

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master

Option : ingénierie thermique et solaire

Etude d'une système de dessalement msf couplet avec concentrateur solaire

Présenté par :

Behri sofiane
Dr. hamane
Houadji abdelhak

Encadré par :

Année universitaire 2016/2017

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents, votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours, veuillez trouver dans ce travail une grande reconnaissance pour ce que vous avez entrepris à mon égard, et un fruit de toutes vos prières et vos efforts.

A mes chers frères et sœurs.

A tous mes amis, et bien sur mon binôme Sofiane

A tous mes collègues.

A toute ma famille.

Abdelhak .H

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là.

Au terme de ce travail, on tient à exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice Dr HAMANE pour nous avoir suivis avec patience et intérêt et pour sa confiance qu'elle a placé en nous tout au long de ce travail, pour ses conseils et pour son aide appréciable, qui ont enrichi ce travail.

On tient également à adresser nos remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce mémoire de Master.

A tous nos enseignants durant notre cursus universitaire, qui nous ont permis d'atteindre ce niveau, nous leurs seront toujours reconnaissant.

Nos sincères remerciements à nos parents, nos frères et sœurs, nos amis et nos copains d'étude.

Résumé - *L'eau et l'énergie sont des sujets les plus importants pour l'environnement international et le développement. La santé économique et sociale moderne dépend de l'approvisionnement durable en énergie et en eau. Beaucoup de zones à travers le monde qui souffrent de la pénurie d'eau douce sont de plus en plus dépendante du dessalement qui est une source très fiable et non conventionnelle de production d'eau douce. Ainsi, le marché du dessalement d'eau de mer a considérablement augmenté ces dernières décennies et devrait se poursuivre dans les années à venir. L'approvisionnement en eau aujourd'hui en Algérie repose en grande partie sur le dessalement. En Algérie, l'irradiation directe, utilisée pour les concentrateurs solaires thermiques dépasse les 2900 kWh/m² dans certaines régions. L'objectif de ce papier consiste à déterminer la quantité d'eau douce produite par une installation de dessalement utilisant les procédés Multi-Stage Flash 'MSF' et équipée d'un champ solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques 'CCP'.*

Abstract – *Water and energy are two of the most important issues on the international environment and development. The modern social and economic health depends on the sustainable supply of energy and on water. Many areas around the world which suffer from shortages of potable water are increasingly dependent on desalination which is a very reliable source and unconventional production system of potable water. Thus, the market for desalination of seawater increased dramatically in recent decades and is expected to continue in the years to come. The water supply in Algeria today is based for a large part on desalination. In Algeria, the direct irradiation, used for concentrated solar thermal systems exceeds 2900 kWh/m² in some areas. The objective of this paper is to determine the amount of potable water produced in a desalination plant using the process Multi-Stage Flash 'MSF' equipped with a parabolic through collectors field 'PTC'.*

Sommaire

INTRODUCTION GENERAL	1
1. Introduction	2
2 Généralités sur le dessalement	2
2.1 Histoire du dessalement	2
3 Dessalement des eaux marines en Algérie	3
3.1 Approvisionnement en eau potable en Algérie	3
3.2 Problème d'eau en Algérie	4
3.2.1 La Faiblesse des ressources en eau	4
3.2.2. La dégradation continue des ressources	5
3.2.3. Les périodes de sécheresse	5
3.2.4. La Croissance démographique	5
4 Objectifs de ce travail	6
CHAPITRE 1 : GENERALITE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	7
1.1 Définition.....	8
1.2 Classification des différents procédés de dessalement	8
1.2.1 Selon le principe sur lequel ils se basent	8
1.2.2 Selon le type d'énergie consommée	8
1.3 Principales technologies de dessalement des eaux	9
1.3.1 Procédés membranaires	10
1.3.1.1. Osmose inverse	10

1.3.1.2. Electrodialyse	11
1.3.2 Procédés de distillation.....	12
1.3.2.1. Distillation à simple effet	13
1.3.2.2. Procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).....	13
1.3.2.3. Procédé de distillation par compression de vapeur (MVC).....	14
1.3.2.4. Procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)	15
1.3.3 Procédés hybrides	18
1.3.4 La distillation solaire directe à effet de serre.....	19
1.3.5 Couplage distillation / solaire thermique	20
1.3.5.1 Flash multi-étages assisté par l'énergie solaire (MSF).....	21
1.3.5.2 Flash multi-étages assisté par un collecteur solaire	22
1.4 Choix d'un procédé de dessalement	23
1.5 Comparaison du procédé de distillation et d'osmose inverse	24
1.6 Les concentrateurs cylindro- parabolique.....	25
1.6.1 Principe de fonctionnement.....	26
1.6.2 Les composants d'un prototype du concentrateur cylindro- parabolique.....	27
1.7 L'état de l'art	28
1.7.1 Les principaux travaux sur le concentrateur cylindro-parabolique.....	28
1.7.2 Les principaux travaux sur le dessalement multi-stage flash (MSF).....	29
1.7.3 Couplage MSF/cylindro-parabolique	30
CHAPITRE 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE.....	31

2.1	Modèle du rayonnement.....	32
2.1.1	Estimation du rayonnement par ciel clair par le modèle de Perrin de Brichambaut.....	32
2.2.	Sous model du concentrateur cylindro-parabolique	33
2.2.1	Estimation des performances du concentrateur cylindro-parabolique.....	34
2.2.2	Développement du modèle de performance	35
2.3	Sous modèle du système MSF	40
2.3.1.	Description du processus	40
2.3.2.	Model mathématique	42
2.3.2.1	Équilibre globales des matériaux.....	42
2.3.2.2.	Profils de température des étages et des condensateurs	43
2.3.2.3	Matériel de l'étage et l'équilibre salin	44
2.3.2.4.	Le chauffeur de saumure, le condenseur et la surface de transfert de chaleur	47
2.3.2.5.	Dimensions de l'étage	48
2.3.2.6.	Paramètres de performance	49
	CHAPITRE 3 : RESULTAT ET INTERPRETATION	50
3.1	Introduction	51
3.2	Méthodologie	51
3.3	Résultats et discussions	54
3.3.1	Résultats du model d'éclairément	54
3.3.2.	Résultats du model cylindro-parabolique	55
3.3.3.	Résultats du model M.S.F-OT.....	57
3.3.3.1	Station de dessalement étudiée.....	57

3.3.3.2 Résultats de simulation de station	59
3.4 Etude paramétrique	63
3.4.1 Influence de la température de vapeur T_s	63
3.4.2 Influence de la température d'eau de mer T_f	65
3.4.3 Influence du débit d'eau de mer M_f	67
3.4.4 Étude de changement de site	68
3.4.4.1 Site d'Oran.....	68
3.4.4.2 Site de Touggourt	71
3.4.4.3 Site de Tamanrasset.....	74
3.4.4.4 Interprétation des résultats.....	76
Conclusion	77
CONCLUSION GENERALE	78
Annexe	A

Liste des figures

Figure 1.1 : Procédés de dessalement selon différents principes.....	8
Figure 1.2 : Procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée.....	9
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement de l'osmose inverse (Degremont, 2010)...	11
Figure 1.4 : Principe de l'électrodialyse (Lenntech, 2012).....	12
Figure 1.5 : Distillateur à simple effet (Danis, 2003).....	13
Figure 1.6 : Schéma de Principe d'un système d'évaporateurs multiples effets.....	14
Figure 1.7 : Principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.....	15
Figure 1.8 : Distillateur par détente successives (MSF).....	17
Figure 1.9 : Chambre typique de flashage.....	17
Figure 1.10 : Installation hybride.....	19
Figure 1.11 : Distillateur solaire à effet de serre.....	20
Figure 1.12 . Représentation schématique d'un système de dessalement flash multi-étages à énergie solaire.....	22
Figure 1.13 . Schéma d'un processus de dessalement (MSF) multi-étages flash assisté par collecteur solaire.....	23
Figure 1.14 Champ d'une centrale cylindro-parabolique.....	25
Figure 1.15 Principe de fonctionnement du concentrateur.....	26
Figure 1.16 : Géométrie d'un concentrateur cylindro- parabolique.....	27
Figure 2.1 : schéma de cylindro-parabolique PTC 1800.....	34
Figure 2.2 Désalinisation instantanée à plusieurs étages une fois par	

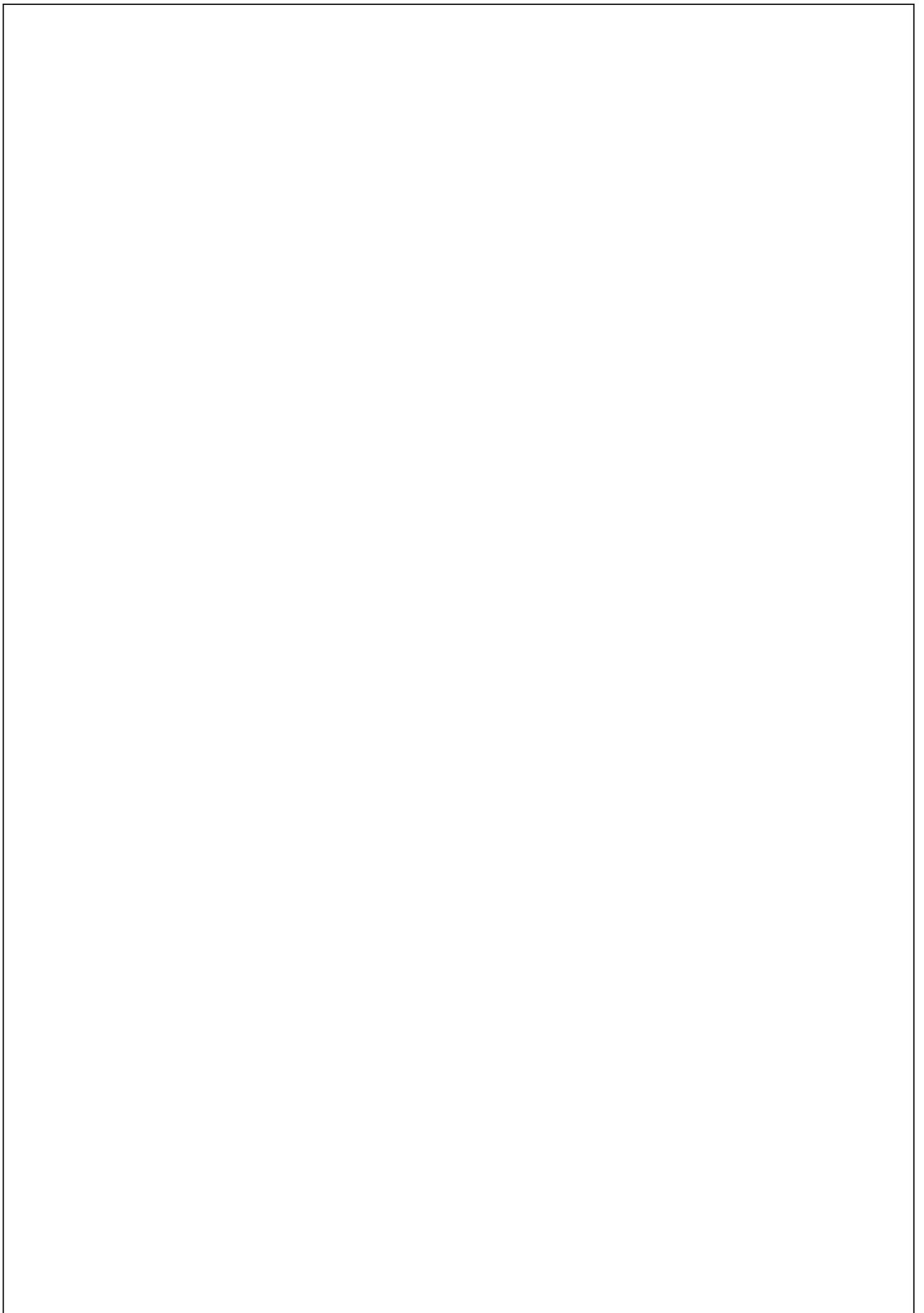
processus.....	40
Figure 2.3 Schéma de variables de modèle en phase de flash.....	41
Figure 2.4 Schéma de variables du modèle dans un réchauffeur de saumure.....	41
Figure 3.1 : Algorithme de l'éclairement.....	51
Figure 3.2 : Algorithme de cylindro-parabolique.....	52
Figure 3.3 : Algorithme de système M.S.F-OT.....	53
Figure 3.4 .Température de saumure flashée.....	54
Figure 3.5 La température de l'eau de mer sort du condenseur dans chaque effet...55	
Figure 3.6 : Salinité de la saumure sortant de chaque étage.....	56
Figure 3.7 : Quantité de saumure à chaque étage.....	56
Figure 3.8 : Quantité de distillat produit à chaque étage.....	59
Figure 3.9 : Graphe d'éclairement direct en fonction du temps pour le site de Bousmail.....	60
Figure 3.10 : Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site de Bousmail.....	60
Figure 3.11 : graphe de la température de sortie de cylindro-parabolique en fonction de temps pour le site de Bousmail.....	61
Figure 3.12 : Graphe de la quantité de chaleur utile de cylindro-parabolique en fonction du temps pour le site de Bousmail.....	62
Figure 3.13 : Graphe de production de dessillât en fonction du temps en mois de juin	62
Figure 3.14 Effet de la température de vapeur sur la production de distillat.....	63
Figure 3.15 Effet de la température de vapeur sur la consommation de vapeur.....	64
Figure 3.16 Effet de la température de vapeur sur la performance GOR.....	64
Figure 3.17 : Effet de la température de vapeur sur T_0	65

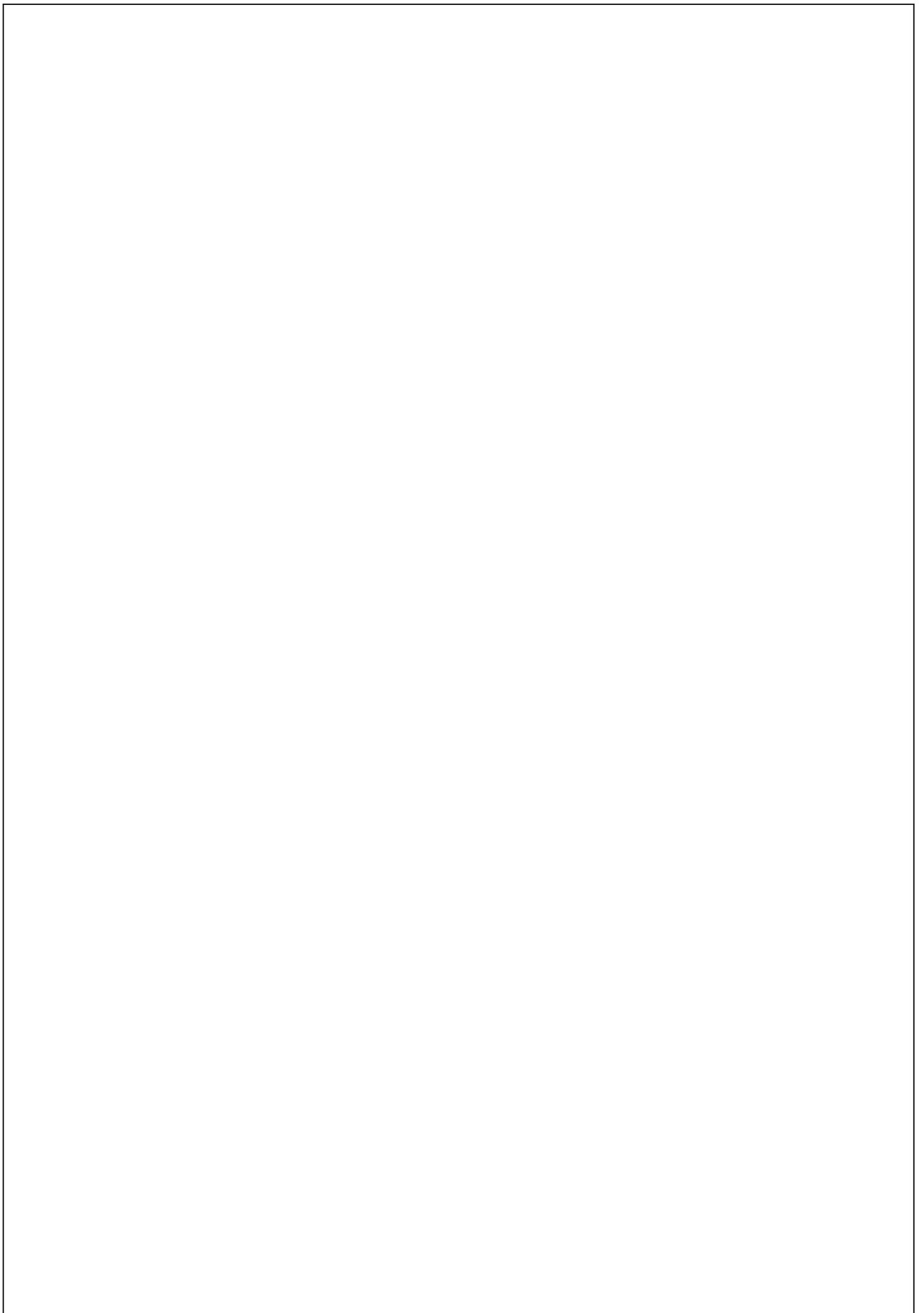
Figure 3.18 : Effet de la température d'eau de mer T_f sur la consommation de vapeur M_s	66
Figure 3.19: Graphe de GOR on fonction de la température d'eau de mer T_f	66
Figure 3.20 : Effet du débit d'eau de mer M_f sur le distillat produit M_d	67
Figure 3.21 : Effet du débit d'eau de mer M_f sur la consommation de vapeur M_s	68
Figure 3.22: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site d'Oran.....	69
Figure 3.23: Graphe d'éclairement direct en fonction du temps pour le site d'Oran.....	69
Figure 3.24: Graphe de la température de sortie en fonction du temps pour le site d'Oran.....	70
Figure 3.25: Graphe la quantité de chaleur utile en fonction du temps pour le site d'Oran.....	70
Figure 3.26: Graphe de la production de distillat en fonction du temps pour le site d'Oran.....	71
Figure 3.27: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site de Djelfa	71
Figure 3.28: Graphe d'éclairement direct en fonction du temps pour le site de Djelfa.....	72
Figure 3.29: Graphe de la température de sortie en fonction du temps pour le site de Djelfa	72
Figure 3.30: Graphe de la quantité de chaleur utile en fonction du temps pour le site de Djelfa	73
Figure 3.31: Graphe du débit de distillat en fonction du temps pour le site de Djelfa.....	73
Figure 3.32: Graphe de l'éclairement global en fonction du temps pour le site de Tamanrasset.....	74
Figure 3.33: Graphe de l'éclairement direct en fonction du temps pour le site de Tamanrasset.....	74
Figure 3.34: Graphe de la température de sortie en fonction du temps	75

Figure 3. 35: Graphe de la quantité de chaleur utile en fonction du temps pour le site de Tamanrasset.....	75
Figure 3. 36: Graphe de la production de distillat en fonction du temps.....	76
Figure A.1 Angles de Base.....	A
Figure A.2 : Variation d'angle de déclinaison	A
Figure A.3: système de coordonnées superficiel de la terre pour observateur à point.....	A
Figure A.4 : une ouverture fixe avec son orientation définie par l'angle (λ) d'inclinaison.....	A
Figure A.5 : la trace ouverture tournant de l'axe r suivant un seul axe.....	A
Figure A.6 : une section mutuelle de la conduite cylindro-parabolique.....	A

Liste des tableaux

Tableau 1 : Disponibilité annuelle en eau par habitant en Algérie.....	4
Tableau 2 : Répartition des eaux de surface en Algérie.....	5
Tableau 1.1 : Quelques usines de procédé thermique couplées avec les capteurs solaire....	21
Tableau 1.2 : Comparaison entre les différents procédés de dessalement de l'eau de mer.....	24
Tableau 2.1 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.....	32
Tableau 2.2 : Caractéristiques du concentrateur PTC-1800.....	32
Tableau 2.3 : les valeurs empiriques de cylindro-paraboliqueTPC1800	37
Tableau 3.1 : Caractéristiques de station étudiée.....	57
Tableaux 3.2 : affichage des résultats de simulation.....	57
Tableau3.3 : Caractéristiques de la station proposée.....	68





INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1 Introduction :

De nos jours, la recherche dans le dessalement de l'eau est capitale du fait du manque croissant d'eau dans les pays où les ressources hydriques sont très faibles par rapport à la demande de la population et de l'agriculture. En effet, bien que la Terre soit recouverte de 72% d'eau on trouve seulement 3% d'eau douce. Cette eau est inégalement répartie sur la planète : 10 pays se partagent 60% des réserves d'eau douce alors que 29 pays subissent de nombreuses sécheresses.[1]

2 Généralités sur le dessalement :

Le dessalement de l'eau est un moyen d'obtenir de l'eau potable qui est de plus en plus utilisée à l'échelle planétaire. C'est un processus qui consiste à extraire le sel d'une eau salée ou d'une eau saumâtre pour la rendre potable ou utilisable pour l'industrie ou l'irrigation.

2.1 Histoire du dessalement :

Le dessalement comme un phénomène naturel est arrivé sur la terre pendant des millions d'années. Le cycle de distillation naturel d'eau s'évaporant de la mer et se condensant ensuite pour former l'eau de pluie pure est probablement l'exemple le plus évident de ce phénomène. L'autre phénomène de dessalement qui arrive dans la nature est la congélation d'eau de mer près de la région polaire. Les cristaux de glace formés sont l'eau pure, le sel étant exclu de la participation dans la croissance de cristal. Le dessalement a été pratiqué en forme de distillation pendant plus de 2000 ans et ce n'est qu'au dix-huitième siècle de notre ère, que les gens ont découvert que le processus de distillation pouvait être amélioré et augmenté en rafraîchissant la surface de condensation. Jaber Ibn Hayyan (721-815), un scientifique arabe, a écrit un traité majeur sur la distillation qui a contenu la première référence à la condensation à refroidissement par eau. Depuis, la nécessité a poussé les scientifiques et les ingénieurs à utiliser la technologie de dessalement d'efficacité variante pour produire l'eau pure à partir de l'eau saline. Avec le développement et une meilleure compréhension des propriétés des gaz, le dessalement a commencé à jouer un rôle important au début des années 1950.

La première usine de dessalement d'eau de mer terrestre commerciale a été installée par les Ottomans dans Jeddah en Arabie Saoudite. Cette unité de distillation brute était une chaudière marchant sous une pression atmosphérique. Toutefois, cette unité a subi d'importants dépôts de tartre et a connu des problèmes de corrosion sévères. Elle fait partie maintenant d'un monument historique à Jeddah

INTRODUCTION GENERALE

Corniche. Avec l'amélioration de la technologie de tube immergé, les premiers évaporateurs avec une capacité totale de plus de 45,000 m^3/j ont été construits dans le Koweït Curaçao au début des années 1950. Mais ce n'est qu'avec l'apparition de la méthode de distillation par flash à plusieurs étages, développée par le Professeur Robert Silver en 1950, que le dessalement est devenu une solution pratique pour le manque d'eau potable. Le tournant historique dans le domaine de dessalement est l'introduction du dessalement par flash à plusieurs étages (MSF) au Koweït en 1957 où le Département d'Électricité et d'Eau a passé une commande avec Westinghouse pour quatre unités de 0.5-million-gallon par jour (MGD). Chaque unité d'évaporateur est composée de quatre étages, conçue par Rowland Colte. Leur succès a encouragé l'autorité dans le Koweït à aller pour des unités de dessalement plus grandes et plus efficaces et accepter une offre de 'G and J Weir' pour fournir un nouveau concept de dessalement connu comme "multi stage flash MSF". L'innovateur du système de flash à plusieurs étages était le Professeur Robert Silver. Bien qu'il ait tenu des brevets sur le processus tant en Europe que les USA, il n'a jamais reçu aucune récompense financière pour son travail. Avec ce succès, des entreprises dans le monde entier, particulièrement aux USA et le Royaume-Uni, ont entrepris des recherches pour le développement de grandes unités d'évaporateurs types flash dans le but d'arriver à un coût de production plus faible. L'installation d'évaporateurs semblables fabriqués par d'autres entrepreneurs a permis au multi stages flash de connaître un grand succès. Par la suite, Sasakura a installé les premières unités MSF de 5 millions de gallons par jour à Shuwaikh dans le Koweït. Des unités semblables ont été alors installées à Shuiabah dans le nouveau Koweït. Le succès de ces grandes unités, prouvant que le processus de MSF pourrait produire de l'eau économiquement et avec la plus grande fiabilité que les systèmes précédents, a préparé le terrain pour les grandes avancés dans la capacité de dessalement qui étaient suivies dans les années 1970 – 1980. (Temperly, 1995) [2].

3 Dessalement des eaux marines en Algérie :

3.1 Approvisionnement en eau potable en Algérie :

L'Algérie fait partie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, et se situe donc en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la

INTRODUCTION GENERALE

banque mondiale, soit 1000 m^3 par habitant et par année (seuil de tension ou water stress). Si en 1962, la disponibilité annuelle en eau par habitant était de 1500 m^3 elle n'était plus que 720 m^3 en 1990, 680 m^3 en 1995 et de 630 m^3 en 1998. Du fait de la pression démographique, cette disponibilité ne sera plus que de 430 m^3 par habitant en 2020 [3]. A cet horizon, cette disponibilité serait par bassin hydrographique comme suit :

Bassin hydrographique	Ressources (hm^3)	Population (10^6 habitants)	Disponibilité (m^3 /habitant)
Oranie-Chott Chergui	1400	6.3	220
Chélif	2072	7.0	300
Algérois-Soumma-Hodna	5125	15.8	320
Const.-Medj.-Mellègue	5048	10.0	500
Sud	5436	4.9	1120
Total Algérie	19081	44.0	2460

Tableau 1 : Disponibilité annuelle en eau par habitant en Algérie [3].

