

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Hydraulique**

MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES  
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN HYDRAULIQUE  
OPTION : TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES EAUX

## Thème

### **Etude des performances de fonctionnement d'un distillateur d'eau modèle GFL 2004**

Soutenu le : 30/09/2014

Présenté par : M<sup>elle</sup> TAIB Amina

Devant les membres de jury :

- Mr GHENIM Abderrahmane
- Mr TERKI HASSAINE TAHA EL Amine
- Mr DEBBAL Mohamed Zakaria
- Mr Boumediene Maamar

Président  
Examinateur  
Examinateur  
Encadreur

**Année Universitaire : 2013/2014**

## DÉDICACES

- ✚ *Mon cher père pour son amour, sa patience et ses sacrifices qu'il m'a consenti pour poursuivre mes études.*
- ✚ *Ma chère mère pour ses encouragements incessants afin de finaliser cette thèse.*
- ✚ *Mes sœurs, Wahiba, Nadjat, Karima, la benjamine Somia, mon cher frère Abdehammid, sa femme pour leur encouragements sans limite de temps et mon adorable neveu Mohammed.*
- ✚ *Tous mes enseignants pour leur participation à mon éducation ainsi qu'à ma formation scientifique depuis mon enfance jusqu'à l'heure actuelle.*
- ✚ *Tous les membres de l'ADE de Nemcen pour leur aide afin d'accomplir mon travail.*

**AMINA**

# Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

**Introduction générale..... 01**

## **Chapitre I : Généralités sur l'eau**

I.1. Introduction.....	03
I.2. Cycle de l'eau.....	03
I.3. Différentes formes de l'eau sur la terre.....	04
I.4. Différents changements d'état de l'eau.....	05
I.5. Propriétés physiques et chimiques de l'eau.....	06
I.5.1. Les propriétés physiques.....	06
I.5.2. Propriétés thermiques.....	09
I.5.3. Propriétés électriques.....	10
I.5.4. Propriétés optiques.....	10
I.5.5. Les propriétés chimiques.....	10
I.6. Différents types d'eau sur la terre.....	12
I.6.1. Les eaux de surface.....	13
I.6.2. Les eaux souterraines.....	14
I.6.3. Les mers et Océans.....	15
I.6.4. Les eaux saumâtres.....	16
I.7. Différents usages de l'eau.....	17
I.7.1. Usages domestique.....	18
I.7.2. Usages agricoles.....	18
I.7.3. Usages industriels.....	19

## **Chapitre II : La distillation de l'eau**

II.1. Introduction.....	20
II.2. La distillation.....	21
II.3. Procédés de distillation.....	22
II.4. Consommation énergétique dans les procédés de distillation.....	29
II.5. Avantages et inconvénients des procédés de distillation.....	32
II.6. Conclusion.....	34

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

III.1. Introduction.....	35
III.2. Présentation et description détaillées du distillateur d'eau marque GFL 2004.....	35
III.2.1. Description du distillateur.....	35
III.2.2. Principe de fonctionnement du distillateur.....	37
III.2.3. Entretien du distillateur.....	40
III.2.4. Caractéristiques techniques du distillateur modèle GFL 2004.....	40
III.3. Dispositif expérimental.....	42
III.3.1. Matériels et méthodes analytiques utilisés.....	42
III.3.1.1. Mesure de la température.....	42
III.3.1.2. Mesure du PH.....	42
III.3.1.3. Mesure de la conductivité.....	43
III.3.1.4. Dosage de la dureté totale.....	44

## **Chapitre IV : Résultats et interprétations**

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Etude de l'influence de débit d'alimentation sur la quantité d'eau distillée produite.....	45
IV.2.1. Débit optimum de l'appareil.....	45
IV.2.2. Volumes cumulés du distillat.....	46
IV.2.3. La température de fonctionnement de l'appareil et du distillat.....	48
IV.2.4. Débit d'eau de refroidissement.....	48

IV.3.Etude de l'influence du débit d'alimentation sur la qualité d'eau distillée....	50
IV.3. 1.Le PH du distillat.....	50
IV.3.2.La conductivité et le Taux de sels du distillat.....	52
IV.3.3.La dureté du distillat.....	56
IV.4.Conclusion.....	59
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>60</b>

## **Annexes**

## **Références bibliographiques**

## Liste des tableaux

• Tableau I.1 : Masse volumique de l'eau en fonction de la température.....	07
• Tableau I. 2 : Viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température.....	08
• Tableau I.3 : Viscosité dynamique de l'eau en fonction de la salinité.....	08
• Tableau I. 4 : Tension superficielle de l'eau en fonction de la température.....	09
• Tableau I. 5 : Répartition des eaux sur le globe.....	13
• Tableau I.6 : principales différence entre eaux de surface et eaux souterraines.....	15
• Tableau I.7 : Salinité des différentes mers.....	16
• Tableau II. 1 : La variation de la chaleur latente en fonction de température.....	30
• Tableau II .2 : La variation de la chaleur spécifique en fonction de la concentration des sels.....	30
• Tableau III .1 : Données techniques du distillateur modèle GFL 2004.....	41
• Tableau III.2 : La qualité chimique d'eau de robinet.....	42
• Tableau. IV.1: La qualité chimique de l'eau avant et après la distillation.....	57

## Liste des figures

• Figure I.1 : Schéma du cycle de l'eau.....	04
• Figure I.2 : Différents changements d'état de l'eau.....	06
• Figure II.1 : Principe de la distillation simple.....	21
• Figure II.2 : Principe de la distillation à simple effet.....	22
• Figure II.3 : Principe de la distillation à multiple effet.....	23
• Figure II.4 : Principe de la Distillation Multi- Flash.....	24
• Figure II.5 : Principe de la distillation par compression de vapeur.....	25
• Figure II.6: Principe de distillation solaire.....	27
• Figure II.7: distillateur solaire à effet de serre.....	28
• Figure II.8: Schéma d'une installation de dessalement par multiple-effets accouplés à des capteurs solaires.....	29
• Figure III.1 : Photo du distillateur d'eau modèle GFL2004.....	35
• Figure III.2 : Constitution du distillateur modèle GFL2004.....	36
• Figure III.3 : Le fonctionnement du distillateur.....	37
• Figure III.4 : Raccordement du distillateur à l'alimentation en eau.....	38
• Figure III.5 : Vidange et sortie d'eau de refroidissement.....	39
• Figure III.6 : Un PH-mètre portable.....	43
• Figure III.7 :Un conductimètre portable.....	43
• Figure. IV.1: La variation de débit de production d'eau distillée en fonction de débit d'alimentation.....	45
• Figure. IV.2 : La variation de volumes cumulés de distillat en fonction du temps pour les différents débits.....	47
• Figure. IV.3 : La variation de température en fonction du temps.....	48
• Figure IV.4 : La variation du débit d'eau de refroidissement en fonction du temps.....	49
• Figure IV.5: La variation de la température d'eau de refroidissement en fonction du temps ...	49
• Figure. IV.6: La variation du PH en fonction du temps avec un débit de 225 l/h.....	50
• Figure. IV.7: La variation du PH en fonction du temps avec un débit de 327 l/h.....	50
• Figure. IV.8: La variation du PH en fonction du temps avec un débit de 450l/h.....	51
• Figure. IV.9: La variation du PH en fonction du temps avec un débit de 514.28 l/h.....	51

• Figure. IV.10: La variation de la conductivité en fonction du temps avec un débit de 225l/h.....	52
• Figure. IV.11: La variation du taux de sels en fonction du temps avec un débit de 225l/h.....	53
• Figure. IV.12: La variation de la conductivité en fonction du temps avec un débit de 327l/h.....	53
• Figure. IV.13: La variation du taux de sels en fonction du temps avec un débit de 327 l/h.....	54
• Figure. IV.14: La variation de la conductivité en fonction du temps avec un débit de 450 l/h.....	54
• Figure. IV.15: La variation du taux de sels en fonction du temps avec un débit de 450l/h.....	55
• Figure. IV.16: La variation de la conductivité en fonction du temps avec un débit de 514.28l/h.....	55
• Figure. IV.17: La variation du taux de sels en fonction du temps avec un débit de 514.28l/h.....	56
• Figure. IV.18: La variation de la dureté en fonction du temps avec un débit de 225l/h.....	56
• Figure. IV.19: La variation de la dureté en fonction du temps avec un débit de 327l/h.....	57
• Figure. IV.20: La variation de la dureté en fonction du temps avec un débit de 450l/h.....	57
• Figure. IV.21: La variation de la dureté en fonction du temps avec un débit de 514.28l/h.....	58

## Liste des abréviations

- T : Température ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Lf : Chaleur latente de fusion ( $\text{KJ/Kg}$ ).
- T : Contrainte tangentielle de cisaillement ( $\text{Pa}$ ).
- V : Gradient de la vitesse ( $\text{m.s}^{-1}$ ).
- Y : Direction (m).
- MED : Distillation à multiples effets.
- MSF : Multi-Flach.
- MCV : Compression de Vapeur.
- $P_0, P_1, P_2, P_n$  : Pressions (bar).
- TDS : Concentration totale des sels (ppm).
- Q : Quantité de chaleur recherchée (en KJ).
- K : Rapport débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite.
- D : Débit d'eau douce (en Kg).
- Cp : Capacité thermique massique supposée ( $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ).
- $\Delta t$  : Ecart entre la température d'ébullition et la température de l'eau mer à l'entrée de l'enceinte et la sortie du condenseur (en  $^{\circ}\text{C}$ ).
- r : Enthalpie (ou chaleur latente) de vaporisation (en kJ).
- Y : Chaleur spécifique du procédé de distillation Multi-Flash.
- Q : Consommation calorifique spécifique en kJ par kg d'eau douce produite.
- Dr : Chaleur latente de vaporisation de l'eau en  $\text{kJ/kg}$ .
- N : Nombre d'effets de l'installation.
- $\Delta t$  : Ecart de température existant dans un effet entre l'eau de mer à la sortie du condenseur et l'eau en ébullition dans cet effet en  $^{\circ}\text{C}$ .
- Cp : Chaleur spécifique de l'eau de mer en  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ .
- Y : Chaleur spécifique du procédé de distillation Multiples Effets.
- N : Nombre d'effets.
- D : Production d'eau douce des n cellules.

DAB : Digital Audio Broadcasting.

Ø : Diamètre interne (mm).

ADE : Algérienne des Eaux.

L : Largueur (mm).

L : Longueur (mm).

H : Hauteur (mm).

W : Watt.

Hz : Hertz.

VV : Volt.

N<sub>EDTA</sub> : Normalité d'Ethylène Diamine Tétra Acétique (N).

V<sub>EDTA</sub> : Volume d'Ethylène Diamine Tétra Acétique (ml).

V<sub>0</sub> : Volume initial d Ethylène Diamine Tétra Acétique (ml).

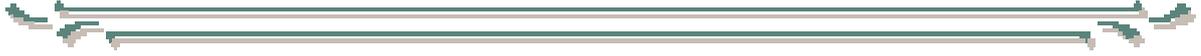
TH : Titre Hydrotimétrique (méc/l ou °F).

PH : potentiel hydrogène.

N.E.T : Noir Eriochrome T.

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Acétique.





# Chapitre 1

## **Généralités sur l'eau**



---

## Chapitre I : Généralités sur l'eau

### I.1. Introduction

L'eau est l'élément vital pour les êtres vivants et la boisson naturelle par excellence. Cette molécule représentée par sa formule  $H_2O$  est la substance minérale la plus répandue à la surface du globe terrestre.

L'eau est un corps unique, inodore, incolore et sans saveur. Sa composition chimique est extrêmement stable. Elle restera toujours le vecteur privilégié de la vie et de l'activité humaine. Ceci implique la nécessité de protéger l'eau et de la traiter pour produire une eau propre à la consommation ou à des usages spécifiques industriels.

### I.2. Cycle de l'eau

La Terre est la seule planète du système solaire sur laquelle l'eau existe sous trois états : solide, liquide et gazeux. Elle est répartie dans différents réservoirs : océans, glaciers, calottes polaires, atmosphère, lacs, rivières, nappes phréatiques, sol, biosphère. Les transferts quantitatifs entre ces différents réservoirs constituent le cycle de l'eau due à ses propriétés physiques et chimiques.

Grâce à l'énergie fournie par le soleil, l'eau s'évapore. Elle arrive dans l'air de plus en plus froid. Elle va se condenser autour de millions de grains de poussières qui se trouvent dans l'atmosphère (fumées, pollen,...). Les gouttelettes formées sont toutes petites et elles ne retombent pas sur terre. Elles forment les nuages. Si l'air se refroidit encore, il se forme de plus grosses gouttes et s'il fait suffisamment froid, les gouttelettes peuvent même geler. Les grosses gouttes sont devenues trop lourdes et elles tombent sur la terre. L'eau peut arriver à la surface du globe sous forme liquide (pluie) ou solide (neige, grêle,...).

L'eau peut retomber directement dans les océans ou dans d'autres milieux liquides ou alors sur la terre. Une partie sera absorbée par les racines des végétaux et retournera dans l'atmosphère suite au phénomène de transpiration. L'infiltration de l'eau dans le sol sert à constituer le stock superficiel alimentant l'évaporation directe et la transpiration des végétaux. L'eau finira généralement par revenir en surface pour pouvoir ainsi recommencer le cycle. [2,3]. La figure I.1 donne un schéma du cycle de l'eau.

