent afin de la diminuer jusqu'à 540°C, la pression reste presque constante (170 bar).

4.3. Le circuit (RA) :

La vapeur surchauffée arrive au corps HP où elle se détend jusqu'à 40 bars et sa température diminue jusqu'à 357°C. Elle retourne vers les resurchauffeurs qui se trouvent dans la chaudière où elle se réchauffe pour atteindre les 540°C. Ensuite elle entre dans le corps MP de la turbine (suivant le

circuit **RB**) et continue jusqu'au corps BP. En passant par ces trois corps elle fournissant un travail moteur.

4.4. Le circuit de condensation (RC) :

Ce dernier circuit est le condenseur dans lequel s'effectue la condensation de la vapeur sous vide à une pression de 0,05 bars et à température de 33°C environ. L'eau recueillie est froide et recommence son cycle de nouveau.

5. Les différents circuits auxiliaires de la centrale :

5.1. Station de l'eau de mer :

L'exploitation d'une Centrale Thermique de grande puissance demande pour réduire la chaleur résiduelle, d'importantes quantités d'eau de refroidissement. Les besoins de la Centrale de Cap-Djinet s'élèvent à 30 m³/s. environ.

5.2. Station de pompe et de filtration d'eau de mer :

La position de la station de pompe et de filtration d'eau de mer est basse sur une profondeur de 7 m environ de profondeur dans la mer méditerranée, la prise d'eau est située à 900 mètres de la côte, L'arrivée de l'eau à la station de pompe se fait par trois tubes en béton d'un diamètre de 2,70 m.

6. Système traitement des eaux:

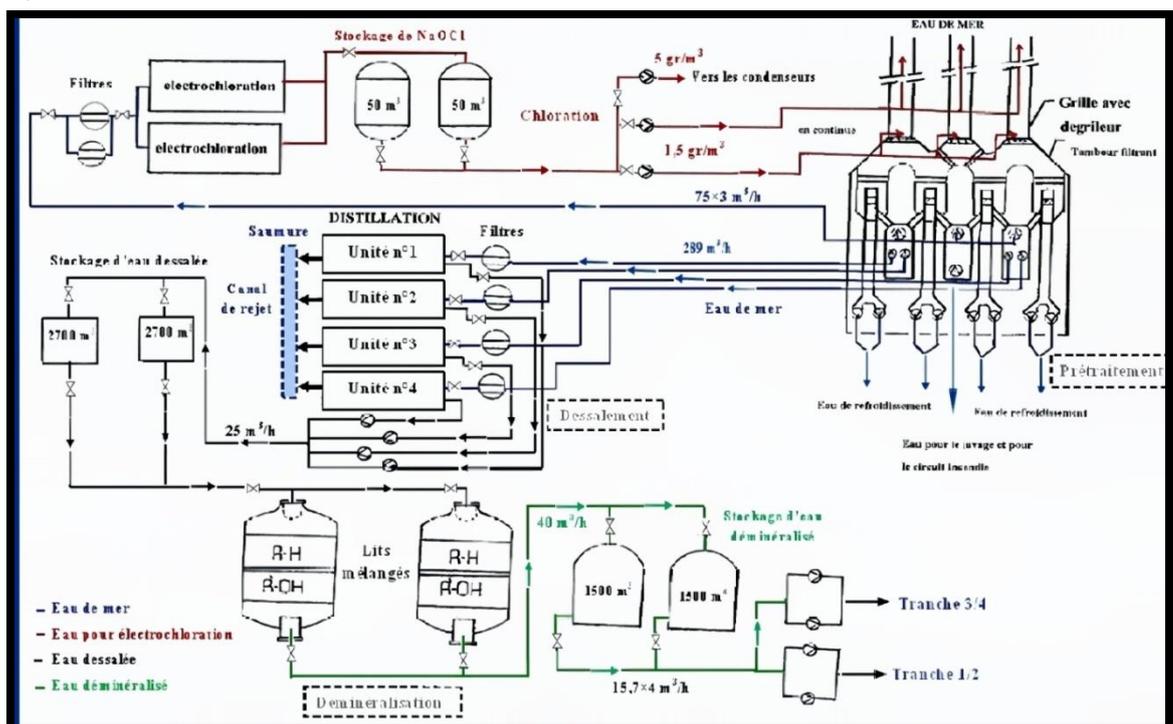


Figure 02 : Schémagénéral de traitement de l'eau de mer dans la centrale thermique de Cap Djinet

6.1. Station de dessalement de l'eau de mer :

La station de dessalement a pour rôle la production d'eau dessalée à partir de l'eau de mer.

Quatre unités de dessalement produisant 500 m³/jour chacune, assurent la production en eau

dessalée, stockée dans deux bâches (2 x 2700 m³).

Type de l'installation : **Multi-flash** qui sert à vaporiser l'eau de mer pour lui enlever le sel puis la condensée pour obtenir de l'eau dessalée.

Trois produits chimiques sont injectés pour le traitement de l'eau qui est les suivants :

- **Le belgard EVN:** Inhibiteur d'incrustation utilisé pour éviter l'entartrage.
- **La belite (M33):** Produit anti-mousse utilisé pour éviter la formation de la mousse au niveau des évaporateurs.
- **Le bisulfite de sodium (NA2SO3):** Produit permettant l'élimination du chlore dans l'eau pour diminuer la conductivité.

6.2. Station de déminéralisation :

L'installation de déminéralisation sert au traitement de l'eau d'appoint d'alimentation pour les 4 chaudières.

Deux chaînes de déminéralisation de 40 m³/h chacune, parachèvent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau vapeur.

Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m³ chacun.

7. Un poste de dépotage et transfert fuel:

Deux (02) bâche de stockage de capacité : 2x10000 m³.

8. Evacuation de l'énergie :

L'énergie électrique produite est évacuée par l'intermédiaire de lignes 225 KV sur le poste BOUDOUAOU et le poste de SI-MUSTAPHA.

9. Commande et contrôle:

La centrale de Cap-Djinet se caractérise par un degré élevé d'automatisme et de centralisation, on de nombre une quarantaine de chaînes de régulation par groupe de production qui permet un pilotage automatique du groupe.

9.1. Système de surveillance, d'alarme et d'analyse :

Pour permettre une bonne conduite du groupe de production des paramètres d'exploitation (température, pression, niveau d'eau, vibrations..), des différents équipements du groupe, sont indiqués, enregistrés en permanence en salle de commande et signalés en cas de dépassement de seuil.

Pour une meilleure analyse en cas d'incident un consigneur d'état est installé, il permet d'enregistrer les alarmes dans un ordre chronologique.

9.2. Salle de commande centralisée :

Chaque paire de tranches est contrôlée et réglée depuis la salle de commande. La salle de commande comprend pour chaque tranche :

- Deux (02) pupitres de conduits.
- Deux (02) tableaux verticaux où sont rassemblés les organes de commande et les appareils d'enregistrement de la plus grande partie des paramètres.
- Un (01) tableau Synoptique schématisant les auxiliaires électriques.

10. Fonctionnement d'une tranche de production :

Il est basé sur la transformation d'énergie chimique contenue dans un combustible, en énergie électrique en passant par l'intermédiaire de l'énergie thermique et mécanique. Cette transformation s'opère dans divers appareils en utilisant les propriétés physiques de l'eau sous ses diverses formes liquide et vapeur.

En gros, on a trois transformations principales (voir figure 3) [4]

Transformation de l'énergie chimique issue du combustible en énergie calorifique (dans un générateur de vapeur), qui est la chaleur nécessaire à la vaporisation et à l'augmentation de la température de l'eau.

L'énergie calorifique obtenue est transmise principalement à l'eau sous formes liquide et vapeurs (saturée et surchauffée). La transformation de cette énergie en énergie mécanique s'opère dans une turbine à vapeur.

L'énergie mécanique résultant de la deuxième transformation est transmise directement à l'alternateur à travers un accouplement pour la transformer en énergie électrique.

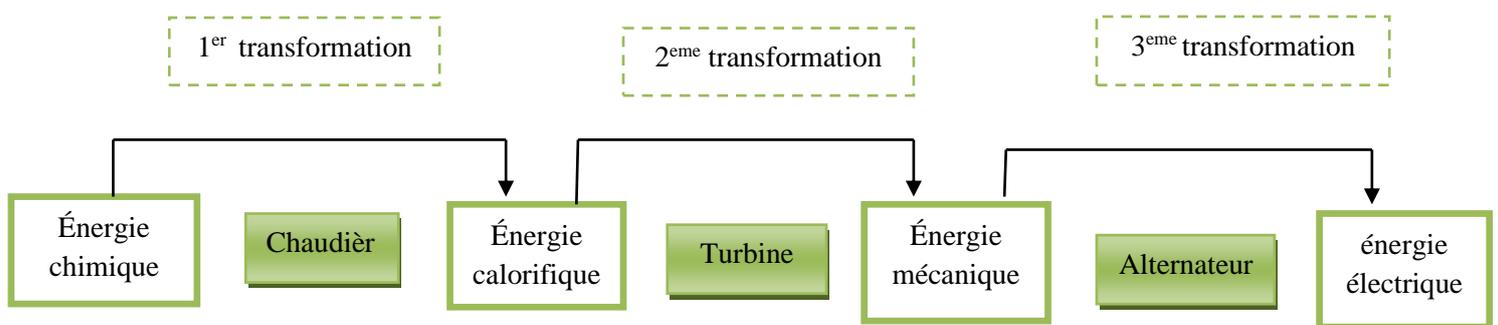


Figure 03: principales transformations d'énergie

Chapitre II:

Propriétés de l'eau de mer

Introduction :

Une quantité équivalant à 97,5% du stock d'eau de la planète est salée et seule une fraction correspondant à 2,5 % se compose d'eau douce. Environ 70% de cette eau douce de la planète est fixée dans les calottes glaciaires des pôles et une partie importante des 30% restants est constituée par des nappes aquifères souterraines de régions reculées. En effet, seule une fraction minuscule de l'eau douce (moins de 1% de l'eau douce totale, soit 0,007 % du stock d'eau mondial) est disponible dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs et est facilement accessible à l'homme pour son utilisation directe. En outre, la répartition spatiale et temporelle du stock et du débit d'eau douce est très inégale.

[5]

La présence de sel dans l'eau de mer modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité). D'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencés de manière significative. Enfin, certains sont essentiellement déterminés par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).[6]

1. Composition de l'eau de mer :

1.1. Les éléments

La masse totale des sels dissous dans 1 kg d'eau de mer peut varier d'une eau de mer à une autre. Par contre, les proportions relatives des principaux sels restent constantes. Cette propriété est évoquée sous l'appellation de loi de Marcet ou de Dittmar.[7]

Les éléments principaux, c'est-à-dire ceux qui contribuent d'une façon notable à la masse de sels dissous dans les océans, représentent 11 éléments différents. Leurs concentrations sont regroupées dans le tableau n°04,[2]

Tableau n° 04 : Concentrations des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35 ‰[8]

Anions	Concentrations (mg/Kg)	Cations	Concentrations (mg/Kg)
Chlorure (Cl ⁻)	19 353	Sodium(Na ⁺)	10 160
Sulfate(SO ₄ ²⁻)	2 712	Magnesium(Mg ²⁺)	1 249
Bicarbonate(HCO ₃ ⁻)	142	Calcium(Ca ²⁺)	413
Bromure (Br ⁻)	67	Potassium(K ⁺)	387
Fluorure (F ⁻)	1	Strontium (Sr ²⁺)	8
Bore	4		

1.2. Autres éléments minéraux: [2]

L'eau de mer contient de nombreux autres éléments à des concentrations beaucoup plus faibles (tableau n° 05). 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 n° 05 : Concentrations des différents éléments mineurs

Eléments	Concentrations (µg/l)	Eléments	Concentrations (µg/l)	Eléments	Concentrations (µg/l)
Li	170	Mn	2	Rb	120
Al	10	Fe	10	Mo	10
Si	3 000	Ni	2	I	60
P	70	Cu	3	Ba	30
Ti	1	Zn	10	U	30
V	2	As	3		

1.3.Composition en gaz dissous de l'eau de mer:

Les gaz dissous comprennent principalement : 64 % d'azote, 34 % d'oxygène, 1,8 % de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre) [9]

1.4.Matières organiques: [2]

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. Par convention, on sépare par filtration sur des filtres de 0,5 µm les matières dissoutes des matières organiques particulaires.

2. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer :

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer sont présentées Comme suit :

2.1.Salinité :

a) Définition :

Dans sa première définition, donnée en 1902 : « la salinité, de symbole S, est la masse en grammes de substances solides contenues dans un kilogramme d'eau de mer, les carbonates étant transformés en oxyde, les bromures et iodures remplacés par leur équivalent en chlorure, les matières organiques oxydées » . Elle se mesure en PSU (practicalSalinity Unit), unité reposant sur la conductivité de l'eau de mer, équivalente au pour mille (‰) ou encore au g/kg, [10]

b) Expression de la salinité : [11]

Compte tenu de la difficulté de la mesure directe de la salinité, Knudsen a proposé un calcul de cette dernière à partir de la chlorinité, qui représente la masse d'halogénures (à l'exception du fluor) exprimée en grammes de chlore par kilogramme d'eau de mer, par la relation suivante :

$$S \text{ ‰} = 0,030 + 1,805 \text{ 0 Cl ‰}$$

En 1956, plusieurs organismes internationaux ont établi et publié des tables océanographiques internationales, et recommandent l'emploi d'une nouvelle relation empirique plus précise entre salinité et la chlorinité :

$$S \text{ ‰} = 1,806 \text{ 55 Cl ‰}$$

c) Variation de la salinité :

La salinité observée dans les différents océans ou mers de globe résulte d'un équilibre entre l'évaporation, la pluie et les apports des fleuves (salinité faible) d'une part et les échanges d'eau avec les autres mers ou océans auxquels ils sont reliés d'autre part, [6]

Elle est donc de l'ordre de 35 g/l et c'est cette valeur qui est considérée comme salinité standard de l'eau de mer. Des variations plus ou moins importantes autour de cette valeur moyenne existent en fonction du bilan précipitation-évaporation, [12]

La salinité peut être très différente dans le cas des mers fermées ou peu ouvertes sur les masses océaniques comme l'illustre le tableau n° 06, [6]

Tableau n° 06: Salinité de différentes mers fermées ou peu ouvertes, [6]

Origine	Salinité « g/l »
Mer baltique	17
Mer noire	22 à 25
Océans atlantique et pacifique	32 à 38
Mer méditerranée	37 à 40
Mer rouge – Golf Arabique	40 à 47
Mer morte	270

2.2. Conductivité : [2]

De l'ordre de 40 ms/cm, la conductivité des eaux de mer subit des variations importantes suivant la température et la salinité des océans (tableau n° 07).

Tableau n° 07 : Conductivité spécifique de l'eau de mer en ms/cm.

Salinité (‰)	25°C	15°C	5°C
10	17,345	13,967	10,616
20	32,188	25,957	20,816
30	46,213	37,351	29,090
35	53,025	42,896	33,457

2.3. Densité :

Rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4°C. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1,035 à 1,036. Elle varie avec la salinité, la température et la pression. La densité est mesurée par le densimètre ou hydromètre à flotteur. [7] Il en existe deux types :

a) L'hydromètre à aiguille :

Présente l'avantage d'être bon marché et facile à utiliser mais a la mauvaise réputation d'être peu précis à cause des frottements des paliers de l'aiguille notamment en raison des concrétions de sel dont ils peuvent faire l'objet Il comporte souvent une échelle de densité (Specific Gravity) et en ppt à une température donnée [7]

b) L'hydromètre flottant :

Consiste en un cylindre creux, lesté et gradué, qui s'enfonce plus ou moins dans le liquide à mesurer selon sa densité. Il comporte aussi parfois un thermomètre comme sur l'image ci-contre On lit directement la densité du liquide dans lequel il est plongé sur la graduation présente à la surface libre, valable uniquement à la température généralement t indiquée sur l'appareil.

Il faut lire l'échelle au niveau de la surface de l'eau, et pas au niveau du ménisque qui peut monter ou descendre sur le tube en verre. [13]

2.4.Solubilité :

La solubilité d'un composé ionique ou moléculaire, appelé soluté, est la quantité maximale de moles de ce composé que l'on peut dissoudre ou dissocier, à une température donnée, dans un litre de solvant. La solution ainsi obtenue est saturée.

Tableau n° 08 : Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l [11].

éléments	Na	Ca	Mg	K	Ba	Sr
Cl	360	730	560	330	370	510
SO ₄	170	2	350	0,002	0,002	0,11
NO ₃	840	1220	740	90	90	70
CO ₃	190	0,013	1	0,02	0,02	0,011
F	45	0,013	0,076	1,6	1,6	0,1

- Les sels de Sodium Cl, SO₄, NO₃, et F sont très bien solubles.
- Les Nitrates Na, Ca, Mg, K, Ba et Sr sont très bien solubles.
- Les sels de Calcium et Strontium SO₄, CO₃, et du F ont une solubilité très limité.
- Les carbonates ont aussi une solubilité très limitée pour les Ca, Mg, K, Sr.
- Les sels ayant une solubilité basse peuvent causer l'entartrage dans les stations d'osmose inverse provoquée par la précipitation. [14]

2.5.Température :

a) Température des eaux salées: Ainsi, par exemple :

La température de la Méditerranée est de 13 degrés en profondeur et quand l'eau de surface devient plus froide, elle plonge, ce qui provoque un mélange des eaux.

La température du lac Léman est de 6 degrés en profondeur et si l'hiver est assez froid toute l'eau du lac se retrouve à cette température ce qui permet un brassage complet de l'eau.

Dans le nord de l'Atlantique l'eau se refroidit et finit par plonger, c'est ce qui se passe au large de la Norvège avec l'eau chaude de ce qui reste du Gulf Stream et ce phénomène est le moteur de la circulation océanique.[15]

L'eau de mer est, en général, plus ou moins froide suivant la latitude. Chaude à l'Équateur (26°C en surface dans l'océan, plus de 30°C dans les mers intérieures l'été), froide aux pôles (1 à 3°C) en surface. L'océan Indien à latitude égale est plus chaud que l'Atlantique. A la même latitude dans un même océan les températures sont différentes. Dans l'hémisphère Sud le phénomène est inverse : ce sont les façades Ouest des continents qui sont plus froides que les côtes Est. Les différences de température sont également importantes suivant les profondeurs.

Les couches superficielles de la mer peuvent être réchauffées ou refroidies par l'air ambiant. Dans les régions polaires, la température des eaux est plus basse au pôle Sud qu'au pôle Nord.

Les échanges thermiques entre la surface de l'eau de mer et l'atmosphère sont très importants : le climat est influencé par la température de l'eau de mer. Les océans se réchauffent moins vite et se refroidissent moins vite également que la terre. Pour cette raison, les régions qui bordent l'océan jouissent d'un climat océanique, plus tempéré (doux et humide).[16]

2.6.pH des eaux de mer :[17]

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 CO₂ 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 CO₂ et par conséquent abaisse le pH.

Le pH des eaux de mer décroît avec une augmentation de température. Pour une eau de chlorinité de 19,5 ‰ est de pH = 8, une élévation de température de 1°C, entre 10°C et 20°C, diminue le pH de 0,0109. De même, une augmentation de pression de 100 bars produit une diminution de pH de l'ordre de 0,02 (pour un pH de 8,3).

2.7.Viscosité :

La viscosité décroît rapidement en fonction de la température et dépend également de la salinité (tableau n° 09). Cette dernière caractéristique est prise en compte dans l'équation suivante :

$$\eta = \eta_0 (1 + A\sqrt{C} + BC)$$

η_0 étant la viscosité du solvant à l'état pur, C la concentration du soluté. A et B des coefficients dépendant du soluté. Suivant la nature des ions, le coefficient B peut prendre des valeurs positives ou négatives et rendre plus ou moins fluide le solvant (les ions ayant tendance à former des ions complexes augmentent la viscosité),[2]

Tableau n° 09: Viscosité relative η/η_0 de l'eau de mer en fonction de la température et de la salinité. η_0 viscosité de l'eau pure à 0°C 1787 centipoise .[17]

Température (°C)	5 ‰ S	10 ‰ S	20 ‰ S	30 ‰ S	40 ‰ S
0	1,009	1,017	1,032	1,056	1,054
5	0,855	0,863	0,877	0,891	0,905
10	0,738	0,745	0,785	0,772	0,785
15	0,643	0,649	0,662	0,675	0,688
20	0,568	0,574	0,586	0,599	0,611
25	0,504	0,510	0,521	0,533	0,545
30	0,454	0,460	0,470	0,481	0,491

2.8.Dureté :

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na^+ , K^+) et H^+ . Elle est souvent due aux ions Ca^{++} et Mg^{++} . La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO_3 par litre.

Dans l'eau, sont déterminées :

- La dureté totale ou titre hydrotimétrique TH qui est la somme des concentrations calcique et magnésienne.
- La dureté calcique qui correspond à la teneur globale en sels de calcium.
- La dureté magnésienne qui correspond à la teneur globale en sels de magnésium.
- La dureté carbonatée correspond à la teneur en hydrogénocarbonate et carbonate de calcium et de magnésium.[18]

2.9.Conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm^2 de surface et séparée l'une de l'autre de 1cm. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau et est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau.[18]

3. Paramètres organoleptiques :

Les différents paramètres organoleptiques se traduisent comme suit :

3.1.Couleur :

Pour l'eau potable, le degré de couleur maximale acceptable est de 15 UCV. Elle peut être due à certaines impuretés minérales (fer) mais également à certaines matières organiques acides. Elle doit être éliminée pour rendre l'eau agréable à boire.[19]

3.2.Goûts et odeurs :

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur agréable. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère.[20]

3.3.Turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, la pluviométrie joue un rôle important vis-à-vis de ce paramètre dans les eaux superficielles et souterraines selon leur origine.[21]

4. Paramètres microbiologiques :

Le risque microbiologique d'origine hydrique (ou risque infectieux) correspond à la présence dans l'eau de microorganismes pathogènes, ou potentiellement pathogènes (opportunistes) et ce en quantité supérieure au seuil d'infection fixé par l'OMS. Parmi ces microorganismes, on distingue les virus, les bactéries et les protozoaires.

Le risque microbiologique provient donc du pouvoir pathogène de ces germes qui est conditionné par les propriétés de l'agent infectieux. Il convient de préciser que la mise en œuvre de procédés élémentaires de désinfection telle que la chloration de l'eau, permet d'éradiquer totalement les fléaux tels que le choléra, la dysenterie bacillaire ou les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes.

Tableau n°10 : Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables.[22]

Origine	maladies	Agents pathogènes
parasitaire	Dysenterie amibienne	Gastro-entérites
	Gastro-enterites	Giardia lamblia Cryptosporidiumparvum
bactérienne	Fievre styphoide et paratyphoide	Salmonella typhi Salmonella paratyphiAet B
	Dysenterie bacillaire	Shigella
	Cholera	Vibriocholerae
	Gastro-enterites	Escherichia coli Enterotoxinogene Campylobacterjejuni Yersinaenterocolitica
virale	Hepatitis A et E	Virus hépatite A et E
	Poliomyelite	Virus poliomyelitique
	Gastro-entérites	Rota virus Entérovirus Calicivirus Adenovirus...

Chapitre III:

Dessalement de l'eau de mer

Introduction :

La nécessité de dessaler l'eau de mer se fait de plus en plus pressante dans de nombreuses parties du monde. Au cours des années 1950 – 1990, la consommation mondiale d'eau a triplé, tandis que la population de la planète augmentait de 2,3 milliards d'habitants.

En Méditerranée, les besoins en eau présents et futurs accusent une croissance effective. On estime que, d'ici à 2010, les demandes en eau augmenteront de 32% au moins pour les pays du sud et de l'est. Il va de soi que des besoins d'une telle ampleur ne peuvent être uniquement couverts et satisfaits que si l'on a recours à des ressources en eau non conventionnelles, comme le recyclage et le dessalement de l'eau.

Le dessalement est depuis longtemps une source d'eau importante dans certaines parties de la Méditerranée. Les usines de dessalement se trouvent dans les régions ayant un climat chaud, une pluviométrie relativement faible et imprévisible et où les ressources en eau ne peuvent répondre aux demandes de pointe de la période touristique. [23]

1. Les principales technologies de dessalement :

La crise de l'eau potable annoncée pour les années 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chers, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement, [24]

2. Procèdes de dessalement :

Les différents procédés de dessalement peuvent être classés en trois grandes familles :

- 1- Les procédés faisant intervenir un changement de phase :
 - Evaporation.
 - Congélation.
- 2- Les procédés de perméation sélective à travers une membrane :
 - Transfert d'ions sous l'action d'un champ électrique (électrodialyse) ou d'un gradient de pression (piezo-dialyse).
 - Transfert d'ions sous l'action d'un gradient de pression (osmose inverse) ou sous l'action d'un gradient de température (thermo-osmose).
- 3- Les procédés chimiques :
 - Echanges d'ions.
 - Extraction par solvant.

En fait, la totalité des installations actuellement en service fait appel à deux grandes familles de procédés : les procédés par évaporation et les procédés de séparation par membranes qui sont plus récents (figure 04),[12]

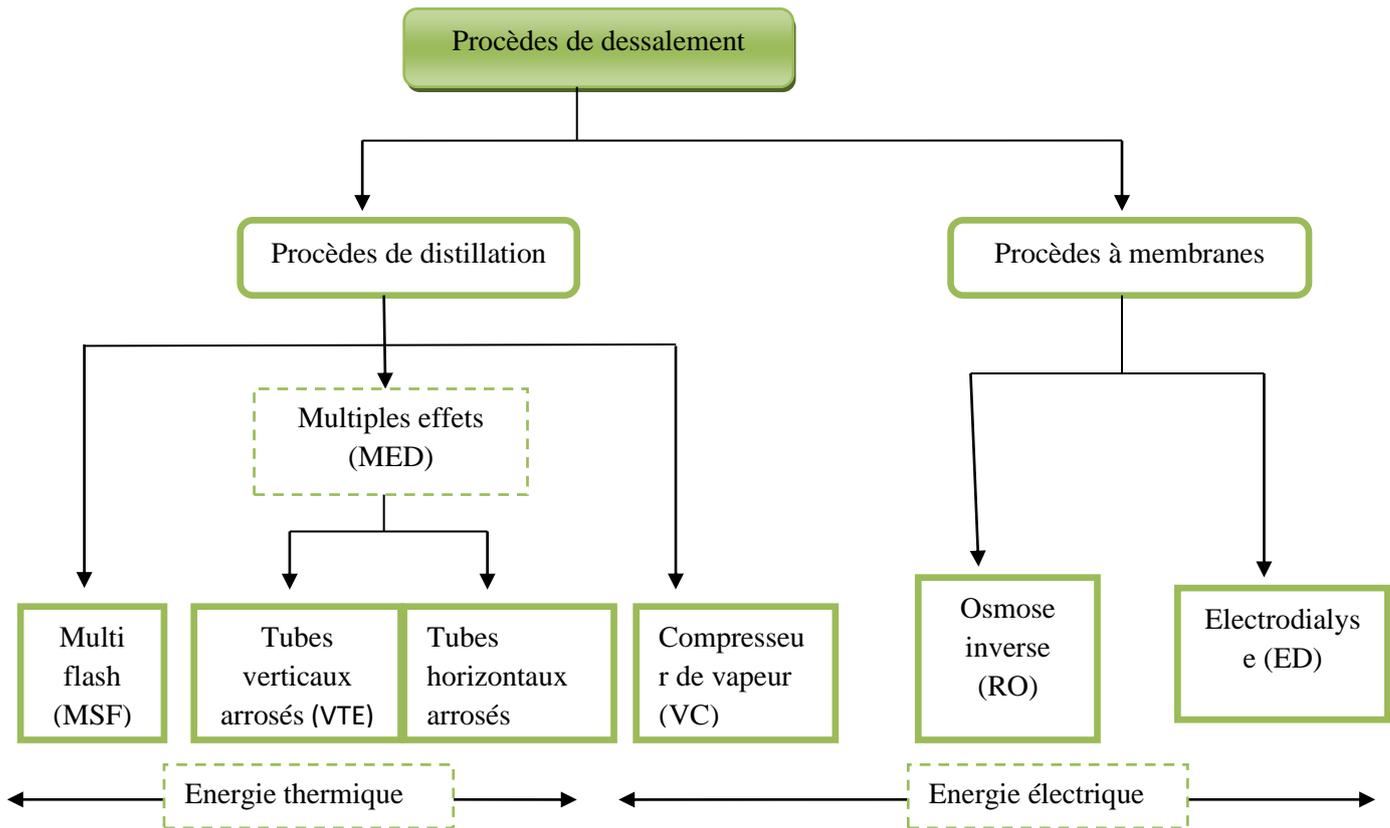


Figure 04: Procèdes industrialisés de dessalement, [13].

3. Schéma générale d'une installation de dessalement :

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes (voir figure 05), [26]

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

A 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, [12]

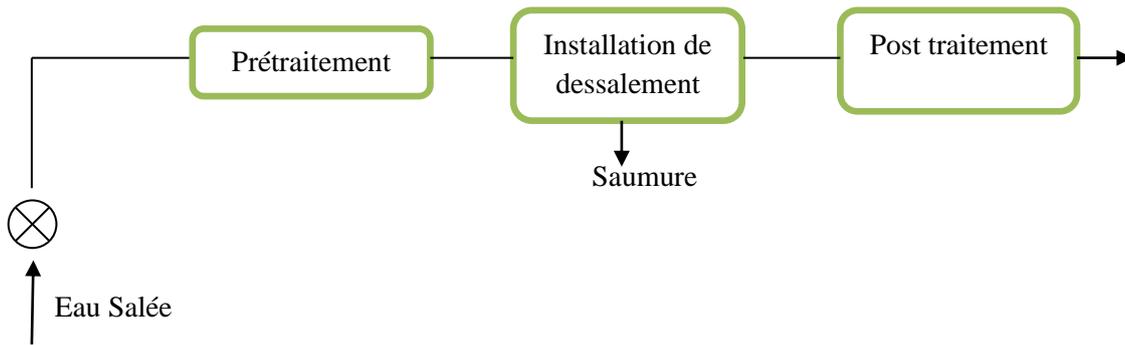


Figure 05:Schéma général d'une installation de dessalement,[13].