3.2 Problème d'eau en Algérie :

Il est dû à plusieurs facteurs, essentiellement :

3.2.1 La Faiblesse des ressources en eau :

- **Ressources en eau superficielle**

Les ressources en eau sont généralement faibles et surtout extrêmement irrégulières. Leur exploitation devient de plus en plus difficile dans notre pays. Leur répartition sur le territoire est inégale ; elles sont également exposées à des risques de pollution de plus en plus importants et qui compromettent l'utilisation de ces eaux dans de nombreuses régions du pays. Les écoulements de surface avaient été estimés pendant la période coloniale à 15 milliards de m^3 pour les bassins tributaires de la Méditerranée (123000 Km^2), c'est-à-dire sans tenir compte des bassins qui dépendent des chotts. Dans les dernières études menées dans le cadre du Plan National de l'eau par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et de la Direction des Grands Aménagements Hydrauliques (DGAIH) et qui intègrent des années de sécheresse, les ressources en eau de surface sont évaluées à 12.4 milliards de m^3 répartis par bassin hydrographique selon le tableau 2 :

INTRODUCTION GENERALE

Tableau 2 : Répartition des eaux de surface en Algérie (ANRH, 2005).

Bassin hydrographique	Oranie Chott Chergui	Chelif Zahrez	Algérois Soummam Hodna	Constantinois Seybouse Mellègue	Sud	Total
Ressources pot. (hm ³ /an)	1025	1840	4380	4500	600	12,34
Pourcentage (%)	8,7	15,7	37,3	38,3	0,48	100

- **Ressources en eau souterraine**

Les eaux souterraines sont généralement faibles et localisées dans le Sahara. Les lits d'oueds alimentent quelques nappes phréatiques souvent saumâtres. Au Nord, les précipitations sont irrégulières et mal distribuées géographiquement, elles augmentent d'Ouest en Est [3]. La mobilisation des eaux souterraines au nord du pays a atteint son seuil maximal. L'augmentation des débits de pompage de ces eaux aura pour effets la surexploitation des nappes superficielles et la détérioration de la qualité des eaux. Cette situation pénalisera de ce fait tous les secteurs (population, industrie et agriculture).

3.2.2. La dégradation continue des ressources :

La dégradation des ressources en eau commence à atteindre des proportions inquiétantes dans la région tellienne où se trouve la plus grande partie des potentialités en eau de surface. Ceci est due à la pollution de certains barrages, tant par les eaux usées domestiques que par des rejets industriels [3].

3.2.3. Les périodes de sécheresse :

L'Algérie connaît depuis plus d'une vingtaine d'années, une sécheresse sévère et Persistante. L'année 1988/89 est à classer en tant qu'année sèche. Le déficit pluviométrique est bien remarque a l'Ouest (notamment a Oran, Ghazaouet et Arzew). Les barrages de Beni- Bahdel et de Mafrouch se sont asséchés. Durant le mois de juin 1988, les régions du Centre et de l'Ouest ont vu un déficit pluviométrique supérieur a 50%, a l'Est, il était de 30% durant ces deux dernières décennies. De manière générale, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis le début des années 80 [3].

3.2.4. La Croissance démographique :

L'Algérie comptait environ 34.8 millions d'habitants en 2008, dont 41% établis dans le milieu rural. La densité moyenne est de 15 habitants/Km², mais la population est fortement concentrée dans la zone côtière composée de terres agricoles plus fertiles et riches en ressources naturelles, ainsi que dans les principales villes et pôles

INTRODUCTION GENERALE

d'activités économiques du pays ($215 \text{ habitants}/\text{Km}^2$), contre $38 \text{ habitants}/\text{Km}^2$ dans la région des hauts plateaux et $7 \text{ habitants}/\text{Km}^2$ dans le sud [3].

4 Objectifs de ce travail :

Le présent travail a pour objet l'étude d'un système de dessalement MSF couplé à un concentrateur cylindro-parabolique. Cette étude consiste à la modélisation de la chaîne de transformation de l'eau de mer en eau douce en utilisant un système de dessalement basé sur le principe « multi-stage flash »

Ce mémoire comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique en présentant quelques travaux de recherche menés auparavant sur le MSF, et ce après le passage en revue des différents procédés de dessalement.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation du procédé étudié. Un modèle mathématique est présenté. Il est constitué de trois sous-modèles principaux ; un pour l'estimation de l'éclairement solaire, un autre pour les performances d'un concentrateur cylindro-parabolique et le dernier pour le système MSF-OT.
- Les différents résultats de cette étude seront présentés en détail dans le troisième chapitre.
- Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE 1 GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre nous allons présenter en quoi consiste le dessalement de l'eau de mer et les moyens utilisés pour extraire l'eau potable.

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Définition :

Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou plus rarement dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale

1.2 Classification des différents procédés de dessalement :

Les méthodes de dessalement peuvent être classées en fonction des procédés utilisés :

Les procédés faisant intervenir un changement de phase (distillation et congélation).

Les procédés utilisant des membranes (électrodialyse et osmose inverse).

Les procédés agissant sur les liaisons chimiques (échange d'ions et extraction par solvant sélectif). Ces procédés peuvent être classés plus précisément, soit :

1.2.1 Selon le principe sur lequel ils se basent :

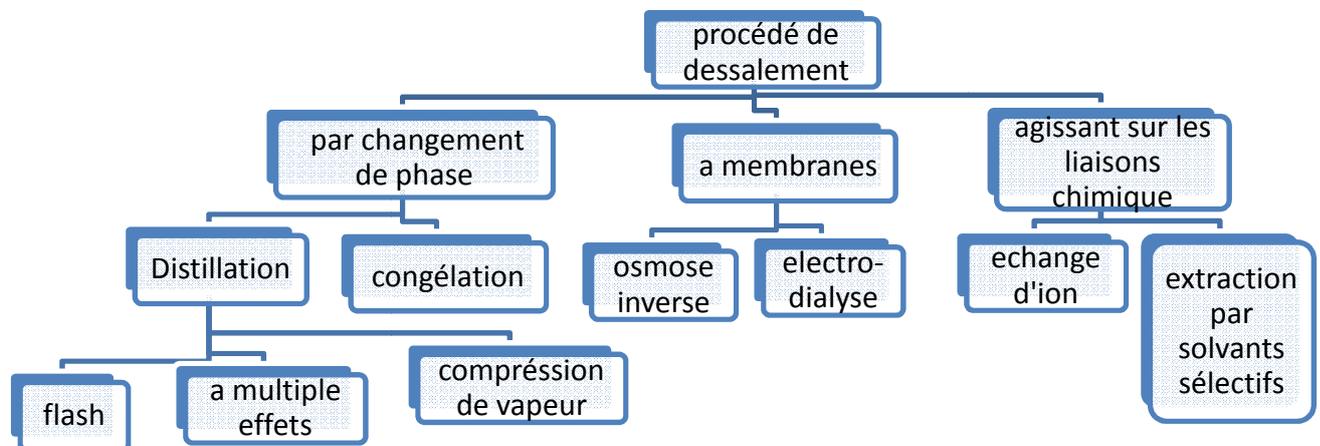


Figure 1.1 : Procédés de dessalement selon différents principes.

1.2.2 Selon le type d'énergie consommée :

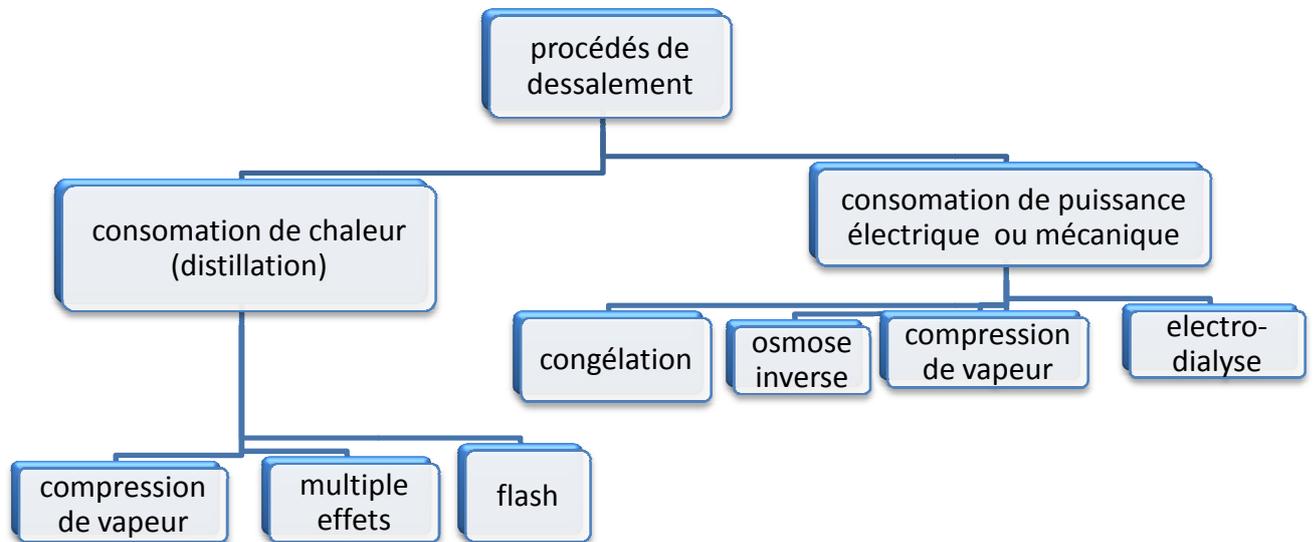


Figure 1.2 : Procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée.

1.3 Principales technologies de dessalement des eaux :

Selon les principes appliqués, les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation (la plus classique, consiste – en simplifiant – à chauffer l'eau, récupérer la vapeur qui a perdu son sel, et la retransformer en eau, qui est alors douce).
- Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse (cette solution est plus technique et consiste à séparer l'eau et le sel, en utilisant des membranes filtrantes).

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

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

énergétique du dessalement varie du simple au double selon le procédé utilisé, il reste trop élevé dans tous les cas. L'évaporation par distillation consomme jusqu'à deux fois plus d'énergie que la plus moderne, la séparation par membrane ou osmose inverse [4]. Les procédés de distillation représentent toujours 90 % de la production d'eau dessalée dans la région du Golfe. Dans le reste du monde, où l'on est en général beaucoup plus sensible au coût de l'énergie, c'est la technologie de l'osmose inverse qui l'emporte. Ainsi, sur le pourtour méditerranéen, 76 % de la production totale (4,2 millions de mètres cubes par jour) est assurée par des installations d'osmose inverse. C'est le cas de l'Espagne, l'Algérie ainsi que certaines grandes îles [5].

1.3.1 Procédés membranaires :

1.3.1.1. Osmose inverse :

Pourquoi l'osmose inversée ? L'eau contient des minéraux inorganiques et des substances pouvant modifier le goût et l'odeur de l'eau. L'eau a comme fonction primaire d'hydrater et non de nous fournir des minéraux.

L'osmose inverse est un système de purification de l'eau contenant des matières en solution par un système de filtrage très fin qui ne laisse passer que les molécules d'eau. L'osmose inverse est donc un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 7-10mm de taille. On peut aussi définir l'osmose inverse comme suit :

Pour dessaler l'eau de mer, on doit créer un flux à travers une membrane, qui entrainerait l'eau du côté salé vers le côté non salé. Pour atteindre ceci, on doit appliquer une pression au-dessus de la colonne d'eau salée, pour contre-balancer la pression osmotique naturelle et pour pousser l'eau à travers la membrane. La pression appliquée doit donc être supérieure à la pression osmotique. Pour le dessalement d'eau de mer, la pression doit être d'environ 54-80 bars [6].

➤ Principe de l'osmose inverse :

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

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Figure 1.3. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse [6].

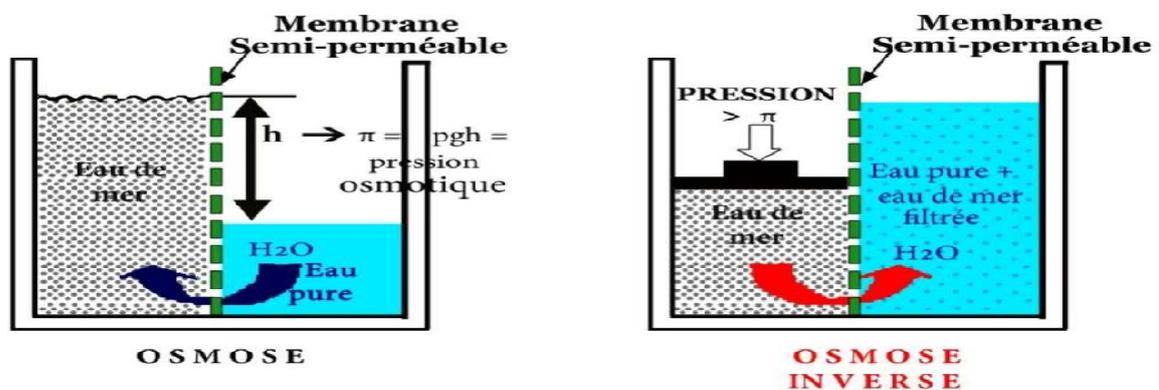


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement de l'osmose inverse [6].

1.3.1.2. Electrodialyse :

L'électrodialyse est une technique séparative dans laquelle des espèces ionisées minérales ou organiques dissoutes, telles que sels, acides ou bases, sont transportées à travers des membranes ioniques et sous l'action d'un champ électrique. Lorsqu'une solution ionisée est envoyée dans les compartiments séparant ces membranes, les cations migrent vers la cathode (-) et les anions vers l'anode (+), en traversant respectivement les membranes cationique (C) et anionique (A) (Figure 1.4). Grâce à une disposition alternée des membranes, les ions capables de traverser les membranes cationiques sont arrêtés par les membranes anioniques, et réciproquement, il en résulte une augmentation de la concentration dans les compartiments de même parité (concentrât) et une diminution dans les compartiments adjacents (diluât) [6]. Pour chaque faraday (96 490 coulombs)

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

traversant l'appareil, il est séparé $N/2$ équivalent-gramme de sel. N étant le nombre total de compartiments autres que ceux qui contiennent les électrodes [7].

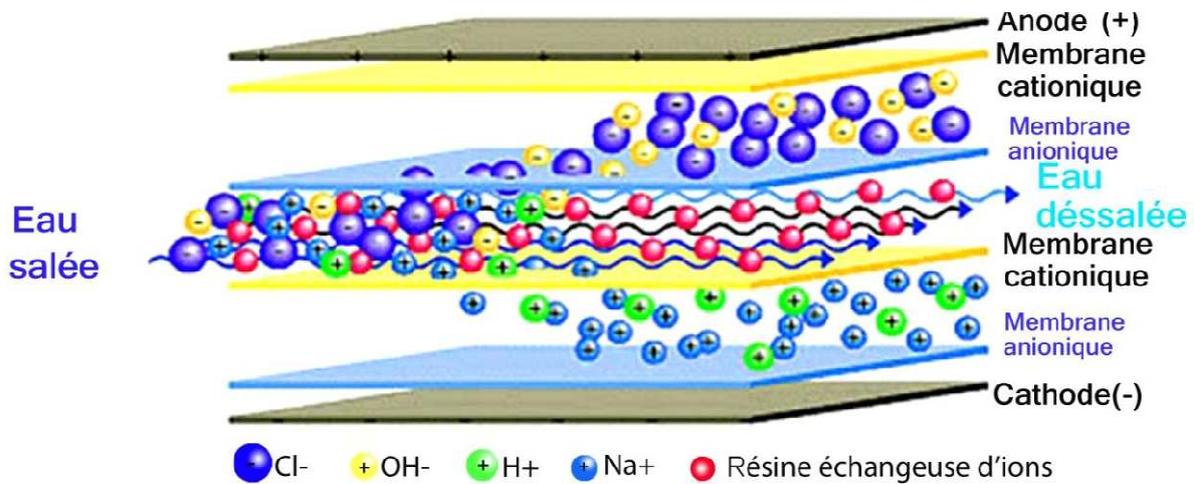


Figure 1.4 : Principe de l'électrodialyse [8]

En effet, l'électrodialyse peut être utilisée dans divers utilisations de dessalement des eaux. Cependant, dans le cas du dessalement profond, le problème d'entartrage est dominant [9].

Il est relié à la précipitation des sédiments de CaCO_3 , de CaCO_4 et de Mg(OH)_2 sur la surface des membranes.

1.3.2 Procédés de distillation :

Dans les procédés de distillation, l'eau de mer est chauffée dans le but de vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet, l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux. L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet, pour transformer un kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kJ (si le changement d'état se fait à 100°C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point. Il existe plusieurs procédés : la distillation à simple effet est la méthode la plus simple. D'autres procédés se partagent le marché du dessalement thermique ; le procédé de

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

distillation à détentes étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED), la distillation par compression de vapeur (MVC) et la distillation membranaire (MD) [10].

1.3.2.1. Distillation à simple effet :

Son principe est simple et reproduit le cycle naturel de l'eau.

- 1) Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer.
- 2) La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide.
- 3) Un groupe électropompe soutire l'eau condensée et un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure figure 1.5.

Cette première solution est simple à mettre en œuvre mais n'offre qu'un rendement réduit, aussi elle n'est utilisée que dans les navires disposant d'une source d'énergie thermique [5].

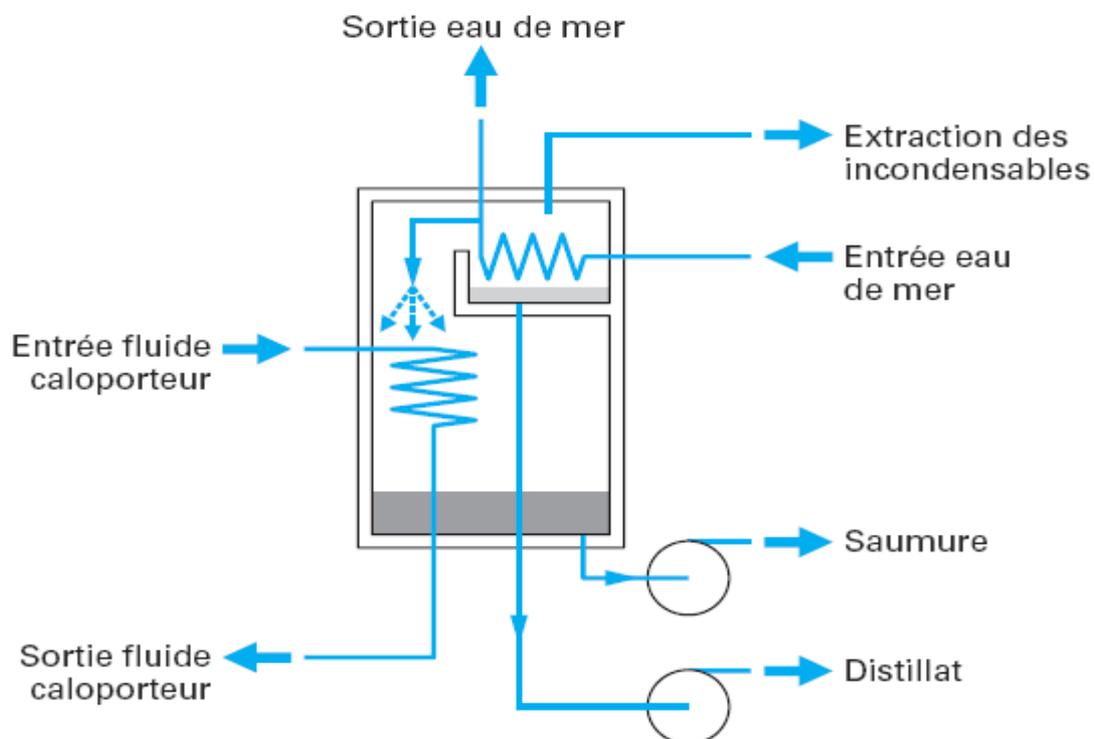


Figure 1.5 : Distillateur à simple effet [11].

1.3.2.2. Procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED) :

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'évaporateur MED est constitué de plusieurs cellules simples consécutives, dans lesquelles on diminue la pression (et la température) du premier (chaud) au dernier (froid). Chaque cellule (aussi appelée effet) contient un faisceau de tubes. Le sommet du faisceau est arrosé avec l'eau de mer qui coule autour des tubes par gravité. La chaleur cédée lors de la condensation réchauffe l'eau de mer à l'extérieur des tubes qui s'évapore en partie. Après l'évaporation, l'eau de mer se concentre en donnant de la saumure au fond de la cellule. La vapeur créée par l'évaporation de l'eau de mer est utilisée comme moyen de chauffage pour l'effet suivant où le processus se répète.

Dans la dernière cellule, la vapeur produite se condense dans un échangeur thermique. Cet échangeur, est rafraîchi par l'eau de mer .figure 1.6. À la sortie du condenseur final, la partie de l'eau de mer réchauffée est utilisée pour alimenter l'unité, l'autre partie est rejetée à la mer. La saumure et le distilla sont collectés dans chaque cellule d'où ils sont extraits par des pompes centrifuges. Cette solution apporte une amélioration du rendement par rapport à la première [5].

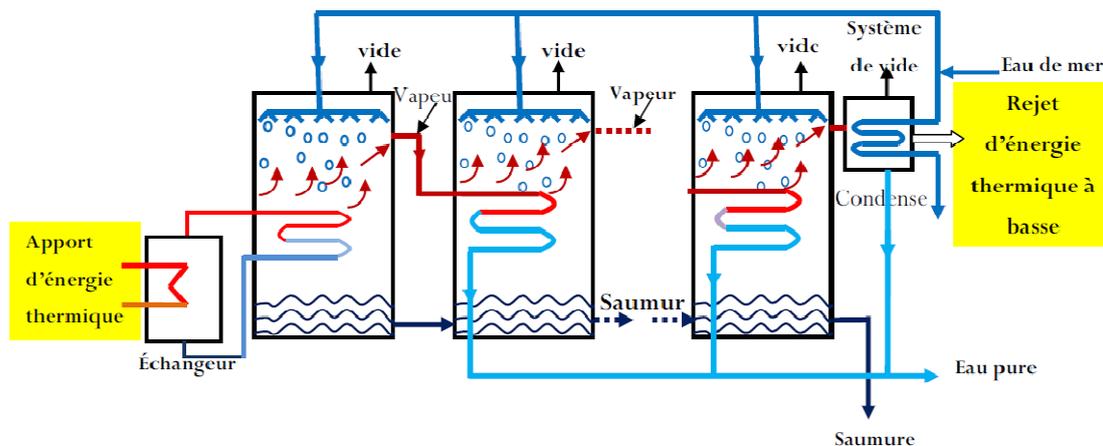


Figure 1.6 : Schéma de Principe d'un système d'évaporateurs multiples effets [12]

1.3.2.3. Procédé de 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 (MVC). Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiple effet. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur .figure 1.7. Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire) pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où

règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et se transforme en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer.[5]

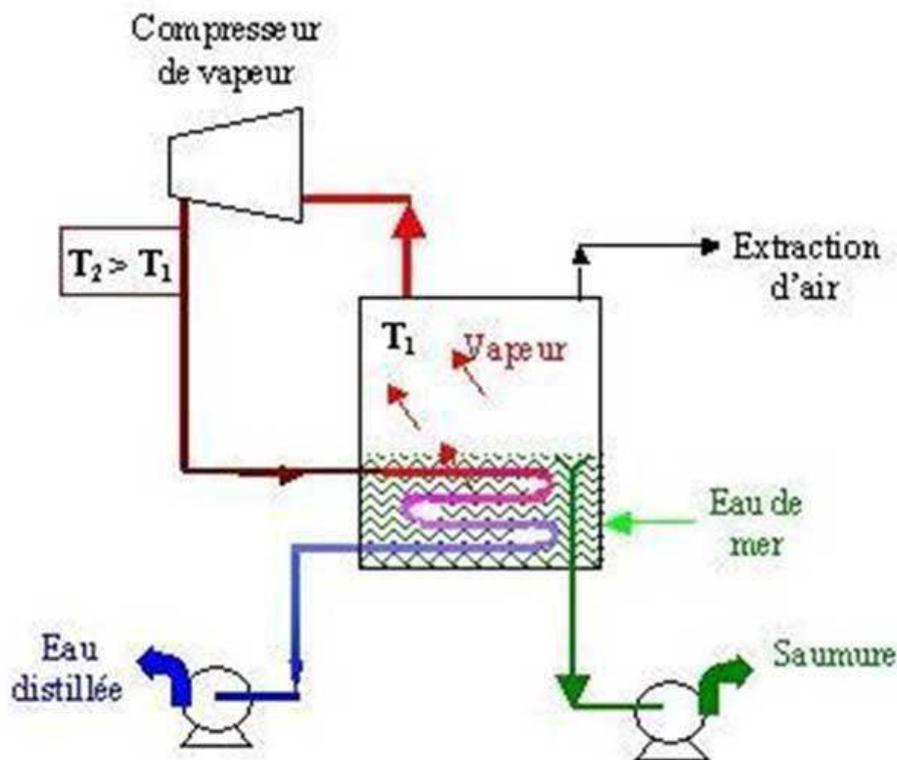


Figure 1.7 : Principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur[13].

1.3.2.4. Procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) :

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage, lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C , elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash.

Une fraction de l'eau s'évapore .voir figure 1.8. Puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré.

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible.

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

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau.

Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de Flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un demister constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flash » et ceci limite les risques d'entartrage (formation d'un dépôt solide).

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière qui peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour [5].