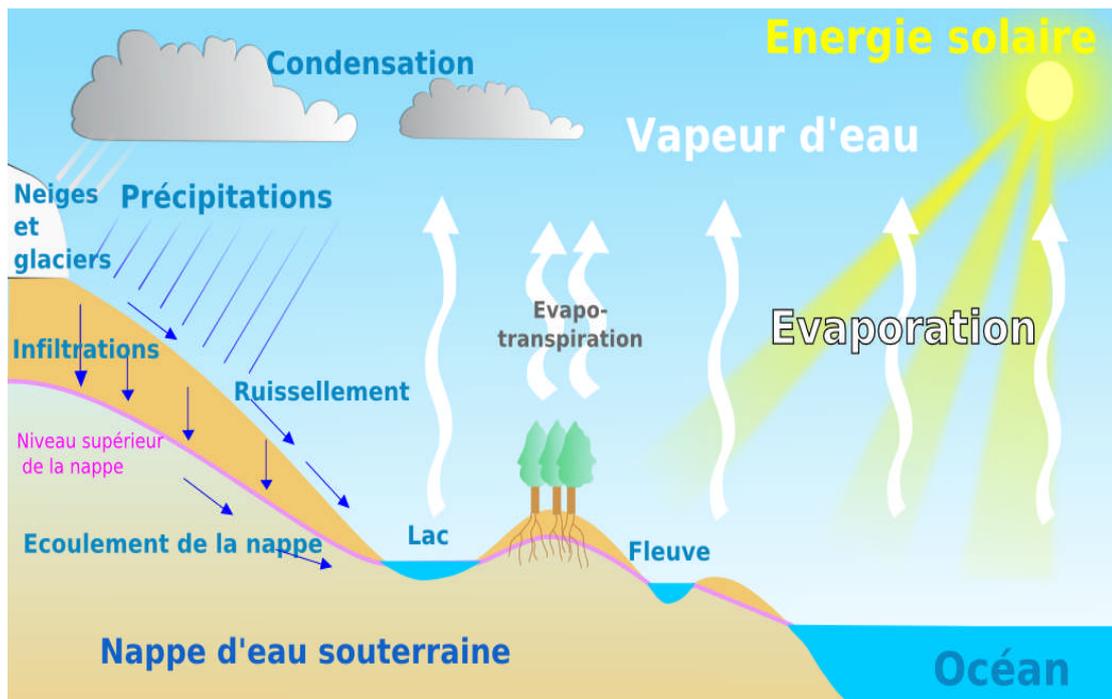


Figure I.1 : Schéma du cycle de l'eau [4]

### I.3. Différentes formes de l'eau sur la terre

L'eau se trouve dans la terre sous trois formes: solide, liquide et gaz, selon les conditions de température ou de pression des milieux environnants et qui est l'une des rares substances qui soient plus lourdes à l'état liquide qu'à l'état solide [5].

#### a)- Etat liquide

La structure précise de l'eau à l'état liquide reste hypothétique. De nombreuses représentations sont proposées sur les propriétés physiques de l'eau, notamment la masse volumique, la viscosité et leurs variations en fonction de la température et de la pression. Le plus simple est, peut-être, le plus efficace de ces modèles admet que les molécules d'eau sont rassemblées par amas ou grappes flottant au milieu de molécules d'eau isolées. Ces grappes rassemblent par des liaisons hydrogènes un nombre variable de molécules d'eau auraient une structure mouvante, se brisant et se reformant perpétuellement. L'existence de liaison hydrogène explique notamment que le point de fusion de l'eau et son point d'ébullition soient beaucoup plus élevés que celles de composés identiques ( $H_2S$ ,  $H_2Se$ ,  $H_2Te$ ).

Le nombre de molécules d'eau libres augmentent avec la température. Elles seraient environ 25 % à  $0^\circ C$  ; 27 % à  $10^\circ C$  ; 29.5 % à  $20^\circ C$  ; 32 % à  $30^\circ C$  et 44% à  $100^\circ C$ .

La superposition de l'effet de tassement dû à la rupture des liaisons hydrogènes et de l'effet de dilatation thermique expliquerait l'existence du maximum de masse volumique de l'eau à  $4^\circ C$  [6].

**b)- Etat solide**

\* **Glace:** La glace est l'eau à l'état solide lorsque sa température est inférieure à la température de fusion qui est de 0 °C. Cependant, en l'absence de cristal de glace, de l'eau calme peut être refroidie à des températures inférieures à 0 °C sans se congeler, dans un état d'équilibre instable appelé surfusion et atteindre ainsi des températures allant jusqu'à -20 °C. La glace possède une structure cristalline régulière correspondant à des associations où les atomes d'oxygène de la molécule se trouvent aux sommets d'un réseau quasi tétraédrique, d'atomes d'hydrogène dont deux sont liés par des liaisons covalentes et deux par des liaisons hydrogène. Cette disposition confère à la glace une structure relativement creuse et par suite une faible densité [5].

\***Neige:** La neige est constituée de glace cristallisée et agglomérée en flocons pouvant être ramifiés d'une infinité de façons. Puisque les flocons sont composés de petites particules, ils peuvent avoir aussi bien une structure ouverte et donc légère, qu'un aspect plus compact voisin de celui de la grêle. La neige se forme généralement par condensation de la vapeur d'eau dans les hautes couches de l'atmosphère et tombe ensuite plus ou moins vite sur terre selon sa structure dont sa taille et sa forme varient avec les conditions climatiques.

**c)- Etat gazeux**

\* **Vapeur d'eau:** La vapeur d'eau est incolore, mais elle est rendue «visible» par la présence de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air, dues à la condensation instantanée de la vapeur elle-même. La vapeur d'eau est l'eau à l'état gazeux. Sa température est donc supérieure à la température d'ébullition de l'eau liquide, ou à la température de sublimation de la glace lorsque la pression est inférieure à la pression de 615 Pa et la température est inférieure ou égale à 0°C.

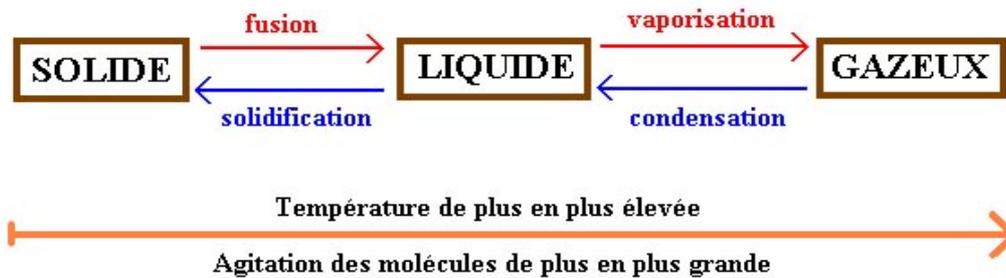
Selon les valeurs des variables thermodynamiques qui sont la pression et la température, l'eau se trouve sous l'état solide, liquide ou vapeur. En faisant varier ces variables, il est donc possible de passer d'un état à un autre : on parle de changement d'état ou encore de changement de phase. L'eau d'un volume d'air dépend entièrement de la température, et elle augmente au fur et à mesure que la température augmente [7].

**I.4. Différents changements d'état de l'eau**

Comme le montre la figure I.2, les différents changements d'état de l'eau sont :

- **La fusion:** c'est le passage de l'état solide vers l'état liquide, le changement inverse est la solidification.
- **La vaporisation:** c'est le passage de l'état liquide vers l'état vapeur ou gazeux, le changement inverse est la liquéfaction (on parle parfois de condensation à l'état liquide).

• **La sublimation** : c'est le passage de l'état solide vers l'état vapeur, le changement inverse est la condensation.



**Figure I.2** : Différents changements d'état de l'eau [8]

Durant le passage d'un état à un autre état, il y a équilibre entre les deux phases, c'est-à-dire que l'eau est présente sous deux états différents. Tous ces passages d'un état de la matière à un autre sont caractérisés par une pression et une température qui restent constantes durant le changement d'état. La quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse d'un corps pour le faire passer de l'état solide à l'état liquide à la température  $T$  est appelée chaleur latente de fusion ( $L_f = 333 \text{ kJ/kg}$  à  $T = 0^\circ\text{C}$ ). Cette valeur signifie qu'il faut  $333 \text{ kJ}$  pour transformer  $1 \text{ kg}$  de glace en  $1 \text{ kg}$  d'eau liquide à  $T = 0^\circ\text{C}$ .

## I.5. Propriétés physiques et chimiques de l'eau

### I.5.1. Les propriétés physiques

\***Température d'ébullition**: La température d'ébullition de l'eau est élevée, si on la compare avec celle des composés de masse moléculaire du même ordre et possédant plusieurs atomes d'hydrogène. Dans les conditions normales elle est de  $100^\circ\text{C}$  [9].

L'évolution de la température dépend du mode d'utilisation de l'eau avant son rejet et surtout le parcours de l'eau avant l'exutoire ou la station d'épuration. En général, l'eau doit être évacuée vers l'environnement à des températures inférieures à  $30^\circ\text{C}$ . Une eau plus chaude constitue une pollution.

#### \* Masse volumique

La masse volumique de l'eau varie avec la température et la pression. Pour l'eau pure sous pression normale, elle passe par un maximum à environ  $4^\circ\text{C}$  et sa variation en fonction de la température est donnée dans le tableau I.1 suivant:

**Tableau I.1** : Masse volumique de l'eau en fonction de la température [10]

T (°C)	Masse Volumique Kg.dm <sup>-3</sup>	T (°C)	Masse Volumique Kg.dm <sup>-3</sup>
0	0,999 839	20	0,998 204
4	0,999 972	25	0,997 045
10	0,999 699	30	0,995 647
15	0,999 099	100	0,958 365

Cette propriété de l'eau entraîne diverses conséquences, aussi bien dans la nature (phénomènes de stratification des lacs) que dans les stations de traitement (ex. : remontées de boues dans les décanteurs). L'eau de mer, de salinité 35 g.L<sup>-1</sup>, a une masse volumique moyenne de 1.028 1 kg.L<sup>-1</sup> à 0 °C ; une variation de salinité de 1 g.L<sup>-1</sup> fait varier la masse volumique de 0,000 8 kg.L<sup>-1</sup>. L'eau a une masse volumique de 1g/cm<sup>3</sup> [10].

#### \* Viscosité

C'est la propriété que présente un fluide (liquide ou gaz) d'opposer une résistance aux divers mouvements, soit internes (ex.: turbulence), soit globaux (ex. : écoulement). Cette résistance est due aux frottements réciproques des molécules en mouvement. Elle est à la base des pertes d'énergie cinétique (pertes de charge) et joue donc un rôle important en traitement d'eau. On distingue deux types de viscosité :

- La viscosité dynamique définie par le rapport de la contrainte tangentielle de cisaillement  $T$  (en Pa) au gradient de la vitesse  $V$  (en m.s<sup>-1</sup>) dans une direction  $Y$  (en m) perpendiculaire au plan de glissement ;
- La viscosité cinématique  $\nu$  définie par le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique  $\rho$  du fluide.

La viscosité de l'eau diminue lorsque la température croit (tableau I.2). En revanche, elle augmente avec la teneur en sels dissous (Tableau I.3). L'eau de mer est donc plus visqueuse que l'eau de rivière.

**Tableau I.2 :** Viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température [10]

T° C	Viscosité Dynamique en mPa.s	T°C	Viscosité dynamique en mPa.s
0	1,797	20	1,007
5	1,523	25	0,895
10	1,301	30	0,800
15	1,138	35	0,723

**Tableau I.3 :** Viscosité dynamique de l'eau en fonction de la salinité [10]

Salinité en ion Cl- (g.L <sup>-1</sup> )	Viscosité dynamique à 20 °C (mPa.s)
0	1,007
4	1,021
8	1,035
12	1,052
16	1,068
20	1,085

La pression agit d'une façon tout à fait particulière sur la viscosité absolue de l'eau. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée rend l'eau moins visqueuse aux basses températures : elle écrase en quelque sorte son organisation moléculaire [9]. Lorsque la pression continue à croître, l'eau reprend une structure de liquide dépourvue de contrainte interne et suit la règle générale, c'est-à-dire que la viscosité croît avec la pression [10].

**\* Tension superficielle**

Elle caractérise une propriété des interfaces (surfaces limitant deux phases). Elle est définie comme une force de traction qui s'exerce à la surface du liquide en tendant toujours à réduire le plus possible l'étendue de cette surface. Elle est telle qu'elle provoque une ascension capillaire de 15 cm à 18°C dans un tube de 0,1 mm de diamètre et diminue avec l'augmentation de la température [10]. Le tableau I.4 donne des valeurs de la tension superficielle de l'eau en fonction de la température.

**Tableau I.4 :** Tension superficielle de l'eau en fonction de la température [10]

T °C	Tension Superficielle En mN.m <sup>-1</sup>	T °C	Tension Superficielle En mN.m <sup>-1</sup>
0	75,60	50	67,91
10	74,22	60	66,18
20	72,75	70	64,40
30	71,18	80	62,60
40	69,56	100	58,90

L'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle. En revanche, d'autres corps la diminuent, ils sont appelés tensioactifs (ex.: détergents) [10].

### I.5.2. Propriétés thermiques

#### \* Chaleur massique

La chaleur représente le transfert d'énergie qui s'établit quand deux corps de températures différentes sont mis en contact où les molécules du corps froid accélèrent leur vitesse au détriment de l'énergie cinétique des molécules du corps chaud. Ainsi, la chaleur spécifique d'un corps est la quantité de chaleur, donc l'énergie, nécessaire pour élever de 1°C la température d'1 gramme de cette substance.

L'eau a une chaleur spécifique de  $4.2 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , qui est une valeur tout particulièrement élevée. Ce phénomène permet non seulement d'amortir les variations de températures, mais également de maintenir des conditions de température favorables au développement de la vie. Elle est nécessaire pour la multiplicité des liaisons hydrogènes qui doivent être préalablement rompues pour que l'énergie cinétique des molécules puisse augmenter.

#### \* Les enthalpies (chaleur latente)

La chaleur latente de changement d'état d'une masse est la quantité d'énergie qu'il faut lui communiquer pour qu'elle passe de l'état initial (solide, liquide ou gazeux) à un autre état. La valeur de chaleur latente est dépendante de la pression. Sous la pression atmosphérique la chaleur latente de l'eau est de 333 kJ/kg pour l'eau à 0°C, 2259 kJ.kg<sup>-1</sup> à la pression normale et à 100°C.

