

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du
Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Energétique

Spécialité : Energétique Académique

THEME

Influence des paramètres thermodynamique sur le rendement d'une station de dessalement MSF avec recirculation de la saumure

Proposé et dirigé par :

Mr Amokrane. M



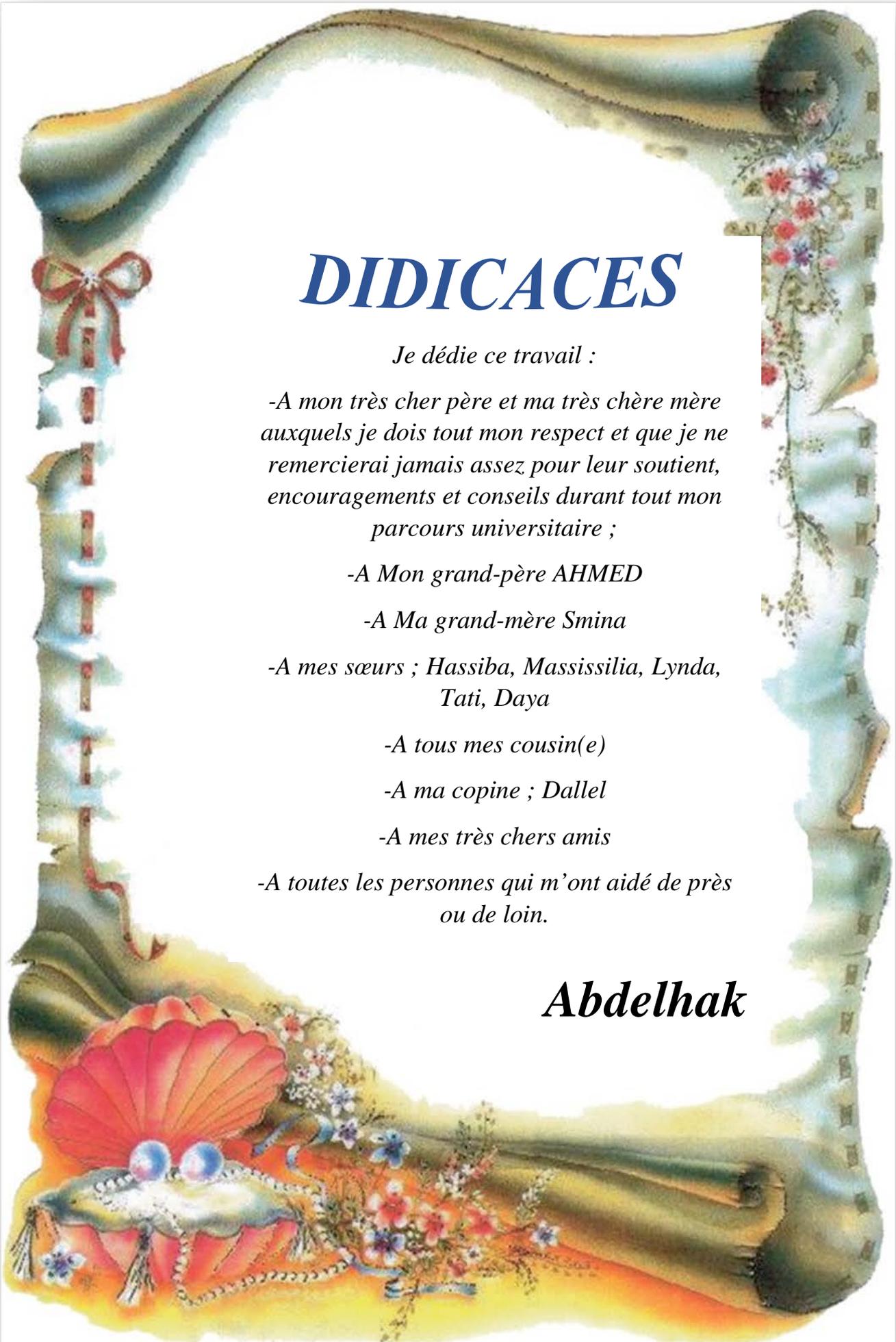
Réalisé par :

Mr BELGHIT Abdelhak

Melle CHERIFI Mounira

Mr TAKILT Tarik

Promotion 2016/2017

A decorative border surrounds the text, featuring a scroll-like shape at the top and bottom, floral patterns on the right side, and a butterfly with a large red and orange wing at the bottom left.

DIDICACES

Je dédie ce travail :

*-A mon très cher père et ma très chère mère
auxquels je dois tout mon respect et que je ne
remercierai jamais assez pour leur soutien,
encouragements et conseils durant tout mon
parcours universitaire ;*

-A Mon grand-père AHMED

-A Ma grand-mère Smina

*-A mes sœurs ; Hassiba, Massissilia, Lynda,
Tati, Daya*

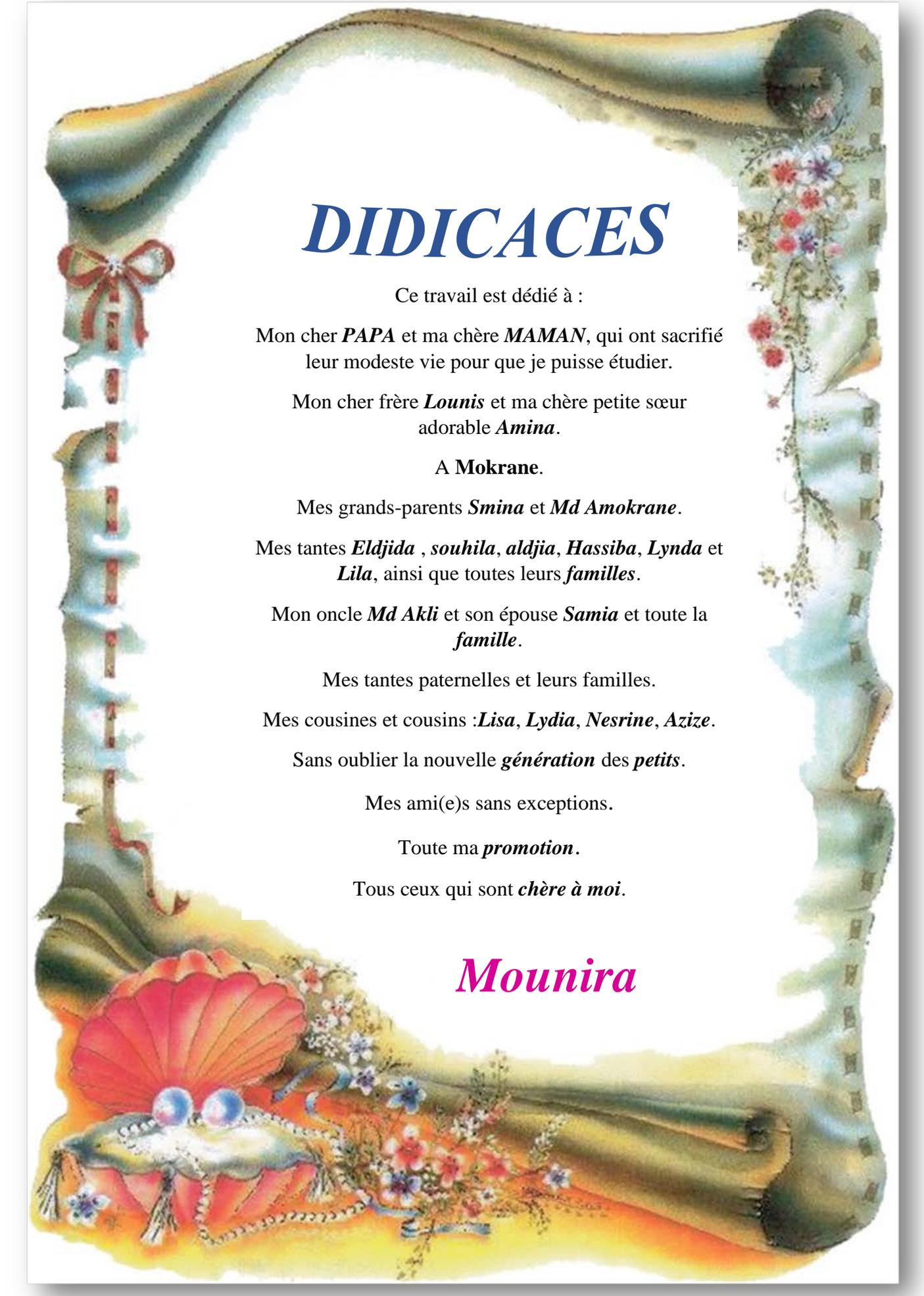
-A tous mes cousin(e)

-A ma copine ; Dallel

-A mes très chers amis

*-A toutes les personnes qui m'ont aidé de près
ou de loin.*

Abdelhak



DIDICACES

Ce travail est dédié à :

Mon cher *PAPA* et ma chère *MAMAN*, qui ont sacrifié leur modeste vie pour que je puisse étudier.

Mon cher frère *Lounis* et ma chère petite sœur adorable *Amina*.

A *Mokrane*.

Mes grands-parents *Smina* et *Md Amokrane*.

Mes tantes *Eldjida*, *souhila*, *aldjia*, *Hassiba*, *Lynda* et *Lila*, ainsi que toutes leurs *familles*.

Mon oncle *Md Akli* et son épouse *Samia* et toute la *famille*.

Mes tantes paternelles et leurs familles.

Mes cousines et cousins : *Lisa*, *Lydia*, *Nesrine*, *Azize*.

Sans oublier la nouvelle *génération* des *petits*.

Mes ami(e)s sans exceptions.

Toute ma *promotion*.

Tous ceux qui sont *chère à moi*.

Mounira



DIDICACES

**Je dédie ce
travail :
A toute ma famille
Et à tous ceux qui
me sont chers**

Tarik

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions ALLAH le tout puissant, qui nous a offert la vie et nous a donné la force pour accomplir ce travail.

Nos plus vifs remerciements vont à nos parents pour les sacrifices qu'ils ont faits pour nous afin d'arriver à ce jour-là.

*Nos sincères remerciements vont à notre promoteur **Mr AMOKRANE Mounir**, pour nous avoir proposé ce sujet, pour son aide précieuse et pour sa rigueur dans ce travail.*

Nous tenons aussi à remercier également les membres de jury :

***Mr HAMDAD**..... Président.*

***Mr MEDJKANE**examineur.*

Qui ont acceptés d'examiner et d'estimer ce travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

NOMENCLATURE

Caractères	Signification	Unités
Caractères latins		
A	Surface	m²
B	Le débit de la saumure	kg/s
C	La concentration en sels	mol/m³
C_d	Le rapport entre le débit réel et le débit théorique	-
BPE	Élévation du point d'ébullition	°C
C_p	La chaleur spécifique	KJ/Kg°C
d	Débit de vapeur formé dans les boîtes de solin	kg/s
D	Le débit du distillat produit	kg/s
GH	La hauteur du passage de la saumure entre étages	m
h	Coefficient de transfert de chaleur	kW/m² °C
H	La hauteur du bassin de la saumure	m
K	rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite	-
k	Coefficient de conductivité thermique	kW/m² °C
L	Longueur	m
M	Débit massique	kg/s
NEA	Différences de température due au déséquilibre thermique	°C
P	Pression	kPa
PR	Rendement thermique	-
ΔP	Différence de pression	kPa
Q	Taux de transfert de chaleur	kJ/s
R	La constante des gaz parfaits	j/mol.k
sA	Surface spécifique de transfert de chaleur	m²/(kg/s)

sMew	Débit spécifique de l'eau de refroidissement	-
T	Température	°C
ΔT	Différence de température	°C
ΔTLM	Différence de température logarithmique	°C
U	Coefficient de transfert de chaleur global	kW/m²° C
V	Débit par unité de largeur	kg/m.s
W	La largeur des étages	m
X	Degré de salinité	ppm
y	Le rapport de la chaleur sensible sur la chaleur latente	-
Caractères grecques		
ρ	La masse volumique	Kg/m³
λ	La chaleur latente	Kj/Kg
γ	Le rapport des chaleur spécifiques respectivement à pression et volume constant	
Indices		
av	Moyen	
b	Saumure	
c	Condenseur	
cw	Eau de refroidissement	
d	Distillat	
f	Alimentation	
r	Recirculation	
s	Vapeur réchauffant	
v	La vapeur formée	
Abréviation		
MSF	Multi-flash	
MED	Dessalement Multi-effet	
CV	Compression de vapeur	

ED	Électrolyse
OI	Osmose inverse

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

FigureI.1	Répartition de l'eau sur la terre	2
FigureI.2	Répartition de l'eau douce sur la terre	2
FigureI.3	Variation de la masse volumique de l'eau de mers, en fonction de la température et de la salinité	5

Chapitre II

Figure I.1	Schéma représentatif des différents procédés de dessalement de l'eau de mer	8
Figure II.2	Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	10
FigureII.3	Principe de l'électrodialyse	12
FigureII.4	Un procédé de congélation	13
FigureII.5	Schéma de la distillation simple effet	14
FigureII.6	Schéma de principe de la distillation à effet multiple	16
Figure II.7	Schéma de la distillation multiple effets (tubes horizontaux arrosés)	16
FigureII.8	Schéma du procédé par compression de vapeur	18
FigureII.9	Schéma du procédé MSF à recirculation de la saumure	20
FigureII.10	Schéma du procédé MSF à cycle direct	21

Chapitre III

Figure III.1	Schéma explicatif d'une station MSF avec recirculation de saumure	25
---------------------	---	----

Chapitre IV

FigureIV.1	Variation du débit de la saumure M_r en fonction de la température T_0	36
Figure IV.2	Variation du débit de réchauffement M_S en fonction de T_0	37
Figure IV.3	Variation du rendement thermique, PR en fonction de, T_0	38
Figure IV.4	La variation du débit spécifique, s_{Mcw} en fonction de la température maximale, T_0	40
Figure IV.5	Influence de la température T_0 sur la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur	45

Figure. IV.6	Influence de la température maximale, T_0 , sur la surface d'échange dans la zone de dissipation de chaleur	48
Figure. IV.7	Influence de la température T_0 sur la surface d'échange du réchauffeur final	50
Figure. IV.8	L'influence de la température maximale sur la surface spécifique, sA	51

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1	La distribution de l'eau dans le monde	2
Tableau I.2	Les principaux constituants de l'eau de mer pour une salinité de 36g/l	3
Tableau I.3	La salinité de différentes mers	4
Tableau I.4	La conductivité de l'eau de mer en fonction de la salinité et de la température	5
Tableau I.5	La viscosité de l'eau de mer en fonction de la température	6
Tableau I.6	Le développement de dessalement au cours de quelques années	7

Chapitre II

Tableau II.1	Comparaison entre les procédés de dessalement	23
---------------------	---	----

Chapitre VI

Tableau VI.1	Tableau comparatif entre les résultats calculés et ceux trouvés dans le livre	34
Tableau VI.2	La variation du rendement thermique en fonction de la température maximale T_0 .	35-36
Tableau VI.3	Le débit spécifique de refroidissement que requiert chaque température, T_0 .	39
Tableau VI.4	Les valeurs de GH_1 en fonction de T_0 .	41-42
Tableau VI.5	Évolution de T_{v1} en fonction de T_0 .	42-43
Tableau VI.6	Le changement de la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur	43-44
Tableau VI.7	La température de condensation T_{vn} pour chaque T_0	45-46
Tableau VI.8	Surface de refroidissement pour chaque T_0 .	46-47
Tableau VI.9	Surface spécifique due à chaque température T_0	49-50

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I :	
I.1. Les ressources en eau douce	2
I.2. Composition de l'eau de mer	3
❖ Quelques propriétés de l'eau de mer	4
1.Salinités des eaux de mer	4
2.Température et densité	4
3.Conductivité	5
4.PH des eaux de mer	5
5.Viscosité	6
I.3.Historique du dessalement	6
CHAPITRE II :	
II.1.Les principales technologies de dessalement d'eau de mer	8
II.2. Lesprocédées membranaires	9
II.2.1.L'Osmose inverse	9
II.2.2. L'Electrodialyse	11
II.3.Lesprocédées thermiques	12
II.3.1.La Congélation	12
II.3.2.La Distillation	13
a.Distillation à simple effet	14
b.Distillation à multi effets (MED)	15
c.Distillation par compression de vapeur	17
d.Dessalement à multi flash (MSF)	19
Chapitre III :	
III.1.Hypothèses	24
III.2.Les paramètres de performance	24
III.3.Les principaux paramètres thermodynamiques du fonctionnement	25
III.4.Les paramètres à calculer pour déterminer ceux des performances	26
III.4.1.Les paramètres thermiques	26
III.4.2. Les paramètres de balance	28
III.4.3.Les paramètres de surface	29
III.5.Le dimensionnement et la balance d'un étage	29
III.5.1. La balance	29
III.5.2.Dimensionnement	30

III.6.Le modèle de calcul	30
III.7.Ce modèle requiert les données ci-dessous	31
Chapitre IV :	
IV.1. Introduction	33
IV.2. Vérification du calcul	33
IV.3. Les résultats obtenus avec l'Excel	34
IV.3.1. Le rendement thermique PR	35
a. Le graphe du débit de saumure, M_r	36
• Discussion	36
b. Le graphe du débit du réchauffement, M_s	37
• Discussion	37
c. Le graphe du rendement thermique PR	38
• Discussion	38
IV.3.2. Le débit spécifique d'eau de refroidissement, $sMcw$	39
a. Legraphe du débit spécifique de refroidissement, $sMcw$	40
• Discussion	40
IV.3.3.Le tableau de la surface totale spécifique pour l'échange de chaleur, sA	41
a.Le calcul de GH_1	41
b.Le calcul de la température de condensation dans le premier étage, T_{v1}	42
c.Le calcul de la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur, A_r	43
d. Le graphe de la surface d'échange de la zone de récupération de chaleur	45
• Discussion	45
e. Le tableau de la surface d'échange dans la zone de dissipation de chaleur, A_j	45
f. Le tableau de A_j	46
g. Le graphe de la surface, A_j	48
• Discussion	48
IV.3.4.Le calcul de la surface d'échange du réchauffeur final et la surface spécifique, sA	49
a.Le graphe de la surface d'échange dans le réchauffeur, Ab	50
• Discussion	51
b. Le graphe de la surface spécifique, sA	51
• Discussion	52
IV.4.Conclusion	52

Introduction générale

Introduction générale

Avec l'augmentation de la population mondiale, les ressources en eau douce s'épuisent, ce qui rend la planète en insuffisance d'eau douce. Pour y remédier, l'utilisation de l'eau de mer, qui est en quantité colossale couvrant la quasi-totalité de la planète, se révèle la solution capitale et définitive pour en parvenir aux besoins en eau douce.