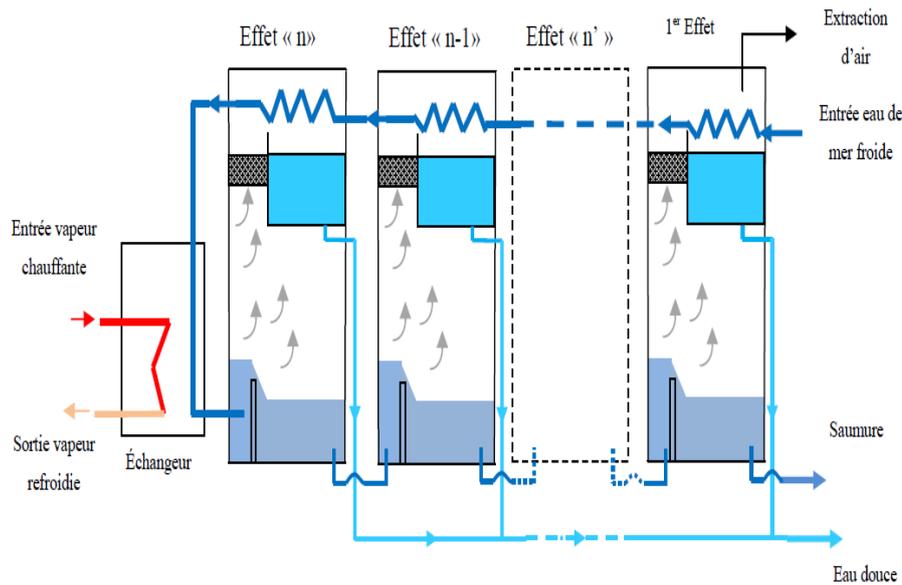


Figure 1.8: Distillateur par détentes successives (MSF)[10]

➤ **Description de la chambre de flashage :**

Pour une unité MSF conventionnelle avec une capacité de 27000 à 32000 m^3/j , les principaux composants de la chambre de flashage Figure 1.9 sont les suivants :

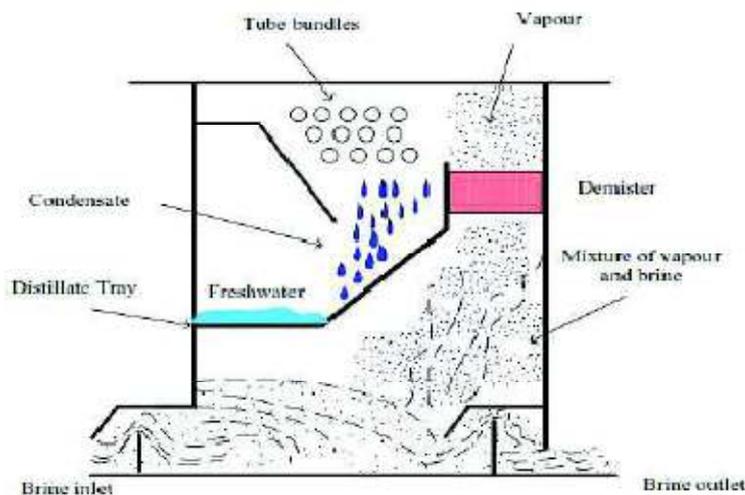


Figure 1.9 : Chambre typique de flashage.

- Un grand bassin de saumure avec même largeur et longueur et une profondeur variant entre 0.2 et 0.5 m.
- Un faisceau tubulaire
- Un dispositif antibuée (débrumiseur, demister) pour bloquer les gouttelettes de saumure.
- Un plateau pour rassembler l'eau de distillat.

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- Des orifices de saumure d'admission/sortie et une boîte de déversoir pour contrôler le niveau de saumure.

Chaque partie de la chambre de flashage a une fonction spécifique qui contribue à l'opération et la haute performance du processus de flashage [14].

✓ **Le faisceau tubulaire de condensateur**

Le faisceau tubulaire de condensateur permet de condenser la vapeur dans la chambre. L'eau recyclée s'écoulant à l'intérieure étant à une température inférieure de celle de la vapeur, va provoquer la condensation de cette dernière sur la surface extérieure des tubes pour produire le distillat.

✓ **L'antibuée**

La fonction d'antibuée est d'enlever ou réduire les gouttelettes de saumure entraînées par la vapeur flashée. Cet élément est essentiel pour empêcher l'augmentation de la salinité d'eau produite.

✓ **Le plateau de distillat**

Le plateau de distillat est là où le produit de distillat condensé est rassemblé et accumulé dans chaque étage. Le produit de distillat est retiré du plateau du dernier étage.

✓ **L'orifice de saumure**

L'orifice de saumure contrôle le débit de saumure à travers les étages. Ceci à son tour ce dispositif de transfert de saumure entre les étages est conçu pour améliorer la turbulence et le mélange du courant de saumure d'admission.

❖ **Les Avantages :**

Technologie maîtrisée avec des centaines d'installations en fonctionnement dans le monde entier depuis plusieurs années et couronnées de succès.

Le procédé MSF dispose de la plus grande capacité installée parmi tous les processus de dessalement grâce à l'évolutivité, à la fiabilité et à la robustesse du procédé.

Nécessite un prétraitement minimal par rapport aux procédés OI.

De nombreux fabricants réputés tels que Doosan, Fisia, Aqua Tech, Hitachi Zosen, etc. peuvent fournir l'installation.

1.3.3 Procédés hybrides :

Le concept de dessalement par voie hybride combine deux ou trois procédés pour fournir une meilleure solution technico-économique. Les trois éléments qui sont intégrés sont :

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- Une unité de distillation en général « multi-flash » (MSF)
- Une unité d'osmose inverse OI
- Une centrale thermique

Il est donc possible de satisfaire, à moindre coût, les demandes en eau et en électricité. En effet, contrairement à l'électricité, l'eau peut être stockée pendant les périodes de faible demande électrique où toute ou une partie de l'excès de production d'électricité est utilisée pour le dessalement par osmose inverse (figure 1.10). La production peut varier rapidement, cela permet d'ajuster la production aux besoins. Un autre avantage important est la régulation de la température de l'alimentation des osmoseurs par utilisation de l'eau de réfrigération de la distillation. Opérant à haute température (jusqu'à 40 °C), cela permet de réduire le nombre d'osmoseurs.

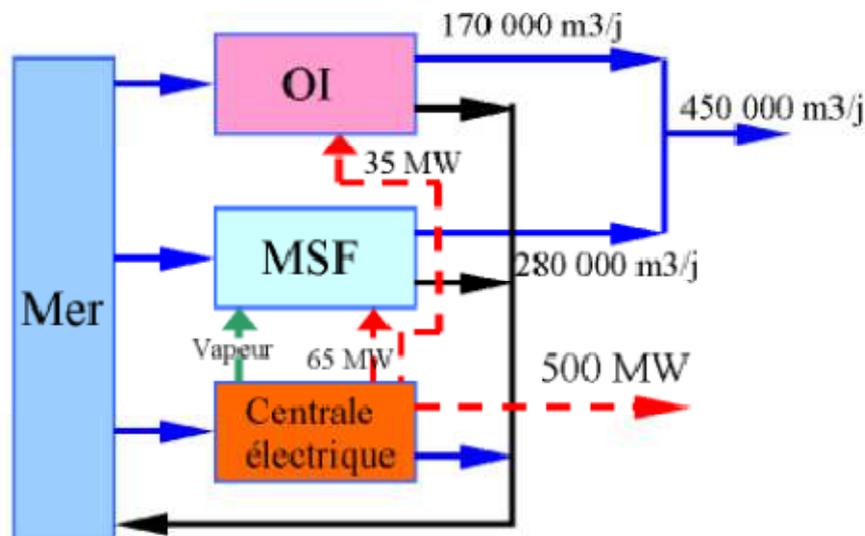


Figure 1.10 : Installation hybride [4]

1.3.4 La distillation solaire directe à effet de serre :

Le distillateur solaire a été utilisé dès 1872 dans les mines de nitrates du nord du Chili. Il permettait de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer, son fonctionnement repose sur l'effet de serre. Il s'agit généralement d'une enceinte fermée, composée d'un bac de surface noire contenant une lame d'eau et d'une couverture vitrée qui sert à obtenir l'effet de serre nécessaire au processus de l'évaporation/condensation figure 1.11. Le rayonnement solaire chauffe la surface noire au fond du bassin. Le rayonnement infrarouge, ne pouvant s'échapper, va échauffer l'eau celle-ci s'évapore et se condense sur la vitre (gouttes

d'eau). Le sel reste sur la surface noire. Les gouttes d'eau pures ruissellent ensuite dans les goulottes. Son grand inconvénient réside dans son faible rendement.[3]

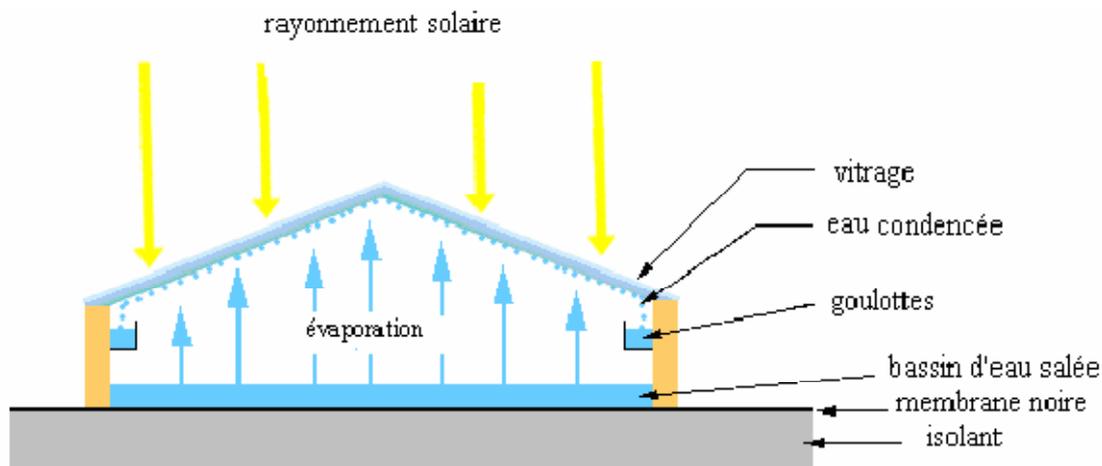


Figure 1.11 : Distillateur solaire à effet de serre [10]

1.3.5 Couplage distillation / solaire thermique :

Les procédés de dessalement thermique MSF et MED couplés avec des capteurs solaires comme une forme indirecte de l'énergie solaire pour produire l'énergie thermique nécessaire pour conduire le processus de dessalement [15]. Les capteurs solaires doivent d'une part chauffer le fluide caloporteur à des températures moyennes de telle sorte que l'eau amenée à l'évaporateur atteigne des températures entre 70 et 120 C° et d'autre part, actionner des turbines à vapeur (par le biais de la chaleur produite) pour produire l'électricité nécessaire pour le pompage [16]. Une étude théorique menée par Sagie et *al.* [13] d'une unité MED couplée à un capteur solaire tubes sous vide montre que cette combinaison donne une amélioration spectaculaire du taux de production de l'eau avec une légère augmentation du coût de l'installation de dessalement. Un des types de capteurs solaires couplés avec MSF est le bassin solaire [18], (cas de l'usine de dessalement à Margarita de Savoya, en Italie, avec une capacité de 50 à 60 m³/jour [19], ou à El Paso, au Texas, avec une capacité de 19 m³/jour [20]). Le collecteur cylindro-parabolique est également utilisé dans une usine de dessalement MSF au Koweït pour un taux de production de 100 m³/jour [21]. Il existe aussi des centrales MED couplées avec des bassins solaires comme l'usine de dessalement proche de la mer morte, avec une capacité de 3000 m³/jour [21] et l'unité hybride de l'université de Ancona en Italie avec une capacité de 30 m³/jour (tableau 1.1) [22].

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1 : Quelques usines de procédé thermique couplées avec les capteurs solaires [23]

lieu	Procédé de dessalement	Capacité (m ³ /j)	Capteur solaire
Île de La désiré, Caraïbes françaises	MED- 14 effets	40	tube sous vide
Abu Dhabi, U.A.E.	MED- 18 effets	120	tube sous vide
Koweït	MSF autorégulé	100	Cylindro-parabolique
La Paz, Méjico	MSF-10 stages	10	Capteur plan + Cylindro-parabolique
Golfe Arabe	MED	6000	Cylindro-parabolique
Al-Ain, U.A.E	MED- 55 stages MSF- 75 stages	500	Cylindro-parabolique
Île Takami, Japon	MED- 16 effets	16	Capteur plan
Berken, Alemania	MSF	20	-
Île Lampedusa, Italie	MSF	0.3	Basse concentration
PSA, Almeria, Espagne	MED- Pompe à chaleur	72	Cylindro-parabolique
Iles Canaries, Espagne	MSF	10	Basse concentration
Université Al Azhar, Gaza	MSF	0.2	Capteur solaire + PV (énergie d'appoint)
Safat, Koweït	MSF	10	Capteur solaire

1.3.5.1 Flash multi-étages assisté par l'énergie solaire (MSF) :

Les systèmes de flash multi-étages assistés par voie solaire (MSF) offrent la deuxième plus grande capacité de dessalement installée après l'osmose inverse (OI). Une usine de dessalement MSF intégrée au champ solaire et partiellement alimentée par l'électricité commerciale est plus économique que tout autre type de technologie de dessalement alimenté par l'énergie solaire [24]. La majeure partie de la consommation d'énergie dans les usines de MSF est due à l'énergie thermique utilisée pour distiller l'eau, alors qu'une certaine électricité est nécessaire pour le pompage. Figure 1.12 montre que la température de l'eau salée d'alimentation augmente à la température de saturation due au chauffage par l'unité de chauffage de la saumure et clignote dans le vaisseau, où la pression diminue en raison de la pompe à vide. La saumure clignotée (flashé) dans chaque étape est déchargée des étapes précédentes. La vapeur formée à chaque étape est condensée lorsque l'eau salée d'entrée est préchauffée [25]. Singh et Sharma [26] ont signalé que les unités MSF solaires sont supérieures aux unités de dessalement thermique direct utilisant l'énergie solaire. Le rapport de performance (PR) d'une unité de dessalement de

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

flash solaire à plusieurs étages était 3-10 fois plus élevé que celui d'un solaire encore. D'autre part, pour la même capacité de production, le coût de production d'eau et l'investissement en capital requis pour une installation flash multi-étages étaient inférieurs à ceux d'un solaire encore [26]. Le MSF/solaire est particulièrement utile compte tenu de certaines exigences du projet. Par exemple, le Mexique et la République fédérale d'Allemagne ont développé une usine de dessalement à 10 étages multi-étages avec une recirculation de la saumure de $10 \text{ m}^3/\text{jour}$, en 1974. L'objectif de ce projet était de démontrer la faisabilité de l'énergie solaire en tant que source d'énergie thermique requise Pour le processus MSF. Des unités de dessalement similaires ont été développées par l'Institut fédéral suisse de technologie et Atlantis Energie. Et testées au Koweït, où les résultats ont été jugés satisfaisants [27].

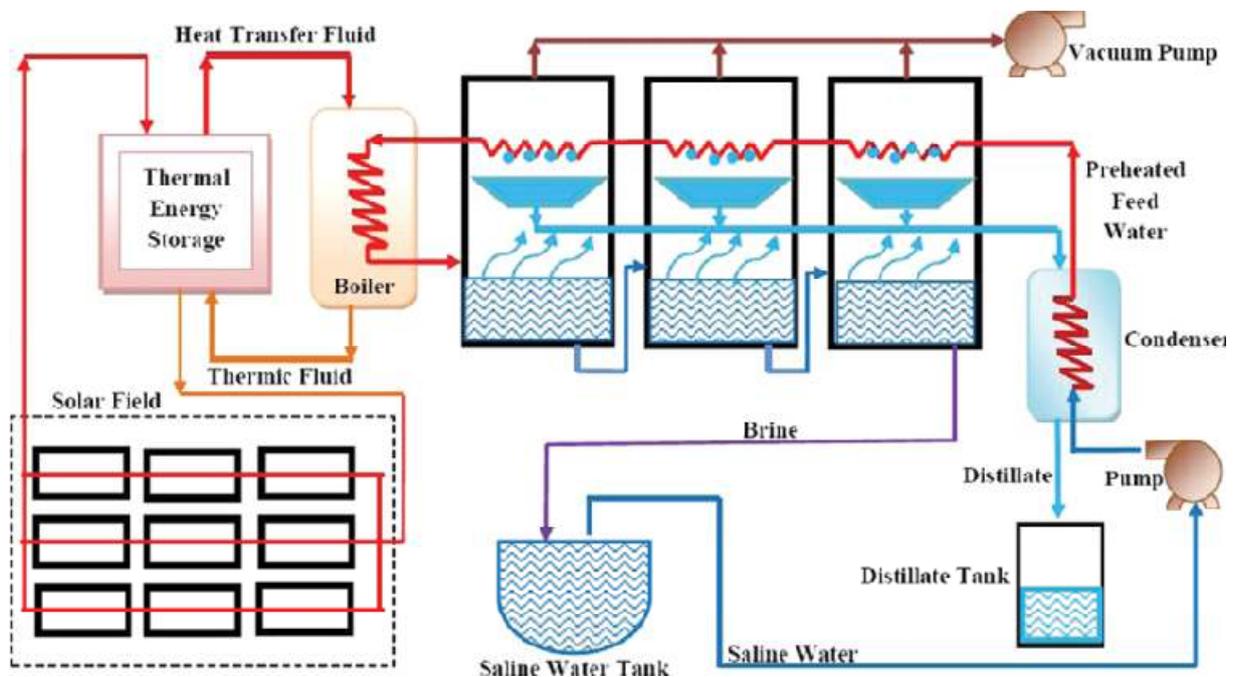


Figure 1.12. Représentation schématique d'un système de dessalement flash multi-étages à énergie solaire [28].

1.3.5.2 Flash multi-étages assisté par un collecteur solaire :

Certains chercheurs ont conclu que la concentration de l'énergie solaire (CSP) offre une alternative durable aux combustibles fossiles pour le dessalement de l'eau de mer à grande échelle [29]. Dans CSP, un champ de collecteur solaire est relié à une installation de distillation conventionnelle pour fournir une énergie thermique pour le processus de dessalement car le combustible fossile n'est pas économique ou

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

durable pour une utilisation à long terme dans des unités de dessalement à grande échelle. Les collecteurs sont généralement suivis comme stationnaires, à un seul axe, et les groupes double-axes. Les collecteurs fixes fonctionnent habituellement dans une large gamme de 30o à 240 C° avec des rapports de concentration de 1 à 5, tandis que le type à axe unique présente un taux de concentration supérieur de 5 à 50 pendant le fonctionnement de 60 à 300 C°. Les collecteurs à double axe fonctionnent à partir de 100 à 2 000 C° avec des rapports de concentration variant de 100 à 1 500 C° [30]. Comme mentionné, les collecteurs solaires fonctionnent sous une large gamme de températures, de sorte qu'ils doivent être choisis en fonction de la température de processus souhaitée. La concentration des systèmes solaires peut être à travers les types de tours de réceptacle, de plat ou central. La possibilité de conjonctions avec de grandes installations de chaleur rend les systèmes solaires de concentration supérieurs aux autres sources renouvelables.

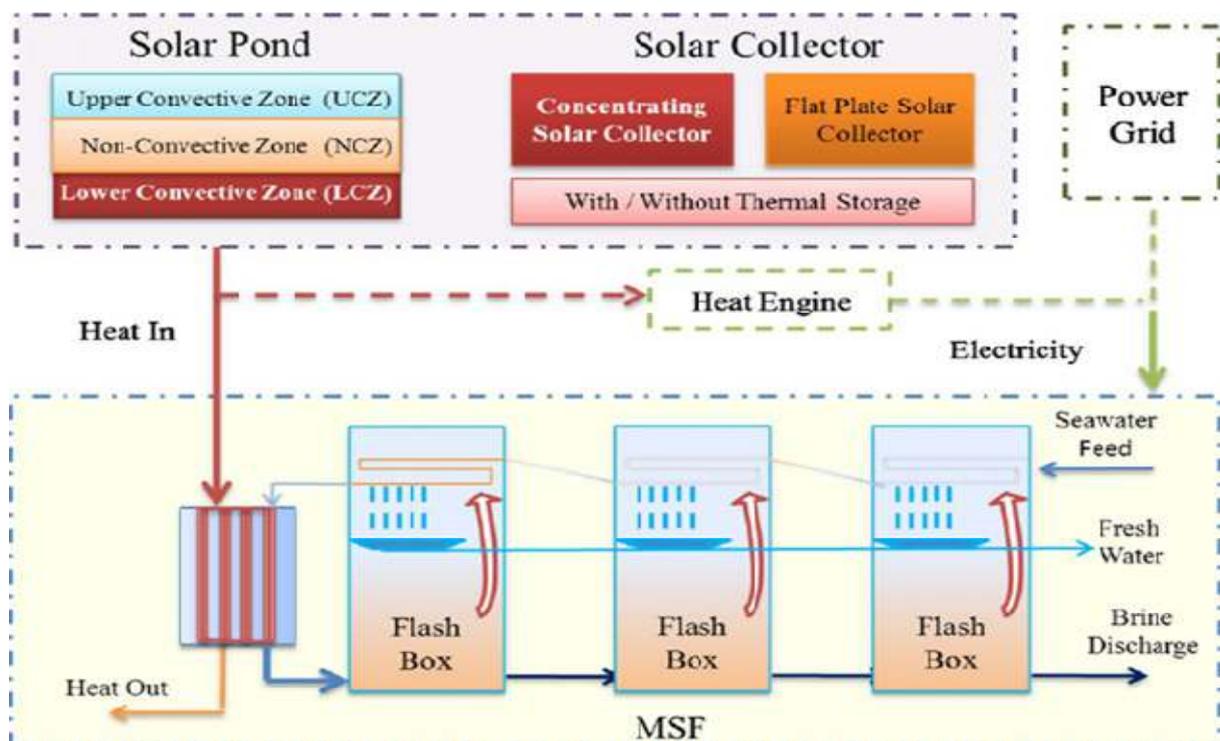


Figure1.13. Schéma d'un processus de dessalement (MSF) multi-étages flash assisté par collecteur solaire [31].

1.4 Choix d'un procédé de dessalement :

Pour le choix d'un procédé de dessalement, plusieurs critères techniques et économiques rentrent en jeu .Pour les eaux saumâtres, l'osmose inverse est le

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

procédé généralement retenu, alors que pour les eaux de mer, ce sont d'abord la nature et le coût qui orientent le choix vers une technologie plutôt que pour une autre et en tenant compte de la minéralisation de l'eau [4].

Tableau 1.2 : Comparaison entre les différents procédés de dessalement de l'eau de mer [4]

Tableau de comparaison des procédés	MSF	MED	MED-TVC	MVC	OI
Température de fonctionnement (°C)	120	70	70	70	45
Principale source d'énergie	Thermique	thermique	thermique	Mécanique(vi a électricité)	Mécanique(vi a électricité)
Consommation thermique (kWh/m ³)	12	6	21	non applicable	non applicable
Consommation électrique (kWh/m ³)	3,5	1,5	1,5	8 à14	4 à 7
Salinité de l'eau brute (g/l)	30-100	30-100	30-100	30-50	1-45
salinité de l'eau traitée (mg/l)	10	10	10	10	500
Capacité d'un train (m ³ /j)	5000-60000	500-12000	100-20000	10-2500	1-10000
Avantages	technique éprouvée	20% moins cher que le MSF	capacité, robustesse	simplicité	modularité
Inconvénients	investissement, consommation	capacité plus faible que MSF	Consommation	capacité limitée	Fragilité

.1.5 Comparaison du procédé de distillation et d'osmose inverse :

L'osmose inverse se place aujourd'hui en rivale incontournable de la distillation. Il faut reconnaître que par rapport à la distillation la technique d'osmose inverse présente des avantages :

- faible consommation d'énergie grâce en particulier à la mise en place d'un système de récupération d'énergie et à l'augmentation des taux de conversion,
- investissements de base plus faibles dus en particulier à l'augmentation des performances des membranes et à une diminution importante des coûts de ces membranes,
- gamme de capacité très vaste allant de quelques litres/jour pour des appareils de survie à plus de 120 000 m³/jour pour les installations de Médine en Arabie Saoudite. [32]

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le dessalement par distillation (MED et MSF) consomme principalement de l'énergie sous forme de chaleur, et peu d'énergie électrique est exigée pour les pompes et les auxiliaires ; par contre l'osmose inverse utilise seulement de l'énergie électrique, plus « noble ». Les procédés de distillation cependant resteront sur le marché, en particulier dans les cas suivants : eau de mer à salinité élevée (> 40 g/l) ; obtention de l'eau pure pour l'industrie ; eau brute à fort pouvoir colmatant et sites disposant d'énergie bon marché.

1.6 Les concentrateurs cylindro- parabolique

Le concentrateur cylindro-parabolique (Fig. 1.14), présente la technologie solaire la plus mature actuellement. Il se distingue par sa simplicité ainsi que ses performances élevées dans le domaine de la production de la vapeur d'eau. La détermination des performances d'un champ de concentrateur cylindro-parabolique dépend de plusieurs paramètres géométriques et optiques.

Le paramètre géométrique dominant est le facteur d'ombre qui intervient quand le concentrateur solaire se trouve dans un champ de capteurs. La puissance concentrée est alors réduite par les effets d'ombre causés par les collecteurs adjacents surtout pour une orientation Est-Ouest, mais aussi, les paramètres optiques, qui dépendent des propriétés des matériaux utilisés, de la disposition de l'absorbeur dans le plan focal et les erreurs angulaires des surfaces réfléchissantes [33].