L'importance de la chaleur massique et de l'enthalpie de vaporisation fait que les grandes étendues d'eau à la surface de la terre constituent de véritables volants thermiques. C'est également la raison de l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur.

### I.5.3. Propriétés électriques

#### \* Conductivité électrique de l'eau

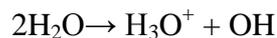
La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à celle de la résistivité électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en micro siemens/cm ( $\mu\text{S/cm}$ ) ou millisiemens (mS/cm).

La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solides dissous sera importante, plus la conductivité sera élevée. Généralement, le rapport entre conductivité et concentration ionique s'exprime par approximation de la façon suivante:

$$2 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ ppm (partie par million),}$$

Où 1 ppm = 1 mg/l correspond à la concentration en solides dissous

L'eau est légèrement conductrice. La conductivité de l'eau la plus pure que l'on ait obtenue est de 4.2 microsiemens par mètre à 20°C. Cette conductivité très faible, mais jamais nulle est expliquée par une légère dissolution de la molécule d'eau selon l'équation chimique :



Elle augmente lorsque les sels sont dissous dans l'eau et elle varie en fonction de la température [9].

### I.5.4. Propriétés optiques

La transparence de l'eau dépend de la longueur d'onde de la lumière qui la traverse. Si l'ultraviolet passe bien, l'infrarouge, si utile au point de vue physique et biologique, pénètre à peine. L'eau absorbe fortement l'orangé et le rouge dans le visible, d'où la couleur bleue de la lumière transmise en couche épaisse.

Cette transparence est souvent utilisée pour apprécier certaines formes de pollution et, en conséquence, l'efficacité des traitements d'épuration ; de même, elle conditionne l'emploi des ultraviolets en désinfection.

### I.5.5. Les propriétés chimiques

L'énergie de formation de la molécule d'eau qui est de 242 kJ/mol, est élevée. Il s'ensuit que l'eau possède une grande stabilité. Cette stabilité, associée aux propriétés électriques et à la constitution moléculaire de l'eau, la rend particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solide. La plupart des substances minérales peuvent se dissoudre dans l'eau, ainsi qu'un grand nombre de gaz et de produits organiques.

La solvatation (ou action hydratante de l'eau) est le résultat d'une destruction complète ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre, pour les remplacer par de nouveaux liens avec les molécules d'eau, et forger ainsi des nouvelles structures: il se produit une véritable réaction chimique (une solvatation complète est une dissolution) [10,11].

#### \* L'eau solvant

Dissoudre un corps, c'est détruire sa cohésion, laquelle est due à des forces électrostatiques ou colombiennes qui peuvent être :

- Interatomiques (liaisons chimiques fortes) : liaisons de covalence (entre atomes) ou ioniques (entre ions) ;
- Intermoléculaires : liens de cohésion entre molécules (liaisons de Van der Waals, liaison hydrogène).

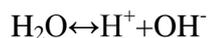
Le pouvoir solvant de l'eau (molécule dipolaire) provoque l'altération partielle ou complète de divers liens entre les atomes (dissociation) et dans les molécules (ionisation) du corps à dissoudre pour les remplacer par de nouveaux liens avec ces molécules propres (hydratation) et forger de nouvelles structures dispersées. Une solvatation complète est une dissolution.

#### \* Ionisation

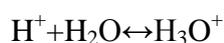
Un composé minéral dissous dans l'eau se dissocie plus ou moins avec apparition d'ions chargés négativement (anions) et positivement (cations). Le corps dissous est appelé électrolyte. Il transporte le courant électrique.

Les acides et bases forts ainsi que leurs sels, même en solution relativement concentrée, sont entièrement dissociés. On les appelle électrolytes forts (par exemple, les acides nitriques, sulfuriques et chlorhydriques). D'autres corps, comme l'acide acétique  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , le sulfure d'hydrogène  $\text{H}_2\text{S}$ , l'acide phosphorique, ne sont que partiellement dissociés en solution. Ce sont les électrolytes faibles.

L'eau elle-même est partiellement dissociée en ions suivant la réaction réversible :



Le proton  $\text{H}^+$  n'existe pas à l'état libre en solution aqueuse. Chaque ion hydrogène se combine avec une molécule d'eau pour former l'ion hydroxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$  proton hydraté.

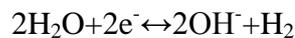
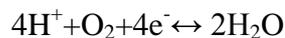


Ainsi, dans l'eau, on trouve à la fois des molécules  $\text{H}_2\text{O}$ , des ions hydroxyles  $\text{OH}^-$  et hydroxonium  $\text{H}_3\text{O}^+$ .

A 25°C, la concentration d'équilibre de  $\text{H}_3\text{O}^+$  (égale à celle de  $\text{OH}^-$ ) vaut  $10^{-7}$  mol.l<sup>-1</sup>. Donc la constante d'auto-ionisation de l'eau à 25°C vaut  $10^{-14}$  mol<sup>2</sup> .l<sup>-2</sup>. Ceci correspond à une auto-ionisation de l'eau peu importante puisque, à 25°C, seulement une molécule sur 550 millions est dissociée. Cette faible dissociation est malgré tout la raison pour laquelle l'eau, même très pure, conduit légèrement le courant [10].

### \* Oxydoréduction

Les phénomènes d'oxydoréduction présentent une grande importance dans tous les domaines du traitement de l'eau. L'eau peut participer, suivant les conditions expérimentales, à des réactions d'oxydoréduction avec comme réactions possibles :



Dans le premier cas, l'eau est donneur d'électrons ; elle est réductrice : l'accepteur d'électrons est un oxydant et de l'oxygène est formé .Dans le deuxième cas, l'eau est un accepteur d'électrons ; elle est oxydante : le donneur d'électrons est un réducteur et de l'hydrogène est libéré, mais les réactions sont très lentes en l'absence de catalyseur et l'on peut en général négliger l'action de l'eau du point de vue oxydoréduction [10].

## I.6. Différents types d'eau sur la terre

La totalité de l'eau présente sur la Terre forme ce que l'on appelle l'hydrosphère. Son volume total est estimé à 1 400 millions de km<sup>3</sup>. Ce volume paraît considérable: Il correspond à un cube de 1 400 kilomètres de côté ou à 400 fois le volume de la Méditerranée.

Plus de 97 % de l'eau de la planète bleue est salée, et l'eau douce représente à peine 3 % du volume total de l'eau présente sur la Terre.

Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappe), des eaux de surface retenues ou en écoulement (barrages, lacs, rivières), des eaux de mer et saumâtres [9].

**Tableau I.5:** Répartition des eaux sur le globe [12]

<b>Provenance de l'eau</b>	<b>Quantités (%)</b>
Eau douce de lacs	0.009
Eau de rivières	0.0001
Eau souterraine (prés de la surface)	0.005
Eau souterraine(en profondeur)	0.61
Eau dans les glaciers et les calottes glaciaires	2.15
Eau salée de lacs ou de mers intérieures	0.008
Eau dans l'atmosphère	0.0001
Eau des océans	97.2

### **I.6.1. Les eaux de surface**

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants.

Les eaux de surface sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement [10].

#### **a)- Les rivières et les fleuves**

En très haute montagne, les cours d'eau naissent de la fonte des glaciers. La glace qui fond donne naissance à des ruisseaux ou à des torrents qui glissent sous les glaciers et émergent à leur pied: c'est le régime glaciaire. Les autres cours d'eau proviennent du ruissellement des pluies excédentaires et/ou de l'émergence, sous forme de sources ou de nappes d'eaux souterraines : ce type de régime est dit pluvial.

Tous les cours d'eau descendent le long des pentes, se rejoignent pour former des rivières de plus en plus imposantes qui finissent par se jeter dans un océan ou une mer intérieure. Tout au long de leur périple, les cours d'eau sont aussi alimentés par les eaux de ruissellement et parfois par des eaux souterraines.

**b)- Les lacs**

Les lacs se forment lorsque les eaux qui coulent le long des pentes, cours d'eau ou eaux de ruissellement, rencontrent un obstacle qui les empêche de poursuivre leur course. Les eaux envahissent alors la dépression ainsi créée, formant des étendues parfois immenses, à tel point que certains grands lacs sont appelés des mers (par exemple, la mer Caspienne : 371 000 kilomètres carrés de superficie).

Les lacs sont alimentés par un cours d'eau ou par des eaux de ruissellement et dans certains cas par des eaux souterraines. Les lacs d'eau douce ne sont pas suffisamment nombreux pour constituer une réserve d'eau importante.

**I.6.2. Les eaux souterraines**

Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches constituant le sous-sol, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable. Là, les eaux s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé nappe. La roche plus ou moins poreuse et donc plus ou moins perméable contenant cette eau est appelée aquifère.

Du point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

❖ **Nappes phréatiques ou alluviales** : peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus.

❖ **Nappes captives** : plus profondes que le premier et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures [13].

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques. Cependant, elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent en général aux normes de potabilité. Pourtant, ces eaux sont plus sensibles aux pollutions accidentelles, elles perdent totalement leur pureté originale dans le cas de contamination par des polluants. Le tableau I.6 donne les principales différences entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

**Tableau I.6:** Principales différences entre les eaux de surface et les eaux souterraines [10]

Caractéristique	Eaux de surface	Eaux souterraines
Température	Variable suivant saisons	Relativement constante
Turbidité	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle (sauf en terrain karstique)
couleur	Liée surtout aux MES sauf dans les eaux très douces et acides (acides humiques)	Liée surtout aux matières en solution (acides humique...)
Minéralisation globale	Variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets...	Sensiblement constante en général nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
Fer et Manganèse dissous	Généralement absents	Généralement présents
nitrate	Peu abondants en général	Teneur parfois élevée
Micropolluants minéraux et organiques	Présents dans les eaux de pays développés, mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source	Généralement absents mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps
Eléments vivants	Bactéries, virus	Ferrobactéries fréquentes

### I.6.3. Les mers et les océans

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau. Elles représentent près de 97.4 % du volume d'eau existant actuellement sur notre planète. Le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraines et eaux superficielles) [12].

Les mers sont les plus grandes étendues d'eau salée après les océans, viennent ensuite les mers de tailles variables. Les mers peuvent être ouvertes ou fermées, c'est-à-dire en contact ou non avec les océans.

Les océans recouvrent environ 361 millions de kilomètres carrés, soit 70.8% de la surface du globe. Leur volume total atteint 1.37 milliard de kilomètres cubes et leur profondeur moyenne est de l'ordre de 3 700-3 800 m. Près de la moitié des eaux océaniques dépasse 3 000 m de profondeur, le point le plus profond est la fosse des Mariannes,

avec 11 020 m de profondeur. La masse volumique de l'eau de mer est entre 1 020 et 1 035 kg/m<sup>3</sup>, la masse totale des eaux océaniques est environ  $1.4 \times 10^{21}$  kg, soit 0.023 % de la masse totale de la Terre.

La salinité de l'eau des mers ouvertes sur les masses océaniques (Atlantiques, Manche, Mer du Nord, Pacifique) est de l'ordre de 35 g/l et c'est cette valeur qui est considérée comme salinité standard de l'eau de mer. Des variations plus au moins importantes autour de cette valeur moyenne existent en fonction du bilan précipitations-évaporation. La salinité peut être très différente dans le cas des mers fermées ou peu ouvertes sur les masses océaniques :

**Tableau I.7 :** Salinité des différentes mers [14]

Mers	Salinité g/l
Mer Méditerranée	36 à 39 g/l
Mer Rouge	40 g/l
Mer Baltique	7 g/l
Mer Caspienne	13 g/l
Mer Morte	270 g/l
Golfe arabo-persique	40 à 70 g/l
Mer Noire	20 g/l

Toutefois, dans des mers ouvertes, la proportion des différents sels en présence est relativement constante comme le montre le tableau I.7. En particulier, la somme des ions chlorure et sodium représente environ 85 % du poids des sels. En revanche, dans les mers fermées ou les grands lacs salés, la concentration par évaporation à partir d'apports d'eaux de surface faiblement salées, mais relativement différentes de celle de l'eau de mer, conduit quelquefois à des compositions ioniques très particulières [14].

#### **I.6.4. Les eaux saumâtres**

On appelle eau saumâtre, une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme d'eaux souterraines.

Leur composition chimique varie énormément d'une région à l'autre et pour une même région d'une saison à l'autre. Ces variations de composition chimique dépendent de plusieurs paramètres : l'eau qui pénètre dans le sol dissout les sels qui composent l'écorce terrestre.

Les principaux sels qui peuvent être dissous en assez grandes quantités sont : le  $\text{CaCO}_3$ , le  $\text{CaSO}_4$ , le  $\text{MgCO}_3$  et le  $\text{NaCl}$ .

Indépendamment de la composition chimique et de la structure physique des roches, d'autres facteurs interviennent également parmi lesquels nous citons :

- ✚ La vitesse de circulation de l'eau et par conséquent le temps de contact ;
- ✚ Les matières déjà dissoutes (la solubilité variante avec la force ionique) : ainsi des eaux chlorurées et gypseuses peuvent contenir en solution des quantités de sulfate de calcium plus supérieures à la solubilité du sulfate de calcium dans l'eau pure.

- ✚ Le phénomène d'évaporation (évaporation directe ou évapotranspiration), paramètre principalement lié aux conditions climatiques, mais aussi à la profondeur du niveau piézométrique des nappes souterraines (influence des irrigations) [14].

### **I.7. Différents usages de l'eau**

Le manque d'eau potable et la rareté de ses ressources naturelles, devient un grand problème qui menace la vie des habitants dans plusieurs régions. Donc rechercher et produire de l'eau potable à partir d'autres ressources naturelles, est une extrême importance.

Sur le plan mondial, la demande en eau potable de bonne qualité est très élevée.

