



*République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

Université Akli Mohand Oulhadj -Bouira-

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté pour l'obtention de diplôme de

Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Par :

BEN HALIMA Aimen & MESRANE Amine

Thème

Diagnostic du Système de Refroidissement par Aération de L'eau (Station
de Dessalement de Ouled Djellal)

Date de Soutenance : 29/06/2025

Devant le jury :

Présidente : Mme. BAGHDADI F.	MCB
Examineur : Mr. LEKHAL R.	MCB
Encadrant : Mr. METAICHE E.	Prof
Co-encadrant : Mr. LAOUARI A.	MAA

Remerciement

*Au terme de ce modeste travail, nous tenons à
exprimer notre profonde gratitude et nos vifs
remerciements :*

*Avant tous, nous remercions ALLAH le tout puissant
pour nous avoir donné la force et la patience pour
mener à terme ce travail.*

*A nos familles : qui nous ont toujours encouragés et
soutenus durant toutes nos études.*

*A nos promoteurs monsieur : Laouari.A et Metaïche.M
pour avoir accepté de nous guider sur le bon chemin
du travail.*

*Aux membres de jury : pour avoir accepté de juger
notre travail. A tous ceux qui ont contribué de près ou
de loin à la réalisation de ce mémoire*

Dédicaces

-Je voudrais dédier ce modeste travail à :

*-Mes chers parents pour leur soutien et leur
encouragement durant toute ma carrière d'études-*

- Mes frères-

-Toute ma grande famille-

-À mon binôme Amine-

-A tous les étudiants du Génie Mécanique-

-Ainsi qu'à tous mes amis et tous qui me

Connaissent-

Amen

Dédicaces

Je dédie ce travail avec humilité, et avec les sentiments les plus sincères et profonds de mon cœur :

À mes parents, je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour votre amour inconditionnel, votre patience et vos encouragements constants.

Votre soutien moral et matériel a été pour moi un guide dans la réalisation de mes objectifs.

À mes frères, pour leur soutien constant et leur complicité.

À mon binôme Aymen.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à tous mes collègues de la filière Génie Mécanique

Amine

Résumé :

La nappe albiennne au sud de l'Algérie constitue une importante réserve d'eau douce, mais son exploitation est limitée par une salinité élevée (3,5 g/l) et une température importante (50 à 60 °C). Pour y remédier, une station de dessalement par osmose inverse a été construite à Ouled Djellal, avec un système de refroidissement par aération destiné à abaisser la température de l'eau. Ce système favorise aussi l'oxydation et la précipitation du fer. Actuellement à l'arrêt, la station nécessite une réévaluation de ce système. Cette étude vise à diagnostiquer le système de refroidissement par aération, simuler son fonctionnement et proposer des améliorations.

Mots clés : Refroidissement par aération, Eau thermale, Nappe albiennne, Dessalement, Membrane d'osmose inverse.

Abstract:

The Albian aquifer in southern Algeria represents a significant freshwater reserve; however, its exploitation is limited by high salinity (3.5 g/L) and elevated temperatures (50 to 60 °C). To address this, a reverse osmosis desalination plant was built in Ouled Djellal, equipped with an aeration cooling system to lower the water temperature. This system also promotes the oxidation and precipitation of iron. Currently out of service, the plant requires a re-evaluation of its cooling system. This study aims to diagnose the aeration cooling system, simulate its operation, and propose improvements.

Keywords: Aeration cooling, Thermal water, Albian aquifer, Desalination, Reverse osmosis membrane.

ملخص:

تعد الطبقة الجوفية الألبينية في جنوب الجزائر مصدرًا هامًا للمياه العذبة، غير أن استغلالها يواجه صعوبات بسبب ارتفاع نسبة الملوحة (3.5 غ/لتر) ودرجات الحرارة العالية (بين 50 و60 درجة مئوية). لمواجهة هذه التحديات، تم إنشاء محطة لتحلية المياه بتقنية التناضح العكسي في أولاد جلال، مزودة بنظام تبريد يعتمد على التهوية لخفض درجة حرارة المياه. ويساهم هذا النظام أيضًا في أكسدة الحديد وترسيبه. وبسبب توقف المحطة حاليًا عن الخدمة، أصبح من الضروري إعادة تقييم نظام التبريد. وتهدف هذه الدراسة إلى تشخيص نظام التبريد بالتهوية، ومحاكاة تشغيله، واقتراح تحسينات ممكنة.

الكلمات المفتاحية: التبريد بالتهوية، المياه الحارة، الطبقة الألبية، التحلية، غشاء التناضح العكسي.

SOMMAIRE

<u>Introduction Général.....</u>	19
---	-----------

Chapitre I : Recherches bibliographiques.

1. La nappe albiennne.....	22
2. L'eau thermique.....	24
2.1. Définition.....	24
2.2. Classification des eaux thermo-minérales.....	24
2.2.1. Eau minéral.....	24
2.2.2. Eau thermo minérale.....	24
2.3. Origine	25
2.4. Formation des eaux thermales.....	26
3. Dessalement de l'eau.....	28
3.1. Définition.....	28
3.2. Historique du dessalement.....	28
3.3. Le dessalement en Algérie.....	29
3.4. Etapes de dessalement de l'eau.....	30
4. Les membranes.....	31
4.1. Définition.....	31
4.2. Les procédés des membranes	31
4.2.1. La microfiltration (MF).....	31
4.2.2. L'ultrafiltration (UF).....	31
4.2.3. La nano-filtration (NF).....	32
4.3. L'osmose inverse.....	33
4.3.1. Mise en œuvre du procédé d'osmose inverse.....	34
4.3.2. Les caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse	34

4.3.2.1. Mécanisme de transfert	34
4.3.2.2. Le taux de conversion	35
4.3.2.3. Le taux de rétention (sélectivité)	35
4.3.2.4. Densité de flux de permeat	35
4.3.2.5. La pression transmembranaire	35
4.3.2.6. Le flux d'eau à travers la membrane.....	36
4.3.2.7. Le flux de sel à travers la membrane.....	36
4.3.3. Configuration des modules d'osmose inverse	37
4.3.3.1. Le module à membrane plane.....	37
4.3.3.2. Le module à membrane fibre creuse.....	37
4.3.3.3. Le module à membrane spirale	38
4.3.4. Différents types de systèmes d'osmose inverse.....	38
4.3.4.1. Système mono-étage.....	38
4.3.4.2. Système multi-étages en série.....	39
4.3.4.3. Le montage multi-étage en série rejet.....	39
4.3.4.4. Le montage multi-étage en série production.....	39
5. Conclusion	40

Chapitre II : Modélisation du Refroidissement par Aération.

1. Généralité sur le refroidissement par aération	42
2. Le besoin de refroidissement.....	42
3. Types de systèmes de refroidissement par aération.....	43
3.1. Aération naturelle.....	43
3.2. Aération forcé.....	44
3.3. Comparaison des deux Systèmes	46
4. Refroidissement aéraulique par tours (station de dessalement Ouled-Djellal).....	46
5. Les composants de la tour de refroidissement.....	47

5.1. La structure du refroidisseur.....	47
5.2. Les ventilateurs.....	47
5.3. Les buses de pulvérisation.....	48
5.4. Les couvercles de tours.....	48
5.5. Les tuyaux d'eau.....	49
5.6. Le bassin de collecte.....	50
5.7. Systèmes de contrôle et de surveillance.....	51
6. Principe de fonctionnement de la tour de refroidissement	51
6.1. Entrée de l'eau chaude dans la tour.....	51
6.2. Distribution d'eau	51
6.3. Le contact avec l'air.....	52
6.4. Échange thermique.....	52
6.5. Récupération de l'eau refroidie à la base de la tour.....	53
6.6. Évacuation de l'air chaud et humide.....	53
7. L'intérêt de la tour de refroidissement.....	53
8. Rappel mathématique.....	54
8.1. La Convection thermique.....	54
8.1.1. Convection naturelle.....	54
8.1.2. Convection forcée.....	56
8.2. La variation de la température de l'eau.....	57
8.3. Coefficient de convection thermique	57
8.4. La chaleur latente	58
8.5. La masse d'eau évaporée	59
8.6. L'humidité relative (RH)	60
8.7. Coefficient de transfert de masse (Ke)	60
9. Conclusion.....	61

Chapitre III : Calcul et Résultat.

1. Introduction.....	63
2. Les données disponibles.....	63
3. Partie théorique.....	67
3.1. Première Cas : sans changement de phase.....	67
3.1.1. Calcul la chaleur sensible.....	67
3.2. Deuxième Cas : avec changement de phase	71
3.2.1. Calcul la chaleur latente.....	71
3.2.2. Calcul la masse d'eau évaporée.....	71
4. Partie expérimental.....	76
4.1. Calcul l'écart	77
4.1.1. L'écart absolu.....	77
4.1.2. L'écart relatif	77
5. Comparaison entre les résultats théorique et expérimental	77
6. Analyse de l'impact de la vitesse du ventilateur sur l'efficacité du refroidissement.....	78
7. Conclusion	80
<u>Conclusion générale.....</u>	82
<u>Références Bibliographiques.....</u>	84

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Région de la nappe albienne dans le sud de l'Afrique.....	22
Figure I.2 : Circulation de l'eau.....	25
Figure I.3 : Circulations hydrothermales et chaleur magmatique.....	26
Figure I.4 : Schéma de l'installation de dessalement.....	30
Figure I.5 : Catégorisation des techniques membranaires barométriques en fonction de la taille de séparation.....	32
Figure I.6 : principe d'osmose inverse.....	33
Figure I.7 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une installation d'osmose inverse.....	34
Figure I.8 : coupe d'un module à membrane spiralé.....	38
Figure I.9 : système d'une unité de dessalement par procédé d'osmose inverse mono étage.....	39
Figure I.10 : système d'unité de dessalement par procédé d'osmose inverse en série.....	40
Figure II.1 : Schéma de principe du refroidissement de l'eau par aération naturelle gravitaire.....	43
Figure II.2 : Schéma de principe du refroidissement de l'eau par aération forcé.....	45
Figure II.3 : la tour de refroidissement de station de dessalement (Ouled Djellal).....	47
Figure II.4 : Les ventilateurs de la tour et son caractéristique.....	48
Figure II.5 : Les couvercles de tours.....	49
Figure II.6 : Les tuyaux d'eau.....	50
Figure II.7 : Le bassin de collecte.....	50
Figure II.8 : système de distribution de l'eau.....	52
Figure II.9 : Phénomène de la convection naturelle.....	54
Figure II.10 : Phénomène de la convection forcée	56
Figure III.1 : Diagramme de l'air humide.....	64
Figure III.2 : les températures moyenne et l'humidité pendant l'année.....	64
Figure III.3 : la pression de la vapeur saturée et l'aire saturée en fonction de la température moyenne	65

Figure III.4 : les températures moyenne en fonction de viscosité cinématique	66
Figure III.5 : la variation de la chaleur sensible en fonction de la température de sortie	69
Figure III.6 : la variation de la température de sortie en fonction de température moyenne.....	70
Figure III.7 : la variation de la température de sortie en fonction de température moyenne	73
Figure III.8 : la variation de l'humidité en fonction de la masse d'eau évaporé.....	73
Figure III. 9 : la variation de la chaleur totale en fonction de l'humidité	74
Figure III.10 : la variation de la chaleur totale en fonction de température de sortie	75
Figure III.11 : Thermomètre électrique	76
Figure III.12 : Ttempérature de sortie en fonction de la vitesse de ventilateur.....	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Quelques stations de dessalement et de déminéralisation existantes dans les années 70 et 80.....	29
Tableau II.1 : Comparaison technico-économique des méthodes de refroidissement de l'eau.....	46
Tableau III.1 : Facteurs climatiques pour l'État au cours de l'année 2015.....	63
Tableau III.2 : pression de vapeur et l'aire saturante en fonction de la température.....	65
Tableau III.3 : propriétés physique et chimique de l'air en fonction de la température.....	66
Tableau III.4 : Tableau des paramètres thermiques mensuels de l'eau refroidie.....	68
Tableau III.5 : Tableau des paramètres thermiques mensuels de l'eau refroidie.....	72
Tableau III.6 : Tableau des températures mesurées sur site à la station de Ouled Djellal.....	77
Tableau : III.7 : Variation des données géométriques du ventilateur en fonction de température de sortie.....	78

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Fig : Figure.

CEE-ONU : Commission économique des Nations Unies pour l'Europe.

XIXe : Dix-neuvième siècle.

XXe : Vingtième siècle.

MSF : Multi-Stage Flash.

PTM : pression transmembranaire.

HVAC : (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) Chauffage, Ventilation et Climatisation.

MF : la micro-filtration.

UF : l'ultra-filtration.

NF : la nano-filtration.

OI : Osmose inverse.

NOMENCLATURE

Les initiales	Significations	Unités
R	Constante universelle des gaz parfaits	$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
rv	La constante des gaz pour la vapeur d'eau	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
T_e	Température d'entrée du fluide	K
T_s	Température de sortie du fluide	K
T_0	Température de l'aire ambiante	K
Q	La quantité de chaleur transférée par unité de temps	J
$Q_{latente}$	La chaleur latente	J
$Q_{sensible}$	La chaleur latente	J
\dot{m}_e	Le débit massique	kg/s
\dot{m}_{ev}	Débit massique d'eau évaporée	Kg / s
C_{pe}	La capacité thermique massique de l'eau	$\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
K_{air}	Coefficient d'échange global	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
Ke	Le coefficient de transfert de masse	$\text{kg}\cdot\text{Pa}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
hc	Coefficient de convection thermique	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
D_c	Coefficient de diffusion moléculaire	m^2/S
A	Surface d'échange	m^2
D	Diamètre critique	m
Nu	Nombre de Nusselt	/
Re	Nombre de Reynolds	/
Pr	Nombre de Prandlt	/

Sh_m	Nombre de Sherwood	/
Sc	Nombre de Schmidt	/
u	Vitesse d'écoulement	m/S
ν	Viscosité cinématique de l'air	m ² /S
\dot{m}_{ev}	Débit massique d'eau évaporée	Kg /S
L_v	La chaleur latente de vaporisation	J/kg
P_{vs}	La pression de la vapeur saturante	Pa
P_{as}	La pression de l'air saturante	Pa
RH	L'humidité relative	%
E_A	L'écart absolu	C°
E_R	L'écart relatif	%
J_p	Densité de flux de perméat	m/s
Q_p	Débit de perméat	m ³ /s
Q_A	Débit volumique de la solution d'alimentation	m ³ /s
S_m	Surface active de la membrane	m ²
P_{TRM}	Pression transmembranaire	Pa
P_p	Pression du perméat	Pa
P_r	Pression du rétentat	Pa
P_a	Pression d'alimentation	Pa
J_w	Flux spécifique de l'eau	m·s ⁻¹
A_m	Coefficient de perméabilité de la membrane au solvant	m·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹
ΔP	Différence de pression hydrostatique entre l'amont et l'aval	Pa
$\Delta \Pi$	Différence de pression osmotique entre l'alimentation et le perméat	Pa
J_s	Flux de soluté à travers la membrane	kg·m ⁻² ·s ⁻¹

A_s	Coefficient de perméabilité de la membrane au soluté	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
C_m	Concentration du soluté à la surface de la membrane côté alimentation	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
C_p	Concentration du soluté dans le perméat	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$
R	Taux de rétention	%
C_A	Concentration du soluté	kg/m^3
Y	Taux de conversion	/
π	Pression osmotique	Pa
C	Concentration molaire des solutés dans la solution	mol/m^3
T	Température absolue	K

Introduction

générale

L'eau constitue l'une des ressources naturelles les plus vitales, indispensable à toute forme de vie, et représente un pilier fondamental du développement socio-économique, notamment dans les régions arides et semi-arides comme le sud algérien. Dans ce contexte, l'Algérie possède un trésor souterrain inestimable : la nappe albiennne, l'un des plus grands réservoirs d'eau douce souterraine au monde, formée il y a des millions d'années. Cette nappe s'étend sur trois pays — l'Algérie, la Tunisie et la Libye — dont l'Algérie détient environ 70 % de la superficie.

Malgré l'énorme potentiel de cette ressource en matière d'agriculture, d'industrie et d'approvisionnement en eau potable, son exploitation reste confrontée à de nombreuses contraintes techniques et économiques, notamment une salinité relative des eaux (environ 3,5 g/l) et une température élevée, oscillant entre 56 et 60 °C à la sortie du sous-sol. Ces caractéristiques rendent indispensable un traitement préalable, surtout dans le cadre de procédés sensibles comme l'osmose inverse, qui nécessite une température d'entrée inférieure à 40 °C.

Dans le but de surmonter ces limitations, une station de dessalement par osmose inverse a été construite dans la région d'Ouled Djellal il y a plus de quarante ans, avec une capacité de 14 litres/seconde, afin de fournir de l'eau potable à la population locale. Un système de refroidissement par aération, utilisant des turbines, a été mis en place pour abaisser la température de l'eau avant son passage dans les membranes de dessalement.