Figure 1.14 Champ d'une centrale cylindro-parabolique [33]

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.6.1 Principe de fonctionnement:

Le capteur cylindro- parabolique s'oriente vers le soleil grâce à un dispositif concentre le rayonnement solaire au niveau de l'absorbeur. C'est le plus préféré pour la production de la vapeur d'eau à hautes températures qui peut être obtenue sans altération du rendement. Il se construit par un réflecteur (miroir ou matériau réfléchissant) de forme cylindro- parabolique. Cette géométrie permet de focaliser l'énergie solaire incidente selon une génératrice linéaire où est placé un tube absorbeur dans lequel circule un fluide caloporteur (figure 1.15). Pour augmenter le principe de captation ainsi que le processus du transfert de chaleur, on a généralement recours à des surfaces sélectives, une enveloppe transparente souvent en verre recouvre le tube absorbeur afin de réduire les pertes thermiques par rayonnement par conduction et par convection vers l'extérieur.

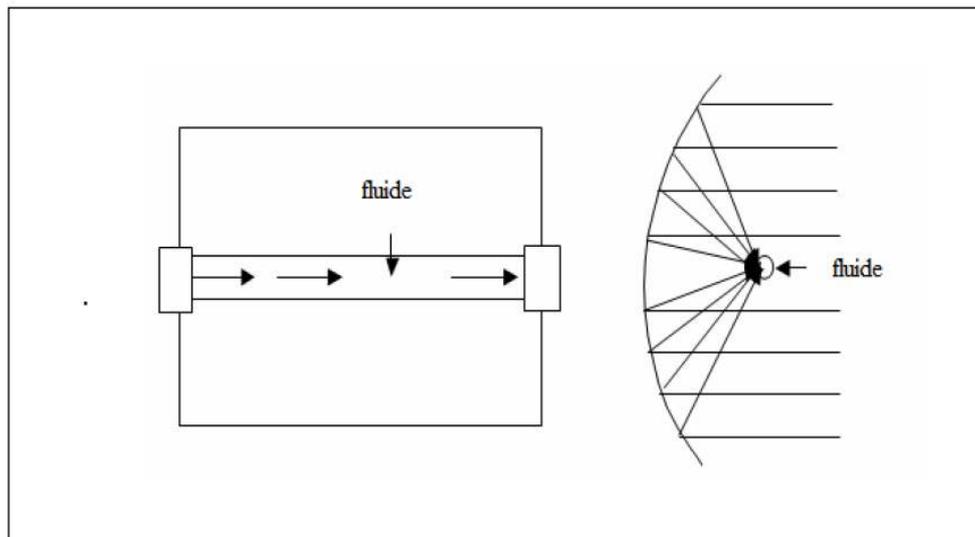


Figure 1.15 Principe de fonctionnement du concentrateur [34].

Pour un (CSP) l'équation générale géométrique, en coordonnées cartésiennes, s'écrit [35] :

$$X^2 = 4 \cdot F \cdot Y \quad (1.1)$$

Et en coordonnées polaire, s'écrit [35]:

$$r = \frac{F}{\cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (1.2)$$

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'ouverture W du concentrateur en fonction de l'angle d'ouverture (φ) est donnée par l'équation suivante [36] :

$$W = 2 \cdot r \cdot \sin(\varphi) = 4 \cdot F \cdot \tan(\varphi) \quad (1.3)$$

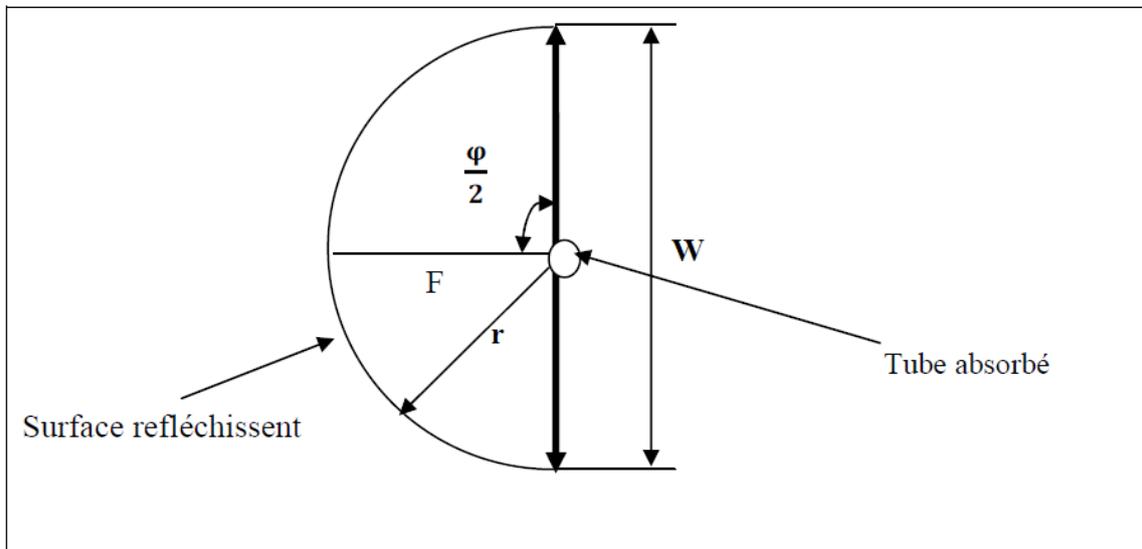


Figure 1.16 : Géométrie d'un concentrateur cylindro- parabolique [36].

1.6.2 Les composants d'un prototype du concentrateur cylindro-parabolique :

➤ L'absorbeur :

C'est la partie essentielle du concentrateur, le pouvoir d'absorber doit être maximal, C'est-à-dire c'est un tube métallique recouvert d'une couche de peinture noire, il faut que ce tube soit mince (la quantité de chaleur absorbée est traversée par le fluide caloporteur) afin d'augmenter la température de fluide. L'énergie solaire orientée vers le tube de l'absorbeur par concentration des rayons solaires cédées au fluide caloporteur (l'eau) par convection entre le tube et de l'eau.

➤ Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur a pour rôle de véhiculer l'énergie convertie sous forme de chaleur au moyen de l'absorbeur pour l'utilisation ou le stockage, le fluide caloporteur doit satisfaire aux conditions suivantes :

- Faible viscosité
- Résistance chimique vis-à-vis des matériaux de l'installation.
- Pertes de charge faibles et coefficient de transfert thermique élevé.
- Grande capacité calorifique et toxicité faible.

1.7 L'état de l'art :

1.7.1 Les principaux travaux sur le concentrateur cylindro-parabolique :

Jean-Louis BOUVIER, Ghislain MICHAUX, Patrick SALAGNAC [37] ont effectué une étude expérimentale d'un concentrateur solaire parabolique à génération directe de vapeur alimentant une centrale de micro-cogénération.

L'objectif de cette étude est la caractérisation expérimentale du concentrateur cylindro-parabolique utilisé dans le cadre du projet MICOSOL. Dans cet article, les auteurs ont présenté le prototype qui a servi à réaliser les essais. Par la suite, les résultats expérimentaux obtenus pour une journée ensoleillée ont été décrits et analysés. Enfin, une caractérisation du rendement en fonction de la différence de température réduite (T_m) a été présentée.

D. Guerraiche , A. Benderradji et H. Benmoussa [38] ont calculer les facteurs optiques et géométriques caractérisant un concentrateur cylindro-parabolique

L'objectif du travail a consisté à déterminer les performances intégrant les différents facteurs géométriques et optiques caractérisant le concentrateur solaire. Une méthode a été présentée pour le calcul de ces différents facteurs, notamment le facteur du cosinus de l'angle d'incidence et le facteur d'ombre. Un modèle de calcul du facteur d'interception a été développé. Les pertes thermiques ont été estimées analytiquement. La détermination des différents facteurs a permis de remonter aux pertes thermiques, et enfin aux performances du concentrateur

N. Nouah, N. Djennaoui et T. Hassani [39] ont proposée la Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

L'objectif du travail a consisté à déterminer la variation de la température de sortie du capteur, l'éclairement solaire et la puissance utile en fonction du temps solaire vrai dans une région choisie.

Adel A. Ghoneim , Adel M. Mohammedein, et Kandil M. Kandil [40] ont fait une analyse de performance du collecteur de voie parabolique dans un climat chaud

L'étude présente un modèle numérique développé pour étudier l'effet de différents Paramètres des collecteurs et conditions de fonctionnement sur la performance du collecteur solaire parabolique (PTSC) dans le climat du Koweït. Le modèle proposé

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

tient compte de la température Interaction entre l'enveloppe d'absorbeur et l'enveloppe pour les pertes de rayonnement thermique qui ont été négligés dans les modèles existants.

1.7.2 Les principaux travaux sur le dessalement multi-stage flash (MSF) :

Said Alforjani Said , Mansour Emtir et Iqbal M. Mujtaba [41] ont propose une Conception flexible et un fonctionnement du processus de dessalement Flash multi-étages (MSF) soumis à une énumération variable et à une demande variable en eau douce

Ce travail décrit comment les paramètres de conception et d'opération du processus de dessalement Flash Multi-Stage (MSF) sont optimisés lorsque le processus est soumis à une variation de la température de l'eau de mer, de l'encrassement et de la demande d'eau douce tout au long de la journée.

Lian-ying Wu, Sheng-nan Xiao, et Cong-jie Gao [42] ont fait une Simulation du processus de dessalement Flash multi-étages (MSF)

Dans cet article, le principe de MSF est analysé et le stade de flash unique est divisé en plusieurs opérations élémentaires. L'ASPEN PLUS est adopté pour simuler le processus de dessalement MSF. Le facteur d'effet du système MSF, tel que la température de l'eau de mer, la température supérieure de la saumure (T_0) et le numéro de l'étape

Hala Faisal Al-Fulaij [43] a proposé une Modélisation dynamique de l'installation de dessalement multi-étages (MSF)

L'étude présentée dans cette thèse est motivée par l'absence de modélisation et d'analyse détaillées de la dynamique du processus MSF et du démon. Un modèle dynamique détaillé peut être utilisé dans la conception, le contrôle, le démarrage / arrêt et le dépannage.

H. El-Dessouky, H. Ettouney, F. Al-Juwayhel , H. Al-Fulaij [44] ont effectué une analyse des chambres clignotantes de dessalement flash multi-étages

Le but de cette étude est de développer un certain nombre de corrélations de conception du stade de flash de MSF. Ces corrélations incluent le coefficient de

Chapitre 1 : GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

décharge (Cd), l'allocation de non-équilibre (NEA) et le coefficient global de transfert de chaleur (U)

1.7.3 Couplage MSF/cylindro-parabolique :

S.M.A. Moustafa.D.I. Jarrar.H.I. El-Mansy [45] ont évalué les performances d'un système autorégulant de dessalement de flash multi-étages

Un système de dessalement multi-stage flash a été conçu et testé à l'institut Koweït de recherche scientifique. Le système comprenait un champ de collecteur concentré de $220m^2$, un réservoir de stockage thermique et un sous-système de désalinisation à 10 étages à plusieurs étages autorégulant. Le champ de collecte, équipé d'un système de suivi en boucle fermée, a été installé avec des creux individuels orientés dans la direction nord-sud. Le sous-système de stockage thermique a été utile pour niveler l'alimentation en énergie thermique et permettre la production d'eau dessalée pendant des périodes de faible rayonnement et de nuit. La capacité autorégulatrice du sous-système de dessalement a permis de régler le débit et la pression, dans les différentes étapes du sous-système de dessalement, en fonction de la différence relative entre la saumure chaude et les températures d'eau de l'entrée. Cela a permis de maintenir une efficacité globale relativement élevée.

N. Nouah , K. Dahmani, N. Djennaoui et M. Brahimi [46] ont effectué une Estimation du flux de masse et de chaleur d'une installation de distillation à détente étagées (MSF) couplée à un capteur cylindro parabolique pour le dessalement d'eau de mer.

L'objectif de ce papier consiste à déterminer la quantité d'eau douce produite par une installation de dessalement utilisant les procédés Multi-Stage Flash 'MSF' et équipée d'un champ solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques 'CCP'. Les résultats montrent que le taux de production par unité de surface est de l'ordre de $11,36 l/m^2$ pour le site d'Oran et $15,65 l/m^2$ pour le site de Touggourt.

CHAPITRE 2 MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

Dans ce chapitre nous allons présenter les modèles utilisés pour le rayonnement ainsi que la modélisation du cylindro-parabolique et le model du MSF

2.1 Modèle du rayonnement :

Le rayonnement solaire hors atmosphère suit une ligne directe du soleil vers la terre. En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire ne subit aucune modification (rayonnement direct), l'autre partie est diffusée par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (rayonnement diffus). La somme du rayonnement direct et diffus est le rayonnement global. Pour les systèmes à concentration, seul le rayonnement direct normal est utilisé. Le terme normal pour le rayonnement direct signifie que le rayonnement direct incident est perpendiculaire à la surface. Seulement le rayonnement direct normal est focalisé et donc chauffe le tube de l'absorbeur.

Il est utile de noter que le rayonnement direct normal est mesuré par un pyréliomètre ou calculé par des modèles numériques. Actuellement, plusieurs bases de données sont disponibles pour l'acquisition des données climatiques tels que, METEONORM et BSRN. Egalement, Il existe une autre méthode dite satellitaire qui consiste à prendre des images par satellite à une résolution spatiale de 2,5 km x 2,5 km et temporaire de 1 heure sur les différentes régions du monde afin de les traiter et de fournir des cartes d'ensoleillement.

2.1.1 Estimation du rayonnement par ciel clair par le modèle de Perrin de Brichambaut :

Dans cette étude, on utilise la formule de Perrin de Brichambaut qui propose [Brichambaut, 1982]:

$$I_b = A \cdot \sin h \cdot \exp \left\{ - \left[C \sin \frac{(h+4\pi)}{180} \right] - 1 \right\} \quad (2.1)$$

$$I_d = B \cdot (\sin h)^{0.4} \quad (2.2)$$

Avec h : la hauteur de soleil

Le global est estimé par sommation ou directement par :

$$I_g = D \cdot (\sin h)^E \quad (2.3)$$

Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel (voir tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

Ciel	A	B	C	D	E
	W/m2	W/m2		W/m2	
Très pur	1300	87	6	1150	1.15
Moyen	1230	125	4	1080	1.22
Pollué	1200	187	2.5	990	1.25

2.2 Sous model du concentrateur cylindro-parabolique :

Le but de cette partie est de donner un modèle mathématique caractérisant les performances du concentrateur cylindro-parabolique dans des différentes conditions. Les paramètres qui seront utilisés pour évaluer la performance sont le rendement optique et la chaleur utile produite par le collecteur cylindro-parabolique. Pour ce faire, le concentrateur dit PTC-1800 a été choisi. Le PTC-1800 a été développé par l'entreprise allemande SOLITEM GmbH. Le réflecteur consiste de 0.8 mm d'épaisseur de la surface réfléchissante réalisée en feuilles d'aluminium couvertes de couche d'aluminium. Les caractéristiques du perceuteur PTC-1800 sont illustrées sur le tableau 2. 2

Tableau 2.2 : Caractéristiques du concentrateur PTC-1800

Paramètre	Valeur
Bordez l'Angle (des degrés)	60
Longueur Focale (mm)	780
Miroir	
Longueur (mm)	5090
Largeur d'ouverture (mm)	1800
Hauteur (mm)	260
Couche d'aluminium (mm)	0,5
Réfectivité solaire-pondérée	0,85
Absorbeur	
matériau	Acier inoxydable
Couche	Chrome noir
Diamètre Externe (mm)	38
Épaisseur de paroi (mm)	1,25
Absorptivité solaire	0,94
Enveloppe de Verre	
Diamètre extérieur (mm)	65
Épaisseur Murale (mm)	2,2
Transmission	0,92

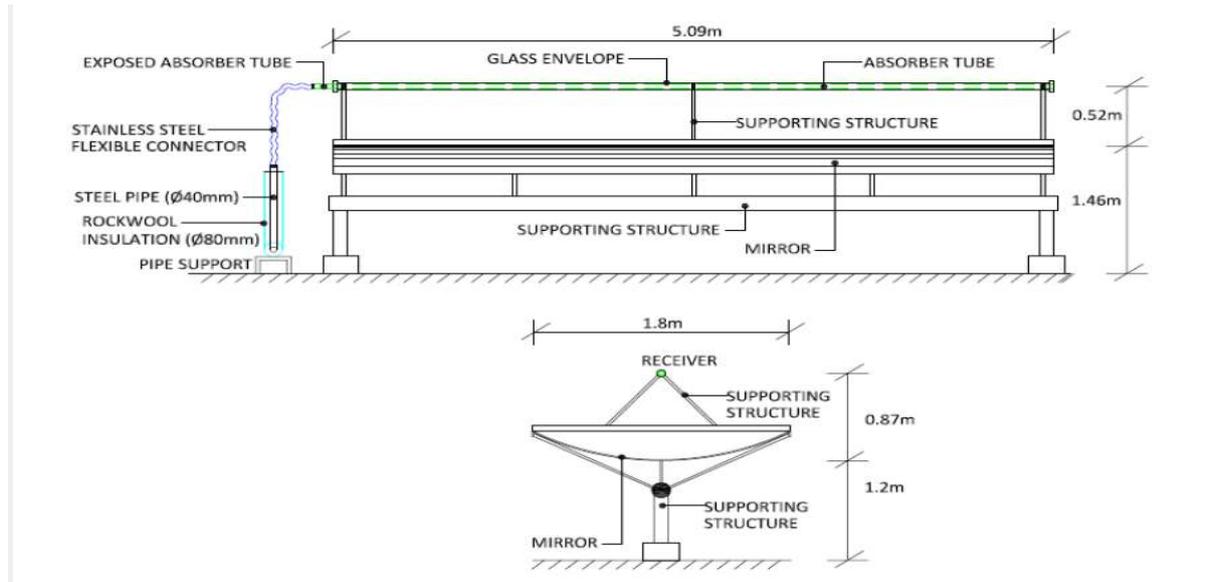


Figure 2.1 : schéma de cylindro-parabolique PTC 1800

2.2.1 Estimation des performances du concentrateur cylindro-parabolique

Comme les autres capteurs solaires, le rendement global du cylindro-parabolique η_c est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur utile Q_u [W] délivrée par le collecteur cylindro-parabolique et l'éclairement incident (G [W/m²]) sur la surface d'ouverture de perceuteur A_c [m²]

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \cdot G} \quad (2.4)$$

L'éclairement global G sur une surface horizontale comporte deux parties : l'éclairement direct G_n et l'éclairement diffus G_d .

$$G = G_n \cdot \cos(\theta_z) + G_d \quad (2.5)$$

θ_z : Angle zénithal

L'éclairement reçu par l'ouverture du concentrateur G_b est inférieur à celui reçu sur une surface horizontale. Ceci est du essentiellement à la perte par l'effet cosinus causée par l'angle d'incidence θ entre l'ouverture normale et G_n . La relation entre les deux éclairements est donnée comme suit :

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

$$G_b = G_n \cdot \cos(\theta) \quad (2.6)$$

La concentration solaire fonctionne généralement dans les conditions du ciel clair, donc la contribution de l'éclairement diffus sera négligée lors du développement du modèle et par la suite, l'éclairement global dans le dominateur est remplacé par l'éclairement reçu par l'ouverture G_b .

La production utile Q_u peut être exprimée comme suit :

$$Q_u = \dot{m} \cdot C \cdot (T_0 - T_{in}) = A_c \cdot G_b \cdot \eta_{op}(\theta) - A_{abs} \cdot U_l \cdot (T_{abs} - T_a) \quad (2.7)$$

\dot{m} : Débit massique du HTF , [kg/s]

C : Chaleur spécifique moyenne entre l'entrée et la sortie [J/kg. K]

T_0 : Température de sortie, [K]

T_{in} : Température d'entrée, [K]

T_a : Température ambiante, [K]

T_{abs} : Température moyenne de la surface de l'absorbeur [K]

A_{abs} : Surface extérieure d'absorbeur, [m²]

U_l : Coefficient de perte global de la surface d'absorbeur, [W/m².K]

$\eta_{op}(\theta)$: Rendement optique en fonction de θ

Il est utile d'exprimer Q_u en fonction de la température d'entrée du fluide T_i en raison de la difficulté de mesurer la température de la surface l'absorbeur T_{abs}

$$Q_u = A_c \cdot FR \cdot G_b \cdot \eta_{op}(\theta) - FR \frac{A_{abs}}{A_c} \cdot u_l \cdot (T_{in} - T_a) \quad (2.8)$$

Où : FR est le facteur de conductance. Plus de détail est disponible sur la référence [43].

Le rendement optique $\eta_{op}(\theta)$ est défini comme la quantité d'éclairement absorbée par le tube d'absorbeur divisé par la quantité d'éclairement direct incident sur la surface d'ouverture. Le rendement optique à la normale (quand l'éclairement direct d'incident est sur la normale) à l'ouverture ($\theta = 0^\circ$) est donné par :

$$\eta_{opn} = \rho_m \cdot (\tau\alpha_c)_e \cdot \gamma_n \quad (2.9)$$

Où

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

- ρ_m : Réflectivité moyenne du miroir à l'incidence normale
 T : Transmission de l'enveloppe de verre
 α_c : Surface de la couche absorbance de l'absorbeur
 $(\tau\alpha_c)_e$: Taux alpha effectif
 γ_n : Facteur d'interception

Le rendement optique varie avec la variation de l'angle d'incidence θ , donc la variation est quantifiée par le modificateur d'angle d'incidence $K(\theta)$.

$$\eta_{op}(\theta) = F_{RS} \cdot K(\theta) \cdot \rho_m \cdot (\tau\alpha_c) \cdot \gamma_n \quad (2.10)$$

2.2.2 Développement du modèle de performance :

Le modèle de performance est utilisé pour la caractérisation des concentrateurs paraboliques en calculant deux paramètres : le rendement et la quantité de chaleur utile produite. Les détails de ce modèle sont présentés par la référence [47].

La température moyenne (T_m) à travers le collecteur est donnée par :

$$F' = \frac{(T_0 + T_n)}{2}$$

Et le rendement est par l'équation non-linéaire suivante :

$$\eta_c = \frac{Q_u}{(A_c \cdot G_b)} = K(\theta) \cdot \eta_{op} - \frac{c_1(T_m - T_a)}{G_b} - \frac{c_2 \cdot (T_m - T_a)^2}{G_b} \quad (2.11)$$

Où les coefficients c_1 et c_2 sont déterminés expérimentalement

La Norme européenne EN 12975 "systèmes solaires thermiques et composants- le capteur solaire "inclut deux méthodes de test des performances thermiques pour la caractérisation de systèmes thermiques solaires : test stationnaire et test quasi-dynamique.

L'équation de base pour le modèle stationnaire est :

$$\eta_c = \frac{Q_u}{(A_c \cdot G_b)} = K(\theta) \cdot \eta_{op} - \frac{c_1(T_m - T_a)}{G_b} - \frac{c_2 \cdot (T_m - T_a)^2}{G_b} \quad (2.12)$$

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

Pour le test quasi-dynamique, l'effet de l'angle d'incidence sur le rendement optique doit être inclus (le modificateur d'angle d'incidence). En outre, l'équation est complétée par des termes de l'éclairement diffus [48]. Ainsi, la puissance spécifique de sortie du quasi dynamique

$$\frac{Q_u}{A_c} = G_b \cdot K(\theta) \cdot \eta_{opn} + G_d \cdot \eta_{opd} - c_1(T_m - T_a) - c_2 \cdot (T_m - T_a)^2 - c_3 \cdot \frac{dT_m}{dt} \quad (2.13)$$

Où G_d : Eclairement diffus

$\eta_{op,d}$: Rendement optique pour l'éclairement diffus

Par conséquent, les équations du modèle de performances finales pour notre système sont :

$$Q_{sf} = A_a \cdot \left(G_b \cdot F_R \cdot K(\theta) \cdot \eta_{opn} - c_1 \cdot (T_m - T_a) - c_2 \cdot (T_m - T_a)^2 - c_3 \frac{dT_m}{dt} - c_4 \cdot u \cdot (T_m - T_a) \right) \quad (2.14)$$

$$\eta_{sf} = \frac{Q_{sf}}{(A_a \cdot G_b)} = F_{RS} \cdot K(\theta) \cdot \eta_{op} - \frac{c_1(T_m - T_a)}{G_b} - \frac{c_2 \cdot (T_m - T_a)^2}{G_b} - \frac{c_3 \cdot \frac{dT_m}{dt}}{G_b} - \frac{c_4 \cdot u \cdot (T_m - T_a)}{G_b} \quad (2.15)$$

$$T_m = \frac{(T_{out} - T_{in})}{2}$$

Où η_{sf} : rendement de cylindro-parabolique.

Q_{SF} : production utile, [W]

A_a : la surface d'ouverture , [m²]

T_{in} : température d'entrée , [K]

T_{out} : température de sortie, [K]

T_m : température moyen , [K]

t: Temps, [s]

u: la vitesse de vent, [m/s]

C_1 : Coefficient de perte de chaleur (à $T_m - T_a = 0$), [W/ m².. K]

C_2 : Dépendance de température des pertes de chaleur, [W/m². K².]

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

C_3 : Capacité thermique effective, [J/ m².. K]

C_4 : aérez la dépendance de vitesse de la perte de chaleur, [J/m³. K]

($T_m - T_a$)/ G_b : différence réduite de température, [m². K/W]

Les valeurs des constants de cylindro-parabolique TPC1800 :

Tableau 2.3 : les valeurs empiriques de cylindro-paraboliqueTPC1800

$c_1 (= b_1)$ [W/(m ² .K)]	$c_2 (= b_2)$ [W/(m ² .K ²)]	$c_3 (= b_3)$ [J/(m ³ .K)]	$c_4 (= b_3)$ [J/(m ³ .K)]
1.7336	0.0293	459.0131	0.0163

2.2.2.1 Estimation du facteur d'interception :

Le facteur interceptant γ_n dans des équations 2.9 et 2.10 est défini comme la fraction de la radiation du rayon incident intercepté par le récepteur à l'éclairement normale. En pratique, il y a des erreurs optiques associées au fonctionnement du concentrateur qui affecte le facteur d'interception, en plus, du fait que les rayons solaires proviennent de directions différentes couvrantes le disque solaire.