En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie et de l'agriculture sont de plus en plus élevés.

Les problèmes actuels et futurs sont multiples :

- La population de la planète ne cesse d'augmenter alors que la ressource reste constante. Dans certains cas, même cette ressource diminue par suite des problèmes de pollution.
- Les ressources en eau sont très inégalement réparties sur la planète. Il y a les déserts et les zones subarides (30 % des terres émergées) qui n'ont que peu ou pas d'eau, il y a aussi certaines zones équatoriales ou tropicales sur lesquelles tombent chaque année plusieurs millimètres de pluie.

Les besoins en eau sont très variables suivant les pays. Il y a les pays en voie de développement peu industrialisés où la consommation par tête n'excède guère une quarantaine de litres par jour, tous usages compris. Mais, il y a des Etats industrialisés où la consommation journalière atteint plusieurs milliers de litres par personne si on additionne les besoins domestiques, agricoles et industriels.

Les usages de l'eau sont multiples :

### **I.7.1. Usages domestiques**

L'eau est prélevée le plus souvent des nappes, quelquefois des rivières, puis traitée pour être potable, ensuite redistribuée dans un réseau collectif en passant par un château d'eau. Lors de sa consommation, une partie est évaporée (arrosage des pelouses, transpiration...) et rejoint le grand cycle de l'eau. La partie non consommée et qui est souillée, doit être collectée, traitée en station d'épuration avant d'être rejetée dans le cours d'eau.

Les usages domestiques concernent l'alimentation environ 3 litres par jour pour une personne, les diverses activités de lavage, d'évacuation des déchets, l'hygiène personnelle, l'arrosage des jardins. À travers le monde, la consommation journalière pour les besoins domestiques est très variable suivant les pays [14]. En France par exemple, chaque habitant consomme en moyenne de 150 à 200 litres d'eau par jour dont 93 % pour l'hygiène corporelle, les sanitaires, l'entretien de l'habitat et les tâches ménagères. Elle est de 600 L aux Etats-Unis, 250 à 300 L en Europe, 30 L en Afrique et 5 L à Madagascar. D'une manière générale, la consommation d'eau potable par habitant est en augmentation dans la plupart des pays.

### **I.7.2. Usages agricoles**

À l'échelle de la planète, les usages agricoles représentent près des trois quarts des consommations d'eau. L'eau constitue en effet un facteur limitant de la production végétale, elle est présente en abondance dans les tissus végétaux (jusqu'à 95 % de leur poids). L'eau assure le transport et les échanges de matières dissoutes à l'intérieur des plantes [14].

L'agriculture occasionne environ 70 % de toute la consommation d'eau douce sur la planète. Cette consommation est essentiellement le fait de l'agriculture irriguée, qui occupe environ 17 % des terres cultivées et assure 40 % de la production agricole mondiale (le reste étant assuré par l'agriculture dite pluviale).

L'eau à usage agricole n'est pas totalement consommée par les végétaux pour leur croissance mais :

- La première partie est évaporée : l'aspersion, en journée, par forte chaleur est très consommatrice, d'autres techniques plus efficaces (gouttes à gouttes reliés à un sondeur d'humidité dans le sol) ne sont pas adaptées qu'à certaines cultures (fruits).

- La deuxième partie est évapotranspirée par les plantes : c'est la part efficace de l'irrigation.

- Alors que la troisième partie n'est pas consommée mais restituée (ruissellement, retour à la nappe).

L'eau sous forme de vapeur réalimente de nouveau le cycle de l'eau.

### **I.7.3. Usages industriels**

L'eau est au cœur de nombreux processus industriels. Elle peut être utilisée pour le lavage, l'évacuation des déchets, le refroidissement des installations, le fonctionnement des chaudières.

Dans l'industrie, l'eau est employée comme réfrigérant, solvant, diluant ou vecteur de dispersion des polluants les plus divers.

L'industrie est responsable d'environ 20 % de la consommation mondiale d'eau douce. Les industries de transformation sont de grosses consommatrices d'eau.



# Chapitre II

## La distillation de l'eau



## **Chapitre II : La distillation de l'eau**

### **II.1. Introduction**

Sur le plan mondial, la question de l'approvisionnement en eau devient de plus en plus préoccupante. L'augmentation démographique que va en effet connaître notre planète va nécessairement s'accompagner d'une explosion de la consommation en eau et d'une dégradation de sa qualité. A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de mobilisation des ressources en eau, il est plus judicieux de repenser à la planification des ressources en eau conventionnelles dans le cadre d'une vision globale, qui intègre également l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [15, 16].

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, de nouvelles techniques de production d'eau potable devront être mises en place pour satisfaire les besoins de la population croissante. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années. Mais leur coût élevé limite souvent leur utilisation aux pays riches [17].

La nécessité au dessalement de l'eau date depuis très longtemps. Au XXe siècle, il est devenu une pratique courante, grâce aux développements énormes qu'ont connus les technologies de dessalement. Il y a actuellement trois techniques disponibles : la distillation, avec ses diverses variantes, l'Electrodialyse et l'Osmose Inverse.

La Distillation est utilisée pour l'eau de mer seulement, l'Electrodialyse pour l'eau saumâtre et l'Osmose Inverse pour toute espèce d'eaux.

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases: la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes: l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement.

## II.2. La distillation

La distillation consiste à évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur émise par les rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels dissous et toutes les autres substances contenues dans l'eau de mer. Il suffit alors de condenser la vapeur d'eau, ainsi obtenue une eau douce consommable. Actuellement, c'est un procédé coûteux, surtout en énergie puisqu'elle nécessite, non seulement l'utilisation d'énergie thermique pour chauffer l'eau, mais aussi d'énergie électrique pour faire circuler l'eau.

Dans les distillateurs modernes, la température de travail oscille entre 5 à 125 °C. La salinité de l'eau douce obtenue par ce travail est toujours nettement inférieure à 100 mg/L, on doit donc reminéraliser cette eau lorsqu'elle est destinée à la consommation. Tous les procédés de distillation suivent ce principe qui comporte 3 phases : production de vapeur, transfert à un condensateur et condensation. Cependant les techniques utilisées ainsi que les mécanismes de récupération d'énergie sont variés [15].

### - Principe

La distillation consiste à séparer des liquides dont la température d'ébullition est différente. L'appareillage vraiment spécifique de la distillation est une colonne verticale appelée colonne à distiller. Celle-ci est garnie (plateaux ou garnitures diverses) , qui permettent un contact entre vapeur et liquide qui y circule dans cette colonne, il y a équilibre thermodynamique entre les deux phases, en fonction de la température et des compositions respectives. Quand on chauffe le mélange en bas de la colonne (bouilleur), le produit à température d'ébullition la plus faible est évacué en haut de la colonne, alors l'autre produit reste dans la partie basse du système.

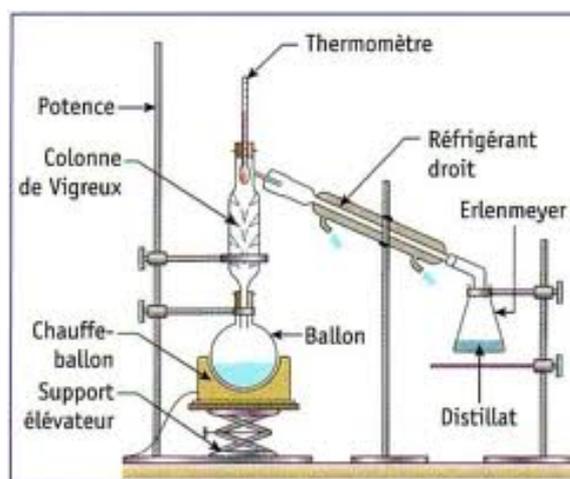


Figure II.1 : Principe de la distillation simple [18]

Durant la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, les techniques de distillation se perfectionnent avec une amélioration et un rendement énergétique, en construisant des stations de grande capacité qui emploient le plus souvent les méthodes dites : distillation flash, distillation à effets multiples, distillation par compression de la vapeur et distillation solaire.

### II.3. Procédés de distillation

#### A) Distillation à simple effet

Ce procédé a été mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable [19].

##### - Principe :

Son principe est simple, il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure [19].

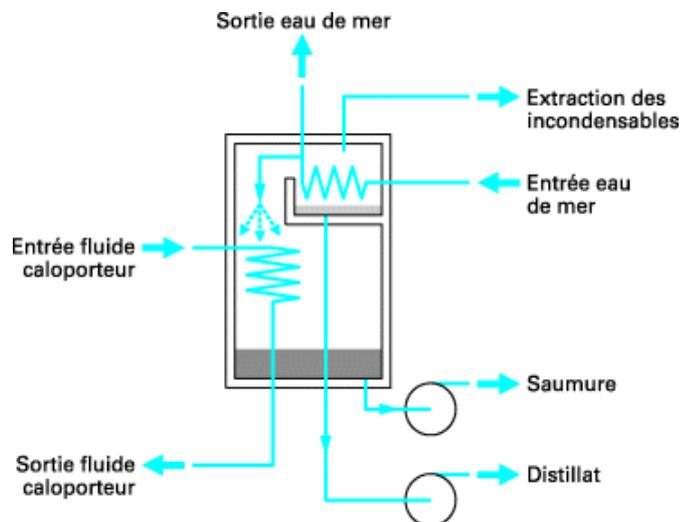


Figure II.2 : Principe de la distillation à simple effet [20]

#### B) Distillation à multiples effets(MED)

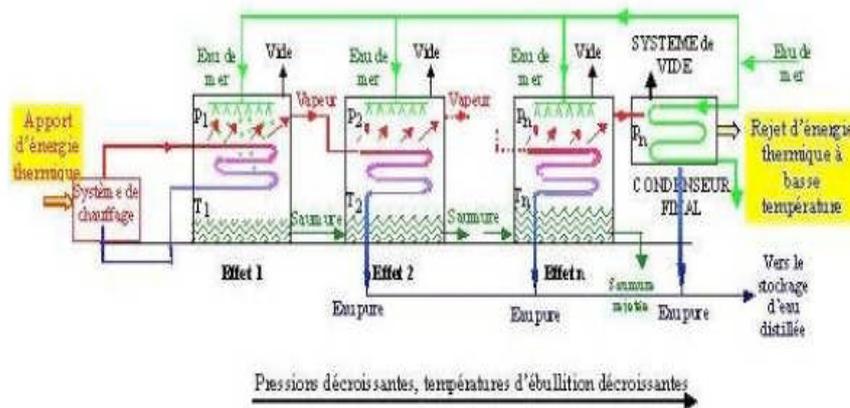
Le processus de la distillation à multiples effets est une technologie classique en ingénierie chimique. Il est apparu absolument nécessaire d'améliorer la consommation spécifique de la distillation à simple effet.

Le procédé MED est économique en énergie avec une souplesse de fonctionnement et un débit de saumure plus faible qui donne un rendement correct. Sa capacité unitaire de fonctionnement est plus faible que MSF qui varie de 20 m<sup>3</sup>/j à 20000 m<sup>3</sup>/j [21].

### - Principe

Ce procédé est basé sur le principe d'évaporation sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variante entre 70 et 80°C [17, 22].

Avec ce procédé, en effectuant des transferts de chaleur successifs appelés « effets » à des températures de moins en moins élevées, c'est-à-dire : au contact de l'échangeur dans lequel la vapeur d'eau produite par l'effet précédent se condense, ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. Cependant, plus l'écart de température n'est faible, plus la surface d'échange assurant le transfert d'énergie doit être grand. Alors on peut comprimer la vapeur pour faciliter le transfert en énergie (principe de la compression mécanique) en utilisant cette fois-ci un thermo compresseur (ou éjecteur à vapeur). Comme le procédé MSF, le MED n'utilise quasiment que de l'énergie thermique, s'y ajoute seulement 1 à 3 kWh/m<sup>3</sup> d'énergie électrique (pas de recirculation de la saumure) [23].



**Figure II.3 :** Principe de la distillation à multiples effets [24]

En pratique, les unités de dessalement à multiples effets fonctionnent sur la base de 4 effets, qui ont une consommation de 628 kJ/kg d'eau douce. A l'intérieur de chaque effet, on dispose plusieurs méthodes pour réchauffer de l'eau de mer [19].

### C) Distillation à détente étagées (MSF)

Cette technologie est apparue en 1960 pour faire face aux problèmes d'entartrage que connaissent les procédés de distillation à multiples effets, elle est maintenant le plus grand secteur dans l'industrie de dessalement [25]. MSF n'a pas eu une grande efficacité mais une énorme capacité, il est considéré comme une énergie intensive [26].

La Distillation Multi Flash est la production de vapeur par une réduction de pression et de température, dans un liquide chaud se trouvant dans sa température d'ébullition, ce qui provoque la diminution de sa chaleur et l'on dispose d'énergie pour la production d'une petite quantité de vapeur. La principale raison de son utilisation, c'est sa grande fiabilité d'opération et d'influence, relativement une basse salissure causée par le sel (tartres) dans les échangeurs de chaleur [27].

#### - Principe

La Distillation Multi-Flash s'appuie sur une évaporation instantanée (flash) d'une partie de l'eau salée chauffée à haute température ( $80^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C}$ ), sous une pression,  $P_0 \approx 2\text{bars}$ , lors d'une détente à l'entrée de la chambre de distillation qui est à la pression  $p_1$ . La vapeur est condensée au niveau d'un échangeur, où elle rétrocède sa chaleur latente de vaporisation à l'eau salée « source liquide » qui se réchauffe, la saumure déjà peu concentrée, s'écoule sous l'effet de la pression vers la chambre de distillation de la cellule suivante, où une nouvelle vaporisation s'effectue à la pression  $p_2 < p_1$ , et ainsi de suite jusqu'à la pression «  $P_n$  » de 0.05 bar, vers  $30^{\circ}\text{C}$ . C'est le principe des détente successives; il peut avoir ainsi jusqu'à 50 cellules [28].