De ce fait, plusieurs procédés de dessalement de l'eau de mer ont vu le jour, seulement, les coûts nécessaires pour leur réalisation s'avèrent être exorbitants. Pour cela, diverses optimisations de ces procédés ont été faites et qui restent toujours dans l'obligation d'être optimisé davantage.

Dans ce présent travail, le but est de savoir l'influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station de dessalement de l'eau de mer par le procédé multi-flash.

L'étude s'est basée sur un modèle de calcul simplifié pour déterminer les trois paramètres de performance qui sont : le rendement thermique, la surface spécifique d'échange de chaleur et le débit spécifique de l'eau de refroidissement. Tout en variant la température maximale T_0 qui sort du réchauffeur final. Car tous les paramètres thermodynamiques en dépendent de cette température.

Ce présent manuscrit est structuré en quatre chapitres. Les généralités sur le dessalement de l'eau de mer font l'objet du chapitre I. Le chapitre II porte sur la description de divers procédés de dessalement. Le chapitre III est consacré au modèle simplifié du calcul des paramètres de performance d'une station de dessalement d'eau de mer par le procédé multi-flash. L'évaluation des paramètres de performance par la variation des paramètres thermodynamique est exposée au chapitre IV. Le manuscrit est achevé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le dessalement de l'eau de mer

I.1. Les ressources en eau douce :

Les ressources en eau douce sont très inégalement réparties et ne représentent qu'environ **2.5%** du volume d'eau existant sur la Terre. Mais malheureusement **80%** de cette eau est congelée dans les calottes glaciaires, ou combinée comme humidité du sol, et les deux formes ne sont pas facilement accessibles pour un usage humain. La moyenne quotidienne mondiale de pluie est de $2 \times 10^{11} \text{m}^3$ et ce montant est mal réparti à travers le monde. (Le tableau 1: donne un résumé pour la distribution de l'eau dans le monde). Or, les besoins en eau douce sont de plus en plus importants. Une bonne partie des zones consommatrices se trouvent proches des rivages océaniques, une solution intéressante consiste à dessaler l'eau de mer. Le procédé est en plein développement. Il est au cœur d'une gamme de problématique humaines, environnementales et économiques.

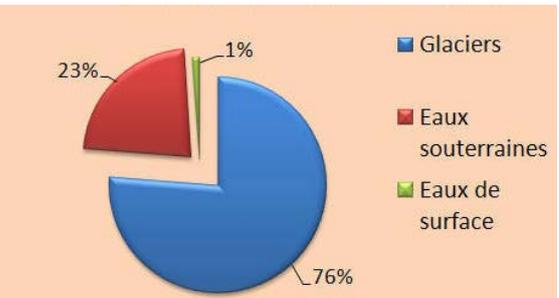


Figure I.1 : répartition de l'eau sur la terre

Figure I.2 : répartition de l'eau douce sur la terre

Résumé de la distribution de l'eau dans le monde :

Ressources	Volume Km ³	% de l'eau totale	%de l'eau fraîche
Eau atmosphérique	12 900	0.001	0.01
Glaciers	24 064 000	1.72	68.7
Glace au sol	300 000	0.21	0.86
Rivière	2 120	0.0002	0.006
Lacs	176 400	0.013	0.26
Marais	11 470	0.0008	0.03
Humidité du sol	16 500	0.0012	0.05
Aquifères	10 530 000	0.75	30.1
Lithosphère	23 400 000	1.68	
Océans	138 000 000	95.81	
Total	1 396 513 390		

Tableau I.1 : la distribution de l'eau dans le monde. [1]

I.2. Composition de l'eau de mer :

La présence de sel dans l'eau de mer, modifie certaines propriétés (masse volumique, compressibilité, point de congélation, températures du maximum de densité). D'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencés de manière significative.

Enfin, certaines sont essentiellement déterminés par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique). [2]

- **Principaux constituants de l'eau de mer pour une salinité de 36 g/l :**

Composé	Composition	Masses-en %	ppm
Chlorure	Cl ⁻	55.03	19810.8
Sodium	Na ⁺	30.61	11019.6
Sulfate	SO ₄ ⁺⁺	7.68	2764.8
Magnésium	Mg ⁺⁺	3.69	1328.4
Calcium	Ca ⁺⁺	1.16	417.6
Potassium	K ⁺	1.16	417.6
Acide carbonique	CO ₃ ⁻⁻	0.41	147.6
Brome	Br ⁻	0.19	68.4
Acide borique	H ₃ BO ₃ ⁻	0.07	25.2
Strontium	Sr ⁺⁺	0.04	14.4
Total		100	36000

Tableau I.2 : les principaux constituants de l'eau de mer pour une salinité de 36g/l.[1]

Et bien sûr que, tous les autres ions présents dans la nature sont présents aussi dans l'eau de mer, mais à une concentration beaucoup plus petite.

- **Matière organique :**

Parmi les matières organiques dissoutes, on trouve des chlorophylles et caroténoïdes, de la vitamine B₁₂, des monosaccharides, des aminoacides. Les matières organiques particulières sont principalement constituées d'animaux et des végétaux du zooplancton (ou leurs résidus). Elles peuvent représenter de 10 à 60% de la matière en suspension. [3]

❖ Quelques propriétés de l'eau de mer :

1. Salinités des eaux de mer :

La salinité désigne la quantité de sel dissous dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux.

Détermination de la salinité : [2]

Même s'il est très difficile d'estimer la salinité par analyse chimique direct, car certains corps présents, notamment les chlorures, s'échappent au cours du dernier stade de séchage, et il existe d'autres formules pour déterminer la salinité, mais seule cette analyse donne un résultat valable dans le cas où la composition de l'eau de mer n'est pas standard.

- Salinité de différentes mers : [3]

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

Tableau I.3 : la salinité de différentes mers.

2. Température et masse volumique : [2]

La température des océans varie de -1.9°C (température de congélation de l'eau de mer à $S=35$) à 30°C . Cette température se varie aussi en fonction de la profondeur.

Avec la température et la salinité on peut identifier la masse d'eau particulière, plus la pression on pourra déterminer la masse volumique.

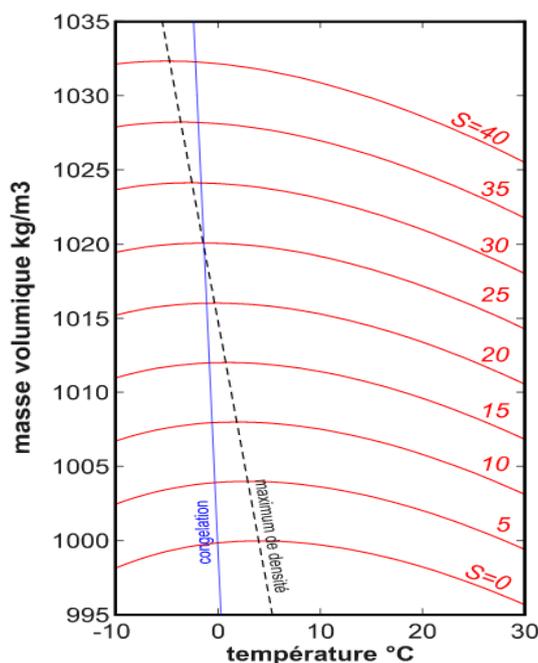


Figure I.3 : variation de la masse volumique de l'eau de mers, en fonction de la température et de la salinité.

3. Conductivité : [3]

De l'ordre de 40 ms/cm, la conductivité des eaux de mer subit des variations suivant la température et la salinité des océans.

Salinité %	Température		
	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

Tableau I.4 : la conductivité de l'eau de mer en fonction de la salinité et de la température.

4. PH des eaux de mer : [3]

L'eau de mer est faiblement alcaline et son PH moyen est de 8.2 avec des variations entre 7 et 8.4. Le PH des eaux de mer décroît avec une augmentation de température de 1°C, entre 10°C et 20°C, diminue le PH de 0.0109. De même, une

CHAPITRE I : Généralités sur le dessalement de l'eau de mer

augmentation de pression de 100 bars produit une diminution de PH de l'ordre de 0.02 (pour un PH de 8.3).

5. Viscosité :

La viscosité décroît rapidement en fonction de la **température** et dépend également de la **salinité**.

Température (°C)	5‰ S	10‰ S	20‰ S	30‰ S	40‰ S
0	1.009	1.017	1.032	1.056	0.054
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

Tableau I.5 : la viscosité de l'eau de mer en fonction de la température

I.3. Historique du dessalement : [1]

Jusqu'au 1800, le dessalement de l'eau de mer était utilisé sur les bateaux, et cela en utilisant des poêles à queue ou des fours.

Le début du dessalement industriel remonte au début du XXIème siècle. En 1912, six usines de désalinisation à effet d'une capacité de 75 m³/jours est installée en Egypte. Puis la capacité totale de dessalement a augmenté au cours de la période qui suit cette année. Cependant, la croissance exponentielle s'est produite au cours de la période de 1935 à 1960 à un taux annuel de 17%. Enfin pour résumer un peu le développement du dessalement, on a le tableau suivant quelque réalisation au cours des années :

CHAPITRE I : Généralités sur le dessalement de l'eau de mer

Année	La réalisation
1960	Les premières usines de MSF sont mises en service à Shuwaikh au Koweït et à guernesey.
1962	Réalisation d'une usine de MSF avec une capacité de 1 Migd.
1973	Construction des usines standard MSF, 6 Migd, 24 stades, et un rapport de performance de 6-8.
1980	Conception et fonctionnement de l'évaporation à effets multiples à basse température.
1999	Construction d'une usine RO à grande échelle en Floride, aux Etats-Unis.
2000	Conception et construction de haute performance du système MSF avec 43 étages.

Tableau I.6 : le développement de dessalement au cours de quelques années.

Chapitre II

Les différents procédés de dessalement

II .1. Les principales technologies de dessalement de l'eau de mer :

Les technologies de dessalement de l'eau de mer sont classées en deux grandes catégories, et cela selon le principe appliqué :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phase : la distillation et la congélation.
- Les procédés membranaires : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

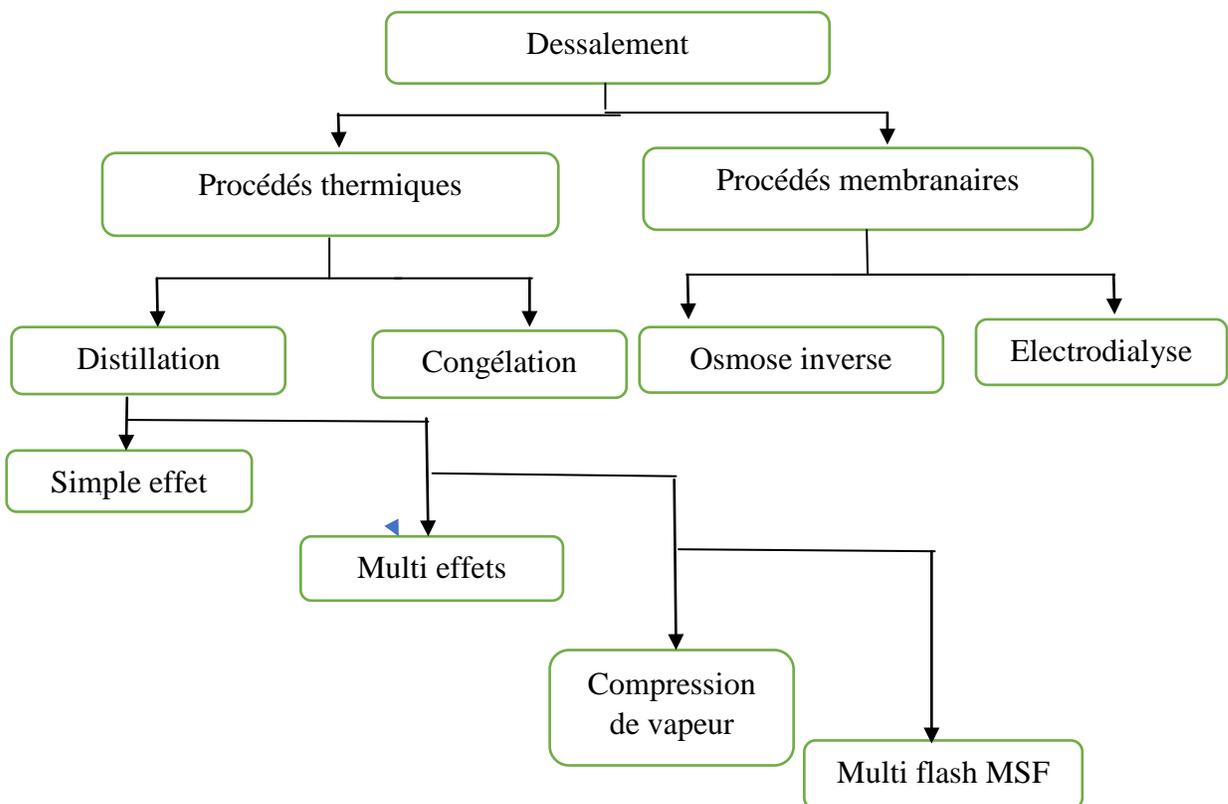


Figure II.1 : schéma représentatif des différents procédés de dessalement de l'eau de mer.

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

Quel que soit le procédé de séparation envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

- Le pompage de l'eau de mer avec une filtration grossière.
- Un pré-traitement consistant une filtration plus fine avec l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte.
- Le procédé de dessalement lui-même.
- Le post traitement avec une éventuelle déminéralisation de l'eau produite.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement.

II.2. Les procédés membranaires :

II.2.1. L'Osmose Inverse : [4]

L'osmose inverse est un procédé de séparation utilisant des 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. Les membranes sont réalisées en polymères, elles laissent passer les molécules d'eau et empêchent le passage des particules des sels dissous et celle des molécules organiques de 10^{-7} **mm** de taille.

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement l'électricité consommée principalement par les pompes à haute pression.

La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de $0,5 \text{ g.L}^{-1}$

- Principe de l'osmose inverse :

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

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure II.2). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

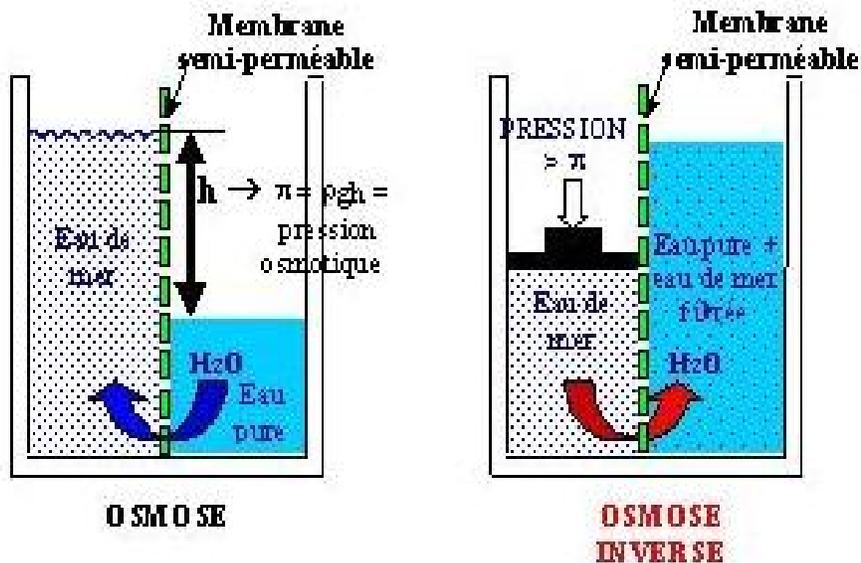


Figure II.2 : Principe de l'osmose inverse

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (figure II.2), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée P_o peut être calculée d'après la loi de van't Hoff :

$$P_o = i \cdot C \cdot R \cdot T \quad (II.1)$$

Où :

i : est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,

C : est la concentration en sels en mol.m^{-3}

R : est la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T : est la température absolue de la solution en **Kelvin**

Le débit spécifique **J** (débit massique par m^2 de membrane) d'eau osmosée produite est proportionnel à la différence entre la pression appliquée **P** et la pression osmotique **P_o** de la solution concentrée.

$$J = A' (P - P_o) \quad (II.2)$$

Où **A'** est le coefficient de perméabilité de l'eau pure.

II.2.2. L'Electrodialyse : [5]

C'est un procédé chimique qui permet de séparer les ions Na^+ et les ions Cl^- contenus dans une solution salée afin de ne conserver que les molécules d'eau.

Un électro-dialyseur est composé de plusieurs compartiments séparés alternativement par des membranes anioniques ou cationiques et à chaque extrémité du système on dispose une cathode et une anode.

Une membrane anionique ne laisse passer que les anions, c'est-à-dire les ions Cl^- , et une membrane cationique ne laisse passer que les cations, c'est-à-dire les ions Na^+ .

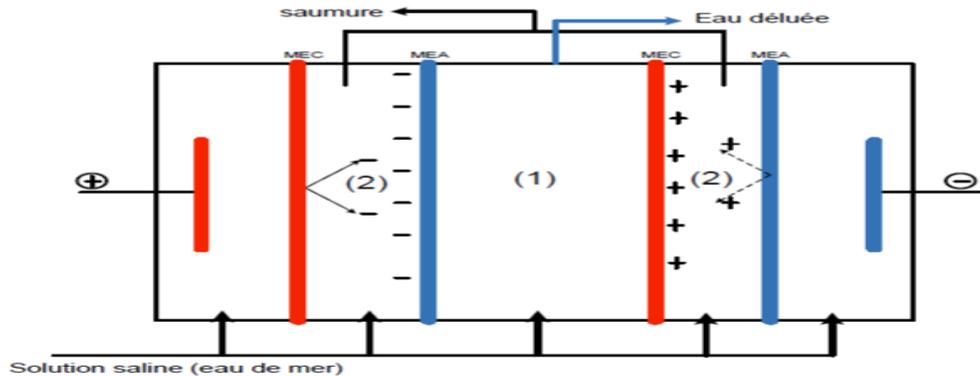


Figure II.3 : Principe de l'électrodialyse.

Contrairement aux membranes d'osmose inverse qui sont perméables à l'eau mais qui filtrent les ions, les membranes d'électrodialyse sont perméables aux ions et imperméables à l'eau. [6]

II.3. Les procédés thermiques :

II.3.1. La Congélation : [7]

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer.