Le facteur d'interception peut se donner en termes de géométrie de concentrateur et des erreurs optiques comme suit [49] :

$$\gamma = \int_{-\infty}^{+\infty} d(\theta) F(\theta) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \text{EXP} \left(-\frac{\theta^2}{2\delta_{\text{tot}}^2} \right) \quad (2.16)$$

$$F(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\theta| < \theta_1 \\ \cot \frac{\psi}{2} \left(\frac{2 \cdot \tan(\frac{\psi}{2})}{\pi c \theta} - 1 \right) & \text{si } |\theta_1| < |\theta| < \theta_2 \\ 0 & \text{si } |\theta| > \theta_2 \end{cases} \quad (2.17)$$

Avec

$$\theta_1 = \frac{\sin \psi}{\pi c} \quad (2.18)$$

$$\theta_2 = \frac{2 \cdot \tan \psi}{\pi \cdot c} \quad (2.19)$$

Où ψ : L'angle d'ouverture du concentrateur

C: La concentration géométrique.

F (θ) : fonction angulaire d'acceptation,

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

σ_{tot} : L'écart-type des erreurs totales [mrad]

L'écart-type des erreurs totales du concentrateur est :

$$\delta_{tot}^2 = \delta_{optical}^2 + \delta_{sun}^2 \quad (2.20)$$

$$\delta_{optical}^2 = 4 \cdot \delta_{stope}^2 + \delta_{specular}^2 + \delta_{diplsement}^2 + \delta_{trakin}^2 \quad (2.21)$$

Où $\sigma_{optical}$: Ecart-type des erreurs optiques totales [mrad]
 σ_{stope} : Ecart-type d'erreurs inclinées [mrad]
 $\sigma_{specular}$: Ecart-type d'erreurs spéculaires [mrad]
 $\sigma_{diplsement}$: Ecart-type d'erreurs de déplacement receveurs [mrad]
 $\sigma_{traking}$: Ecart-type de suivre à la trace des erreurs [mrad]

2.2.2.2 Angle d'incidence modifie :

Il existe d'autre type de pertes liées à l'angle d'incidence en raison de la variation de la réflexion du miroir et l'absorption d'enveloppe de verre avec la variation de l'angle d'incidence. L'influence de ces pertes sur la performance du concentrateur est mesurée par le modificateur d'angle d'incidence $K(\theta)$. Selon la référence [47] est donné comme suit, et ce suite à des séries d'expérimentation :

$$K(\theta) = 1 - 5.782 \cdot \theta \cdot 10^{-3} + 1.485 \cdot \theta \cdot 10^{-4} - 2.995 \cdot \theta^3 \cdot 10^{-6} \quad (2.22)$$

2.3. Sous modèle du système MSF :

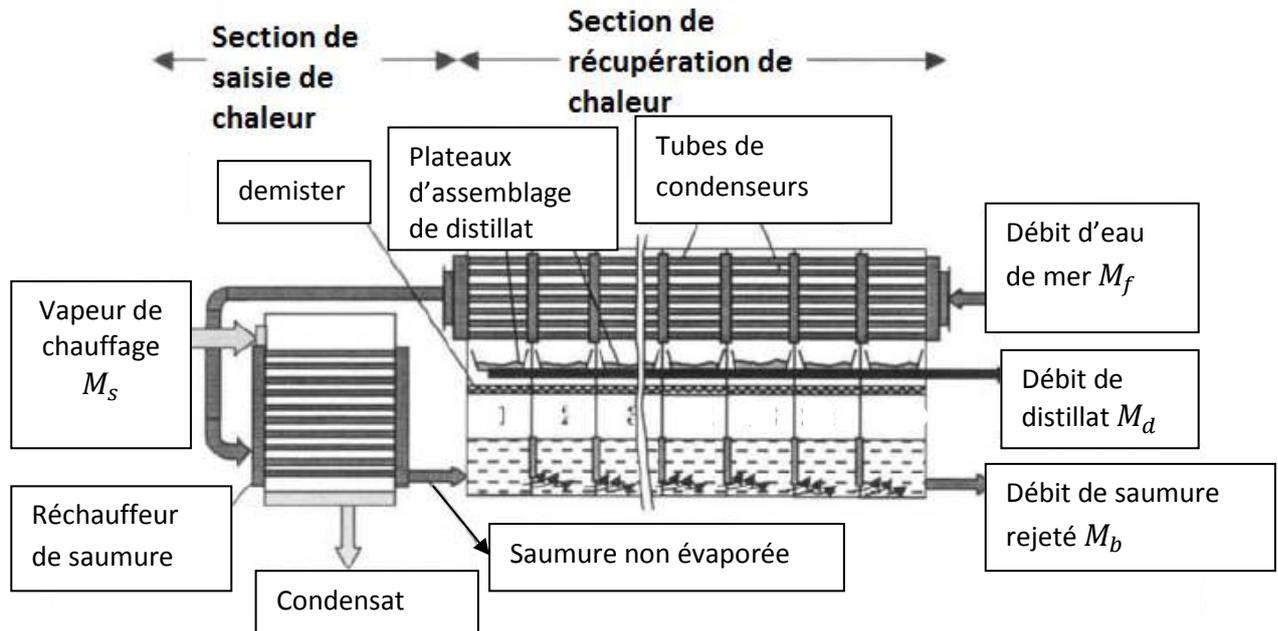


Figure 2.2 Processus de dessalement flash multi-étages-OT (once through)

2.3.1. Description du processus :

Le débit d'eau de mer M_f est introduit dans les tubes des condenseurs du dernier étage dans la section de récupération de chaleur où est désaérée et traitée chimiquement.

Comme le débit d'eau de mer M_f coule dans les tubes à travers les étages, il absorbe la chaleur latente de condensation de la vapeur flashée dans chaque étage. Le débit M_f entre dans les tubes du réchauffeur de saumure figure 2.4, où la vapeur chauffante M_s est condensée sur la surface extérieure des tubes. Le débit M_f absorbe la chaleur latente de la vapeur condensée et sa température augmente à sa valeur de conception maximale connue comme la température de saumure supérieure T_0 .

Le débit M_f entre dans les chambres de flashage dans la section de récupération de la chaleur, où une petite quantité de vapeur d'eau douce est formée par la saumure flashée dans chaque étage selon le principe d'évaporation par détente.

Dans chaque étage de la section de récupération de chaleur, la vapeur se condense sur la surface extérieure des tubes des condenseurs, alors que la saumure M_f s'écoule à l'intérieur du tube de côté froid au côté chaud de l'unité.

2.3.2. Model mathématique :

Le modèle simplifié MSF-OT est un outil très utile, qui peut être utilisé pour obtenir des données de conception rapides, évaluer les performances du système et développer une bonne estimation initiale pour des modèles mathématiques plus détaillés. Le modèle simplifié ne nécessite pas de solution itérative et nécessite un effort minimal de calcul.

Le développement du modèle simplifié repose sur les hypothèses suivantes:

- Chaleur spécifique constante et égale pour tous les flux liquides, C_p
- La chaleur latente de la vaporisation à chaque étage est supposée égale à la valeur moyenne pour le processus.
- Les effets des gaz non condensables ont un effet négligeable sur le processus de transfert de chaleur.
- Les effets de l'élévation du point d'ébullition et les pertes de non-équilibre sur le bilan énergétique de l'étage sont négligeables, mais leurs effets sont inclus dans la conception de la surface de transfert de chaleur du condenseur.

Le modèle simplifié comprend les éléments suivants:

- équilibre globales des matériaux
- les profils de température des étages et des condenseurs.
- équilibre des étages et de sel
- Condensateurs et réchauffeur de saumure et les transferts de chaleur.
- Dimensions de l'étage.
- Paramètres de performance.

Les sections suivantes incluent les équations du modèle pour chacun des éléments ci-dessus: [50][51][52][53][54][55][56][57][58]

2.3.2.1 Équilibre globales des matériaux :

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

Le diagramme de flux MSF-OT montre un flux d'entrée, l'eau de mer d'alimentation, M_f et deux flux de sortie, le produit distillé, M_d et la saumure rejetée M_b .

Par conséquent, l'excès d'énergie ajoutée au système dans le réchauffeur de saumure est éliminé dans les courants de purge et de distillation du produit.

Les équations globales du bilan matériel sont données par :

$$M_f = M_b + M_d \quad 2.23$$

M est le débit massique et l'indice b , d , et définit la saumure, le distillat et l'alimentation. L'équilibre global du sel est donné par :

$$X_f M_f = X_b M_b \quad 2.24$$

X est la concentration en sel. L'équation (2.24) suppose que le distillat est sans sel.

2.3.2.2. Profils de température des étages et des condensateurs :

La répartition de la température dans le système MSF-OT est définie en fonction de quatre températures; Ce sont les températures de la vapeur, T_s la saumure qui sort du préchauffeur (température supérieure de la saumure), T_0 , la saumure sortant de la dernière étage, T_n et de l'eau de mer de l'alimentation, T_f . Un profil linéaire pour la température est supposé pour la saumure clignotante et l'eau de mer qui coule à l'intérieur des tubes du condenseur. La chute de température par étage, ΔT , est obtenue à partir de la relation :

$$\Delta T = (T_0 - T_n)/n \quad 2.25$$

Où n est le nombre d'étages. Par conséquent, la température dans la première étage est donnée par :

$$T_1 = T_0 - \Delta T$$

la température de la deuxième étage, est égal à

$$T_2 = T_1 - \Delta T$$

La substitution de T_1 à l'équation ci-dessus donne :

$$T_2 = T_0 - \Delta T - \Delta T = T_0 - 2 \Delta T$$

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

La même procédure est répétée pour les étages suivantes et une expression générale est développée pour la température de l'étage i :

$$T_i = T_0 - i \Delta T \quad 2.26$$

La température de l'eau de mer de l'alimentation, M_f qui s'écoule à l'intérieur des tubes du condenseur, augmente par Δt dans le condenseur de chaque étage. Cette augmentation de température, Δt , est égale à la diminution de la température de la saumure à chaque étage, ΔT . Ce résultat est obtenu en effectuant un bilan énergétique sur l'étape i , qui donne :

$$D_i C_p T_{V_i} + B_i C_p T_i - D_{i+1} C_p T_{V_{i+1}} - B_{i+1} C_p T_{i+1} = M_f C_p (t_i - t_{i+1})$$

En supposant que la différence de température, $T_i - T_{V_i}$ est faible et a un effet négligeable sur le bilan énergétique de l'étage. Ainsi, l'équation ci-dessus se réduit à :

$$(D_i + B_i) C_p T_i - (D_{i+1} + B_{i+1}) C_p T_{i+1} = M_f C_p (t_i - t_{i+1})$$

Rappelant que la somme $D_i + B_i$ dans chaque étage est égale à M_f , simplifierait l'équation ci-dessus à :

$$M_f C_p T_i - M_f C_p T_{i+1} = M_f C_p (t_i - t_{i+1})$$

L'élimination des termes similaires des deux côtés de l'équation donne la relation suivante, donc :

$$T_i - T_{i+1} = t_i - t_{i+1} \quad \text{Ou} \quad \Delta T_i = \Delta t_i$$

La température de l'eau de mer, qui sort du condenseur de la première étage, est alors définie par :

$$t_1 = T_f - n \Delta T$$

La température de l'eau de mer sortant du condenseur de la deuxième étage, T_2 est inférieure à T_1 de ΔT , où

$$t_2 = t_1 - \Delta T$$

La substitution de T_1 dans l'équation ci-dessus donne :

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

$$t_2 = T_f + (n - 1) \Delta T$$

De manière similaire à l'équation (2.26), une équation générale est obtenue pour la température du condenseur à l'étage i :

$$t_i = T_f + (n - (i - 1))\Delta t \quad 2.27$$

2.3.2.3 Matériel de l'étage et l'équilibre salin :

La quantité de vapeur éclairante formée à chaque étage obtenue Par la conservation de l'énergie au sein de l'étage, où le latent consommé par la vapeur clignotante est égal à la diminution de la chaleur sensible de la saumure. C'est :

$$D_1 = y M_f$$

Où D_1 est la quantité de vapeur éclairante formée dans la première étage, M_f est le débit d'eau de l'alimentation et y est le rapport spécifique de la chaleur sensible et de la chaleur latente il est égal à :

$$y = C_p \Delta T / \lambda_{av} \quad 2.28$$

C_p Est la capacité calorifique spécifique et λ_{av} est la chaleur latente moyenne calculée à la température moyenne

$$T_{av} = (T_0 + T_n) / 2 \quad 2.29$$

La quantité de distillât formée dans la deuxième étape est égale à :

$$D_2 = y (M_f - D_1)$$

La substitution de la valeur de D_1 dans l'équation ci-dessus donne :

$$D_2 = y (M_f - y M_f)$$

Cela se simplifie

$$D_2 = M_f y (1 - y)$$

Les équations d'équilibre pour D_2 et D_3 révéleront la forme générale de la formule de D_i celle de D_3 est :

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

$$D_3 = y(M_f - D_1 - D_2)$$

La substitution des valeurs de D_1 et D_2 dans l'équation ci-dessus donne :

$$D_3 = y(M_f - y M_f - M_f y (1 - y))$$

On prend (M_f) Comme facteur commun dans l'équation ci-dessus ce qui donne :

$$D_3 = M_f y (1 - 2y - y^2)$$

Cela se simplifie

$$D_3 = M_f y (1 - y)^2$$

En conséquence, la formule générale résultante pour D_i est :

$$D_i = M_f y (1 - y)^{i-1} \quad 2.30$$

Le débit total du distillat est obtenu en additionnant les valeurs de D_i pour toutes les étages. La sommation est effectuée par étages pour obtenir une équation de forme fermée. Par conséquent, la sommation de D_1 et D_2 donne :

$$D_1 + D_2 = M_f (y + y(1 - y)) = M_f (2y - y^2) = M_f (1 - (1 - y)^2)$$

L'addition de D_3 à ce qui précède donne :

$$D_1 + D_2 + D_3 = M_f ((2y - y^2) + y(1 - y)^2)$$

Cela se simplifie

$$\begin{aligned} D_1 + D_2 + D_3 &= M_f (2y - y^2 + y - 2y^2 + y^3) \\ &= M_f (3y - 3y^2 + y^3) \\ &= M_f (1 - (1 - y)^3) \end{aligned}$$

La comparaison des sommations de $D_1 + D_2$ et $D_1 + D_2 + D_3$ donne la forme générale pour la sommation totale du distillat formé dans toutes les étages, M_d , qui est donné par :

$$M_d = M_f (1 - (1 - y)^n) \quad 2.31$$

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

L'équation (2.31) est utilisée pour calculer le débit d'alimentation, car le débit du distillat est toujours spécifié dans un problème de conception.

Le débit de l'étape de départ du flux de saumure (i) est donné par

$$B_i = M_f - \sum_{k=1}^i D_k \quad 2.32$$

La concentration de sel dans le débit de saumure sortant de l'étape i est donnée par :

$$X_i = M_f X_f / B_i \quad 2.33$$

Le débit de la vapeur de chauffage, M_s est obtenu pour l'équation d'équilibre énergétique pour le réchauffeur de saumure, où

$$M_s \lambda_s = M_f C_p (T_0 - t_1)$$

L'équation ci-dessus est organisée pour calculer la M_s

$$M_s = M_f C_p (T_0 - t_1) / \lambda_s \quad 2.34$$

2.3.2.4. Le chauffeur de saumure, le condenseur et la surface de transfert de chaleur :

La surface de chauffage de la saumure est donnée par :

$$A_b = M_s \lambda_s / (U_b (\text{LMTD})_b) \quad 2.35$$

Où LMTD est donné par :

$$(\text{LMTD})_b = \left((T_s - T_0) - (T_s - t_1) \right) / \ln \left((T_s - T_0) / (T_s - t_1) \right) \quad 2.36$$

Et U_b est donné par :

$$U_b = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} T_s + 1.5971 \times 10^{-5} (T_s)^2 - 1.9918 \times 10^{-7} (T_s)^3 \quad (2.37)$$

La surface de transfert de chaleur pour le condenseur à chaque étape est supposée égale.

Par conséquent, la surface de transfert de chaleur calculée pour la première étape est utilisée pour obtenir la surface de transfert de chaleur totale dans le système. La

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

surface de transfert de chaleur du condenseur dans la première étape est obtenue à partir de :

$$A_c = M_f C_p (t_1 - t_2) / (U_c (LMTD)_c) \quad 2.38$$

Où

$$U_c = 1.7194 + 3.2063 \times 10^{-3} T_{v_1} + 1.5971 \times 10^{-5} T_{v_1}^2 - 1.9918 \times 10^{-7} T_{v_1}^3 \quad 2.39$$

$$T_{v_1} = T_1 - BPE_1 - NEA_1 - \Delta T_{d_1} \quad 2.40$$

Et

$$(LMTD)_c = \left((T_{v_1} - t_1) - (T_{v_1} - t_2) \right) / \ln \left((T_{v_1} - t_1) / (T_{v_1} - t_2) \right) \quad 2.41$$

Dans les équations ci-dessus (BPE) est l'élévation du point d'ébullition (NEA) est l'allocation de non-équilibre, (T_v) est la température de la vapeur de condensation, (ΔT_d) est la chute de température dans le demister, et (U_c) Est Le coefficient global de transfert de chaleur du condenseur

Le transfert de chaleur total dans le système est obtenu en additionnant la surface de transfert de chaleur pour tous les condenseurs et le réchauffeur de saumure est donné par :

$$A = A_b + nA_c \quad 2.42$$

2.3.2.5. Dimensions de l'étage :

Les calculs des dimensions de l'étage comprennent la hauteur de la porte, la hauteur du bassin de saumure, la largeur du plateau et la longueur de l'étage. La longueur de tous les étages est égale à la longueur du dernier étage et la largeur de toutes les étapes est égale à la largeur de la première étape. La hauteur du bassin de saumure doit être supérieure à la hauteur de la porte, ce qui est nécessaire pour éviter le contournement des vapeurs entre les étages (soufflage de vapeur). La hauteur de la porte (GH) est obtenue en fonction de la chute de pression de l'étage (ΔP), de la densité de saumure (ρ_b), du coefficient de frottement du fût (C_d), de la largeur de l'étage (W) et du débit d'alimentation (M_f). Pour l'étage i, la hauteur de la porte est :

Chapitre 2 : MODELISATION DU SYSTEME M.S.F SOLAIRE

$$GH_i = (M_f - \sum_{j=1}^{i-1} D_j) (2\rho_{b_i} \Delta P_i)^{-0.5} / (C_d W) \quad 2.43$$

La hauteur du bassin de saumure est supérieure à la hauteur de la porte de 0,2 m.

$$H_i = 0.2 + GH_i \quad 2.44$$

Où

$$\Delta P_i = P_i - P_{i+1} \quad \text{Et} \quad W = M_f / V_b \quad 2.45$$

Où P_i et P_{i+1} sont les pressions par étapes i et $i+1$, et V_b est la vitesse de masse de la saumure par largeur de la chambre. La longueur de la dernière étage est déterminée en fonction du débit de vapeur, D_n , la densité de vapeur, ρ_{V_n} , la vitesse perméable à la vapeur, de V_{V_n} et de la largeur de l'étage.

$$L = D_n / (\rho_{V_n} V_{V_n} W) \quad 2.46$$

La surface de section transversale pour chaque étage, A_s , est alors calculée :

$$A_s = L W \quad 2.47$$

$$BBE_i = X_i (b + X_i C) \times 10^{-3} \quad 2.48$$

$$NEA_i = 0.9784^{T_{i-1}} 15.7378^{H_i} 1.3777^{V_b} \times 10^{-6} \quad 2.49$$

2.3.2.6. Paramètres de performance :

Les paramètres de performance du système sont définis par le rapport de performance thermique, PR et surface de transfert de chaleur spécifique, A_s . Le rapport de performance est défini comme la quantité de produit distillé produite par unité de masse de la vapeur de chauffage. C'est :

$$PR = M_d / M_s \quad 2.50$$

La surface spécifique de transfert de chaleur est définie par :

$$S_A = (A_b + nA_c) / M_d \quad 2.51$$

CHAPITRE 3
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons la méthodologie que nous avons suivie pour résoudre l'ensemble d'équations développées dans le chapitre précédent. Nous allons présenter les différents résultats obtenus pour chaque sous-modèle développé ainsi que pour le modèle global, tels que l'irradiation solaire, le rendement de cylindro-parabolique et la quantité d'eau produite par le système M.S.F-OT. Une étude paramétrique sera effectuée pour les différents systèmes étudiés et cela afin de concevoir une centrale de dessalement M.S.F couplée à un concentrateur cylindro-parabolique.

3.2 Méthodologie :

Pour chaque modèle mathématique que nous avons exposé dans le chapitre II, nous avons réalisé son algorithme correspondant. Pour l'éclairement global, l'algorithme est donné sur les figures 3.1, 3.2, 3.3 :

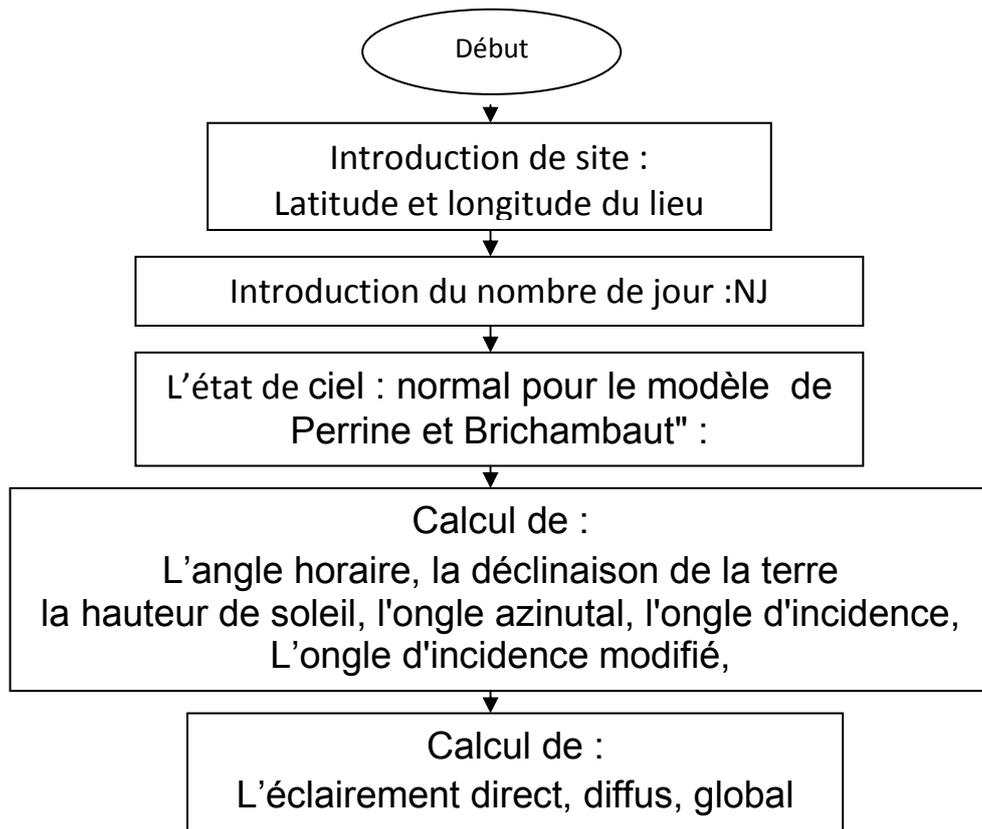


Figure 3.1 : Algorithme de l'éclairement

L'algorithme utilisé pour la simulation du modèle qui calcule la quantité de chaleur utile et le rendement de cylindro-parabolique est représenté ci-dessous :

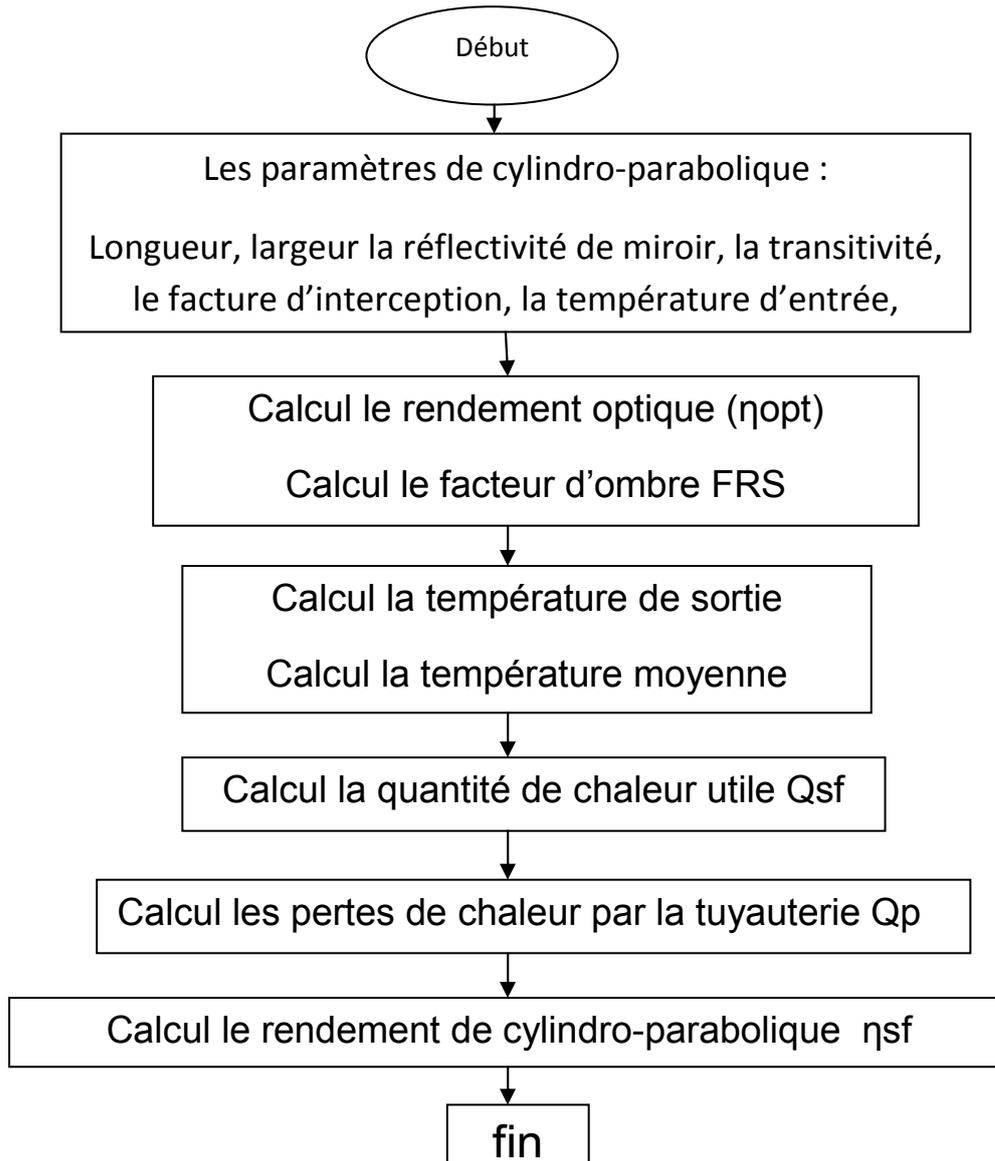


Figure 3.2 : Algorithme de cylindro-parabolique

Pour calculer la quantité d'eau produite par le système M.S.F-OT, nous avons étudié une simulation dont l'algorithme est le suivant :