Cependant, ce système présente plusieurs problèmes techniques majeurs, notamment :

- L'incapacité à abaisser de manière constante la température de l'eau en dessous de 40 °C.
- L'aération favorise l'oxydation du fer, présent en grande quantité dans l'eau souterraine, ce qui entraîne la précipitation d'oxydes de fer, causant l'encrassement et la corrosion des canalisations.
- L'arrêt actuel de la station de dessalement, en raison de ces dysfonctionnements techniques, affecte l'alimentation en eau potable de la région.

Cette étude se construit autour de la problématique suivante :

Dans quelle mesure le système de refroidissement par aération de la station de Ouled Djellal est-il efficace pour abaisser la température de l'eau de la nappe albiennne, et quelles améliorations peut-on envisager dans le cadre de l'extension de la station ?

Pour répondre à cette problématique, le présent mémoire vise à :

1. Diagnostiquer de manière approfondie le système actuel de refroidissement, en analysant son efficacité et ses limites.
2. Réaliser une simulation théorique du fonctionnement du système à l'aide d'outils numériques et logiciels spécialisés, afin de mieux comprendre les phénomènes de transfert thermique et de circulation de l'air.
3. Proposer des solutions techniques d'amélioration dans le cadre de l'extension de la station, dont la capacité devrait atteindre 50 litres/seconde pour satisfaire la demande croissante liée à l'augmentation rapide de la population.

Cette étude s'inscrit dans une démarche scientifique et technique visant à optimiser la gestion des ressources en eau souterraine profonde, et constitue un pas important vers une exploitation durable et raisonnée des richesses hydriques du sud algérien.

Notre mémoire s'articule autour des étapes suivantes, réparties en quatre chapitres.

- Le chapitre I est une étude sur les eaux thermales (sources, classification, formation) et des techniques de dessalement par membranes, notamment l'osmose inverse.
- Le chapitre II est une présentation des principes et types de refroidissement par aération, avec description des composants et du fonctionnement de la tour de refroidissement de la station d'Ouled Djellal.
- Le chapitre III est un rappel des bases mathématiques du transfert de chaleur et de masse (convection, évaporation, humidité, lois de Newton).
- Le chapitre IV est consacré aux calculs théoriques et expérimentaux du refroidissement, comparaison des résultats, et analyse de l'impact de la vitesse du ventilateur et de la surface d'échange sur le mécanisme de refroidissement globale

Le mémoire se termine par une conclusion générale et perspectives.

Chapitre

I

1. La nappe albiennne :

Sous les vastes étendues désertiques du sud algérien, où les températures peuvent atteindre près de 50 degrés Celsius, se cachent de gigantesques réserves d'eau douce. Ces eaux se sont accumulées au cours de la seconde moitié de l'ère secondaire, il y a environ 100 millions d'années. Ce réservoir souterrain, connu sous le nom de "nappe albiennne", contient plus de 50 000 milliards de mètres cubes d'eau, ce qui équivaut à 50 000 fois la capacité du barrage de Beni Haroun situé à l'est de l'Algérie.

Les eaux de la nappe albiennne rencontrent plusieurs défis. Bien qu'elles aient une faible teneur en minéraux par rapport à d'autres nappes souterraines, elles se trouvent souvent à des profondeurs pouvant atteindre 2000 mètres, ce qui rend les forages particulièrement onéreux. De plus, lorsqu'elles sont extraites, les eaux ont des températures proches de 60°C, ce qui nécessite des installations spécifiques pour les refroidir avant leur utilisation. [1]



Fig.1.1 : "Région de la nappe albiennne dans le sud de l'Afrique" [2]

La nappe albiennne couvre une superficie d'un million de kilomètres carrés, répartie entre l'Algérie (70%), la Libye (20%) et la Tunisie (10%), Comme indiqué dans la **Fig.I.1**, s'étendant du Tassili du Hoggar dans le sud jusqu'à l'Atlas saharien au nord. Toutefois, selon les spécialistes de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU), cette réserve d'eau souterraine fait face à des risques de déplétion et de détérioration. [2]

2. L'eau thermique :

2.1. Définition :

C'est une eau profonde qui, lorsqu'elle refait surface, affiche une température plus élevée que celle de la moyenne annuelle de la région. Elle présente des caractéristiques physicochimiques constantes pour chaque source, comme le flux, la température, le niveau de minéraux et de gaz, sans tenir compte des fluctuations climatiques et environnementales (saisons, précipitations, sécheresses). Outre son utilisation comme eau potable, elle sert aussi à des fins thérapeutiques pour traiter différentes maladies et affections. [3]

2.2. Classification des eaux thermo-minérales :

2.2.1. Eau minérale :

Les eaux minérales sont des eaux contenant une forte concentration en minéraux dissous, employées pour boire, se baigner ou dans un but thérapeutique.

2.2.2. Eau thermo minérale :

Il s'agit d'une eau, exploitée en tant qu'eau minérale, qui est naturellement chaude à l'endroit où elle jaillit.

On peut classer les sources en diverses catégories en fonction de leur température.

- Les sources froides en dessous de 20°C.
- Les sources tièdes de 20 à 30°C.
- Les sources chaudes au-delà de 30°C. [4]

Toutefois, du point de vue hydrogéologique, cette catégorisation n'a pas vraiment d'importance, puisque les températures de 20°C et 30°C ne constituent pas des critères suffisants pour différencier les sources en diverses classes, selon le type de circulation souterraine des eaux qui les approvisionne. Une nouvelle classification a été proposée par de nombreux auteurs. Voici la classification de P. Verdeil, qui catégorise les eaux thermales de la façon suivante :

- **Eaux athermales ou proto-thermales :** Eaux dont la température est plus basse que celle de l'endroit où elles émergent.

- **Eaux hypothermies** : Eaux dont la température correspond à la moyenne de la température du lieu où elles émergent.
- **Eaux méso-thermes** : Eaux dont la température se situe entre 4°C et 37°C, correspondant à la température moyenne du lieu d'origine.
- **Eaux ortho thermes** : Eaux ayant une température allant de 37°C à 45°C.
- **Eaux hyperthermies** : eaux ayant une température qui excède 45°C. [5]

2.3. Origine :

On peut distinguer trois types de sources d'eau minérale naturelle : superficielle, profonde ou mixte.

- **Eau minérale d'origine superficielle** : Aussi appelées eaux météoriques ou géothermales, ces eaux de pluie s'infiltrent dans le sol et peuvent parcourir d'importantes profondeurs avant leur remontée à la surface.

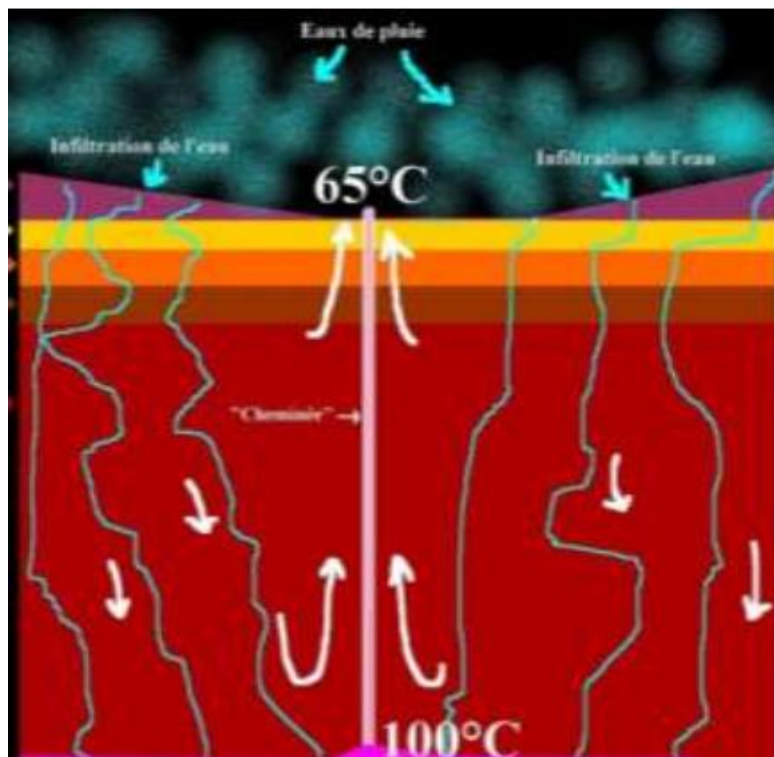


Fig.I.2 : " Circulation de l'eau "[10]

- **Eau minérale d'origine profonde (juvénile) :** Ces eaux ont leur origine dans les strates les plus en profondeur de la lithosphère. D'après une théorie récente, leur formation chimique pourrait se produire dans le magma qui se trouve au centre de la Terre (dans la pyrosphère et même la barysphère). Ces dernières seraient alors le fruit d'une combinaison directe de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux présents dans la pyrosphère ou la barysphère.

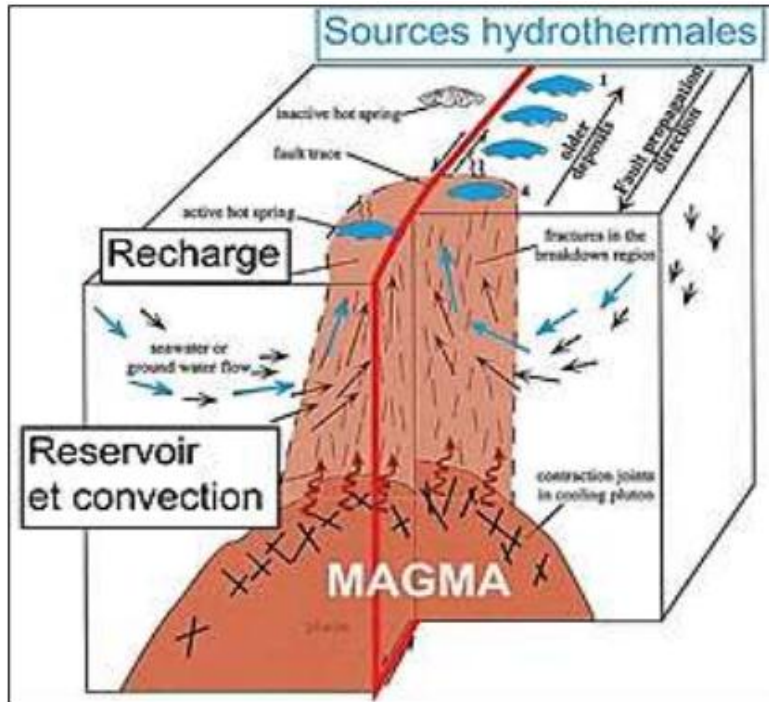


Fig.I.3 : "Circulations hydrothermales et chaleur magmatique"[11]

- **Eau minérale d'origine mixte :** Ces dernières sont issues d'un mélange, dont les proportions varient au cours de leur montée, entre des eaux profondes d'origine jeune et des eaux superficielles. [6,7]

2.4. Formation des eaux thermales :

On peut esquisser le principe de fonctionnement de la « machine thermique » à l'origine de la thermalité de la manière suivante.

La densité de l'eau baisse lorsque sa température augmente. Par conséquent, l'eau réchauffée dans les profondeurs terrestres a une tendance naturelle à monter vers la surface, un mouvement

facilité par la diminution de sa viscosité qui accompagne l'augmentation de la température. C'est ce qu'on appelle l'effet du « thermosiphon » : l'eau froide se descend pour se réchauffer, puis elle remonte.

La chaleur emmagasinée sur des centaines, voire des millions d'années, se retrouve essentiellement dans les premiers 15 à 20 kilomètres de la croûte terrestre, et secondairement, dans le manteau plus en profondeur. Son fonctionnement en profondeur favorise la répartition de cette chaleur vers la surface.

Les eaux récentes, connues sous le nom de neptuniennes, sont généralement plus superficielles et de température plus basse. Par contre, les eaux plutoniennes, qui se trouvent à la plus grande profondeur, sont également les plus anciennes (leur âge est évalué en millions d'années) et ont tendance à être les plus chaudes. [8,9]

3. Dessalement de l'eau :

3.1. Définition :

Le dessalement, aussi connu sous le nom de désalinisation, ou parfois dessalage, est une technique qui vise à extraire les sels de l'eau brute, comme l'eau de mer ou l'eau saumâtre issue des terres intérieures. [13]

3.2. Historique du dessalement :

Face à la raréfaction de l'eau douce et à une demande grandissante en eau potable, le recours au dessalement de l'eau est en forte expansion à travers le monde. Son parcours peut être retracé jusqu'à l'époque grecque, avec des progrès significatifs à partir du XIXe siècle, y compris au Chili où la première installation de distillation solaire a été mise en place. Durant le vingtième siècle, les méthodes d'évaporation prédominaient, cependant leur importante consommation énergétique a mené à l'émergence de technologies plus performantes, telles que l'osmose inverse, surtout à partir des années 60 en Amérique.

À ce jour, on dénombre plus de 15 000 stations de dessalement réparties dans 120 nations, générant approximativement 56 millions de mètres cubes d'eau quotidiennement. La plupart de cette eau est d'origine marine (60,6 %), puis vient l'eau saumâtre (22,8 %).

L'Arabie Saoudite, les États-Unis, les Émirats Arabes Unis et le Koweït sont les principaux pays de production. En ce qui concerne les technologies, la méthode d'évaporation MSF constitue 42,9 % de la capacité globale, alors que l'osmose inverse en représente 38,9 %.

En 2012, la capacité globale de dessalement à l'échelle mondiale excédait les 80 millions de mètres cubes quotidiennement, répondant aux besoins en eau douce de presque 200 millions d'individus. En ce qui concerne la région méditerranéenne, elle compte pour environ 25% de cette production mondiale et pourrait, d'ici 2030, générer seule entre 30 et 40 millions de mètres cubes quotidiennement. [12,14]

3.3. Le dessalement en Algérie :

Le développement des industries du pétrole et de la sidérurgie en Algérie est étroitement associé à l'expérience du pays dans le domaine du dessalement.

L'utilisation du dessalement pour fournir de l'eau potable à la population reste marginale, avec une unique initiative couronnée de succès à Ouled Djellal.

En même temps, plusieurs infrastructures ont été établies pour satisfaire la demande en eau de haute qualité destinée aux complexes de génération d'électricité et au secteur de liquéfaction (Arzew, Skikda).

Quelques installations situées dans le Sud approvisionnent en eau destinée à la consommation humaine les plateformes pétrolières. En 2012, l'Algérie possédait 13 grandes installations de dessalement capables de traiter jusqu'à 2,26 millions de m³ par jour et 16 plus petites stations le long de la côte, avec une capacité variante entre 2500 et 5000 m³ par jour. [15,16]

Tableau I.1 : Quelques stations de dessalement et de déminéralisation existantes dans les années 70 et 80. [17]

Site	Nombre d'unités	Débit (m ³ /j)	Procédé	Mise en service
Skikda	1	1440	Flash	1971
Annaba	2	960	Echangeurs d'ions	1971
Arzew	6	3880	Electrodialyse	1975
Annaba	3	14180	Multi-flash	1978
Arezw	1	960	Multi-flash (5 étages)	1979
HassiRmel	3	792	Osmose inverse	1979
Ghardaïa	\	960	Osmose inverse	1980
Reghaia	\	160	Echangeurs d'ions	1982
Biskra	\	864	Osmose inverse	1981

3.4. Etapes de dessalement de l'eau :

Le dessalement fait référence à l'élimination des sels de l'eau brute, qu'elle soit d'origine marine ou continentale (eau saumâtre). Le dessalement de l'eau de mer se déroule en quatre étapes.

- Captation de l'eau.
- Prétraitement.
- Dessalement.
- Post traitement ou minéralisation.

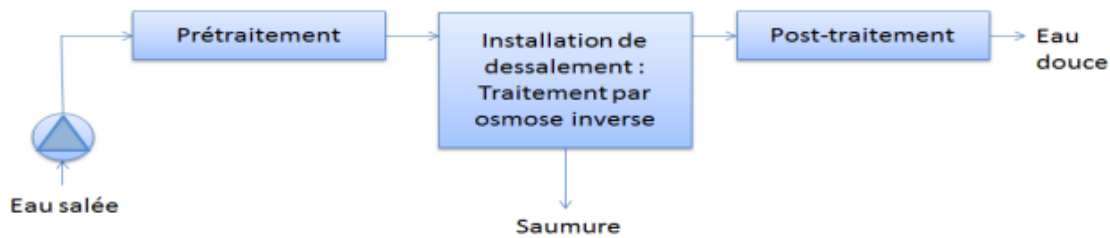


Fig.I.4 : "Schéma de l'installation de dessalement "[18].