4. Procédés de distillation :

L'eau de mer chauffée émet une vapeur d'eau pure qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est utilisé depuis long temps, [12]

4.1. Distillation à simple effet :[25]

Un faisceau tubulaire, alimenté par un fluide chauffant est plongé dans l'eau de mer à la partie basse d'une enceinte étanche et sous vide. Le fluide chauffant provoque alors une évaporation de l'eau de mer. La vapeur ainsi formée est condensée sur un faisceau tubulaire, placé dans la partie haute de l'enceinte et dans lequel circule l'eau de mer froide. L'eau distillée et condensée s'écoule du faisceau et est recueillie dans une goutte à goutte d'où elle est pompée pour des usages divers. Un appoint d'eau de mer, supérieur à la production, est introduit dans l'enceinte, une autre pompe évacue une fraction de saumure de telle manière que la salinité de l'eau de mer reste à une concentration acceptable (voir figure 06),

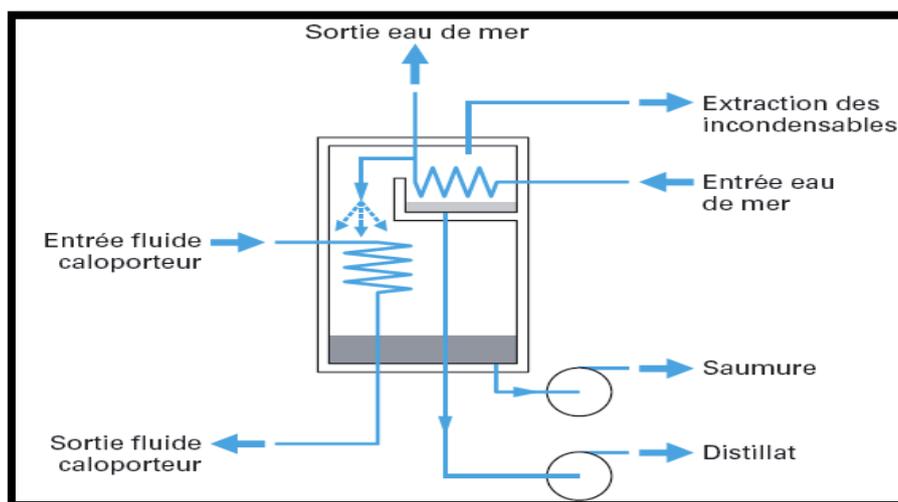


Figure 06 : Principe de distillation à simple effet

4.2. Distillation à multiple effets :

L'eau de mer est chauffée dans le premier effet, vaporisant une fraction d'eau de mer, une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire où circule de l'eau de mer froide. L'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, maintenu à une pression plus faible que le premier. De même, une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau de mer dans le second. La vapeur en provenance du premier effet se condense dans le deuxième sur le faisceau tubulaire et produit une quantité presque égale de vapeur à partir de l'eau de mer, et ainsi de suite. A chaque effet, l'eau distillée est envoyée dans un collecteur (voir figure 07), [25]

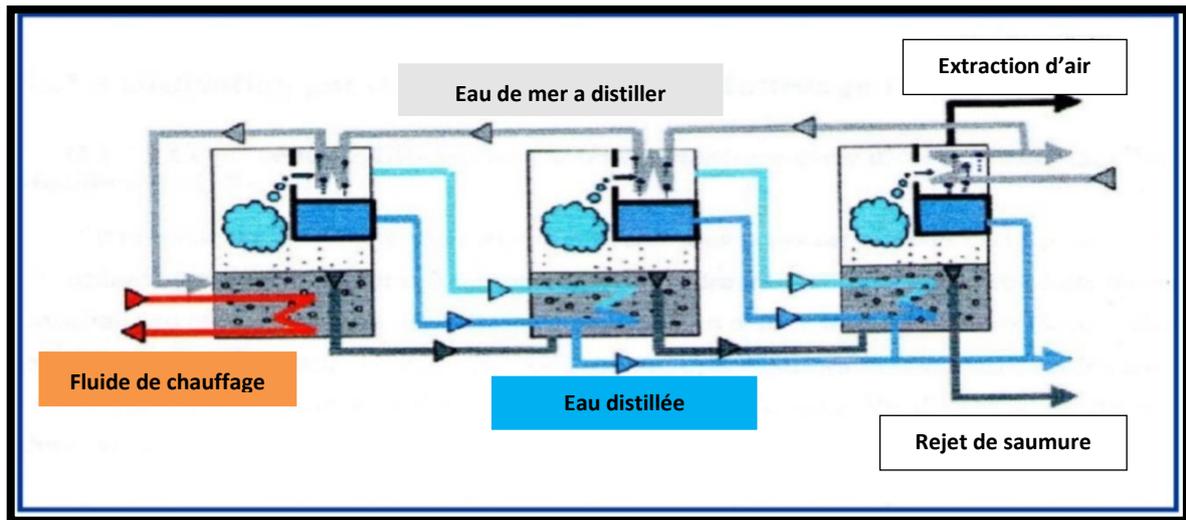


Figure 07: distillation à multiples effets

Il existe plusieurs variantes d'évaporateurs multiples effets, les usines MED sont construites avec des faisceaux à long tubes verticaux (Vertical Tube Evaporator, VTE) et les évaporateurs multiples effet à tubes horizontaux (Horizontal Tube Evaporator, HTE), [12]

- Dans le 1^{er} cas, l'eau de mer est amenée au sommet des faisceaux multitubulaires et ruisselle en film mince le long de tubes d'échange chauffés extérieurement, la saumure est recueillie à la base de la cellule. La saumure et la vapeur, qui sert de fluide chauffant sont envoyées à la partie supérieure de la seconde cellule et ainsi de suite, [12]
- Dans le 2^{ème} cas, le principe retenu est de pulvériser la saumure préchauffée sur la surface extérieure d'un faisceau de tubes horizontaux, tandis que la vapeur s'écoule à l'intérieur des tubes ou elle se condense, produisant ainsi de l'eau pure, [5].

4.3. Distillation par détente successives (Multi stage Flash, MSF) :

4.3.1. Le procédé de distillation à détente étagées a cycle direct : [26]

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 dans des réceptacles en dessous des tubes (voir figure 08).

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.

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.

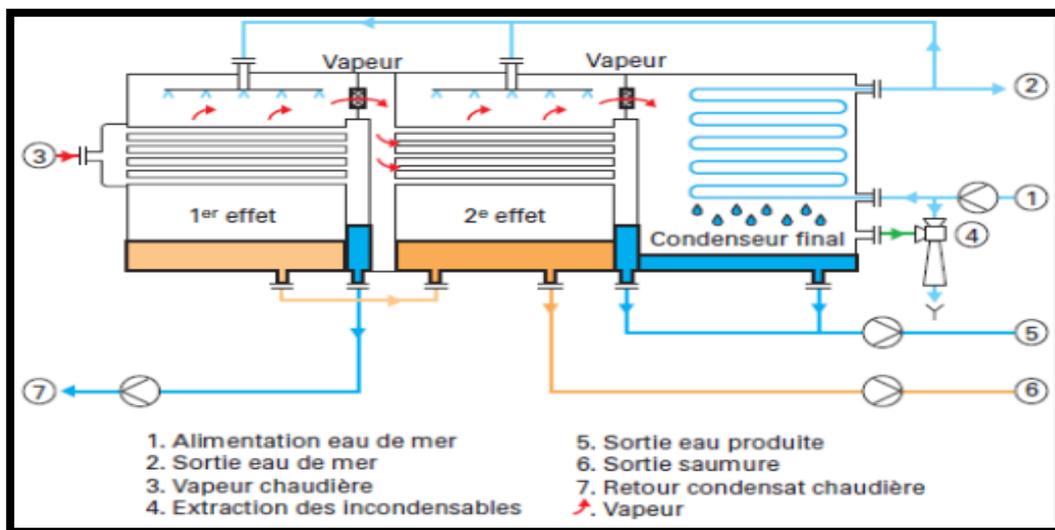


Figure 08: Principe de fonctionnement d'un système par détente successive MSF

4.3.2. Procédé Flash à recirculation :[12]

Une unité Flash à recirculation est divisée en deux parties :

- Des étages à basse température dits de rejet de chaleur, où l'eau de mer froide est utilisée pour la condensation de la vapeur produite et où sont extraites l'eau douce et la saumure.
- Des étages de récupération de chaleur et de réchauffeur, où la saumure circule en boucle fermée : la concentration de la saumure dans les condenseurs est maintenue constante par injection du débit d'eau de mer prétraitée.

4.4. Distillation par compression de vapeur :

L'eau de mer à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermique isolée. La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée, [25]

5. Procédés à membrane :

Les membranes ont la capacité de différencier et séparer sélectivement les sels et l'eau. En utilisant ces capacités mais différemment dans chaque cas, deux procédés de dessalement à membrane ont été développés et sont actuellement disponibles sur le marché, [27]

5.1. Osmose inverse :

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration, [28]

Si l'on considère 2 solutions de concentrations salines différentes séparées par une membrane (voir figure 09). L'eau migre spontanément de la solution diluée à la solution la plus concentrée. Si l'on applique une pression supérieure à la pression osmotique (pression d'équilibre) le solvant va migrer de la solution concentrée à la solution diluée, c'est le phénomène d'osmose inverse, [29]

Donc, l'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase, [18].

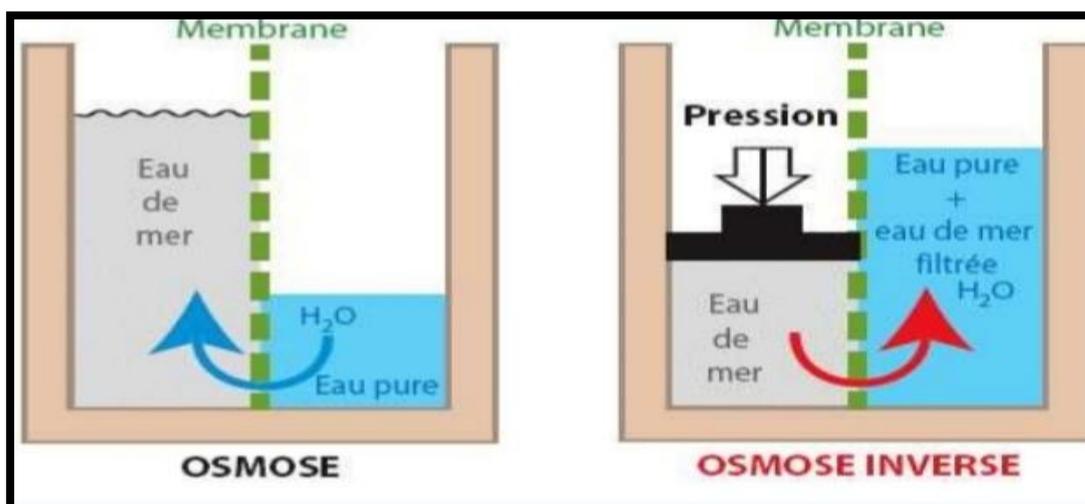


Figure 09 : Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

Les membranes sont constituées d'une surface plane dont la perméabilité est sélective. Son objectif principal est d'éliminer le sel. Elle assure également la rétention des composants indésirables dans l'eau (micro algues, bactéries, certains virus, microorganismes, micropolluants), supprime la turbidité (eaux troubles), limite les sous-produits de désinfection et permet la production d'une eau épurée, [29]

Actuellement quatre types de modules sont commercialisés et les membranes les plus couramment utilisées pour le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse sont les membranes à fibres creuse et de type spirale, [30]

5.2.Électrodialyse :

L'électrodialyse est une technique séparative dans laquelle des espèces ionisées minérales ou organiques dissoutes, telles que les sels, les acides ou les bases, sont transportées à travers des membranes ioniques et sous l'action d'un champ électrique.

Lorsqu'une solution ionisée est envoyée dans les compartiments séparant ces membranes, les cations migrent vers la cathode (-) et les anions vers l'anode (+), en traversant respectivement les membranes cationique (C) et anionique (A).

Grâce à une disposition alternée des membranes, les ions capables de traverser les membranes cationiques sont arrêtés par les membranes anioniques, et réciproquement (figure 10) : il en résulte une augmentation de la concentration dans les compartiments de même parité (concentrat) et une diminution dans les compartiments adjacents (diluat),[31]

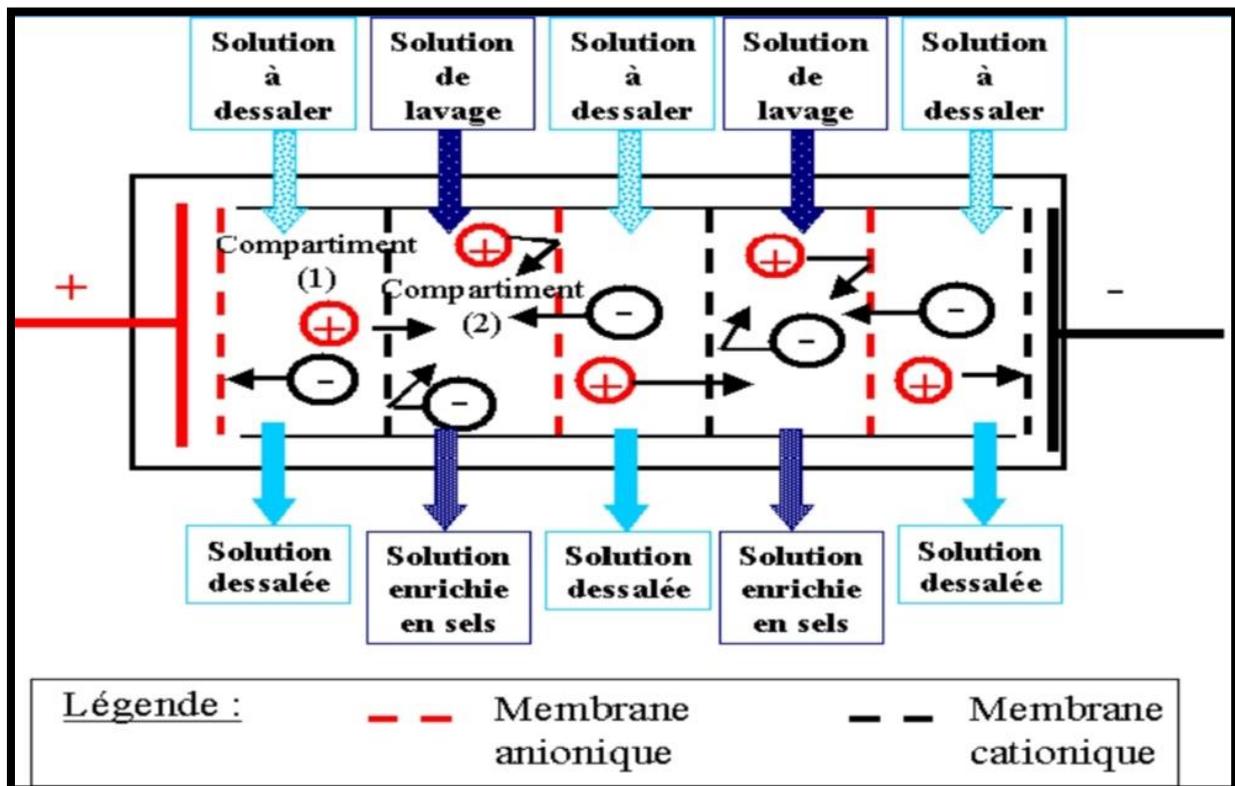


Figure 10: Principe du dessalement par électrodialyse

Les membranes utilisées en électrodialyse sont des membranes échangeuses d'ions qui se présentent sous la forme de feuilles dont l'épaisseur est comprise entre 0,1 et 0,8 mm. Du point de vue propriétés on distingue deux types de membranes,[12]

- Les échangeuses de cations qui sont perméables uniquement aux cations et dont le groupement fonctionnel est en générale un groupement acide sulfonique (SO_3^-).

- Les échangeuses d'anions qui sont perméables uniquement aux anions et dont le groupement fonctionnel est en générale un groupement ammonium quaternaire (NR_3^+).

6. Autres procédés :

Reposant sur le principe de la congélation, de la distillation à membranes, de l'humification solaire et les processus solaires et éoliens. Elles sont Très peu utilisées compte tenu de faible succès commercial, mais ils peuvent prouver l'objet de valeur dans des circonstances spéciales ou encore avec d'autres avances ou améliorations technologiques.

7. Comparaison des procédés :[32]

Le dessalement est un processus très consommateur d'énergie. Pour le MED et les usines MSF, l'énergie principale est sous forme de chaleur, mais un peu d'énergie électrique est exigée pour les pompes et les auxiliaires. Le RO et ED utilisent seulement de l'énergie électrique.

Tableau n° 11 : Comparaison des procédés de dessalement.

Comparaison	MSF	MED	MED-VC	VC	RO	ED
Température de fonctionnement (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70	< 45	< 45
Principale source d'énergie	Thermique	Thermique	Thermique	Electrique	Electrique	Electrique
Consommation thermique (kWh/m ³)	12	6	21	Pas applicable	Pas applicable	Pas applicable
Consommation électrique (kWh/m ³)	3,5	1,5	1,5	8 - 15	4 - 7	1
Salinité de l'eau brute (g/l)	30 - 100	30 - 100	30 - 100	30 - 50	1 - 45	0,1 - 3
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 500	< 500
Capacité d'un trainage (m ³ /j)	5000- 60000	500 - 12000	100 - 20000	10 - 2500	1 - 10000	1 - 12000
Avantages	Technique éprouvée	20 % moins cher que le MSF	Capacité robuste	Simplicité	Modularité	/
Inconvénients	Investissement, consommation	Capacité plus faible que MSF	Consommation	Capacité limitée	Fragilité	/

Les techniques thermiques sont adaptées aux fortes salinités et aux hautes températures alors que les techniques à membranes sont meilleur marché dans des conditions de salinité moyenne et de température peu élevée (autour de 25°C).

8. Choix des procédés : [12]

Le choix du procédé dépend de plusieurs paramètres :

- La situation géographique.
- La disponibilité, le coût des matériaux et le coût de l'énergie.
- La capacité désirée pour l'installation et la nature de l'eau à dessaler.
- La pureté de l'eau que l'on veut obtenir.
- La disponibilité de main d'œuvre pour l'entretien.
- L'utilisation de l'eau produite (usage domestique ou bien industrielle).

9. Situation et tendances du dessalement de l'eau de mer en Algérie :

Les sécheresses répétées qui frappent notre région magrébine ont accru d'une manière considérable les difficultés d'approvisionnement des populations en quantité qu'en qualité,[33]

. L'Algérie avec un climat semi-aride et avec des ressources en eau souvent utilisés intensivement, souffre temporairement en eau de stockage, avec un niveau élevé d'utilisation de ces ressources en eau, la demande en eau croît rapidement et l'eau disponible décroît.

L'Algérie a choisi le dessalement d'eau de mer pour faire face à la demande domestique et industrielle en eau dans le pays.

9.1. Les ressources en eau en Algérie : [34]

En moyenne, un milliards de m³ d'eau précipite annuellement sur le nord de l'Algérie. 150 millions de m³ seulement alimentent les nappes phréatiques. Le reste, soit 850 millions m³ s'évapore dans l'atmosphère.

Les potentialités en eaux superficielles de l'Algérie sont estimées à environ 13 milliards m³ dont 11,5 milliards de m³ dans les bassins côtiers et 627 millions de m³ dans les bassins sahariens et 733 millions de m³ dans les hautes plaines.

Pour ce qui est des eaux souterraines, elles sont estimées à 1,8 milliards de m³ dans le Nord. Les ressources mobilisables totales en eau de surface sont évaluées à 5,7 milliards de m³ dans le sud du pays.

D'autres ressources non négligeables peuvent être mobilisées pour l'agriculture. Par exemple, il s'agit de traitement des eaux usées dont le volume est d'environ 600 millions de m³. Si toutefois les stations d'épuration sont fonctionnelles.

9.2. Les avantages et les inconvénients de dessalement de l'eau de mer en Algérie : [35]

Les principaux avantages du procédé de dessalement sont :

- L'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km.
- L'utilisation de l'eau de mer qui est une ressource pratiquement non polluante et inépuisable.
- La population ainsi que l'industrie à grande consommation d'eau se trouvent à proximité de la mer.
- Le domaine de dessalement de l'eau de mer a connu ces dernières années une avancée technologique remarquable grâce au développement de différents procédés (osmose inverse).

- Une importante demande en eau se située à proximité de la côte ce qui réduit davantage les prix de revient d'eau.

L'un des grands avantages de dessalement reste la sécurisation de l'alimentation en eau (potable ou industrielle) des différents consommateurs, car cette ressource n'obéit pas aux aléas climatiques et elle permet donc de produire d'une manière permanente les quantités voulues, des quantités journalières qui dépassent les 200 000 m³/j.

Malgré que le dessalement de l'eau de mer apporte une réponse aux besoins d'eau (domestique et industrielle), quelque soit le procédé utilisé il n'est pas sans inconvénients :

- Les installations de dessalement coûtent cher et elles se caractérisent par leur grande consommation énergétique.
- Ces installations dégagent des gaz à effet de serre, ce qui provoque le réchauffement climatique.
- Elles détruisent les zones côtières.
- Elles bouleversent les écosystèmes, car elles rejettent des déchets appelés saumure (de l'eau fortement salée), certaines espèces ou végétations sont très sensibles à la salinité.
- Présence de traces de métaux lourds échappés des installations.
- Les rejets associés aux unités de dessalement comme les eaux provenant du nettoyage (filtres à sable, membranes et dépôts) contaminent le milieu.

10. Aboutissement du dessalement dans le pays : [35]

L'implantation d'usine de dessalement, selon la démarche utilisée par "Algerian Energy Company", a plusieurs aspects, nous citons notamment :

10.1. Economique :

- Non-recours à la garantie de l'Etat pour le montage de ces projets.
- Participation étrangère majoritaire dans le capital de la société de projet.
- Participation à l'absorption du déficit en eau au niveau national.

10.2. Social :

- Rendre l'eau disponible d'une manière permanente pour satisfaire les populations.
- Amélioration de la qualité de vie de la population et l'hygiène.

10.3. Technologique :

- Transfert des technologies de dessalement évident.
- Amélioration de la recherche et du développement dans ce domaine en vue d'atteindre d'autres performances.

10.4. Environnemental :

- Préserver nos réserves d'eau albiennes et, par voie de conséquence, préserver l'avenir des générations futures.
- Améliorer le cadre de vie ainsi que celui de l'environnement car la technique utilisée maîtrise les différentes émissions qui peuvent provenir de ces usines.

11. Les impacts du dessalement de l'eau de mer :

Parmi les impacts dus à une usine de dessalement, il y a ceux qui se limitent à la phase de construction et ceux qui sont liés à la phase d'exploitation. Les impacts commencent avec la transformation de l'occupation du sol, puis continuent avec des conséquences visuelles et des nuisances sonores pour

s'étendre à des émissions dans l'atmosphère et des rejets dans l'eau ainsi qu'à des dommages potentiels pour le milieu récepteur.

Les activités de construction et d'exploitation peuvent se traduire par une série d'impacts sur les zones littorales, affectant notamment la qualité de l'air, la qualité de l'eau, la flore et la faune marine, la perturbation d'écosystèmes importants, le bruit, [35]

11.1. Impacts socio-économiques : [35]

Le dessalement des eaux de mer a donné des solutions urgentes et sécuritaires, mais il peut aussi avoir des impacts non négligeables sur les citoyens comme suit :

- Changement des modes de consommation, voire utilisation abusive de l'eau sous l'impression qu'il est facile de s'en assurer.
- Concentration accrue de développement et l'activité dans la zone côtières, migration de population des régions rurales vers les zones côtières.
- Dépendance à l'égard d'une technologie qui peut à son tour dépendre de l'importation de savoir faire ou d'énergie, ce qui expose la qualité de l'eau à la dégradation (par ex, déversements de pétrole).

11.2. Impacts sur l'environnement :

Les activités de dessalement d'eau de mer ont des impacts défavorables sur l'environnement. La plupart des impacts dérivent du positionnement des tubes d'alimentation et des canalisations de décharge de saumure, [36]

Les impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement sont représentés dans le tableau n° 12 :

Tableau n° 12: Impacts néfastes sur l'environnement associés aux procédés de dessalement, [35]

Impact	Degré d'impact	Origine de l'impact	Technique d'atténuation
Pollution thermique			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction de l'oxygène dissous dans les eaux réceptrices. 	M	Saumure chaude	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mélange de la saumure avec de l'eau froide avant le rejet. ▪ Bassins de retenue.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effets nocifs pour les espèces thermo-résistantes 	M		
Salinité accrue			

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effets nocifs pour les espèces résistantes aux sels. 	M	Saumure concentrée	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dilution de la saumure avant rejet. ▪ Récupération de sels. ▪ Bon choix de l'emplacement pour l'émissaire afin de permettre le maximum de brassage et de dispersion.
Désinfection			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Désinfectants 	E	Chlore et ses composés Réaction du chlore avec des composés organiques « hydrocarbures »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation d'autres désinfectants. ▪ Mesures de protection contre les polluants au prélèvement de l'usine.
Métaux lourds			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Toxicité 	M	Corrosion du matériel de l'usine	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conception et choix judicieux du matériel de l'usine en recourant à des matériaux résistants à la corrosion.
Produits chimiques			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eutrophisation des eaux réceptrices ▪ Toxicité ▪ Hausse du pH 	E F F	Adjonction d'agents Anticorrosion et antitartre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction au minimum de l'utilisation de produits chimiques. ▪ Utilisation d'additifs sans danger pour l'environnement.
Pollution atmosphérique			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pluies acides ▪ Effet de serre ▪ Poussières 	F M M	Utilisation de combustibles et activités d'élimination	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisation d'énergies propres et renouvelables autant que possible. ▪ Application de systèmes mixtes et de production couplée. ▪ Purification des gaz avant émission dans l'atmosphère.

Sédiments			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Turbidité et limitation de la photosynthèse. 	M	Perturbation dessables par des activités	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction au minimum et contrôle des activités d'excavation et remblayage.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Difficultés de respiration chez les animaux aquatiques. 	M	d'excavation et de dragage.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bonne maîtrise du ruissellement dans la zone du site

12. Les ajouts chimiques dans une station de dessalement :[37]

12.1. Les Coagulants :

Les usines utilisent généralement du chlorure ferrique ou du chlorure d'aluminium pour améliorer le filtrage des matières en suspension présentes dans l'eau d'alimentation. Les additifs de coagulation (substances organiques comme le polyacrylamide) et le contrôle du pH à l'acide sulfurique sont des moyens supplémentaires de renforcer le processus.

12.2. Agents antitartres :

Les dépôts de tartre se forment sur les surfaces du matériel de dessalement. La présence de tartre entraîne inévitablement des difficultés d'exploitation et/ou de perte de rendement. Les additifs antitartres les plus largement utilisés semblent être des polymères de l'acide maléique, .Ces polymères empêchent les matières dissoutes de précipiter, décanter et former une croûte sur les surfaces.

12.3. Agents antisalissure :

Les salissures constituent un processus à phase multiples dans lequel interviennent de nombreux groupes d'organismes. Elles commencent par l'adsorption de substances polymères de l'eau non traitée sur les surfaces solides, ce qui permet la formation d'un film précurseur pour la colonisation par des bactéries. Depuis longtemps, les composés de chlore sont utilisés pour désinfecter les systèmes d'apport d'eau de mer et l'usine située en amont, afin de prévenir les salissures.

12.4. Agents anti mousses :

La mousse produite par l'eau de mer aux étages du procédé de distillation multi flash est imprévisible mais a tendance à poser un problème plus grave quand les séparateurs sont proches de la surface du courant de saumure, ce qui permet de séparer qu'un volume réduit en phase aqueuse et la phase vapeur. Les agents anti mousses sont habituellement des poly glycols alkyles, des acides gras et des esters d'acides gras. Les agents sont tension- actifs à l'interface eau- vapeur et empêchent la formation de mousse. La formation de mousse est une fonction des constituants organiques de l'eau de mer qui sont principalement des produits d'excrétion et de dégradation d'algues planctoniques.

13. Présentation de l'installation de dessalement MSF de cap-djine:

Les besoins journaliers en eau dessalée de la centrale thermique sont de l'ordre de 1100 m³. L'installation comprend quatre unités indépendantes les unes des autres (trois unités sont en service et la quatrième est désinstallée), fonctionnant selon le principe de la distillation par détentes successives

à 18 étages. Chaque unité produit 500 m³ d'eau dessalée par jour qui est stockée dans deux réservoirs de 2700 m³,[38]

13.1. Station de pompage :[39]

La hauteur de l'entrée dans la station est de 7,65m sous le niveau de la mer. A chaque entrée est prévue une fosse de révision, chacun des trois canaux est pourvu d'un batardeau.

La station de pompage est un ouvrage en béton armé étanche avec bord supérieur à plus de 7,5m du dessus du niveau de la mer et se compose d'un bassin d'alimentation, de quatre voies de filtration et des chambres d'aspiration pour les pompes de l'installation de dessalement, de la chloration et pour la pompe d'incendie. Les batardeaux d'arrêt sont installés à l'avant de chacun des 8 pompes de circulation.

La station de pompage est divisée en quatre voies de filtration qui sont chacune équipées d'une grille à dégrilleur. Les matrices retenues par le tambour filtrant et la grille sont amenée par un caniveau de rejet jusqu'au panier de récupération de détrit. Les pompes de circulation principales sont installées à la fin des installations de filtration.

Entre les voies sont disposées les chambres d'aspiration, les deux chambres extérieurs servent à l'alimentation de l'installation de dessalement d'eau de mer par les pompes de transfert et comprennent chacune une pompe pour la chloration.

Dans la chambre d'aspiration du milieu est installée la troisième pompe de la chloration et une pompe incendie à eau de mer.

13.2. Les différents organes de l'installation :[38]

a) L'évaporateur : L'évaporateur est constitué de 18 étages :

- Trois étages pour la dissipation de chaleur.
- Quinze étages pour la récupération de chaleur.