Lorsqu'on congèle une solution aqueuse (eau de mer), les cristaux de glace formés sont constitués d'eau pure, le soluté ou polluant restant dans la phase liquide aqueuse.

On distingue deux types de procédés par congélation, cette dernière pouvant être « directe » ou « indirecte ».

Dessalement par congélation directe :

Le principe de la congélation directe repose sur la formation de cristaux de glace par contact direct entre un réfrigérant et l'eau de mer. Ce réfrigérant peut être l'eau de

mer elle-même : la chaleur est soustraite à la saumure par une évaporation flash sous pression réduite.

Dessalement par congélation indirecte :

Dans le cas de la congélation indirecte, le refroidissement est assuré par un échangeur de chaleur et une couche de glace est déposée sur les parois froides de l'échangeur.

Exemple : procédé de congélation par absorption de vapeur utilisant une pompe à chaleur à compression. (Figure II.4)

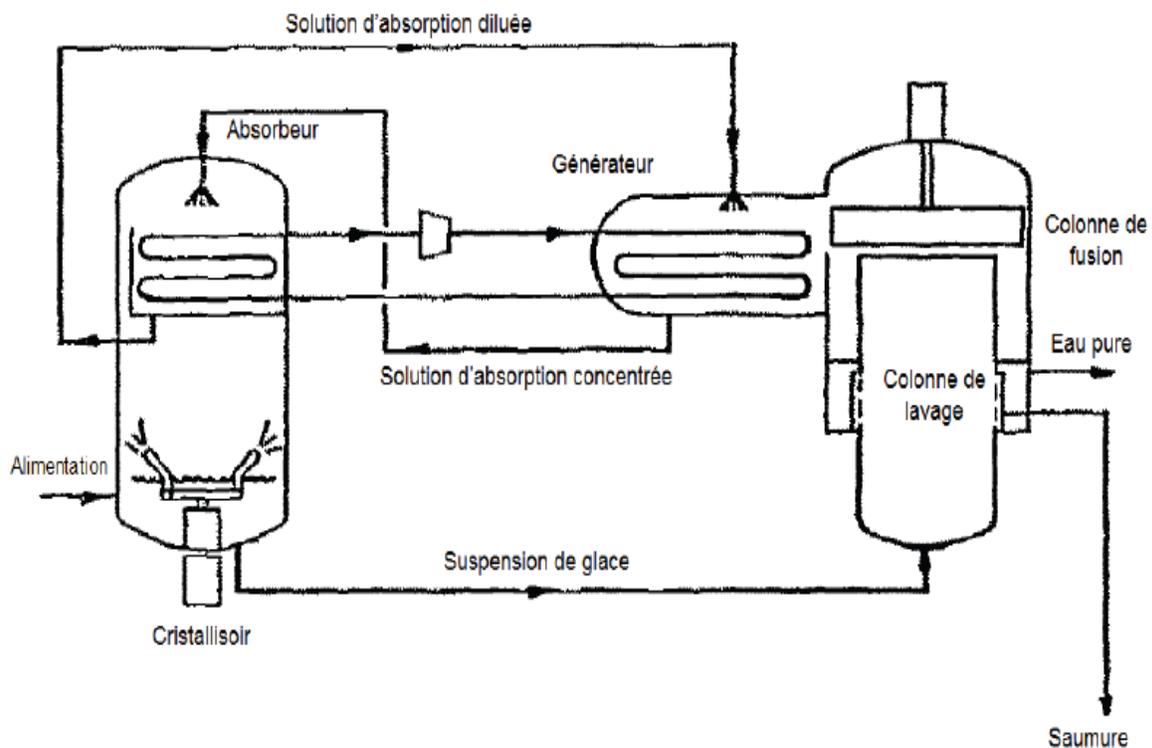


Figure II.4 : Un procédé de congélation.

II.3.2. La Distillation :

La distillation est une méthode de changement de phase qui consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons du soleil, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en

dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau ainsi obtenue pour obtenir une eau douce consommable.

a. Distillation à simple effet :

Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau de mer est chauffée pour en vaporiser une partie. La vapeur d'eau ainsi produite ne contient pas de sels. Il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide (figure II.5).

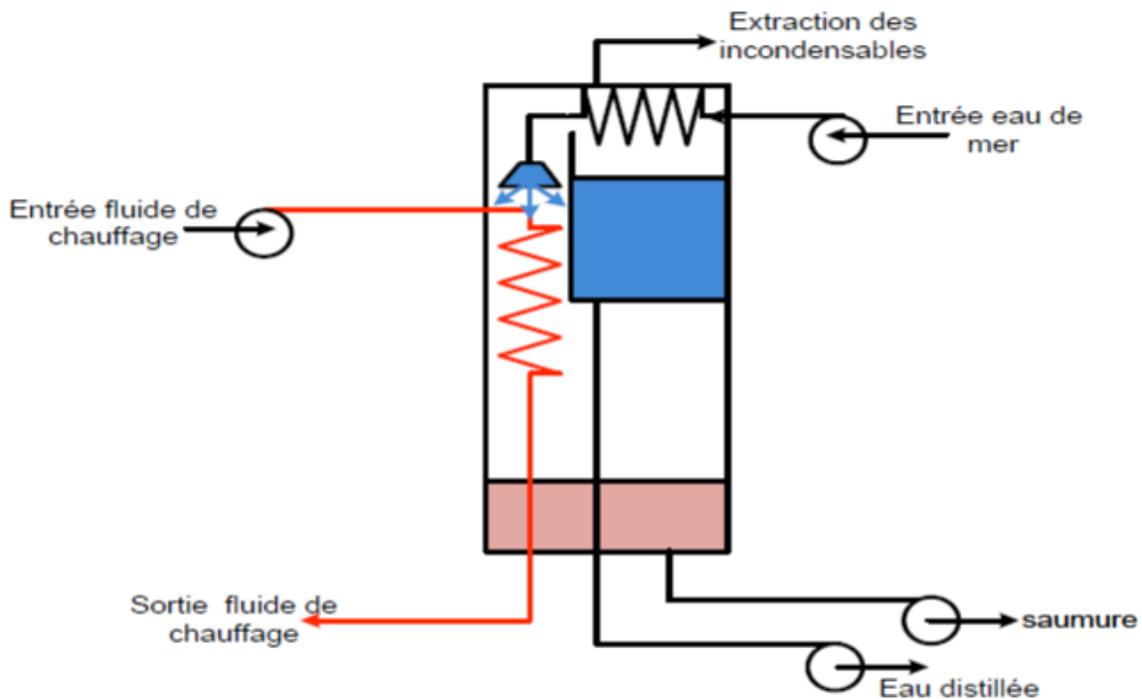


Figure II.5 :Schéma de la distillation simple effet.

Consommation d'énergie : [8]

$$Q = \lambda + K \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (II.3)$$

Q : consommation spécifique d'énergie calorifique (kj/kg).

λ : chaleur latente de vaporisation de l'eau (kj/kg).

K : rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite.

C_p : chaleur spécifique à pression constante de l'eau de mer ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$).

ΔT : différence de température entre l'eau de mer en ébullition et l'eau de mer à la sortie du condenseur ($^{\circ}\text{C}$).

b. Distillation à multi effets (MED): [9]

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de la distillation à effet simple (figure II.6). Le fluide de chauffage porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule où règne la température la plus haute. La vapeur générée par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où on maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition est décroissante avec la pression, on vaporise l'eau de mer présente dans la deuxième cellule, c'est le deuxième effet. On peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois.

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

Plusieurs technologies d'évaporateurs à multiples effets existent :

Les évaporateurs à faisceau de tubes noyés sont des évaporateurs dans lesquels les tubes où circule le fluide de chauffage sont plongés dans l'eau de mer (comme l'illustre la figure II.6)

Les évaporateurs à effets multiples à tubes horizontaux arrosés (figure II.7) sont les plus utilisés actuellement. Dans ces procédés, le fluide de chauffage s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau de mer à évaporer est injectée (arrosiers) de manière à s'écouler sous forme d'un film le plus uniformément possible sur l'extérieur des tubes.

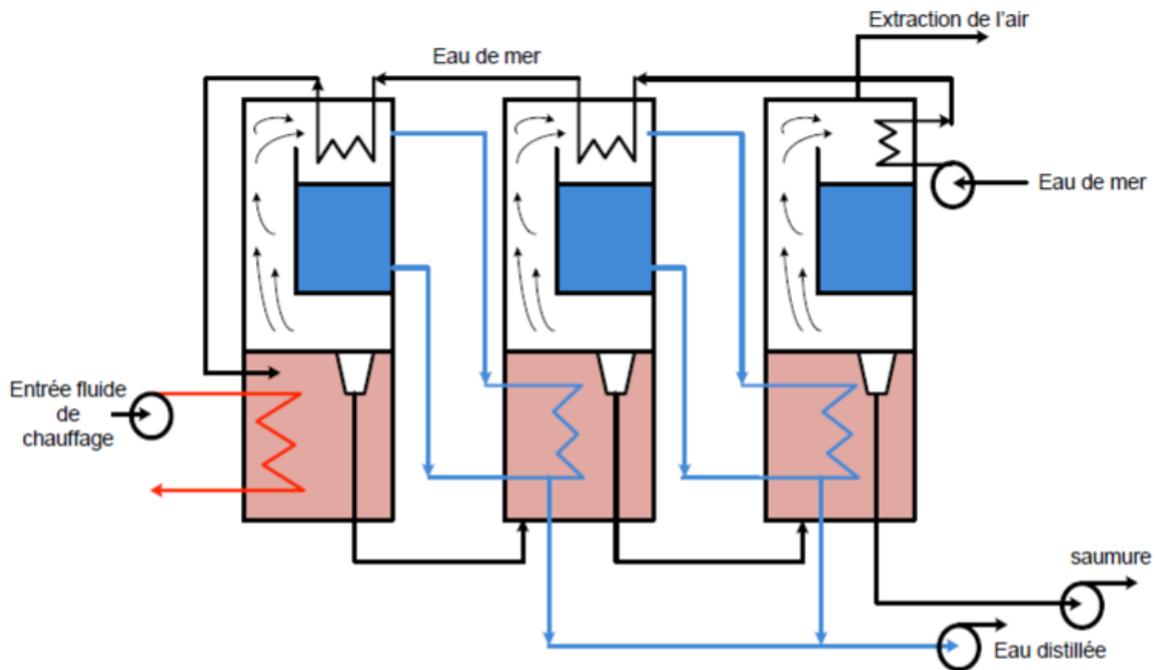


Figure II.6 : Schéma de principe de la distillation à effet multiple (évaporateurs à faisceau de tubes noyés)

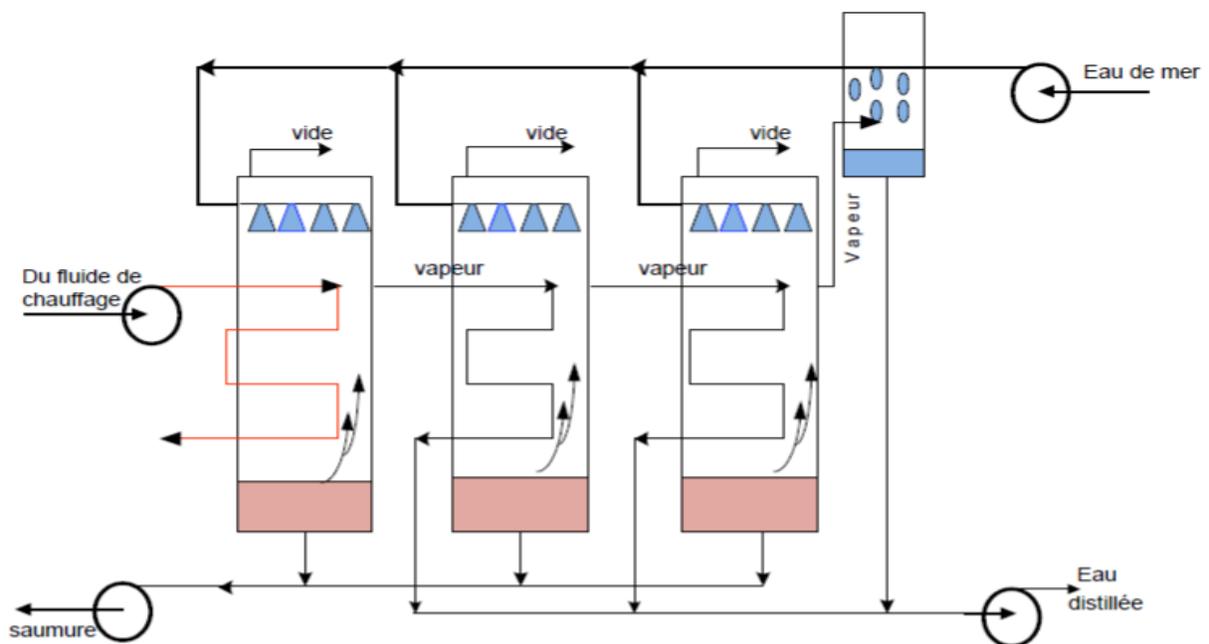


Figure II.7 : Schéma de la distillation multiple effets (tubes horizontaux arrosés)

Consommation d'énergie : [8]

La chaleur à fournir à une unité de distillation à multiple effet est uniquement celle qui est nécessaire pour réchauffer l'appoint d'eau de mer dans le premier effet et pour vaporiser la production de ce seul effet.

Si les productions des n effets sont identiques, la consommation spécifique de chaleur est, en négligeant les pertes et certains effet secondaire :

$$Q = (\lambda / n) + k.C_p.\Delta T \quad (11.4)$$

Avec :

Q : consommation calorifique spécifique d'eau douce produite (kj/kg).

λ : chaleur latente de vaporisation d'eau (kj/kg).

n : nombre d'effets de l'installation.

K : rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite.

ΔT : écart de température existant dans un effet entre l'eau de mer à la sortie du condenseur et l'eau en ébullition dans cet effet (°C).

C_p : chaleur spécifique de l'eau de mer (kj.kg⁻¹.°C⁻¹).

c. Distillation par compression de vapeur : [9]

Ce procédé a pour principe de récupérer la chaleur de condensation avec un apport d'énergie sous forme mécanique. On peut l'utiliser dans un évaporateur simple ou multiples effets.

L'eau à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte thermiquement isolé.

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.

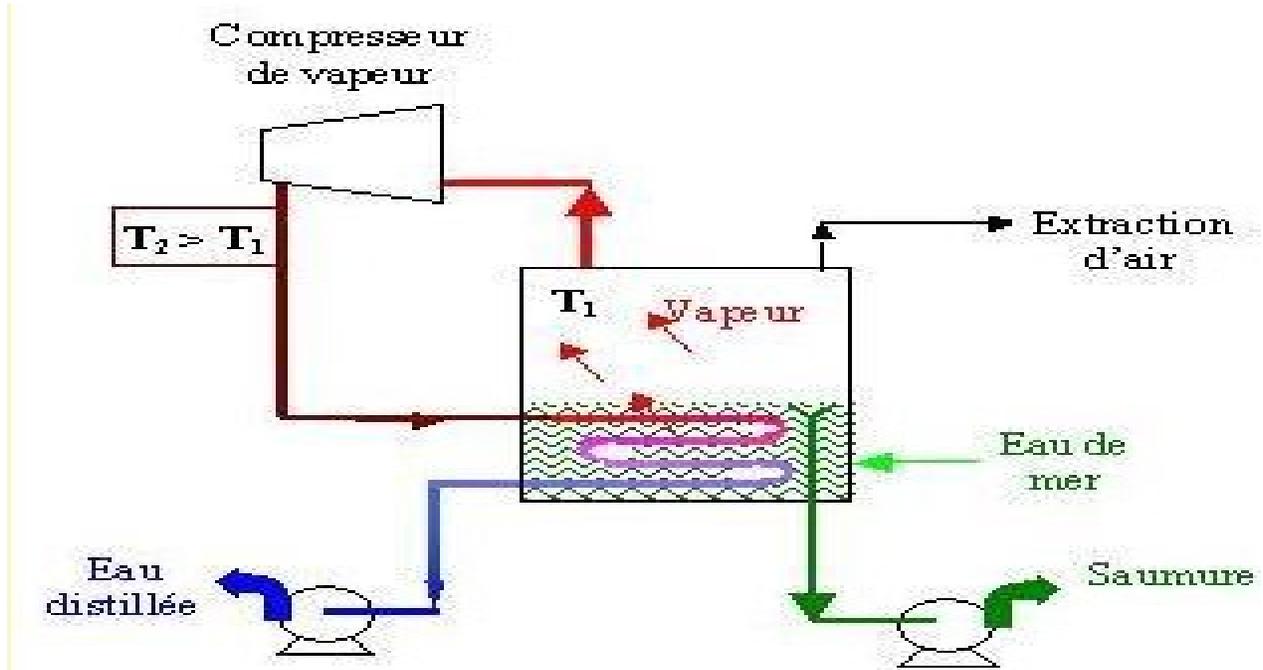


Figure II.8 : Schéma du procédé par compression de vapeur.

Consommation d'énergie : [8]

L'énergie consommée correspond à l'énergie mécanique d'entraînement du compresseur. Si on donne aux caractéristique de la vapeur, l'indice 1 à l'aspiration du compresseur et l'indice 2 au refoulement, l'énergie nécessaire pour comprimer adiabatiquement un volume de vapeur V_1 de la pression P_1 à la pression P_2 (volume V_2), est égale à :

Bilan énergétique :

$$m.h_1 + w = m.h_2 \tag{II.5}$$

La compression étant adiabatique on a :

$$T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{(\gamma - 1) / \gamma} \tag{II.6}$$

γ étant le rapport des chaleur spécifiques respectivement à pression et volume constant. Dans le cas de la vapeur d'eau, γ est égal à 1,32.

Développer l'équation (II.5), en tenant compte de la relation (II.6) avec une chaleur spécifique considérée constante ($C_{p1}=C_{p2}=C_p$) on donne :

$$W = m.(h_2-h_1) = m.C_p.(T_2 - T_1) = m.C_p.T_1.(T_2 / T_1 - 1) = m.C_p.T_1.((P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}-1)$$

donc :

$$W = m.C_p.T_1.((P_2 / P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}-1)$$

d. Distillation à multi flash (MSF) :

Ce procédé a été développé dans les années 70 et est actuellement la technique la plus répandue dans les stations à grande production. Il comporte deux types de système :

- **Distillation à multi flash avec recirculation de saumure : [10]**

Il se distingue par un évaporateur divisé en deux parties, zone de dissipation de chaleur et zone de récupération de chaleur. En revanche l'eau de mer rentre en premier lieu à la zone de dissipation, puis en sortant, l'eau se mélange avec la saumure pour enfin s'introduire dans le réchauffeur (figure II.9).