4. Les membranes :

4.1. Définition :

La séparation des éléments d'un fluide est rendue possible grâce à la technique de filtration membranaire. La membrane fonctionne comme un filtre sélectif, autorisant le passage de certains composants tout en retenant d'autres, basé sur les caractéristiques spécifiques de ces composants sous l'influence d'une force motrice. [20]

Cette force peut être attribuée à un gradient de potentiel, de concentration ou de pression, et elle découle de la disparité de pression entre l'environnement et la membrane, une notion connue sous le nom de pression transmembranaire (PTM). [21]

4.2. Les procédés des membranes :

On identifie les procédés suivants :

- La micro-filtration (MF).
- L'ultra-filtration (UF).
- La nano-filtration (NF).
- Osmose inverse (OI).

Les particules plus petites que les pores de la membrane peuvent passer à travers celle-ci lorsqu'une pression est appliquée, tandis que les substances et les molécules de plus grande taille sont retenues par la membrane. [21]

4.2.1. La micro-filtration (MF) :

La microfiltration est essentiellement employée pour la séparation des macromolécules (polymères), des micro-organismes et des particules en suspension, grâce à des membranes dont les pores ont une taille allant de 0,1 à 10 μm . Dans ce processus, les contraintes exercées sont très légères, ne dépassant pas 2 bars, pour éviter l'obstruction. [22]

4.2.2. L'ultra-filtration (UF) :

Cette technique fait appel à l'emploi de membranes macroporeuses, dont les pores présentent des diamètres variant de 1 à 100 nm. Les pressions exercées, allant de 1 à 10 bars, dépassent

celles mises en œuvre lors de la microfiltration. Elle permet donc la distinction entre les macromolécules et les espèces colloïdales, comme les polymères et les protéines.

4.2.3. La nano-filtration (NF) :

La nano-filtration est une méthode de séparation par membranes qui se positionne entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration en termes d'application. En outre, cette méthode retient les sels bivalents et les molécules d'environ 0,001 μm , exigeant une pression opérationnelle située entre 10 et 25 bars. Les membranes de nano-filtration, moins denses que celles de l'osmose inverse, offrent des débits de perméat plus importants à des pressions plus faibles. Cela signifie que cette méthode est plus économique et consomme moins d'énergie.

La nano-filtration, considérée comme une méthode prometteuse pour la désaliénation de l'eau saumâtre, a connu un essor considérable ces dernières années grâce à sa faible consommation d'énergie, ce qui en fait une alternative moins onéreuse que l'osmose inverse. Ses membranes possèdent des pores plus larges et opèrent à des pressions inférieures.

La figure I.5 illustre les divers secteurs où sont utilisées les membranes à gradient de pression.

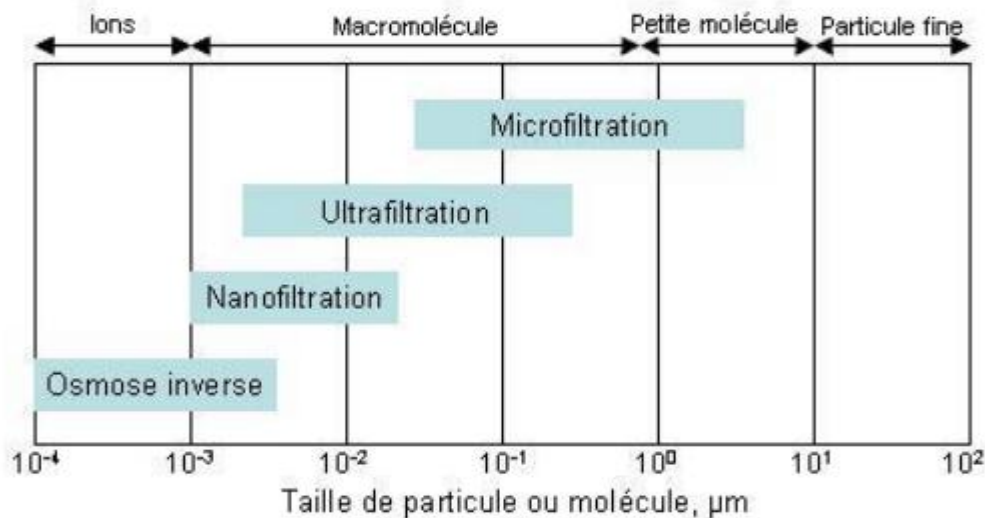


Fig.I.5 : "Catégorisation des techniques membranaires barométriques en fonction de la taille de séparation" [20]

4.3. L'osmose inverse :

Parmi les différentes méthodes utilisant des membranes, l'osmose inverse est la seule adaptée au dessalement de l'eau de mer. Quand une membrane semi-perméable divise deux sections contenant de l'eau à des niveaux variés de sels dissous, les molécules d'eau sont enclines à s'acheminer du compartiment moins concentré vers celui plus concentré, dans le but d'atténuer la salinité de ce dernier.

On appelle ce phénomène « osmose directe ». Ce processus de transfert d'eau cesse lorsque la différence de hauteur entre les deux compartiments atteint une valeur équivalente à la pression osmotique π . (figure a- I.6). [24]

Pour réduire la teneur en sels dissous dans une eau, il suffit d'exercer une pression supérieure à celle de la pression osmotique, ce qui contraint les molécules d'eau à traverser la membrane semi-perméable. On désigne alors ce processus sous le terme d'osmose inverse (figure b-I.6). [20]

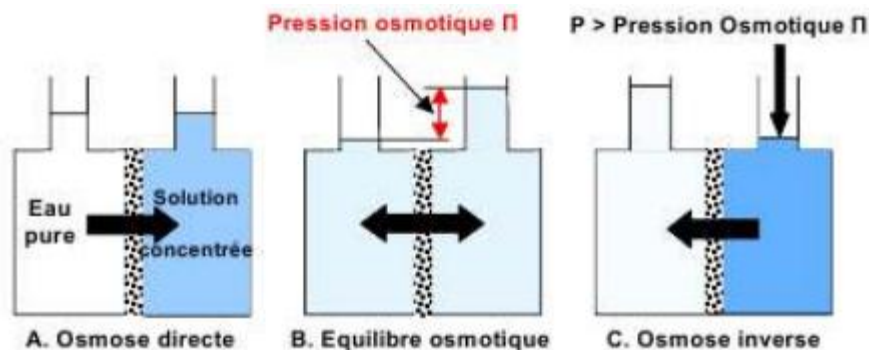


Fig.I.6 : " principe d'osmose inverse "[24]

La pression osmotique π être exprimée à partir de la relation de Van't Hoff [22] :

$$\pi = C \times R \times T \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

C : Correspond à la concentration molaire du soluté [**mol.m³**].

R : est la constante des gaz parfaits $R = 8,314$ [**J.mol⁻¹. K⁻¹**].

T : est la température absolue de la solution en [**Kelvin**].

4.3.1. Mise en œuvre du procédé d'osmose inverse :

Le processus de dessalement repose principalement sur une technique d'osmose inverse. Avant d'atteindre la membrane, l'eau traverse une phase connue sous le nom de poste de prétraitement. L'eau est par la suite poussée vers les membranes d'osmose inverse grâce à des pompes à haute pression, ce qui entraîne une consommation énergétique considérable pour l'ensemble du matériel de la station. [25]

Au niveau de la membrane, la solution à traiter (débit Q_A) se divise en deux fractions ayant des concentrations distinctes :

- Une portion franchit la membrane, c'est ce qu'on appelle le perméat ou filtrat (Q_P).
- Un autre segment, nommé retentât ou concentrât (Q_R), ne passe pas à travers la membrane et conserve sa charge en ions ainsi que les particules qui y sont retenues. [24]

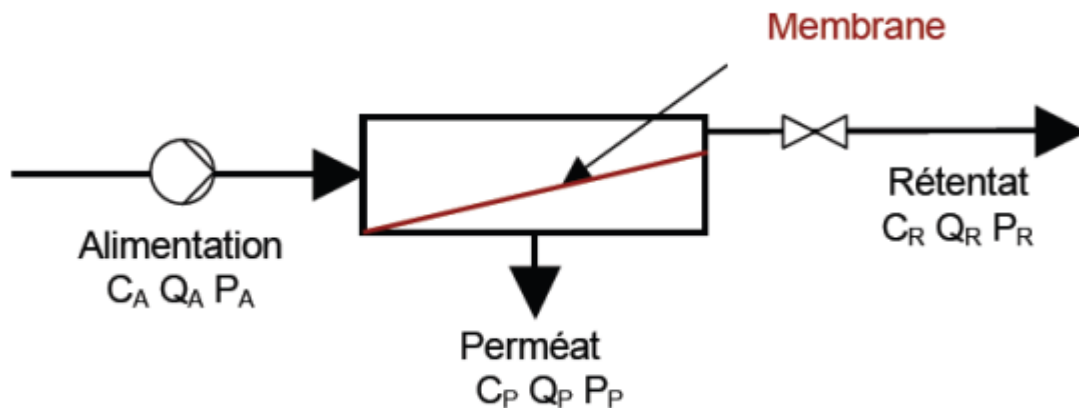


Fig .I.7 : "Schéma illustrant le fonctionnement d'une installation d'osmose inverse" [26]

4.3.2. Les caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse :

4.3.2.1. Mécanisme de transfert :

Le processus de solubilisation-diffusion décrit le déplacement du solvant et du soluté à travers une membrane semi-perméable. Dans ce mécanisme, toutes les entités moléculaires, qu'elles soient soluté ou solvant, se dissolvent dans la membrane et y diffusent sous l'impact d'un gradient de concentration et de pression. [26]

4.3.2.2. *Le taux de conversion :*

La fraction du débit de solution qui passe à travers la membrane est définie comme le taux de conversion, noté (Y). Il offre la possibilité d'évaluer le rendement du perméat généré en comparaison avec la solution d'alimentation traitée. [24]

$$Y = \frac{Q_p}{Q_A} \quad (\text{I. 2})$$

4.3.2.3. *Le taux de rétention (sélectivité) :*

Le pourcentage de rétention R (%) indique la faculté de la membrane à retenir les solutés et sa capacité de sélection. La rétention pendant l'ensemble du module membranaire correspond à la moyenne des concentrations aux points d'entrée et de sortie du module C_A et du module C_P . [24,27]

$$R = \frac{C_A - C_P}{C_A} = 1 - \frac{C_P}{C_A} \quad (\text{I. 3})$$

4.3.2.4. *Densité de flux de perméat :*

La vitesse perméation, ou densité de flux de perméat, indique la productivité du perméat en fonction de la surface de membrane exploitée. Le flux de perméat J_p est défini comme le quotient du débit de perméat Q_p par l'unité de surface membranaire S_m . [24]

$$J_p = \frac{Q_p}{S_m} \quad (\text{I. 4})$$

4.3.2.5. *La pression transmembranaire :*

On calcule la pression transmembranaire en considérant la moyenne des pressions d'alimentation P_A (pression d'entrée) et de rétentat P_R (pression de sortie), à laquelle on déduit la pression du perméat P_P . [26]

$$P_{TRM} = \frac{P_A + P_R}{2} - P_P \quad (\text{I. 5})$$

4.3.2.6. *Le flux d'eau à travers la membrane :*

Le modèle de Kimura-Sourirajan fournit une représentation mathématique adéquate du transport à travers les membranes d'osmose inverse. [27]

Ce modèle est fréquemment employé dans l'élaboration des systèmes d'osmose inverse, puisqu'il autorise une prédiction précise du déplacement des solutés et du solvant à travers la membrane. [28]

Un modèle mathématique de membrane d'osmose inverse, basé sur le modèle de Kimura-Sourirajan et la théorie du film, a été conçu pour représenter le mouvement à travers la membrane. [29]

Le passage du solvant à travers la membrane est quantifié en termes de flux d'eau pure

$$J_w = A_m(\Delta P - \Delta \Pi) \quad (\text{I. 6})$$

Dans cette formule, A représenté la perméabilité de la membrane au solvant (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$), ΔP indique l'écart de pression des deux côtés de la membrane et $\Delta \Pi$ correspond à la pression osmotique du flux d'alimentation quand le perméat est une solution fortement diluée. On exprime les pressions en pascals. [19]

4.3.2.7. *Le flux de sel à travers la membrane :*

Le flux de soluté à travers la membrane est dicté par la disparité de concentration et est évalué en se basant sur le modèle de Kimura-Sourirajan. J_s ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{ S}^{-1}$) [30] :

$$J_s = A_s(C_m - C_p) \quad (\text{I. 7})$$

Où :

A_s : est la perméabilité moyenne de la membrane.

C_m : Concentration de sel au.

C_p : Concentration de sel au perméat.

4.3.3. Configuration des modules d'osmose inverse :

Les membranes sont généralement réunies en modules qui regroupent plusieurs d'entre elles, afin d'être mises en œuvre. Cependant, dans le cadre de l'osmose inverse (OI), on utilise surtout des modules en spirale, ainsi que des fibres creuses. Ces deux sortes de modules offrent le bénéfice d'être compacts et peu coûteux, tout en ayant besoin d'une consommation d'énergie minime. [31]

Actuellement, on retrouve sur le marché trois sortes de modules :

- Module à membrane plane.
- Module à membrane fibre creuse.
- Module à membrane spiralé.

4.3.3.1. *Le module à membrane plane :*

Cette configuration est la plus ancienne et la plus simple. Les membranes sont rigides, ce qui fait qu'elles ne peuvent pas être enroulées et leur utilisation est donc limitée à des appareils de type filtre-presse, où les membranes en forme de feuille sont fixées des deux côtés sur des structures rigides empilables. Du fait de leur coût plutôt élevé, ces modules ont été substitués dans les processus d'osmose inverse par des modules en spirale et des modules à fibres creuses. [22]

4.3.3.2. *Le module à membrane fibre creuse :*

Il s'agit de membranes en fibres U, d'un diamètre approximatif d'un millimètre, organisées en faisceau. Ces faisceaux ainsi constitués sont ancrés aux extrémités pour assurer l'imperméabilité entre le compartiment (permeat) et l'approvisionnement. La fourniture peut être effectuée en interne (interne-externe) ou en externe (externe-interne) pour les fibres creuses. Ces membranes sont économiques, sensibles à l'encrassement et leur application se limite au traitement de l'eau. [21,26]

4.3.3.3. Le module à membrane spirale :

Pour minimiser l'espace requis pour l'installation des membranes, elles sont arrangées en forme de spirale. Les grilles de circulation pour l'eau d'alimentation et de récupération du perméat sont installées entre les membranes, puis enroulées avec ces dernières afin de constituer des composants aux dimensions normalisées. [26]

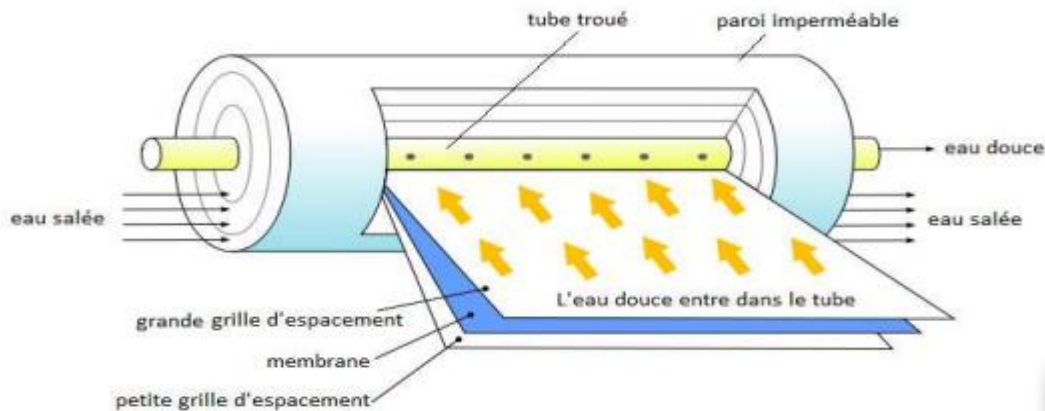


Fig.I.8 : "coupe d'un module à membrane spirale" [32]

4.3.4. Différents types de systèmes d'osmose inverse :

4.3.4.1. Système mono-étage :

Un dispositif de dessalement par osmose inverse comprend une source d'eau salée qui est soumise à un système de pompage assurant la pressurisation, ce dernier renvoyant l'eau sous haute pression vers les modules d'osmose inverse. Tous ces modules sont assemblés en parallèle. [26,27]

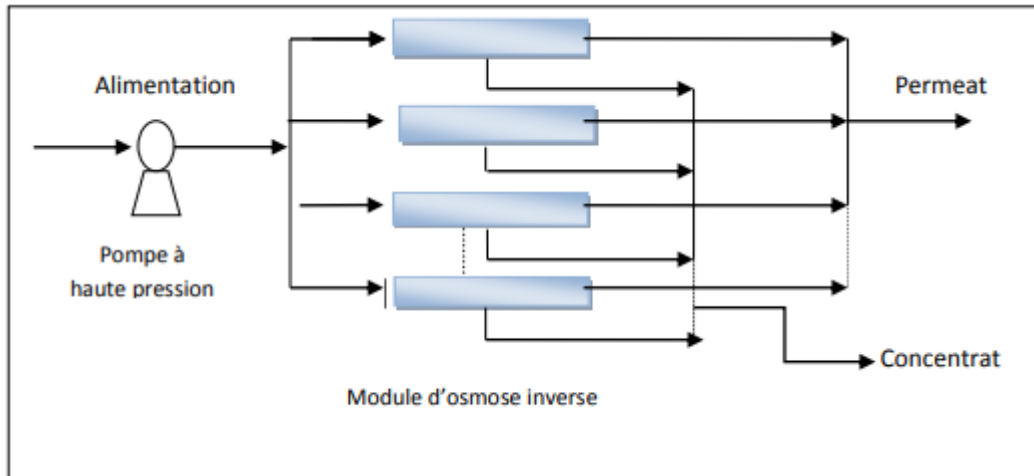


Fig.I.9 : "système d'une unité de dessalement par procédé d'osmose inverse mono étage"[26]

4.3.4.2. Systèmes multi-étages en série :

On distingue deux sortes de montage : le montage en série avec rejet et le montage en série avec production.