Le faisceau des tubes de condenseur se trouve dans la partie supérieure de chaque chambre. Dans chacun des faisceaux, quelques tubes sont séparés des autres par une chape-tôle. Ce compartiment séparé sert de zone de refroidissement pour les gaz non condensables.

Le dernier étage est muni d'un indicateur de niveau pour le distillat et la saumure. Tous les dispositifs sont prévus pour vider et aérer totalement tous les étages.

b) Le réchauffeur final :

La saumure de recirculation coule du dernier étage du condenseur au réchauffeur final pour y être chauffé, ensuite le procédé de détente pourra commencer dans le premier étage d'évaporation.

Le réchauffeur final est un échangeur thermique à faisceaux de tube droit. L'eau de mer traverse les tubes, alors que l'eau chaude circule sur les cotés enveloppe. Il consiste à chauffer la saumure sortant des zones de récupération de chaleur à une température de 83°C avec un débit de 280 m³ /h (coté enveloppe).

Il est caractérisé par :

- Une température d'entrée de 95°C.
- Une température de sortie de 88°C.

c) La chaudière :

C'est une chaudière à eau chaude et basse pression qui combine le principe de retour de flamme et le principe des trois passages. Tel que, l'eau est réchauffée en deux étapes :

- La première surface de chauffe comprend les parois de la chambre de combustion.
- La deuxième comprend l'extérieur des tubes de fumée. Cette conception permet une bonne circulation de l'eau et un transfert optimal de chaleur, ainsi que de basses températures de fumés.

Elle est caractérisée par :

- Une température de service de 95°C.
- Un débit de 180 m³ /h.

d) Les pompes :

- Les pompes de traitement :

Tableau n° 13 : Caractéristiques principales des pompes centrifuges de traitement.

Pompe	Pompe de recirculation de saumure	Pompe de saumure	Pompe de distillat	Pompe de l'eau motrice	Pompe de recirculation d'eau chaude
Débit (m ³ /h)	258	36	25	103	280
Puissance (KW)	65,8	2,75	4,2	6,9	8,1

Les pompes de transfert d'eau de mer :

Les pompes de transfert d'eau de mer installées dans la station de pompage sont des pompes centrifuges verticales à 2 étages.

Tableau n° 14 : Caractéristiques techniques des pompes de transfert d'eau de mer.

Caractéristique fonctionnelle	Pompe de transfert
Milieu d'alimentation	Eau de mer
Débit (m ³ /h)	289
Rendement (%)	70
Masse volumique/température (Kg.m ⁻³ / °C)	1026 / 27
Hauteur de refoulement (m)	39
Vitesse de rotation (tr/mn)	1450
Puissance nécessaire (KW)	44,8
Liquide d'arrêt	Eau de mer

Les pompes d'éjection :

Tableau n°15 : Caractéristiques techniques des pompes d'éjection.

Caractéristique fonctionnelle	Pompe d'éjection de vapeur	Pompe d'éjection de L'eau
Quantité (kg)	68,900	130,000
Température d'entrée (°C)	30	78,6
Aspiration des étages	14 et 18	2, 4, 5 et 13

Pression d'entrée (bars)	0,0747	0,143
Pression de sortie	1,0133 atm	0,073 bars
Capacité (kg/h)	2,95	Max 15,8

Les pompes doseuses :

Tableau n°16 : Caractéristiques techniques des pompes doseuses.

Caractéristique fonctionnelle	Pompe doseuse de Belgard	Pompe doseuse de Bisulfite de sodium
Milieu d'alimentation	Belgard EVN	Bisulfite de sodium
Débit (m ³ /h)	Max 0,0026	Max 0,006
Masse volumique / température (kg.m ⁻³ /°C)	1000 / 50 max	1000 / 50 max
Hauteur de refoulement (m)	120	120
Vitesse de rotation (tr/mn)	1500	1500
Puissance nécessaire (KW)	0,25	0,25

13.3. Filtre de l'eau de mer:

Le filtre utilisé est de type à décolmatage par contre courant (auto-nettoyant). L'eau de mer à filtrer pénètre dans ce filtre à la bride d'entrée, traverse le double panier filtrant et quitte le filtre à la bride de sortie.

Les impuretés sont retenues dans le filtre par la toile filtrante de panier, lorsque par la suite d'un colmatage du filtre on atteint la perte de charge limite. Le procédé de décolmatage par contre courant se met en marche automatiquement.

13.4. Système d'évacuation : mise sous vide

L'eau de mer naturelle utilisée pour le procédé d'évaporation est saturée de gaz incondensables tels que l'oxygène et l'azote ainsi que le gaz carbonique formé, par le bicarbonate, sont peu à peu libérés dans les étages de l'installation et peuvent nuire à l'échange de chaleur, ces gaz incondensables sont amenées de l'étage 2 jusqu'à l'étage 4 puis de l'étage 5 à l'étage 13 et enfin de l'étage 14 à l'étage 18, et sont évacués aux points d'aspiration des étages 1, 4, 13 et 18.

La pompe d'éjection d'eau est prévue pour aspirer les gaz de la pompe d'éjection de vapeur et ce des étages 2 à 13, l'eau motrice de l'éjecteur est mise en circulation par la pompe un réservoir de désaéragé fait partie de ce circuit, les gaz dissous dans l'eau sont libérés et évacués à l'atmosphère.

Pour éviter un réchauffement indésirable de l'eau motrice, on remplace une partie de cette eau, par la même quantité d'eau froide.

Ce système comprend aussi une pompe d'eau motrice qui à un débit de 103 m³ /h.

13.5. Equipement de surveillance :

La conception de base de fonctionnement d'évaporateur se base sur la télécommande et la télésurveillance, les instruments indicateurs pour le fonctionnement et la surveillance sont arrangés sur les pupitres de commande ceux-ci comprennent en outre des boutons-poussoirs et des interrupteurs pour démarrer et arrêter l'installation, des instruments de réglage et de télé contrôle, ainsi qu'un système d'alarme et un diagramme d'ensemble.

Additionnellement on a placé des instruments sur les appareils, tels que indicateurs de pression, de température de niveau, de conductivité ainsi qu'un dispositif de sécurité pour la chaudière.

13.6. Injection des produits chimiques:

Le système d'injection des produits chimiques a pour but de protéger l'installation de dessalement d'eau de mer contre l'entartage, les salissures et la formation de la mousse, [38]

a) Protection contre l'entartage:

L'entartrage est le dépôt de tartre sur un objet ou à l'intérieur d'une canalisation. Il est formé principalement par les carbonates de calcium présent dans l'eau. [40]

Afin de minimiser l'entartrage des tubes, La centrale dispose d'instrument d'injection du Belgard EVN à 3,5 mg/l. Ce dernier est un polymère carboxylique nommé « acide poly maléique » de formule ;



Sa température maximale d'emploi est de 120°C, [25]

b) Protection contre les salissures : [38]

Les salissures sont une cause importante de corrosion sous dépôt et de détérioration de la capacité d'échange thermique.

Entre 6 et 12 mois sera nécessaire de nettoyer le condenseur et le réchauffeur final. L'agent nettoyant utilisé à la centrale est l'acide chlorhydrique à 5%, environ 290 L de solution de HCl par nettoyage est dosé et injecté par une pompe doseuse avec un débit de 35.25 m³ /h, soit dans la mer soit dans la saumure de circulation suivant la zone à nettoyer.

L'acide chlorhydrique réagit essentiellement avec les incrustations des accélérateurs :

- Carbonate de calcium CaCO₃,
- Hydroxyde de magnésium Mg(OH)₂,
- Carbonate de magnésium MgCO₃.

Les produits de réaction de l'acide avec ces incrustations sont les chlorures et les dioxydes de carbone.

Le procédé de nettoyage, se fait en fonction de la valeur du pH, doit être identique à l'entrée et à la sortie de la zone à nettoyer.

c) Protection contre la formation de la mousse :

La mousse produite par l'eau de mer aux étages du procédé de distillation multi flash est imprévisible mais a tendance à poser un problème plus grave quand les séparateurs sont proches de la surface du courant de saumure, ce qui permet de séparer qu'un volume réduit en phase aqueuse et la phase vapeur. Les agents anti mousses sont habituellement des poly glycols alkyles, des acides gras et des esters d'acides gras.

Les agents sont tension- actifs à l'interface eau- vapeur et empêchent la formation de mousse. La formation de mousse est une fonction des constituants organiques de l'eau de mer qui sont principalement des produits d'excrétion et de dégradation d'algues planctoniques.[37]

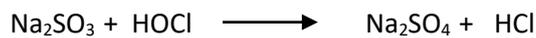
Une partie de cette mousse peut arriver au distillat et le rendre inutilisable. Dans ce cas, le produit chimique commercial préconisé (Belite M33 à 0.1 mg /l) peut être dissout et dosé avec l'inhibiteur d'incrustation,[38]

d) Neutralisation au chlore :[38]

L'eau de mer, pour la centrale thermique, est traitée au chlore actif. Ce procédé détruit les organismes se trouvant dans l'eau de mer.

Un excédent de la concentration de chlore actif dans l'eau de mer alimentant le poste de dessalement influence négativement le procédé de dessalement.

Le contenu de chlore actif est mesuré et si sa teneur augment, on ajoute le bisulfite de sodium Na_2SO_3 dans l'eau de mer servant d'eau d'alimentation, ce qui neutralise le chlore. Le bisulfite de sodium réduit le chlore dans l'eau comme suit :



Chapitre IV:

Déminéralisation de l'eau de mer

Introduction :

La déminéralisation est l'une des techniques très largement utilisée pour l'obtention de l'eau pure à partir d'une eau caractérisée par leurs concentrations en sels dissous (eau de mer). Donc, c'est un procédé d'épuration de l'eau destiné à éliminer partiellement ou totalement les sels qui y sont dissous. Elle s'effectue en particulier par échange d'ions. L'épuration par échange d'ions consiste à fixer les ions en liberté sur des corps doués de propriétés particulières que l'on appelle « échangeurs d'ions » ou « permutites », d'où le nom permutation donné à ce procédé. Ce dernier permet d'obtenir des eaux de très haute pureté chimique caractérisées par leur très faible conductivité.[41]

1. Echangeurs d'ions :[42]

1.1.Définitions et principe de base :

Un échangeur d'ions est un solide insoluble qui au contact d'une solution, échange les ions qu'il contient contre d'autres ions, de même signe, présents dans la solution. Nous considérerons principalement les résines échangeuses d'ions qui représentent la classe des polymères greffés. Cependant, il est important de savoir que d'autres matériaux existent : certains sont naturels, comme les échangeurs minéraux tels que les aluminosilicates ou les zéolithes.

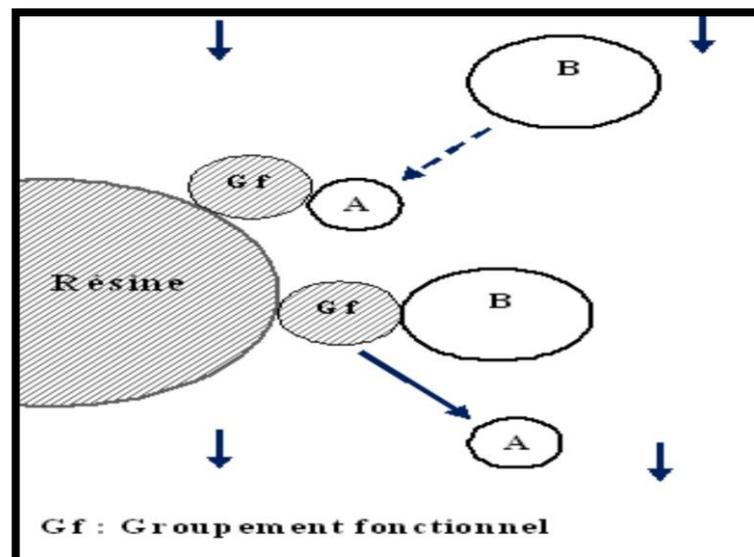


Figure 11 : Principe de l'échange d'ions

1.2.Description d'un échangeur d'ions :

Les résines se présentent généralement sous la forme de particules sphériques dont le diamètre est compris entre 0,3 et 1,2 mm ; la tendance actuelle est de synthétiser des billes parfaitement sphériques et bien calibrées. En utilisation industrielle, la taille des particules résulte d'un compromis entre la vitesse de réaction d'échange, qui est d'autant plus élevée que les billes sont fines, et les débits élevés nécessitant de grosses particules pour limiter les pertes de charge. On distingue deux grands types d'échangeurs, par similitude avec les acides et les bases: les échangeurs forts et les échangeurs faibles : les échangeurs fortement acides ou basiques et les échangeurs faiblement acides ou basiques.

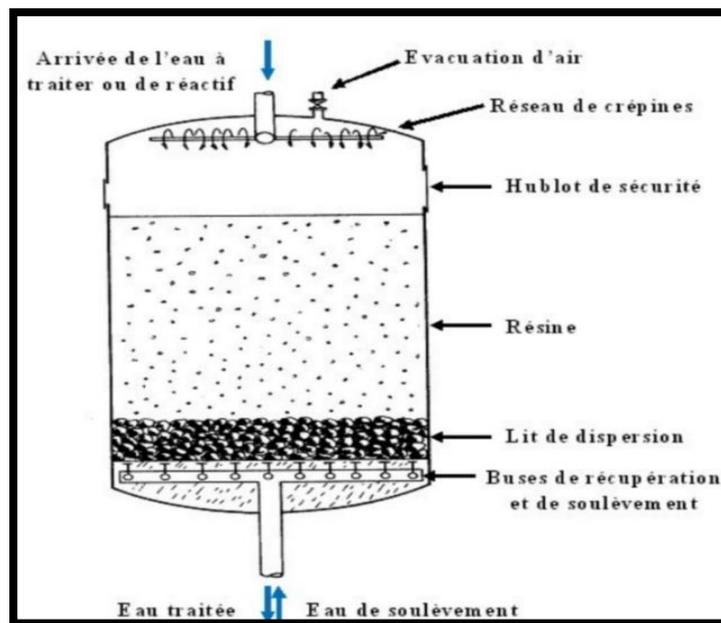


Figure 12: Echangeur d'ions

1.3. Groupes fonctionnels :

- Echangeurs de cations fortement acides : Le groupe fonctionnel est généralement l'acide sulfonique: $R-SO_3H$. Son acidité est voisine de celle de l'acide sulfurique. Le groupement est fortement dissocié en $-SO_3^-$ et se comporte comme un acide fort (d'où son nom). L'ion H^+ sera facilement échangé contre un autre cation d'une solution de pH 1 à 13.
- Echangeurs de cations faiblement acides Ce sont généralement des échangeurs carboxyliques, de formule générale $R-COOH$ (R étant bien souvent un squelette polyacrylique). Sous forme H^+ , ils sont capables de libérer l'acide carbonique par fixation des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ...) correspondant aux bicarbonates présents dans l'eau, mais ne peuvent pas échanger les cations en équilibre avec des anions d'acide fort (SO_4^{2-} , CrO_4^{2-} , NO_3^- , ...). Sous une forme neutralisée (Na^+ par exemple), ils peuvent fixer des anions divalents et/ou trivalents d'une solution de pH 3 à 8.
- Echangeurs d'anions fortement basiques : Le groupement fonctionnel est un groupe ammonium quaternaire. Par convention, on distingue deux groupes :
 - type I : les groupes benzyl triméthyl ammonium, les plus fortement basiques. Ces échangeurs sont utilisés pour l'élimination de tous les types d'anions, même ceux d'acides faibles (silice).
 - type II : les groupes benzyl diméthyl éthanolammonium, dont la basicité est légèrement plus faible. Ils éliminent bien les anions et présentent l'avantage de se régénérer plus facilement avec la soude. Ils ont donc une capacité d'échanges élevés et un bon rendement de régénération. Cependant, ils sont moins stables chimiquement que ceux de type I et ont de plus tendance à produire des fuites de silice.
- Echangeurs faiblement basiques : Le groupe actif est dans ce cas une amine. La basicité peut varier considérablement : les amines tertiaires sont parfois appelées moyennement basiques, alors que les amines primaires ont une basicité très faible, et sont d'ailleurs rarement utilisées. Par conséquent, les résines faiblement basiques les plus utilisées sont les amines tertiaires.

Elles fixent les acides forts dans la solution à traiter mais pas les sels neutres ni les acides faibles.

2. Quelques propriétés des résines :

2.1. Capacité d'échange:

Des précisions concernant les notations La capacité d'échange du lit de résine représente le nombre de sites actifs où les ions vont pouvoir s'échanger. On pourra l'exprimer soit en équivalent (qui correspond à une mole de charges), soit en équivalent par rapport à un volume en faisant attention de ne pas confondre:

- le volume de lit V_b
- le volume de la résine V_r

Tous ces paramètres vont être redéfinis pour éviter toute confusion.

Les colonnes sont généralement cylindriques.

Le volume total du lit V_b sera la somme:

du volume de la résine V_r qui représente le volume de toutes les billes de résines

du volume poreux intergranulaire V_p qui représente aussi sensiblement le volume de liquide dans le lit

$$V_b = V_r + V_p$$

Par définition la porosité externe du lit E est :

$$V_p = E V_b$$

Donc:

$$V_r = (1 - E) V_b$$

Précision sur la porosité :

Le symbole E utilisé correspond à la porosité externe du lit : en effet, une bille de résine a aussi une porosité interne E_{int} du fait de sa structure. La porosité totale est égale à la somme de la porosité interne et externe.

$$E_{tot} = E_{int} + E$$

La solution présente dans la porosité interne est immobile alors que celle dans la porosité externe est entraînée par convection pendant la percolation. Dans la suite, lorsque nous parlerons de porosité nous nous référerons à la porosité externe.

La capacité est définie par rapport à V_b ou V_r . Ainsi, on définit : N' comme la capacité en équivalent,

$N_{lit} = N' / V_b$, comme la capacité du lit de résine par volume de lit,

$N = N' / V_r$, comme la capacité du lit de résine par volume de résine.

Les constructeurs donnent généralement N_{lit} dans leurs fiches techniques car cette grandeur est plus facile à mesurer mais elle est en générale assez peu précise. Les scientifiques préfèrent utiliser N et

c'est cette grandeur que nous utiliserons par la suite. L'ordre de grandeur de la porosité E est compris entre 0,3 et 0,5. Si les billes ont toutes la même taille, on s'approchera d'un empilement compact et d'une porosité de 0,3. Si les billes ont une distribution de tailles non négligeables, la porosité pourra atteindre 0,5. Un lit de billes de résine est généralement considéré avec une porosité de 0,4.

Pour une espèce ionique i , on définira:

- C_i sa concentration dans la phase liquide en eq/L .
- Q_i sa concentration dans la phase solide en eq/L de résine.

Dans le domaine de l'échange d'ions, il est courant de travailler en fractions ioniques.

La fraction ionique X_i en solution de i est définie comme :

$$X_i = C_i / \sum C_i = C_i / C_0$$

$$\sum X_i = 1$$

où $\sum C_i$ est la normalité de la solution C_0 .

La fraction ionique Y_i de i dans le solide est :

$$Y_i = Q_i / \sum Q_i = Q_i / N$$

$$\sum Y_i = 1$$

où $\sum Q_i$ est le nombre total de charges fixées sur le solide donc la capacité par volume de résine N .

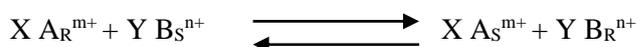
2.2. Gonflement :

Les échangeurs d'ions étant des électrolytes, au cours de l'échange, la configuration autour de chaque groupe chargé va changer. Les ions qui s'échangent n'ont pas nécessairement la même solvatation donc la même taille. En outre, la solvatation d'un ion donné peut varier lorsqu'il passe de la solution à la résine et inversement. Les billes de résine vont donc avoir tendance à gonfler ou à se contracter au cours de l'échange. Les tensions que subit la résine au cours de ces changements peuvent être extrêmement fortes, et si on n'y est pas attentif, aboutir à la rupture des billes. Il est par conséquent important de bien connaître ces phénomènes. Il est généralement admis que :

- le gonflement est réduit dans les résines à fort taux de réticulation en raison de la rigidité plus importante de leur matrice.
- le gonflement augmente avec la capacité (car il y a plus d'eau d'ionisation des groupes fonctionnels), surtout si les groupes ioniques fixés ont tendance à être complexant ou à former des paires d'ions.

3. Loi d'équilibre :[43]

Les réactions d'échange d'ions sont régies par la loi d'équilibre chimique entre l'ion fixé sur la matrice de l'échangeur et l'ion en solution. Cet échange peut être caractérisé par la réaction suivante:



Où les indices S et R correspondent respectivement à la solution et à l'échangeur.

Dans cet équilibre l'ion de charge opposée fixé sur l'échangeur, associé à l'ion échangé, n'est pas affecté. L'équilibre est régi par une constante d'équilibre thermodynamique, définie à l'aide des concentrations des ions fixés sur l'échangeur et des activités des ions en solution. Il s'exprime de la manière suivante:

$$K = \frac{[A_S^{m+}]^x [B_R^{n+}]^y}{[B_S^{n+}]^y [A_R^{m+}]^x}$$

Cette constante d'équilibre est une mesure de l'affinité relative présentée par la matière échangeuse à libérer l'ion A (fixé sur la résine) et à fixer l'ion B (en solution).

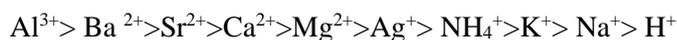
On peut émettre les considérations suivantes à propos de l'équation d'échange ionique présenté ci-dessus:

a- l'échange est stœchiométrique, c'est à dire que les quantités d'ions échangés entre la résine et la solution sont équivalentes.

b- la sélectivité vis-à-vis d'un ion en solution peut varier de façon très sensible en fonction:

- des paramètres physico-chimiques du milieu (température, pH, force ionique);
- des propriétés des ions (nature, valence, concentration, degré d'hydratation);
- des propriétés de la matière échangeuse (nature, compacité, degré et type de polymérisation, etc...).

En règle générale, la fixation des ions varie selon leur valence et leur rayon ionique. Ainsi, l'ordre d'affinité est le suivant pour une résine du type acide fort (sulfonique):



4. Régénération des résines:

Lorsque la résine est saturée (tous les sites d'échange sont saturés, B remplace presque totalement A), sa capacité d'échange est alors nulle. On doit procéder à sa régénération afin qu'il puisse être réutilisé pour un nouveau cycle. Cette opération consiste à faire inverser les réactions d'équilibre chimique en apportant une concentration très importante de l'ion A. Pour ce faire on utilise un sel de cet ion. Il est appelé régénérant ou réactif de régénération (le chlorure de sodium pour Na et Cl, un acide minéral pour H⁺, la soude caustique pour OH⁻).

La régénération peut se faire en sens inverse : régénération à contre courant ou en co-courant.

4.1. Régénération à co-courant.

Dans ce mode de régénération, le flux de régénérant est dirigé au travers du lit de résine dans le même sens que l'eau en cycle de production, c'est-à-dire de haut en bas dans les procédés classiques.

Ce mode de régénération a l'avantage de ne pas exiger un dispositif élaboré de répartition haute est flux puisque le courant de régénérant est automatiquement réparti de façon quasi uniforme par les couches hautes du lit de résine.

Dans ce mode de régénération, le débit de détassage peut être élevé dans le cas de traitement d'eaux contenant quelques matières solides en suspension; le détassage sert alors aussi de phase de lavage préliminaire de la résine qui aura retenu des matières solides au cours du cycle de production.

Au cours de ce détassage, les billes de résine les plus petites (ainsi que les fractions de billes cassées par fatigue mécanique) sont entraînées vers le liant du lit de résine. Les plus fines d'entre elles sont même drainées au travers du dispositif de répartition haute et évacuées vers l'égout.

4.2.Régénération à contre-courant:

Dans ce mode de régénération, le régénérant circule à contre-courant par rapport à l'eau traitée en cours de cycle: pour les échangeurs d'ions classiques traitant l'eau en cours de cycle de haut en bas, l'écoulement du régénérant s'effectue de bas en haut.

Ce mode présente, par rapport à la régénération co-courant, de très nombreux avantages:

- La solution régénérante s'attaque en premier lieu aux couches basses de résine très peu saturées qui sont donc très facilement débarrassées des quelques ions indésirables qu'elles contenaient en fin de cycle:

La régénération à contre-courant permet donc d'obtenir:

- un meilleur rendement de régénération;
- des couches basses très bien régénérées, donc une fuite ionique permanente réduite.

Toutefois, ce mode de régénération ne peut être utilisé qu'à condition de satisfaire aux exigences technologiques suivantes:

- corps équipés de dispositifs sophistiqués de répartition haute et de reprise basse;
- dispositifs hydrauliques extérieurs au corps permettant une parfaite maîtrise des débits;
- volume libre strictement calculé pour l'expansion du lit de résine lors du détassage;
- volume d'eau de détassage limité à la stricte quantité nécessaire.

Le dispositif de répartition haute, qui sert de reprise lors de la régénération, doit être suffisamment fin pour ne pas laisser échapper la résine vers l'égout. Les corps d'appareils échangeurs d'ions régénérés à contre-courant sont donc équipés en partie haute, soit de planchers à bosselures, soit de crépines (à disques empilés ou à bras ramifiés).

Pour éviter que les billes fines de résine ne viennent colmater les fentes des bosselures ou des crépines, une résine inerte, de densité réelle inférieure à celle de l'eau, est mise en place à la surface du lit de résine.

La régénération à contre-courant impose:

- de ne traiter que des eaux parfaitement limpides.
- de procéder régulièrement (une à deux fois par an. et chaque fois qu'une perte de charge trop importante est constatée) à l'ouverture du corps d'échangeur d'ions pour vérifier la granulométrie et la propreté des couches hautes du lit de résine, éliminer et remplacer les résines

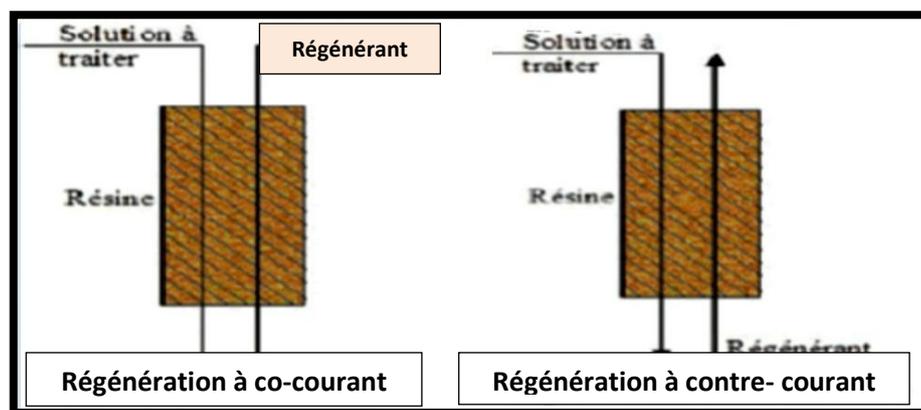


Figure13: Modes de régénération

4.3. Rendement de régénération : [44]

On appelle rendement de régénération, exprimé le plus souvent en pourcentage, le rapport entre la quantité d'ions régénérant unis en jeu pour une régénération et la quantité d'ions que la résine fixera au cours de cycle de production qui suivra la régénération.

Ce rendement varie en fonction de nombreux paramètres :

- Type de résine.
- Quantité de régénérant utilisé par litre de résine.
- Concentration de la solution régénérant au contact de la résine.
- Mode de régénération utilisé.
- Vitesse de passage de la régénération sur la résine.
- Etat de saturation de la résine au moment de sa régénération.
- Température de la solution régénérant.

Dans la pratique, le rendement de régénération varie de 20% à 95% selon le type de résine et les conditions opératoires.

4.4. Les réactifs régénérant : [45]

La régénération se fait à l'aide d'un acide pour les résines cationiques (généralement sulfurique ou chlorhydrique) et à l'aide d'une base (soude) pour les résines anioniques.

Tableau n° 17 : Produits régénérant les plus utilisés.

Produits	Chlorure de sodium	Acide chlorhydrique	Acide sulfurique	Soude	Acide carbonique
Formule	NaCl	HCl	H ₂ SO ₄	NaOH	H ₂ CO ₃
Masse molaire (g/mol)	58,5	36,5	96	40	62
Forme disponible	pastilles	solution	solution	Pastilles Lessive de soude	Gaz dissous dans l'eau
Solubilité dans l'eau	306 g/l à 20° C	33 à 35 % soit 380 à 410 g/l	92 à 98 % soit 1,7 à 1,8 kg/l	800 g/l (en paillettes)	Solution dans l'eau en

					fonction de la pression
Emploi avec les échangeurs d'ions	Résines cationiques fortes en Na+ anioniques fortes en Cl	Résines cationiques fortes en H+ cationiques faibles	Résines cationiques fortes en H+ (Risque précipitation de CaSO ₄)	Résines anioniques fortes en OH anioniques faibles	Résines cationiques faibles
Observation	Sel neutre : utilisation non dangereuse	Acide fumant Vapeurs corrosives Utilisation dangereuse	Acide très dangereux Forte élévation de température à la dissolution	Base très dangereuse	Acide faible peu dangereux
Utilisation	Utilisation à domicile et industrielle	Utilisation industrielle	Utilisation industrielle	Utilisation industrielle	Utilisation industrielle

5. Déminéralisation par échangeurs d'ions :

La déminéralisation est l'élimination des sels minéraux présents dans une eau (généralement eau saumâtre ou eau de mer) afin de rendre en vue d'un usage destiné à l'alimentation en eau potable de la population ou pour assurer la fourniture de l'eau des chaudières, des cycles de refroidissements...etc.

La déminéralisation par échangeur d'ions fait l'objet d'un certain nombre de variantes basées essentiellement sur les paramètres suivants :

- Qualité d'eau à obtenir.
- Composition de l'eau à traiter.
- Consommation de réactifs de régénération.

D'autres considérations (investissement, implantation...) peuvent également avoir une influence sur la composition de la chaîne,[46]

La description donnée ci-après des groupements d'échangeurs les plus fréquents, utilise la notation, [46] :

- Cf : cation faiblement acide.
- CF : cation fortement acide.
- Af : anion moyennement ou faiblement basique.
- AF : anion fortement basique.
- |CO₂|: élimination de CO₂.
- LM : lits mélangés (Mixed-bed).