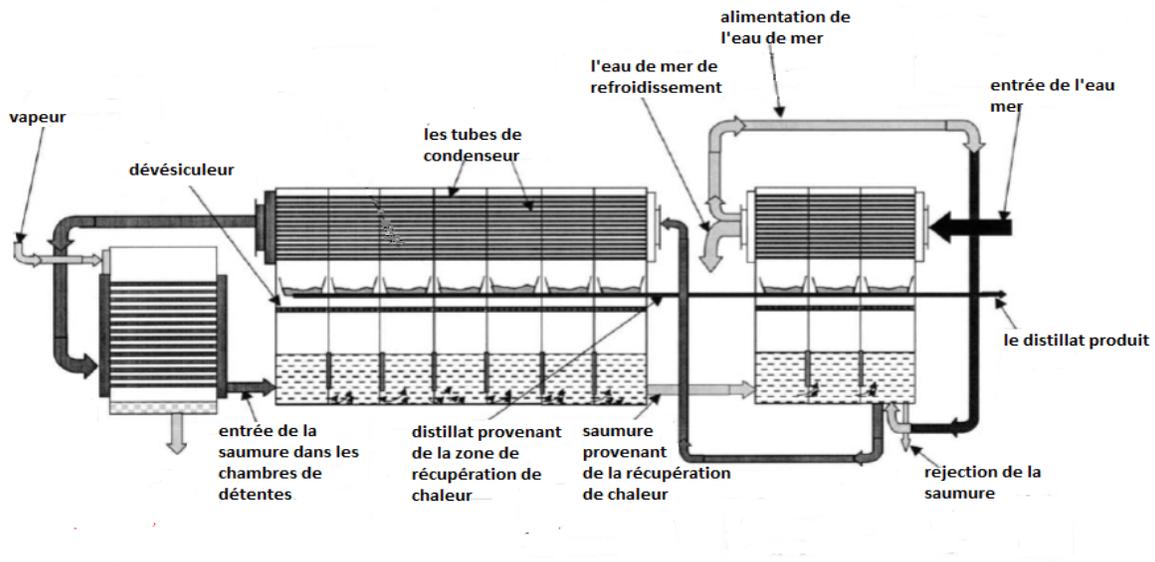


Figure II.9 : Schéma du procédé MSF à recirculation de la saumure.

- **Distillation à multi flash (MSF) à cycle direct : [10]**

Il n'y a pas de zone de dissipation de chaleur, l'eau de mer entre directement dans la zone de récupération de chaleur, préchauffé en passant par le condenseur, est finalement chauffé dans le réchauffeur et qui descend à travers les chambre de détente, au dernier étage le flux total de la saumure est rejeté vers l'extérieur (figure II.10).

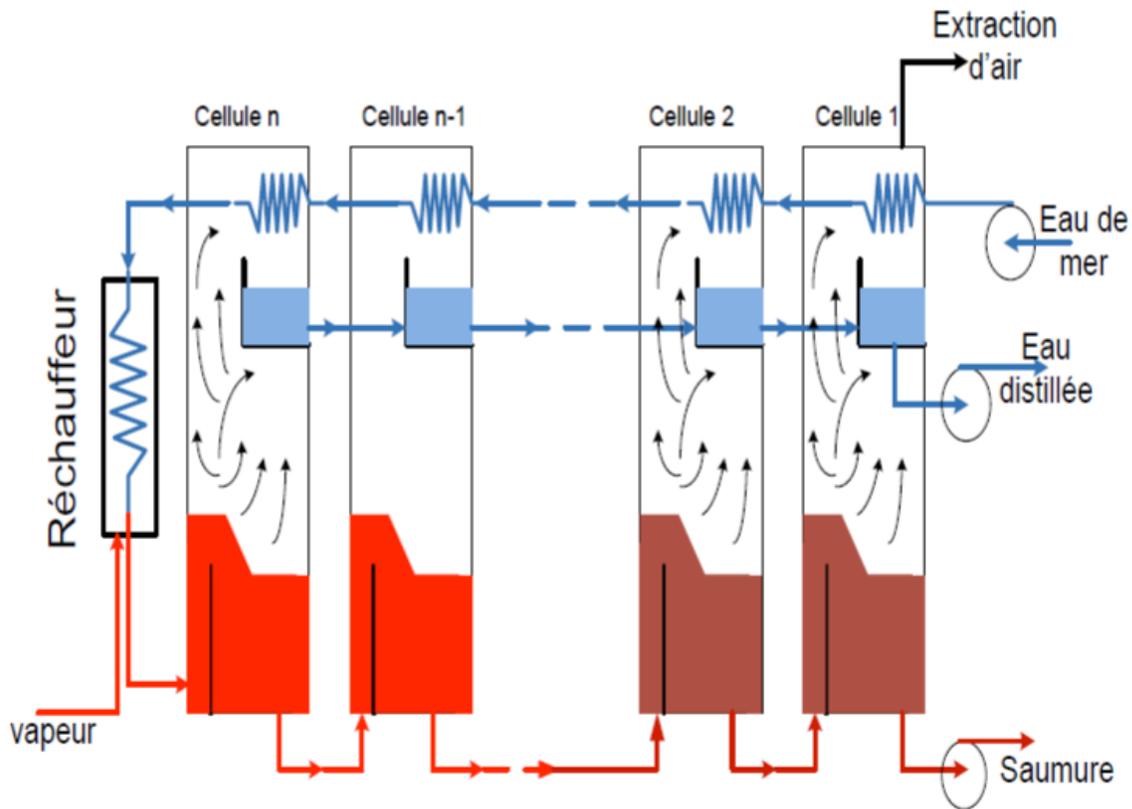


Figure II.10 : Schéma du procédé MSF à cycle direct.

En principe, ces deux systèmes ont le même fonctionnement et se fait par la manière suivante :

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. L'eau liquide est recueillie dans des bacs en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré.

Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

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 la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité. On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte [9].

En conclusion, voici un tableau qui montre quelque comparaison entre les procédés cités.

Comparaison	MSF	MED	MED-CV	CV	OI	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 MSF	Capacité Robustesse	Simplicité	Modularité	Consommation d'énergie faible
Inconvénients	Investissement, consommation	Capacité plus faible que MSF	Consommation	Capacité limitée	Fragilité	Il ne peut pas être utilisé pour l'eau à forte salinité

Tableau. II.1 : comparaison entre les procédés de dessalement [11].

Chapitre III

Modèle de calcul des paramètres de performance d'une station MSF

CHAPITRE III : Modèle de calcul des paramètres de performance d'une station MSF

Le modèle MSF simplifié est un outil très utile pour obtenir une conception rapide de données, l'évaluation des performances du système, et le développement d'une bonne estimation initiale pour modèles mathématiques plus détaillés. Ce modèle n'a pas besoin de solution itérative et nécessite un effort de calcul minimal.

III.1. Hypothèses :

- La Chaleur spécifique C_p est constante pour tous les liquides.
- Chute de température de la saumure par étage est constante.
- Diminution de température dans le condenseur est la même pour chaque étage.
- La chaleur latente de vaporisation dans chaque étage est supposée égale à la valeur de celle de la température moyenne.
- Les gaz non condensables ont un effet négligeable sur le processus de transfert de chaleur.
- La température de l'eau de mer d'alimentation quittant la section de rejection de chaleur est égale à la température de la saumure dans le dernier étage.

III.2. Les paramètres de performance : [1]

La résolution se fait par la détermination des trois paramètres de performances ci-dessous :

- **Le rendement thermique** : qui est le rendement exprimé par le rapport du débit du distillat sur le débit du réchauffement, donné par l'expression suivante :

$$PR = M_d / M_s \quad (III.1)$$

- **La surface spécifique** : elle représente le rapport entre la somme des surfaces des deux zones d'échange sur le débit du distillat ainsi calculé :

$$sA = (S_b + S_c) / M_d \quad (III.2)$$

- **Le débit spécifique d'alimentation** : c'est le rapport entre le débit du refroidissement sur le débit du distillat :

$$sM_{cw} = M_{cw} / M_d \quad (III.3)$$

III.3. Les principaux paramètres thermodynamiques du fonctionnement : [1]

Pour mettre en évidence ces paramètres nous avons opté au schéma représentatif suivant :

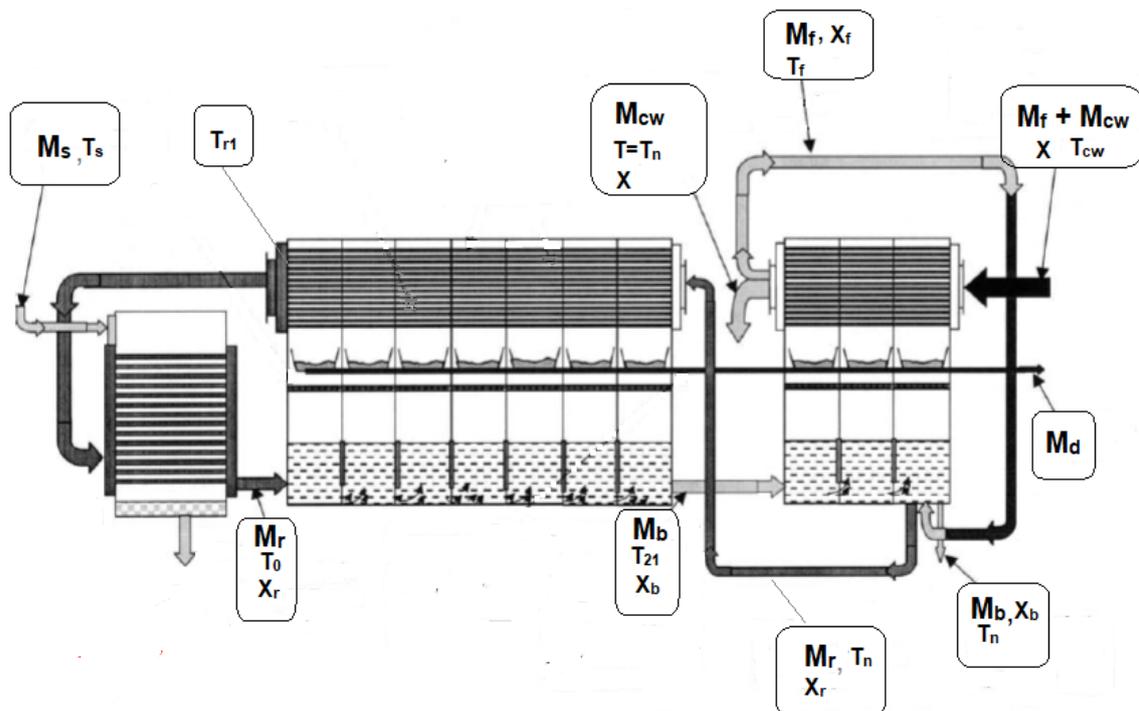


Figure III.1 : Schéma explicatif d'une station MSF avec recirculation de saumure.

III.4. Les paramètres à calculer pour déterminer ceux des performances :

III.4.1. Les paramètres thermiques :

T_i : représente la température de l'étage i .

T_0 : la température maximale sortante du réchauffeur final.

T_n : la température du dernier étage.

T_s : la température du réchauffement dans le réchauffeur final.

ΔT_d : la chute de température dans le dévésiculateur ayant une valeur négligeable.

La chute de température par étage :

$$\Delta T = (T_0 - T_n) / n \quad (III.4)$$

La température moyenne dans l'évaporateur :

$$T_{av} = (T_0 + T_n) / 2 \quad (III.5)$$

La température de la saumure à l'intérieur des tubes condenseurs :

$$T_{ri} = T_n + (n - j) \Delta T - (i - 1) \Delta T \quad (III.6)$$

La chute de température est la même pour celle saumure et celle à l'intérieure des tube condenseurs :

$$\Delta T_i = \Delta T_{ri} \quad (III.7)$$

La chute de température de l'eau de mer dans la section de rejection de chaleur :

$$\Delta T_{ji} = (T_n - T_{cw}) / j \quad (III.8)$$

La température de l'eau de mer dans la section de rejection de chaleur :

$$T_{ji} = T_{cw} + (n - i + 1) \Delta T_{ji} \quad (III.9)$$

La température de l'étage i :

$$T_i = T_0 - i \cdot \Delta T \quad (III.10)$$

CHAPITRE III : Modèle de calcul des paramètres de performance d'une station MSF

La température de condensation dans l'étage i :

$$T_{vi} = T_i - BPE_i - NEA_i - \Delta t_{di} \quad (III.11)$$

Élévation du point d'ébullition dans le dernier étage :

$$BPE_n = X_n \times (B_n + (X_n \times C_n)) \cdot 10^{-3} \quad (III.12)$$

Élévation du point d'ébullition dans le premier étage :

$$BPE_1 = X_r \times (B_1 + (X_r \times C_1)) \cdot 10^{-3} \quad (III.13)$$

Différence de température due au déséquilibre thermique du dernier étage :

$$NEA_n = (0.9784)^{T_n-1} \cdot (15.7378)^{H_n-1} \cdot (1.3777)^{V_b \cdot 10^{-6}} \quad (III.14)$$

Où V_b représente le débit massique par unité de la largeur de la chambre.

Différence de température due au déséquilibre thermique du premier étage :

$$NEA_1 = (0.9784)^{T_0} \cdot (15.7378)^{H_1} \cdot (1.3777)^{V_b \cdot 10^{-6}} \quad (III.15)$$

La différence de température logarithmique moyenne dans le réchauffeur :

$$\Delta TLM)_b = ((T_s - T_0) - (T_s - T_{r1})) / \ln((T_s - T_0) / (T_s - T_{r1})) \quad (III.16)$$

La différence de température logarithmique moyenne dans la zone de récupération de chaleur :

$$\Delta TLM)_r = ((T_{v1} - T_{r1}) - (T_{v1} - T_{r2})) / \ln((T_{v1} - T_{r1}) / (T_{v1} - T_{r2})) \quad (III.17)$$

La différence de température logarithmique moyenne dans la zone de dissipation de chaleur :

$$\Delta TLM)_j = ((T_{vn} - T_{cw}) - (T_{vn} - T_{jn})) / \ln((T_{vn} - T_{cw}) / (T_{vn} - T_{jn})) \quad (III.18)$$

Le coefficient global de transfert de chaleur :

$$U = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} \times (T_v) + 1.5971 \times 10^{-5} \times (T_v)^2 - 1.9918 \times 10^{-7} \times (T_v)^3 \quad (III.19)$$

Le coefficient de transfert de chaleur dans la zone de dissipation de chaleur :

CHAPITRE III : Modèle de calcul des paramètres de performance d'une station MSF

$$U_j = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} \times (T_{vn}) + 1.5971 \times 10^{-5} \times (T_{vn})^2 - 1.9918 \times 10^{-7} \times (T_{vn})^3 \quad (\text{III.19})$$

Le coefficient de transfert de chaleur dans le réchauffeur final :

$$U_b = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} \times (T_s) + 1.5971 \times 10^{-5} \times (T_s)^2 - 1.9918 \times 10^{-7} \times (T_s)^3 \quad (\text{III.19})$$

Le coefficient de transfert de chaleur dans la zone de récupération de chaleur :

$$U_r = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} \times (T_{v1}) + 1.5971 \times 10^{-5} \times (T_{v1})^2 - 1.9918 \times 10^{-7} \times (T_{v1})^3 \quad (\text{III.19})$$

ρ_{bi} : est la masse volumique de la saumure dans l'étage i. sa valeur est prise par l'annexe du livre

λ_s et λ_{av} : sont respectivement les chaleurs latentes de l'eau aux températures T_s et T_{av}

Le rapport de la chaleur sensible sur la chaleur latente :

$$y = C_p \cdot \Delta T / \lambda_{av} \quad (\text{III.23})$$

III.4.2. Les paramètres de bilan :

Les expressions ci-dessous ont été déduites par les bilans énergétiques et massiques :

Le débit d'eau d'alimentation qui rentre directement au dernier étage, M_f :

$$M_f = X_b / (X_b - X_f) \cdot M_d \quad (\text{III.24})$$

Débit de saumure recyclée, M_r :

$$M_r = M_d / (1 - (1 - y)^n) \quad (\text{III.25})$$

Le débit de vapeur réchauffant dans le réchauffeur final, M_s :

$$M_s = M_r \cdot C_p \cdot (T_0 - T_{r1}) / \lambda_s \quad (\text{III.26})$$

Le débit d'eau de refroidissement ayant comme seul but, plus d'extraction de la chaleur de saumure :

$$M_{cw} = (M_s \cdot \lambda_s - M_f \cdot C_p \cdot (T_n - T_{cw})) / (C_p \cdot (T_n - T_{cw})) \quad (\text{III.27})$$

La salinité de la saumure sortante du dernier étage n :

$$X_r = (X_f \cdot M_f + (M_r - M_d) \cdot X_n - M_b \cdot X_b) / M_r \quad (III.28)$$

X_b : La salinité de la saumure rejetée vers la mer ; considérée constante.

X_n : la salinité de saumure dans le dernier étage.

III.4.3. Les paramètres de surface :

La surface totale d'échange de chaleur dans le réchauffeur final :

$$A_b = M_s \cdot \lambda_s / (U_b \cdot \Delta TLM)_b \quad (III.29)$$

La surface totale d'échange de chaleur dans la zone de récupération de chaleur :

$$A_r = M_r \cdot C_p \cdot (T_{r1} - T_{r2}) / (U_r \cdot \Delta TLM)_r \quad (III.30)$$

La surface d'échange de chaleur des tubes situant dans un étage de la zone de dissipation de chaleur :

$$A_j = (M_f + M_r) C_p \cdot (T_{jn} - T_{cw}) / (U_j \cdot \Delta TLM)_j \quad (III.31)$$

La surface totale d'échange de chaleur dans l'évaporateur :

$$A_c = (n - j) A_r + j \cdot A_j \quad (III.32)$$

III.5. Le dimensionnement et les bilans d'un étage :

III.5.1. Les bilans :

Le débit du distillat produit dans l'étage i :

$$D_i = M_r \cdot y \cdot (1 - y)^{(i-1)} \quad (III.33)$$

Le débit total produit depuis le premier étage jusqu'à l'étage i :

$$\sum D_i = M_r (1 - (1 - y)^n) \quad (III.34)$$

Le débit de saumure dans l'étage i :

$$B_i = M_r - \sum_{k=1}^i D_k \quad (III.35)$$

III.5.2. Dimensionnement :

La hauteur du passage de la saumure dans l'étage i.

$$GH_i = (M_r - \sum_{k=1}^{i-1} D_k) \cdot (2 \cdot \rho_{bi} \cdot \Delta P_i)^{(-0.5 / Cd \cdot W)} \quad (III.36)$$

La hauteur du bassin de la saumure :

$$H_i = 0.2 + GH_i \quad (III.37)$$

La largeur des étages :

$$W = M_r / V_b \quad (III.38)$$

V_b : est la vitesse de montée de la vapeur pris par l'annuaire de la station.