Ce procédé nécessite une énergie thermique de  $50$  à  $70000\text{ kcal/m}^3$  et un prétraitement pour limiter l'entartrage [29].

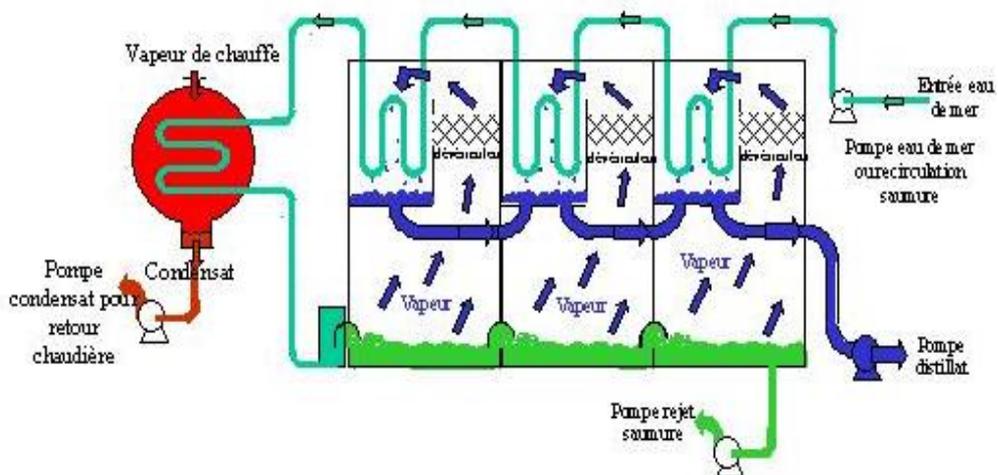


Figure II.4 : Principe de la Distillation Multi- Flash [30]

**D) Distillation par compression de vapeur (MVC)**

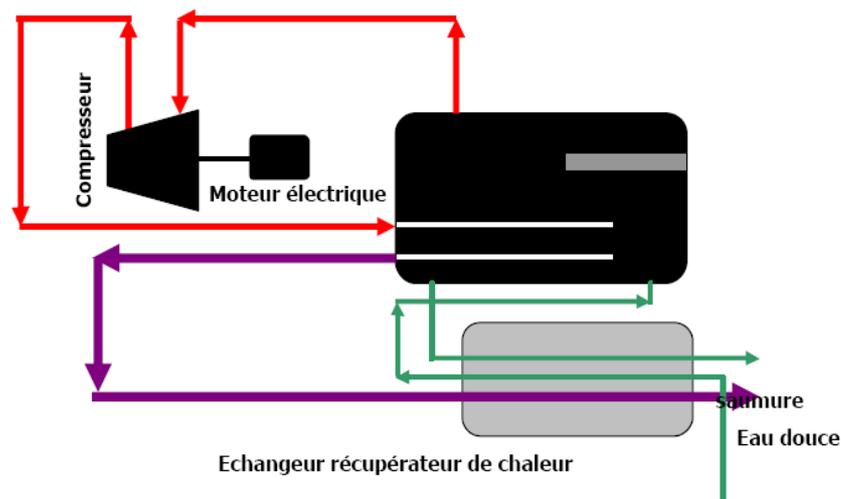
Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la compression mécanique de vapeur. Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiples effets [17]. Le compresseur fonctionne avec  $4.5 \text{ kWh/m}^3$ , mais utilise exclusivement de l'électricité. Les capacités unitaires traitées qui dépendent directement de la capacité du compresseur sont en augmentation: elle s'étend aujourd'hui, de 15 à plus de  $3800 \text{ m}^3/\text{j}$  [14].

**- Principe**

Le principe de dessalement d'eau salée par compression de vapeur est celui d'une pompe à chaleur; où l'eau salée est évaporée après avoir été préchauffée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée. Le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner.

La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant du sel. A cause des problèmes de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ  $60^\circ\text{C}$  avec un facteur de concentration égal à deux :  $1\text{m}^3$  d'eau salée ( $35 \text{ g/l}$  de sel) donnera 500 litres d'eau douce et 500 litres de saumure à  $70 \text{ g/l}$  de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques [31].

Dans ce procédé la vapeur produite par la cellule la plus froide est comprimée par un éjecteur à vapeur dont plus la pression de la vapeur motrice est élevée, plus l'enthalpie du mélange sortant est importante [19].



**Figure II.5 :** Principe de la distillation par compression de vapeur [16]

La compression de vapeur peut être obtenue :

➤ Soit par des éjecteurs à vapeur, ce procédé est alors appelé thermocompression. Cette variante du procédé trouve des applications particulièrement favorables dans la réalisation d'unités de petites dimensions de 20 à 1500 m<sup>3</sup>/jour et même éventuellement au-delà. Il permet en effet de réaliser des unités entièrement statiques, simples, fonctionnant à très basse température inférieure à 50°C. Le rendement de compression des éjecteurs est assez faible, ce qui conduit à des consommations de l'ordre de 420 KJ/Kg (100 kcal/kg) d'eau produite.

➤ Soit par des machines rotatives axiales ou centrifuges. Un tel procédé appelé compression mécanique est utilisé pour des unités de dessalement de quelques m<sup>3</sup>/jour jusqu'à environ 5000 m<sup>3</sup>/jour, il est limité actuellement par des difficultés technologiques rencontrées dans la construction de gros compresseurs [14].

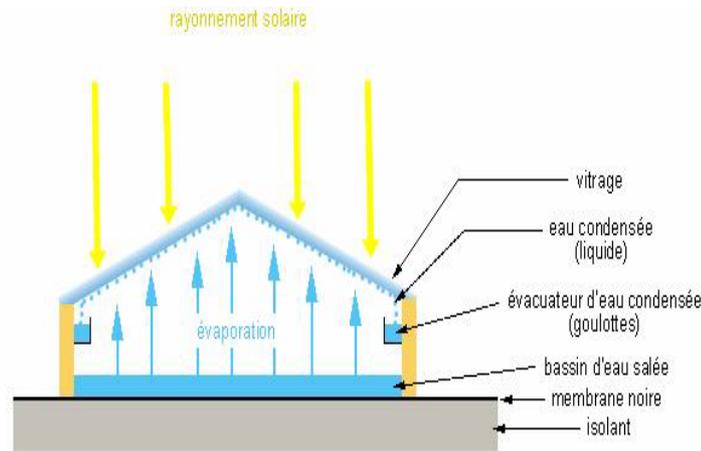
### E) Distillation solaire

Parmi les techniques de dessalement par changement de phase, il existe une technique ancienne et très intéressante, qui est d'un emploi commode dans les régions arides ensoleillée utilisant des distillateurs solaires, malgré qu'elle présente l'inconvénient de nécessiter des surfaces très importantes disponibles au sol et des investissements importants, elle présente un meilleur avantage car elle utilise une énergie gratuite. Cette technique est appelée: «Distillation Solaire» [32].

#### - Principe

Tous les distillateurs solaires ont le même principe de fonctionnement; néanmoins, ils peuvent différer les uns des autres en conception et en matériaux. Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur l'effet de serre [33].

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire, pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée [34]. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de la température une partie de l'eau s'évapore. La vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel.



**Figure II.6:** Principe de distillation solaire [35]

Les procédés de dessalement par distillation utilisant l'énergie solaire sous forme thermique sont:

- Distillation solaire à effet de serre.
- Distillation solaire à multiples effets.

➤ **Distillation solaire à effet de serre :**

Ce procédé consiste à chauffer l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible, 5 litres/jour.m<sup>2</sup>.

Il existe cependant deux types de fabrications de distillateur, ces derniers peuvent être construits soit [32] :

Sous forme de produit modulable, il s'agit généralement d'un bac (plastique, tôle, bois...) isolé inférieurement et recouvert d'un vitrage supérieurement. Plusieurs distillateurs peuvent être alimentés simultanément pour former une unité de distillation. Le nombre de distillateurs dépend de la capacité d'eau produite et désirée. Ce modèle est utilisé seulement pour de très petites capacités, plusieurs dizaines de litres par jours. Il est pratiqué lorsque les besoins en eau distillée ne sont pas très importants (laboratoire d'analyse...). Il existe cependant plusieurs variantes dont on peut citer le distillateur plan, en cascade, à mèche, à multiples effets, sphérique, etc...).

Un certain nombre d'applications est effectué généralement dans les zones rurales où les surfaces au sol sont disponibles.

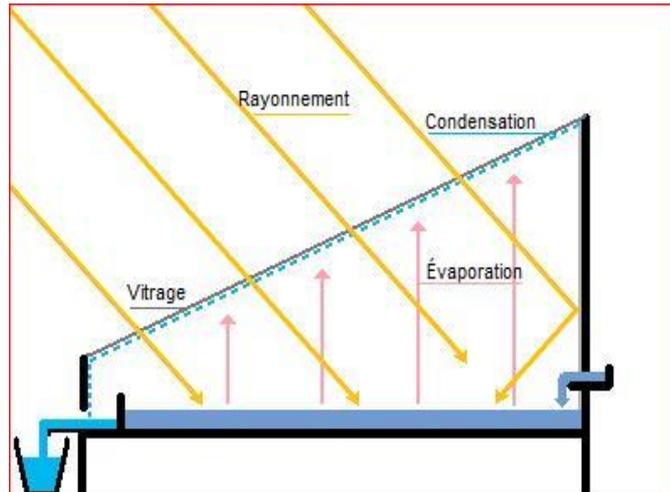


Figure II.7: distillateur solaire à effet de serre [36]

### ➤ Distillation solaire à multiples effets

L'eau salée est chauffée dans le premier effet, vaporisant une fraction de celle-ci une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire où circule l'eau de mer relativement froide. L'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, de même une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau de mer salée dans le second.

La vapeur en provenance du premier effet se condense dans le deuxième sur le faisceau tubulaire et produit une quantité presque égale de vapeur à partir de l'eau salée, et ainsi de suite. A chaque effet, l'eau distillée est envoyée vers un collecteur. Le procédé MED produit presque l'eau pure (5 à 25 ppm TDS ; concentration totale des sels) à partir de l'eau de mer avec un TDS de 3500 à 4500 ppm.

Ce procédé est mieux disposé à s'adapter à l'énergie solaire. Cette adaptation peut se faire soit avec :

- Des capteurs solaires plans pour les petites unités allant jusqu'à plusieurs m<sup>3</sup>/jour.
- Des capteurs à concentration pour les capacités plus importantes [32].

Un stockage thermique est souvent utilisé, sous forme de réserve d'eau chaude, pour permettre d'avoir une certaine autonomie de fonctionnement en régime permanent.

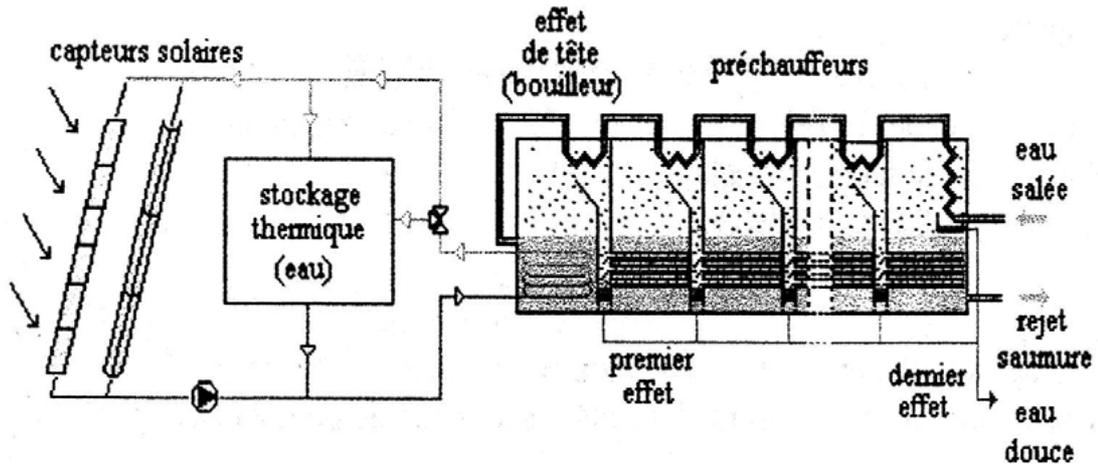


Figure II.8: Schéma d'une installation de dessalement par multiple-effets accouplés à des capteurs solaires [32]

### II.4. Consommation énergétique dans les procédés de distillation

La distillation consomme énormément d'énergie et reste très couteuse au niveau des installations industrielles. En effet pour transformer 1 kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température, il faut environ 2250 kilojoules si le changement d'état se fait à 100°C [17].

La production d'1 m<sup>3</sup> d'eau dans la distillation simple nécessite 700 kW/h énergie thermique et on ne requiert dans la distillation multi flash et à multiples effets plus que 100 kW/h énergie thermique, soit 7 fois moins que pour la distillation à simple effet. L'augmentation de la compression de vapeur permet pour le même volume d'eau produit une consommation électrique de l'ordre de 10kW/h. C'est pourquoi de nombreuses améliorations ont été effectuées sur cette technique permettant de réduire et d'économiser l'énergie utilisée.

Ainsi, la distillation multi flash (ou multi-étages), la distillation à multiples effets ou encore la compression de vapeur et la distillation solaire sont des procédés permettant une réduction considérable des énergies consommées.