5.1.La déminéralisation partielle :[46]

Elle comporte un appareil chargé d'échangeur de cations fortement acide (CF), régénéré par un acide fort, qui fonctionne en série avec un appareil chargé d'échangeur d'anions faiblement (ou moyennement) basique (Af), régénéré par la soude ou l'ammoniaque. L'eau produite est utilisée telle quelle si l'acidité carbonique n'est pas nuisible, ou dégazée sur un éliminateur de CO₂ situé en amont ou en aval de l'échangeur anionique.

L'eau traitée contient la totalité de la silice présente et si elle est dégazée, environ 10 à 15 mg/l d'acide carbonique. Suivant le taux de régénération adopté pour l'échangeur de cations, la conductivité peut varier entre 2 et 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le pH est de l'ordre de 6 à 6,5 après l'élimination du CO_2 . Une telle chaîne produit de l'eau pour les chaudières à moyenne pression et pour certains procédés industriels.

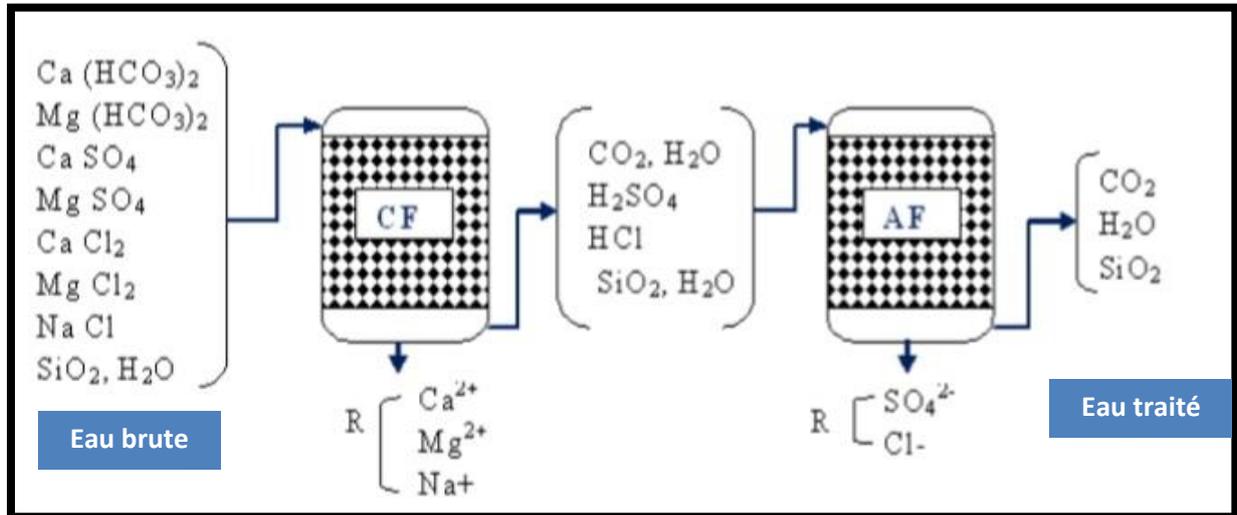


Figure 14: déminéralisation partielle

5.2. La déminéralisation totale : [44]

La déminéralisation totale (voir figure 15) permet d'obtenir des eaux ayant un extrait sec très faible et dont le degré de dépuratation dépend de la combinaison des chaînes d'échangeurs d'ions.

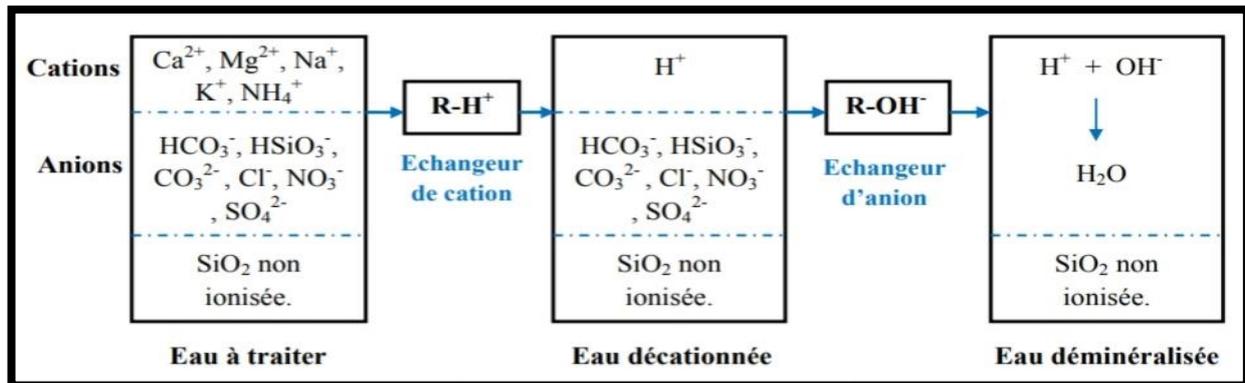


Figure 15: Principe de déminéralisation totale

5.3. Chaîne CF + AF : [46]

Tous les ions, y compris la silice, sont éliminés (figure 16). Le plus souvent, on a intérêt à réduire le flux d'ions envoyé sur l'échangeur d'anions, en intercalant entre ce dernier et l'échangeur de cations un éliminateur de CO_2 qui abaisse la teneur à quelques mg/l. Ceci permet de diminuer le volume de résine anionique forte et la consommation de réactif de régénération.

En pratique, on obtient le plus souvent une eau ayant une conductivité de 1 à 10 $\mu\text{s}/\text{cm}$, une teneur en silice de 0,05 à 0,5 mg/l et un pH compris entre 7 et 9.

Ce schéma est le plus simple et permet d'obtenir une eau déminéralisée utilisable dans un grand nombre d'applications.

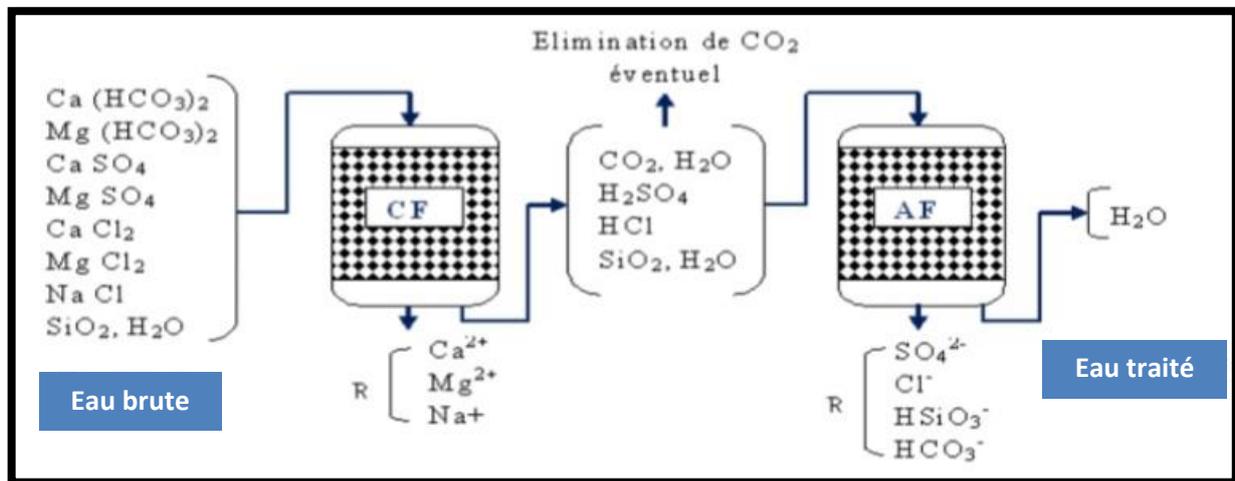


Figure 16: Déminéralisation totale avec chaînes (CF+AF)

5.4. Chaîne CF + Af + AF : [46]

Cette chaîne (voir figure 17) est une variante de la précédente qui aboutit à une qualité d'eau identique, mais présente un intérêt économique lorsque l'eau à traiter contient une forte proportion d'anions forts (chlorure et sulfates). L'eau traverse successivement l'échangeur d'anions faiblement basique et l'échangeur d'anions fortement basique. L'élimination d'acide carbonique est facultative et peut être placée, soit entre l'échangeur de cations et le premier échangeur d'anions, soit entre les deux échangeurs d'anions.

La régénération des échangeurs d'anions s'effectue en série, la solution de soude traversant d'abord la résine fortement basique, puis la faiblement basique. Cette méthode permet une économie de soude considérable par rapport à la précédente, car, en général, l'excès de soude provenant de la régénération à dose normale de la résine fortement basique est suffisant pour régénérer complètement la résine faiblement basique.

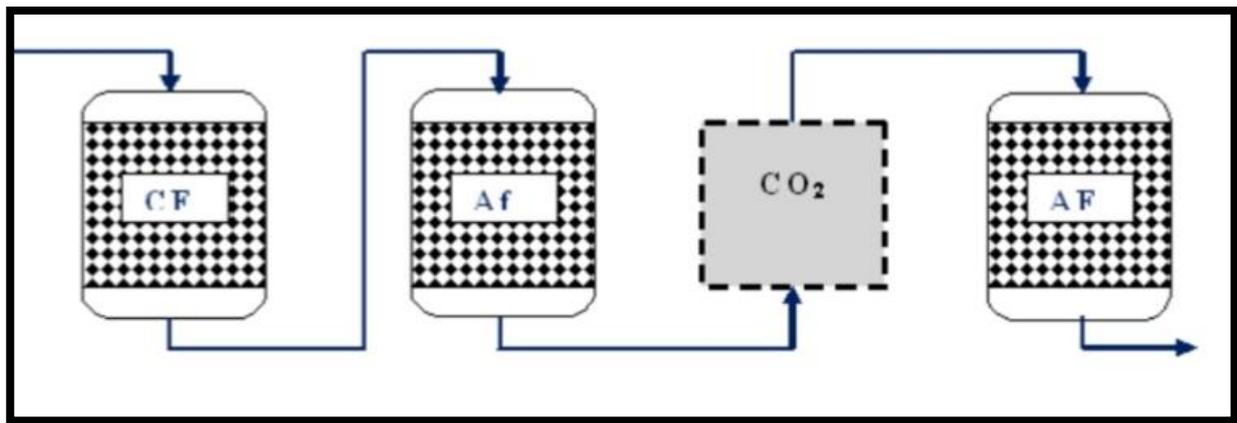


Figure 17: Déminéralisation totale avec chaînes (CF+Af+AF)

5.5. Chaîne avec groupement Cf + CF et Af + AF :[46]

Ce groupement est intéressant lorsque l'eau contient une proportion notable de bicarbonates. La régénération s'effectue en série traversant successivement l'échangeur sulfonique et l'échangeur carboxylique.

Etant donné que la régénération de la résine carboxylique s'effectue à peu près stœchiométriquement à partir de l'excès d'acide libre subsistant après la régénération de la résine sulfonique, le taux de régénération global est considérablement abaissé. Ce type de chaîne qui permet une consommation minimale des réactifs.

5.6. Lits mélangés (LM) :[46]

Ce procédé diffère essentiellement de la solution à lits séparés du fait que deux résines fortes, cationique et anionique, sont réunies dans un seul appareil (voir figure 18). Elles sont intimement mélangées par brassage à l'air comprimé. Les grains de résine ainsi disposés côte à côte se comportent donc comme une infinité d'échangeurs de cations et d'anion en série.

Pour effectuer la régénération, les deux résines sont classées hydrauliquement lors de détassage. La résine anionique, plus légère se place au-dessus, la résine cationique, plus lourde, se dépose dans le fond.

Après séparation des résines, chacune d'elles est régénérée séparément respectivement avec de la soude caustique et un acide fort. L'excès de régénérant est ensuite évacué par rinçage de chaque lit. Après vidange partielle de l'appareil, les résines sont mélangées à l'air comprimé. On termine le rinçage et l'appareil est prêt pour un nouveau cycle.

Les avantages des lits mélangés, par rapport aux lits séparés, sont les suivantes :

- Obtention d'une eau de très haute pureté et de qualité constante au cours du cycle, (conductivité inférieure à 0,2 $\mu\text{s}/\text{cm}$, silice inférieure à 20 $\mu\text{g}/\text{l}$).
- pH voisin de la neutralité.
- consommation d'eau de rinçage très faible.

Les inconvénients des lits mélangés sont le pouvoir d'échange plus faible et la conduite plus délicate entraînée par la nécessité d'une séparation et d'un mélange des résines parfaitement corrects.

Un seul lit mélangé est susceptible de remplacer une chaîne complexe d'échangeurs d'ions.

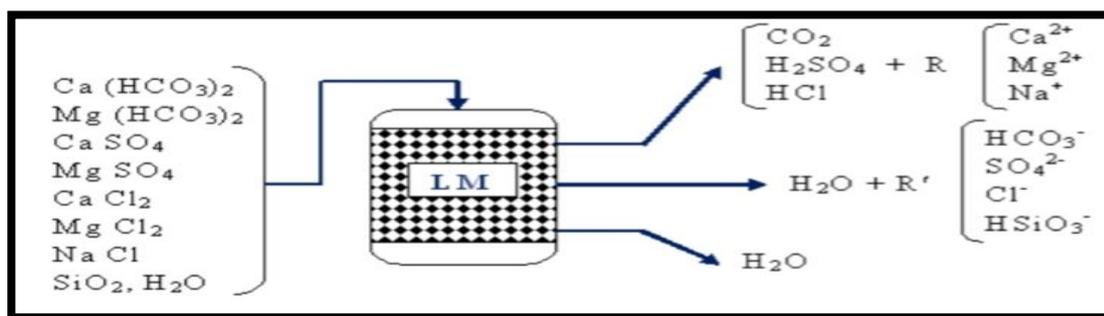


Figure 18: Déminéralisation totale avec lit mélangé

6. Installation comportant une chaîne de finition :[46]

La qualité de l'eau sortant d'une chaîne primaire quelle que soit sa composition, est déterminée par la fuite ionique de l'échangeur de cations. Cette fuite ionique, variable suivant les caractéristiques de l'eau brute et le taux de régénération, ne permet pas d'obtenir une qualité suffisante pour certains emplois de l'eau déminéralisée, tels que l'alimentation des chaudières à très haute pression et certaines applications dans les industries chimiques, nucléaires ou électroniques. Il faut donc traiter à nouveau sur une chaîne dite de finition.

La fuite ionique de l'échangeur de cations est transformée en basse libre sur l'échangeur d'anions avec pour conséquence une fuite en silice de celui-ci. Par conséquent, une chaîne de finition doit nécessairement comporter un échangeur de cations fortement acide et un échangeur d'anions fortement basique.

Elle peut se présenter sous forme de deux colonnes en série, la régénération se fait dans le sens AF2-AF1 et CF2-CF1. Dans ces conditions, les échangeurs de finition sont parfaitement régénérés et la qualité de l'eau déminéralisée est excellente (conductivité inférieure à 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, teneur en silice comprise entre 5 et 20 $\mu\text{g}/\text{l}$).

Cependant, ce système est de moins en moins utilisé. On lui préfère les échangeurs à lits mélangés qui permettent d'atteindre une conductivité de l'ordre de 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25 °C et des fuites en silice nettement inférieures à 10 $\mu\text{g}/\text{l}$.

6.1.Principe de calcul d'une chaîne de déminéralisation :[48]

Les éléments suivants sont nécessaires au calcul :

- Titre TAC de l'eau brute en °F.
- Titre SAF de l'eau brute en °F ($\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$).
- Teneur en silice TSiO_2 .
- Teneur en acide carbonique de l'eau après passage sur cation et éventuellement élimination d'acide carbonique, TCO_2 .
- Volume d'eau à fournir entre régénération, en m^3 , y compris éventuellement les eaux de service.
- Débit horaire Q en m^3 .
- Pouvoir d'échange C des résines exprimé en degrés-litres/litre de résine tassée.

Pour les chaînes classiques, le pouvoir d'échange est calculé pour chaque résine à partir de documents fournis par le fabricant.

On calcule d'abord l'échangeur d'anions de capacité C, le volume à utiliser est donné par les formules:

- S'il s'agit d'un échangeur faiblement basique :

$$= V \times \text{SAF}$$

- S'il s'agit d'un échangeur fortement basique :

$$= V \times (\text{SAF} + \text{TCO}_2 + \text{TSiO}_2)$$

On calcul ensuite l'échangeur de cations en tenant compte de l'eau supplémentaire αV_a nécessaire au rinçage de l'échangeur d'anions, pouvant varier entre 5 et 20 suivant le type de résine. On a alors :

$$=(V + \alpha V_a) \times (\text{SAF} + \text{TAC})$$

Les volumes ainsi calculés doivent alors être comparés avec le débit horaire à traiter. Il existe en effet des limites supérieures à la vitesse de passage ou à la charge volumique. Si V_c ou V_a sont trop faibles, il ya lieu de les réajuster, quitte à accroître le volume de cycle V.

7. Présentation de l'unité de déminéralisation à lits mélangées de la centrale de cap-djinet :

L'installation de déminéralisation sert au traitement de l'eau d'appoint d'alimentation pour les quatre chaudières.

Comme eau brute, on utilise le distillat des unités de dessalement d'eau de mer qui a une teneur en sel maximum de 20 mg/l comme NaCl et une température maximal de 40°C.

Deux filtres à lits mélangés sont prévus avec une capacité nette de 40 m³/h pour chacun, fonctionnant généralement en mode alterné, un sert à la déminéralisation, l'autre en réserve. L'eau déminéralisée produit est stockée dans deux réservoirs de 1500 m³ de volume pour chacun. Elle doit correspondre dans sa qualité à l'exigence de l'eau d'appoint des chaudières à vapeur à haute pression,[49]

7.1.Différents organes de l'installation :[49]

L'installation de déminéralisation se compose des parties suivantes:

- Trois pompes d'eau brute.
- Deux colonnes à lits mélangés automatiques.
- Deux soufflantes à air pour la régénération.
- Deux réservoirs de stockage d'acide chlorhydrique.
- Deux pompes de remplissage d'acide chlorhydrique.
- Deux pompes de la soude.
- Un réservoir de stockage de la soude.
- Une station de préparation de la soude.
- Une station de préparation de l'acide.
- Deux pompes d'eau de dilution (déminéralisée).
- Fosse et équipement de neutralisation.
- deux soufflantes à air pour la neutralisation.

- Appareils de mesure de débit, pression, conductivité...
- Une armoire de commande.

7.2. Compartiment de l'acide HCl :

L'acide chlorhydrique à 30% de concentration est stocké dans deux réservoirs, d'une capacité de 10 m³ pour chacun.

Le remplissage des conteneurs par l'acide s'effectue par le refoulement avec l'air comprimé.

La quantité d'acide, nécessaire pour la régénération est transportée par deux pompes doseuses et diluée avec l'eau déminéralisée jusqu'à une concentration de 5%.

7.3. Compartiment de la base NaOH :

La soude caustique à 99% qui est livrée en forme solide (flacons, feuillets), est dissoute dans une cuve de dissolution équipée d'un agitateur à une concentration de 30%, puis pompés par deux pompes de remplissage jusqu'au réservoir de stockage de 1800 L de volume.

La quantité nécessaire à la régénération est aspirée par deux pompes doseuses et diluée avec de l'eau déminéralisée jusqu'à une concentration de 5%.

7.4. Description de l'installation:

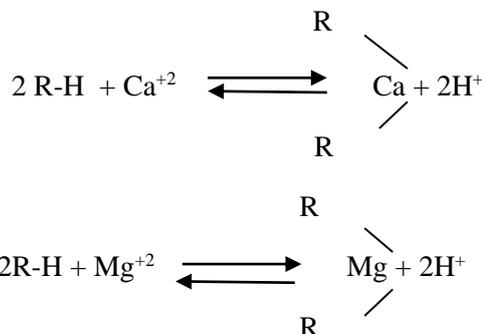
Le distillat de l'installation de dessalement de l'eau de mer qui est stocké dans deux réservoirs de 2700 m³, est pompé à la station de déminéralisation pour être refoulé vers les deux filtres à lits mélangés.

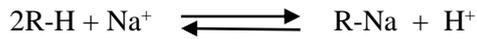
7.5. Les filtres à lits mélangés :

Le système de lit mélangé est le système le plus répandu, il permet d'atteindre la conductivité théorique de l'eau pure (0.055 µs/cm à 25°C) et des fuites ioniques et en silice de l'ordre 1 µg/l, par fois inférieures, [50]

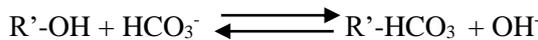
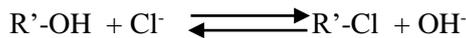
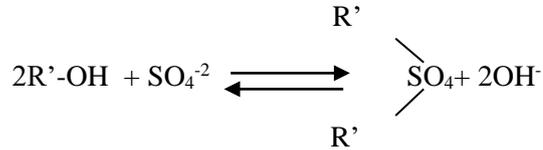
Un filtre à lits mélangés comprend le mélange d'échangeurs cationiques fortement acides, et les échangeurs anioniques fortement basiques. En service normal, l'eau à déminéraliser s'écoule de haute en bas à travers la couche des résines tel que :

- Les cations de l'eau sont absorbés par la résine cationique et échangés contre les ions H⁺ selon les réactions suivantes :





- Les anions sont absorbés par la résine anionique et échangés contre les ions OH⁻ selon les réactions suivantes :



L'eau déminéralisée est envoyée vers les deux réservoirs de stockage de 1500 m³ pour chacun. On injecte dans la conduite d'arrivée des deux réservoirs de stockage de l'ammoniac NH₃ pour relever la valeur de pH de l'eau déminéralisée à plus de 9,5, [49]

Une fois que les résines sont saturées. Il y a lieu de procéder de régénération.

7.6. La régénération :

Si à la sortie des filtres à lits mélangés, la conductivité est importante (supérieure à 0,1µs/cm) et l'eau est de mauvaise qualité, ce dernier ne doit pas être utilisée pour les besoins de la centrale et surtout pour l'alimentation du générateur de vapeur. La mauvaise qualité de l'eau et sa conductivité importante revient principalement à la saturation des résines.

Pour régler ce problème, on fait appelle à la régénération.

7.6.1. Principe :[49]

La régénération permet une réactivation des résines saturées. Elle consiste à effectuer un rinçage des résines anioniques et cationiques, par deux solutions :

- Solution de HCl concentrée à 5%.
- Solution de NaOH concentrée à 5%.

Les indices suivants permettent de déceler si la régénération est nécessaire :

- Si la conductivité à la sortie des lits mélangés est supérieure à 0,1µs/cm.
- Si la silice SiO₂ est supérieure à 0,02mg/l.
- Si la différence de pression entre l'entrée et la sortie des lits mélangés est supérieure à 1,5 bars.
- Après un fonctionnement continu de 4 semaines.

7.6.2. Les étapes de régénération :[49]

Au niveau de la centrale, la régénération a lieu en mode à contre-courant. Elle s'effectue en neuf étapes suivantes :

1ère étape : Détassage.

Elle consiste à effectuer la séparation des résines par l'intermédiaire de l'eau brute qui est introduite par le point bas (figure 19), l'eau ressort par la partie supérieure.

Par la différence de poids spécifique, les résines cationiques plus denses retournent dans le bas du réservoir et les résines anioniques occupent la partie supérieure. Cette opération dure 20 minutes.

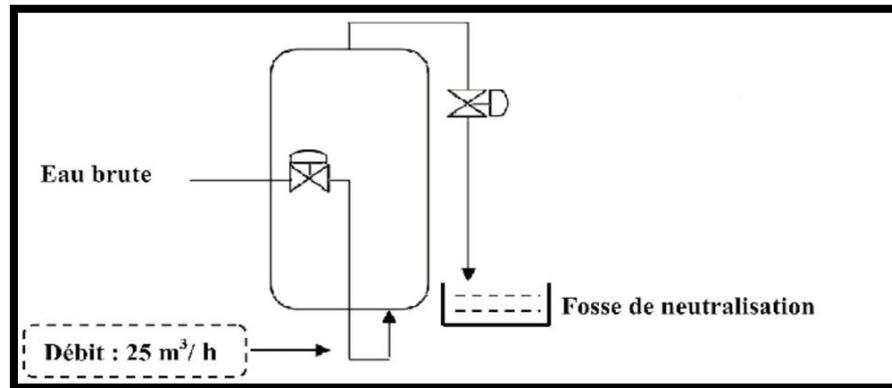


Figure 19: Étape n°1 de régénération des lits mélangés

2ème étape : Pause.

Arrêt de l'arrivée de l'eau brute (figure 20) pour la précipitation complète des résines. Cette opération dure 5 minutes.

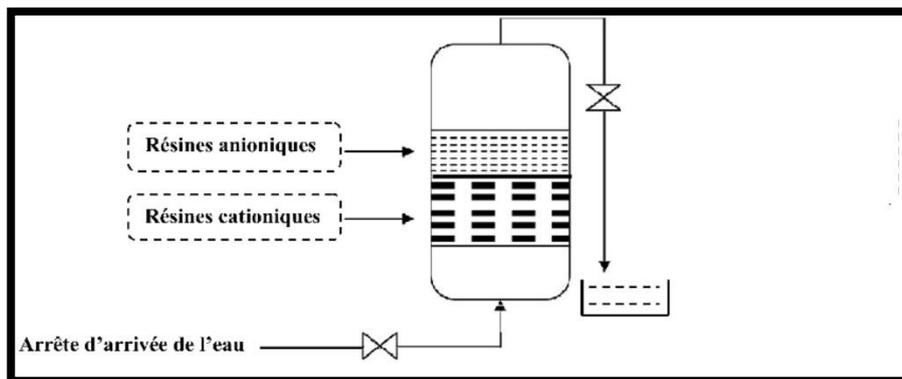


Figure 20: Étape n°2 de régénération des lits mélangés

3ème étape : Remplissage d'acide et de soude.

Le Remplissage de l'acide chlorhydrique et de la soude (figure 21) s'effectue en même temps. Cette opération dure 30 minutes.

- La solution HCl à 5% introduit par le point bas du réservoir pour régénérer les résines cationiques.

- La solution de soude NaOH à 5% introduite par le point supérieur du réservoir pour régénérer les résines anioniques.

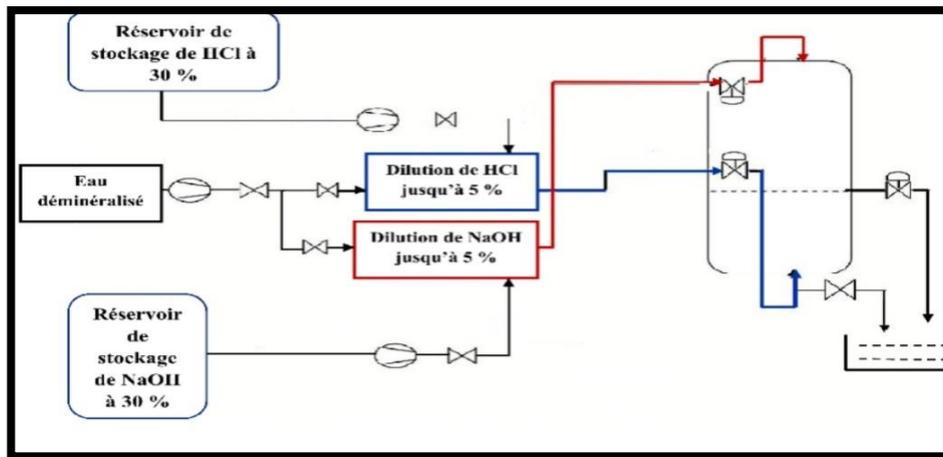


Figure 21: Etape n° 3 de régénération des lits mélangés

4ème étape : Rinçage des résines.

Une fois que l'acide et la soude caustique sont introduits, les pompes doseuses des deux solutions s'arrêtent. La pompe d'eau de dilution reste en service pour effectuer le lavage des résines avec une eau déminéralisée pour enlever les traces de HCl et NaOH. Cette opération dure 80 minutes.

5ème étape : Pause.

Avant de passer à l'étape suivante, une pause de 30 secondes est nécessaire, pour arrêter complètement l'opération de lavage des résines.

6ème étape : Abaissement du niveau d'eau.

Le niveau d'eau dans le lit mélangé doit abaisser, pour se stabiliser à 10 cm au dessus des résines (figure 22). Cette opération dure 30 minutes.

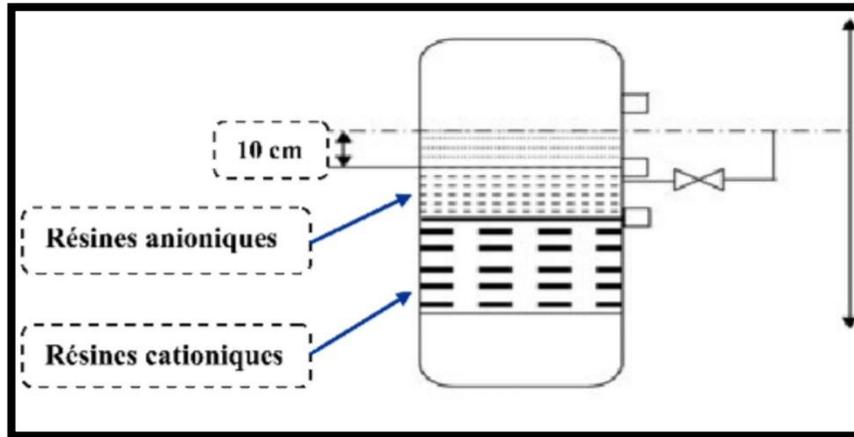


Figure 22: Étape n°6 de régénération des lits mélangés

7ème étape : Reconstitution du mélange de résines.

Cette étape consiste à une reconstitution du mélange des résines. L'air fourni par le compresseur est introduit par le bas du réservoir des lits mélangés et ressort par la partie supérieure (figure 23).

Lors de cette opération, le volume à l'intérieur du filtre augmente avec l'apport d'air pour reconstituer le mélange des résines. Cette opération dure 10 minutes.