La longueur d'un étage :

$$L = D_n / (\rho_{vn} \cdot V_{vn}^3 \cdot W) \quad (III.39)$$

La surface de la base d'un étage :

$$As = L \cdot W \quad (III.40)$$

III.6. Le modèle de calcul: [1]

La résolution se déroule comme suit :

- Les débits de l'eau de mer d'alimentation M_f , et de la saumure M_r , sont obtenus à partir des équations (III.24) et (III.25), respectivement.
- La chute de température par étage ΔT_{est} calculée à partir de l'équation (III.4).
- Les températures des étages 1 et 2, T_1 et T_2 , sont calculées à partir de l'équation (III.10).
- Les températures de l'eau de mer sortant des condenseurs du premier et du deuxième étage, T_{r1} et T_{r2} , sont déterminés à partir de l'équation (III.6). Aussi, la température de l'eau de mer sortant du condenseur du dernier étage, T_{jn} , est calculée à partir de l'équation (III.9).

- La température moyenne de l'étage, T_{av} , est calculée à partir de l'équation (III.5), et la valeur de chaleur latente correspondante est obtenue à partir d'une application Android « TLV toolBox ».
- Le rapport entre la chaleur sensible et la chaleur latente, y , est calculé à partir de l'équation (III.23).
- Les débits de saumure de recyclage, M_r , Eau de mer de refroidissement, M_{cw} , et la vapeur, M_s , sont calculés à partir des équations (III.25), (III.27) et (III.26), respectivement.
- La zone de transfert de chaleur pour le préchauffeur de saumure (A_b) le condenseur de premier étage dans la section de récupération (A_r) et le dernier condenseur dans la section de rejet (A_j) sont calculés à partir des équations. (III.29), (III.30) et (III.31), respectivement.
- La longueur, la largeur et les sections transversales de la chambre de détente sont déterminées à partir des équations. (III.38), (III.39), (III.40). De plus, la hauteur du bassin de saumure, H , et la hauteur de l'orifice de passage de saumure dans l'étage i , GH_i , sont obtenus à partir des équations. (III.36) et (III.37).
- Les paramètres de performance du système, PR , sA et sM_{cw} sont calculés à partir des équations. (III.1), (III.2), (III.3).

III.7. Ce modèle requiert les données ci-dessous :

- Débit total du distillat, M_d .
- Nombre total d'étages (récupération et rejet). $n-j$
- Nombre d'étages de la zone de dissipation de chaleur, j .
- Température de l'eau de mer à l'admission, T_{cw} .
- Température maximale de la saumure, T_0 .
- Température de la vapeur, T_s .
- Température de la saumure du dernier étage T_n .
- Concentration en sel de saumure, X_b .

CHAPITRE III : Modèle de calcul des paramètres de performance d'une station MSF

- Concentration de sel d'eau de mer à l'admission, X_f .
- Capacité calorifique des fluides liquides, C_p .
- Le rapport du débit réel sur le débit théorique, C_d .
- Vitesse de la vapeur dans le dernier étage, V_{vn} .
- Débit massique de saumure par largeur d'étage, V_b .

Chapitre IV

Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

IV.1. Introduction :

Ayant pour but un système MSF plus rentable et performant, une étude thermodynamique sera faite afin de savoir l'influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station de dessalement MSF.

Pour ce faire, nous avons opté au modèle de calcul déjà décrit dans le chapitre précédant en faisant d'une part, varier la température maximale, T_0 a la sortie du réchauffeur final. Car tous les paramètres en dépendent de cette température. D'autre part, le débit du distillat sera pris comme étant constant.

Pour cela nous avons eu recours au logiciel Excel pour exécuter les opérations voulues. Cependant avec la variation de la température, certains paramètres varient d'une manière complexe, difficile à déterminer, ainsi donc, d'autres hypothèses nécessaires seront faites de la sorte :

- La température de l'eau de mer, T_{cw} , est constante.
- La chute de température $\Delta T)_{T_0}$ entre un étage et son succédant est constante au cours de l'évaluation.
- La salinité de l'eau de mer, X_f , est constante.
- La Salinité sortie saumure, X_b , est constante.
- Ce rapport entre le débit massique d'eau réel et le débit théorique dans le dévésiculeur est constant.
- T_s prise comme étant supérieure à T_0 par 10°C .
- V_b le débit massique de saumure par unité de largeur est constant.
- Le nombre d'étage constant et égal à, $n = 24$

IV.2. Vérification du calcul :

Afin de valider le calcul effectué au préalable, on fera ci-dessous un tableau comparatif de nos résultats avec ceux du livre[1], d'où le calcul a été pris pour une température maximale de 106°C .

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

	PR	sA	sM_{cw}
Valeurs calculées :	7.20	258,31	2.40
Valeurs trouvées dans le livre [1] :	7.21	259,6	2.41

Tableau IV.1 : tableau comparatif entre les résultats calculés et ceux trouvés dans le livre.

Une légère différence de valeur s'est apparue au niveau des trois paramètres. Cela est dû à la chaleur latente prise pour la température du réchauffement T_s .

La chaleur latente à $T_s=116^\circ$ pour l'eau c'est $\Lambda_s = 2213.27$ (kJ/kg. k)

Sauf que, dans le livre la chaleur latente est $\Lambda_s = 2222.33$ (kJ/kg. k)

IV.3. Les résultats obtenus avec l'Excel :

Les résultats seront présentés sous forme de tableaux indiquant la variation de tous les paramètres thermodynamiques régissant dans les équipements essentiels de la station de dessalement.

Comme déjà dit, les composants essentiels d'une station de dessalement sont :

1) Les deux zones d'échange dans le condenseur :

- Zone de récupération de chaleur
- Zone de dissipation de chaleur

2) Le réchauffeur final

Sachant que l'étude consiste essentiellement à connaître la variation des trois paramètres de performance qui sont :

Le rendement thermique PR.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

La surface spécifique d'échange s_A .

Le débit spécifique de refroidissement sM_{cW} .

Par suite, un programme de calcul a été fait d'une manière à ce que chaque paramètre soit traité séparément de la manière suivante :

IV.3.1. Le rendement thermique PR :

T0	Tn	Tr1	ΔT	Tav	λ_s	λ_{av}
98	32	89,75	2,75	65	2235,11	2345
100	34	91,75	2,75	67	2229,7	2340
102	36	93,75	2,75	69	2224,6	2335
104	38	95,75	2,75	71	2218,78	2330
106	40	97,75	2,75	73	2213,27	2325
108	42	99,75	2,75	75	2207,72	2320
110	44	101,75	2,75	77	2202,15	2315
112	46	103,75	2,75	79	2196,54	2310
114	48	105,75	2,75	81	2190,88	2305
116	50	107,75	2,75	83	2185,19	2300
118	52	109,75	2,75	85	2179,47	2295
120	54	111,75	2,75	87	2173,7	2290

La suite du tableau :

Y	Mr	Ms	Md	PR
0,00490	3 405,05	52,536	378,8	7,21
0,00491	3 398,19	52,557	378,8	7,21
0,00492	3 391,34	52,571	378,8	7,21
0,00493	3 384,48	52,603	378,8	7,20
0,00494	3 377,62	52,627	378,8	7,20
0,00495	3 370,76	52,652	378,8	7,19
0,00497	3 363,91	52,678	378,8	7,19
0,00498	3 357,05	52,705	378,8	7,19
0,00499	3 350,19	52,733	378,8	7,18
0,00500	3 343,34	52,762	378,8	7,18

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

0,00501	3 336,48	52,792	378,8	7,18
0,00502	3 329,62	52,823	378,8	7,17

Tableau IV.2 : la variation du rendement thermique en fonction de la température maximale T_0 .

a. Le graphe du débit de saumure, M_r :

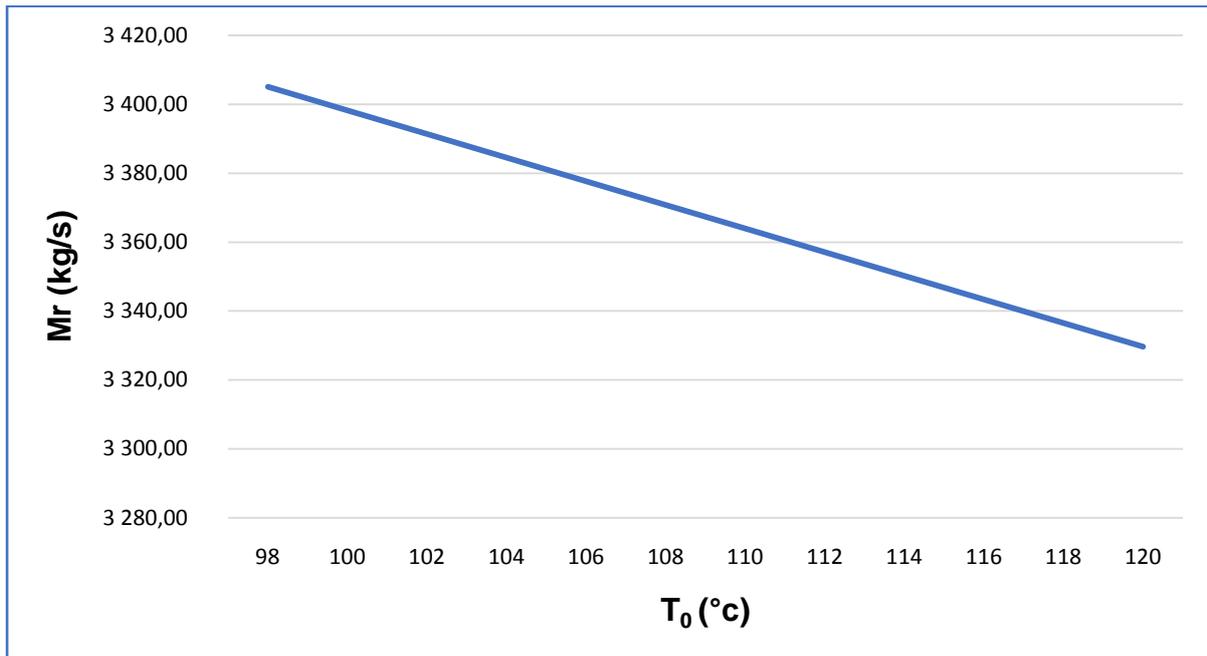


Figure IV.1: variation du débit de la saumure M_r en fonction de la température T_0 .

- **Discussion :**

Cette droite représente l'effet de la température maximale, T_0 , sur le débit de recirculation de la saumure, M_r . Elle débute par la valeur maximale $M_r=3405$ pour la plus basse température $T_0=98^\circ$ diminuant linéairement et légèrement jusqu'à $M_r=3329$ pour la plus haute température $T_0=120^\circ$.

En revenant à l'expression du débit de recirculation de saumure ainsi donnée :

$$M_r = M_d / (1 - (1 - y)^n)$$

On trouve que l'origine de cette diminution est bien le rapport spécifique de la chaleur sensible sur la chaleur latente, y , vu que le débit du distillat est constant.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Ayant un comportement croissant avec l'augmentation de la température, le rapport spécifique fait diminuer le débit de saumure M_r nécessaire pour la production d'une même quantité du distillat. Car le rapport spécifique détermine la capacité à faire évaporer 1kg d'eau avec une diminution minimale de la chaleur sensible entre deux étages successifs. Par conséquent, plus le rapport spécifique est grand plus le débit de saumure à recycler sera moindre.

b. Le graphe du débit du réchauffement M_s :

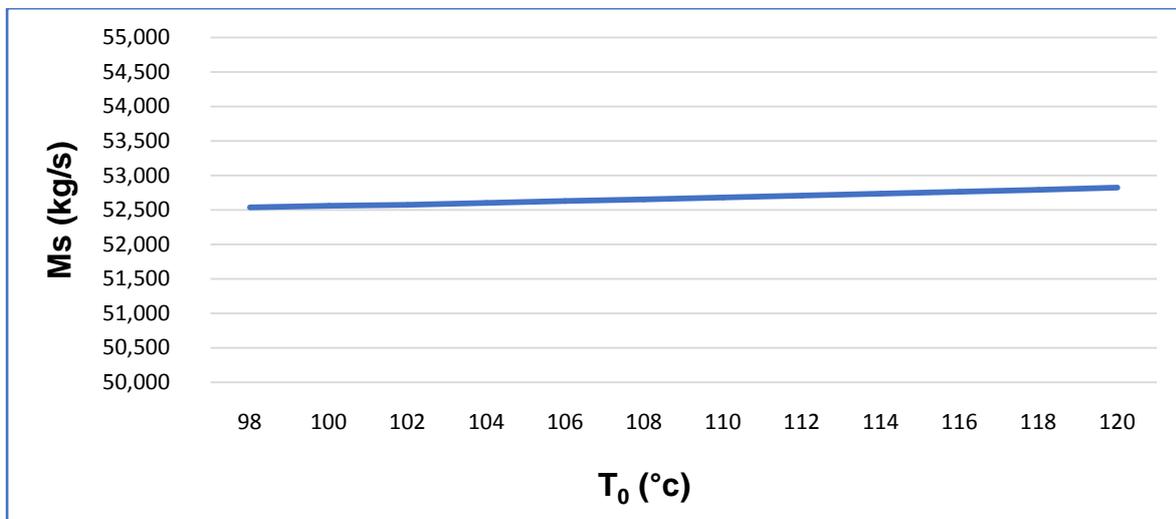


Figure IV.2: variation du débit de réchauffement MS en fonction de T_0 .

- **Discussion :**

Le graphe montre la variation du débit du réchauffement, M_s , en fonction de la température maximale, T_0 . La courbe est sous forme d'une droite légèrement croissante de la valeur $M_s=52.53$ pour $T_0=98^\circ$ jusqu'à $M_s=52.82$ pour $T_0=120^\circ$.

Ayant pris pour hypothèse la chute de température, ΔT , constante, à priori, le rendement thermique serait approximativement égal à la valeur n/j . ce qui donne $PR=M_d/M_s=n/j$, par conséquent M_s serait plutôt, légèrement décroissant, car en réalité, avec ΔT non constante, la température maximale T_0 a une influence considérable sur le rendement PR et elle peut lui faire augmenter jusqu'à la valeur $PR+1$ ou plus, pour le même système avec le même nombre d'étages.

c. Le graphe du rendement thermique PR :

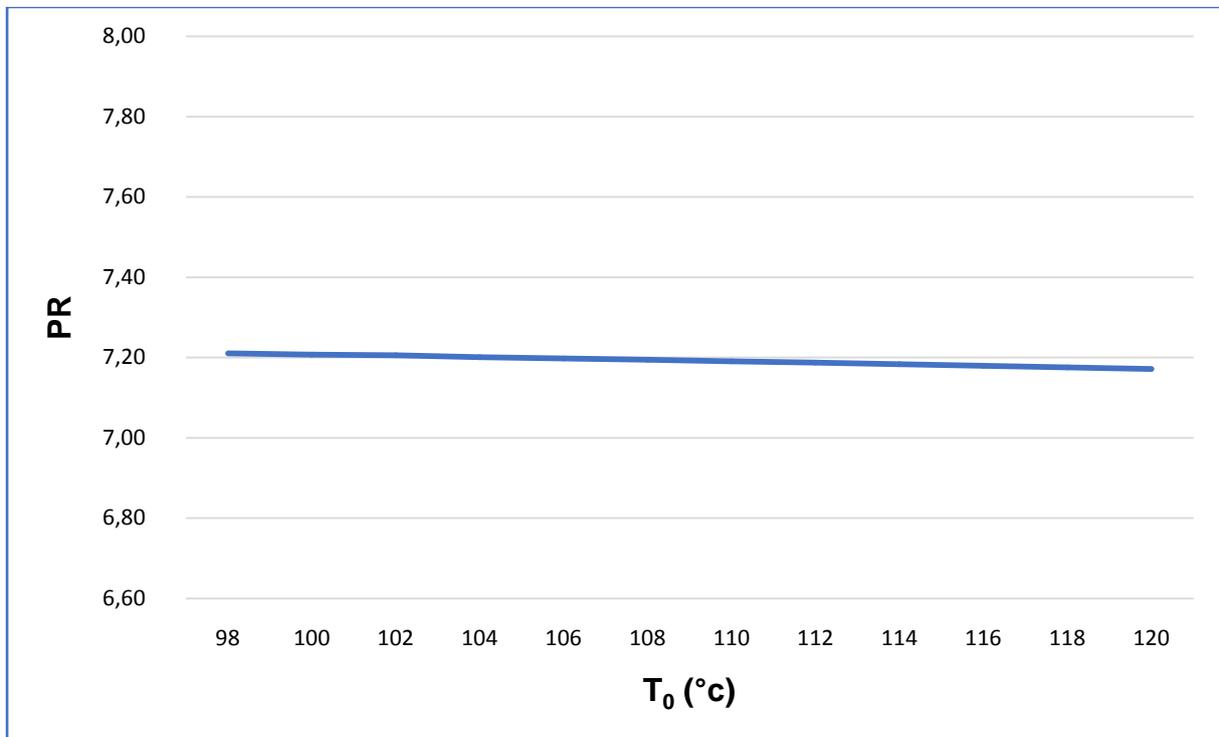


Figure IV.3: variation du rendement thermique PR en fonction de T_0 .

• Discussion :

Ce graphe représente l'influence de T_0 sur le rendement thermique PR. La courbe diminue légèrement et linéairement de PR=7.21 pour $T_0=98^\circ$ jusqu'à PR=7.17 pour $T_0=120^\circ$. Une influence négligeable de la température maximale vu que PR varie entre 6 et 10, avec une valeur de 8 en générale dans de telles station MSF avec recirculation de saumure.