Comme dans la distillation à simple effet, une partie de la chaleur de condensation de la vapeur est utilisée pour préchauffer l'eau de mer. Alors la consommation spécifique d'énergie qui mesure la quantité de chaleur nécessaire à la production de 1 kg d'eau douce et la masse d'eau douce produite par 1 kg de vapeur est égale à :

$$Q = k \cdot D \cdot C_p \cdot \Delta t + D \cdot r$$

$$Y = Q/D = k \cdot C_p \cdot \Delta t + r$$

Avec :

$Q$  : la quantité de chaleur recherchée (en kJ),

$K$  : le rapport débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite,

$D$  : le débit d'eau douce (en kg),

$C_p$  : la capacité thermique massique supposée égale à 4,18 kJ/(kg· K), quelle que soit la salinité de l'eau,

$\Delta t$  : l'écart entre la température d'ébullition et la température de l'eau mer à l'entrée de l'enceinte et la sortie du condenseur (en °C),

$r$  : l'enthalpie (ou chaleur latente) de vaporisation (en kJ) .

$Y$  : la chaleur spécifique du procédé de distillation Multi-Flash [19].

La chaleur latente de vaporisation de l'eau de mer est presque identique à celle de l'eau déminéralisée. Elle varie avec la température, comme l'indique le tableau ci-dessous:

**Tableau II.1** : La variation de la chaleur latente en fonction de température [14]

Température en °C	60	75	100	125
Chaleur latente de vaporisation en kJ/kg (kcal/kg)	2357(563)	2319(554)	2257(539)	2185(522)

La chaleur spécifique de l'eau de mer est inférieure de quelques pour cent de celle de l'eau pure, et ceci d'autant plus que la concentration est élevé.

**Tableau II.2:** Variation de la chaleur spécifique en fonction de la concentration des sels [14]

	Eau pure	Eau de mer à 35 g/l	Eau de mer concentrée 2 fois
Chaleur spécifique à 25 °C (en kJ.kg <sup>-1</sup> .°C)	4.178	4.035	3.851

Alors on constate qu'il faut approximativement 1 kg de vapeur pour produire 1 kg d'eau où la quantité d'énergie thermique devient très grande, dès qu'il s'agit de répondre aux besoins de la population d'une ville. D'autres procédés plus économiques ont donc été mis au point.

La distillation à multiples effets dérive directement de celui-ci dont la chaleur à fournir à une unité de distillation à multiples effets est uniquement celle qui est nécessaire pour réchauffer l'appoint d'eau de mer dans le premier effet et pour vaporiser la production de ce seul effet.

Pour évaluer la consommation thermique de ce procédé, on supposera que,  $n$  étant le nombre d'effets et  $D$  la production d'eau douce des  $n$  cellules, la production de chaque cellule est égale à  $D/n$  .

Par ailleurs, on négligera les pertes thermiques, dans ces conditions, la consommation d'énergie de la distillation à multiples effets est égale :

$$Q = k \cdot D \cdot C_p \cdot \Delta t + D r / n$$

$$Y = Q/D = k \cdot C_p \cdot \Delta t + r/n$$

Avec :

Q : consommation calorifique spécifique en kJ par kg d'eau douce produite ;

Dr : chaleur latente de vaporisation de l'eau en kJ/kg ;

n : nombre d'effets de l'installation ;

k : rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite ;

$\Delta t$  : écart de température existant dans un effet entre l'eau de mer à la sortie du condenseur et l'eau en ébullition dans cet effet en °C ;

$C_p$  : chaleur spécifique de l'eau de mer en  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Y : la chaleur spécifique du procédé de distillation Multiples Effets

Cette équation montre que la consommation d'énergie est approximativement celle de la distillation simple divisée par le nombre d'effets. En d'autres termes, le rapport de la masse d'eau douce sur celle de la vapeur est presque égale au nombre d'effets [19].

Les procédés de dessalement par distillation semblent les plus aptes à être couplés avec l'énergie solaire. En effet, pour son fonctionnement une installation de distillation nécessite pour la plus grande part de l'énergie thermique afin d'assurer le chauffage de l'eau de mer : de 170 à 420 MJ (40 à 120 thermies) par  $\text{m}^3$  d'eau produite suivant le rendement de l'installation, cette énergie thermique doit être fournie à un niveau de température relativement faible en général inférieure à 100-110°C pour éviter les problèmes d'entartrage.

Dans ces conditions, l'énergie thermique d'une installation de dessalement par distillation peut très bien être fournie soit par des capteurs plans, si l'unité de dessalement fonctionne à basse température (60-70°C) constituée d'un absorbeur qui reçoit le rayonnement solaire, sa partie supérieure vitrée laisse pénétrer le soleil et retient la chaleur. Le circuit primaire contient le fluide caloporteur (eau antigel), ce liquide est chauffé dans le capteur et intègre le ballon d'eau chaude grâce à l'échangeur pour céder ses calories à l'eau chaude sanitaire [14].

L'énergie solaire permet de satisfaire 50 à 60 % des besoins annuels en eau sanitaire, généralement les installations solaires sont équipées d'un appoint (résistance électrique, chaudière existante) qui permet de répondre aux besoins pendant la période hivernale.

Dans les procédés de distillation la plus grande partie d'énergie nécessaire est utilisée à un niveau relativement bas, pour des raisons technologiques (problèmes d'entartrage en particulier) la température de l'eau de mer ne doit pas dépasser 110-120°C, il est donc tout naturel d'utiliser de la chaleur dégradée et de coupler la distillation avec une usine de

production d'énergie quand les demandes d'eau et d'électricité sont compatibles. Un tel couplage peut être réalisé avec un moteur diesel, une turbine à gaz ou une turbine à vapeur.

### **II.5. Avantages et inconvénients des procédés de distillation**

Le procédé de dessalement par distillation présente certains avantages en particulier pour les eaux très salines puisque sa performance et ses coûts sont indépendants de la salinité [37]. De plus la distillation produit une eau contenant peu de solides dissous totaux ce qui est intéressant pour les industries ayant recours à l'eau dans leur procédé [37] et [22]. Elle produit une eau distillée présente une salinité comprise entre 20 et 80 mg/l [19]. Cependant puisqu'il ne requiert pas de prétraitement complexe ou de membrane, le procédé est moins compliqué et produit moins de rejets tangibles. Au point de vue des coûts, aucune des technologies retenues pour l'étude, ne démontre un avantage particuliers l'investissement initial est faible, les coûts d'entretien et de fonctionnement sont plus élevés par la suite et vice versa. Par contre l'énergie nécessaire au procédé de distillation a un coût élevé doit être considéré dans le calcul du coût de production de l'eau [38].

La conversion de l'eau de mer en eau douce implique une consommation d'énergie thermique dans les procédés de distillation qui ont fait des progrès considérables, ces procédés résultent de l'effort de recherche des organismes publics et des industriels, du retour d'expérience des nombreuses réalisations effectuées en particulier au Moyen-Orient et enfin de la concurrence de l'osmose inverse..Jusqu'aux années 60 la seule technologie industrielle disponible était la distillation simple effet ou multiples effets qui sont caractérisées par des coefficients d'échange de chaleur élevés qui permettent l'utilisation de très faibles différences de température par effet, c'est-à-dire l'obtention d'un taux de performance élevé tout en maintenant une température maximum de saumure relativement basse environ 60-70°C a permis de supprimer les problèmes d'entartrage avec un traitement antitartre limité au dosage d'un inhibiteur de corrosion à base de polyphosphate donc la vitesse de corrosion assez limitée.

La distillation à multiples effets avec sa souplesse de fonctionnement produit une eau de salinité de l'ordre 1 à 50 mg/l d'où la consommation d'énergie de pompage moins importante 2 à 3 kWh/m<sup>3</sup>. C'est pourquoi le procédé multiples effets et en particulier , le procédé multiples effets à tubes horizontaux connaît actuellement un développement important , le seul inconvénient étant dans la taille des installations unitaires qui est inférieure à celle du procédé FLASH de l'ordre de 10 à 25000 m<sup>3</sup>/j par unité, cette technologie étant maintenant 10 à 20% moins chère que celle du procédé Multi-Flash, grâce à les difficultés dues à l'entartrage

des surfaces d'échange de la distillation à multiples effets à partir des années 60, le procédé Multi-Flash s'est progressivement imposé, du moins pour les grandes installations de capacités supérieures à 25000 m<sup>3</sup>/j à cause de sa fiabilité et de sa maîtrise des différents problèmes comme la corrosion, le vide et l'automatisation.

Dans le procédé de Multi-Flash, la quantité d'eau douce produite ne représente qu'une fraction de l'ordre de 10 à 15 % du débit d'eau de mer entrant dans l'installation. Donc on a l'intérêt à limiter le débit d'eau de mer nécessaire à la production de l'eau dessalée souhaitée. Ceci est rendu l'importance de la saumure que l'on recycle. Cette technologie produit 56% de l'eau douce avec une salinité de 50 à 100 mg/l par rapport aux autres technologies de dessalement, mais ce procédé présente un coût d'investissement relativement élevé et la consommation d'énergie électrique pour le recyclage de la saumure est importante (4 à 5 kWh/m<sup>3</sup>).

La recherche d'un procédé aussi fiable que le Multi-Flash, mais nettement moins cher en investissement et en fonctionnement a abouti à la compression de vapeur, dans le cas où l'on dispose de vapeur à une pression comprise entre 1.5 et 3 bar absolu. Un thermocompresseur peut être utilisé pour aspirer la vapeur produite par le dernier effet et l'envoyer se condenser dans le premier effet. On peut ainsi obtenir avec une unité de distillation à 4 effets un taux de performance ou ratio de 7 à 8 tonnes d'eau douce par tonne de vapeur, ce qui diminue environ 2 fois la consommation énergétique des multiples effets.

Dans le cas où l'on ne dispose que de l'énergie électrique, le thermocompresseur peut être remplacé par un compresseur mécanique, cette solution présente l'avantage d'un meilleur rendement énergétique mais le coût d'investissement d'un compresseur mécanique est beaucoup plus élevé que celui d'un thermocompresseur et la taille des compresseurs actuels limite la capacité de production aux environs de 5000 m<sup>3</sup>/jour. Ce procédé avec sa simplicité de fonctionnement produit une eau douce de salinité entre 1-50 mg/l avec un peu d'énergie de l'ordre 4.5 kw/h. En 1925, une autre technologie forte, simple qui apparue c'est la distillation solaire a les possibilités très limitées. En effet, la productivité ne peut dépasser 4 à 5 litres d'eau douce par jour, selon une estimation, le prix du distillateur suivant le coût de l'entretien.

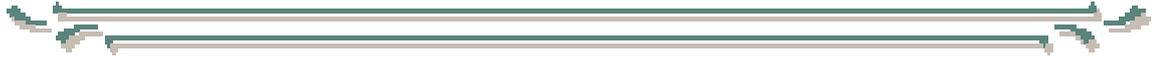
Si l'on admet une durée de vie de 15 ans une production spécifique de 4 l/j/m<sup>2</sup>, soit environ 1.2m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an. L'énergie solaire est inépuisable, non polluante, propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre, elle est intermittente, il faut donc un système de chauffage d'appoint permettant d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire n'est possible que

lorsqu'il y a du soleil, les installations des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes, donc il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes, mais les frais de maintenance et de fonctionnement de ces installations sont relativement faibles [14].

### II.6. Conclusion

Dans certains pays les habitants choisissent de dessaler l'eau de mer grâce à des usines de dessalement. Mais pour des raisons plus économiques, ils devraient rechercher des sources d'eau douce à traiter comme les rivières, lacs....

Cependant dans de nombreuses régions du monde les sources sont inexistantes, alors c'est pour cela qu'ils utilisent les usines de dessalement qui sont coûteux, car ils nécessitent un chauffage important. Il existe plusieurs méthodes pour dessaler l'eau de mer comme la distillation, même si elle comporte quelques inconvénients où même si elle coûte assez chère. C'est un procédé couramment utilisé pour le dessalement de l'eau de mer. C'est aussi un des plus connus et un des plus simples à reproduire. Seule la source d'énergie est difficile à trouver. Alors nous pouvons affirmer que cette technique restera longtemps en première place dans la catégorie «dessalement d'eau de mer» jusqu'à la découverte d'un procédé plus performant et moins coûteux.



# Chapitre **III**

## **Matériels et méthodes**



## Chapitre III : Matériels et méthodes

### III .1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du distillateur modèle GFL 2004 et de la méthodologie expérimentale adopté pour permettre de juger le fonctionnement et les performances de l'appareil. Ensuite nous décrivons les méthodes d'analyse d'eau distillée pour étudier les caractéristiques chimiques de l'eau de ce distillateur.

Le choix d'un distillateur dépend du débit de distillat et de l'efficacité interne de ce dernier, qui sont généralement influencés par les paramètres de fonctionnement permettant d'améliorer sa performance et son fonctionnement.

### III.2.Présentation et description détaillées du distillateur d'eau marque

#### GFL 2004

La distillation au sein de laboratoire est un procédé de séparation de mélange de substances liquides, elle consiste à évaporer ce mélange par un distillateur modèle GFL 2004 (Figure III.1) pour avoir de l'eau distillée, exempte de sels, de substances organiques, de microorganismes ainsi que de pyrogènes et de bactéries.