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

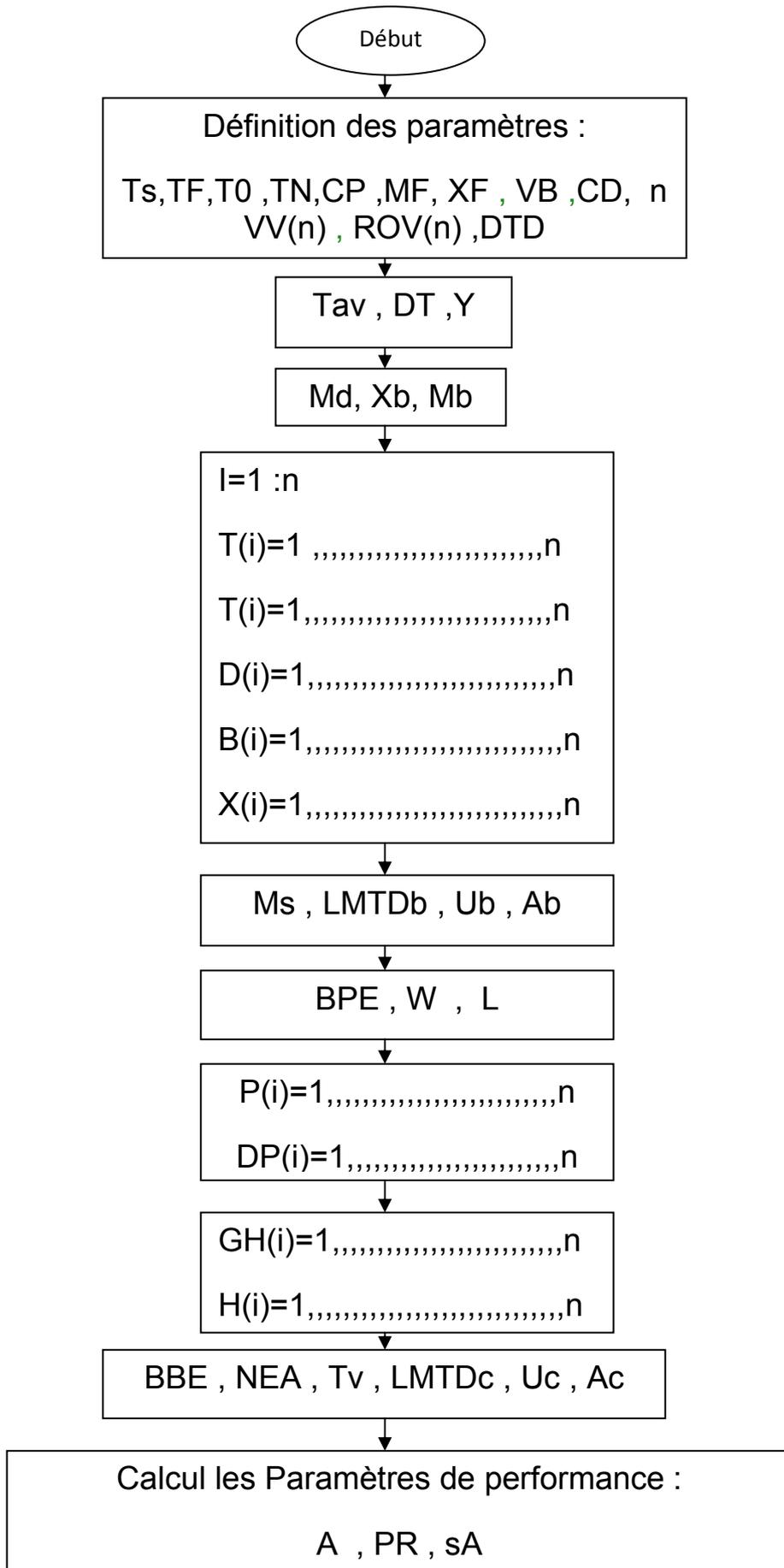


Figure 3.3 : Algorithme de système M.S.F-OT

3.3 Résultats et discussions :

3.3.1 Résultats du model d'éclairement :

Nous avons choisi la région de de Bousmail (w. de Tipaza) pour étudier la variation de l'éclairement direct et global en utilisant le model de Perrin de Brichambaut

. Les résultats sont donnés par les figures ci-dessous.

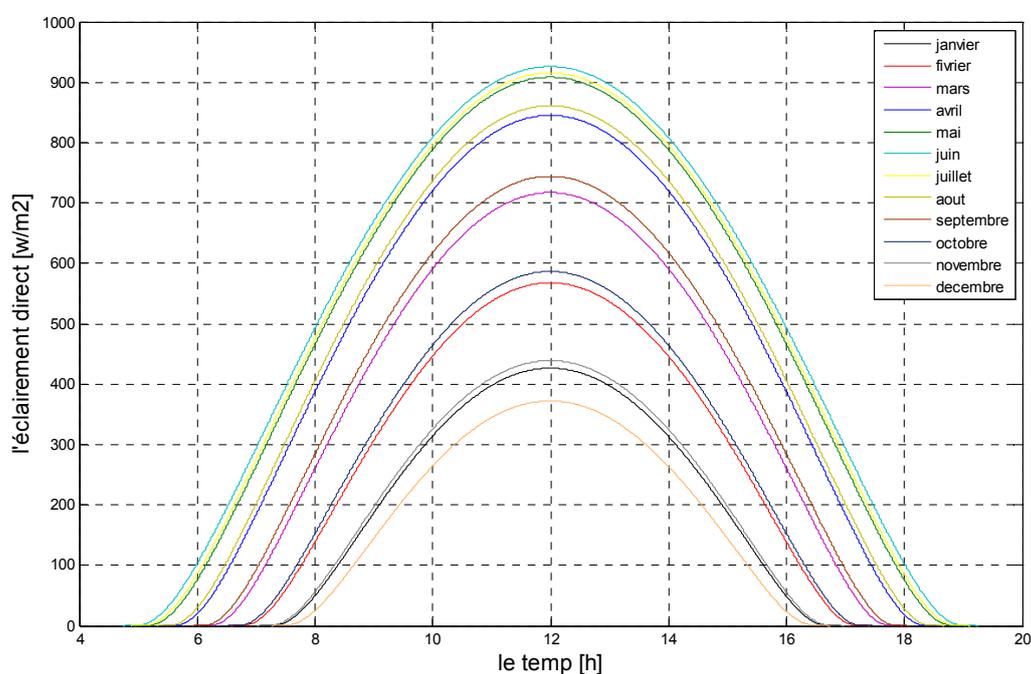


Figure 3.4: Graphe d'éclairement direct en fonction du temps pour le site de Bousmail

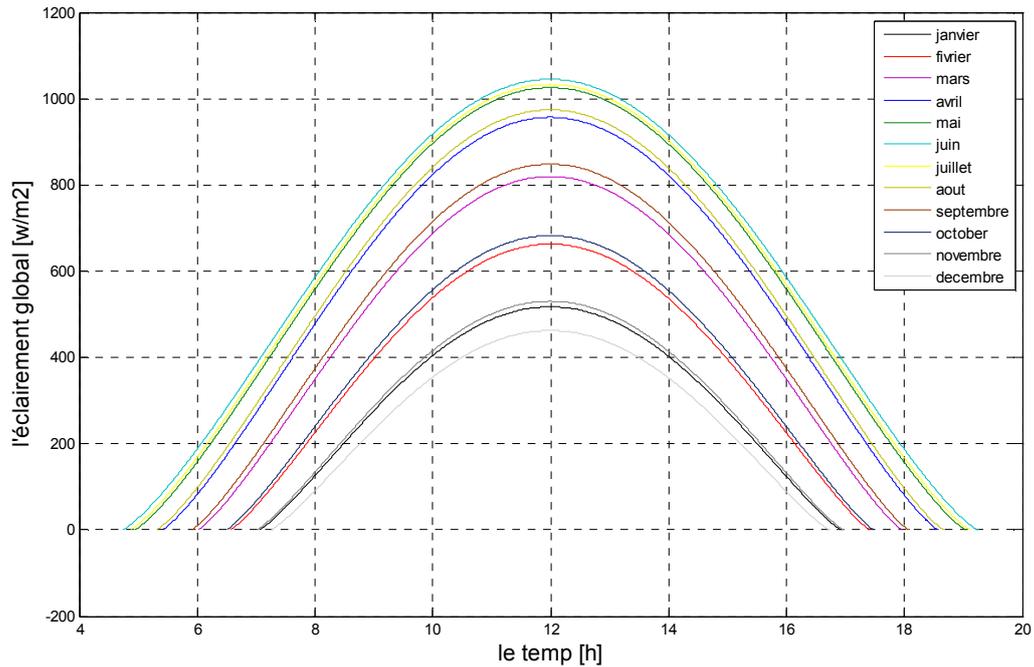


Figure 3.5: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site de Bousmail

On remarque que les graphes de l'éclairement direct et l'éclairement global ont une forme en cloche pour tous les jours de l'année. On constate aussi que l'éclairement est minimal au mois de décembre et maximal au mois de juin, tandis qu'il est moyen au printemps et en automne.

3.3.2. Résultats du model cylindro-parabolique :

Nous avons utilisé le cylindro-parabolique PTC-1800 dans les mêmes conditions du model de l'éclairement. Les résultats de la température de sortie et la quantité de chaleur utile sont représentés dans les graphes suivants :

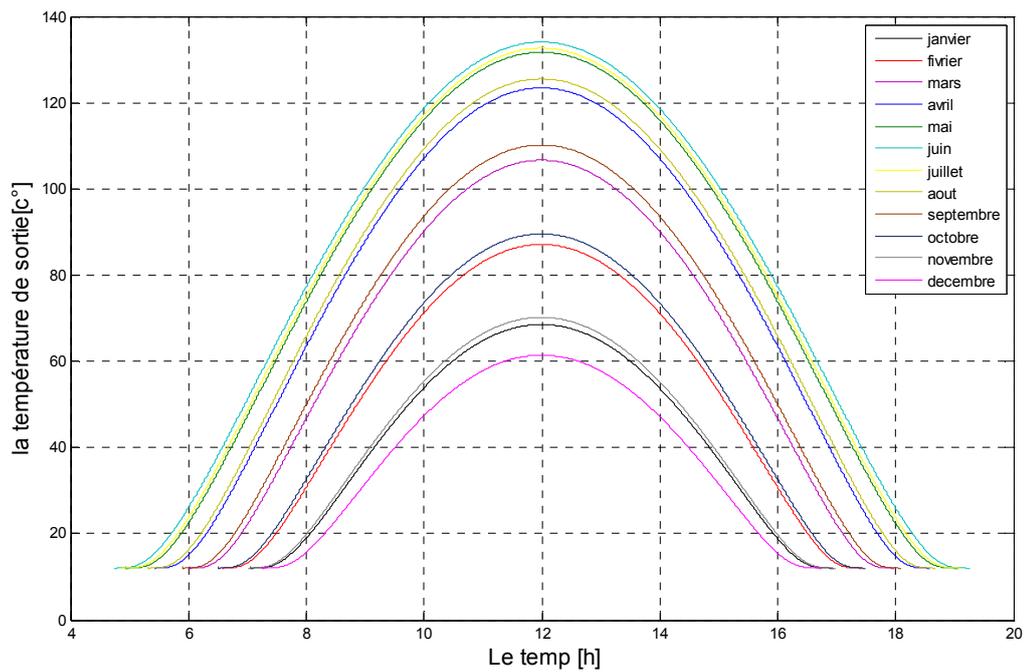


Figure 3.6: Graphe de la température de sortie de cylindro-parabolique en fonction du temps pour le site de Bousmail

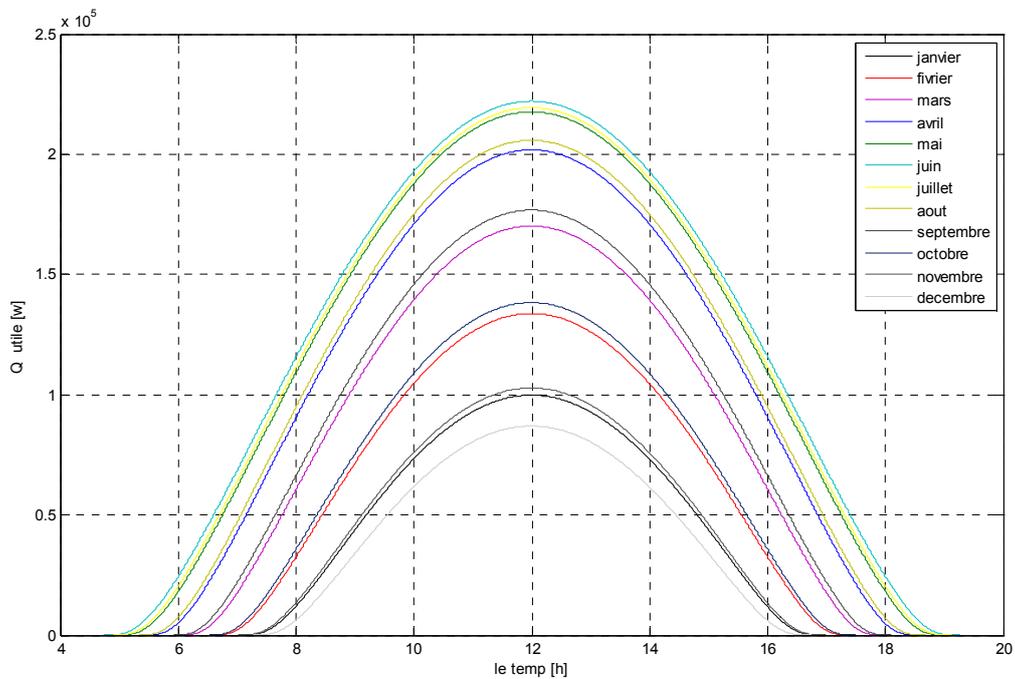


Figure 3.7: Graphe de la quantité de chaleur utile de cylindro-parabolique en fonction du temps pour le site de Bousmail

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

La variation annuelle de la quantité de chaleur de cylindro-parabolique suit la même allure de celle de l'éclairement : si l'éclairement augmente, la quantité de chaleur augmente aussi, et. La même chose est remarquée pour la variation de la température de sortie du cylindro-parabolique en fonction du temps.

3.3.3 Résultats du model M.S.F-OT:

3.3.3.1 Station de dessalement étudiée :

Le système étudié est conçu pour produire 378.80 kg/s d'eau potable. Il est composé d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique et d'un système de dessalement MSF-OT. Le tableau 3.1 présente les caractéristiques principales de la station étudiée. Et le tableau 3.2 présent les résultats de simulation sur le mathlab

Tableau 3.1 : Caractéristiques de la station étudiée

Nombre d'effets	24
la température de l'eau de mer d'alimentation (T_f °)[c°]	25
Le débit d'eau de mer d'alimentation M_f [Kg/s]	3384.8
La salinité de l'eau de mer d'alimentation X_f [ppm]	42000
Température de la vapeur T_s [c°]	116
Température supérieure à la saumure T_0 [c°]	106
La salinité de la saumure souffle X_b [ppm]	47292.6
Le débit de la vapeur de chauffage M_s [Kg/s]	95.49

Tableaux 3.2 affichage des résultats de simulation

effet	D[kg/s] distillat	$\sum D$	B[kg/s] saumure	X[ppm] concentration	T[c°] Saumure flashé	t[c°] l'eau de mer	GH[m] H de la port	H[m] H du piscine de saumure
1	16.70	16.70	3368.1	42208.2	103.25	91	0.078	0.278
2	16.61	33.31	3351.5	42417.5	100.5	88.25	0.081	0.281
3	16.53	49.84	3335.0	42627.7	97.75	85.5	0.084	0.284

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4	16.45	66.30	3318.5	42839.1	95	82.75	0.087	0.287
5	16.37	82.67	3302.1	43051.4	92.25	80	0.09	0.29
6	16.29	98.96	3285.8	43264.9	89.5	77.25	0.094	0.294
7	16.21	115.16	3269.6	43479.3	86.75	74.5	0.097	0.297
8	16.13	131.29	3253.5	43694.9	84	71.75	0.101	0.301
9	16.05	147.34	3237.5	43911.5	81.25	69	0.105	0.305
10	15.97	163.31	3221.5	44348.0	78.5	66.25	0.11	0.31
11	15.89	179.21	3205.6	44567.8	75.75	63.5	0.114	0.314
12	15.81	195.02	3189.8	44129.2	73	60.75	0.119	0.319
13	15.74	210.75	3174.0	44788.8	70.25	58	0.124	0.324
14	15.66	226.41	3158.4	45010.8	67.5	55.25	0.13	0.33
15	15.58	241.99	3142.8	45233.9	64.75	52.5	0.136	0.336
16	15.50	257.50	3127.3	45458.2	62	49.75	0.143	0.343
17	15.43	272.92	3111.9	45683.5	59.25	47	0.15	0.35
18	15.35	288.27	3096.5	45910.0	56.5	44.25	0.157	0.357
19	15.28	303.55	3081.3	46137.6	53.75	41.5	0.165	0.365
20	15.20	318.75	3066.1	46366.3	51	38.75	0.175	0.375
21	15.12	333.87	3050.9	46596.2	48.25	36	0.185	0.385

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

22	15.05	348.92	3035.9	46827.2	45.5	33.25	0.197	0.397
23	14.98	363.90	3020.9	47059.3	42.75	30.5	0.211	0.411
24	14.90	378.80	3006.0	47292.6	40	27.75	0.211	0.411

3.3.3.2 Résultats de simulation de station :

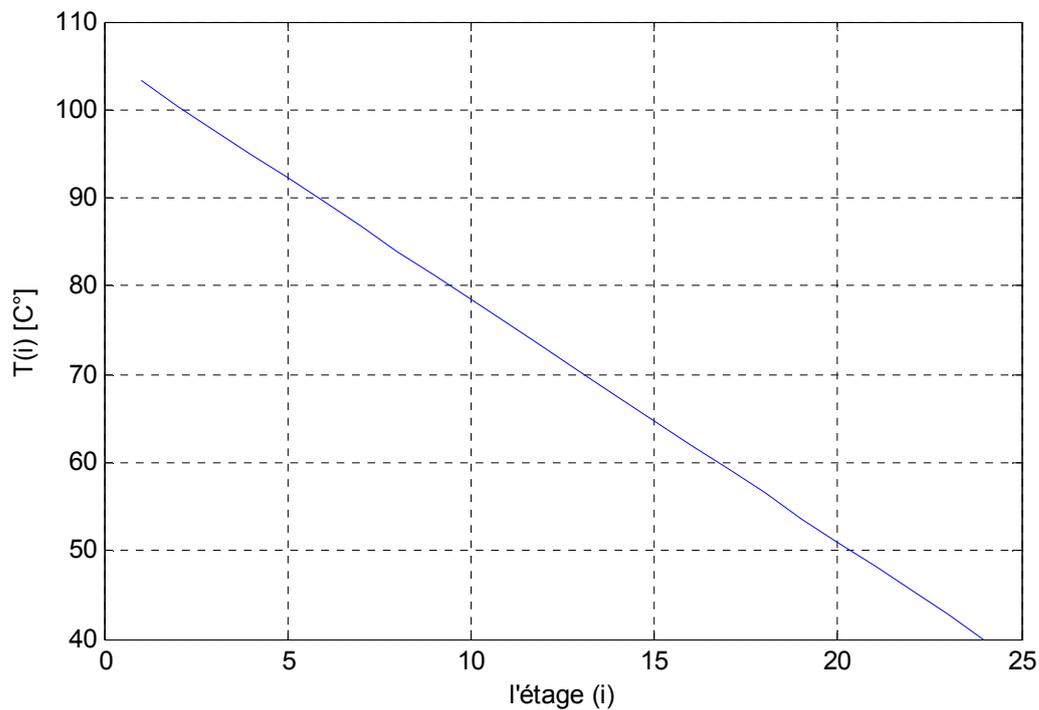


Figure 3.8.Température de saumure flashée.

La diminution de TB est due au fait que d'un étage à étage une portion de sa quantité s'évapore et donc elle se refroidie.

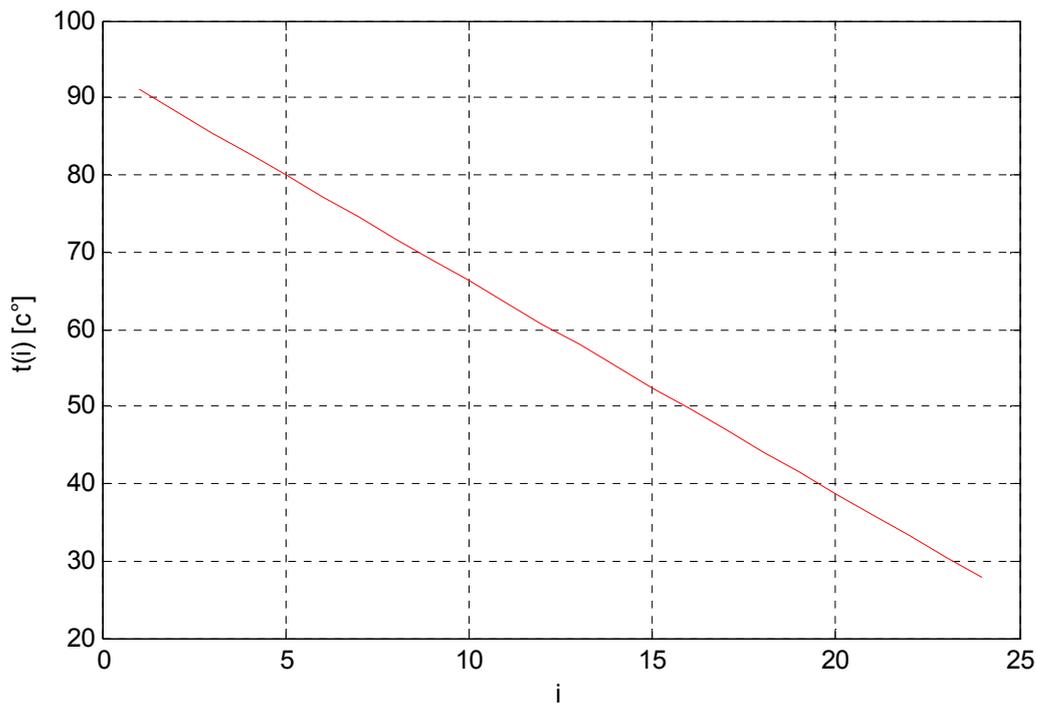


Figure 3.9 La température de l'eau de mer sort du condenseur dans chaque effet

L'analyse de la Figure 3.9 montre que la température de l'eau de mer augmente d'un étage à étage à partir de l'entrée de l'étage 24 jusqu'à la sortie dans l'étage 1 à l'intérieur des chambres puisqu'elle récupère la chaleur latente de condensation à chaque étage.

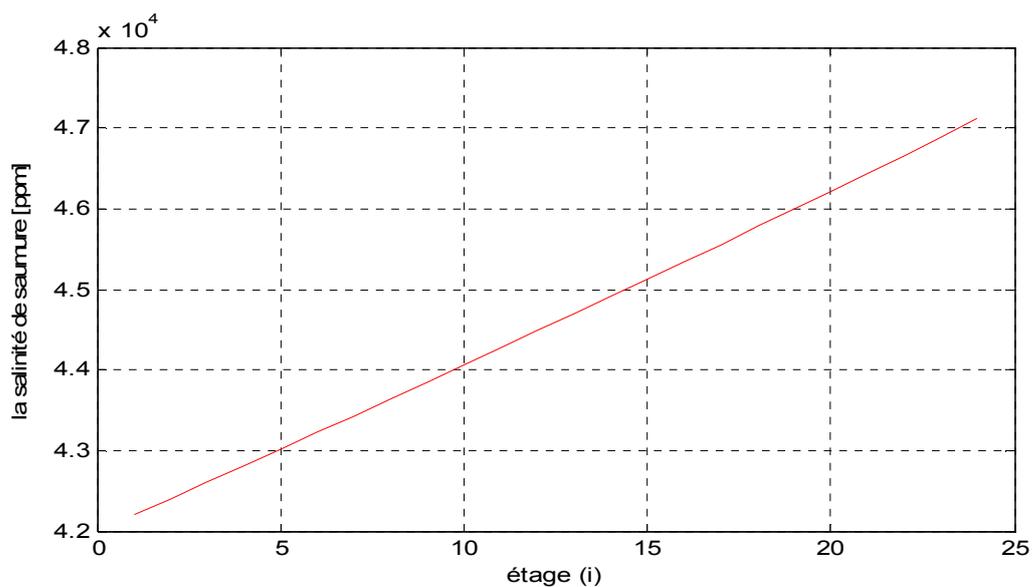


Figure 3.10 : Salinité de la saumure sortant de chaque étage.