ΔT étant constante, la valeur de PR serait approximative de $PR=n/j=7$. Avec la variation de T_0 , ΔT aurait une autre valeur en étant toujours constante entre les étages, quoique nous l'avons pris comme étant constante, ce qui a donné au final une influence négative sur le rendement thermique au lieu d'une influence avantageuse.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

IV.3.2. Le débit spécifique d'eau de refroidissement SM_{cw} :

T0	Tn	Tcw	Mf	Ms	λ_s	Cp	Mcw
98	32	25	947	52,54	2235,11	4,18	3 066,10
100	34	25	947	52,56	2229,7	4,18	2 168,01
102	36	25	947	52,57	2224,6	4,18	1 596,50
104	38	25	947	52,60	2218,78	4,18	1 200,84
106	40	25	947	52,63	2213,27	4,18	910,69
108	42	25	947	52,65	2207,72	4,18	688,81
110	44	25	947	52,68	2202,15	4,18	513,64
112	46	25	947	52,70	2196,54	4,18	371,84
114	48	25	947	52,73	2190,88	4,18	254,70
116	50	25	947	52,76	2185,19	4,18	156,30
118	52	25	947	52,79	2179,47	4,18	72,48
120	54	25	947	52,82	2173,7	4,18	0,22

Suite du tableau sM_{cw} :

Mcw	Md	SM_{cw}
3 066,10	378,8	8,09
2 168,01	378,8	5,72
1 596,50	378,8	4,21
1 200,84	378,8	3,17
910,69	378,8	2,40
688,81	378,8	1,82
513,64	378,8	1,36
371,84	378,8	0,98
254,70	378,8	0,67
156,30	378,8	0,41
72,48	378,8	0,19
0,22	378,8	0,00

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Tableau IV.3 : le débitspécifique de refroidissement que requiert chaque température T_0 .

a. Le graphe du débit spécifique de refroidissements M_{cw} :

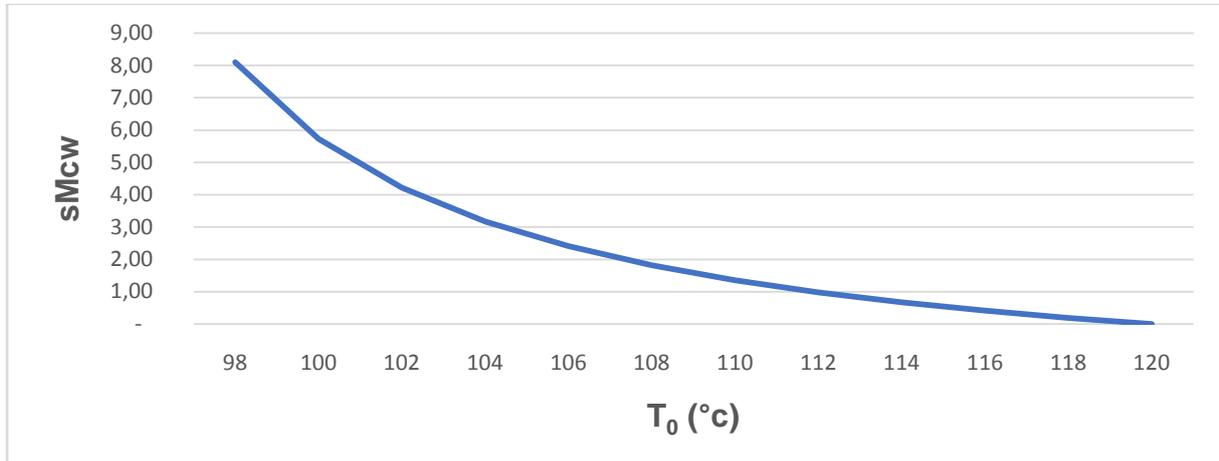


Figure IV.4: la variation du débit spécifique sM_{cw} en fonction de la température maximale T_0 .

- **Discussion :**

La figure montre l'effet considérable qu'exerce la température maximale, T_0 sur le débit spécifique de refroidissement, M_{cw} . La courbe décroît d'une manière considérable d'une valeur maximale, $sM_{cw}=8.09$ pour la plus basse température $T_0=98$, jusqu'à atteinte d'une valeur rapprochant de zéro, $sM_{cw}=0.00058$, pour la plus haute température $T_0=120^\circ$. ce qui signifie l'absence totale du besoin d'un système de refroidissement pour les températures les plus élevées.

Pourquoi cette baisse ? si on revient au bilan énergétique dans un étage donné on obtient l'équation suivante :

$$(M_f + M_{cw}) \cdot \Delta T = M_{di} \cdot \lambda_{vi}$$

Bien évidemment, plus T_0 est grande plus la température au sein du condenseur est élevée, ce qui implique une chaleur latente de condensation moindre. Par conséquent le débit de refroidissement se baisse avec l'augmentation de la température maximale vu que $\Delta T)_{T_0}$, M_f et m_{di} sont constants.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Mais avec une vraie valeur de $\Delta T)_{T_0}$, et un ΔT entre étages variable, la décroissance du débit spécifique de refroidissement serait moins importante.

IV.3.3. Le tableau de la surface totale spécifique pour l'échange de chaleurs A :

La surface spécifique est fonction de plusieurs paramètres à déterminer, et ces mêmes paramètres doivent être calculés et représentés sous forme de tableaux vu la complexité de leur calcul.

Ces paramètres à déterminer sont les suivants :

- **GH1** la hauteur de l'ouverture entre étages.
- T_{v1} température de condensation dans le premier étage.
- A_r la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur.
- T_{vn} la température de condensation dans le dernier étage.
- A_j la surface d'échange dans la zone de dissipation de chaleur.
- A_b la surface d'échange dans le réchauffeur final.

a. Le calcul de GH_1 :

Xf	Xb	Md	Mf	Mb	Xn	Mr	Xr
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 405,05	62 212,75
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 398,19	62 197,03
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 391,34	62 181,25
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 384,48	62 165,41
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 377,62	62 149,51
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 370,76	62 133,54
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 363,91	62 117,50
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 357,05	62 101,40
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 350,19	62 085,23
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 343,34	62 069,00
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 336,48	62 052,70
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 329,62	62 036,33

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

La suite du tableau GH₁

Vb	W	ρb1	ΔP1	Cd	GH1
180	18,92	997,8	8300	0,5	0,088
180	18,88	999,2	8800	0,5	0,086
180	18,84	1000,6	9300	0,5	0,083
180	18,80	1001	9900	0,5	0,081
180	18,76	1002,4	10600	0,5	0,078
180	18,73	1003,8	11200	0,5	0,076
180	18,69	1005,2	11800	0,5	0,074
180	18,65	1006,6	12500	0,5	0,072
180	18,61	1008	13200	0,5	0,070
180	18,57	1009,4	13900	0,5	0,068
180	18,54	1010,8	14800	0,5	0,066
180	18,50	1012,2	15600	0,5	0,064

Tableau IV.4 : les valeurs de GH₁ en fonction de T₀.

b. Le calcul de la température de condensation dans le premier étage T_{v1} :

T0	T1	Xr	B1	C1	BPE1	W
98	95,25	62 212,75	0,0136	2,40061E-07	1,777	18,92
100	97,25	62 197,03	0,0138	2,40615E-07	1,789	18,88
102	99,25	62 181,25	0,0140	2,41177E-07	1,801	18,84
104	101,25	62 165,41	0,0141	2,41747E-07	1,812	18,80
106	103,25	62 149,51	0,0143	2,42324E-07	1,824	18,76
108	105,25	62 133,54	0,0145	2,42909E-07	1,836	18,73

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

110	107,25	62 117,50	0,0146	2,43501E-07	1,848	18,69
112	109,25	62 101,40	0,0148	2,441E-07	1,860	18,65
114	111,25	62 085,23	0,0150	2,44708E-07	1,873	18,61
116	113,25	62 069,00	0,0151	2,45322E-07	1,885	18,57
118	115,25	62 052,70	0,0153	2,45945E-07	1,897	18,54
120	117,25	62 036,33	0,0155	2,46574E-07	1,909	18,50

Suite du tableau de T_{v1} :

GHI	H1	Vb	NEA1	$\Delta Td1$	Tv1
0,088	0,288	180	0,261	0	93,21
0,086	0,286	180	0,248	0	95,21
0,083	0,283	180	0,235	0	97,21
0,081	0,281	180	0,224	0	99,21
0,078	0,278	180	0,213	0	101,21
0,076	0,276	180	0,202	0	103,21
0,074	0,274	180	0,193	0	105,21
0,072	0,272	180	0,183	0	107,21
0,070	0,270	180	0,175	0	109,20
0,068	0,268	180	0,166	0	111,20
0,066	0,266	180	0,158	0	113,19
0,064	0,264	180	0,151	0	115,19

Tableau IV.5 : évolution de T_{v1} en fonction de T_0 .

c. Le calcul de la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur A_r :

T0	Tn	n-j	ΔT	Tr1	Tr2
98	32	21	2,75	89,75	87
100	34	21	2,75	91,75	89
102	36	21	2,75	93,75	91

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

104	38	21	2,75	95,75	93
106	40	21	2,75	97,75	95
108	42	21	2,75	99,75	97
110	44	21	2,75	101,75	99
112	46	21	2,75	103,75	101
114	48	21	2,75	105,75	103
116	50	21	2,75	107,75	105
118	52	21	2,75	109,75	107
120	54	21	2,75	111,75	109

Suite du tableau de, A_r :

T_{v1}	$(\Delta TLM)_r$	U_r	C_p	M_r	A_r
93,21	4,704	1,9957	4,18	3 405,05	4 169,35
95,21	4,705	1,9975	4,18	3 398,19	4 156,02
97,21	4,706	1,9990	4,18	3 391,34	4 144,17
99,21	4,706	2,0002	4,18	3 384,48	4 133,54
101,21	4,705	2,0010	4,18	3 377,62	4 124,11
103,21	4,703	2,0015	4,18	3 370,76	4 116,28
105,21	4,701	2,0016	4,18	3 363,91	4 109,79
107,21	4,698	2,0013	4,18	3 357,05	4 104,47
109,20	4,694	2,0006	4,18	3 350,19	4 100,48
111,20	4,690	1,9995	4,18	3 343,34	4 097,77
113,19	4,686	1,9981	4,18	3 336,48	4 096,17
115,19	4,681	1,9962	4,18	3 329,62	4 095,96

Tableau IV.6 : le changement de la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur.

d. Le graphe de la surface d'échange de la zone de récupération de chaleur :

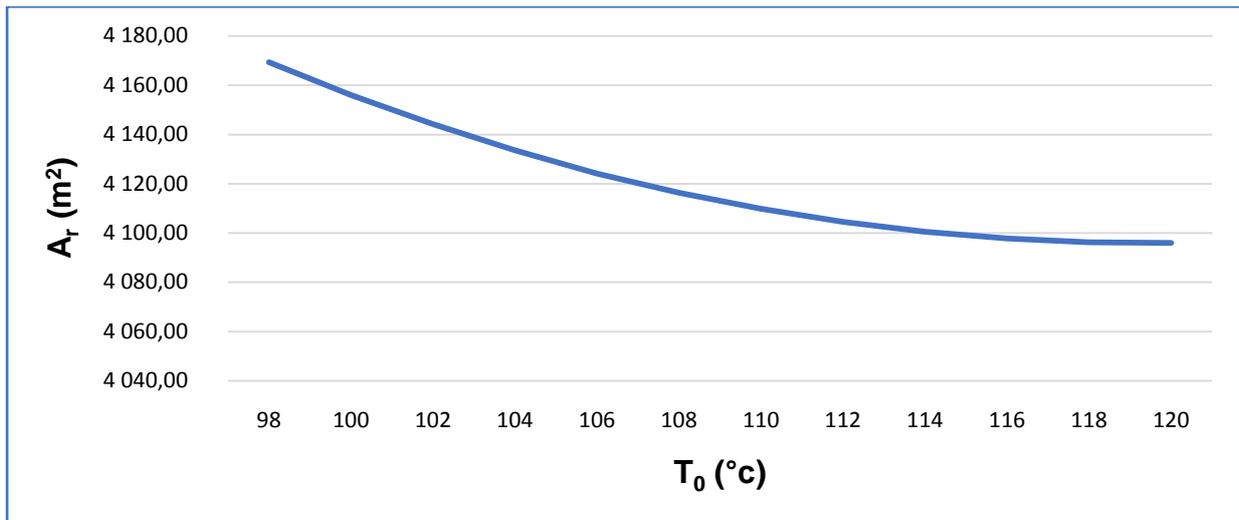


Figure IV.5: influence de la température T_0 sur la surface d'échange dans la zone de récupération de chaleur.

• Discussion :

La courbe donne la surface de la zone de récupération de chaleur, A_r , nécessaire pour chaque température maximale, T_0 . Elle se décroît légèrement de $A_r=4160$, pour $T_0=98^\circ$, jusqu'à $A_r=4100$ pour $T_0=120^\circ$.

La décroissance de la courbe est liée en premier lieu à la diminution de la valeur du débit de saumure M_r . Et une légère influence du coefficient d'échange U_r et $\Delta TLM)_r$.

e. Le tableau de la surface d'échange dans la zone de dissipation de chaleur A_j :

Pour cela on doit d'abord déterminer la température de condensation dans le dernier étage, T_{vn} , et cela est fait par le tableau suivant :

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Tn	Tn-1	Xn	Bn	Cn	BPEn	W	DPn-1
32	34,75	70000	0,0088	2,2641E-07	1,728	18,917	800
34	36,75	70000	0,0090	2,2673E-07	1,739	18,879	900
36	38,75	70000	0,0091	2,2705E-07	1,751	18,841	1000
38	40,75	70000	0,0093	2,2738E-07	1,762	18,803	1100
40	42,75	70000	0,0094	2,2772E-07	1,774	18,765	1100
42	44,75	70000	0,0095	2,2807E-07	1,786	18,726	1300
44	46,75	70000	0,0097	2,2842E-07	1,797	18,688	1400
46	48,75	70000	0,0098	2,2878E-07	1,809	18,650	1500
48	50,75	70000	0,0100	2,2915E-07	1,821	18,612	1600
50	52,75	70000	0,0101	2,2953E-07	1,833	18,574	1700
52	54,75	70000	0,0103	2,2991E-07	1,845	18,536	2000
54	56,75	70000	0,0104	2,3031E-07	1,858	18,498	2100

Suite du tableau, T_{vn} :

pbn-1	Mr	Bn-2	GHn-1	Hn-1	NEAn	ΔTdn	Tvn
1039,8	3 405,05	3 056,13	0,251	0,451	1,621	0	28,65
1040,6	3 398,19	3 049,27	0,236	0,436	1,491	0	30,77
1041,4	3 391,34	3 042,41	0,224	0,424	1,380	0	32,87
1042,2	3 384,48	3 035,56	0,213	0,413	1,283	0	34,95
1043	3 377,62	3 028,70	0,213	0,413	1,228	0	37,00
1043,8	3 370,76	3 021,84	0,196	0,396	1,121	0	39,09
1044,6	3 363,91	3 014,99	0,189	0,389	1,052	0	41,15
1045,4	3 357,05	3 008,13	0,182	0,382	0,989	0	43,20
1046,2	3 350,19	3 001,27	0,176	0,376	0,931	0	45,25
1047	3 343,34	2 994,41	0,171	0,371	0,878	0	47,29
1047,8	3 336,48	2 987,56	0,157	0,357	0,810	0	49,34
1048,6	3 329,62	2 980,70	0,154	0,354	0,767	0	51,37

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Tableau IV.7 : la température de condensation T_{vn} pour chaque T_0 .

f. Le tableau de A_j :

T_0	T_{cw}	T_n	ΔT_{ji}	T_{vn}	M_f
98	25	32	2,33	28,65	947
100	25	34	3,00	30,77	947
102	25	36	3,67	32,87	947
104	25	38	4,33	34,95	947
106	25	40	5,00	37,00	947
108	25	42	5,67	39,09	947
110	25	44	6,33	41,15	947
112	25	46	7,00	43,20	947
114	25	48	7,67	45,25	947
116	25	50	8,33	47,29	947
118	25	52	9,00	49,34	947
120	25	54	9,67	51,37	947

Suite du tableau, A_j :

M_{cw}	T_{jn}	$(\Delta TLM)_j$	U_j	C_p	A_j
3 066,10	27,33	2,290	1,8197	4,18	9 394,07
2 168,01	28,00	4,088	1,8274	4,18	5 229,07
1 596,50	28,67	5,846	1,8350	4,18	3 634,24
1 200,84	29,33	7,583	1,8425	4,18	2 784,62
910,69	30,00	9,275	1,8498	4,18	2 263,01
688,81	30,67	11,018	1,8573	4,18	1 893,41
513,64	31,33	12,723	1,8645	4,18	1 630,09
371,84	32,00	14,420	1,8717	4,18	1 429,81
254,7	32,67	16,111	1,8787	4,18	1 272,30
156,3	33,33	17,798	1,8857	4,18	1 145,15

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

72,48	34,00	19,499	1,8926	4,18	1 039,27
0,22	34,67	21,175	1,8993	4,18	951,69

Tableau IV.8 : surface de refroidissement pour chaque T_0 .

g. Le graphe de la surface A_j :

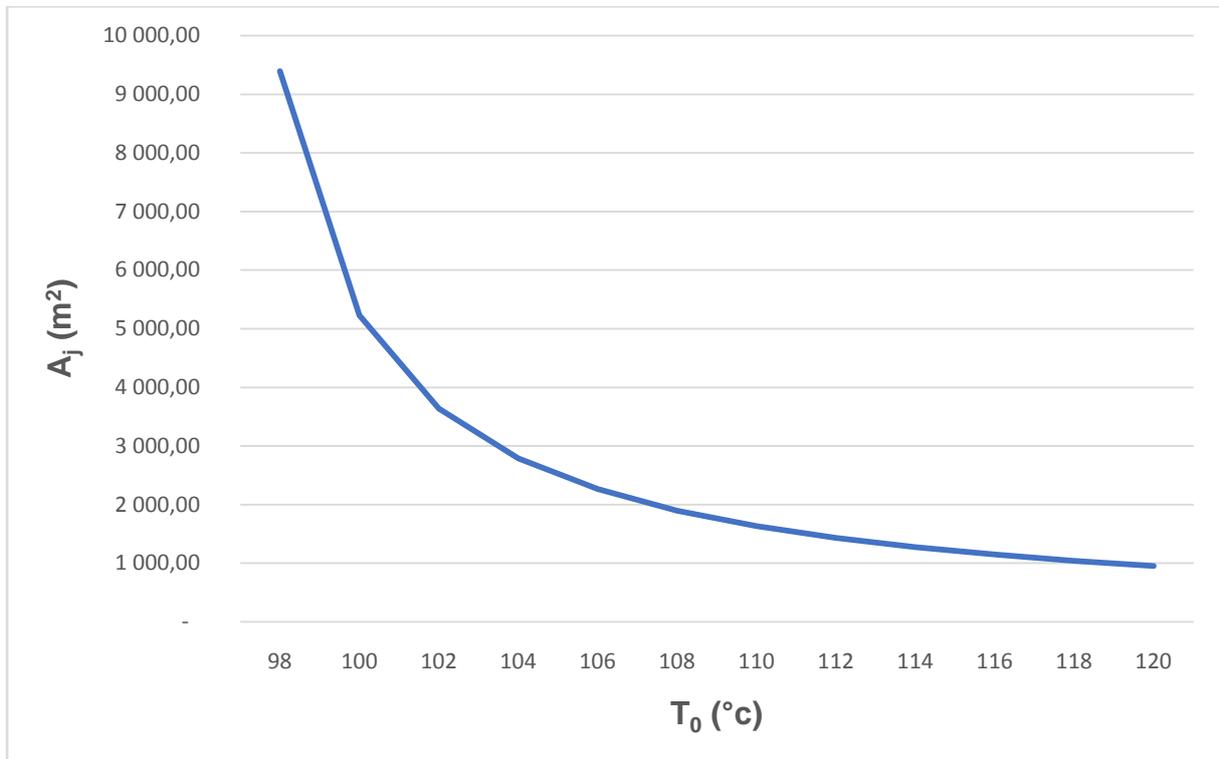


Figure IV.6: influence de la température maximale T_0 sur la surface d'échange dans la zone de dissipation de chaleur.