4.3.4.3. Le montage multi-étage en série rejet :

Il consiste essentiellement en une série d'étages, où l'effluent de chaque étage alimente le niveau supérieur, et ainsi de suite. On collecte les productions de tous les niveaux pour constituer, finalement, la production globale du système. [33]

4.3.4.4. Le montage multi-étage en série production :

Il est composé d'une série de niveaux, où la production de chaque niveau sert à alimenter le niveau suivant, et ainsi de suite, de façon à ce que l'alimentation de chaque niveau reflète les caractéristiques identiques à celles de la production du niveau précédent. [33]

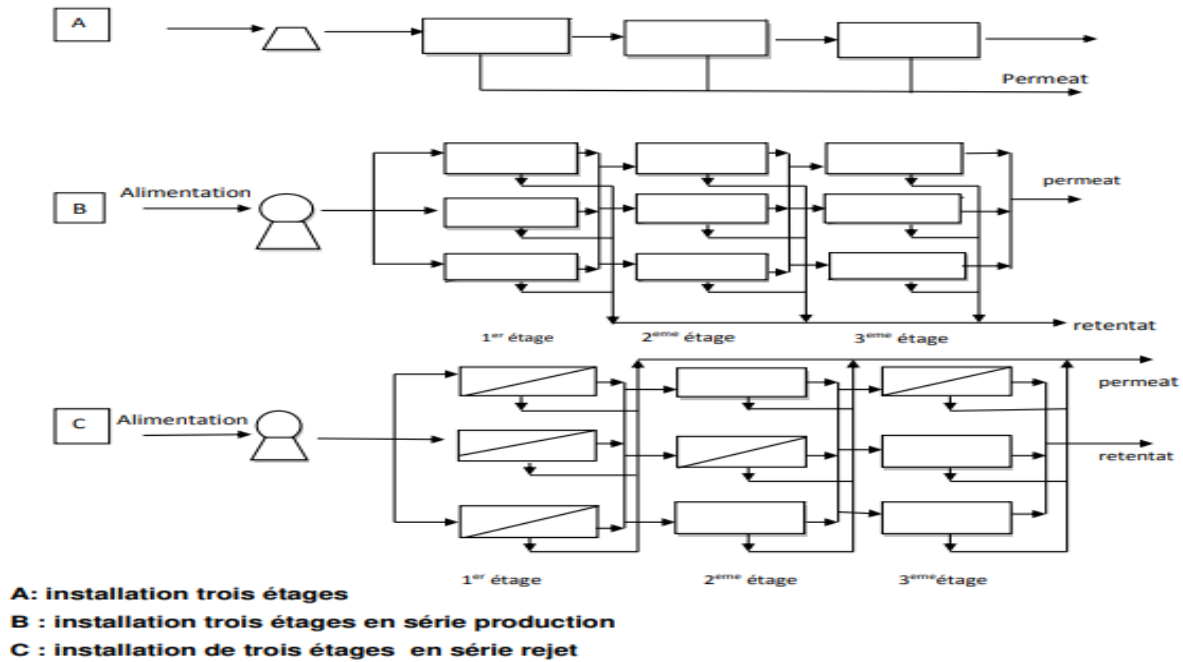


Fig.I.10 : "système d'unité de dessalement par procédé d'osmose inverse en série" [27]

5. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de notre sujet. Il a abordé la nappe albienne comme ressource stratégique, les caractéristiques et l'origine des eaux thermales, ainsi que les principes du dessalement, en particulier en Algérie. Une attention particulière a été accordée aux technologies membranaires, notamment l'osmose inverse, ses mécanismes, ses configurations et ses performances. Ces éléments constituent une base essentielle pour analyser le système de refroidissement et de dessalement existant, et orienter les étapes suivantes de diagnostic et extension du système.

Chapitre

II

1. Généralité sur le refroidissement par aération :

Le refroidissement de l'eau par aération est une méthode naturelle et économique qui consiste à augmenter la surface de contact entre l'eau chaude et l'air ambiant afin de favoriser les échanges thermiques. En dispersant ou en faisant tomber l'eau dans l'air, généralement avec le recours à des ventilateurs, une portion de la chaleur se dissipe dans l'atmosphère, contribuant ainsi à abaisser la température de l'eau.

On utilise fréquemment cette méthode dans les installations géothermiques, les tours de refroidissement et les systèmes de traitement des eaux, surtout dans les régions où il est nécessaire de refroidir l'eau chaude avant sa réutilisation ou son rejet. [34]

2. Le besoin de refroidissement :

L'aération comme méthode de refroidissement est cruciale dans divers environnements industriels et environnementaux pour différentes raisons. En premier lieu, cette méthode aide à sauvegarder les installations en abaissant la température de l'eau chaude, évitant ainsi d'abîmer des composants tels que les conduits ou les pompes. L'eau issue de sources géothermiques ou d'activités industrielles peut monter à des températures significatives, risquant de provoquer des dysfonctionnements ou des complications dans le système si elle n'est pas refroidie. En outre, le refroidissement par ventilation favorise la réutilisation efficace de l'eau.

Dans des installations closes, comme celle de la station de Ouled Djellal, il est crucial de rafraîchir l'eau avant de la réemployer pour l'irrigation, le chauffage ou d'autres applications. Si l'eau atteint une température trop élevée, elle devient inapte ou risquée pour ces utilisations. Ce dispositif contribue aussi à minimiser l'empreinte écologique, étant donné que le déversement d'eau chaude dans la nature peut provoquer une pollution thermique préjudiciable aux écosystèmes aquatiques. En pré-refroidissant l'eau, on peut éviter ces conséquences néfastes, protégeant par conséquent la faune et la flore. En outre, cette approche est très rentable. Par rapport à d'autres méthodes de refroidissement (telles que celles à compression ou à absorption), celle-ci est facile à déployer, économique et demande moins de puissance électrique. [35]

De plus, dans des zones chaudes et arides telles qu' Ouled Djellal, l'aération comme méthode de refroidissement est particulièrement bénéfique puisqu'elle exploite la chaleur sèche de l'air pour accélérer le processus d'évaporation et donc optimiser le refroidissement.

3. Types de systèmes de refroidissement par aération :

3.1. Aération naturelle :

L'aération naturelle est une méthode passive qui permet à l'air environnant de circuler librement autour de l'eau ou entre les surfaces en contact, sans avoir recours à des dispositifs de ventilation artificiels. Cette méthode de refroidissement s'appuie sur l'écart de température entre l'eau chaude et l'air.

Quand l'eau est en contact avec l'air, il se produit un échange thermique entre les deux par convection, et une portion de l'eau s'évapore, provoquant une diminution de la chaleur latente. Ce processus peut se dérouler de façon continue si les conditions météorologiques sont optimales, à l'instar des milieux chauds et arides. [36]

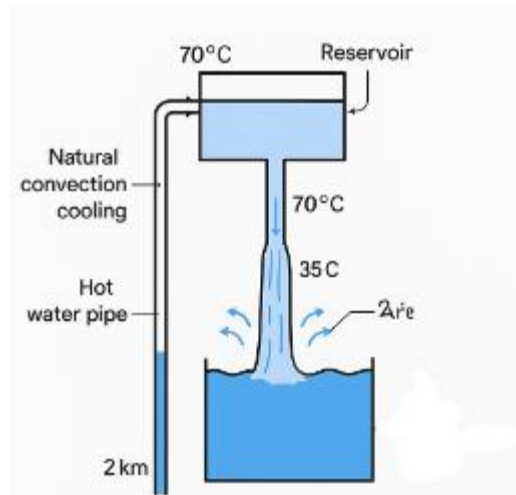


Fig.II.1 : "Schéma de principe du refroidissement de l'eau par aération naturelle gravitaire"[36]

Il existe différentes méthodes pour réaliser une aération naturelle :

- **Chute libre de l'eau :** L'eau est soit pulvérisée, soit lâchée d'une hauteur déterminée, augmentant ainsi la zone de contact avec l'air et favorisant un échange thermique plus efficace. Cela s'applique aux tours de refroidissement gravitaires, où l'eau s'écoule dans un bassin ou une cuve.

- **Écoulement en cascade** : Dans ce dispositif, l'eau s'écoule doucement sur une surface irrégulière ou en pente, générant ainsi une vaste zone d'échange avec l'air. On a souvent recours à ce genre de système dans les piscines ou dans les équipements agricoles.

Le principal atout de l'aération naturelle réside dans son faible coût d'installation et l'absence de besoin en énergie pour le mouvement de l'air. Cependant, son efficacité est grandement conditionnée par les conditions météorologiques et la température extérieure, ce qui en restreint l'utilisation dans les zones à forte humidité ou aux températures plutôt basses. [36]

3.2. Aération forcée :

L'aération forcée, également appelée mécanique, fait appel à des ventilateurs ou des souffleurs afin d'optimiser la circulation de l'air autour de l'eau ou de la surface destinée au refroidissement. Ce dispositif facilite le dépassement des contraintes des systèmes naturels en intensifiant le flux d'air et en générant une circulation d'air plus constante, optimisant ainsi le mécanisme de convection et précipitant l'évaporation de l'eau.

On utilise fréquemment les systèmes de ventilation forcée dans les refroidisseurs industriels, les dispositifs de climatisation, ainsi que dans les infrastructures géothermiques ou thermiques où il est nécessaire de dissiper une énorme quantité de chaleur en un temps limité. [36]

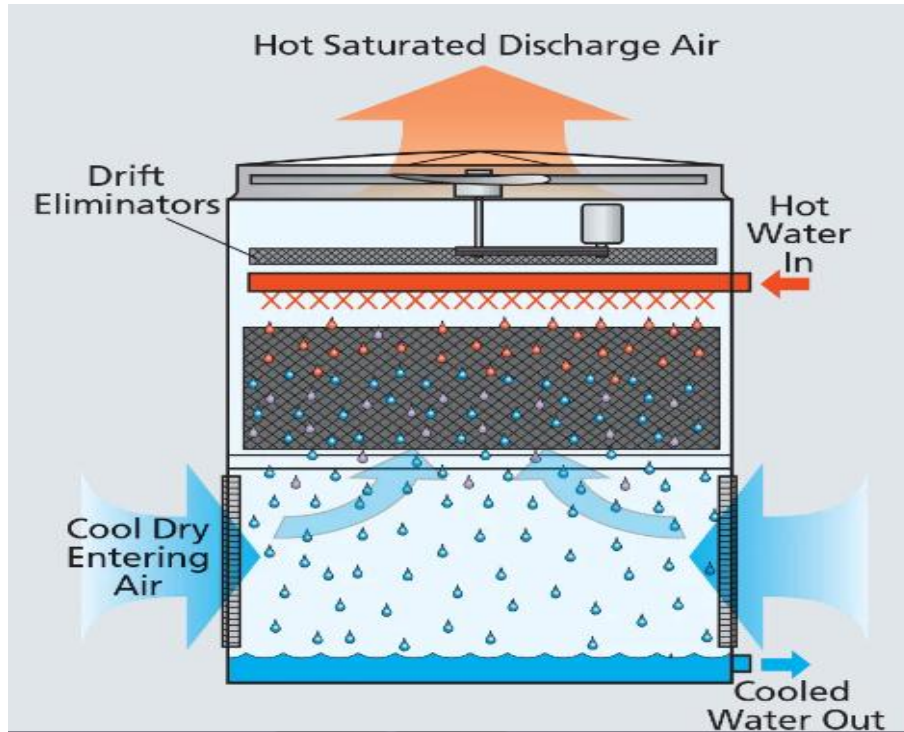


Fig.II.2 : " Schéma de principe du refroidissement de l'eau par aération forcée"[34]

Il existe plusieurs types d'aération forcée :

- **Tours de refroidissement à courant direct :** Dans ce dispositif, l'air est dirigé directement à travers les conduits de refroidissement où il rencontre l'eau réchauffée. L'air dissipe la chaleur de l'eau, ce qui diminue sa température. Ces structures peuvent être dotées de ventilateurs positionnés à la base ou au sommet pour expulser ou aspirer l'air.
- **Systèmes à flux inversé :** Dans ce système, l'air se déplace dans un sens contraire à celui de l'eau, augmentant ainsi la durée du contact entre les deux et par conséquent, améliorant l'efficacité du refroidissement. On utilise souvent ces dispositifs dans les centrales de refroidissement et les réacteurs nucléaires.
- **Échangeurs de chaleur par air forcé :** Ce dispositif implique la circulation de l'air à travers un ensemble de conduits ou d'échangeurs thermiques, où passe de l'eau chaude. L'air forcé saisit la chaleur de l'eau via convection et contribue à son refroidissement efficace.

L'aération forcée offre un contrôle supérieur sur les conditions de refroidissement et peut être mise en œuvre dans une plus grande variété de situations environnementales. Toutefois, cela

nécessite une utilisation d'énergie pour faire fonctionner les ventilateurs ou les systèmes de soufflage, ce qui peut accroître les frais d'exploitation. En outre, elle requiert un entretien périodique afin d'assurer le bon fonctionnement du système, notamment pour éviter l'accumulation de poussière ou d'autres particules susceptibles de bloquer les ventilateurs. [37]

3.3. Comparaison des deux Systèmes :

La distinction majeure entre la ventilation naturelle et forcée s'établit à travers l'usage de l'énergie ainsi que l'efficacité du dispositif. L'aération naturelle est plus économique au niveau de la consommation d'énergie, cependant elle repose en grande partie sur les conditions climatiques. Par contre, l'aération forcée est plus maîtrisable et efficace dans les milieux où les conditions naturelles sont précaires, bien qu'elle requière une énergie additionnelle.

Dans le domaine industriel ou géothermique, on peut associer ces deux systèmes afin d'améliorer l'efficacité de la climatisation. Par exemple, en recourant à la ventilation naturelle lors des moments de faible demande et à la ventilation forcée lorsque les exigences en matière de refroidissement augmentent. [37]

Tableau II.1 : Comparaison technico-économique des méthodes de refroidissement de l'eau.

Méthode	Coût	Efficacité	Maintenance
Aération naturelle	Faible	Moyenne	Faible
Aération forcée	Moyenne	Élevée	Moyenne

4. Refroidissement aéraulique par tours (station de dessalement Ouled Djellal) :

Le refroidissement par tours aérauliques est une technique efficace utilisée pour abaisser la température de l'eau chaude provenant de processus industriels ou de centrales électriques, en l'exposant à des courants d'air à l'intérieur de tours de refroidissement. Ces tours augmentent le contact entre l'eau et l'air, permettant ainsi un bon échange thermique, où la chaleur de l'eau est absorbée par l'air.

Dans les systèmes équipés de ventilateurs, la circulation de l'air à l'intérieur de la tour est renforcée, ce qui améliore l'efficacité du refroidissement et permet de réduire la température plus rapidement. Le système repose également sur le principe de l'évaporation partielle de l'eau, ce qui

contribue à abaisser la température de manière efficace. Cette technique est une solution durable qui garantit un refroidissement continu et fiable dans les applications nécessitant l'utilisation de grandes quantités d'eau, telles que les centrales géothermiques. [38]



Fig.II.3 : *"la tour de refroidissement de station de dessalement (Ouled Djellal)"*

5. Les composants de la tour de refroidissement :

5.1. La structure du refroidisseur :

La structure du refroidisseur est la partie principale de la tour de refroidissement, responsable de la direction correcte de l'eau et de l'air à l'intérieur du système. Le design des tours peut être soit ouvert, soit fermé, en fonction du type de la tour (tour de refroidissement ouverte ou fermée). La structure permet à l'air de pénétrer en grande quantité et assure l'échange de chaleur entre l'air et l'eau à sa surface. Elle contient des réseaux de tuyaux et des ouvertures pour guider l'écoulement de l'eau vers le bas, tout en s'assurant que l'air entre en contact suffisant avec l'eau pour améliorer le refroidissement. [38]

5.2. Les ventilateurs :

Les ventilateurs jouent un rôle crucial dans la tour de refroidissement en améliorant le flux d'air à l'intérieur de la tour. Dans certains types de tours, on peut compter sur l'effet de tirage naturel,

où l'air chaud monte naturellement dans la tour. Cependant, dans les tours qui utilisent des ventilateurs, ces derniers accélèrent le mouvement de l'air et le dirigent efficacement pour augmenter l'échange thermique entre l'eau et l'air. Cela aide à évaporer une plus grande quantité d'eau plus rapidement, ce qui permet de refroidir l'eau de manière plus efficace.