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

L'évolution du taux de salinité de la saumure flashée le long des étages est représentée sur la (Figure 3.10) concerne la salinité de la saumure flashée à travers l'étage. La salinité de la saumure augmente à chaque étage car on perd en quantité de saumure (Figure 3.11) en termes de vapeur qui se transforme en distillat qui s'accumule à travers les étages (Figure 3.12).

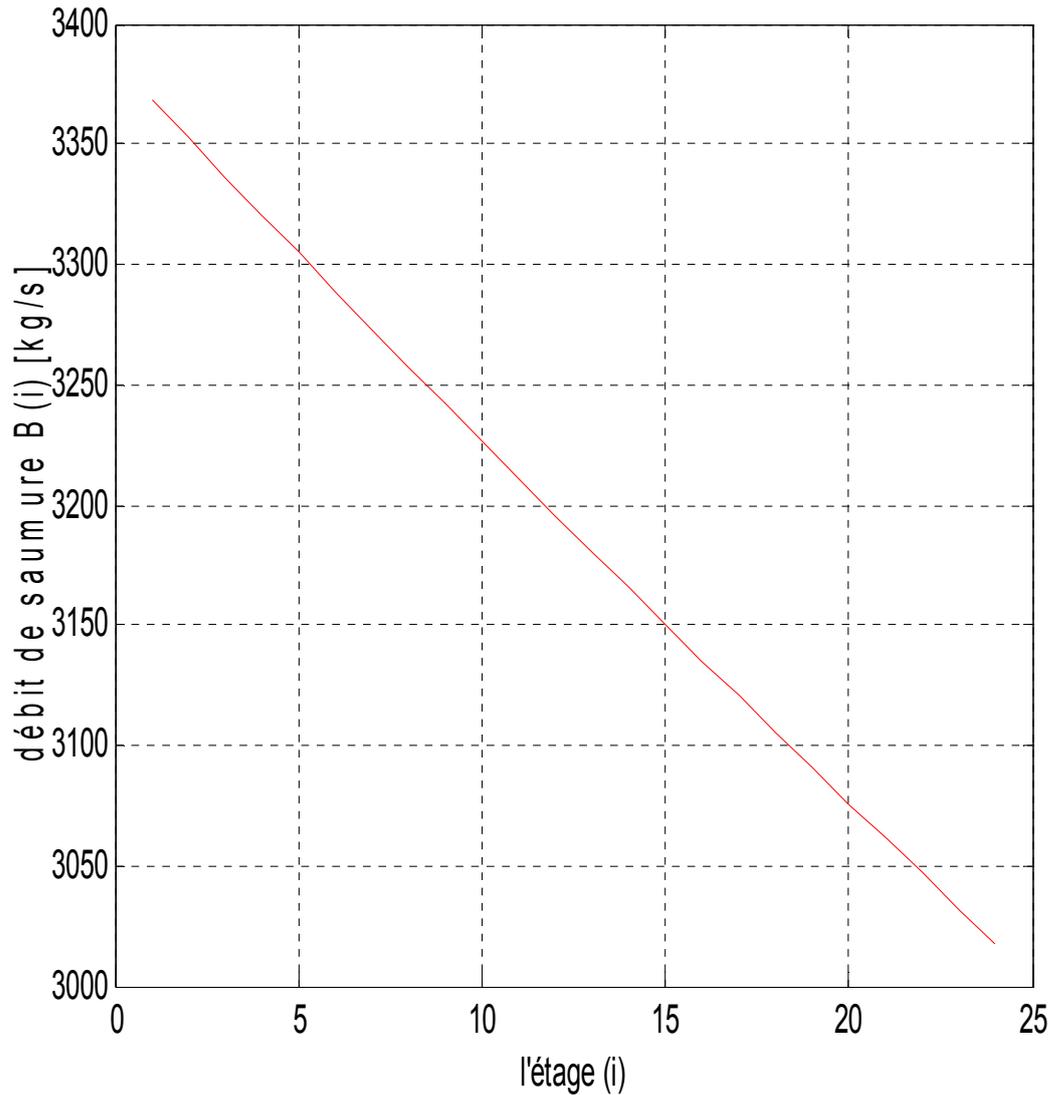


Figure 3.11 : Quantité de saumure à chaque étage.

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

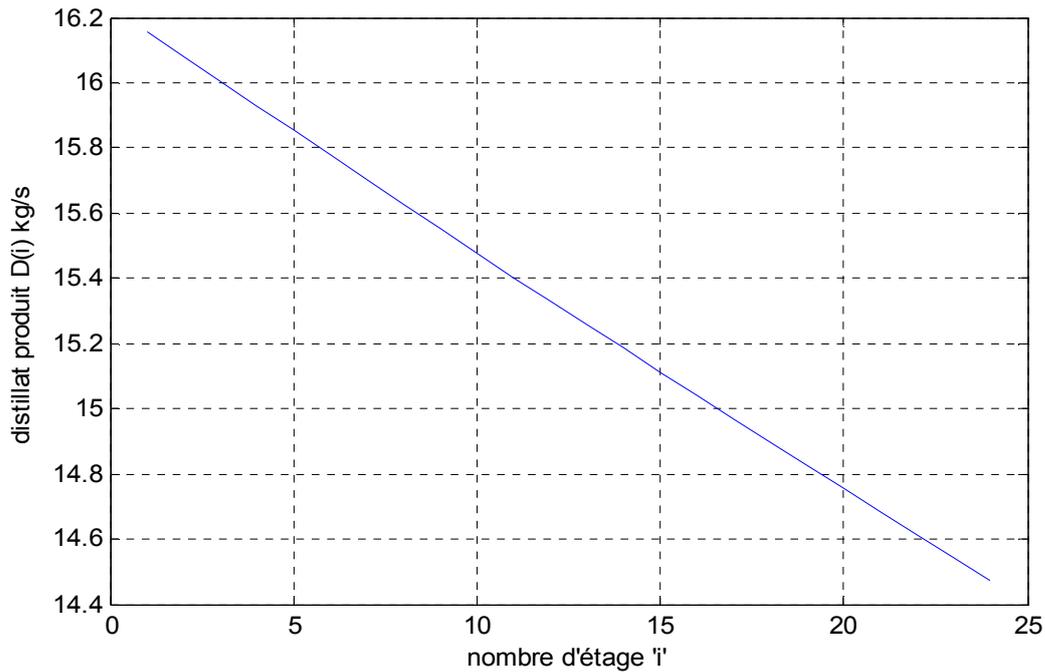


Figure 3.12 : Quantité de distillat produit à chaque étage

L'allure de la variation de production de distillat en fonction du temps est similaire à celle de l'éclairement (en forme d'une cloche). En plus, la production de dessillât varie proportionnellement avec l'éclairement

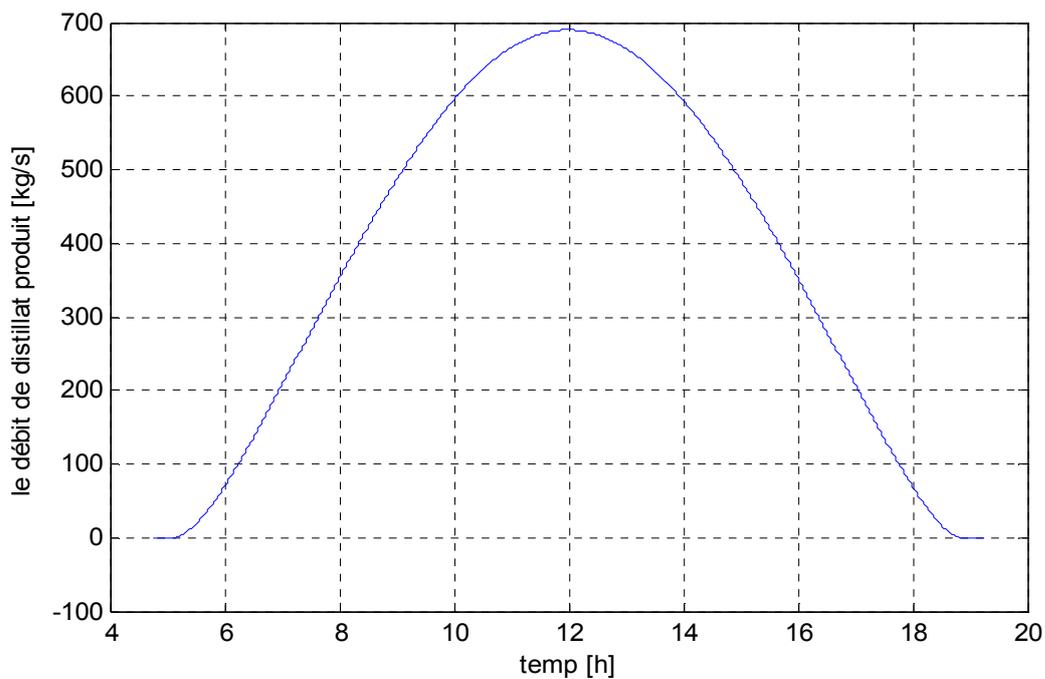


Figure 3.13: Graphe de production de dessillât en fonction du temps en mois de juin

3.4 Etude paramétrique :

Dans cette partie des résultats, nous allons étudier l'influence d'un certains nombres de paramètres sur la performance de l'unité MSF donnée par le GOR. On définit le GOR (gain output ratio) $GOR = M_d/M_s$ comme étant le rapport du distillat produit M_d sur la vapeur consommée M_s .

3.4.1 Influence de la température de vapeur T_s :

Un des plus importants paramètres qui affecte la performance du processus MSF est la température de vapeur. Un accroissement de la valeur de T_s va engendrer une augmentation de la consommation de vapeur (figure 3.14) et la quantité de distillat produite (figure 3.15)

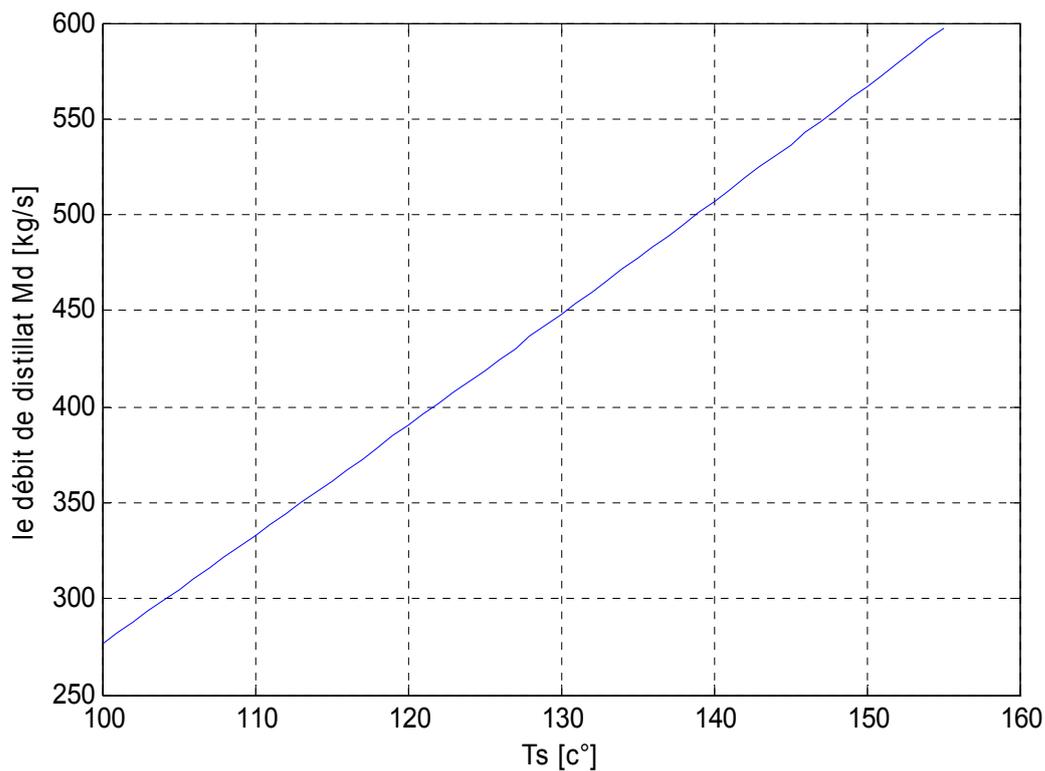


Figure 3.14 Effet de la température de vapeur sur la production de distillat.

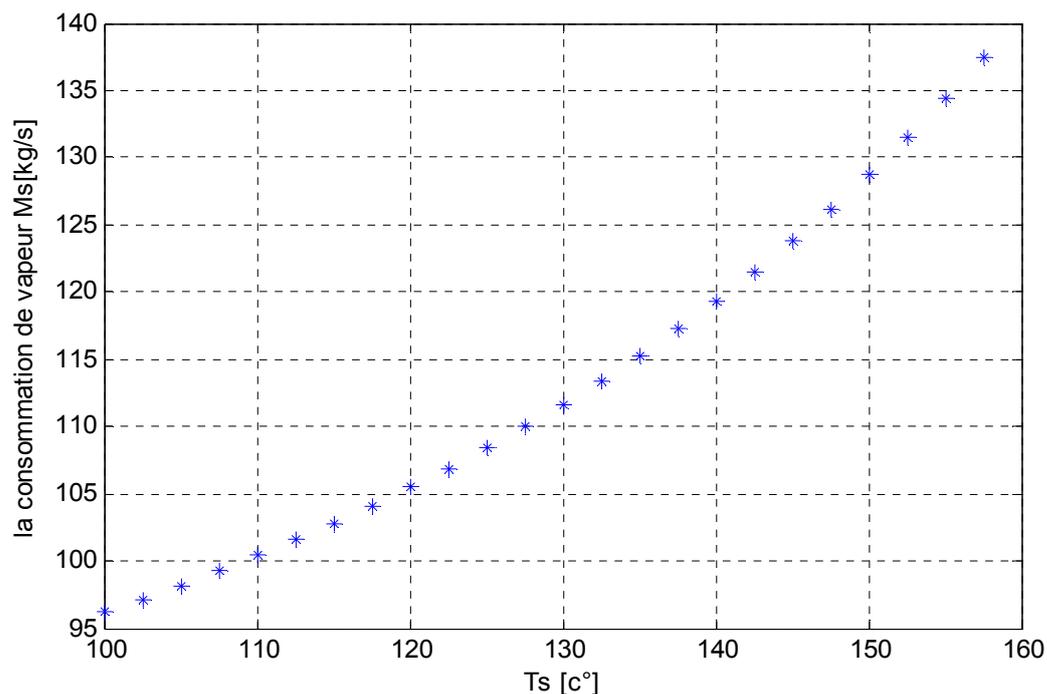


Figure 3.15 Effet de la température de vapeur sur la consommation de vapeur.

Le GOR qui représente le rapport entre les deux quantités précédentes affiche une évolution non monotone (Figure 3.16) avec la présence d'une valeur maximale obtenue à une température d'eau de mer optimale autour de 160°C

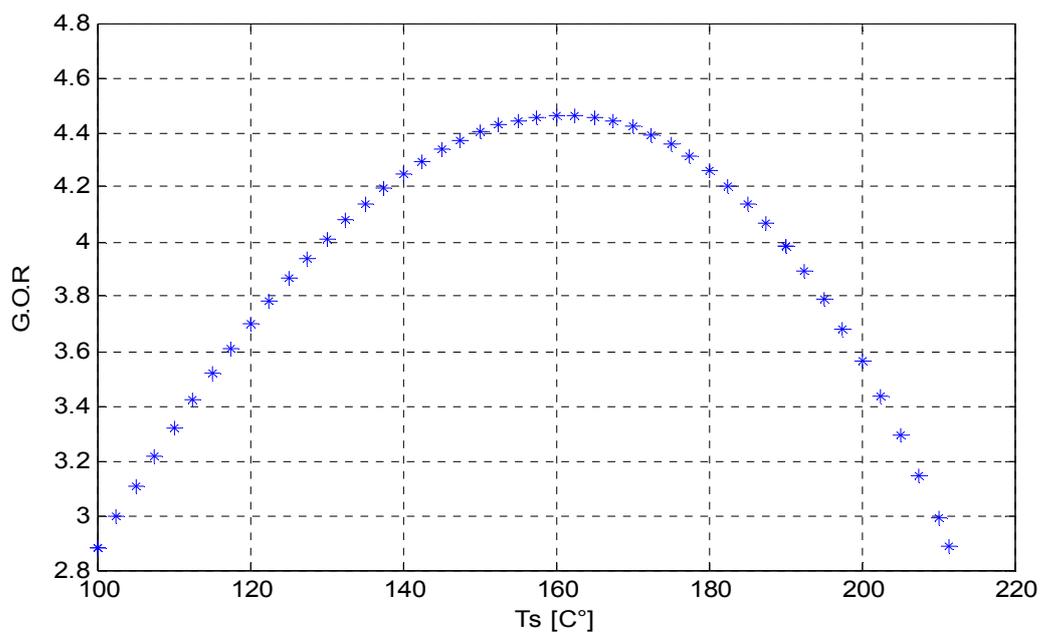


Figure 3.16 Effet de la température de vapeur sur la performance GOR

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Augmenter la température de vapeur T_s entrainera un accroissement de la température de saumure supérieure T_0 qui joue un rôle direct dans la production de distillat. En effet, plus la saumure entre avec une plus grande température plus l'énergie disponible est importante ce qui facilitera l'évaporation menant à des grandes quantités de distillats produits.

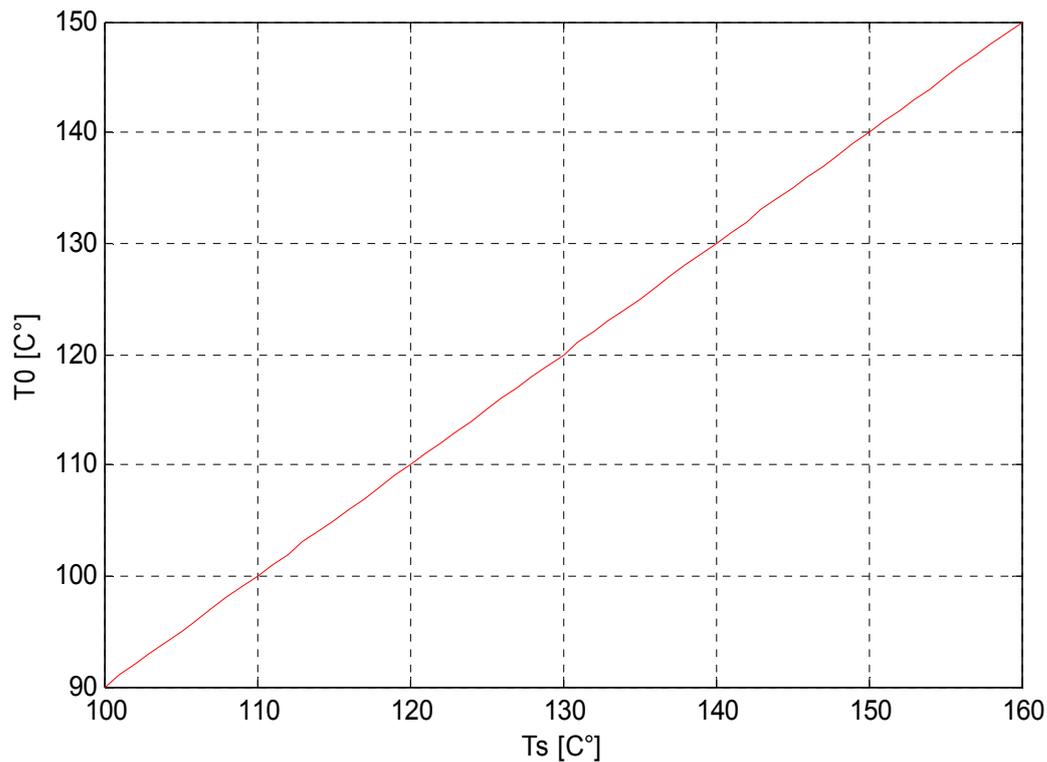


Figure 3.17 : Effet de la température de vapeur sur T_0 .

3.4.2 Influence de la température d'eau de mer T_f :

La consommation de vapeur M_s par le réchauffeur de saumure diminue lorsque la température d'eau mer augmente (Figure 3.18). Cette évolution peut s'expliquer par le fait qu'accroître T_f conduira à une température d'eau à la sortie de la section de récupération de chaleur plus grande et donc engendrera une consommation moindre de vapeur pour augmenter sa température à la valeur T_0 .

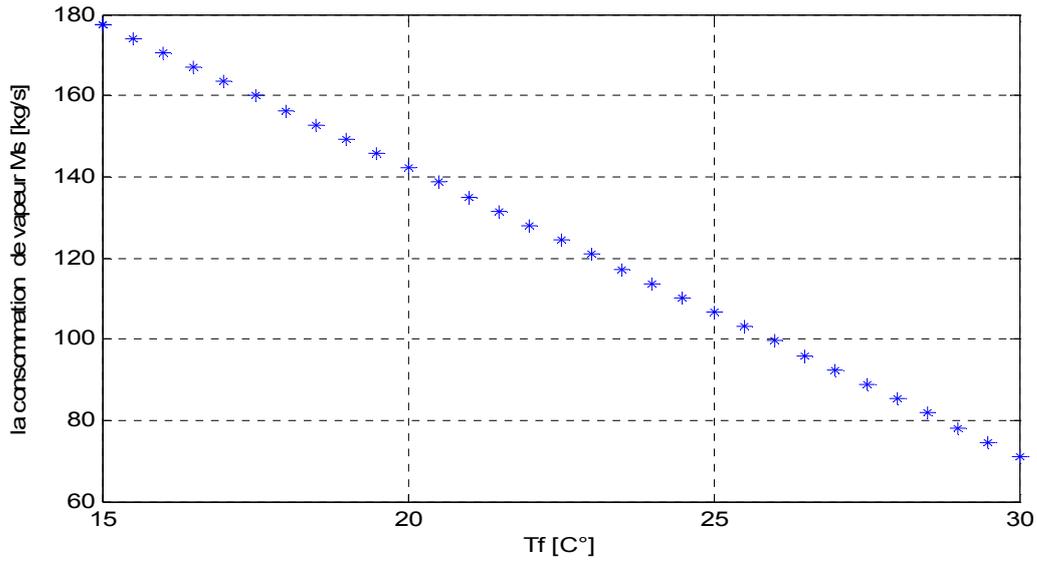


Figure 3.18 : Effet de la température d'eau de mer T_f sur la consommation de vapeur M_s .

La figure 3.19 montre que le GOR Augmente quand de la température d'eau de mer T_f augmente.

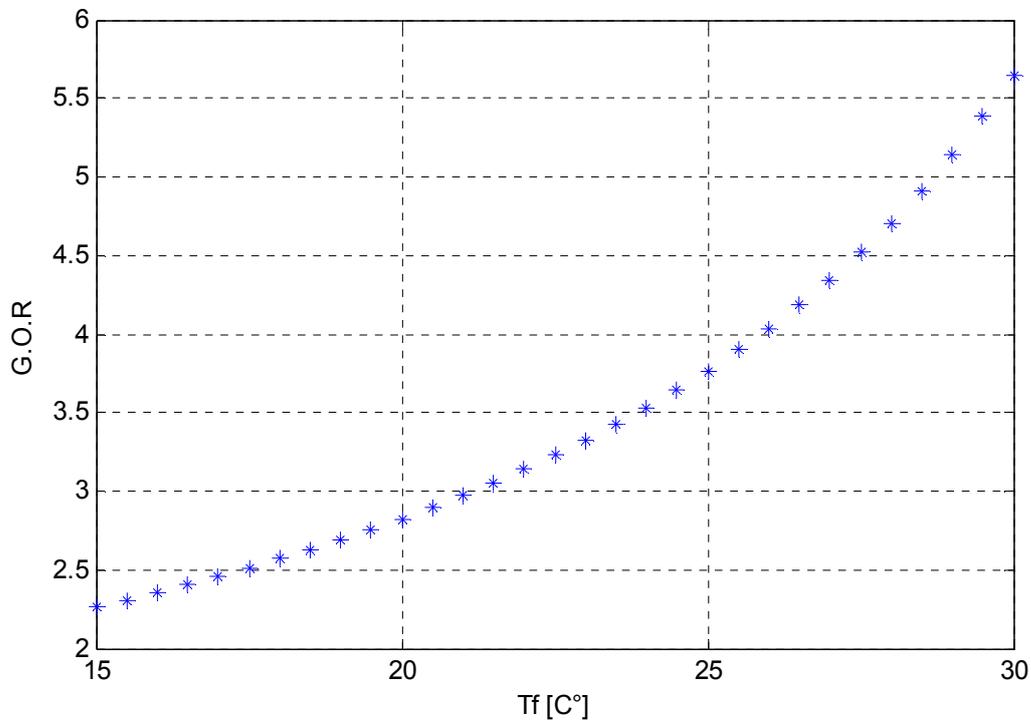


Figure 3.19: Graphe de GOR on fonction de la température d'eau de mer T_f

3.4.3 Influence du débit d'eau de mer M_f :

La figure 3.20 montre que le débit de distillat M_d augmente quand le débit d'eau de mer M_f augmente.