- **Discussion :**

La courbe montre l'importance de la surface d'échange dans la zone de refroidissement à utiliser pour chaque température, T_0 . La courbe est en forte chute de la valeur, $A_j=9394$ pour $T_0=98^\circ$ jusqu'à $A_j=950$ pour $T_0=120^\circ$.

La courbe diminue pour plusieurs raisons ainsi données en ce qui suit :

M_r étant diminuant, alors moins de surface nécessaire pour refroidir.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

T_v , la température de condensation devient plus importante pour une température T_0 plus grande. Avec ΔT et $\Delta T)_{T_0}$ constantes, On aurait moins de surface de refroidissement, sachant que la température de refroidissement est toujours constante $T_{cw}=25^\circ$.

Et au final, le facteur le plus influant sur la surface c'est le débit spécifique de refroidissement. Ayant une forte chute avec la variation de T_0 , cela engendre une forte chute dans la surface nécessaire pour le refroidissement.

Mais comme déjà dit pour le sM_{cw} , que c'est la $\Delta T)_{T_0}$ et ΔT qui sont prises constantes qui ont causé une telle chute de valeur, alors, de même pour cette chute de surface de refroidissement. Par suite, la chute serait moins importante si les différences de température, $\Delta T)_{T_0}$, ΔT étaient prises à leurs valeurs réelles.

IV.3.4 .Le calcul de la surface d'échange du réchauffeur final et la surface spécifiquesA :

Ar	Aj	Ac	T0	Ts	Tr1	(ΔTLM)b
4 169,35	9 394,07	115 738,55	98	108	89,75	13,71
4 156,02	5 229,07	102 963,73	100	110	91,75	13,71
4 144,17	3 634,24	97 930,39	102	112	93,75	13,71
4 133,54	2 784,62	95 158,14	104	114	95,75	13,71
4 133,53	2 263,01	93 593,07	106	116	97,75	13,71
4 116,28	1 893,41	92 122,13	108	118	99,75	13,71
4 109,79	1 630,09	91 195,86	110	120	101,75	13,71
4 104,47	1 429,81	90 483,40	112	122	103,75	13,71
4 100,48	1 272,30	89 926,89	114	124	105,75	13,71
4 097,77	1 145,15	89 488,65	116	126	107,75	13,71
4 096,17	1 039,27	89 137,39	118	128	109,75	13,71
4 095,96	951,69	88 870,15	120	130	111,75	13,71

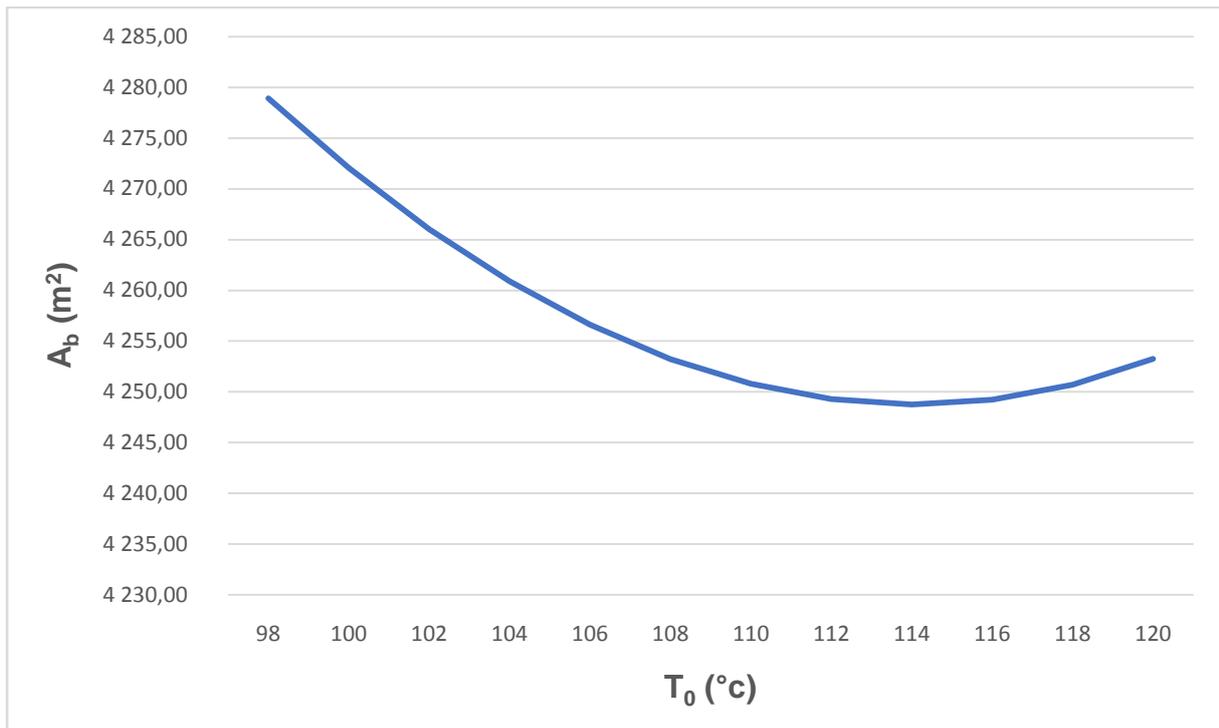
Suite du tableau de sA :

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Ub	Ms	λ_s	Ab	Md	Sa
2,001	52,54	2235,11	4 278,92	378,8	316,84
2,000	52,56	2229,7	4 272,06	378,8	283,09
1,999	52,57	2224,6	4 266,04	378,8	269,79
1,997	52,60	2218,78	4 260,89	378,8	262,46
1,995	52,63	2213,27	4 256,62	378,8	258,31
1,993	52,65	2207,72	4 253,24	378,8	254,42
1,990	52,68	2202,15	4 250,80	378,8	251,97
1,987	52,70	2196,54	4 249,30	378,8	250,09
1,983	52,73	2190,88	4 248,77	378,8	248,62
1,979	52,76	2185,19	4 249,23	378,8	247,46
1,974	52,79	2179,47	4 250,72	378,8	246,54
1,969	52,82	2173,7	4 253,27	378,8	245,84

Tableau IV.9 : surface spécifique due à chaque température T_0 .

a. Le graphe de la surface d'échange dans le réchauffeur A_b :



CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Figure IV.7 :Influence de la température T_0 sur la surface d'échange du réchauffeur final.

- **Discussion :**

L'allure montre la variation de la surface d'échange dans le réchauffeur final en fonction de celle de la température maximale T_0 . la courbe est en légère diminution de la plus grande surface $A_b=4278$ pour la plus basse température $T_0=98^\circ$ jusqu'aux environs de $T_0=114^\circ$ pour une valeur de $A_b=4248$. Ensuite, la courbe prend un comportement croissant jusqu'à valeur $A_b=4253$ pour la température $T_0=120^\circ$.

Pour savoir l'origine du comportement inversé de la courbe depuis la température $T_0=114^\circ$, on revient à l'expression de la surface d'échange dans le réchauffeur final suivante :

$$A_b = M_s \cdot \lambda_s / (U_b \cdot \Delta TLM)_b.$$

λ_s , étant en diminution linéaire, la différence de température logarithmique moyenne constante. Le coefficient d'échange U_b est en diminution décélérée dès la température $T_0=114^\circ$. Ce qui engendre au final une augmentation de la surface au lieu d'une réduction de sa valeur.

b. Le graphe de la surface spécifique s_A :

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

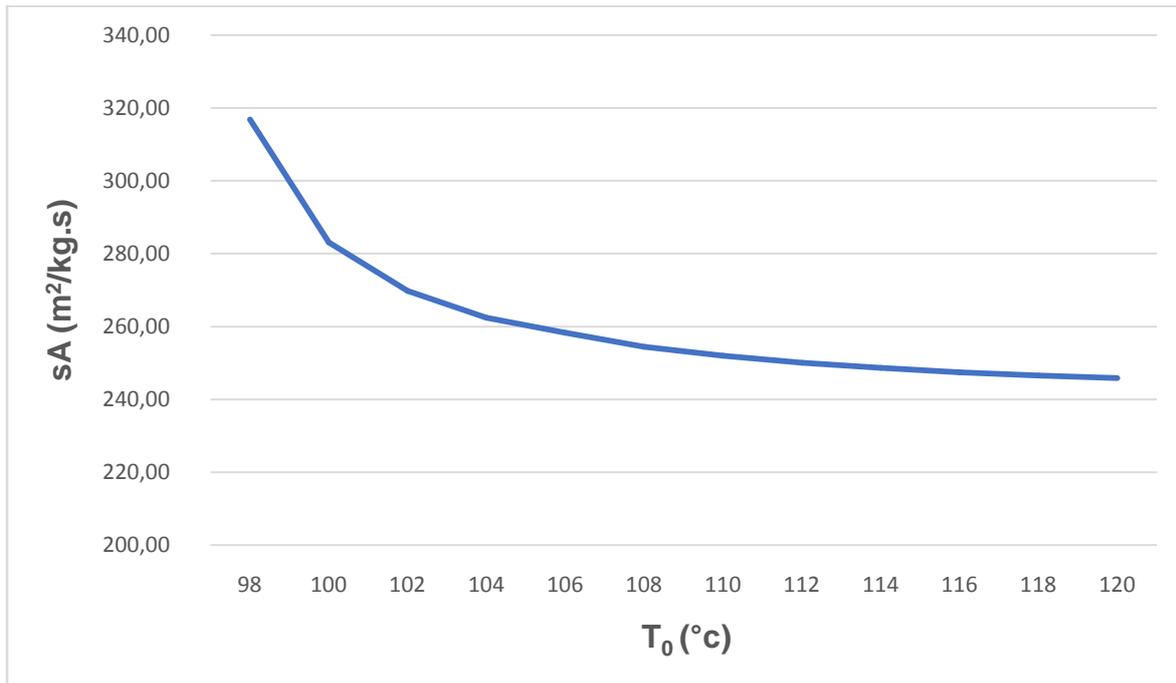


Figure IV.8: l'influence de la température maximale sur la surface spécifiquesA

- **Discussion :**

Le graphe montre la variation de la surface spécifique totale nécessaire pour un système multi-flash avec recirculation de saumure pour chaque température maximale, T_0 . La courbe est en chute brusque de $sA=316$ pour $T_0=98^\circ$ jusqu'à $sA=254$ pour $T_0=108$ puis une diminution légère jusqu'à $sA=245$ pour $T_0=120^\circ$.

Comme la surface totale A est la somme des surfaces d'échange, alors cette chute est due à la chute de la surface d'échange pour le système de refroidissement vu que les deux autres surfaces sont en légère diminution.

De ce fait, les causes de cette chute sont bien les mêmes qui ont causé la chute de la surface d'échange pour la surface de refroidissement.

Un bref récapitulatif des causes :

- M_r qui est en diminution
- ΔT et $\Delta T)_{T_0}$ qui ont été prises comme étant constantes. Alors qu'en réalité ces deux paramètres ce sont les facteurs dominants sur la variation de la surface.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

En conclusion, la décroissance de cette surface serait moins importante que celle obtenue avec les hypothèses établies au préalable.

IV.4. Conclusion :

Pour conclure, voici un bref récapitulatif des résultats trouvés :

PR Le rendement thermique est en diminution négligeable, quoique, il devait être légèrement augmentant. La diminution est due au fait que, $\Delta T)_{T_0}$ est prise constante.

sMCW le débit spécifique d'eau de refroidissement est en chute brusque. Cela est dû aussi au fait que $\Delta T)_{T_0}$ est constante.

sA la surface totale spécifique d'échange est en chute brusque. Cela est dû à la fixation de $\Delta T)_{T_0}$.

Mais avec exacte valeur de $\Delta T)_{T_0}$, la diminution de la surface spécifique et celle du débit spécifique seraient moins importantes.

En conclusion, la température maximale T_0 a bien un effet important sur le rendement d'une station MSF avec recirculation de saumure, vu que non seulement, plus la température T_0 est grande, plus le débit du distillat est important, mais encore, la

Surface d'échange devient de plus en plus moindre avec l'augmentation de la température maximale T_0 . Ce qui rend la station plus rentable est plus performante.

CHAPITRE IV : Influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station MSF

Conclusion générale

Conclusion générale

Au cours de cette étude le but est de savoir l'influence des paramètres thermodynamiques sur le rendement d'une station de dessalement de l'eau de mer par le procédé multi-flash.

L'étude s'est basée sur Un modèle de calcul simplifié pour déterminer les trois paramètres de performance qui sont : le rendement thermique, la surface spécifique d'échange de chaleur et le débit spécifique de l'eau de refroidissement. Tout en variant la température maximale T_0 qui sort du réchauffeur final. Car tous les paramétré thermodynamique en dépendent de cette température.

Tandis que nous essayions de varier la température maximale T_0 , certains paramètres s'avèrent être difficiles à en déterminer, du coup, nous avons établi quelques hypothèses nécessaires.

Pour l'exécution du calcul on s'est servis du logiciel Excel. Ensuite, les résultats ont été donnés sous forme de graphes montrant l'influence de la température maximale sur les paramètres de performance.

À travers les résultats obtenus nous avons constaté que :

- la température maximale T_0 révéle être un facteur influant sur les paramètres de performance. Vu que plus elle augmente plus le rendement thermique devient plus important et plus on a besoin de moins de surface d'échange et moins de débit de refroidissement. Cependant, l'influence est un peu excessive en raison des hypothèses établies.
- le paramètre essentiel dans une station MSF est bien la différence de température entre les étages. Ce qui fait que l'influence excessive a comme origine principale la fixation de la différence de température, ΔT au cours de la variation de la température maximale.
- la température maximale T_0 , est un paramétré à maîtriser pour en avoir un rendement optimal d'une station de dessalement MSF. En outre, au cours de

notre étude nous avons constaté que le deuxième paramètre le plus influant sur le rendement de telles station est bien le nombre d'étages.

En perspective, on souhaiterait d'autres améliorations et développements dans les années à venir pour un tel calcul, en se focalisant sur la variation de la différence de température ΔT au cours de la variation de la température maximale T_0 . Ce qui rendra les résultats encore plus réalistes.