Fig.II.4 : " Les ventilateurs de la tour et son caractéristique"

5.3. Les buses de pulvérisation :

Les buses de pulvérisation sont des éléments qui permettent de pulvériser l'eau de manière uniforme sur la surface de la tour. Cette pulvérisation aide à augmenter la surface de contact entre l'eau et l'air, ce qui favorise l'évaporation et l'échange thermique.

Plus les buses sont capables de répartir l'eau de manière égale, plus l'efficacité du refroidissement augmente. Elles aident également à distribuer uniformément l'eau sur toutes les parties de la tour, améliorant ainsi la qualité du processus de refroidissement.

5.4. Les couvercles de tours :

Les couvercles de tours jouent un rôle fondamental en protégeant la tour des influences environnementales externes telles que les vents forts et les pluies, qui pourraient affecter l'efficacité du refroidissement. Les couvercles aident également à guider l'air de manière

appropriée dans la tour, permettant à l'air de circuler de manière organisée pour assurer un bon échange thermique avec l'eau. Ils contribuent aussi à réduire l'évaporation non nécessaire et à protéger la tour contre les contaminants externes. [38]



Fig.II.5 : "*Les couvercles de tours*"

5.5. Les tuyaux d'eau :

Les tuyaux d'eau sont les canaux par lesquels l'eau chaude est transportée de la source vers le sommet de la tour. L'eau est pompée à travers ces tuyaux à l'aide de pompes haute pression, puis elle atteint les buses de pulvérisation pour commencer le processus de refroidissement. Les tuyaux sont une partie essentielle pour garantir un flux d'eau continu et bien organisé, facilitant ainsi le processus de refroidissement. Les tuyaux en acier inoxydable sont souvent utilisés dans ces systèmes pour résister à la chaleur et à la rouille.



Fig.II.6 : "*Les tuyaux d'eau*"

5.6. Le bassin de collecte :

Le bassin de collecte se trouve à la base de la tour de refroidissement et sert à collecter l'eau refroidie après l'échange thermique. L'eau est ensuite réutilisée de manière cyclique dans le processus. Ce bassin est conçu pour retenir l'eau efficacement après qu'elle ait perdu une grande partie de sa chaleur. Il peut également être équipé d'un système de filtration pour éliminer les impuretés ou les dépôts qui pourraient s'accumuler dans l'eau. [38]



Fig.II.7 : "*Le bassin de collecte*"

5.7. Systèmes de contrôle et de surveillance :

La présence de systèmes de contrôle et de surveillance dans les tours de refroidissement est essentielle pour assurer un fonctionnement optimal du refroidissement. Ces systèmes incluent la surveillance de la température, de l'humidité, du flux d'eau et d'air, ainsi que le contrôle des ventilateurs et des pompes à eau. Ces systèmes permettent d'optimiser l'efficacité du refroidissement et de maintenir l'opération de manière continue et sans interruption. [38]

6. Principe de fonctionnement de la tour de refroidissement :

6.1. Entrée de l'eau chaude dans la tour :

L'eau chaude est extraite d'un puits profond de plus de 2000 mètres, où la température et la pression sont naturellement élevées. Cette extraction peut se faire à l'aide d'une pompe à haute pression, conçue pour supporter des conditions extrêmes en profondeur, ou bien, dans certains cas, grâce à la pression géothermique interne du réservoir, l'eau remonte spontanément à la surface.

La pression peut atteindre jusqu'à 3 bars, ce qui permet un écoulement naturel et continu de l'eau vers la surface sans apport d'énergie externe. Une fois extraite, l'eau est dirigée à travers des conduites en acier spécialement traitées pour résister à la température, à la pression et à la corrosion, jusqu'au sommet de la tour de refroidissement où début le processus d'aération.

6.2. Distribution d'eau :

L'eau chaude est transformée en fines gouttelettes grâce à des buses de pulvérisation spécialement conçues, qui la projettent vers le bas de la tour. Cette atomisation augmente considérablement la surface d'échange entre l'eau et l'air, ce qui améliore l'efficacité du refroidissement par contact direct avec l'air ambiant. Ce processus favorise également l'évaporation partielle de l'eau, permettant ainsi une réduction rapide de la température avant sa récupération à la base de la tour.



Fig.II.8 : "système de distribution de l'eau "

6.3. Le contact avec l'air :

Pendant leur chute, les fines gouttelettes d'eau interagissent thermiquement avec le flux d'air entrant dans la tour, généré par l'aspiration mécanique des ventilateurs, ce qui favorise le transfert de chaleur et le refroidissement par évaporation

6.4. Échange thermique :

La chaleur de l'eau est transférée à l'air ambiant à travers le contact direct avec les gouttelettes. Ce transfert thermique provoque l'évaporation d'une partie de l'eau. Le processus d'évaporation est une réaction endothermique, ce qui signifie qu'il absorbe de la chaleur de l'eau, réduisant ainsi sa température.

Cette dissipation thermique aide à refroidir efficacement l'eau avant qu'elle ne soit réutilisée ou rejetée, contribuant à un système de refroidissement durable et performant.

6.5. Récupération de l'eau refroidie à la base de la tour :

Après avoir subi un processus de refroidissement par contact direct avec les flux d'air à l'intérieur de la tour de refroidissement, l'eau refroidie est collectée dans un bassin spécialement conçu situé à la base de la tour. Ce bassin est conçu pour assurer une collecte efficace de l'eau ayant perdu une grande partie de son énergie thermique. Sa conception prend en compte la capacité, l'isolation.

Par la suite, cette eau refroidie est aspirée par des pompes et envoyée, à travers un réseau de canalisations, vers une station de dessalement où elle est utilisée comme eau d'alimentation dans des procédés de dessalement thermique ou par osmose inverse, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité énergétique globale et à réduire la pression sur les ressources en eau.

6.6. Évacuation de l'air chaud et humide :

L'air chaud et humide, chargé de vapeur d'eau issue du processus d'évaporation, est évacué par le sommet de la tour de refroidissement. Cette évacuation est renforcée par l'effet de tirage généré par des ventilateurs mécaniques qui accélèrent le flux d'air à l'intérieur de la tour. Ce processus est essentiel pour maintenir un gradient thermique adéquat permettant un échange de chaleur efficace, tout en limitant l'accumulation d'humidité dans le système, ce qui permet d'éviter une baisse de performance de l'installation.

7. L'intérêt de la tour de refroidissement :

Les tours de refroidissement constituent des éléments essentiels dans de nombreux secteurs industriels et de services, car elles permettent d'éliminer l'excès de chaleur contenu dans l'eau utilisée au cours de divers procédés. Dans les centrales électriques, elles sont utilisées pour refroidir l'eau chauffée à la sortie des turbines, permettant ainsi son recyclage efficace dans le processus de production d'électricité.

Dans les installations industrielles, elles servent à refroidir l'eau de traitement utilisée pour le refroidissement des machines et équipements, ainsi que pour des opérations spécifiques telles que la purification chimique ou la fabrication textile. Dans les systèmes de climatisation (HVAC), les

tours de refroidissement jouent un rôle central en abaissant la température de l'eau condensée ayant absorbé la chaleur intérieure des bâtiments. Elles sont également employées dans l'industrie agroalimentaire pour refroidir l'eau utilisée dans le lavage et la désinfection des produits, dans les centres de données pour maintenir la température des équipements électroniques, et dans les laboratoires pour refroidir les instruments de précision. Grâce à cette diversité d'applications, les tours de refroidissement représentent une solution cruciale pour maintenir l'efficacité des processus industriels tout en contribuant à la gestion durable de l'eau par son réemploi. [39 ,40]

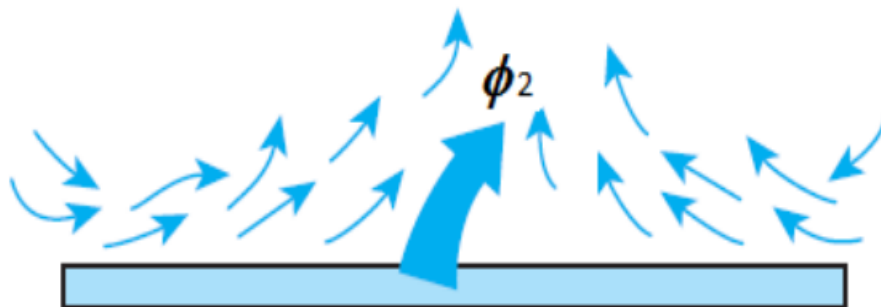
8. Rappel mathématique :

8.1. La Convection thermique :

La convection est un procédé de transmission de chaleur qui, outre la conduction, implique le déplacement macroscopique de la matière. Ce phénomène a lieu dans les environnements fluides (liquides ou gaz) qui sont en train de s'écouler, ou bien entre une surface solide et un fluide qui est en déplacement. On identifie deux sortes de convection.

8.1.1. Convection naturelle :

Les déplacements sont causés par les changements de densité dans un fluide exposé à la force de gravité. Les changements de densité peuvent être provoqués par des variations de température (l'air chaud est moins dense que l'air froid) et/ou des variations de composition (air d'une salle chauffée par un radiateur, courants marins ou atmosphériques...).



Convection naturelle

Fig.II.9 : "*Phénomène de la convection naturelle*" [44]

L'équation classique de la convection naturelle s'exprime à partir du nombre de Nusselt (**Nu**) en fonction du nombre de Rayleigh (**Ra**) :

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad (\text{II. 1})$$

Où :

- $Nu = \frac{h \cdot L}{k}$ est le nombre de Nusselt.
- $Ra = Gr \cdot Pr$ est le nombre de Rayleigh.
- Gr est le nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (Ts - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2} \quad (\text{II. 2})$$

- $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ est le nombre de Prandtl.
- h est le coefficient de convection thermique [**W/m²·K**].
- L est la longueur caractéristique [**m**].
- k est la conductivité thermique du fluide [**W/m·K**].
- g est la gravité [**m/s²**].
- β est le coefficient de dilatation thermique [**1/K**].
- Ts est la température de la surface [**K**].
- T_{∞} est la température ambiante [**K**].
- ν est la viscosité cinématique [**m²/s**].
- α est la diffusivité thermique [**m²/s**].

La forme exacte de la relation $Nu = C \cdot Ra^n$ dépend du type de géométrie et des conditions aux limites (mur vertical, horizontal, cavité, etc.). Par exemple, pour une plaque verticale, on a souvent :

$$Nu = 0,59 \cdot Ra^{1/4} \text{ Pour } 10^4 < Ra < 10^9$$

8.1.2. Convection forcée :

Le déplacement du fluide est induit par des interventions mécaniques externes (pompe, ventilateur, etc.).

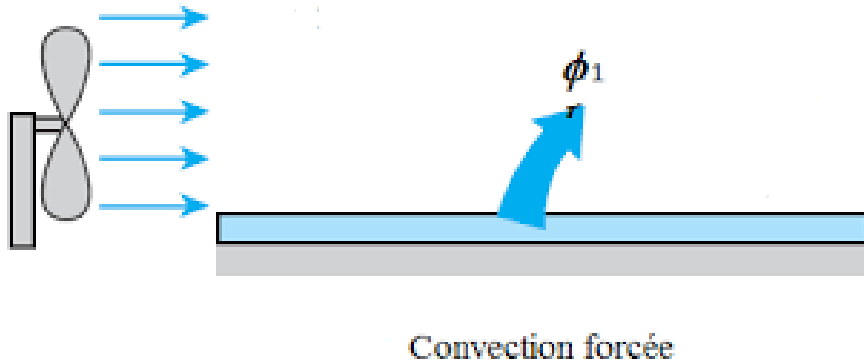


Fig.II.10 : "Phénomène de la convection forcée" [44]

La loi qui régit ce transfert est la suivante :

$$Q_{\text{sensible}} = hc \cdot A \cdot (T_e - T_0) \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

- Q : quantité de chaleur transférée par unité de temps [W].
- hc : coefficient de convection thermique [W/m²·K].
- A : surface d'échange [m²].
- T_e : Température de l'eau à l'entrée [K].
- T_0 : température de l'aire ambiante [K]. [42]

8.2. La variation de la température de l'eau :

Pour calculer la variation de la température de l'eau lors de son passage à travers le système de refroidissement, on utilise l'équation thermique dérivée du principe de conservation de l'énergie dans les systèmes ouverts, exprimée comme suit :

$$T_e - T_s = \frac{Q_{tot}}{\dot{m}_e \times C_{pe}} \quad (\text{II. 4})$$

$$Q_{tot} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad (\text{II. 5})$$

- T_e, T_s : représente les températures d'entrée et de sortie de l'eau respectivement [K].
- Q_{tot} : est la quantité de chaleur transférée par unité de temps [watts].
- \dot{m}_e : est le débit massique de l'eau [kg/s].
- C_{pe} : est la capacité thermique massique de l'eau [J/kg·°C].

Cette équation constitue une relation fondamentale permettant d'estimer l'efficacité du système de refroidissement et son impact sur la température de l'eau. Elle est largement utilisée dans l'analyse des systèmes de refroidissement par ventilation, comme celui mis en œuvre à la station d'Oulad Djellal. [42]

8.3. Coefficient de convection thermique :

Le coefficient de convection thermique, noté généralement h , est un paramètre clé en transfert de chaleur. Il exprime la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de différence de température entre une surface solide et un fluide en contact avec elle (comme l'air ou l'eau). Il est utilisé dans la loi de Newton du refroidissement, nous utilisons la relation suivante :

$$hc = \frac{K_{air} \times Nu}{D} \quad (II. 6)$$

Avec :

- **hc** : coefficient de convection thermique [**W/m²·K**].
- **K_{air}** : coefficient d'échange globale [**W/m·K**].
- **Nu** : nombre de Nusselt.
- **D** : diamètre critique [**m**].

Pour calculer Nu on utilise la corrélation d'un régime turbulent suivante :

$$Nu = 0,023 \times Re^{4/5} \times Pr^{1/3} \quad (II. 7)$$

Où :

- **Nu** : nombre de Nusselt.
- **Re** : nombre de Reynolds.
- **Pr** : nombre de Prandlt ($\approx 0,71$).

Calcul le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{u \times D}{\nu} \quad (II. 8)$$

- **u** : vitesse d'écoulement d'air [**m/S**].
- **ν** : viscosité cinématique de l'air [**m²/S**]. [42]

8.4. La chaleur latente :

Pour calculer la quantité d'énergie thermique absorbée lors de l'évaporation d'une partie de l'eau dans le système de refroidissement, nous utilisons la relation suivante :

$$Q_{latente} = \dot{m}_{ev} \times L_v \quad (II. 9)$$

Où :

- $Q_{latente}$: Quantité de chaleur latente [W].
- \dot{m}_{ev} : Débit massique d'eau évaporée [Kg /S].
- L_v : la chaleur latente de vaporisation de l'eau [J/kg].

Cette équation permet de calculer la quantité de chaleur nécessaire pour transformer une certaine masse d'eau de l'état liquide à l'état gazeux sans changement de température. Ce phénomène est très important dans les tours de refroidissement par évaporation, où une partie de l'eau s'évapore et absorbe de la chaleur latente, contribuant ainsi efficacement au processus de refroidissement. [42]

8.5. La masse d'eau évaporée :

Pour estimer la masse d'eau évaporée par unité de temps, on peut utiliser la relation suivante :

$$\dot{m}_{ev} = \frac{Ke}{rv \times T} \times (P_{vs} - P_{as}) \times A \quad (\text{II. 10})$$

- \dot{m}_{ev} : est le débit massique de l'eau évaporée [kg/s].
- Ke : est le coefficient de transfert de masse [kg·Pa/m²·s].
- rv : est la constante des gaz pour la vapeur d'eau [J/kg·K].
- T : est la température absolue [K].
- P_{vs} : est la pression de saturation de la vapeur à la température de surface [Pa].
- P_{as} : est la pression partielle de la vapeur dans l'air ambiant [Pa].
- A : est la surface d'échange [m²].

Cette expression met en évidence que le taux d'évaporation dépend principalement du gradient de pression de vapeur et de la température du système. [42]

8.6. L'humidité relative (RH) :

L'humidité relative (RH) est définie comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau présente dans l'air et la pression de saturation à la même température, exprimée en pourcentage :

$$RH = \frac{P_{as}}{P_{vs}} \times 100 \quad (\text{II. 11})$$

- **RH** : est l'humidité relative [%].
- **P_{as}** : est la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air [**Pa**].
- **P_{vs}** : est la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température donnée [**Pa**].