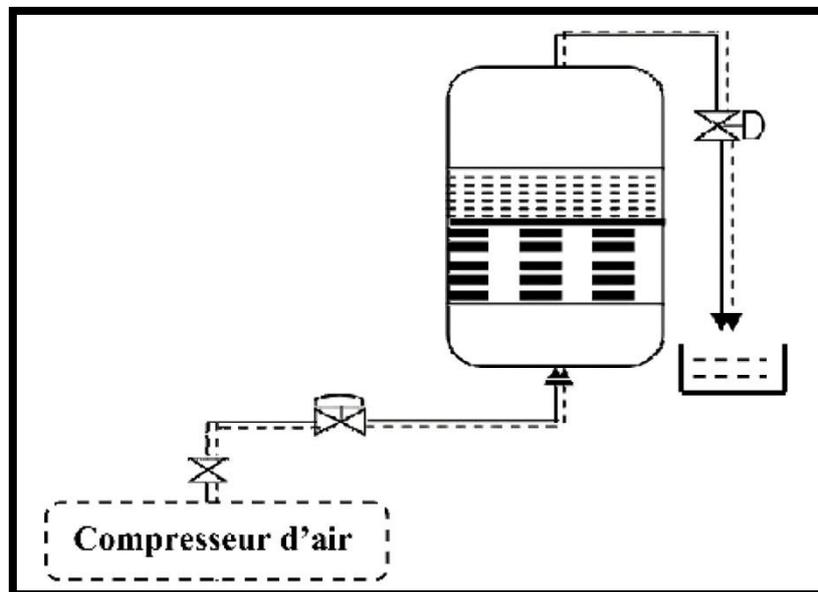


Figure 23:Étape n°7 de régénération des lits

8ème étape : Remplissage de l'espace vide.

Dans cette étape (figure 24) l'espace vide du réservoir des lits mélangés est rempli, jusqu'à ce que l'eau sorte par le point haut. Cette opération dure 5 minutes.

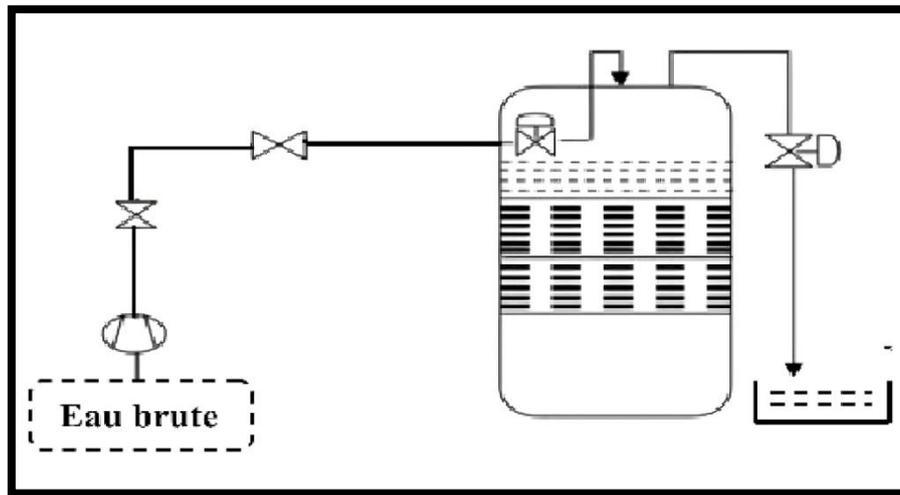


Figure 24: Étape n°8 de régénération des lits

9ème étape : rodage du lit mélangé.

Cette opération consiste à faire une recirculation d'eau brute pour effectuer le lavage des résines, et mesurer la conductivité de l'eau sortant du réservoir (figure 25) :

- Si la conductivité est supérieure à $10 \mu\text{s}/\text{cm}$, l'eau est envoyée vers le rejet.
- Si la conductivité est comprise entre $0.1-10 \mu\text{s}/\text{cm}$, la circulation est maintenue pendant 120 minutes.
- Si la conductivité est inférieure à $0.1 \mu\text{s}/\text{cm}$, l'eau déminée est dirigé vers les deux réservoirs de stockage.

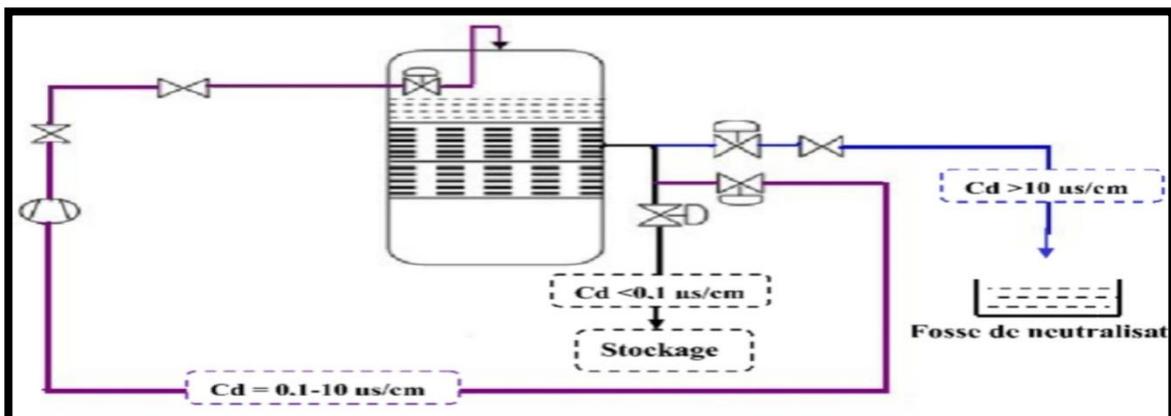


Figure 25: Etape n° 9 de régénération des lits

7.6.3. La neutralisation :[49]

Les traitements de correction de pH souvent désignés par le terme de neutralisation, qui consiste à ramener le pH d'une eau à une valeur définie. Les solutions évacuées au niveau de la centrale ne peuvent pas être directement déversées dans le conduit des eaux résiduaires, car elles sont encore corrosives et pourraient endommager les canalisations et polluer l'environnement, il faut donc neutraliser ces solutions.

Les solutions conduites à la neutralisation viennent :

- De la régénération de l'installation.
- De lavage à contre-courant.
- Des filtres humides du réservoir HCl.
- Des filtres humides du réservoir NaOH.
- Des vidanges (lors de rinçages ou de mise en service).

Les composants principaux de l'installation de neutralisation sont :

- Un bassin mélangeur.
- Une pompe aspirante.
- Deux ventilateurs à air mélangeurs.
- Deux réservoirs collecteurs.

Le capteur de niveau très haut donne une alarme en salle de commande et met la neutralisation en service automatique. La pompe de recirculation reste en service pendant 20 minutes avant toute injection, afin d'avoir un mélange homogène, et une mesure de pH correcte. Après 20 minutes, si le pH est bas (inférieure à 7), il y a injection de NaOH, s'il est supérieur à 7, injection de HCl.

8. Le cycle eau-vapeur :

Après dessalement et déminéralisation de l'eau de mer, les pompes d'alimentation de la chaudière (voir figure 26) fournissent à celle-ci la quantité nécessaire d'eau qui va être transformé en vapeur a haute pression et qui va alimenter le groupe turbo-alternateur, [49]

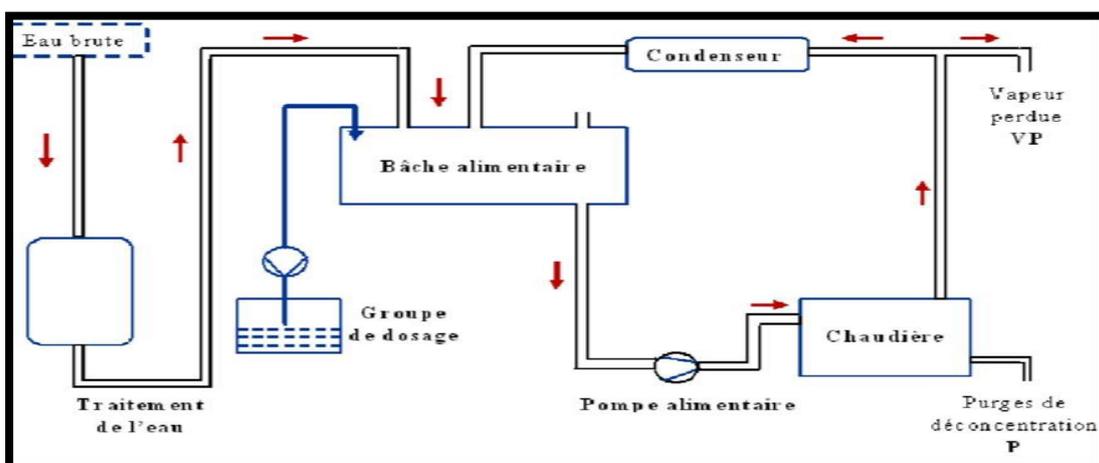


Figure 26: Principe de production de vapeur

8.1.Le générateur de vapeur : [41]

La chaudière se présente sous la forme d'un cylindre suspendu sur un support rectangulaire. A sa partie inférieure se trouve, le foyer ou a lieu la transformation de l'énergie calorifique. La combustion a lieu dans la chaudière à 8 brûleurs utilisant, comme combustible, du gaz ou du fuel (comme énergie de secours).

Le comburant (air) est tiré de l'atmosphère par l'intermédiaire de deux ventilateurs de soufflage. La chaudière peut être assimilée à 2 parcours :

- Dans le premier parcours, composé de parois à membranes soudées, étanches aux gaz de l'évaporateur, sont installés les surchauffeurs HP, MP et BP, les deux resurchauffeurs ainsi que l'économiseur.
- Le deuxième parcours étant une conduite de fumées provenant du foyer et qui servent à chauffer les surchauffeurs et l'économiseur, ces fumées passent par le réchauffeur d'air avant d'être rejetées à l'atmosphère par la cheminée.

Cette disposition permet à l'ensemble des éléments de la chaudière de ne pas subir des contraintes de dilatation thermique. Pour parer à toute autre forme de contraintes, les parois de l'évaporateur sont renforcées par des bandages spéciaux.

8.2.Fonctionnement de cycle :[51]

Dans la centrale, l'eau peut être dans un état liquide comme elle peut être dans un état vapeur, et ceci dépend du circuit traversé.

La vapeur ayant traversé la turbine (corps HP, MP, BP) se trouve en fin de parcours dans le condenseur situé en dessous du corps BP, cette vapeur va se répandre sur les 15 000 tubes en titane disposés transversalement dans le condenseur à l'intérieur desquels circule l'eau de mer qui va servir de source froide pour la condensation de la vapeur. Cela produira le condensat principal qui va être récupéré dans le puits du condenseur. Les pertes seront compensées par des appoints d'eau déminé qui se feront automatiquement à partir de la bêche tampon trouvant à proximité du condenseur.

La pompe d'extraction va refouler ce condensat dans les réchauffeurs basse pression (BP1, BP2, BP3) et acheminera l'eau jusqu'à la bêche alimentaire ou elle subira un dégazage physique et autre un réchauffage par mélange. L'eau dégazée et réchauffée à environ 150°C dans la bêche alimentaire va être reprise par les pompes alimentaires pour alimenter la chaudière en passant à travers les réchauffeurs haute pression (HP1, HP2) qui élèveront sa température à 240°C avant son admission dans la chaudière (eau d'alimentation).

L'eau d'alimentation passera à travers la soupape alimentaire (vanne de réglage niveau ballon chaudière) pour entrer la chaudière au niveau de l'économiseur qui va encore l'élever en température à environ 300°C avant son entrée dans le ballon chaudière. L'eau d'alimentation parvenue au ballon va occuper la partie inférieure et son niveau sera réglé à 50%. Cette eau va ensuite descendre par les colonnes d'alimentation pour rejoindre le collecteur inférieur qui alimentera les tubes vaporisateurs (ou les tubes écrans) qui sont directement exposés aux flammes des huit brûleurs disposés sur une des quatre faces de foyer chaudière.

La vapeur saturé produite dans ces tubes va s'élever vers le collecteur supérieur par différence de densité entre l'eau et la vapeur (la vapeur étant plus légère que l'eau) pour être acheminée vers la partie supérieur du ballon chaudière. Cette vapeur (contenant des gouttelettes d'eau) devra être séchée

avant son admission dans la turbine corps HP. Elle sortira donc du ballon et passera à travers les surchauffeurs N° 1, 2 et 3 pour être séchée et deviendra alors vapeur vive ou vapeur sèche. Ce dernier sortira de la chaudière avec une pression de 145,7 bars et une température de 540°C et elle se dirigera alors vers la turbine corps HP ou elle subira une détente pour en ressortir sous forme de vapeur moyenne pression et de température avoisinant les températures de vapeur saturée. Pour cette raison elle sera réintroduite dans la chaudière pour passer à travers les resurchauffeurs N°1 et 2 ou elle sera resurchauffée.

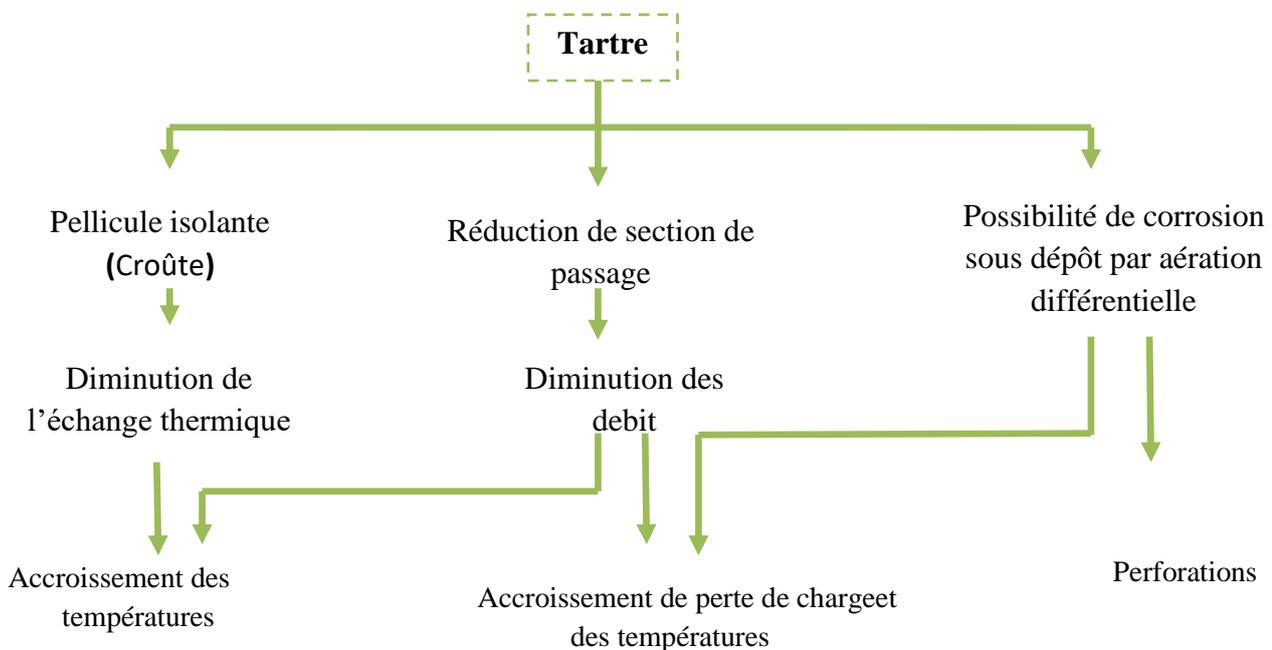
La vapeur resurchauffée ressortira de la chaudière avec une pression de 35,9 bars et une température de 535°C, se dirigera alors vers le corps MP de la turbine ou elle subira une autre détente pour en ressortir avec une basse pression et température et aller directement vers le corps BP de la turbine ou elle sera soumise à sa dernière détente avant de se retrouver dans le condenseur du groupe et le circuit reprend son cycle.

9. Inconvénients provoqués par les sels et les impuretés de l'eau :

Les problèmes que l'eau peut provoquer dans une chaudière ou dans la turbine qui est associée à la production de l'électricité sont :

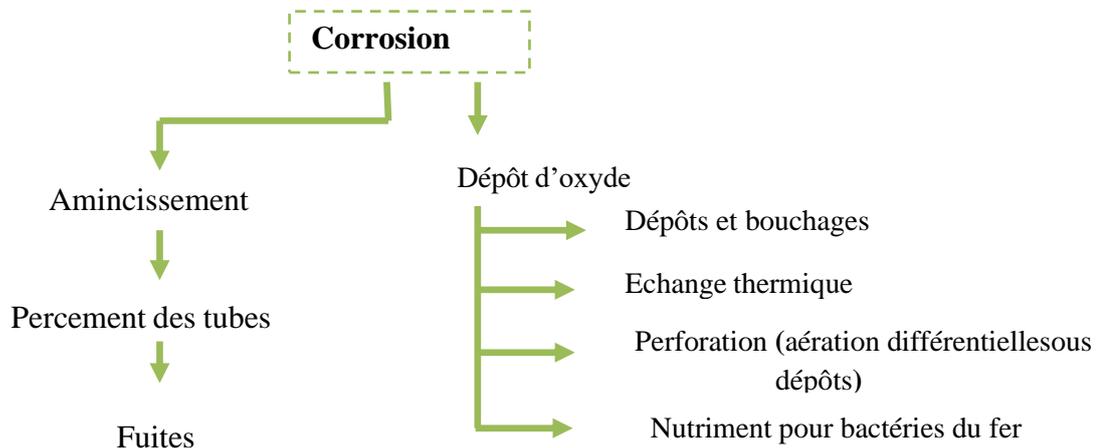
9.1.L'entartrage :

La présence d'un tartre sur une surface de chauffage affecte peu le rendement de générateur de vapeur et change considérablement la température de l'acier de tube, [41]. Le schéma ci-dessous résume les Inconvénients dus au tartre, [48]



9.2. La corrosion:

D'origine et de nature très variées dues, soit à l'action de l'oxygène dissous, soit à l'acidité du milieu due au gaz carbonique CO₂ en particulier, soit encore à l'attaque directe du fer par l'eau, [7]. Le phénomène le plus fréquent est la formation de piqûres ou de pustules qui peuvent entraîner des perforations ou des destructions de tuyauteries, [41]. Le schéma ci-dessous résume les Inconvénients dus à la corrosion, [48]



9.3. Le primage: [48]

Le phénomène de primage consiste en l'entraînement d'eau avec la vapeur c.-à-d la vapeur produite par le générateur de vapeur entraîne mécaniquement de fines gouttelettes d'eau contenant des sels dissous. Il est principalement dû à la vitesse du flux de vapeur vers les surchauffeurs primaire et secondaire. Des vibrations des surchauffeurs peuvent détacher ces dépôts et les entraîner vers la turbine, érodant, les coudes des surchauffeurs, les organes d'interception et les ailettes.

9.4. L'entraînement dans la vapeur: [7]

L'entraînement de corps minéraux volatils dans la vapeur à la température d'ébullition, dont le plus nocif est celui de la silice (SiO₂) qui se produit au dessus de 250°C. Ces sels se déposent sur les ailettes de la turbine entraînant de graves désordres dans leur fonctionnement. Les entrainements, d'autant plus importants que la pression et la température, sont plus élevées. Ils sont en relation avec la concentration des éléments concernés dans l'eau du ballon.

10. Lutte contre les problèmes de circuit eau-vapeur :

Afin d'éliminer les problèmes de circuit eau-vapeur, des traitements appliqués en chaufferie visent à maintenir dans la chaudière [44] :

- Un pH alcalin (supérieur à 9).
- Un excès de réducteur d'oxygène.
- Une teneur minimale de passivant des surfaces internes.
- Une viscosité (donc une salinité) aussi faible que possible.
- Et chaque fois que l'usage de la vapeur le permet, un pH légèrement alcalin (8,5 à 9) dans la vapeur condensée.

10.1. Le dégazage :

10.1.1. Le dégazage physique:

Il se fait à l'aide d'un dégazeur thermique (bâche dégazant). Il présente l'avantage d'éliminer non seulement l'oxygène, mais aussi les autres gaz dissous et particulièrement le gaz carbonique qui est très nocif, [41]

L'eau entre dans la bâche par le haut à l'intérieur de cette dernière, il y a un système de pulvérisation dont le but est d'éviter les chocs thermiques eau-vapeur et augmenter la surface et le temps de contact.

La vapeur entre par le bas avec une température de 282,2 °C jusqu'à 151,4 °C. Cette température permet l'évaporation du CO₂ et O₂ dissous qui causent la corrosion.

La pression à l'intérieur de la bâche est de 0,15 bars. Donc, la bâche dégazant permet aussi un préchauffage d'eau à 151,4 °C pour éviter les chocs thermiques à l'entrée de la chaudière, [50]

10.1.2. Le dégazage chimique:[50]

Le dégazage thermique permet une bonne diminution de la teneur en oxygène dissous. Cependant, l'expérience a prouvé que cette réduction n'était pas suffisante pour assurer une protection totale. De ce fait l'utilisation de réducteurs chimique s'est généralisée.

Le réducteur d'oxygène utilisé au niveau de la centrale thermique de Cap Djinet est l'hydrazine (N₂H₄. H₂O).

L'hydrazine réagit avec l'oxygène en ne donnant que des produits volatils non nocifs, théoriquement l'élimination de 32 grammes d'O₂ nécessite 32 grammes de N₂H₄ ou 50 grammes de N₂H₄. H₂O.

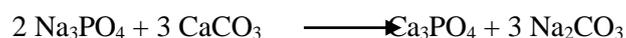
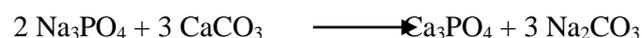
10.2. Injection de l'ammoniac (NH₃):[41]

Une correction du pH est envisagée pour l'eau déminéralisée en utilisant l'ammoniac (NH₃). Ce dernier est un agent chimique basique, si on l'ajoute à l'eau, il augmente sa valeur de pH et, de cette manière, il réduit la corrosion sur les surfaces en acier normal. Le pH est maintenu entre 9.5 et 10.

10.3. Injection de phosphate trisodique (Na₃PO₄): [41]

Il garanti les fonctions suivantes :

- Il contribue, dans le temps de la première mise en marche à limiter l'entraînement de l'oxyde de silicium vers la turbine et à faciliter son élimination par les soupapes de purge.
- En cas de pénétration d'eau de mer, il agit par sa nature basique, contre la réduction de la valeur du pH par hydrolyse des sels de magnésium et calcium selon les deux réactions suivant :



Et en aura ensuite :



Par conséquent, la dose de PO_4^{3-} diminue et le pH augmente. La soude, qui résulte et qui a une très forte concentration peut causer des inconvénients néfastes pour le rendement de la centrale, est éliminée par Na_2HPO_4 qui est ajouté à l'eau dans la chaudière et en aura :



Il faut donc ajoute 95 g de PO_4^{3-} pour 40 g de NaOH, pour éliminer les boues déposées. On réalisera des extractions de fond avec mise à l'égout.

Le tableau n°27 représente les différents points de dosage de l'ammoniac NH_3 et du phosphate de sodium (Na_3PO_4) et les doses utilisées pour chaque produit.

11. Les besoins en eau de refroidissement et leur qualité :

L'exploitation d'une centrale thermique à grande puissance demande d'importantes quantités d'eau de refroidissement pour réduire la chaleur résiduelle, [39]

11.1. Principe de processus de refroidissement :[48]

Dans un processus industriel de refroidissement, on peut distinguer deux étapes :

- Transfert de la chaleur à évacuer vers un fluide de refroidissement par contact direct ou plus généralement indirect grâce à des équipements d'échange thermique.
- Transfert des calories du fluide de refroidissement vers le milieu environnant.

Trois cas peuvent se présenter, l'eau chaude :

- est rejetée directement en mer, en rivière ou à l'égout : c'est le circuit ouvert.
- est refroidie par un contact avec un fluide secondaire (air ou eau) et retourne sans contact avec l'air aux appareils à refroidir : c'est le circuit fermé.
- est refroidie par une évaporation partielle dans un réfrigérant atmosphérique, puis retourne aux appareils : c'est le circuit semi-ouvert.

11.2. Circuits de refroidissement au niveau de la centrale :[39]

Le besoin en eau froide de la centrale s'élève à 1000 m³ /h environ et ceci dépend de circuit traversé (principale ou intermédiaire).

11.3. Circuit de refroidissement principal :

Le circuit d'eau de circulation principale sert principalement à l'évacuation de la chaleur résiduelle produite par la condensation de vapeur dans les condenseurs.

Comme en ce qui concerne la centrale thermique de Cap Djinet, l'eau de mer est en quantité suffisante, le procédé de refroidissement en circuit ouvert a été retenu. Le principe est le suivant :

- L'eau est aspirée de la station de pompage au moyen de quatre pompes de débit 2500 m³/h chacun.
- Après l'étape de prétraitement de l'eau de mer, l'eau de refroidissement est refoulée par quatre conduites dans les condenseurs pour enfin retourner à la mer à travers le canal de rejet.

11.4. Circuit de refroidissement intermédiaire :

Ce système sert à refroidir les consommateurs suivants :

- Réfrigérants d'huile de turbine.
- Réfrigérants d'huile d'étanchéité du générateur.
- Réfrigérants d'excitatrice.
- Enveloppes réfrigérantes de la caméra vidéo
- Réfrigérants des pompes eau d'alimentation
- Réfrigérants de palier préchauffeur d'air
- Réfrigérants de prélèvement d'échantillons
- Réfrigérants ventilateur de recirculation
- Détendeurs des purges
- Réfrigérants d'air des compresseurs

Le milieu réfrigérant est de l'eau totalement déminéralisée. Cette dernière est stockée dans une bache de 5 m³ circulant en circuit fermé.

12. Les besoins en eau de lavage :

La consommation d'eau de lavage au niveau de la centrale de Cap Djinnet est en grande quantité environ 1319 m³/h. L'eau est alors utilisée comme véhicule des produits de nettoyage et de désinfection, mais aussi comme fluide de rinçage destiné à éliminer toute trace des réactifs chimiques avant remise en service du processus. La consommation est également accrue lorsqu'on opère un lavage de surface à forte pression, [49]

Les traitements appliqués aux eaux de lavage correspondent à ceux de circuit de refroidissement principale : dégrillage-tamassage, chloration et injection de NH₃ (5 L/h) afin d'augmenter le pH à plus de 9,5 [39]

Tableau n° 27 : les différents points de dosage de l'ammoniac (NH₃) et de phosphate de sodium (Na₃PO₄).

Mode de service	Valeurs indicatrices pour le service					Point de dosage	
	Pression « Bars »	Liquide refoulé	Débit « L/h »	Quantité de dosage « mg/kg »	Conséquence		
Automatique en dépendance du débit	15	3%NH ₃ 97%H ₂ O	6	3 -4	Maintien de la valeur de pH entre 9,5et10	<ul style="list-style-type: none"> Sur le réservoir de stockage d'eau déminéralisée. Après les filtres à lits mélangés. 	Eau d'appoint
Manuel discontinu	25	1%NH ₃ 99%H ₂ O	5,3	50 -100	Maintien de la valeur de pH entre 9,5et10	<ul style="list-style-type: none"> Après la pompe du condensat principale. 	Circuit de Condensatin principale
	25	6%NH ₃ 94%H ₂ O	10	0,1	Maintien de la valeur de pH entre 9,5 et 10	<ul style="list-style-type: none"> Avant le réchauffeur final à basse pression 	
	200	1%Na ₃ PO ₄ .12 H ₂ O 99%H ₂ O	30	0,1	Maintiende2-6 mg/kg de PO ₄ ³⁻ dans l'eau de chaudière	<ul style="list-style-type: none"> Dans le ballon de chaudière. 	
	15	3%NH ₃ 97%H ₂ O	5	3 -4	Maintien de la valeur de pH entre 9,5et10	<ul style="list-style-type: none"> Circuit d'eau de refroidissement. 	

Partie expérimentale

Introduction :

Dans cette partie expérimental, nous allons aborder première partie la technologie de traitement de l'eau de mer au niveau de la centrale de cap-djinet, à savoir le prétraitement, le dessalement, la déminéralisation et la production de vapeur.

Dans la seconde partie, nous allons entamés toutes les analyses de l'eau de mer pour enfin nous renseigner sur le rendement d'élimination des sels donc sur l'efficacité de la méthode de dessalement et de déminéralisation utilisée pour la fabrication de l'électricité.

1. Technologie de traitement de l'eau de mer au niveau de la centrale :

1.1.Prétraitement :

Il est généralement nécessaire pour les centrales électriques se trouvant en bord de la mer, ce qui est le cas pour la centrale thermique de Cap Djinet, une filtration qui est faite au niveau de la station de pompage par un ensemble de dégrilleurs et de tambours filtrants suivie par une injection de quelques ppm de chlore. Cette dernière peut être faite de façon continue ou intermittente selon les exploitants.