Annexe

Le programme effectué sur le logiciel EXCEL pour le calcul des différents paramètres thermodynamiques :

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
T0	Tn	Tr1	ΔT	Tav	λs	λav	y	Mr	Ms	Md	PR				
98	32	89,75	2,75	65	2235,11	2345	0,00490192	3405,05129	52,5357561	378,8	7,21032736				
100	34	91,75	2,75	67	2229,7	2340	0,00491239	3398,19395	52,5571683	378,8	7,20738982				
102	36	93,75	2,75	69	2224,6	2335	0,00492291	3391,33663	52,5713583	378,8	7,20544441				
104	38	95,75	2,75	71	2218,78	2330	0,00493348	3384,47935	52,6026782	378,8	7,20115425				
106	40	97,75	2,75	73	2213,27	2325	0,00494409	3377,6221	52,6267913	378,8	7,19785476				
108	42	99,75	2,75	75	2207,72	2320	0,00495474	3370,76489	52,6519791	378,8	7,19441142				
110	44	101,75	2,75	77	2202,15	2315	0,00496544	3363,90772	52,6777729	378,8	7,1908866				
112	46	103,75	2,75	79	2196,54	2310	0,00497619	3357,05058	52,7046579	378,8	7,18722055				
114	48	105,75	2,75	81	2190,88	2305	0,00498698	3350,19347	52,7320845	378,8	7,18337941				
116	50	107,75	2,75	83	2185,19	2300	0,00499783	3343,3364	52,7619822	378,8	7,17941185				
118	52	109,75	2,75	85	2179,47	2295	0,00500871	3336,47937	52,7919591	378,8	7,17533516				
120	54	111,75	2,75	87	2173,7	2290	0,00501965	3329,62237	52,8233093	378,8	7,17107665				

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Xf	Xb	Md	Mf	Mb	Xn	Mr	Xr	Vb	W	pb1	ΔP1	Cd	GH1	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 405,05	62 212,75	180	18,92	997,8	8900	0,5	0,088	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 398,19	62 197,03	180	18,88	999,2	8800	0,5	0,086	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 391,34	62 181,25	180	18,84	1000,6	9300	0,5	0,083	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 384,48	62 165,41	180	18,80	1001	9900	0,5	0,081	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 377,62	62 149,51	180	18,76	1002,4	10600	0,5	0,078	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 370,76	62 133,54	180	18,73	1003,8	11200	0,5	0,076	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 363,91	62 117,50	180	18,69	1005,2	11800	0,5	0,074	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 357,05	62 101,40	180	18,65	1006,6	12500	0,5	0,072	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 350,19	62 085,23	180	18,61	1008	13200	0,5	0,070	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 343,34	62 069,00	180	18,57	1009,4	13900	0,5	0,068	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 336,48	62 052,70	180	18,54	1010,8	14800	0,5	0,066	
42000	70000	378,8	947	568,2	70000	3 329,62	62 036,33	180	18,50	1012,2	15600	0,5	0,064	

excel - Excel

Outils de tableau

Connexion

Fichier Accueil Insérer Mise en page Formules Données Révision Affichage Création Dites-nous ce que vous voulez faire Partager

Calibri 11

Standard

Mise en forme conditionnelle

Mettre sous forme de tableau

Styles de cellules

Insérer

Supprimer

Format

Trier et Rechercher et filtrer

Édition

Partager

Prêt

23:25 08/01/2018

$$K2 = =(0,9784^{*(T0)}*(15,7378)^{*(H1)}*(1,3777)^{*(Vb)}*(10)^{-6})$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	T0	T1	Xr	B1	Cl	BPE1	W	GH1	H1	Vb	NEA1	ΔTd1	Tv1			
2	98	95,25	62212,746	0,01369252	2,40061E-07	1,77725396	18,916952	0,0884559	0,28845588	180	0,26055662	0	93,2121894			
3	100	97,25	62197,032	0,01379682	2,40615E-07	1,78093428	18,878855	0,085846	0,28584598	180	0,24763446	0	95,2134313			
4	102	99,25	62181,254	0,01396189	2,41177E-07	1,80068219	18,840759	0,083448	0,28344797	180	0,23549066	0	97,2138272			
5	104	101,25	62165,412	0,01412775	2,41747E-07	1,81249754	18,802663	0,0808636	0,28086356	180	0,22382737	0	99,2136751			
6	106	103,25	62149,507	0,01429439	2,42324E-07	1,82438019	18,764567	0,0780933	0,27809335	180	0,21263281	0	101,212987			
7	108	105,25	62133,536	0,0144618	2,42909E-07	1,83633001	18,726472	0,0759198	0,27591977	180	0,20233058	0	103,211339			
8	110	107,25	62117,501	0,01463	2,43501E-07	1,84834685	18,688376	0,0739129	0,2739129	180	0,19261597	0	105,209037			
9	112	109,25	62101,4	0,01479897	2,441E-07	1,86043056	18,650281	0,0717636	0,27176357	180	0,18329582	0	107,206274			
10	114	111,25	62085,233	0,01496873	2,44708E-07	1,87258099	18,612186	0,0697863	0,26978632	180	0,17450938	0	109,20291			
11	116	113,25	62069	0,01513926	2,45322E-07	1,88479801	18,574091	0,0679592	0,26795923	180	0,16621291	0	111,198989			
12	118	115,25	62052,701	0,01531057	2,45945E-07	1,89708145	18,535996	0,0658149	0,26581487	180	0,15817249	0	113,194746			
13	120	117,25	62036,334	0,01548266	2,46574E-07	1,90943118	18,497902	0,0640608	0,26406075	180	0,150683	0	115,189886			

excel - Excel

Outils de tableau

Connexion

Fichier Accueil Insérer Mise en page Formules Données Révision Affichage Création Dites-nous ce que vous voulez faire Partager

Calibri 11

Standard

Mise en forme conditionnelle

Mettre sous forme de tableau

Styles de cellules

Insérer

Supprimer

Format

Trier et Rechercher et filtrer

Édition

Partager

Prêt

23:25 08/01/2018

$$M2 = =[Bn-2]^{*(2*[@pbn-1]*[@DPn-1])^{-0,5}}/0,5^{*(@W)}$$

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Tn	Tn-1	Xn	Bn	Cn	BPEn	W	DPn-1	pbn-1	Mr	Bn-2	GHn-1	Hn-1	NEAn	Δtdn	Tvn
2	32	34,75	70000	0,00883854	2,2641E-07	1,72812333	18,916952	800	1039,8	3405,05129	3056,1293	0,25050458	0,45050458	1,62069106	0	28,6511856
3	34	36,75	70000	0,00897819	2,2673E-07	1,73944841	18,878855	900	1040,6	3398,19395	3049,2719	0,23603278	0,43603278	1,49077191	0	30,7697797
4	36	38,75	70000	0,00911863	2,2705E-07	1,75086496	18,840759	1000	1041,4	3391,33663	3042,4146	0,22378255	0,42378255	1,37968912	0	32,8694459
5	38	40,75	70000	0,00925985	2,2738E-07	1,76237299	18,802663	1100	1042,2	3384,47935	3035,5573	0,21323682	0,41323682	1,28289609	0	34,9547309
6	40	42,75	70000	0,00940184	2,2772E-07	1,77397248	18,764567	1100	1043	3377,6221	3028,7001	0,21310528	0,41310528	1,22762841	0	36,9983991
7	42	44,75	70000	0,00954461	2,2807E-07	1,78566344	18,726472	1300	1043,8	3370,76489	3021,8429	0,19590729	0,39590729	1,12076557	0	39,093571
8	44	46,75	70000	0,00968817	2,2842E-07	1,79744588	18,688376	1400	1044,6	3363,90772	3014,9857	0,18866427	0,38866427	1,05166684	0	41,1508873
9	46	48,75	70000	0,0098325	2,2878E-07	1,80931978	18,650281	1500	1045,4	3357,0506	3008,1286	0,18215418	0,38215418	0,98882366	0	43,2018566
10	48	50,75	70000	0,00997761	2,2915E-07	1,82128516	18,612186	1600	1046,2	3350,1935	3001,2714	0,17626072	0,37626072	0,93131716	0	45,2473977
11	50	52,75	70000	0,0101235	2,2953E-07	1,833342	18,574091	1700	1047	3343,3364	2994,4144	0,17089192	0,37089192	0,87842429	0	47,2882337
12	52	54,75	70000	0,01027017	2,2991E-07	1,84549032	18,535996	2000	1047,8	3336,4794	2987,5573	0,15745669	0,35745669	0,81031897	0	49,3441907
13	54	56,75	70000	0,01041762	2,3031E-07	1,8577901	18,497902	2100	1048,6	3329,6224	2980,7003	0,15356642	0,35356642	0,76741885	0	51,3748511

excel - Excel

Outils de tableau

Connexion

Fichier Accueil Insérer Mise en page Formules Données Révision Affichage Création Dites-nous ce que vous voulez faire Partager

Calibri 12 A A' Renvoyer à la ligne automatiquement Standard

Coller G I S Mise en forme conditionnelle Mettre sous forme de tableau Styles de cellules Insérer Supprimer Trier et Rechercher et filtrer sélectionner Édition

Presse-papiers Police Alignement Nombre

J2 =1,71944+3,2063*10^(-3)*[Tvn]+1,5971*10^(-5)*[Tvn]^2-1,9918*10^(-7)*[Tvn]^3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	TD	Tcw	Tn	Dtj	Tvn	Mf	Mcw	Tjn	ΔTLMj	Uj	Cp	Aj				
2	98	25	32	2,33	26,6511856	947	3066,0962	27,33	2,2897174	1,8196901	4,18	9394,0595				
3	100	25	34	3,00	30,7697797	947	2168,0111	28,00	4,0879391	1,8273756	4,18	5229,0753				
4	102	25	36	3,67	32,8694459	947	1596,5025	28,67	5,8457005	1,8349711	4,18	3634,2441				
5	104	25	38	4,33	34,9547309	947	1200,8427	29,33	7,5828155	1,8424825	4,18	2784,6267				
6	106	25	40	5,00	36,9983991	947	910,69216	30,00	9,274858	1,8498026	4,18	2263,0147				
7	108	25	42	5,67	39,093571	947	688,81298	30,67	11,018443	1,8572539	4,18	1893,4156				
8	110	25	44	6,33	41,1508873	947	513,64414	31,33	12,72257	1,8645075	4,18	1630,0993				
9	112	25	46	7,00	43,201857	947	371,8413	32,00	14,419787	1,8716661	4,18	1429,8143				
10	114	25	48	7,67	45,247398	947	254,69983	32,67	16,111184	1,8787233	4,18	1272,2972				
11	116	25	50	8,33	47,288234	947	156,30101	33,33	17,797591	1,885672	4,18	1145,1482				
12	118	25	52	9,00	49,344191	947	72,479807	34,00	19,499246	1,8925686	4,18	1039,269				
13	120	25	54	9,67	51,374851	947	0,2201575	34,67	21,175043	1,8992683	4,18	951,68524				

Prêt

23:25 08/01/2018

excel - Excel

Outils de tableau

Connexion

Fichier Accueil Insérer Mise en page Formules Données Révision Affichage Création Dites-nous ce que vous voulez faire Partager

Calibri 12 A A' Renvoyer à la ligne automatiquement Standard

Coller G I S Mise en forme conditionnelle Mettre sous forme de tableau Styles de cellules Insérer Supprimer Trier et Rechercher et filtrer sélectionner Édition

Presse-papiers Police Alignement Nombre

J2 =1,71944+3,2063*10^(-3)*[Tvn]+1,5971*10^(-5)*[Tvn]^2-1,9918*10^(-7)*[Tvn]^3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	TD	Tn	h-j	Δt	Tr1	Tr2	Tv1	ΔTLM	Ur	Cp	Mir	Ar				
2	98	32	21	2,75	89,75	87	99,2121894	4,7039728	1,9957195	4,18	3405,05129	4169,3498				
3	100	34	21	2,75	91,75	89	95,2134313	4,7052504	1,997544	4,18	3398,19395	4156,0241				
4	102	36	21	2,75	93,75	91	97,2138272	4,7056577	1,99904	4,18	3391,33663	4144,1747				
5	104	38	21	2,75	95,75	93	99,2136751	4,7055012	2,0001988	4,18	3384,47935	4133,5367				
6	106	40	21	2,75	97,75	95	101,212987	4,7047983	2,0010109	4,18	3377,6221	4124,1081				
7	108	42	21	2,75	99,75	97	103,211339	4,7030983	2,001467	4,18	3370,76489	4116,2804				
8	110	44	21	2,75	101,75	99	105,209037	4,7007297	2,0015582	4,18	3363,90772	4109,7892				
9	112	46	21	2,75	103,75	101	107,20627	4,6978863	2,0012752	4,18	3357,0506	4104,4744				
10	114	48	21	2,75	105,75	103	109,20291	4,6944251	2,0006088	4,18	3350,1935	4100,4761				
11	116	50	21	2,75	107,75	105	111,19899	4,6903991	1,9995498	4,18	3343,3364	4097,7719				
12	118	52	21	2,75	109,75	107	113,19475	4,686025	1,9980888	4,18	3336,4794	4096,1705				
13	120	54	21	2,75	111,75	109	115,18989	4,6810235	1,996217	4,18	3329,6224	4095,9571				

Prêt

23:25 08/01/2018

excel - Excel Outils de tableau Connexion

Fichier Accueil Insérer Mise en page Formules Données Révision Affichage Création Dites-nous ce que vous voulez faire Partager

Calibri 12 A A' Renvoyer à la ligne automatiquement Standard Mise en forme conditionnelle Mettre sous forme de tableau Styles de cellules Insérer Supprimer Formater Trier et Rechercher et filtrer sélectionner Édition

Police Alignement Nombre Cellules

H2 $=1,7194+3,2063*10^{(-3)}*(Ts)+1,5971*10^{(-5)}*(Ts)^2-1,9918*10^{(-7)}*(Ts)^3$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Ar	Aj	Ac	TD	Ts	Tr1	ΔTLM	Ub	Ms	λs	Ab	Md	sA			
1																
2	4169,3498	9394,0595	115798,52	98	108	89,75	13,713887	2,0010567	52,5957561	2235,11	4278,9176	378,8	316,83591			
3	4156,0241	5229,0753	102963,73	100	110	91,75	13,713887	2,0002335	52,5971683	2229,7	4272,0578	378,8	263,09343			
4	4144,1747	3634,2441	97930,401	102	112	93,75	13,713887	1,9990123	52,5713583	2224,6	4266,0418	378,8	269,78998			
5	4133,5367	2784,6267	95158,151	104	114	95,75	13,713887	1,9973834	52,6026782	2218,78	4260,8878	378,8	262,45786			
6	4133,5254	2263,0147	93593,077	106	116	97,75	13,713887	1,9953373	52,6267913	2213,27	4256,6152	378,8	258,31492			
7	4116,2804	1893,4156	92122,135	108	118	99,75	13,713887	1,9928645	52,6519791	2207,72	4253,2446	378,8	254,42286			
8	4109,7892	1630,0993	91195,871	110	120	101,75	13,713887	1,9899554	52,6777729	2202,15	4250,7973	378,8	251,97114			
9	4104,4744	1429,8143	90483,405	112	122	103,75	13,713887	1,9866004	52,704658	2196,54	4249,2965	378,8	250,08633			
10	4100,4761	1272,2972	89926,89	114	124	105,75	13,713887	1,9827899	52,732884	2190,88	4248,7663	378,8	248,61578			
11	4097,7719	1145,1482	89488,654	116	126	107,75	13,713887	1,9785145	52,761982	2185,19	4249,2326	378,8	247,4601			
12	4096,1705	1039,269	89137,387	118	128	109,75	13,713887	1,9737645	52,791959	2179,47	4250,7226	378,8	246,53672			
13	4095,9571	951,68524	88870,155	120	130	111,75	13,713887	1,9685304	52,823309	2173,7	4253,2656	378,8	245,83796			
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																

PR GH1 Tv1 Tvn Aj Ar sA sMew Feuil1 Feuil2

Prêt 23:26 08/01/2018

excel - Excel Outils de tableau Connexion

Fichier Accueil Insérer Mise en page Formules Données Révision Affichage Création Dites-nous ce que vous voulez faire Partager

Calibri 12 A A' Renvoyer à la ligne automatiquement Standard Mise en forme conditionnelle Mettre sous forme de tableau Styles de cellules Insérer Supprimer Formater Trier et Rechercher et filtrer sélectionner Édition

Police Alignement Nombre Cellules

G2 $=(D2^*E2-C2^*F2)/(F2^(A2-B2))$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Tn	Tcw	MF	Ms	λs	Cp	Mew	Md	sMew							
1																
2	32	25	947	52,5957561	2235,11	4,18	3066,0962	378,8	8,0942349							
3	34	25	947	52,5571683	2229,7	4,18	2168,0111	378,8	5,7233662							
4	36	25	947	52,5713583	2224,6	4,18	1596,5025	378,8	4,2146317							
5	38	25	947	52,6026782	2218,78	4,18	1200,8427	378,8	3,1701232							
6	40	25	947	52,6267913	2213,27	4,18	910,69216	378,8	2,4041504							
7	42	25	947	52,6519791	2207,72	4,18	688,81238	378,8	1,8184065							
8	44	25	947	52,6777729	2202,15	4,18	513,64414	378,8	1,3559771							
9	46	25	947	52,704658	2196,54	4,18	371,8413	378,8	0,9816296							
10	48	25	947	52,732884	2190,88	4,18	254,69983	378,8	0,672386							
11	50	25	947	52,761982	2185,19	4,18	156,30101	378,8	0,4126215							
12	52	25	947	52,791959	2179,47	4,18	72,479807	378,8	0,1913406							
13	54	25	947	52,823309	2173,7	4,18	0,2201575	378,8	0,0005812							
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																

PR GH1 Tv1 Tvn Aj Ar sA sMew Feuil1 Feuil2

Prêt 23:26 08/01/2018

Variation de la masse volumique de l'eau de mer en fonction de la température et la salinité

T (°C)	Salinité (ppm)						
	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
10	1008	1015	1023	1031	1038	1046	1054
15	1007	1014	1022	1030	1037	1045	1053
20	1006	1013	1021	1028	1036	1044	1051
25	1004	1012	1019	1027	1034	1042	1050
30	1003	1010	1018	1025	1033	1040	1048
35	1001	1008	1016	1023	1031	1038	1046
40	999	1007	1014	1021	1029	1036	1044
45	997	1004	1012	1019	1027	1034	1042
50	995	1002	1010	1017	1024	1032	1039
55	993	999.9	1007	1015	1022	1029	1037
60	990	997.5	1005	1012	1020	1027	1034
65	988	994.9	1002	1010	1017	1024	1032
70	985	992.2	999.5	1007	1014	1022	1029
75	982	989.3	996.6	1004	1011	1019	1026
80	979	986.3	993.7	1001	1008	1016	1023
85	976	983.2	990.6	997.9	1005	1013	1020
90	973	980	987.4	994.7	1002	1010	1017
95	969	976.7	984	991.4	998.8	1006	1014
100	966	973.2	980.6	988	995.4	1003	1010
105	962	969.6	977	984.4	991.9	999.3	1007
110	958	965.9	973.3	980.8	988.3	995.7	1003

REFERENCES

[1].Livre:Hisham T.El-Dessouky,Hisham M.Eettouney.Fundamentals of Salt Water desalination, Departement of chemical Engineering College of Engineering and Petroleum. Kuwait University(2002),ISBN :9780080532127

[2]. Article : Propriétés Physiques du Milieu Marin, un cours d'Introduction à l'Océanographie physique. Olivier Le Calvé.2002

[3].Mémoire de master :Mlle Benfattoum Kahina, Etude et suivi du processus de traitement de l'eau de mer dans la centrale thermique de Cap Djinet, UMBB 2011

[4].Siteinternet :culturescience-
chimie<http://www.culturesciences.chimie.ens.fr/content/le-dessalement-de-leau-de-mer-et-des-eaux-saumatres-840>

[5]. Article : Le dessalement de l'eau de mer (Quelle méthode de désalinisation de l'eau est actuellement la plus envisageable pour répondre aux problèmes de pénurie d'eau douce), p11.

[6]. Site internet: le dessalement de l'eautunisie
<http://www.dessalementunisie.e-monsite.com/pages/sous-partie/2-1-electrodialyse.html>

[7]. Thèse: A. R. Garcia. Étude de la congélation comme technique de traitement des eaux.2004.

[8].Livre : Alain Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres octobre 2001.ISBN :9782743008901.

[9].Mémoire de master : SMAIL Moula,Analyse comparative, énergétique et technico-économique, UMMTO 2009.

[10].Article:Desalination Technologies (1),EftihiaTzen, Wind Energy Department, p32-33.

[11].Sit internet : l'eau potable : enjeux géopolitiques. Le dessalement est-il une solution d'avenir, <https://tpeorbleu.wordpress.com>