Cette grandeur permet de quantifier le degré de saturation de l'air en vapeur d'eau. Une humidité relative de 100 % signifie que l'air est saturé et ne peut plus contenir davantage de vapeur d'eau, favorisant ainsi la condensation ou la formation de brouillard [42].

8.7. Coefficient de transfert de masse (Ke) :

En utilisant l'analogie entre les transferts de chaleur et de masse suivante :

$$Shm = 0,037 \cdot Re^{4/5} \cdot Sc^{1/3} \quad (\text{II. 12})$$

Avec:

$$Re = \frac{u}{\nu} \times D \quad (\text{II. 13})$$

Et :

$$Sc = \frac{\nu}{Dc} \quad (\text{II. 14})$$

On en déduit le coefficient de transfert de masse par convection :

$$Ke = Shm \times \frac{Dc}{D} \quad (\text{II. 15})$$

Où :

- ***Shm*** : nombre de Sherwood.
- ***Rem*** : nombre de Reynolds.
- ***u*** : vitesse d'écoulement d'air [**m/S**].
- ***v*** : viscosité cinématique de l'air [**m²/S**].
- ***D*** : diamètre critique [**m**].
- ***Dc*** : coefficient de diffusion moléculaire [**m²/S**].
- ***Sc*** : nombre de Schmidt. [42]

9. Conclusion :

Ce chapitre a présenté le principe du refroidissement par aération, ses types (naturel et forcé), ainsi que son application dans la station de dessalement d'Ouled Djellal. Les composants essentiels de la tour de refroidissement ainsi que son mode de fonctionnement ont également été décrits.

L'importance de ce système réside dans sa capacité à réduire la température de l'eau avant l'étape de dessalement. Ces éléments constituent une base pour l'analyse des performances réelles du système dans le chapitre suivant.

Chapitre

III

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous effectuerons des calculs précis de la température de l'eau après le processus de refroidissement, en prenant en compte les températures de l'air ambiant durant les différents mois de l'année. Ces calculs s'appuieront sur les équations présentées dans le chapitre précédent, ainsi que sur les données disponibles relatives au système étudié. Les résultats théoriques seront ensuite comparés aux résultats pratiques enregistrés.

Nous analyserons également les facteurs qui influencent l'efficacité du refroidissement, tels que la vitesse du vent et les dimensions de la tour de refroidissement, afin d'évaluer leur impact sur la performance globale du système.

Enfin, des solutions alternatives à faible coût seront proposées afin d'améliorer l'efficacité du refroidissement sans engendrer de charges financières supplémentaires.

2. Les données disponibles :

Tableau IV.1 : Facteurs climatiques pour l'État au cours de l'année 2015. [45]

Mois	La température moyenne (°C)	Humidité (%)
Janvier	11,7	57
Février	12,3	57
Mars	16,5	46
Avril	22,4	38
Mai	28	22
Juin	31,2	29
Juillet	34,3	27
Aoute	34,2	34
Septembre	30	46
Octobre	23,5	53
Novembre	17,6	55
Décembre	12,2	63

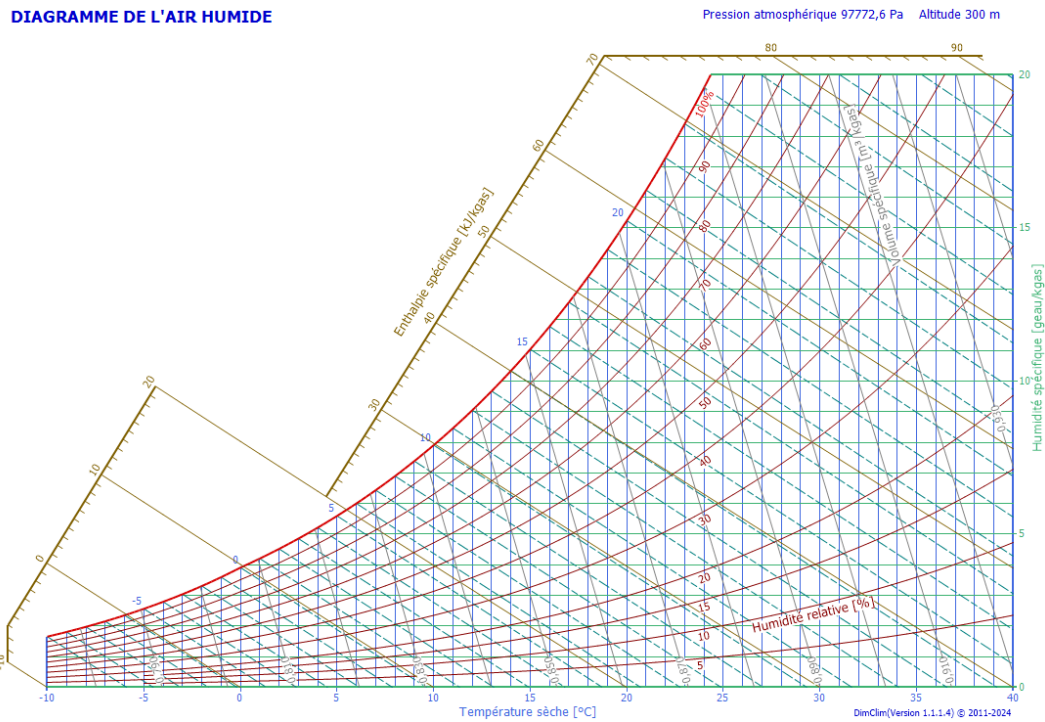


Fig.III.1 : "Diagramme de l'air humide." [43]

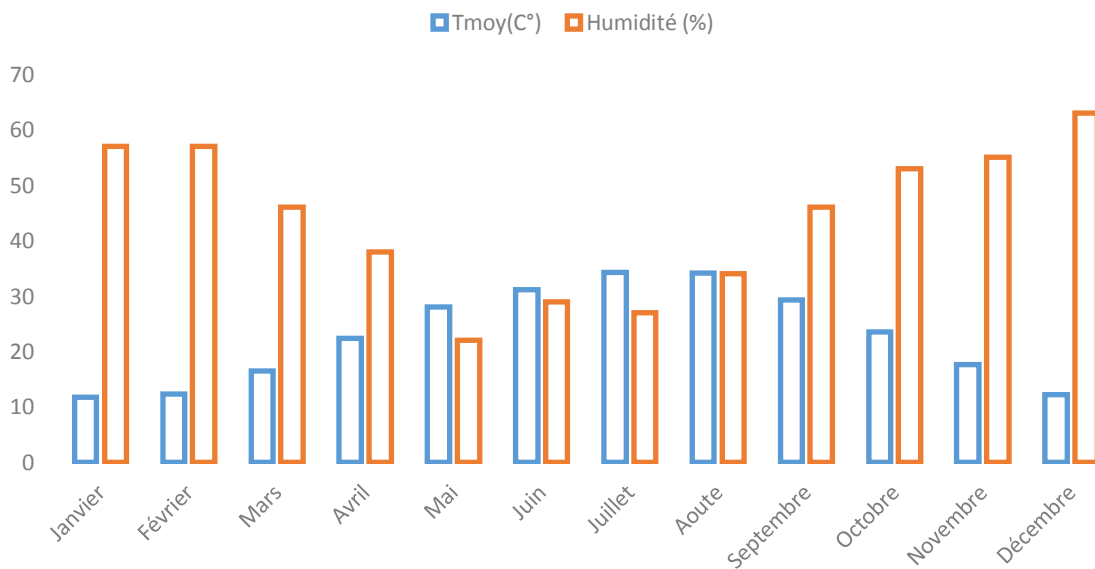


Fig.III.2 : "les températures moyenne et l'humidité pendant l'année"

Pour calculer la pression de l'air saturante en utilise la formule (II.11) dans le chapitre précédent.

Tableau III.2 : pression de vapeur et l'aire saturante en fonction de la température.

Température (C°)	Pression de vapeur saturante (mbar)	Pression de vapeur saturante (Pa)	Pression de l'air saturante (Pa)
10	12,3	1230	701,1
15	17	1700	782
20	23,4	2340	889,2
25	31,7	3170	1680,1
30	42,4	4240	1950,4
35	73,8	7380	1992,6

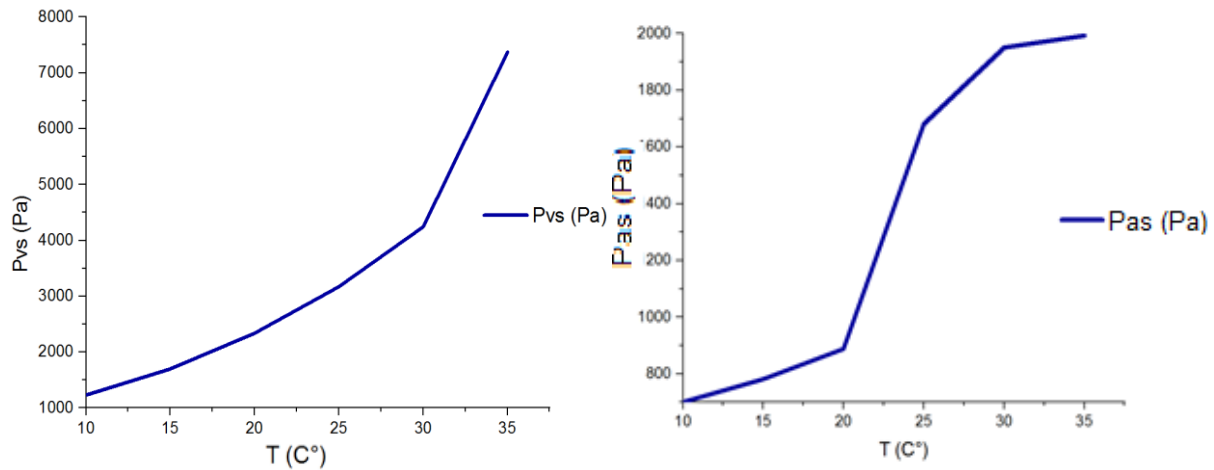
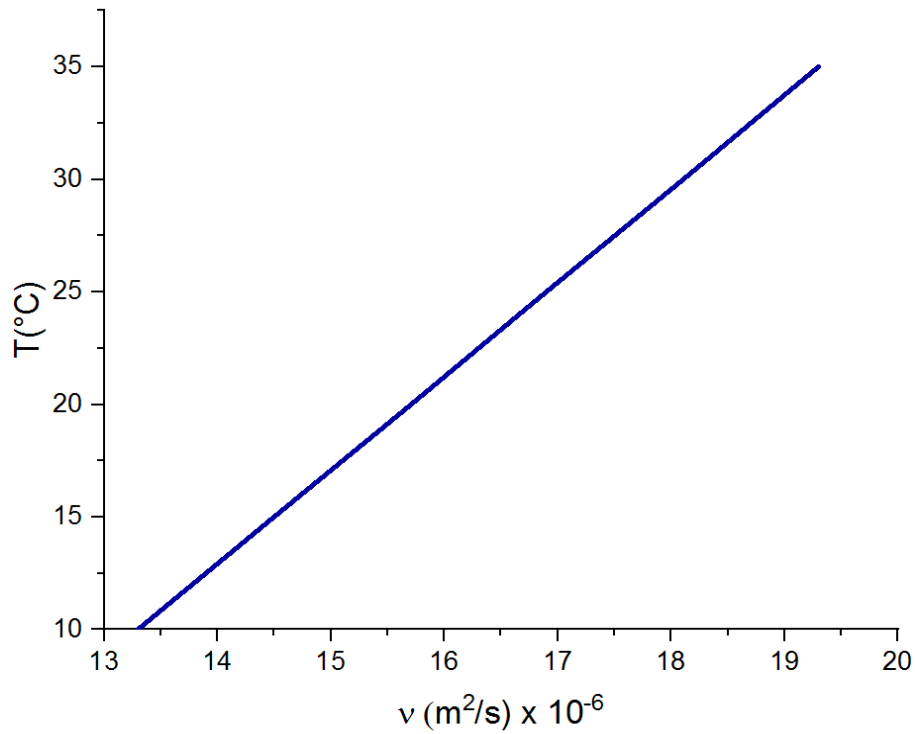


Fig.III.3 : "la pression de la vapeur saturée et l'air saturé en fonction de la température moyenne"

Tableau III.3 : propriétés physique et chimique de l'air en fonction de la température.

Température	Viscosité cinématique de l'air (m^2/S) $\times 10^{-6}$	Conductivité thermique Kair ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
10	13.3	0.0241
15	14.5	0.0244
20	15,7	0,0250
25	16.9	0.0257
30	18.1	0.0263
35	19,3	0,0269

**Fig.III.4** : "les températures moyenne en fonction de viscosité cinématique "

➤ *Autre donnée :*

C_{pe}	4180 KJ/kg.°C
L_v	2260 kJ/kg
rv	461,5 J/kg·K
u	18,17 m/s
D	2 m
D_c	$2,4 \times 10^{-5}$ m ² /s
A	3,14 m ²
T_e	50 °C
\dot{m}_e	25 kg/s

3. Partie théorique :

Dans cette partie, le mois de septembre sera choisi pour calculer la température de l'eau après le refroidissement, en se basant sur les données disponibles.

Deux cas seront étudiés : le premier sans changement de phase, et le second avec changement de phase. Ensuite, les résultats seront comparés afin de déterminer si la masse de vapeur générée a un impact sur l'efficacité du refroidissement.

3.1. Première Cas : sans changement de phase :

3.1.1. Calcul la chaleur sensible :

Dans l'expression (II.8) avec et $v=18,1 \times 10^{-6}$ m²/s, on obtient :

$$Re = \frac{6,54 \times 2}{18,1 \times 10^{-6}} = 722792 > 105 \text{ alors le régime est turbulent.}$$

Pour calculer le nombre de Nusselt on utilise la corrélation suivante :

$$Nu = 0,023 \times Re^{4/5} \times Pr^{1/3}$$

On prendre $Pr=0,71$

$$Nu = 0,023 \times 722792^{4/5} \times 0,71^{1/3} = 999,66$$

Pour calculer hc on utilise la formule (III.6), on prend $K_{air}= 0,0263 \text{ (W/m.}^\circ\text{C)}$:

$$hc = \frac{0,0263 \times 999,66}{2} = 13,146 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Enfin, nous calculons la chaleur sensible en utilisant la formule (II.3), on obtient :

$$Q_{sensible} = 13,146 \times 3,14 \times (50 - 30) = 825,26 \text{ W}$$

Application numérique de l'équation (II.4) :

$$T_s = 50 - \frac{825,26}{0,025 \times 4180} = 34,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tableau III.4 : Tableau des paramètres thermiques mensuels de l'eau refroidie.

Mois	T _{moy} (°C)	hc (W/m ² . °C)	Q _{tot} =Q _{sensible} (W)	T _s (°C)
Janvier	11,7	15,2679	1837,08	16,19
Février	12,3	14,9995	1776,52	17,307
Mars	16,5	14,2783	1502,69	22,347
Avril	22,4	13,7877	1195,5	28
Mai	28	13,3291	921,245	33,047
Juin	31,2	13,0345	769,843	35,833
Juillet	34,3	12,8286	632,745	38,356
Aoute	34,2	12,8348	637,082	38,276
Septembre	30	13,1456	825,961	34,8
Octobre	23,5	13,747	1144,47	28,939
Novembre	17,6	14,2538	1450,86	23,3
Décembre	12,2	15,0215	1783,83	17,173

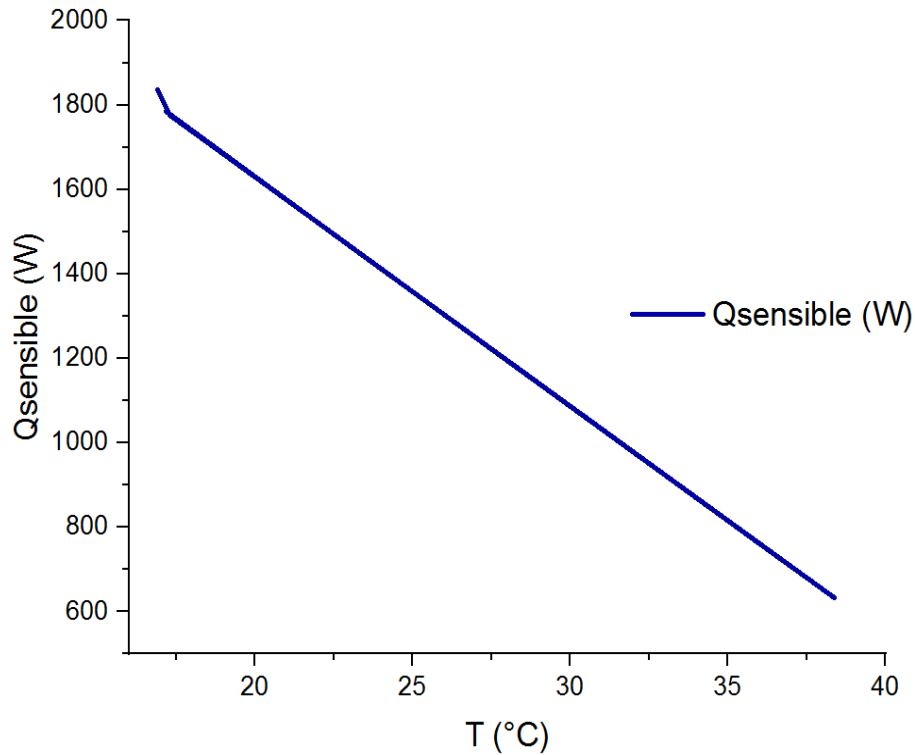


Fig.III.5 : " la variation de la chaleur sensible en fonction de la température de sortie"

Cette courbe montre une relation inverse entre la quantité de chaleur sensible extraite de l'eau et sa température après sa sortie du système de refroidissement. On observe que :

- En hiver, la température de l'eau après refroidissement diminue de manière significative, ce qui permet d'extraire une plus grande quantité de chaleur (Q_{sensible} élevée).
- En revanche, en été, la température de l'eau après refroidissement augmente, ce qui entraîne une diminution de la quantité de chaleur extraite.