1.1.1. La prise d'eau :[39]

Elle a une profondeur d'environ 7m et se trouve à 900m de l'arrivée de l'eau à la station de pompage. Elle se fait par trois canaux en béton d'un diamètre de 2,7 m

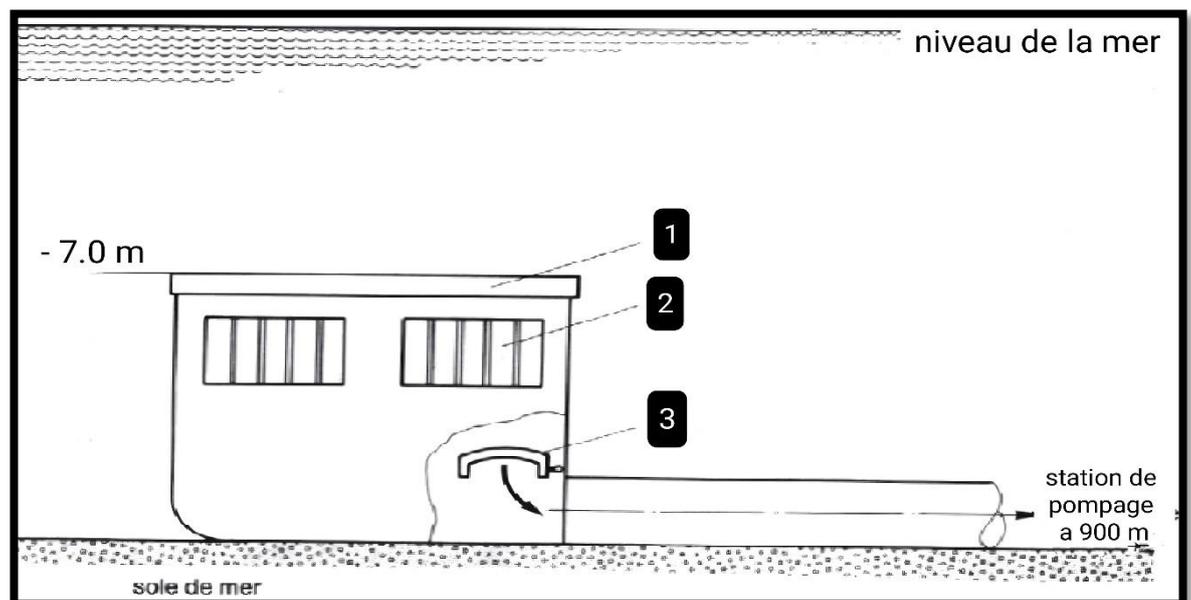


Figure 01 : Station de l'entrée de l'eau de mer

1.1.2. Filtration de l'eau de mer :

La filtration consiste à faire traverser l'eau dans un milieu poreux et perméable qui retient les particules solides (matière organique et sels), de dimensions supérieures à celles des pores du milieu.

Ce procédé sert à l'extraction des impuretés de l'eau de mer utilisée comme eau de circulation principale et au rinçage de détritux afin qu'ils puissent être transportés dans les paniers de récupération.[2]

Chaque tranche de la centrale est associée à une voie de filtration qui est équipée d'une grille avec dégrilleur, d'un circuit d'arrosage et d'appareils de mesure de niveau grille différentiel de l'eau [39]

a) Filtration primaire (dégrillage) :[39]

Une première filtration de l'eau de mer est effectuée par une installation composée d'une grille fixe et une dégrilleur entraîné électriquement. Cette grille sert à retenir les impuretés de l'eau de grandes tailles (supérieures à 40 mm).

Les matières retenues par la grille sont soulevées jusqu'au niveau d'évacuation de détrit. Le débit d'eau dans cette étape est 12 500 m³ /h.



Image 01: dégrilleur électriquement

b) Filtration secondaire (tamisage) :[39]

La filtration secondaire qui est finale se fait par des tambours filtrants, chaque tambour est constitué par une structure à rotation lente dans la quelle l'eau entre de chaque côté.

Les panneaux filtrants sont montés à la périphérie de la structure tournante et l'eau est refoulée vers l'extérieur depuis le centre de tambour à travers les mailles filtrantes.

Tandis que le filtre tourne, le détrit. adhèrent à l'intérieur des panneaux passe au dessus des paniers de récupération placés à l'intérieur du filtre. Lorsque les panneaux arrivent au dessus des paniers, ils passent au dessous des géoleurs d'eau situé à l'extérieur du filtre.



Image 02:tambours filtrants

1.1.3. La chloration :

Dès la prise d'eau de mer, il faut bloquer la prolifération des organismes vivants. Sinon, on devra faire face à toute une série d'incidents tels que la réduction des échanges thermiques et l'obstruction partielle ou même totale des conduites.

Le procédé le plus répandu consiste à injecter du chlore, réactif dont le stockage et la manipulation exigent des précautions strictes. Pour éliminer le danger lié au chlore, on peut le substituer par l'hypochlorite de sodium (eau de javel),[52]

a) Les différents points d'injection:[39]

Le système de distribution de l'hypochlorite de sodium est prévu pour un :

Dosage continu : environ 1,5 g/m³ d'eau de circulation. Ce dosage à lieu à la prise d'eau de mer et à la station de pompage.

Dosage de choc : environ 5 g/m³ d'eau de circulation pendant 15 minutes, toutes les trois heures de service. Ce dosage à lieu à la prise d'eau de mer et aux entrées des condenseurs.

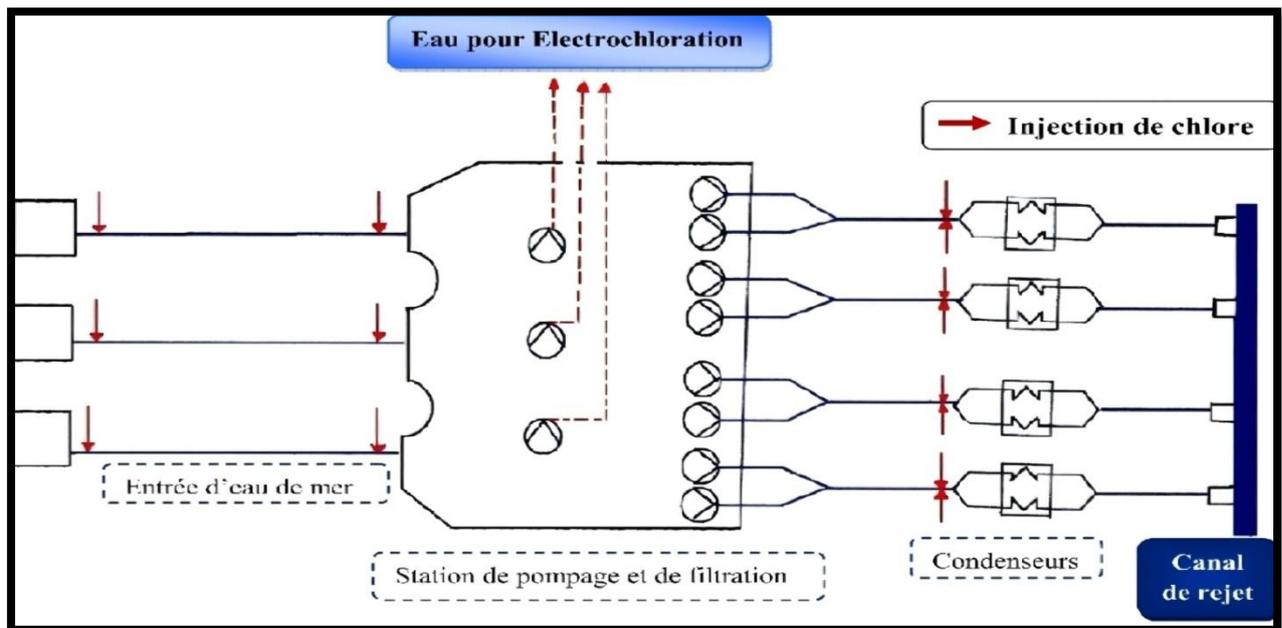


Figure 02: Les différents points d'injection de chlore au niveau de la centrale

1.2. Le traitement de dessalement : [38]

La pompe d'eau de mer refoule le liquide à travers les condenseurs en passant par les filtres. Une partie de l'eau de mer est dérivée avant d'entrer à la chambre d'eau du 18^{ème} étage d'évaporateur pour créer les vides et refroidir le système de recirculation de l'aspiration d'air.

L'eau réchauffée, provenant des étages de dissipation de chaleur 16, 17 et 18, sera retournée à la mer. D'abord une partie de l'eau de mer chaude sera dérivée à la sortie de l'étage 16 pour être amenée au procédé comme eau d'alimentation, elle remplace la saumure. Ensuite elle est dégazée dans le 18^{ème} étage d'évaporation par le vide se trouvant dans celui-ci, pour écouler ensuite dans la tuyauterie coté aspiration de la pompe de recirculation où elle sera mélangée par le réservoir de produits chimiques.

La saumure de recirculation est refoulée à travers le faisceau de tubes du condenseur des étages de récupération de la chaleur 1 à 15 de l'évaporateur, et réchauffée par la chaleur d'évaporation de la vapeur condensable de chaque étage. Du dernier condenseur d'évaporateur, la saumure coule vers le réchauffeur final, ou elle est portée à la température maximale prévue.

Le réchauffeur final sera chauffé par l'eau de la chaudière. La pompe de recirculation fait circuler l'eau chaude à travers un circuit fermé.

La saumure chaude de recirculation sera amenée au premier étage d'évaporation, la pression dans la première chambre de détente est un peu plus réduite que la pression de saturation qui correspond à la température de la saumure entrant, de manière qu'une partie de la saumure s'évapore.

La vapeur ascendante coule à travers un séparateur d'humidité et se condense finalement sur les parois des tubes du condenseur dans la partie supérieure de l'étage d'évaporation.

Au fond de l'étage, la saumure coule par des passages spéciaux vers la prochaine chambre de détente où la pression est encore plus réduite que la pression de saturation, qui correspond à la température de saumure ; par ce fait une partie de la saumure s'évapore de nouveau. Ce procédé se répète dans chaque

étage. L'évaporateur entraîne une baisse progressive de la température de saumure, alors que la concentration de la saumure de recirculation augmente.

Le distillat goutte des parois des tubes dans les cuves à distillat existant dans chaque étage, ensuite il coule d'un étage à l'autre par les orifices de passage, pour être finalement évacué au dernier étage par la pompe de distillat.

Un système de mesure de conductivité automatique a lieu après la pompe de distillat, tel que :

- Rejet de distillat. ⇒ Si la conductivité est supérieure à 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Stockage de distillat. ⇒ Si la conductivité est inférieure à 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Une partie de la saumure concentrée sera refoulée par la pompe de saumure du dernier étage au canal de saumure tandis que la partie principale de la saumure coule vers la pompe de recirculation. Les gaz non condensables, seront évacués par une pompe d'éjection de vapeur et par une pompe d'éjection d'eau.



Image03 : La station de Dessalement

1.2.1. Données techniques : [38]

Tableau n°1 : Caractéristiques techniques de l'installation de dessalement MSF.

Données techniques	
Production de distillat (m^3/h)	20,83 - 25,00
Impureté du distillat (mg/l)	Inferieur à 15
Température maximum de saumure ($^{\circ}\text{C}$)	83 - 91
Quantité d'eau de mer (m^3/h)	239 - 256
Salinité maximale de l'eau de mer (mg/l)	39400

Salinité maximale dans la saumure (mg/l)	65300
Débit de recirculation (m ³ /h)	239 - 256
Débit de saumure (m ³ /h)	31– 37
Débit d'eau d'alimentation (m ³ /h)	52– 62
Matières consommables	
Inhibiteur d'incrustation	BELGARD EVN
- Taux de dosage (mg/l)	- 3,8 - 5,8
- Consommation (kg/h)	- 0,2 - 0,36
Produit anti – mousse	BELITE M33
- Dosage saisonnier (mg/l)	- 0,1 - 1,0
- Consommation (g/l)	- 26
Mazout (kg/h)	202– 250
Gaz de chauffage (m ³ /h)	242 - 300 (15°C- 1,0 bar)

1.3.Traitement de déminéralisation :

Le distillat de l'installation de dessalement de l'eau de mer qui est stocké dans deux réservoirs de 2700 m³, est pompé à la station de déminéralisation pour être refoulé vers les deux filtres à lits mélangés.

1.3.1. Caractéristiques techniques des équipements :[49]

Tableau n°2 : Les Caractéristiques techniques des équipements de la station de déminéralisation sont:

Données de puissance	
Nombre de filtre à lits mélangés	2
Débit de fonctionnement pour chaque filtre à lit mélangé (m ³ /h)	40-45
La quantité d'eau entre régénération (m ³)	2400-2600
Dimension des filtres et capacités	
Diamètre (mm)	1800
Hauteur du cylindre (mm)	3000
Pression de service (bars)	5
Température de service (°C)	40
Surface du lit mélangé (m ²)	2,5
Vitesse du lit mélangé (m/h)	18
Résistance de lit mélangé (bars)	0,7 – 1,5
Durée de marche (heures)	60
Capacité de l'échangeur d'ions : (L)	
- Résine cationique	1150
- Résine anionique	2400
Consommation de produits chimiques par régénération : (L)	
- NaOH à 30 %	533,5
- HCl à 30 %	335

1.3.2. Les filtres à lits mélangés :

Le système de lit mélangé est le système le plus répandu, il permet d'atteindre la conductivité théorique de l'eau pure ($0.055 \mu\text{s}/\text{cm}$ à 25°C) et des fuites ioniques et en silice de l'ordre $1 \mu\text{g}/\text{l}$, par fois inférieures, [51]

Un filtre à lits mélangés comprend le mélange d'échangeurs cationiques fortement acides, et les échangeurs anioniques fortement basiques. En service normal, l'eau à déminéraliser s'écoule de haute en bas à travers la couche des résines.

L'eau déminéralisée est envoyée vers les deux réservoirs de stockage de 1500 m^3 pour chacun. On injecte dans la conduite d'arrivée des deux réservoirs de stockage de l'ammoniac NH_3 pour relever la valeur de pH de l'eau déminéralisée à plus de 9,5, [49]



Image 04 : Les filtres à lits mélangés

2. Production de l'électricité :[50]

Dans la centrale, l'eau peut être dans un état liquide comme elle peut être dans un état vapeur, et ceci dépend du circuit traversé (Voir la figure n°3)

La vapeur ayant traversé la turbine (corps HP, MP, BP) se trouve en fin de parcours dans le condenseur situé en dessous du corps BP, cette vapeur va se répandre sur les 15 000 tubes en titane disposés transversalement dans le condenseur à l'intérieur desquels circule l'eau de mer qui va servir de source froide pour la condensation de la vapeur. Cela produira le condensat principal qui va être

récupéré dans le puits du condenseur. Les pertes seront compensées par des appoints d'eau déminé qui se feront automatiquement à partir de la bache tampon trouvant à proximité du condenseur.

La pompe d'extraction va refouler ce condensat dans les réchauffeurs basse pression (BP1, BP2, BP3) et acheminera l'eau jusqu'à la bache alimentaire ou elle subira un dégazage physique et autre un réchauffage par mélange. L'eau dégazée et réchauffée à environ 150°C dans la bache alimentaire va être reprise par les pompes alimentaires pour alimenter la chaudière en passant à travers les réchauffeurs haute pression (HP1, HP2) qui élèveront sa température à 240°C avant son admission dans la chaudière (eau d'alimentation).

L'eau d'alimentation passera à travers la soupape alimentaire (vanne de réglage niveau ballon chaudière) pour entrer la chaudière au niveau de l'économiseur qui va encore l'élever en température à environ 300°C avant son entrée dans le ballon chaudière. L'eau d'alimentation parvenue au ballon va occuper la partie inférieure et son niveau sera réglé à 50%. Cette eau va ensuite descendre par les colonnes d'alimentation pour rejoindre le collecteur inférieur qui alimentera les tubes vaporisateurs (ou les tubes écrans) qui sont directement exposés aux flammes des huit bruleurs disposés sur une des quatre faces de foyer chaudière.

La vapeur saturé produite dans ces tubes va s'élever vers le collecteur supérieur par différence de densité entre l'eau et la vapeur (la vapeur étant plus légère que l'eau) pour être acheminée vers la partie supérieur du ballon chaudière. Cette vapeur (contenant des gouttelettes d'eau) devra être séchée avant son admission dans la turbine corps HP. Elle sortira donc du ballon et passera à travers les surchauffeurs N° 1, 2 et 3 pour être séchée et deviendra alors vapeur vive ou vapeur sèche. Ce dernier sortira de la chaudière avec une pression de 145,7 bars et une température de 540°C et elle se dirigera alors vers la turbine corps HP ou elle subira une détente pour en ressortir sous forme de vapeur moyenne pression et de température avoisinant les températures de vapeur saturée. Pour cette raison elle sera réintroduite dans la chaudière pour passer à travers les resurchauffeurs N°1 et 2 ou elle sera resurchauffée.

La vapeur resurchauffée ressortira de la chaudière avec une pression de 35,9 bars et une température de 535°C, se dirigera alors vers le corps MP de la turbine ou elle subira une autre détente pour en ressortir avec une basse pression et température et aller directement vers le corps BP de la turbine ou elle sera soumise à sa dernière détente avant de se retrouver dans le condenseur du groupe et le circuit reprend son cycle.

SCHEMA SYNOPTIQUE D'UNE TRANCHE THERMIQUE

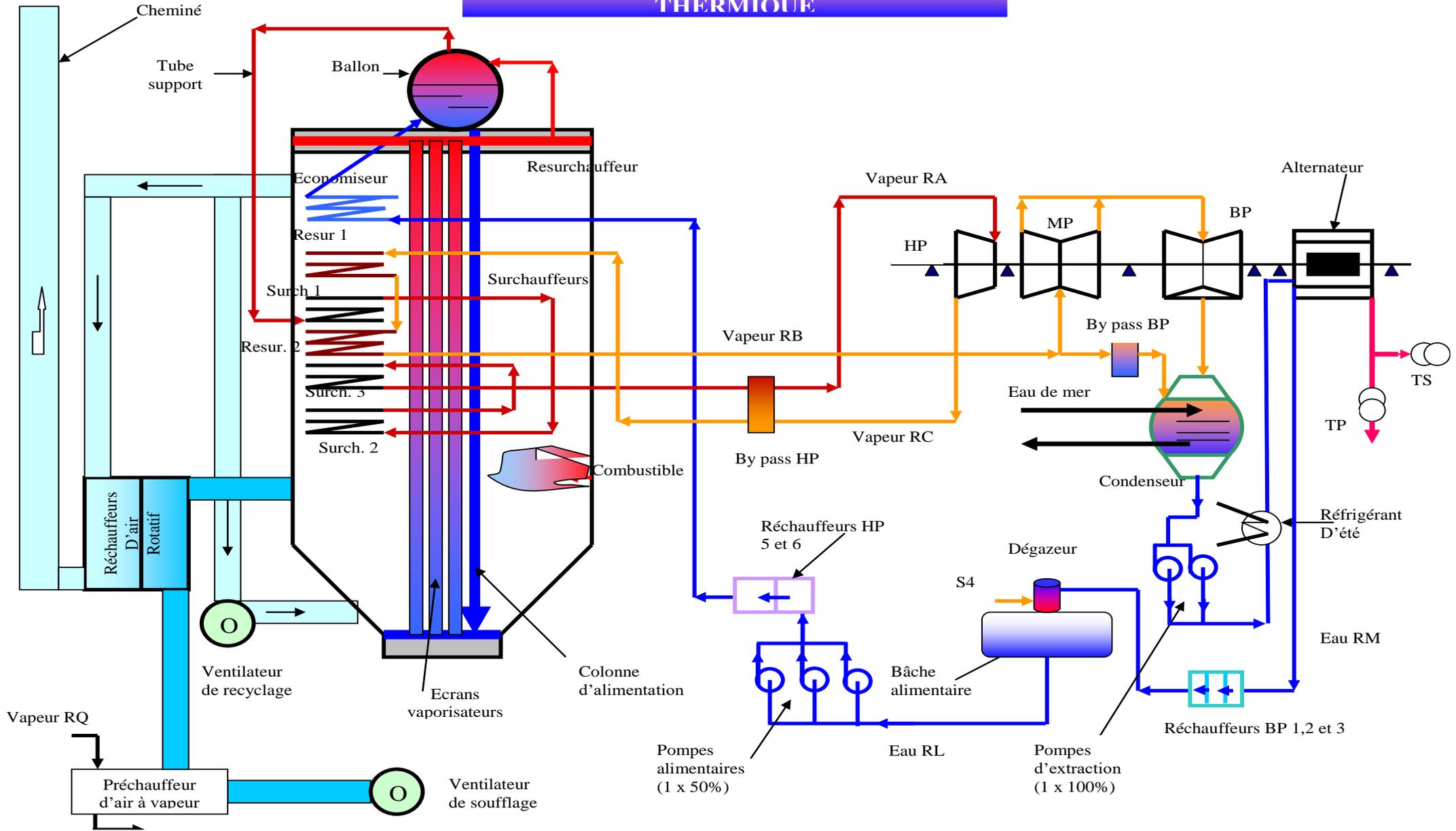


Figure 03: circuit de production de l'électricité

2.1.Paramètres chimiques de cycle : [50]

Tableau n°3: Paramètres chimiques de cycle eau-vapeur.

Système	paramètres	Valeur de service	Valeur limite d'alarme
Eau d'extraction	pH conductivité corrigée teneur en fer total teneur en O2 teneur en CO2	9,5 à 9,8 < 0,2 µs/cm < 0,02 ppm < 0,02 ppm < 0,003 ppm	< 9,2 ≥ 0,6 µs/cm < 0,02 ppm < 0,02 ppm < 0,003 ppm
Eau d'alimentation	pH conductivité corrigée teneur en fer total teneur en O2 teneur en Cu	9,5 à 9,8 < 0,2 µs/cm < 0,02 ppm < 0,02 ppm < 0,02 ppm	< 9,2 - 0,02 ppm 0,02 ppm 0,003 ppm
Eau de chaudière	pH conductivité corrigée silice teneur en fer total teneur en Cl	9,5 3 µs/cm 0,25 ppm 0,02 ppm -	< 9 3 µs/cm 0,25 ppm 0,02 ppm ≥ 1 mg/l
Vapeur saturée	pH conductivité corrigée silice teneur en fer total	9,5 < 0,2 µs/cm < 0,02 ppm < 0,02 ppm	< 9 0,2 µs/cm 0,02 ppm 0,02 ppm
Vapeur surchauffée et resurchauffée	pH conductivité corrigée silice	9,5 < 0,2 µs/cm < 0,02 ppm	< 9 0,2 µs/cm 0,02 ppm

3. Les analyses :

Après avoir décrit toutes les étapes de fonctionnement de traitement de l'eau de mer présentent dans la centrale thermique de Cap Djinet pour l'alimentation des auxiliaires Electriques, on s'est intéressé à la partie analyse. Pour cela, on a retenu trois points de prélèvements

- Le premier point concerne l'eau brute, le prélèvement a été effectuer sur l'eau de mer au niveau D'une vanne placée sur la conduite de pompage.
- Le deuxième prélèvement concerne l'eau dessalée, après passage à travers l'unité de Dessalement.
- Le troisième prélèvement a été effectué à la sortie de l'unité de déminéralisation.

3.1.Prélèvement des échantillons :

C'est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Globalement, il est donc nécessaire de mettre en place une organisation structurée, de développer une méthodologie adaptée à chaque cas, de procéder à un choix judicieux des points de prélèvements et d'utiliser le matériel convenable.

Quelque soit la méthode adoptée, les principes de bases suivants doivent être respectés :

- Localisation des différents points de prélèvement.
- Définir les quantités à prélever : le volume nécessaire pour une analyse complète est de 2 litres.

- Stabiliser l'échantillon en le conditionnant dans un récipient hermétique approprié. Les prélèvements seront effectués dans des flacons bien propres en polyéthylène ou en verre borosilicaté. Pour une meilleure conservation des échantillons, certains matériels sont à déconseiller comme les bouteilles en plastique ou en caoutchouc, leur réemploi poserait des problèmes de contamination résiduelle,[53]. Dans notre travail on a utilisé des flacons en polyéthylène qui sont lavés et séchés de la manière suivante :

- Lavage au détergent avec de l'eau plusieurs fois.
- Rinçage abondant avec de l'eau distillée, puis séchage.
- Avant remplissage, rinçage des flacons avec l'eau à analyser.
- Eviter toutes bulles d'air dans les flacons.

Les échantillons soigneusement étiquetés et conservés à 4°C seront transportés jusqu'au laboratoire dans un laps de temps ne dépassant pas 24 heures. Toutefois, un certain nombre d'analyses sont pratiqués sur place tel que la température et le pH, [53]

Etiqueter l'échantillon en précisant l'origine exacte et la date de prélèvement.

3.2.Mesure de pH :

3.2.1. Principe:

La différence de potentiel existant entre une électrode de verre et une électrode de référence (Calomel - KCl saturé) plongeant dans une même solution, est une fonction linéaire du pH de celle-ci. Le potentiel de l'électrode est lié à l'acidité des ions H^+ .

Appareil:

- pH mètre.

Réactifs:

- Tampons à différents pH (pH:9,7 et 4).

3.2.2. Mode opératoire:

a) Etalonnage de l'appareil:

- Allumer le pHmètre (bouton rouge).
- Brancher l'électrode de pH.
- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée.
- Vérifier l'électrode (niveau de la solution de KCl).
- Afficher la température ambiante.
- Prendre dans un petit bécher, la solution tampon pH=7.
- Régler l'agitation à faible vitesse.
- Tremper l'électrode de pH dans la solution tampon pH=7.
- Laisser stabiliser un moment.
- Enlever l'électrode et la rincer abondamment avec l'eau distillée.
- Réétalonner de la même manière avec les solutions tampon pH=9 et pH =4.
- Puis rincer abondamment l'électrode avec l'eau distillée.

b) Dosage de l'échantillon:

- Prendre environ **100ml** d'eau à analyser.

- Mettre sous faible agitation.
- Tremper l'électrode dans le bécher.
- Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation.
- Puis noter la valeur de pH.



image05 : pH mètre

3.3.Mesure de température:

3.3.1. Principe:

La température est mesurée grâce à un thermomètre à mercure.

3.3.2. Mode opératoire:

Le thermomètre est trempé dans le flacon juste après le prélèvement. Le résultat est donné directement en °C.

3.4.Mesure de la conductivité:

3.4.1. Principe:

Mesure de la conductance électrique d'une colonne d'eau délimitée par deux électrodes de platine (**Pt**) (ou couvertes de noir de platine) maintenues parallèles.

Appareil : Conductimètre.

3.4.2. Mode opératoire:

D'une façon générale, la verrerie rigoureusement propre et rincée, avant usage, avec de l'eau distillée est utilisée. Rincer plusieurs fois la cellule à conductivité, d'abord avec de l'eau distillée puis en la plongeant dans un récipient contenant de l'eau à examiner, faire la mesure dans un deuxième récipient en prenant soin que les électrodes de platine soient complètement immergées.

Agiter le liquide (barreau magnétique) afin que la concentration ionique entre les électrodes soit identique à celle du liquide ambiant. Cette agitation permet aussi d'éliminer les bulles d'air à la surface des électrodes. La

température du liquide ne devra en aucun cas varier pendant la mesure.

La mesure est obtenue directement en $\mu\text{S/cm}$.



Image 06 : Conductimètre

3.5. Mesure de la salinité:

Après avoir étalonné rigoureusement l'électrode de la salinité, la placer cette électrode dans l'eau à analyser.

La mesure peut s'effectuer en sélectionnant dans le menu "affichage numérique" en attendant que la valeur affichée se stabilise; le résultat est donné en (mg/l).

3.6. Mesure de la turbidité :

3.6.1. Définition:

Réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matière non dissoute.

3.6.2. Principe:

Pour tout échantillon d'eau, la mesure de la lumière diffusée et de la lumière transmise permet la détection de matières non dissoutes, absorbant mais diffusant mal, qui passeraient inaperçues par la seule mesure de la lumière diffusée.

Appareil:

- Turbidimètre.
- Cuvette d'évaluation de la transparence constituée d'une cuvette de verre incolore de 50mm, de diamètre.

3.6.3. Mode opératoire:

Etalonnage de l'appareil:

A l'aide des solutions d'étalonnage de formazine (**400NTU**), on prépare une solution fille à **40NTU** et on effectue la mesure.

Dosage de l'échantillon:

Remplir une cuvette de mesure propre avec l'échantillon à analyser bien homogénéisé et effectuer rapidement la mesure. Il est nécessaire de vérifier l'absence de bulle d'air avant la mesure.

La mesure est obtenue directement en **NTU**.

3.7.Détermination de titre hydrotimétrique TH :

3.7.1. Définition:

La dureté totale d'une eau ou titre hydrotimétrique **TH** est la somme des concentrations calcique et magnésienne.

3.7.2. Principe :

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à forme un complexe de type «chélate» par le sel disodique de l'acide éthylène diamine tétra acétique(EDTA), désigné sous le nom de« Complexon III ».Les dernières traces d'éléments libres à doser sont décelées par le virage d'un indicateur spécifique de la dureté totale, le Noir Eriochrome T (**NET**). La méthode permet de doser les ions calcium et magnésium.

Appareillage:

- Bécherde**250 ml**.
- Cylindre gradué de**100 ml**.
- Burette rapide.

Réactifs:

- Solution volumétrique de Complexon III « **Na₂H₂(EDTA). 2 H₂O** » à 0,01 M.
 - ♦ ComplexonIII 3,722 g.
 - ♦ Eau distillée... 1000 ml.
- Solution tampon pH=10.
- Indicateur Noir d'EriochromeT.

3.7.3. Mode opératoire :

On opère sur 100 ml d'eau à analyser en ajoutant **3 à 5 ml** de solution tampon de **pH = 10** et une pincée d'indicateur **NET**, on titre avec l'EDTA (**0,01 M**) jusqu'au virage du rouge foncé au bleu et on lit le volume **V** utilisé ; on répète 3 fois l'analyse et on calcule la moyenne.

Lorsqu'on emploie une solution de **0,01 M** de Complexon, **1 ml** utilisé correspondant à **1°fH** de dureté.

3.8.Détermination de titre hydrométrique calcique THCa²⁺ :

3.8.1. Principe :

Titration des ions calcium avec une solution aqueuse d'EDTA à pH compris entre **12** et **13**. Le murexide qui forme un complexe rouge avec le calcium est utilisé comme indicateur. Le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage.

Lors du titrage, l'EDTA réagit tout d'abord avec les ions calcium libre, puis avec les ions combinés avec l'indicateur qui vire alors de la couleur rouge à la couleur bleu-violet.

Appareillage:

- Bécherde **250 ml**.
- Cylindre gradué de **100 ml**.
- Burette rapide.

Réactifs:

- Solution volumétrique de Complexon III « $\text{Na}_2\text{H}_2(\text{EDTA}) \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ » à 0,01 M.
 - ♦ Complexon III 3,722 g.
 - ♦ Eau distillée... 1000 ml.
- Solution d'hydroxyde de sodium NaOH à 2N.
 - ♦ NaOH (pastilles).....80 g.
 - ♦ Eau distillée... 1000 ml.

Indicateurs colorés : Murexide (mélangé 1 : 100 avec NaCl).