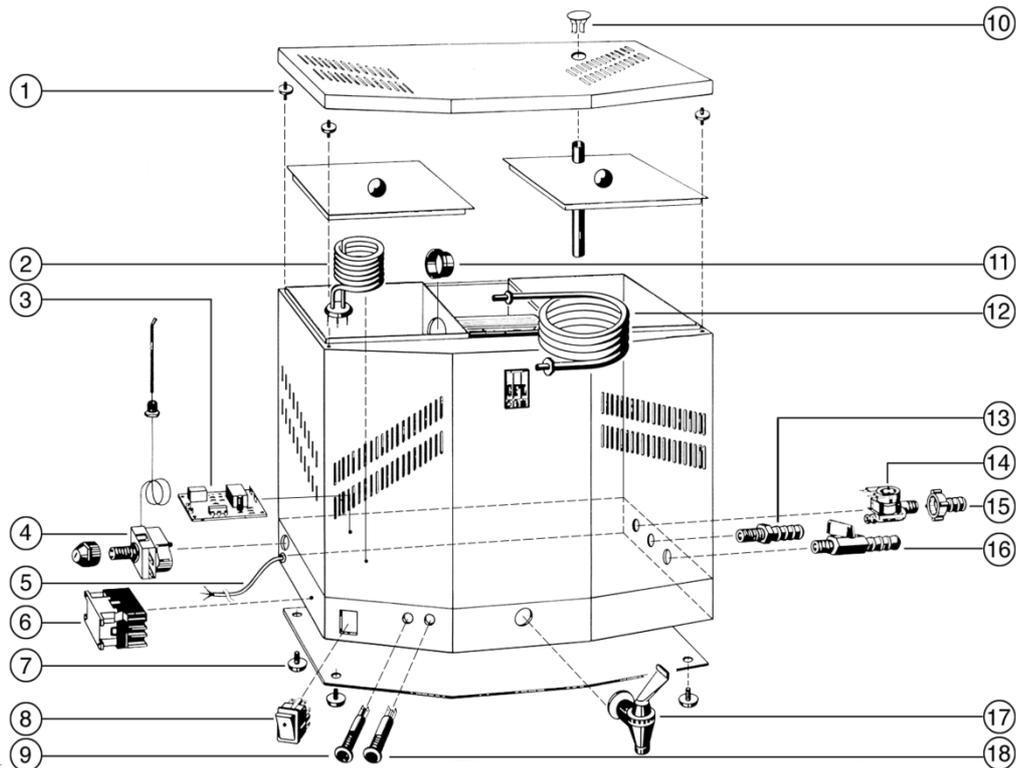
**Figure III. 1** : Photo du distillateur d'eau modèle GFL 2004

#### III.2.1. Description du distillateur

Le distillateur GFL avec réservoir 2004 c'est un appareil qui produit un distillat ultra pur conforme aux normes DAB (Digital Audio Broadcasting) et aux normes de nombreuses pharmacopées internationales. Cet appareil peut être installé sur une paillasse ou au mur , en

cas d'installation sur une paillasse, on place le distillateur uniquement sur une surface solide lisse et à niveau et en cas d'installation murale, on vérifie la limite de charge admissible du mur en la comparant au poids total de l'appareil (appareil rempli d'eau) et on fixe les deux vis de montage dans le mur en respectant la distance entre les deux trous en arrière du distillateur puis on emboîte le distillateur dans ces trous [39].

Le système de distillation présenté sur la (Figure III .1) est essentiellement constitué de :



**Figure III.2 :** Constitution du distillateur modèle GFL 2004 [39]

- 1-Pointe de couvercle (Anneau de fixation).
- 2-Elément chauffant.
- 3-Détecteur de niveau électronique.
- 4- Coupe circuit manque d'eau.
- 5-Câble d'alimentation électrique.
- 6-Contacteur.
- 7-Pied.
- 8-Commutateur.

- 9-Indicateur lumineux LED, rouge (Lampe témoin de pureté).
- 10-Protection anti-poussière.
- 11-Joint silicone profilé.
- 12-Refroidisseur tubulaire.
- 13-Ecoulement pour tuyau de sortie d'eau de refroidissement (Joint).
- 14-Electrovanne (régulateur de débit).
- 15-Raccordement à vis.
- 16-Robinet pour tuyau (1/4'') 6.3 mm ou douille hexagonale ou écoulement pour tuyau ou Joint
- 17-Robinet de prélèvement de distillat.
- 18-Indicateur lumineux LED, jaune (Lampe témoin de fonctionnement).

### III.2.2 .Principe de fonctionnement du distillateur

Avant le démarrage initial on retire les couvercles extérieurs et intérieurs pour remplir manuellement le bouilleur jusqu'à ce que les éléments chauffants deviennent en bas du récipient sous le niveau d'eau. Puis on remet les deux couvercles en place avant de mettre l'appareil en marche, ensuite on ouvre le robinet d'arrêt de l'alimentation en eau et on met l'appareil en marche, alors la tension délivrée par le secteur et la tension précisée sur la plaque d'identification du côté gauche de l'appareil sont identiques, aussi l'indicateur lumineux vert sur le commutateur d'alimentation et le témoin lumineux jaune de fonctionnement s'allument.

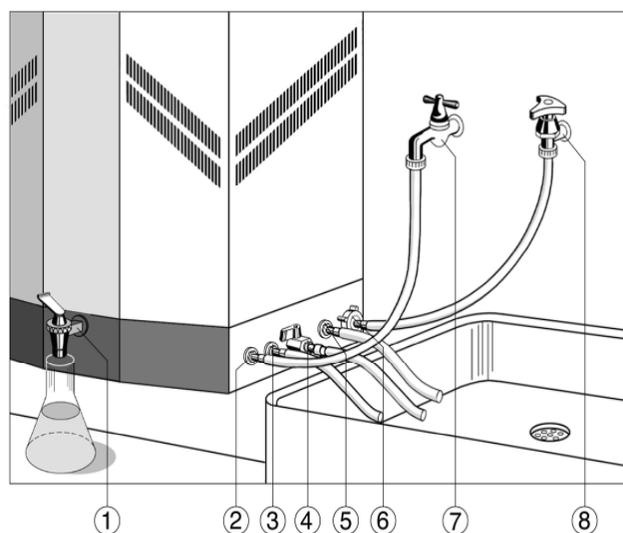


**Figure III.3 :** Le fonctionnement du distillateur

Le distillateur GFL 2004 présente un fonctionnement entièrement automatique. Lorsque l'électrovanne est ouverte l'eau s'écoule à travers le serpentin de refroidissement dans le réservoir de stockage et un régulateur de niveau mécanique contrôle le niveau d'eau dans le bouilleur, les éléments chauffants sont mis sous tension et portent l'eau à ébullition dans le bouilleur, la vapeur produite est conduite à travers un tube à vapeur vers le serpentin de refroidissement et se condense, le distillat résultant goutte dans un réservoir de stockage avec un dégagement de dioxyde de carbone par une ouverture en haut du distillateur. Enfin on prélève le distillat par le robinet en plastique noir à l'avant de l'appareil, après le prélèvement du distillat l'appareil se remet automatiquement en marche et le réservoir de stockage se remplit à nouveau. Dans le cas où le réservoir est plein l'électrovanne interrompt l'arrivée d'eau de refroidissement, les éléments chauffants sont coupés en cas de manque d'eau par un circuit thermostatique pour protéger ces éléments contre toute possibilité de fonctionnement à sec [39].

Tous les raccordements hydrauliques du distillateur se trouvent du côté droit de l'appareil, sauf le robinet de prélèvement du distillat qui est à l'avant.

Les tuyaux d'admission et de sortie d'eau ne sont pas fournis par le constructeur, mais ils sont à la charge de l'utilisateur.



**Figure III.4** : Raccordement du distillateur à l'alimentation en eau [39]

### 1 - Prélèvement du distillat

Le distillat est prélevé à l'aide du robinet de plastique noir sur la face avant de l'appareil, le robinet peut être ouvert en continu ou par intermittence. L'utilisateur peut fixer

un tuyau de laboratoire d'un diamètre interne de 15 mm environ, sur le robinet de prélèvement du distillat à l'aide d'un collier de serrage.

## 2 - Admission d'alimentation en eau indépendante

L'admission d'alimentation en eau indépendante alimente le bouilleur du distillateur avec de l'eau prétraitée, par l'intermédiaire d'une connexion par un tuyau avec réducteur de débit incorporé (0,5 l/min). On utilise un tuyau d'alimentation sous pression (1/2", Ø interne 12,7 mm) avec raccordement d'eau permettant de stopper la distribution par robinet d'arrêt manuel, pour connecter le raccordement du tuyau avec l'alimentation en eau prétraitée.

L'entrée d'eau prétraitée ne sera pas automatiquement interrompue lorsque l'appareil est mis hors tension, ou lorsque le réservoir de stockage est plein.

## 3 - Sortie d'alimentation en eau indépendante

On raccorde un tuyau de 3/4" (Ø interne 19 mm) sur le raccordement de sortie de l'alimentation en eau indépendante et on le dirige vers un évier situé en contrebas. Le tuyau doit présenter une pente sur toute sa longueur, l'eau doit s'écouler sans retour possible.

## 4 - Vidange du bouilleur

On raccorde un tuyau de 1/2" (12,7 mm) pour vidanger le bouilleur en cas de nettoyage ou d'entretien.

## 5 - Sortie d'eau de refroidissement

On raccorde un tuyau thermorésistant de 3/4" (19 mm) sur la sortie d'eau de refroidissement. Sa longueur ne doit pas dépasser 1,5 m. On dirige le tuyau vers un évier situé en contrebas avec une pente sur toute sa longueur. L'eau de refroidissement doit pouvoir s'écouler sans possibilité de retour.

## 6 - Admission d'eau du robinet

L'admission d'eau du robinet alimente le distillateur en eau par l'intermédiaire d'une électrovanne on utilisant un tuyau de 1/2" (12,7 mm) supportant la pression et une connexion d'eau pouvant stopper la distribution. (8 : Robinet d'arrêt manuel) pour connecter le tuyau à l'alimentation en eau.



Figure III.5 : Vidange et sortie d'eau de refroidissement

### III.2.3. Entretien du distillateur

Le distillateur GFL 2004 est fabriqué à partir de matériaux de première classe et sont prévus pour supporter des conditions d'utilisation éprouvantes que dans des limites raisonnables. L'utilisateur doit éliminer régulièrement les formations de tartre dans le distillateur suivant le degré de dureté de l'eau de robinet. Tout d'abord on retire les couvercles internes, externes et le déflecteur, puis on verse le détartrant constitué d'un mélange de 10% d'acide formique, 10% d'acide acétique et 80% d'eau distillée dans le bouilleur pour recouvrir les formations de tartre les plus hautes, mais ce mélange ne doit pas contenir de l'acide chlorhydrique et on chauffe jusqu'à environ 70°C.

Après 30 minutes environ, on ferme les robinets et on met l'appareil en marche jusqu'à ce que la température soit atteinte, on laisse s'écouler le mélange de solvant et de tartre à travers le robinet de vidange, puis on rince le bouilleur plusieurs fois à l'eau.

Suivant la quantité d'impureté contenue dans l'eau d'alimentation et la quantité d'impureté présente dans le bouilleur suite au processus de distillation; l'eau peut mousser pendant l'ébullition, si la mousse entre en contact avec l'électrode dans le bouilleur, un détecteur d'impureté électronique éteint l'appareil et le témoin lumineux rouge de pureté s'allume, donc on doit vidanger le bouilleur à l'aide du robinet et le rincer plusieurs fois à l'eau claire, ensuite on redémarre l'appareil.

Avant le redémarrage du distillateur, on le laisse refroidir et on vérifie qu'aucun liquide n'entre en contact avec les connexions électriques ou avec les pièces électriques internes de l'appareil. Après le nettoyage des surfaces traitées par poudrage électrostatique si nécessaire avec des détergents doux, on remplit le distillateur avec de l'eau jusqu'au recouvrement des éléments chauffants.

L'entretien, la réparation ou la modification doivent être effectués uniquement par des électriciens compétents conformément aux règles techniques générales. Dans ce cas là pour un bon fonctionnement, il faut utiliser uniquement des pièces d'origine après une demande de confirmation détaillée des tâches à effectuer par la personne responsable (entreprise, date, signature) [39].

### III.2.4. Caractéristiques techniques du distillateur modèle GFL 2004

Le distillateur modèle GFL 2004 est parmi les systèmes les plus performants du marché, il a été conçu selon les modèles pour le débit de quatre litres de distillat par heure.

Cet appareil assure une production continue de distillat par une surveillance électronique et un réservoir d'une capacité deux fois le débit horaire.

**Tableau III.1** : Données techniques du distillateur modèle GFL 2004 [39]

Référence	2004
Modèle	Mono-distillateur avec réservoir de paillasse ou mural
Dimension (L*H) mm	620*330*460
Volume du réservoir de stockage	8L
Matériau interne	Acier inoxydable
Capacité	4l/h
Eau de refroidissement	48l/h
Conductivité	2.3 $\mu$ s/cm à 20 °C
Qualité de l'eau distillée	Conforme au DAB (Pharmacopée allemande) , exempte de bactérie et de pyrogène , faible teneur en gaz
Puissance	3000W
Fréquence	50/60Hz
Voltage	220/230V, 110VV
Poids net	20.2kg
Poids brut environ	25kg
Volume emballage environ	0.16 m <sup>3</sup>
Protection du corps de chauffe	Par thermostat évitant une marche à sec
Economie d'énergie	Grâce à l'alimentation de bouilleur par l'eau de refroidissement préchauffée

### III.3. Dispositif expérimental

L'eau distillée est une eau obtenue par évaporation et condensation d'une eau impure et qui est ainsi théoriquement pure exempte de minéraux et d'organismes que l'on pourrait retrouver dans l'eau naturelle.

Elle est utilisée généralement pour diluer la solution d'acide sulfurique dans les batteries de voiture. Elle est aussi employée comme ingrédient dans beaucoup de produits cosmétiques et pharmaceutiques. Son utilisation est recommandée par sa pureté éliminant ainsi les réactions chimiques non désirables.

#### III.3.1. Matériels et méthodes analytiques utilisés

L'étude expérimentale effectuée au niveau du laboratoire de traitement des eaux de la faculté des Sciences Techniques, nous a permis de mesurer la quantité et la qualité chimique d'eau distillée produite par le distillateur GFL 2004 pendant une durée de quatre heures.

Pour faire cette mesure on remplit manuellement le bouilleur de l'appareil et on le raccorde au robinet lié à un débitmètre qui sert à régler le débit traversant l'appareil. Alors on obtient des quantités variables d'eau distillée avec des différentes températures en fonction du temps.

L'eau utilisée dans notre étude c'est une eau de robinet contrôlée par une analyse complète faite au niveau du Laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE) de la wilaya de Tlemcen. Dans laquelle nous avons procédé à la mesure des principaux paramètres physico-chimiques des eaux à savoir : la température, le PH, la conductivité, le Taux de sels et la dureté totale.