Ce comportement est dû à une différence de température plus importante entre l'eau et l'air pendant les saisons froides, ce qui permet un échange thermique plus efficace. En revanche, pendant les saisons chaudes, cette différence est réduite, ce qui limite la capacité du système à refroidir, et donc la quantité de chaleur extraite est plus faible.

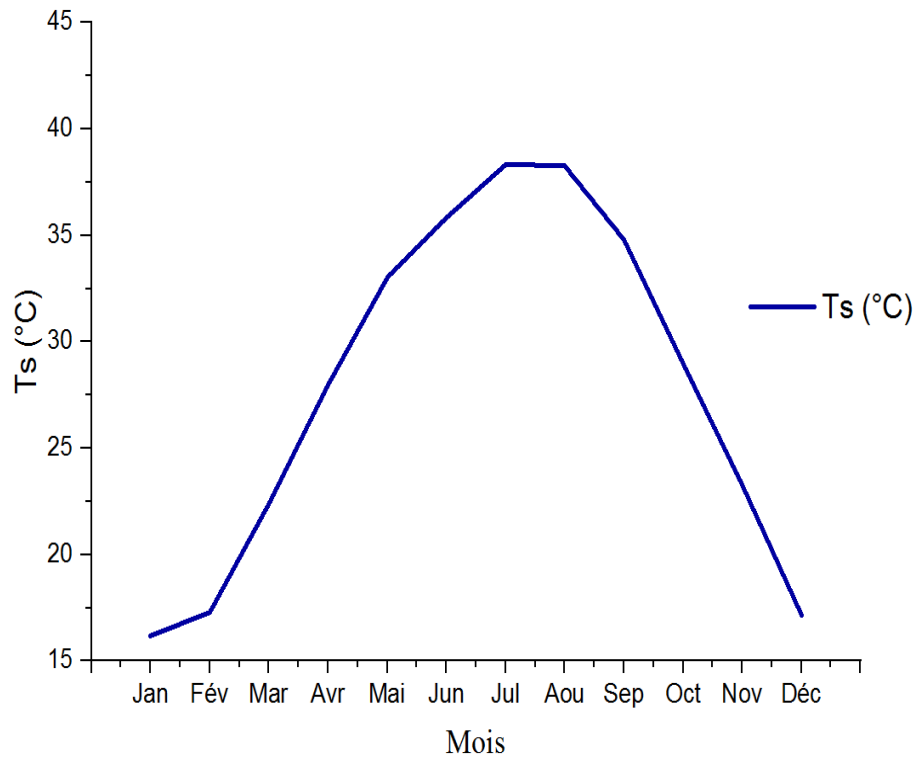


Fig.III.6 : "la variation de la température de sortie en fonction de température moyenne des mois"

Cette courbe montre une relation directe entre la température de l'air ambiant et la température de l'eau après refroidissement, où :

- Plus la température de l'air ambiant augmente, plus la température de l'eau après refroidissement augmente également.
- Cela indique que la performance du système de refroidissement est directement influencée par la température de l'air extérieur, étant donné que l'air est le fluide intermédiaire par lequel le refroidissement de l'eau est assuré.

Pendant les mois d'été, l'air ambiant devient plus chaud, ce qui réduit la différence de température entre l'eau et l'air, diminuant ainsi l'efficacité de l'échange thermique. En revanche, en hiver, la baisse de la température de l'air contribue à améliorer l'efficacité du refroidissement, entraînant une diminution significative de la température de l'eau à la sortie.

3.2. Deuxième Cas : avec changement de phase :

3.2.1. Calcul la chaleur latente :

Pour calculer $Q_{latente}$ il faut calculer les paramètres suivants : \dot{m}_{ev} , K_e , Re , Sc et Shm

$$(II.13) \Rightarrow Re = \frac{6,54}{18.1 \times 10^{-6}} \times 2 = 726808$$

$$(II.14) \Rightarrow Sc = \frac{18.1 \times 10^{-6}}{0,000024} = 0,75$$

AN de l'eqt (II.12) :

$$Shm = 0,037 \cdot 726808^{4/5} \cdot 0,75^{1/3} = 1644,8$$

AN de l'eqt (II.15) :

$$K_e = 1644,8 \times \frac{0,000024}{2} = 0,01974 \text{ m/s}$$

3.2.2. Calcul la masse d'eau évaporée :

$$\dot{m}_{ev} = \frac{0,01974}{461,5 \times 30} \times (4240 - 1950) \times 3,14 = 0,00101 \text{ Kg/s}$$

Calcul $Q_{latente}$:

$$Q_{latente} = 0,00101 \times 2260000 = 2290,91 \text{ W}$$

AN de l'eqt (II.5) :

$$Q_{tot} = 825,961 + 2290, = 3116,33 \text{ W}$$

AN de l'eqt (II.4) :

$$T_s = 29,82 \text{ C}^\circ$$

Remarque : On remarque que la différence entre les deux cas réside dans la température de sortie, celle calculée dans le deuxième cas étant supérieure de 4 °C par rapport au premier. Ainsi, on ne peut pas négliger la quantité d'eau évaporée.

Nous procédons maintenant au calcul de la température pour les mois restants, en tenant compte des caractéristiques atmosphériques telles que l'humidité, la pression, etc., afin d'obtenir le tableau suivant :

Tableau III.5 : Tableau des paramètres thermiques mensuels de l'eau refroidie.

Mois	T _{moy} (C°)	hc (W/m ² .C°)	Q _{sensible} (W)	\dot{m}_{ev} (Kg/s)	Q _{latent} (W)	T _s (C°)	Q _{tot} (W)
Janvier	11,7	15,2679	1837,08	0,00028	636,376	23,6694	2473,456
Février	12,3	14,9995	1776,52	0,00029	660,807	23,3237	2437,327
Mars	16,5	14,2783	1502,69	0,00047	1070,01	24,6192	2572,7
Avril	22,4	13,7877	1195,5	0,00078	1773	28,4068	2968,5
Mai	28	13,3291	921,245	0,00115	2602	33,7153	3523,245
Juin	31,2	13,0345	769,843	0,00156	3533,49	41,1803	4303,333
Juillet	34,3	12,8286	632,745	0,00221	4998,48	44,8873	5631,225
Aout	34,2	12,8348	637,082	0,00198	4479,94	42,9667	5153,022
Septembre	30	13,1456	825,961	0,00101	2290,91	29,8265	3116,871
Octobre	23,5	13,747	1144,47	0,00067	1504,67	25,3506	2649,14
Novembre	17,6	14,2538	1450,86	0,00042	954,317	23,016	2405,177
Décembre	12,2	15,0215	1783,83	0,00025	565,104	22,4779	2348,934

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, on observe que la température de l'eau après refroidissement varie entre 20 °C et 35 °C durant la plupart des mois de l'année, ce qui constitue des valeurs acceptables et compatibles avec le processus de dessalement.

Toutefois, en période estivale, cette température peut atteindre jusqu'à 45 °C, comme indiqué dans la **figure III.7**. Une telle valeur est considérée comme inadaptée au dessalement de l'eau, en raison de son impact potentiel sur les équipements de dessalement, notamment les membranes d'osmose inverse (OI), qui risquent d'être endommagées ou de voir leur performance diminuer lorsque les limites thermiques recommandées sont dépassées.

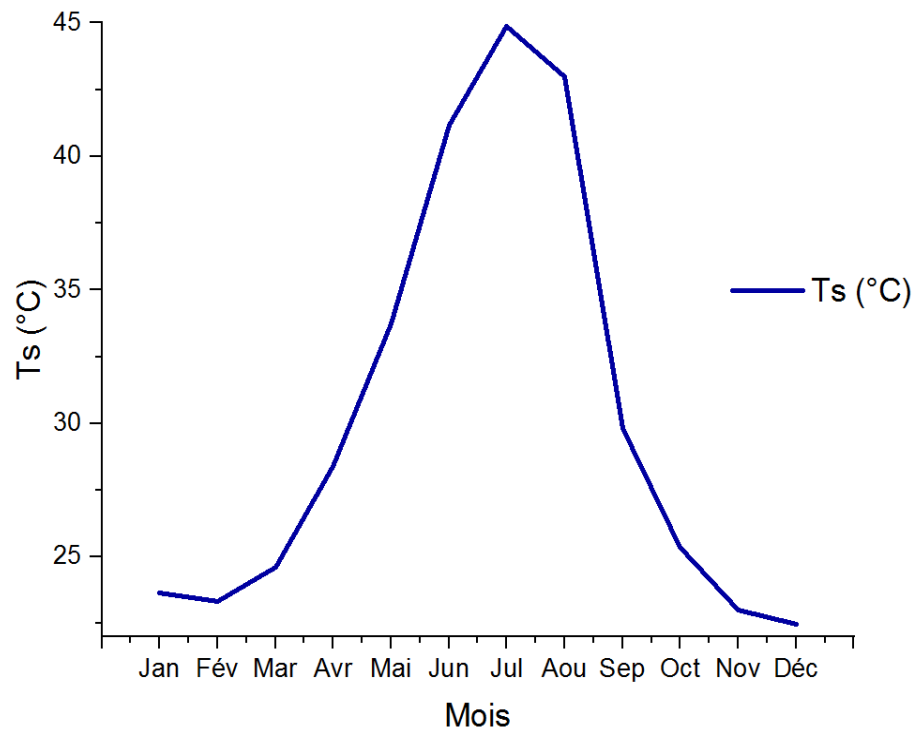


Fig.III.7 : "la variation de la température de sortie en fonction de température moyenne des mois"

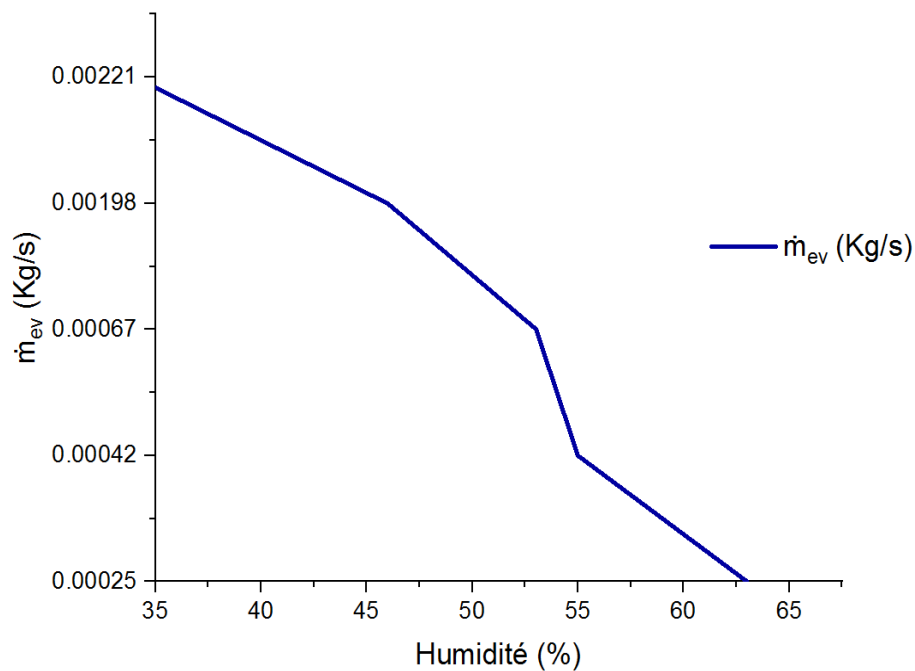


Fig.III.8 : "la variation de l'humidité en fonction de la masse d'eau évaporée"

La courbe montre une relation inverse entre l'humidité relative de l'air et la quantité d'eau évaporée depuis le bassin :

- Lorsque l'humidité est faible (air sec), l'air peut absorber davantage de vapeur d'eau, ce qui favorise fortement l'évaporation.
- Lorsque l'humidité est élevée (air déjà chargé en vapeur), la capacité de l'air à accepter de la vapeur diminue, ce qui freine le processus d'évaporation.

Analyse physique : L'évaporation dépend de la différence entre la pression de vapeur à la surface de l'eau et celle dans l'air. Plus cette différence est grande, plus l'évaporation est intense.

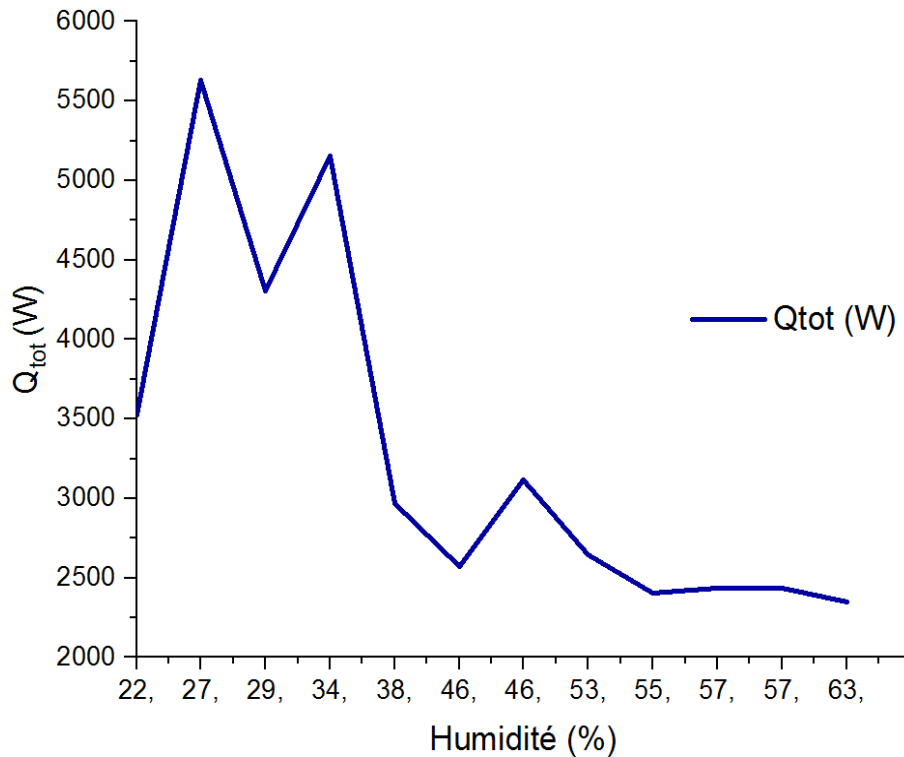


Fig.III.9 : "la variation de la chaleur totale en fonction de l'humidité "

La quantité de chaleur évacuée (Q_{tot}) dépend directement de la quantité d'eau évaporée, chaque kilogramme d'eau évaporée transportant une importante chaleur latente.

- Lorsque l'air est sec, l'évaporation est élevée, ce qui entraîne une valeur élevée de Q_{tot} .
- Lorsque l'air est humide, l'évaporation est limitée, et Q_{tot} diminue en conséquence.