3.8.2. Mode opératoire :

A l'aide d'un cylindre gradué, introduire 100 ml de l'échantillon à analyser dans un bécher de 250ml. Ajouter 2ml de la solution de NaOH et environ 0,2g de l'indicateur Murexide. Mélanger et doser immédiatement.

Ajouter la solution d'EDTA tout en continuant d'agiter. Verser lentement. Le virage est atteint lorsquela couleur ne doit plus changer avec l'ajout d'une goutte supplémentaire de la solution d'EDTA. Soit V le volume d'EDTA versé.

1 ml de Complexon III utilisé correspond à **4 mg/l** de Ca^{2+} ou **1°** de dureté calcique ou **0,2 méq/l**.

3.9. Détermination de titre hydrométrique magnésium $\text{TH}_{\text{Mg}^{2+}}$:

La différence entre la dureté totale et la dureté calcique donne directement la dureté magnésium.

$$\text{TH}_{\text{Mg}^{2+}} = \text{TH} - \text{TH}_{\text{Ca}^{2+}}$$

3.9.1. Détermination de l'alcalinité :

Définition:

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des hydrogénocarbonates HCO_3^- , carbonates CO_3^{2-} et hydroxydes OH^- .

- Le titre alcalimétrique (TA) mesure la teneur de l'eau en alcalis libres et en carbonates caustiques.
- Le titre alcalimétrique complet (TAC) mesure la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates.

3.9.2. Principe:

Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

Appareillage:

- Bécherde **250 ml**.
- Cylindre gradué de **100 ml**.
- Burette rapide.

Réactifs:

- Acide chlorhydrique ou sulfurique 0,1N.
- Solution alcoolique de phénolphtaléine à 0,5%.
 - ♦ Phénolphtaléine... 5 g.
 - ♦ Alcooléthylique... 500 ml.
 - ♦ Eau distillée... 500ml,
- Solution de méthylorange à 0,5%.
 - ♦ Méthylorange... 0,5g.
 - ♦ Eau distillée... 100ml.

3.9.3. Mode opératoire:

a) Détermination des carbonates (TA):

Pour un prélèvement de 100 ml d'eau à analyser dans un bécher, ajouter 2 gouttes de solution alcoolique de phénolphtaléine, une couleur rose doit alors se développer. Dans le cas contraire le TA est nul, ce qui se produit en général pour les eaux dont le pH est inférieur à 8,3.

Verser ensuite l'acide dans le bécher à l'aide d'une burette en agitant constamment et ceci jusqu'à décoloration complète de la solution (pH=8,3). Soit V le nombre de millilitres d'acide utilisés pour obtenir le virage.

b) Détermination du titre alcalimétrique complet (TAC):

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution de méthylorange et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'au virage du jaune au jaune orangé (pH = 4,3). S'assurer qu'une goutte d'acide en excès provoque le passage de la coloration du jaune orangé au rose orangé (pH = 4).

Soit V' le nombre de millilitres d'acide (0,1 N) versés depuis le début du dosage. Retrancher de ce volume 0,1 ml, quantité d'acide nécessaire pour le virage de l'indicateur.

3.9.4. Expression des résultats:

a)- Pour TA:

- V exprime le titre alcalimétrique en milliéquivalents par litre.
- 5V exprime le titre alcalimétrique en degrés français (en effet, 1°F correspond à 10mg de carbonate de calcium (CaCO₃) ou 0,2 meq/l)

b)- Pour TAC:

- (V'-0,1) exprime le titre alcalimétrique complet en milliéquivalent par litre.
- (V'-0,1).5 exprime le titre alcalimétrique complet en degrés français.

3.10. Détermination des HCO_3^- et CO_3^{2-} :

La connaissance du TA et du TAC permet le calcul des concentrations en:

- Hydroxydes OH^- .
- Bicarbonates HCO_3^- .
- Carbonates CO_3^{2-} .

Si le TA et le TAC sont égaux, toute l'alcalinité est due aux hydroxydes.

Si le TA est inférieur au TAC, des carbonates et des hydroxydes sont présents. Ceci veut dire que le TA est égal à tous les hydroxydes, plus la moitié des carbonates, et que le TAC est égal à tous les hydroxydes et tous les carbonates.

Par conséquent:

$$\begin{cases} \text{TA} = [\text{OH}^-] + \frac{1}{2} [\text{CO}_3^{2-}] \\ \text{TAC} = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \end{cases} \implies \begin{cases} [\text{OH}^-] = 2 \text{TA} - \text{TAC} \\ [\text{CO}_3^{2-}] = 2 (\text{TAC} - \text{TA}) \end{cases}$$

Si le TA est égal à la moitié du TAC, toute l'alcalinité est due aux carbonates.

Si le TA est égal à moins de la moitié du TAC, des carbonates et bicarbonates sont présents. Ceci veut dire que le TA est égal à la moitié de l'alcalinité due aux carbonates, et que le TAC est égal à l'alcalinité due aux bicarbonates, plus l'alcalinité due aux carbonates. Par conséquent:

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 2 \text{TA}$$

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

Tableau n°4 : Si le TA est nul, le TAC est dû aux bicarbonates seuls. En résumé:

Si	OH^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-
TA = TAC	TAC	0	0
TA > 1/2 TAC	2 TA - TAC	2 (TA - TAC)	0
TA = 1/2 TAC	0	TAC	0
TA < 1/2 TAC	0	2 TA	TAC - 2 TA
TA = 0	0	0	TAC

3.11. Détermination des chlorures :

3.11.1. Principe:

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

Appareillage:

- Erlenmeyer de 250ml.

- Cylindre gradué de 100ml.
- Burette.

Réactifs:

- Acide nitrique pur.
- Carbonate de calcium pur.
- Solution de chromate de potassium à **10%**.
- Solution de nitrate d'argent **N/10**.

3.11.2. Mode opératoire:

Introduire 100 ml d'eau à analyser, préalablement filtrée, dans un erlenmeyer de 250 ml. Ajouter 2 à 3 gouttes d'acide nitrique pur puis une pincée de carbonate de chaux et 3 gouttes de solution de chromate de potassium à 10 %.

Verser alors au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3 minutes. Soit **V** le nombre de millilitres de nitrate d'argent à N/10 utilisés.

Pour une prise d'essai de 100ml :

- **$V \times 10 \times 3,35$** donne la teneur en chlorures, exprimée en milligrammes de **Cl⁻** par litre d'eau.

3.12. Détermination de sodium et de potassium :

3.12.1. Principe:

Le photomètre de la flamme est un des procédés les plus rapides et sensibles connus aujourd'hui pour le dosage des éléments alcalino-terreux.

Les éléments à analyse (sodium, potassium lithium...etc.) sont généralement sous forme de sels. L'analyse se fait en partant de leurs solutions.

Appareil:

- Photomètre à flamme.

Réactifs:

- Solution fille de sodium (**Na⁺**) à **10mg/l**.
 - ♦ Solution mère de **NaCl** à 1g/1 1 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 100 ml.
- Solution fille de potassium (**K⁺**) à **10mg/l**.
 - ♦ Solution mère de **KCl** à 1g/1 1 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 100ml.

3.12.2. Mode opératoire:

Il faut le suivre étape par étape:

- Allumer l'appareil à l'aide du bouton vert.
- Allumer la pompe.

- Ouvrir le robinet de la bouteille du gaz propane.
- Allumer la flamme.
- Aspirer de l'eau distillée remplie dans une cuvette.
- Appuyer sur la touche KONTROLL.
- Appuyer sur la touche Null-Zéro et attendre 5 à 10 minutes.
- Appuyer une 2^{ème} fois sur la même touche (Null-Zéro) pour qu'elle allume.
- Retirer la cuvette d'eau distillée et la remplacer par une autre cuvette remplie par une solution étalon de (Na⁺) ou de (K⁺) à 10 mg/l.
- Appuyer sur la touche STANDARD.
- Attendre qu'elle allume.
- Appuyer une 2^{ème} fois sur la même touche et attendre qu'elle allume.
- Ensuite, appuyer sur la touche Analyse (il faut que la lecture donne une valeur de 10).
- A la fin pas de saux échantillons à analyser et appuyer seulement sur la touche Analyse (3 essais pour chaque échantillon).

A la fin du dosage et par mesure de la sécurité, il faut toujours fermer la bouteille de gaz propane en premier lieu ensuite l'appareil et la pompe.

3.12.3. Expression des résultats:

Le résultat est donné directement en mg/l.

Rq : Avant de doser le sodium (Na⁺), il faut toujours vérifier les valeurs de la conductivité car cette dernière est proportionnelle à la dilution, c'est-à-dire plus que la conductivité est grande plus que la dilution du Na⁺ est grande et vice versa. Alors pour le cas de K⁺, on ne fait pas la dilution sauf si la conductivité est grande.

3.13. Détermination des sulfates :

3.13.1. Principe:

Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum qui est stabilisé à l'aide d'une solution de Tween 20. Les suspensions homogènes sont mesurées au spectrophotomètre à $\lambda = 650 \text{ nm}$.

Appareil:

- Spectrophotomètre.

Réactifs:

- Solution étalon de sulfates de sodium à 150 mg/l de SO²⁻:
 - ♦ Solution de sodium anhydre Na₂SO₄..... 0,221 g.
 - ♦ Eau distillée..... 1000 ml.
- Acide chlorhydrique à 10%.
- Chlorure de baryum stabilisé:
 - ♦ Chlorure de baryum... 10 g.

- ♦ Solution de Tween 20 à 25%... 20 ml.
- ♦ Eau distillée... 80 ml.

3.13.2. Mode opératoire:

- Dans les fioles, introduire 39 ml de l'échantillon à analyser.
- Ajouter 1 ml d'acide chlorhydrique à 10%.
- Ajouter 5 ml de la solution de chlorure de baryum stabilisé.
- Agiter et laisser reposer pendant 15 mn.
- Agiter à nouveau et passer au spectrophotomètre à la longueur d'onde $\lambda=650\text{nm}$.

Faire une gamme d'étalon de la solution mère de sulfates [0-11] ml.

3.13.3. Expression des résultats:

Pour une prise d'essai de 39 ml, la courbe donne directement la teneur en sulfates exprimée en milligrammes de SO_4^{2-} par litre d'eau.

3.14. Détermination des phosphates :

3.14.1. Principe:

En milieu acide et en présence du molybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue susceptible d'un dosage spectrophotométrique.

Le développement de la coloration est accéléré par l'utilisation d'un catalyseur, le tartrate double d'antimoine et de potassium. La mesure de l'absorbance de ce complexe se fait à l'un des deux maxima d'adsorption (une vers $\lambda=700\text{nm}$, l'autre plus importante à $\lambda=880\text{ nm}$).

Appareil:

- Spectrophotomètre.

Réactifs:

- Acide ascorbique à 10 g/l.
 - ♦ Acide ascorbique... 10 g.
 - ♦ Eau distillée... 100 ml.
- Solution mère étalon à 50 mg/l de PO_4^{2-} .
 - ♦ KH_2PO_4 après séchage à 105°C... 0,2197 g.
 - ♦ Eau distillée... 800 ml.
 - ♦ Acide sulfurique à 7,5 mol/l... 10 ml.
 - ♦ Eau distillée... 190 ml.
- Solution fille étalon à 1 mg/l.
 - ♦ Solution mère... 20 ml.
 - ♦ Eau distillée... 980 ml.

- Réactif mélangé:

(Réactif1+Réactif 3) + Réactif2 =500 ml(stable2mois).

Réactif1:

- ♦ Heptamolybdate d’ammonium... 13 g.
- ♦ Eau distillée... 100 ml.

Réactif2:Tartrate de potassium et d’antimoine

- ♦ Hemihydraté... 0,35 g.
- ♦ Eau distillée... 100ml.

Réactif3:

- ♦ Acide sulfurique 9mole/l... 150ml.
- ♦ Eau distillée... 150ml.

3.14.2. Mode opératoire:

Introduire dans une série des fioles jaugées de 25ml:

Tableau n°5 :

Numéro des fioles	T	1	2	3	4	5
Solution étalon de phosphore à 1mg/l(ml)	00	01	05	10	15	20
Eau distillée	20	19	15	10	05	00
Correspondance de mg/l de phosphore	00	0,05	0,25	0,50	0,75	1

Introduire dans chaque fiole 1 ml de solution d’acide ascorbique, agiter puis ajouter 4 ml de réactif combinée, mélanger soigneusement, compléter éventuellement le volume à 25 ml, attendre 30min pour la stabilisation de la coloration, et effectuer les mesures au spectrophotomètre à la longueur d’onde de 700 nm, et on construit la courbe d’étalonnage.

Dosage de l’échantillon:

Dans un Erlenmeyer introduire :

- 40 ml d’eau à analyser.
- 1 ml d’acide ascorbique
- Ajouter 2ml du réactif mélangé
- Laisser au repos pendant 10 minutes
- Effectuer les mesures au spectrophotomètre à la longueur d’onde de 700nm.

3.14.3. Expression des résultats:

Le résultat est donné directement en mg/l.

3.15. Détermination des nitrites :

3.15.1. Principe:

Les ions nitrites réagissent en milieu acide (**pH= 4,9**) avec le réactif amino – 4 benzène sulfonamide ($\text{NH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_2\text{NH}_2$) en présence d'acide ortho phosphorique pour former un sel diazoïque donnant un complexe de coloration rose avec le dichlorhydrate de N-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane ($\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{Cl}_2\text{N}_2$) qui est dosé par spectrométrie à la longueur d'onde $\lambda = 540\text{nm}$.

Appareil:

- Spectrophotomètre.

Réactifs:

- Acide orthophosphorique H_3PO_4 (d=1,7).
- Solution d'acide phosphorique (utilisée si l'échantillon est coloré).
 - ♦ Acide phosphorique (**80%**)..... 25 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 150ml.
 - ♦ Après refroidissement à la température ambiante, on complète avec l'eau distillée jusqu'à 250ml.
 - ♦ Conserver cette solution dans un flacon en verre brun. Elle est stable pendant 6 mois.
- Réactif coloré (réactif dangereux).
 - ♦ Amino-4benzènesulfonamide 20g.
 - ♦ Mélange H_3PO_4 (d=1,7) 50 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 250ml.
 - ♦ Dichlorhydrate de N-(naphtyl-1) diamino 1,2 éthane... 1g.
 - ♦ Eau distillée..... 500ml.
 - ♦ Conserver cette solution dans un flacon en verre brune. Elle est stable pendant 1 mois, si elle est conservée entre **2 et 5°C**.
- Solution mère étalon en d'azote nitreux (NO_2^-) à **100mg/l**.
 - ♦ Nitrites de sodium (NaNO_2)..... 0,492g.
 - ♦ Sécher à **150°C** pendant 2 heures.
 - ♦ Eau distillée..... 1000 ml.
 - ♦ Conserver cette solution dans un flacon en verre brun. elle est stable pendant 1 mois si elle est conservée entre **2 et 5°C**.
- Solution fille étalon d'azote nitreux (NO_2^-) à **1mg/l** (préparer cette solution chaque jour avant emploi).
 - ♦ Solution mère..... 1 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 100 ml.

- Solution de nettoyage (toute la verrerie doit être soigneusement lavée avec une solution d'acide chlorhydrique (d= 1,12mg/1, à 25%) et rincée abondamment à l'eau distillée).

3.15.2. Mode opératoire:

Etablissement de la courbe d'étalonnage:

Dans une série des fioles jaugées de 50 ml et numérotées, introduire successivement:

Tableau n° 6 :

Numéro de fiole	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Solution étalon fille à 1mg/1 (ml)	0	0,4	0,8	1,2	2	4	6	8	10
Eau distillée (ml)	40	39,6	39,2	38,8	38	36	34	32	30
Réactif coloré (ml)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Correspondance en mg/1 D'azoténitieux	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25

Effectuer les mesures au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 540nm, et construire la courbe d'étalonnage.

Dosage de l'échantillon:

Dans un Erlenmeyer introduire :

- 40 ml d'eau a analysée.
- Ajouter 1ml du réactif coloré.
- Homogénéiser immédiatement en faisant tourbillonner et compléter à 50ml. Le pH doit être égale **1,9**.
- Laisser reposer 20mn.
- Effectuer les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde de $\lambda=540\text{nm}$.

3.15.3. Expression des résultats:

Expression donnée la teneur en azoténitieux **N-NO₂** exprimée en **mg/1**. Pour obtenir la teneur en nitrite **NO₂**, multiplier ce résultat par **3,29**.

3.16. Détermination des nitrates :

3.16.1. Principe:

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosoulate de couleur jaune susceptible d'un dosage colorimétrique.

Appareil:

Spectrophotomètre.

Réactifs:

- Solution de salicylate de sodium à **0,5g** dans 100ml.
- Solution d'hydroxyde de sodium **30g** dans 50ml.
- Acide sulfurique concentré H₂SO₄.
- Tartrate double de sodium et de potassium:
 - ♦ Hydroxyde de sodium NaOH..... 80 g.
 - ♦ Tartrate de sodium et de potassium..... 12 g.
 - ♦ Eau distillée.....200ml.
 - ♦ Laisser refroidir avant de compléter à 200ml, cette solution doit être conservé dans un flacon de polyéthylène.
- Solution mère d'azote d'originenitrique à **100mg/1**.
 - ♦ Nitrate de potassiumanhydre..... 0, 722 g.
 - ♦ Eau distillée..... 1000ml.
 - ♦ Chloroforme.....1 ml.
- Solution fille d'azote d'origine nitrique à **5mg/1**.
 - ♦ Solution mère..... 50 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 1000 ml.

3.16.2. Mode opératoire:

Etablissement de la courbe d'étalonnage:

Tableau n°7

Dans une série de capsule de 60ml, introduire successivement:

N° de capsule	1	2	3	4	5
Solution etalon 5mg/1(ml)	0	1	2	5	10
Eau distillée (ml)	10	9	8	5	0
Solution de salicylate de sodium(ml)	1	1	1	1	1
Correspondant en mg/1	00	0,5	1	2,5	5

Effectuer les mesures au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 415 nm, et construire la courbe d'étalonnage.

Dosage de l'échantillon:

Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser. Dans une capsule de 60 ml, ajouter 2 à 3 gouttes de NaOH à 30%. Ensuite 1 ml de salicylate de sodium. Evaporer à sec au bain marie ou dans une étuve à 75 – 88 °C (ne pas surchauffer ni chauffer très longtemps). Laisser refroidir à température ambiante, puis reprendre le résidu pour 2 ml de H₂SO₄.

Ajouter successivement 15 ml d'eau distillée. Ajouter 15 ml de tartrate double (qui développe la couleur jaune) puis passer au spectrophotomètre. Effectuer la lecture des absorbances à la longueur d'onde de $\lambda=415$ nm.

3.16.3. Expression des résultats:

Le résultat est donné directement en mg/l.

3.17. Détermination du fer :

Appareil:

- Spectrophotomètre.
- Cuve de 10 mm.

Réactifs:

- **Réactif A:** Dans une fiole de 100 ml mettre :
 - ♦ Acétate d'ammonium..... 40 g.
 - ♦ Acide acétique..... 50 ml.
 - ♦ Eau distillée..... 50 ml.
- **Réactif B:** Dans une fiole de 100 ml mettre:
 - ♦ Chlorure d'hydroxyde ammonium..... 20 g.
 - ♦ Eau distillée..... 100 ml.
- **Réactif C:** Dans une fiole de 100 ml mettre :
 - ♦ Chlorure de phénantroline..... 20 g.
 - ♦ Eau distillée..... 100 ml.
- **Réactif D:** Acide chlorhydrique à 25%.

3.17.1. Mode opératoire:

Dans un erlenmeyer de 100 ml mettre :

- 20 ml d'eau à analyser.
- 0,1 ml d'acide chlorhydrique HCl à 25%.
- 2 ml de réactif A.
- 1 ml de réactif B.
- 2 ml de réactif C.

Mélanger et laisser 15 minutes puis passer au spectrophotomètre à la longueur d'onde de $\lambda=500\text{nm}$ et un facteur de **2,00**. Pour l'échantillon témoin: 20 ml d'eau déminéralisée+les réactifs.

3.17.2. Expression des résultats:

Le résultat est donné directement en mg/l.

3.18. Détermination du cuivre :

Appareil:

- Spectrophotomètre.
- Cuve de 10 mm.

Réactifs:

- **Réactif A:** Dans une fiole de 100 ml mettre :
 - ♦ Acide ascorbique..... 20 g.
 - ♦ Eau distillé... 100 ml.
- **Réactif B:** Ammoniaque 10%.
- **Réactif C:** Dans une fiole de 100 ml mettre :
 - ♦ Chlorure d'ammonium..... 20 g.
 - ♦ Eau distillé... 100 ml.
- **Réactif D:** Chloroforme.
- **Réactif E:** Dans une fiole de 100 ml mettre :
 - ♦ Diethyl-dithiocarbanat de sodium..... 1 g.
 - ♦ Eau distillé... 100 ml.

3.18.1. Mode opératoire:

Dans une ampoule à décanter mettre :

- 100 ml d'eau à analyser.
- 1 ml de réactif A.
- 2 ml de réactif B.
- 0,5 ml de réactif C.
- 10 ml de réactif D.

Agiter pendant 5 minutes et jeter la phase organique. Ajouter ensuite 1 ml de réactif E et 10 ml de réactif D, agiter pendant 5 minutes et filtrer la phase organique et passer au spectrophotomètre à la longueur d'onde de $\lambda=435\text{nm}$ et un facteur de **1,33**. Pour l'échantillon témoin: réactif D.

3.18.2. Expression des résultats:

Le résultat est donné directement en mg/l.

3.19. Détermination de la silice :

Appareil:

- Spectrophotomètre.
- Cuve de 10 mm.

Réactifs:

- **Réactif A:** Dans une fiole de 250ml mettre :
 - ♦ Molybdate d'ammonium.....6,75g.
 - ♦ Acide sulfurique pur... 13 ml.
 - ♦ Eau distillée.....237 ml.
- **Réactif B:** Dans une fiole de 250ml mettre:
 - ♦ Acide oscalique (H₂C₂O₄).....25 g.
 - ♦ Eau distillée..... 100 ml.
- **Réactif C:**Dans une fiole de 250ml mettre :
 - ♦ Sulfate de ferammoniacal... 3 g.
 - ♦ Acide sulfuriquepur... 3 ml.
 - ♦ Eau distillée.....247ml.

3.19.1. Mode opératoire:

Dans une éprouvette en polystyrène mettre:

- 25 ml d'eau à analyser.
- 1ml de réactif A, attendre 10 minutes.
- 1 ml de réactif B, attendre 2 minutes.
- 1 ml de réactif C, attendre 2 minutes.

Passer au spectrophotomètre à la longueur d'onde de $\lambda=800\text{nm}$ et un facteur de **3,50**. Pour l'échantillon témoin: 25 ml d'eau déminéralisée + les réactifs.

3.19.2. Expression des résultats:

Le résultat est donné directement en mg/l.

Résultats et discussion des analyses

1. Les analyses physico-chimiques des différents échantillons :

Les analyses dues à l'évaluation de l'efficacité de traitement :

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement des eaux adaptées pour la centrale thermique, il est nécessaire de suivre l'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'eau durant le traitement.

a) Les résultats :

Le tableau n° 8 présente les caractéristiques de :

- L'eau de mer (eau brute).
- L'eau dessalée (distillat).
- L'eau déminéralisée.

Tableau n°8 : Les caractéristiques de l'eau de mer, l'eau dessalée et l'eau déminéralisée.

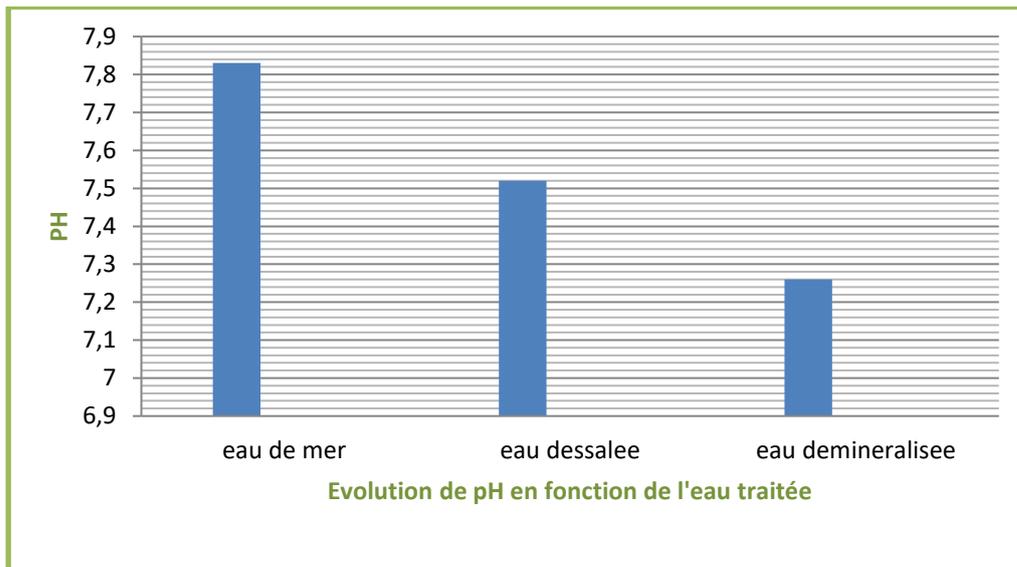
Paramètres d'analyses	Unités	Eau de mer				Eau dessalée				Eau déminéralisée			
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
PH	-	7,85	7,81	7,83	7,83	7,76	7,41	7,40	7,52	7,34	7,20	7,26	7,26
Température	°C	22,72	22,70	22,72	22,71	26,42	27,26	27,47	27,05	23,24	22,92	23,52	23,22
Conductivité	µs/cm	54 500	55 900	55 100	55166,66	12,14	10,24	12,06	11,48	0,07	0,05	0,04	0,053
Salinité	mg/l	38750,41	39825,30	38812,44	39129,38	14,93	13,92	15,11	14,65	0,09	0,06	0,06	0,07
Turbidité	NTU	0,336	0,365	0,315	0,338	0,435	0,406	0,439	0,426	0,285	0,322	0,311	0,306
TH	°F	730	780	750	753,33	0,8	0,9	0,95	0,88	00	00	00	00
TH _{Ca2+}	mg/l	420,84	480,96	460,92	454,24	1,002	0,75	0,98	0,91	00	00	00	00
TH _{Mg2+}	mg/l	1550,16	1625,04	1564,08	1579,75	1,158	1,680	1,585	1,47	00	00	00	00
TA	°F	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
TAC	°F	13,5	12	13	12,83	1,00	0,75	0,90	0,88	00	00	00	00
CO ₃ ²⁻	mg/l	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
HCO ₃ ⁻	mg/l	164,7	146,4	158,6	156,56	12,20	9,15	10,98	10,77	00	00	00	00
Chlorure(Cl ⁻)	mg/l	19 800	21 600	20 400	20 600	9,20	8,70	8,90	8,93	00	00	00	00
Sodium(Na ⁺)	mg/l	12285	12051	11928	12088	2,83	2,47	2,20	2,50	00	00	00	00
Potassium(K ⁺)	mg/l	421	425	416	420,66	0,32	0,27	0,24	0,27	00	00	00	00
Sulfate(SO ₄ ²⁻)	mg/l	3190	3250	3060	3166,66	3,08	2,57	2,68	2,76	00	00	00	00
Phosphate (PO ₄ ³⁻)	mg/l	0,41	0,47	0,40	0,42	0,23	0,20	0,21	0,21	00	00	00	00
Nitrite(NO ₂ ⁻)	mg/l	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Nitrate(NO ₃ ⁻)	mg/l	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Fer(Fe ³⁺)	mg/l	0,056	-	-	0,056	0,018	-	-	0,018	0,0016	-	-	0,0016
Cuivre(Cu ²⁺)	mg/l	0,003	-	-	0,003	0,045	-	-	0,045	0,003	-	-	0,003
Silice(SiO ₂ ⁻)	mg/l	0,16	0,14	0,17	0,15	0,24	0,21	0,21	0,022	0,002	0,002	0,002	0,002

2. Interprétation des résultats :

Pour une analyse complète des résultats indiqués dans le tableau précédent et pour pouvoir évaluer la qualité du traitement, nous avons utilisé un histogramme qui détermine les différents paramètres des différentes propriétés de l'eau analysée.

Le pH :

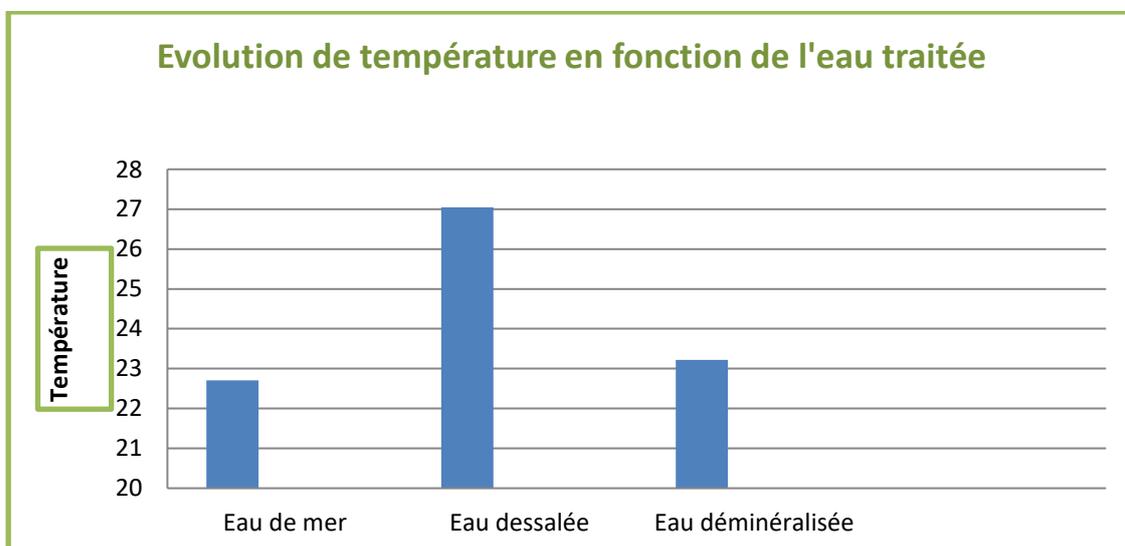
La figure n° 4 représente l'évolution du pH en fonction de l'eau traitée.