Les résultats obtenus sur la qualité chimique d'eau de robinet sont montrés dans le tableau suivant :

**Tableau III.2 :** La qualité chimique d'eau de robinet.

Les paramètres mesurés	PH	Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	TDS	Dureté (mg/de $\text{CaCO}_3$ )
Eau de robinet	7.45	860	430	183.5

#### III.3.1.1. Mesure de la température

La mesure de la température doit être faite sur site en utilisant un thermomètre. La lecture doit s'effectuer après l'immersion du thermomètre dans l'eau.

#### III.3.1.2. Mesure du PH

Le PH correspond à la concentration d'ions d'hydrogène. Il mesure l'acidité ou la basicité d'une eau, dans le domaine de l'eau, le pH joue un rôle primordial à la fois dans :

- Les propriétés physico-chimiques (acidité, agressivité).
- Les processus biologiques dont certains exigent des limites très étroites des pH.

-L'efficacité de certains traitements (coagulation, adoucissement, contrôle de la corrosion, chloration).



**Figure III.6 :** Un PH-mètre portable

Le pH-mètre est un appareil de mesure qui permet de déterminer avec précision le pH d'une solution. Il est constitué généralement d'une électrode en verre reliée à un convertisseur numérique. Pour mesurer le PH, on a utilisé un PH-mètre portable (Figure III.6).

### III.3.1.3. Mesure de la conductivité

Une caractéristique physico-chimique liée à la concentration des substances dissoutes et à leur nature, elle s'exprime en micro siemens/cm .La mesure de la conductivité permet d'avoir une idée sur la concentration des sels dissous dans l'eau .Une conductivité élevée traduit soit des PH anormaux, soit le plus souvent une salinité élevée. Pour mesurer la conductivité on utilise le conductimètre portable (Figure III.7) [40,41].



**Figure III.7 :** Un conductimètre portable

Le conductimètre possède une cellule désignée pour donner une lecture précise de la conductivité en  $\mu\text{s/cm}$  directement sur le cadran digital.

#### Mode opératoire

- 1-Régler l'appareil.
- 2-Rincer la cellule du conductimètre avec l'eau distillée, puis avec l'échantillon à analyser.
- 3-Lire l'affichage de la conductivité et la température de l'échantillon à analyser.

### III.3.1.4. Dosage de la dureté totale

La dureté ou titre hydrotimétrique correspond essentiellement à la présence de sels de calcium et de magnésium. Elle est directement liée à la nature des terrains traversés. Ils proviennent des roches calcaires ou dolomitiques.

Dans une eau naturelle, on peut distinguer des différents types de dureté:

- **Dureté totale** : somme des concentrations en calcium et magnésium.
- **Dureté calcique** : concentration globale en calcium.
- **Dureté magnésienne** : concentration globale en magnésium.

La dureté s'exprime généralement en degré Français ou en milliéquivalents/l.

$$1^{\circ}\text{F} = 5\text{meq/l}$$

$$1^{\circ}\text{F} = 4\text{mg/l de Ca ou } 2.43\text{mg/l de Mg ou } 10\text{mg/l de CaCO}_3$$

#### Principe

Les alcalino-terreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe de type chélate par le sel di sodique de l'acide éthylène. La disparition des dernières traces d'éléments à doser est décelée par le virage d'indicateur spécifique en milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du Mg, cette méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium [40].

#### Réactifs utilisés

- Solution d'EDTA 0.02N.
- Solution étalon de calcium à 0.4 g/l.
- Solution tampon.

#### Mode opératoire

Dans un erlenmeyer de 250 ml : on prélève 10 ml d'eau on chauffe avec un bain Marie à une température d'environ 60°C puis on ajoute 0.5 ml de la solution tampon (PH=9.5-10) et (3) gouttes d'indicateur coloré N.E.T, on verse la solution d'EDTA jusqu'au virage du rouge en bleu vert.

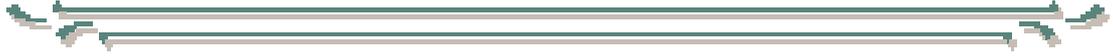
#### Expression des résultats

$$\text{TH} = (N_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}) \times 1000 / V_0$$

TH : c'est le titre hydrométrique en méqg ( $1\text{méqg} = 5^{\circ}\text{F}$ )

$$\text{TH} = (N_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}) \times 1000 / V_0 \times 5 (\text{F}^{\circ})$$





# ***Conclusion générale***



### Conclusion générale

Le choix d'une méthode de purification de l'eau dépend avant tout de son usage et des moyens du laboratoire, la meilleure technique utilisée dans les laboratoires est la distillation où on distille l'eau de robinet. Alors les impuretés restent dans le fond du distillateur.

Le distillateur modèle GFL 2004 est un dispositif très simple dans sa réalisation, il peut être réalisé avec des matériaux locaux, ce qui lui donne l'avantage d'être facilement exploitable dans le laboratoire .

D'après cette étude expérimentale sur la qualité et la quantité d'eau distillée produite par le distillateur modèle GFL 2004 on peut noter que :

- Lors du changement du débit d'eau d'alimentation, le débit optimum de l'appareil restera de l'ordre 3.9 l/h.

- Quelque soit le débit d'eau d'alimentation, le volume du distillat augmente avec le temps.

- Lorsque la température de fonctionnement du distillateur atteint 100°C, la température du distillat reste constante pendant 30 minutes, puis elle augmente jusqu'à 77°C après 4 heures.

- La quantité d'eau de refroidissement augmente avec le temps et la température de cette eau progresse jusqu'à 68°C à cause de la température de fonctionnement élevée à l'intérieur de l'appareil.

- Le PH, la conductivité, le taux de sels et la dureté du distillat diminuent avec le temps pour les différents débits d'eau d'alimentation.

L'entretien de l'appareil disponible dans notre laboratoire est facile, mais il a trois inconvénients majeurs :

- Le coût énergétique important : la thermistance ayant une puissance de 3000W.

- Le débit horaire : le constructeur annonce 4L/h. Dans la pratique, il faut régler correctement le débit d'arrivée d'eau, ce qui est parfois délicat.

- La conception : lors de la distillation de l'eau, toutes les impuretés se déposent dans le fond. Ce qui fait que l'appareil s'entartre très vite et nécessite un entretien régulier.

Mais cet appareil disponible dans notre laboratoire n'est pas un trop gros investissement et son entretien est facile. Il a cependant trois inconvénients majeurs :

- Coût énergétique important : la thermistance ayant une puissance de 3000W.
- Le débit horaire : le constructeur annonce 4L/h. Dans la pratique, il faut régler correctement le débit d'arrivée d'eau, ce qui est parfois délicat.

-La conception : lors de la distillation de l'eau, toutes les impuretés se déposent dans la cuve. Ce qui fait que l'appareil s'entrartre très vite et nécessite un entretien régulier.

D'après cette étude expérimentale sur la qualité et la quantité d'eau distillée produite par le distillateur modèle GFL2004 on peut noter :

-Quelque soit le débit d'eau d'alimentation, le volume de distillat augmente avec le temps.

-Le débit et la température d'eau de refroidissement augmente au cours du temps.

-La température de fonctionnement et du distillat croit au cours du service du distillateur.

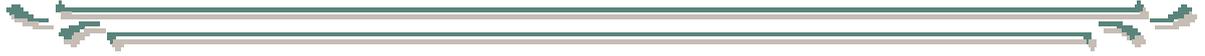
-Le PH de distillat diminue avec le temps quelque soit le débit d'eau d'alimentation.

## Conclusion générale

---

-La conductivité et le Taux de sels de distillat diminuent avec le temps pour les différents débits d'eau d'alimentation.

-La dureté de distillat diminue avec le temps dans les différents débits d'eau d'alimentation.



# ***Bibliographie***



### Bibliographie

- [1] Double G., Ferroni G., Petrocchi A., 1970, Travaux Pratiques de chimie Minérale – Précis d'analyse qualitative (Maîtrise de chimie), Dunod Université, ed. Paris Dunod, 213p.
- [2] Jocelyne Garbar ; Stéphanie Dechamps ; Françoise August, 2008, l'eau sur Terre , 23p.
- [3] Y.Barhonmi- Andreani ; J.Gandremean ; B.Gerbe ; F.Khamsing ; Y.Rabatel, 2004, Eau ressources et menaces, 30p.
- [4] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle\\_de\\_l%27eau](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l%27eau) , consulté le : 21/02/2014.
- [5] Mireille DEFRANCESCHI, 1998, L'eau dans tous ses états, ed. Ellipses Marketing, 127p.
- [6] Gérard Copin-Montégut, Physique et chimie marine, L'eau dans tous ses états, 4p.
- [7] Eldon J. Oja, 2001, La vapeur d'eau et le cycle de l'eau ,12p.
- [8] [www.pignolos.pagesperso-orange.fr](http://www.pignolos.pagesperso-orange.fr), consulté le : 23/02/2014.
- [9] Amel LOUNNAS, 2009, Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station HAMADI-KROM Skikda, Mémoire de Magistère, Université du 20 Août 1955 Skikda, 92p.
- [10] Degrémont, 2005, mémento technique de l'eau Tome I, ed. Tec & Doc Lavoisier, 1718p.
- [11] BOEGLIN Jean-claude, 2001, Propriétés des eaux naturelles, Technique de l'ingénieur, traité environnement, G1 110, 8p.
- [12] BOUDJEBIR Hind, 2010, Etude de l'impact de l'écart de température (Ambiance- Eau) sur le rendement d'un distillateur solaire à effet de serre, Mémoire de Magistère, Université Mantouri de Costantine, 97p.

- [13] CARDOT Claude, 1999, Génie de l'environnement : les traitements de l'eau, ed. Ellipses, 256p.
- [14] Alein Maurel, 2006, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, 2<sup>ème</sup> édition, ed. Lavoisier, 286p.
- [15] RAHMANI Rym, 2007, Rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effet de certains paramètres thermo physiques sur le rendement, Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Costantine, 95p.
- [16] HALLOUFI Ouahid, 2010, Etude de la performance d'un distillateur solaire par un système de préchauffage solaire de l'eau saumâtre, Mémoire de Magister, Université Mentouri de Costantine, 82p.
- [17] Viviane Renaudin, Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, cet article fait partie du dossier pluridisciplinaire sur l'eau, <http://culturesciences.chimie.ens.fr/category//eau-51>, consulté le : 25/02/2014.
- [18] [www.clemspreims.free.fr](http://www.clemspreims.free.fr), consulté le : 25/02/2014.
- [19] Patrick DANIS, 2003, Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'ingénieur traité Génie des procédés, J 2700,18p.
- [20] [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr), consulté le : 28/02/2014.
- [21] M.L.Khanna & k.n.Mathur ,1961, Experiments on demineralization of water in North India, New Delhi,135p.
- [22] AL-SUBAIE, K.Z, 2006,Precise way to select a desalination technology, Desalination, pp : 29-35.
- [23] B.W. Tleimat, 1980, Solar distillation: the state of the art, Sea water conversion laboratory, Richmond, U.S.A,34p.

- [24] [www. culturesciences.chimie.ens.fr](http://www.culturesciences.chimie.ens.fr), consulté le : 03/ 03/2014.
- [25] M.S.TanvirI.M.Mujtaba<sup>\*</sup>, 2006,Neural network based correlations for estimating température élévation for seawater in MSF desalination process, dessalination vol.195,pp :251-272.
- [26] Marian G.Marcovercchio,Sergio.F.Mussati,,pio A.Aguirre,Nicolas J.and Scenna ,2005, optimization of hybrid desalination processes including multi stage flash and reverse osmosis systems ,Dessalination , vol . 182, pp : 111-122.
- [27] Fiorini P., Sciubba E., 2005, Thermo-economic analysis of a MSF desalination plant, Desalination, Vol.182, pp : 39-51.
- [28] R.BERNAD, G.MERGUY, M. SCHWARTZ : le rayonnement solaire : convection thermique et application, Technique et documentation, deuxième édition 1980, ed.paris, 216p.
- [29] Maurel A., 1990, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non Conventionnels d'approvisionnement en eau douce, Lavoisier, paris, 86p.
- [30] [www. hmf.enseeiht.fr](http://www.hmf.enseeiht.fr), consulté le : 03/03/2014.
- [31] MERAD L., B.BENYOUCEF B., LO.MERAD LO., BOUSSOUKAIA T.,et OMARI B., Etude d'un procédé thermique de dessalement d'eau de mer par aérogénérateur à rendement élevé, Rev. Energ. Ren 11èmes Journées Internationales de Thermique 2003, pp : 13-19.
- [32] Sadi A., 2000, Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques, Revue. Energie Renouvelable : Chemss pp : 91-97.
- [33] BOUKERZAZA N., 2009, étude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire, mémoire de magister, Université de Costantine, 92p.
- [34] Fedali S., 2008, modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales: mémoire de Magister,Université de Batna, 105p.

- [35] [www.fondation-lamap.org](http://www.fondation-lamap.org), consulté le : 07/03/2014.
- [36] [www. Distillateur solaire à effet de serre](http://www.distillateur-solaire.com), consulté le 15/03/2014.
- [37] APTEL P., 2006. Filtration membranaire (OI, NF, UF) application en traitement des eaux, Techniques de l'ingénieur, Toulouse, 12 p.
- [38] BORSANI R., REBAGLIATI S., 2005, Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies, Desalination 182, pp : 29-37.
- [39] Fisher Bioblock Scientific, GFL001 FR DISTILLATEUR AVEC RESERVOIR. doc.
- [40] Jean Rodier, 1996, L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 8<sup>ème</sup> édition, Dunod , paris, 1383p .
- [41] Franck Rejsek, 2002, Analyse des eaux –Aspects réglementaires et techniques, CRDP d'aquitaine, ed. France, 151p.