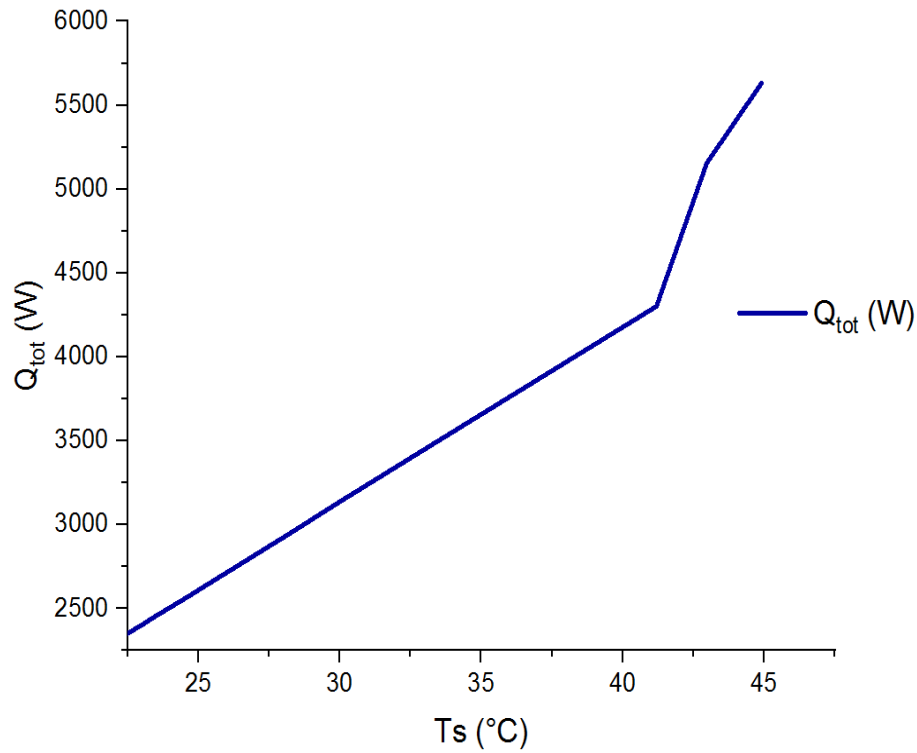


Fig.III.10 : "la variation de la chaleur totale en fonction de la température de sortie "

- Quand Q_{tot} est élevée (évaporation importante dans un air sec), la température de l'eau en sortie est basse, ce qui reflète un bon refroidissement.
- Quand Q_{tot} est faible (dans un air humide), l'eau perd moins de chaleur, sa température reste relativement élevée.

4. Partie expérimental :

Dans cette partie, nous procéderons à des mesures expérimentales de la température de l'eau lors de sa chute depuis le sommet de la tour de refroidissement, ainsi qu'après son refroidissement, en utilisant un thermomètre électronique (**Fig.III.11**). La température de l'air extérieur sera également mesurée. Les valeurs obtenues seront ensuite comparées aux résultats théoriques préalablement calculés, afin d'évaluer la concordance entre les données expérimentales et les prévisions analytiques.



Fig.III.11 : " Thermomètre pour la mesure de la température"

Tableau III.6 : Tableau des températures mesurées sur site à la station de Ouled Djellal.

Temps	T _e (°C)	T _{air} (°C)	T _s (°C)
09 :40	49,2	26,7	28,2
10 :00	48,7	26,9	28,2
10 :20	49,1	27,2	28,3
10 :40	48,3	26,3	29,3
11 :00	49,3	27,5	29,5
T _{moy}	48,49	26,92	28,7

4.1. Calcul l'écart :

4.1.1. L'écart absolu :

$$E_A = | 28,7 - 33,71 | = 5,01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.1.2. L'écart relatif :

$$E_R = \frac{| 28,7 - 33,71 |}{28,7} \times 100 = 17,45 \%$$

5. Comparaison entre les résultats théorique et expérimental :

La température de l'eau après refroidissement a été calculée en se basant sur des relations mathématiques fondées sur les propriétés de l'échange thermique dans la tour de refroidissement, en prenant en compte les données du mois de mai afin d'assurer une correspondance avec les températures ambiantes réelles. Le résultat théorique obtenu était de 33°C.

Par la suite, nous avons mesuré la température réelle de l'eau à la sortie de la tour à l'aide d'un thermomètre, et nous avons trouvé une température de 28,7 °C.

Nous constatons donc un écart de 5 °C entre le calcul théorique et la mesure réelle. Cet écart peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Les conditions climatiques au moment de la mesure (telles qu'une température de l'air plus basse ou une vitesse du vent plus élevée) ont pu améliorer l'efficacité réelle du refroidissement.
- Les performances des ventilateurs ou la répartition de l'air et de l'eau à l'intérieur de la tour ont pu être meilleures que celles supposées dans le modèle théorique.

Malgré cet écart, le résultat théorique reste proche de la valeur réelle, ce qui montre que les calculs étaient globalement corrects et peuvent être considérés comme un modèle approximatif fiable.

6. Analyse de l'impact de la vitesse du ventilateur sur l'efficacité du refroidissement :

Tableau : III.7 : Variation des données géométriques du ventilateur en fonction de la température de sortie.

D (m)	Qv (m ³ /S)	V (m/s)	Ts (°C)
2	20,5356	6,54	44,88
2	36,5182	11,63	41
2	47,7908	15,22	39,22
2	79,0652	25,18	37,91
2	95,3618	30,37	35,8
2	125,6	40	31,56

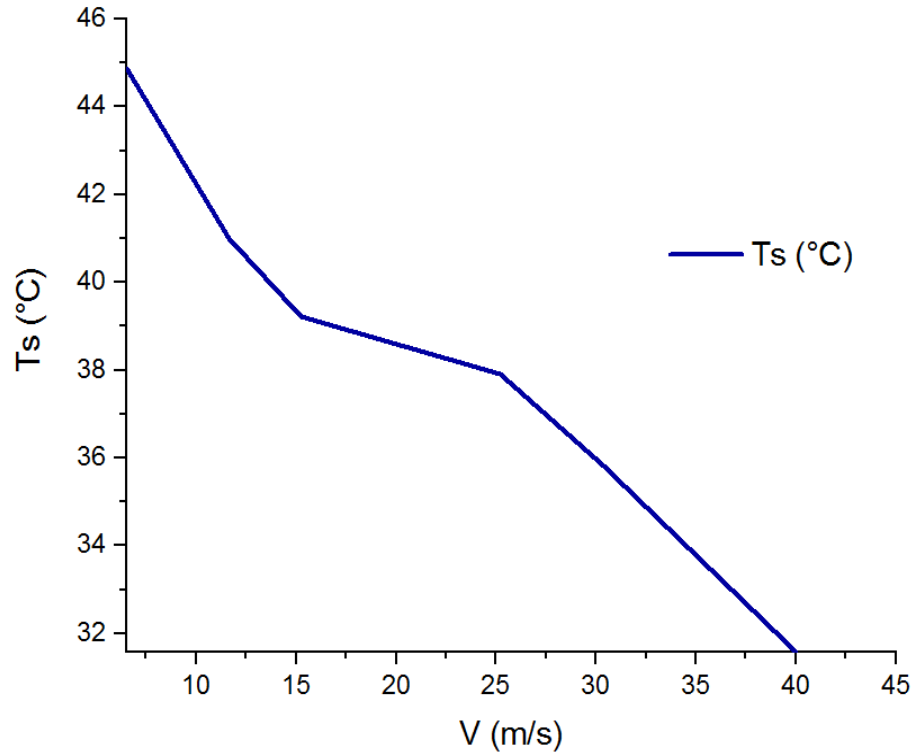


Fig.III.12 : " température de sortie en fonction de la vitesse de ventilateur"

Interprétation de la Fig.IV.12 :

On observe que l'augmentation de la vitesse du ventilateur entraîne une baisse notable de la température de l'eau après refroidissement. Cela s'explique par un meilleur échange thermique grâce à un débit d'air plus élevé, favorisant l'évaporation.

Toutefois, l'effet de la vitesse devient moins significatif à partir d'un certain seuil, traduisant un rendement décroissant. Il est donc important de choisir une vitesse optimale qui équilibre performance thermique et consommation énergétique.

Cela nous mène à la conclusion que :

À partir de l'analyse des résultats, il ressort que les vitesses 25,185 m/s, 30,37 m/s et 40 m/s sont les plus appropriées, car les températures obtenues à ces valeurs sont toutes inférieures à 40 °C.

Cela les rend compatibles avec les exigences des étapes suivantes du processus de dessalement. Ce constat souligne l'importance du choix d'une vitesse de ventilation adéquate pour assurer une efficacité de refroidissement optimale et répondre aux contraintes thermiques du système.

7. Conclusion :

Ce chapitre a permis d'évaluer les performances du système de refroidissement à travers une approche théorique et expérimentale. Les résultats ont montré que la température de l'eau est influencée par les conditions climatiques et les paramètres de fonctionnement.

L'introduction du changement de phase dans les calculs a amélioré la précision des résultats, lesquels se sont révélés proches des mesures réelles. Les vitesses de 25,185 m/s, 30,37 m/s et 40 m/s se sont avérées les plus efficaces pour atteindre une température inférieure à 40 °C, critère essentiel pour les étapes de dessalement. L'étude confirme qu'un bon équilibre entre la vitesse, la surface de contact et les conditions ambiantes améliore considérablement les performances thermiques du système.

Conclusion

Générale

L'exploitation des eaux souterraines géothermales à la station de Ouled Djellal constitue une initiative prometteuse pour répondre à la demande croissante en eau dans les régions arides du sud algérien. Toutefois, les performances limitées du système de refroidissement par ventilation actuellement en service ont révélé plusieurs insuffisances techniques compromettant la continuité et l'efficacité du fonctionnement de la station, notamment en période estivale marquée par des températures élevées et une faible humidité relative.

À travers cette étude, une analyse approfondie, à la fois théorique et expérimentale, a permis de diagnostiquer les faiblesses majeures du système, principalement l'insuffisance de la ventilation et la faible capacité d'échange thermique, ne permettant pas d'abaisser la température de l'eau en dessous de 40 °C – seuil critique pour la protection des membranes d'osmose inverse.

La modélisation thermique a permis d'évaluer avec précision les échanges de chaleur sensibles et latents, en mettant en évidence l'impact des conditions climatiques (température, humidité, vitesse du vent) ainsi que des paramètres de conception sur les performances globales du système. Les résultats expérimentaux ont confirmé la validité du modèle proposé, malgré de légères divergences attribuées à la variabilité des conditions réelles d'exploitation.

Ainsi, il ressort de cette étude que :

- Le système actuel ne satisfait pas aux exigences thermiques nécessaires pour un fonctionnement fiable et continu de l'unité de dessalement.
- Des améliorations significatives peuvent être apportées en adaptant le design aux spécificités climatiques locales.
- Le refroidissement par ventilation offre des perspectives intéressantes, à condition d'être renforcé par des solutions hybrides et des technologies de contrôle intelligentes.

En perspective, nous recommandons :

1. Le développement de solutions hybrides combinant ventilation naturelle et systèmes actifs (échangeurs thermiques, par exemple).
2. L'adoption de systèmes intelligents de pilotage et de régulation, sensibles aux variations climatiques en temps réel.

3. L'évaluation de la rentabilité énergétique et économique du système amélioré pour garantir sa viabilité à long terme.

Intégrer les dimensions techniques, économiques et environnementales constitue la voie idéale pour assurer la durabilité des projets de dessalement, tout en renforçant l'impact du savoir scientifique appliqué dans les défis liés à la sécurité hydrique en Algérie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Brahim TAKHEROUBT, « La nappe albienne et ses mystères », l'expression, 13-Novembre-2022
- [2] Naïma BENOURET, « La nappe albienne s'étend sur trois pays : Un impressionnant gisement d'eau à préserver », El Watan, 10-Novembre-2024
- [3] PIERRE MAIN, « Eau thermique », (Septembre 2001).
- [4] Gaston, F. (1989). La vie des eaux thermo-minérales ».
- [5] P. Verdeil (1982). Aperçu sur les eaux thermales et thermo-minérales de l'Algérie
- [6] AUBYJ.F, « Les eaux minérales », collection Que. Sai. Je, Edition Presse Universitaire De France (1994).
- [7] LAURE SANDERS, « Les eaux thermales en traitement adjuvant dermatologique et dermo-cosmétique exemple de l'eau thermique d'Avène », Thèse docteur en pharmacie, (25/02/2013).
- [8] GEORGES POPOFF, « Spécificité, législation et contrôle des eaux minérales naturelles utilisées dans les établissements thermaux Français », Press Therm Climat (2010), 147,2:107-119.
- [9] ALBAN DURIEZ, « Origine et processus de minéralisation d'eau thermales en milieu continental méditerranée : cas de système géothermal des Thermopyles », Thèse de docteur en science spécialité : science de la terre.
- [10] (www.chemindeleau.com).
- [11] Curewitz D. et Karson J. A., « *Cadres structuraux de l'écoulement hydrothermal : perméabilité des fractures maintenue par la propagation et l'interaction des failles* », Elsevier, Pays-Bas, 1997.

- [12] : Zinelaabidine TOUIDJENI, Abdelkrim BENARAB Sécurité hydrique et sécurité alimentaire, la stratégie de l'Algérie, état des lieux
- [13] I. Ahmouda et H.Biaa, Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer cas de « les dunes » Oran, mémoire de master, Université Larbi Tebssi, 2015-2016
- [14] : Abderrazak ATALLAH. Procède de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine .03 juillet 2014
- [15] : Bessenasse Mohamed, article dessalement d'eau de mer : étude de trois station du littoral algérois, université SAAD Dahleb,blida ,2006
- [16] : MSRE, stratégie et indicateur du secteur de l'eau en Algérie, 2011
- [17] : Bessenasse Mohamed. Dessalement d'Eau de Mer : Etude de Trois Stations du Littoral Algérois.2006
- [18] : MAUREL A. (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2eme édition, TEC&doc.286p.
- [19] Eric Daini, « de l'eau salée à l'eau potable, analyse et synthèse de document scientifique, lycée Paul Cézanne,
- [20] Chatkaew Tansakul, « Procédés hybrides à membranes pour le Prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse », thèse doctorat, 13 novembre 2009.
- [21] Julie Mendret, « mise au point de caractérisation de membrane application à la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé », thèse doctorat, INSA Toulouse, novembre 2007.
- [22] Khabbaze hatim, « traitement des solutions modèles du lait par des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse », thèse doctorat, université Mohamed V, Rebat 07 février 2008.
- [23] Hanane Dach, « comparaison des opérations de nanofiltration et d'osmose inverse pour le dessalement sélectif des eaux saumâtres : de l'échelle du laboratoire au pilote industriel », thèse doctorat, université d'Angers, mai 2008.

- [24] Alain maurel, « dessalement de l'eau de mer et des eaux de saumâtres : et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce », 2eme edition 2006.
- [25] Alfa Arzate, Ph.D, « procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire », Acer, 642-RVL-0508, saint 3Norbert d'Athabaska, 30 mai 2008.
- [26] Marjorie Gavach, « Détoxification de condensats de distillerie par osmose inverse échange d'ions et leur combinaison Application au recyclage en fermentation alcoolique », thèse de doctorat, 27 mai 2010
- [27] Camille Sagne, « étude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse », thèse doctorat, institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement Agro Paris Tech, 24 avril 2008.
- [28] Woodcock DJ, White M. «The application of Pelton type impulse turbines for energy recovery on seawater reverses osmosis system ». Desalination 1981 ; 39 :447- 58.
- [29] Tilak Gullinkala, B, digman, « desalination reverse osmosis and membrane distillation », Département de chimie et environnement l'université de Toledo, OH 43606-3390, USA, 2010.
- [30] Yan Yue Lu, Yang D H , « optimum design of reverse osmosis system under different feed concentration and product specification » journal de science membranaire 287 ,219-229 ,2007
- [31] Jean Marc B, Catherine J, « Les procédés membranaires pour les traitements de l'eau », document technique , Ministère de l'agriculture de l'alimentation de la peche et des affaires rurales direction de l'espece rural et de la forêt Direction de l'Espace Rural et de la Forêt ,France ,Décembre 2002
- [32] www.lenntech.fr
- [33] John Palmeri, Mehdi Metaiche, « dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres par osmose inverse et nanofiltration », MEDERC, février 2009
- [34] Hill and L. Watkins. "Cooling Towers: Principles and Practice".UK. 1990.
- [35] D.W. Green & R.H. Perry. "Perry's Chemical Engineers' Handbook". USA. 1934

- [36] ASHRAE (2020). HVAC Applications – “Cooling Towers and Evaporative Cooling,” ASHRAE Handbook
- [37] Hesse, R. W. “Cooling of Water by Forced Draft Cooling Towers”. (p115-124).USA.1968.
- [38] Ministère de l’Énergie « Rapport technique sur les installations géothermiques dans la région de Biskra ».1968. Algérie
- [39] Hewitt, G. F. “Heat Exchanger Design Handbook” .UK.2008.
- [40] Ghassemi, F., & Heidari, A. “Cooling Technologies in Geothermal Power Plants” (p881-895).UK.2016.
- [41] Jean-Louis BATOZ, Didier DUBOIS, “Transferts thermiques” Dunod, Paris, France, 2013.
- [42] Jean-Francois Sacadura “Transferts Thermiques (initiation et approfondissement)” editions.lavoisier.fr, France, février 2015.
- [43] F. J. Arranz, *Diagramme psychrométrique (altitude : 0, 750, 1500, 2250, 3000 m)* – version noir et blanc, Wikipédia Commons, 15 juillet 2022
- [44] Patrick H Oosthuizen and David Naylor. An Introduction to Convective Heat Transfer Analysis .1999.
- [45] Source Département des transports (<http://wilayabiskra.dz/>).