Le pH est un élément important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau. D'après les résultats, nous voyons que le pH est neutre et égal aux trois propriétés de l'eau. On peut donc dire que le processus de dilution et de différenciation n'a aucun effet sur le pH.

température :

La figure n°5 donne l'évolution de la température durant le traitement.

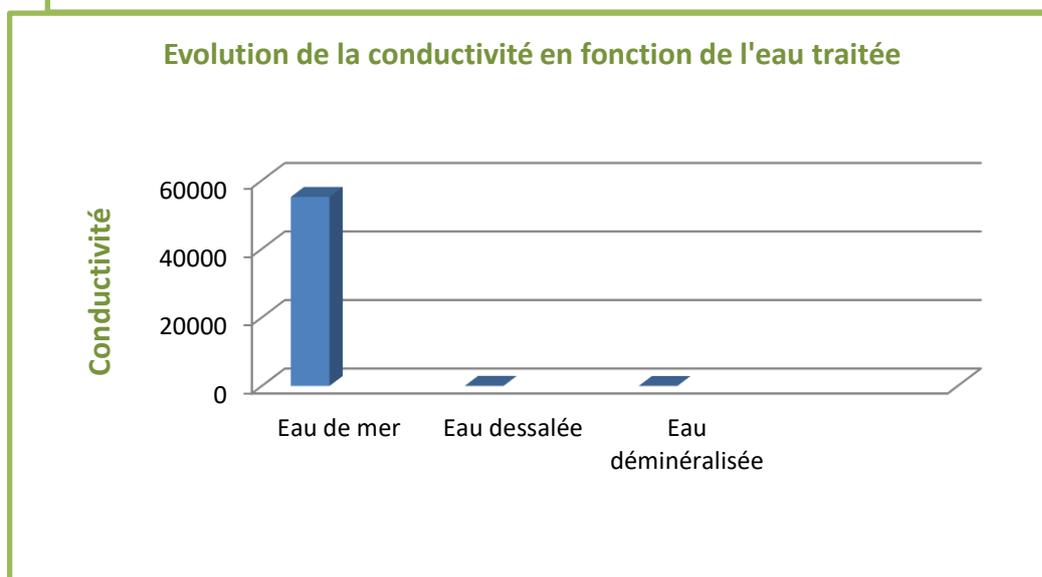
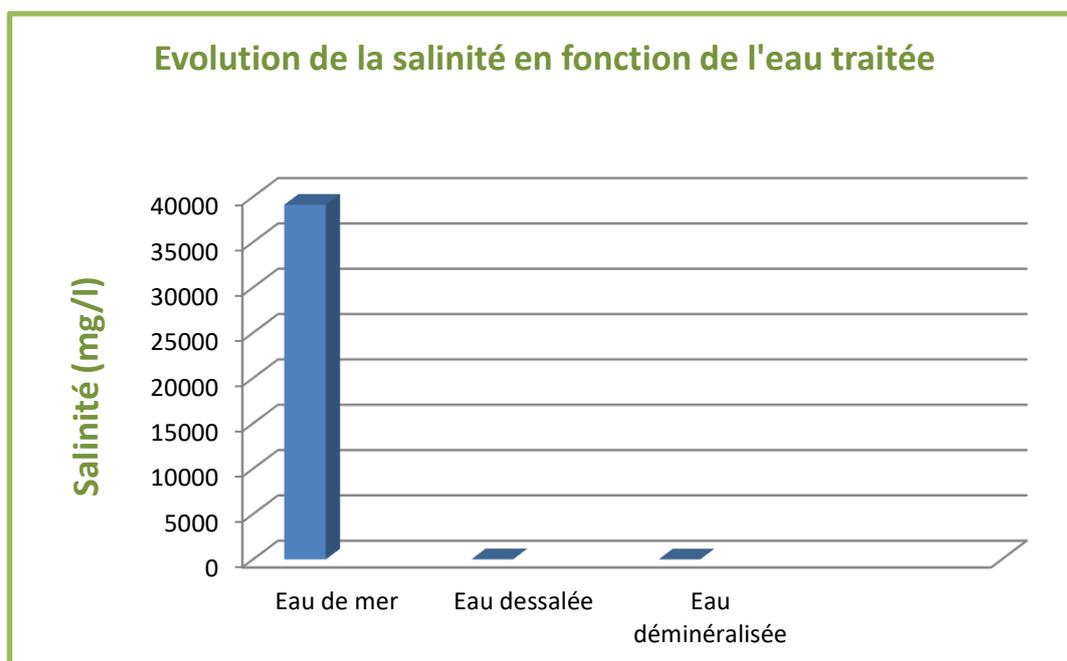


D'après les résultats obtenus à partir des trois caractéristiques de l'eau, on constate peu de différence entre la température de l'eau de mer et celle de l'eau déminéralisé.

Or ,l'élévation de la température de l'eau dessalée jusqu'à **27 °C** revient au procédé de distillation lui-même qui repose sur le principe de l'évaporation .L'augmentation s'accompagne d'un changement de densité, qui diminue avec l'augmentation de la température, d'une réduction de la viscosité et d'une augmentation de la tension de vapeur saturante à la surface (évaporation). En générale, la température n'a pas un effet néfaste sur la qualité de l'eau produite.

La conductivité et la salinité:

La figure n°6 et n°7 représente respectivement l'évolution de la conductivité et de la salinité en fonction de l'eau traitée.



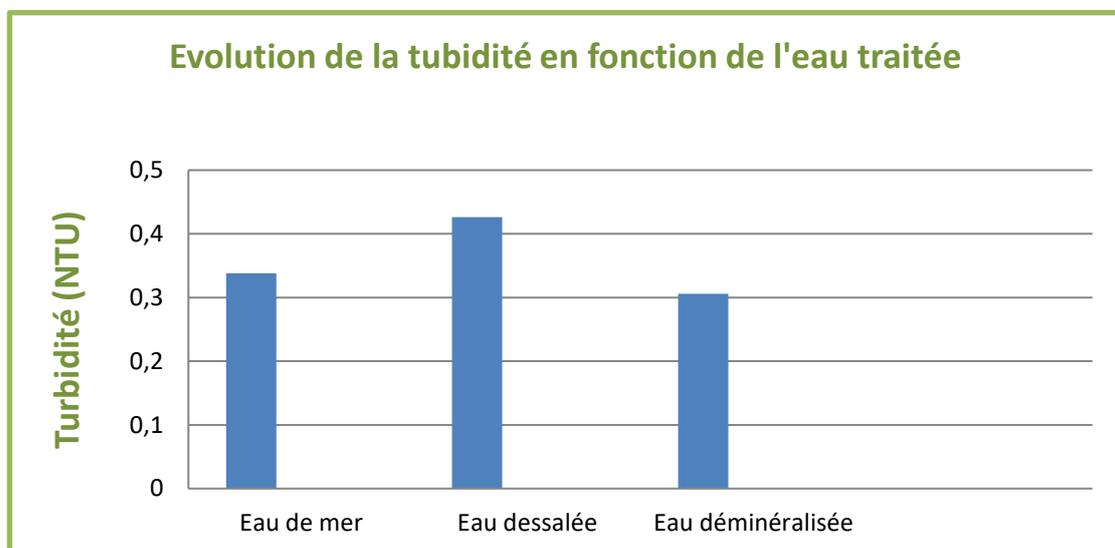
La conductivité électrique est proportionnelle à la salinité d'une eau.

Sur la base des résultats obtenus pour les trois qualités d'eau, on remarque que la conductivité de l'eau de mer est très élevée, elle varie entre **55** et **56 ms/cm**. Après la distillation, nous constatons une forte diminution, il ne reste que **11 $\mu\text{s/cm}$** dans le distillat. Enfin, nous obtenons une conductivité résiduelle de **0,05 $\mu\text{s/cm}$** par traitement sur lit mélangé.

On peut donc dire que ces deux méthodes sont efficaces et très appropriées pour une réduction conséquente de la conductivité.

La turbidité:

La figure n°8 donne l'évolution de la turbidité durant le traitement.

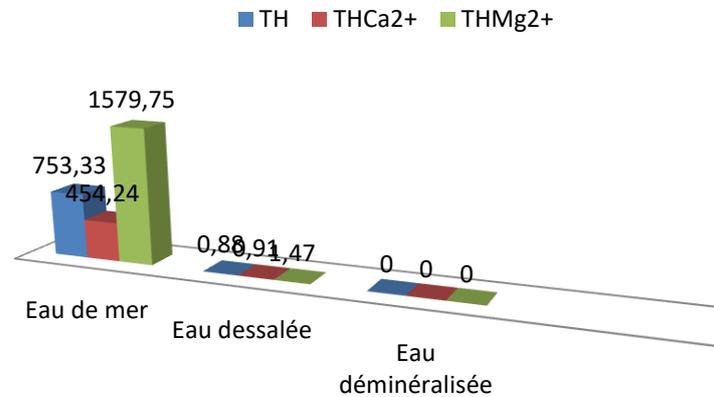


D'après les résultats, nous avons constaté que la turbidité est presque identique pour les trois qualités d'eau traitée. Elle varie entre 0,4 et 0,3 NTU c.-à-d elle est négligeable. Par conséquent, nous pouvons affirmer l'absence de matières en suspension.

La dureté totale TH :

La figure n° 9 représente l'évolution de la dureté totale **TH**, **TH Ca²⁺** et **TH Mg²⁺** en fonction de l'eau traitée.

Evolution de la dureté totale en fonction de l'eau traitée



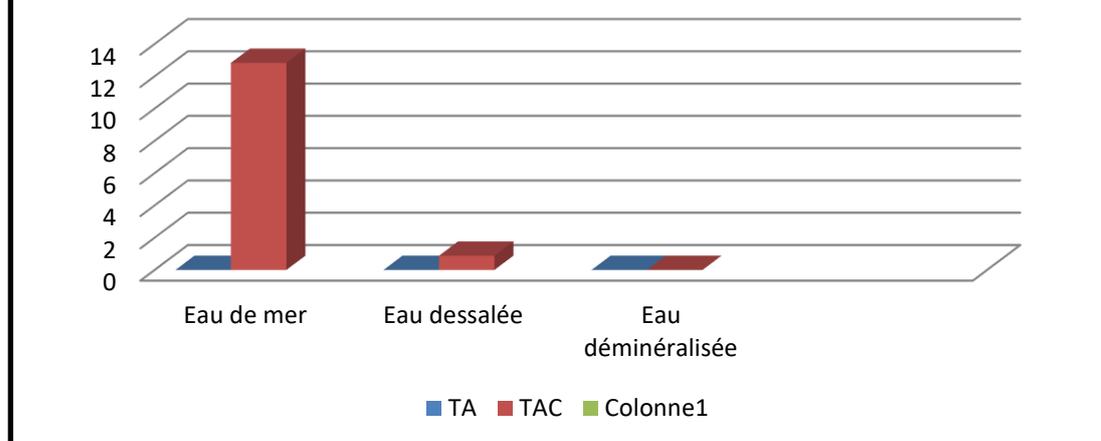
La dureté de l'eau est la combinaison du Ca²⁺ et du Mg²⁺ des métaux alcalino-terreux. La concentration de Mg²⁺ dans l'eau de mer est trois fois supérieure à celle de Ca²⁺.

L'eau brute a une valeur TH élevée de 750°f, ce qui correspond à une eau dure. Après la distillation, nous avons constaté que la majeure partie de la dureté est éliminée, le reste est fixé par le lit mélangé qui permet d'avoir un TH nul.

Le titre alcalimétrique TA et TAC:

La figure n°10 représente l'évolution du TA et TAC en fonction de l'eau traitée.

Evolutio de TA et TAC en fonction de l'eau traité



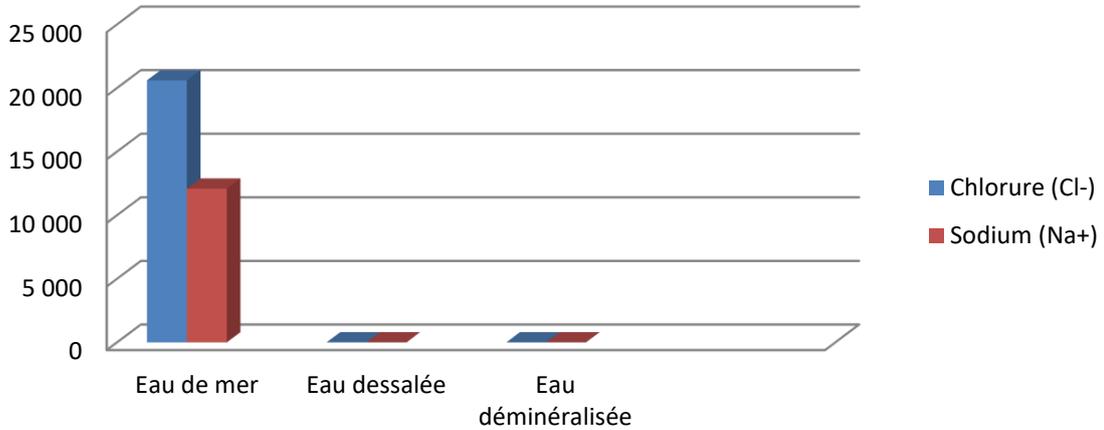
Le titre **TA** étant nul, la concentration en ion hydroxy des(OH^-) et en carbonate (CO_3^{2-})est pratiquement négligeable, l'alcalinité est donc constituée par les hydrogénocarbonates HCO_3^- .

La valeur de **TAC** obtenue pour l'eau brute est de 12,83°F. L'**alcalinité** est presque éliminée totalement par le procédé de distillation. Une valeur résiduelle de 0,88°F de TAC est constatée c'est-à-dire de HCO_3^- qui est ensuite éliminée totalement par le lit mélangé. Ce dernier permet d'avoir un TAC conforme aux normes.

Les chlorures et le sodium:

La figure n°11 représente respectivement l'évolution des chlorures et de sodium en fonction du l'eau traitée.

Evolution des chlorures et de sodium en fonction de l'eau traitée



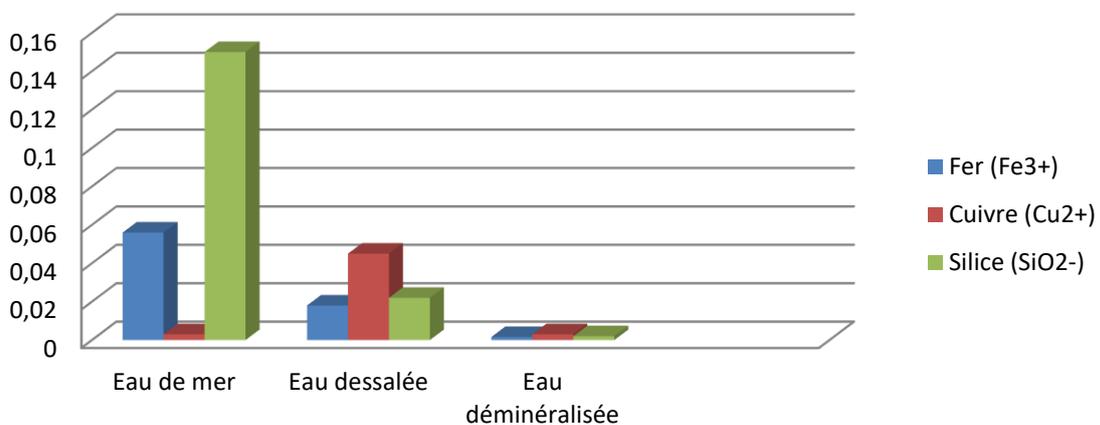
L'eau de mer contient beaucoup des chlorures (Cl^-) et de sodium (Na^+), mais les procédés de distillation et de déminéralisation sur lit mélangé sont suffisants pour les éliminer complètement.

Le fer, le cuivre et la silice:

La figure n°12

Représente respectivement l'évolution de fer, de cuivre et de la silice en fonction de l'eau traitée.

Evolution de fer, de cuivre et de la silice en fonction de l'eau traitée



L'analyse des ions ferriques et cuivriques sont importantes au niveau de la centrale thermique car ces derniers peuvent provoquer de la corrosion dans les canalisations qu'ils traversent, même en faible quantité.

La majeure partie du fer est éliminée lors du processus de distillation tandis que la teneur de cuivre augmente au cours de ce procédé. Cette augmentation revient à la dissolution du cuivre constituant la cuve de distillat et le condenseur (elles sont fabriquées à base de cuivre et de nickel « Cupronickel, $\text{CuNi}_{30}\text{Fe}$ »).

Le dioxyde de silicium dans l'eau peut exister sous deux états différents : ionique et colloïdal. La plupart d'entre eux peuvent être retirés du processus de distillation et le reste par le lit mélangé. La valeur obtenue est acceptable puisqu'elle répond aux normes exigées par la centrale.

Les autres paramètres:

On remarque que la distillation élimine la majeure partie de leurs teneurs et le reste éliminé par le lit mélangé.

Donc, on peut dire que l'eau traitée est de parfaite qualité, elle est totalement déminéralisée. De ce fait, on peut dire que les deux procédés de traitement des eaux de la centrale, la distillation et la déminéralisation sur lit mélangé fonctionnent très bien et sont donc efficaces.

Les analyses dues à l'évaluation de l'impact environnemental:

Afin d'étudier l'effet de la saumure chargée en sel provenant de l'unité de dessalement sur l'environnement aquatique, nous avons procédé à des analyses physico-chimiques de la saumure avant et après dilution avec de l'eau de refroidissement.

Les résultats :

Le tableau n°9 présente les caractéristiques de:

- Saumure avant dilution.
- Saumure après dilution.

Tableau n° 9: Résultats des analyses physico-chimiques de la saumure avant et après dilution avec l'eau de refroidissement.

Paramètres d'analyses	Unités	Saumure avant dilution				Saumure après dilution			
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moy
PH	-	8,36	8,39	8,41	8,38	7,87	7,54	7,66	7,69
Température	°C	28,40	29,10	28,60	28,7	21,30	22,40	21,90	21,81
Conductivité	ms/cm	91,40	87,80	85,00	88,06	55,80	54,20	54,26	54,75
Salinité	mg/l	69830	69700	68907	69479	41200	40893	40228	40773
Turbidité	NTU	0,442	0,492	0,375	0,436	0,388	0,442	0,412	0,414
TH	°F	1050	1070	1030	1050	640	600	630	623,33
THCa ²⁺	mg/l	701,40	761,52	721,44	728,12	400,8	440,88	450,90	430,86

THMg ²⁺	mg/l	2133,60	2127,48	2059,56	2106,88	1327,20	1179,12	1250,10	1252,14
TA	°F	2,4	2,9	2,8	2,70	0	0	0	00
TAC	°F	20,20	19,80	19,60	19,86	12,50	12,20	12,40	12,36
CO ₃ ²⁻	mg/l	57,60	69,60	67,20	64,80	0	0	0	00
						0	0	0	
HCO ₃ ⁻	mg/l	305,00	312,32	307,44	308,25	152,5	148,48	151,28	150,75
Cl ⁻	mg/l	39100	35600	35400	36700	22500	22100	21900	22166
Na ⁺	mg/l	25520	25195	24978	25221	12257	12720	12526	12501
K ⁺	mg/l	870	840	842	850,66	490	486	470	482
SO ₄ ²⁻	mg/l	4560	4900	5010	4823	3020	3120	3050	3063
PO ₄ ³⁻	mg/l	0,47	0,45	0,49	0,47	0,34	0,29	0,27	0,30
NO ₂ ⁻	mg/l	0	0	0	00	0	0	0	00
NO ₃ ⁻	mg/l	0	0	0	00	0	0	0	00
Fe ³⁺	mg/l	0,066	-	-	0,066	0,045	-	-	0,045
Cu ²⁺	mg/l	0,067	-	-	0,067	0,010	-	-	0,010
SiO ₂ ⁻	mg/l	0,20	0,22	0,19	0,20	0,14	0,16	0,16	0,15

Interprétation des résultats:

Nous remarquons que la saumure provenant des unités de dessalements ont très chargés en sel. Elle absorbe deux fois plus que l'eau de mer.

La conductivité de la saumure atteint une valeur maximale de **88 ms/cm** (due probablement à l'évaporation de l'eau de mer) qui la charge en sels. Avant rejet, la saumure subit une dilution avec les eaux de refroidissement (diminution de la conductivité à **54 ms/cm**), **valeur équivalente à celle de la conductivité de l'eau de mer.**

Pour les autres paramètres, les mêmes résultats que l'eau de mer ont été trouvées. Donc, le rejet de saumure n'a pas d'impact sur l'environnement et sur le milieu marin.

Contrôle de l'unité de dessalement:

Le but de ce contrôle est de vérifier la qualité de l'eau dessalée et de faire un bilan sur les différentes natures d'eau présentes dans l'unité de dessalement afin de vérifier la présence d'une éventuelle corrosion.

Résultats:

Le tableau n° 9 présente les caractéristiques des différents échantillons d'eau prélevé au niveau de l'unité de dessalement.

Tableau n°10: Analyse physico-chimique des différents échantillons.

Echantillon	Mesure	Valeur de consigne limite	Valeur mesurée
Eau de mer	pH	7,5-7,8	7,75
	Conductivité(µs/cm)	60	53,5

Eau de chaudière	PH	9	9,06
	Conductivité($\mu\text{s/cm}$)	1000	93,9
Distillat	PH	5-8	7,19
	Conductivité($\mu\text{s/cm}$)	30	12,14
	Cuivre(ppm)	0,15	0,017
Saumure de recirculation	PH	8	8,11
	Conductivité($\mu\text{s/cm}$)	112	84,6
	TA($^{\circ}\text{F}$)	/	5,5
	TAC($^{\circ}\text{F}$)	/	14,5
Rejet de saumure	PH	8	7,8
	Conductivité($\mu\text{s/cm}$)	120	82,8
	TA($^{\circ}\text{F}$)	/	7
	TAC($^{\circ}\text{F}$)	/	16

Interprétation des résultats:

Le pH:

Les valeurs pH de cinq échantillons répondent aux normes applicables à la station .Il n'y a donc aucun problème de corrosion dans l'unité de dessalement.

Les valeurs de pH mesurées pour les échantillons d'eau de mer, de distillat et de rejet de saumure, les valeurs de pH mesurées sont à la neutralité. On voit donc que le processus de distillation n'a aucun effet sur le pH.

Pour les eaux de chaudière, la valeur mesurée du pH est de **9,5**. Cette augmentation est due à l'injection de NH_3 dans les eaux d'alimentation.

La valeur mesurée pour la circulation de la saumure est de 8,11. Cette légère augmentation est due à l'ajout de produits chimiques (antitartre et anti mousse).

La conductivité :

Les valeurs de la conductivité des cinq échantillons prélevés ne dépassent pas les limites exigées à la centrale.

La conductivité de l'eau de mer est très grande (**53500 $\mu\text{s/cm}$**). Après la distillation, la majeure partie de cette conductivité est éliminée, il ne reste que **12,14 $\mu\text{s/cm}$** dans le distillat. Donc, on peut dire que le procédé est efficace.

La chaudière est alimentée par une eau déminéralisée dont la conductivité est inférieure à **0,6 $\mu\text{s/cm}$** . L'augmentation de cette dernière jusqu'à **93,9 $\mu\text{s/cm}$** est due à l'augmentation de la

température (95 °C). Donc, on peut dire que la conductivité devient plus importante lorsque la température augmente.

La conductivité de rejet de saumure (82,8µs/cm) est inférieure à celle de la saumure de recirculation (84,6 µs/cm), cette diminution est due à la dilution (un appoint d'eau de mer) de la saumure dans la zone de dissipation de chaleur. Lors de l'appoint d'eau de mer, il faut maintenir un certain niveau de la saumure dans l'évaporateur, ce système est muni d'une pompe qui aspire l'excès de la saumure, cet excès est appelé rejet de saumure.

TA, TAC :

Les mesures de TA et TAC indiquent que la saumure de recirculation et le rejet de saumure contiennent les ions OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- .

Cuivre:

Le cuivre est un facteur de corrosion, la cuve du distillat et le condenseur sont fabriqués à base de cuivre et de nickel (Cupronickel, $\text{CuNi}_{30}\text{Fe}$). La valeur du cuivre relevée est inférieure à la valeur limite, ce qui indique que les conduites ne sont pas corrodées.

Contrôle de circuit eau-vapeur:

Le but de ce contrôle est de vérifier la pureté de l'eau d'appoint, s'il y a éventuellement une entrée d'eau de mer, ou d'autre impuretés.

Deux mesures de conductivité sont effectuées:

- Une dite **mesurée**, qui représente la conductivité de l'eau avec la présence des ions NH_4^+ qui est due à l'injection de NH_3 (en vue d'élever le pH à plus de 9,5).
- L'autre dite **corrigée**, qui représente la valeur donnée par le conductimètre placé à la prise d'échantillon. Il donne la conductivité de l'eau après avoir débarrassé les ions NH_4^+ .

Les ions NH_4^+ sont éliminés de l'eau au moyen d'une résine cationique (R-H^+). Elles sont retenues par la résine comme suit :



Cette résine est régénérée après saturation avec HCl à 5%. De ce fait, la conductivité peut nous renseigner sur la pureté de notre eau.

Résultats:

Les résultats des contrôles de circuit eau-vapeur sont indiqués au tableau n° 16.

Tableau n°11 : Les résultats des analyses effectuées au circuit eau-vapeur.

Point de prise d'échantillon	PH	Conductivité µs/cm		TH (°F)	Cl ⁻ (mg/l)	Cu ppm	Fe ppm	SiO ₂ ppm
		Brute	Corrigé					

Ballon	Consigne	9,2 -9,5	/	3	0	1	/	0,02	0,25
	Mesure	9,44	7,25	0,4	0	0	0,03	0,018	0,044
Vapeur sur-chauffé	Consigne	9,5 -9,8	/	0,2				0,02	0,02
	Mesure	9,62	8,50	0,06				0,015	0,010
Vapeur re-surchauffé	Consigne	9,5 -9,8	/	0,2				0,02	0,02
	Mesure	9,67	8,14	0,06				0,014	0,018
Vapeur saturée	Consigne	9,5 -9,8	/	0,2					
	Mesure	9,65	8,63	0,07					
Eau d'extraction	Consigne	9,5 -9,8	/	0,2					
	Mesure	9,70	8,25	0,18					
Eau d'alimentation	Consigne	9,5 -9,8	/	0,2					
	Mesure	9,76	8,52	0,15					
Eau d'appoint	Consigne	9,5 -9,8	/	1					
	Mesure	9,70	8,67	0,86					
Eau de réfrigération	Consigne	10 – 10,5	/						
	Mesure	10,18	57,92						

Interprétation des résultats:

Les eaux d'extractions (condensées):

Les analyses effectuées sur l'eau condensée ont donné des résultats satisfaisants, ils sont conformes aux normes de la centrale.

En effet, la valeur du pH est supérieure à **9,5**. Donc, la corrosion est négligeable. La valeur de la conductivité est légèrement supérieure à zéro, ce qui explique l'absence des charges électriques des ions présents dans l'eau. Donc pas d'entrée d'impuretés.

Les eaux d'alimentation:

Le générateur de vapeur est alimenté par l'eau d'appoint et le retour de condensats. Concernant les valeurs mesurées de pH et de conductivité, ils répondent aux normes exigées. Donc, cette eau ne pose aucun inconvénient sur le circuit eau-vapeur.

Les eaux du ballon chaudière:

Les valeurs du **pH** et conductivité, des éléments **Cu²⁺**, **Fe²⁺** et **SiO₂** sont conformes aux normes. En effet, le pH est inférieur à **9,5** du à l'injection de NH₃.

La conductivité corrigée est légèrement supérieure à zéro ce qui explique l'absence des ions, donc pas d'entrée d'impuretés.

La silice est présente en petite concentration et cela s'explique par sa fixation difficile par les

résines, mais ces valeurs restent toujours acceptables puisqu'elles sont inférieures aux normes.

Dans les eaux naturelles, la silice se présente tout comme l'acide carbonique, sous forme non ionique (SiO_2). En milieu alcalin (eaux des chaudières) il se forme des ions d'ortho-silicate primaire d'après l'équation:



Les teneurs élevées de SiO_2 dans les eaux de chaudières ne représentent aucun danger (formation de dépôts), pourvu que l'eau ne soit pas dure. Par contre, le taux de silicates doit être réduit pour des installations à turbines, car sinon il y a danger de formation de silicate sur les pelles des turbines.

La vapeur surchauffée:

Les analyses effectuées sur la vapeur surchauffée (après réfrigération) ont donné des résultats satisfaisants, en conformité avec les normes exigées.

La vapeur est de bonne qualité, elle est pauvre en ions de l'eau et entraîne une faible concentration en SiO_2 qui est négligeable.

La vapeur resurchauffée :

Les valeurs de pH, SiO_2 et de conductivité répondent aux normes exigées pour la centrale, donc elles n'influent pas négativement sur les canalisations.

Conclusion générale

L'étude que nous avons effectuée à la centrale thermique de Cap Djinet nous a été bénéfique à plus d'un titre, parce qu'elle nous a permis d'appliquer en pratique les connaissances acquises en théorie et de côtoyer la réalité industrielle.

Elle nous a permis maîtriser les différents traitements utilisables pour les eaux destinées à l'alimentation des chaudières et de mieux apprécier l'exploitation et la gestion des installations de traitement des eaux, ainsi que de comprendre les paramètres physico-chimiques qui influent sur la fiabilité des équipements.

Le procédé de distillation représente un traitement pour l'eau d'appoint, car il permet de traiter l'eau destinée à la déminéralisation sur lits mélangés de telle sorte qu'elle soit très faiblement chargée en ions de l'eau qui est pratiquement la condition exigée pour ce genre de traitement.

Le lit mélangé assure une meilleure production d'eau de plus grande pureté, celle-ci reste toujours en phase de production et reste de loin, le plus performant du point de vue économique et entretien.

D'après les analyses que nous avons effectuées sur l'eau traitée, on a constaté que l'eau finale est complètement déminéralisée, dégazée et conforme à une eau d'alimentation d'une chaudière à haute pression.