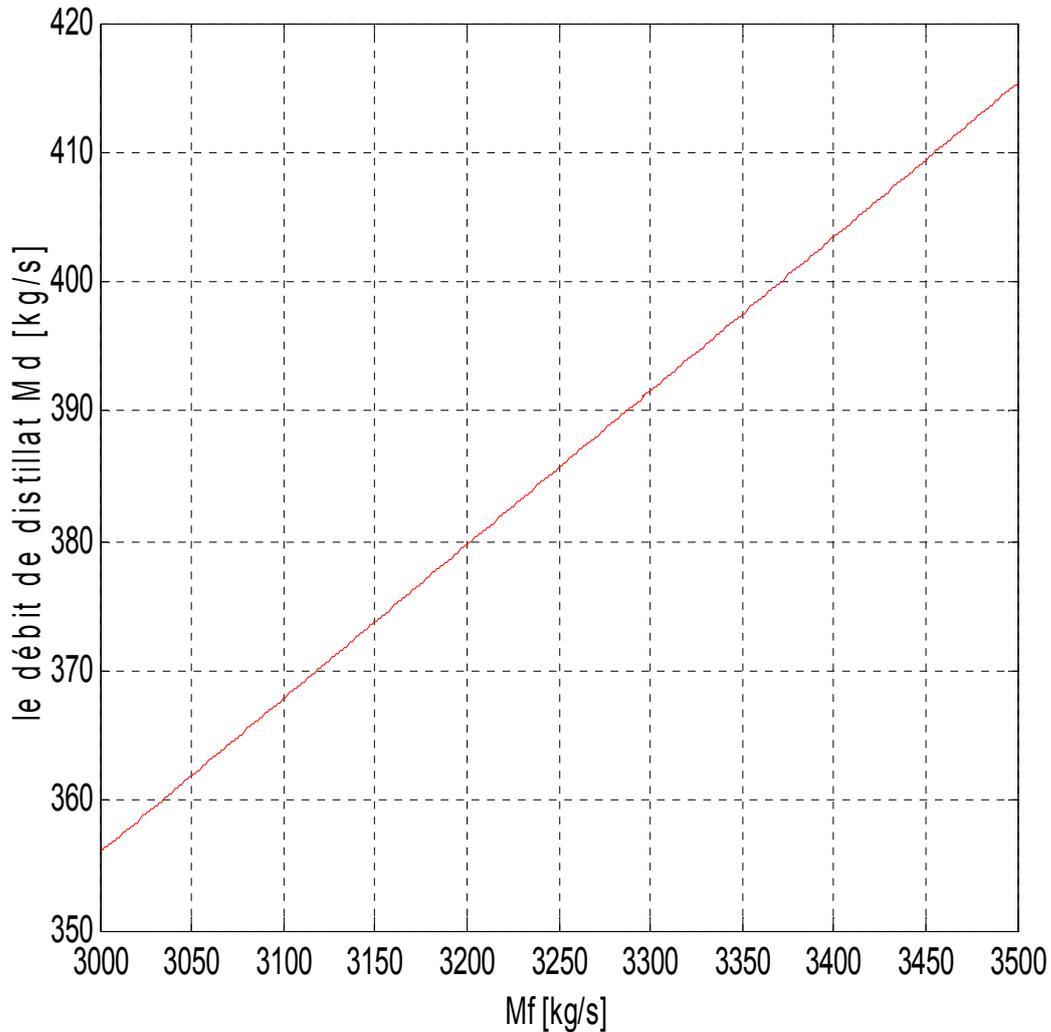


Figure 3.20 : Effet du débit d'eau de mer M_f sur le distillat produit M_d .

La figure 3.21 montre que la consommation de vapeur M_s augmente quand le débit d'eau de mer M_f augmente.

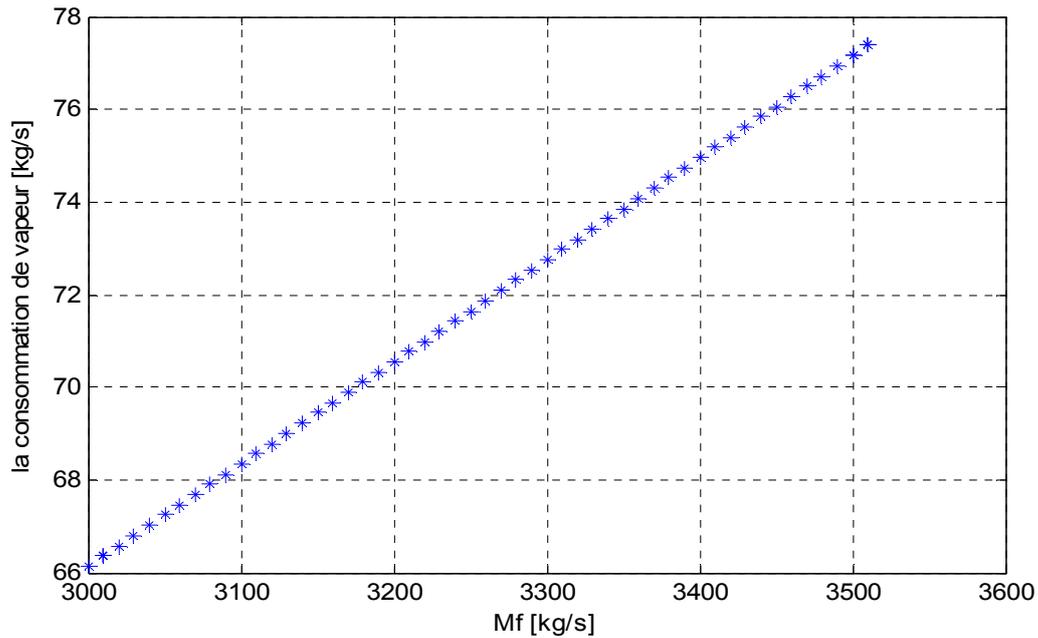


Figure 3.21 : Effet du débit d'eau de mer M_f sur la consommation de vapeur M_s .

3.4.4 Étude de changement de site :

Nous avons étudié trois sites algériens : Oran, Touggourt et Tamanrasset. La station proposée comporte 24 cylindro-parabolique de PTC 1800 à tubes verticaux, a les caractéristiques données par le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 : Caractéristiques de la station proposée

Nombre d'effets	24
la température de l'eau de mer d'alimentation (T_f) [c°]	25
Le débit d'eau de mer d'alimentation M_f [Kg/s]	3384.8
La salinité de l'eau de mer d'alimentation X_f [ppm]	42000
Température de la vapeur T_s [c°]	116
Température supérieure à la saumure T_0 [c°]	106
La salinité de la saumure souffle X_b [ppm]	47292.6
Le débit de la vapeur de chauffage M_s [Kg/s]	95.49

3.4.4.1 Site d'Oran :

Les résultats sont donnés pour le mois de juin

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- L'éclairement global :

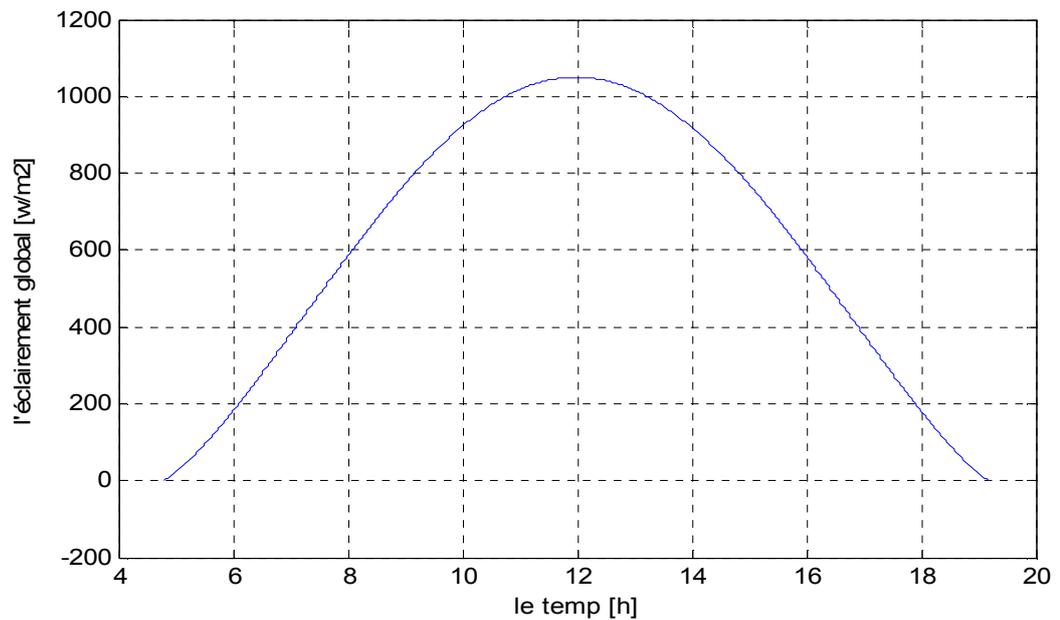


Figure 3.22: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site d'Oran

- L'éclairement direct :

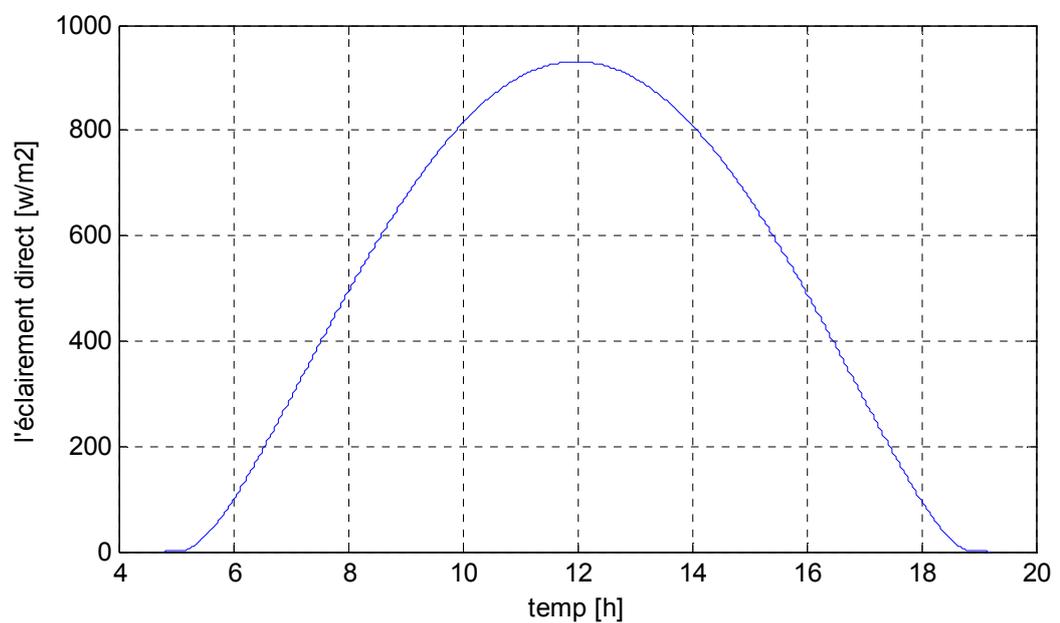


Figure 3.23: Graphe d'éclairement direct en fonction du temps pour le site d'Oran

- La température de sortie de cylindro-parabolique :

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

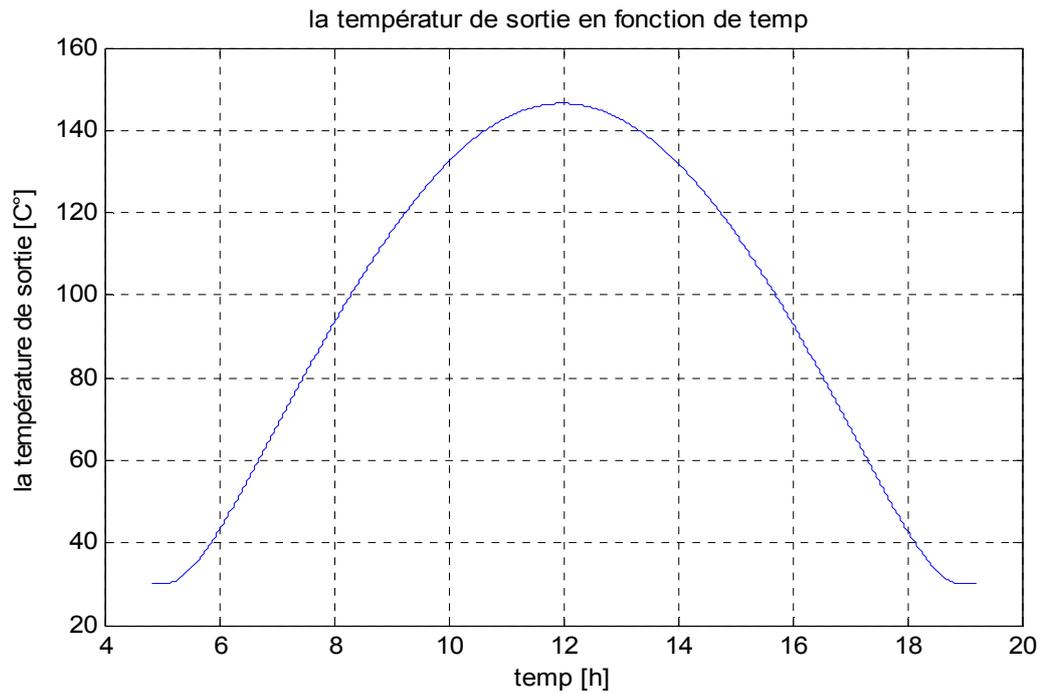


Figure 3.24: Graphe de la température de sortie en fonction du temps pour le site d'Oran

- La quantité de chaleur utile de cylindro-parabolique :

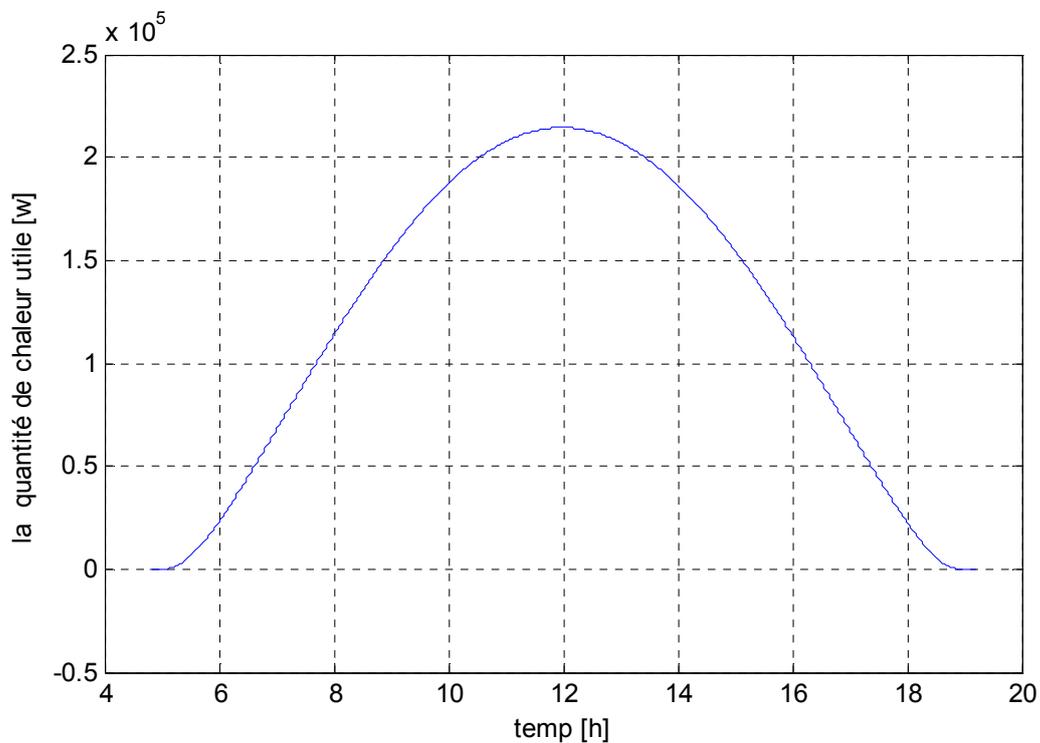


Figure 3.25: Graphe la quantité de chaleur utile en fonction du temps pour le site d'Oran

- La production de distillat :

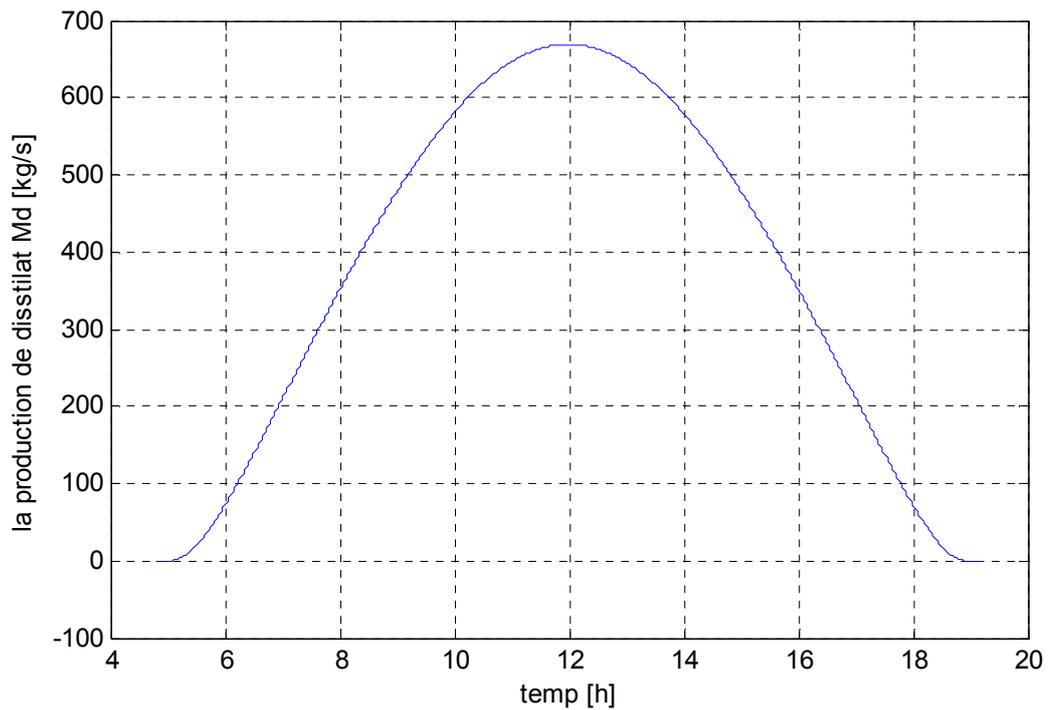


Figure 3.26: Graphe de la production de distillat en fonction du temps pour le site d'Oran

3.4.4.2 Site de Touggourt :

Les résultats sont donnés pour le mois de juin

- L'éclairement global :

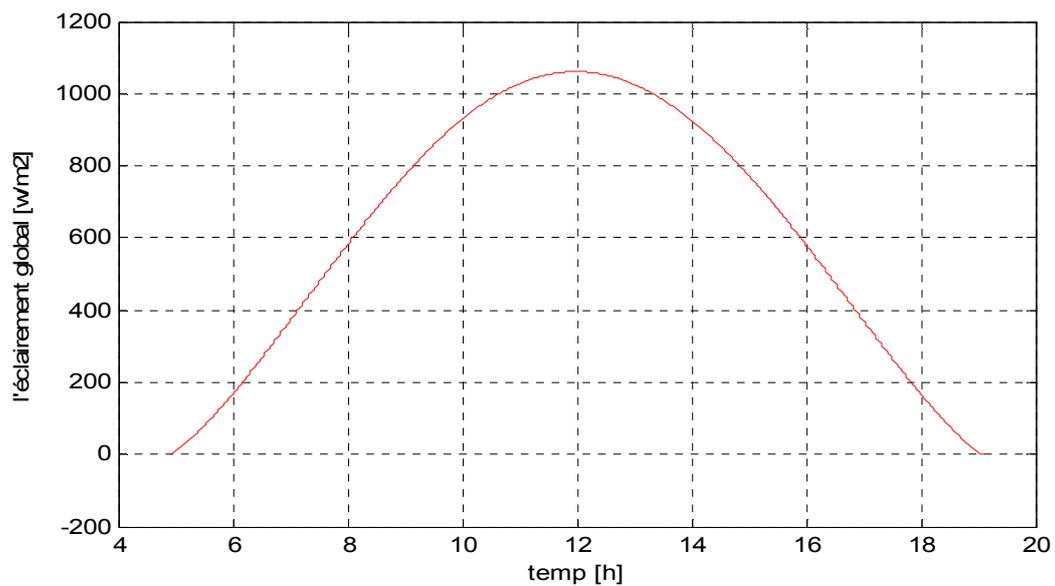


Figure 3.27: Graphe d'éclairement global en fonction du temps pour le site de Touggourt

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- L'éclairement direct :

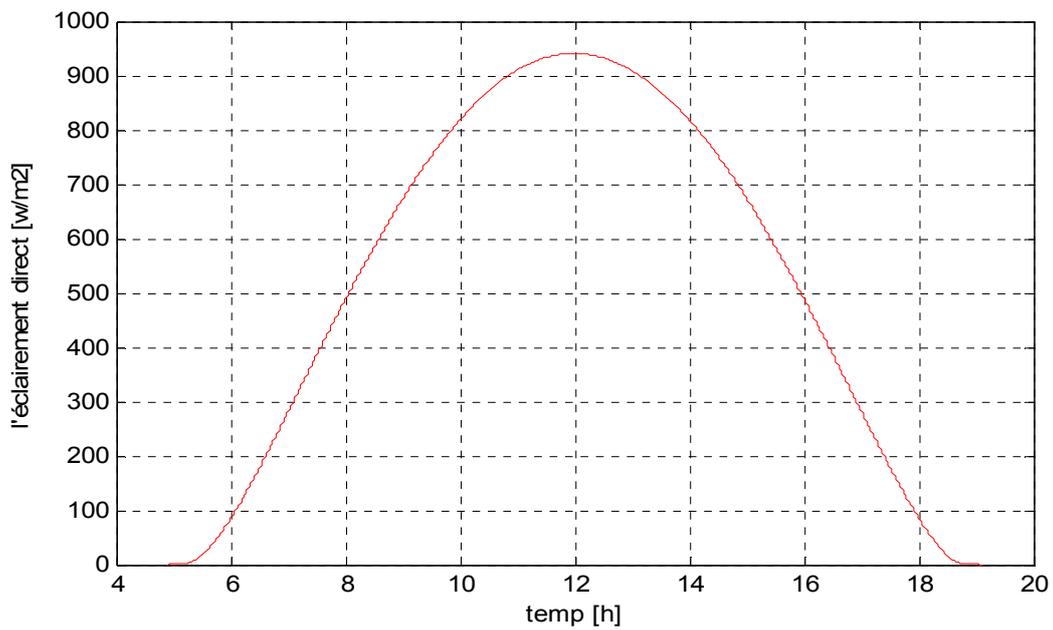


Figure 3.28: Graphe d'éclairement direct en fonction du temps pour le site de Touggourt

- La température de sortie de cylindro-parabolique :

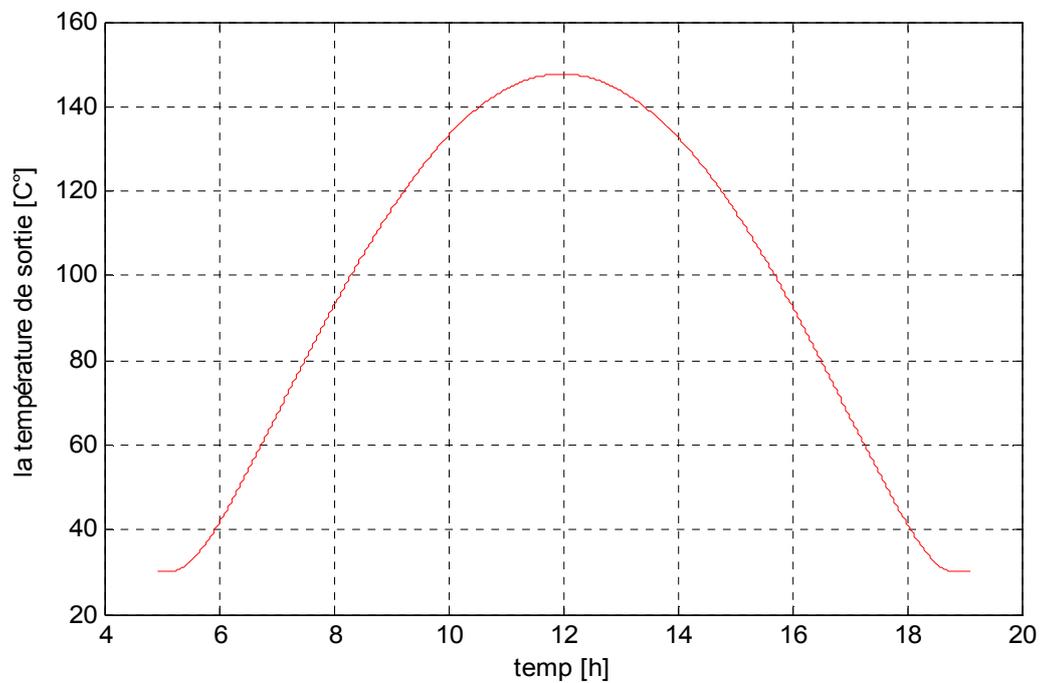


Figure 3.29: Graphe de la température de sortie en fonction du temps pour le site de Touggourt

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- La quantité de chaleur utile de cylindro-parabolique :

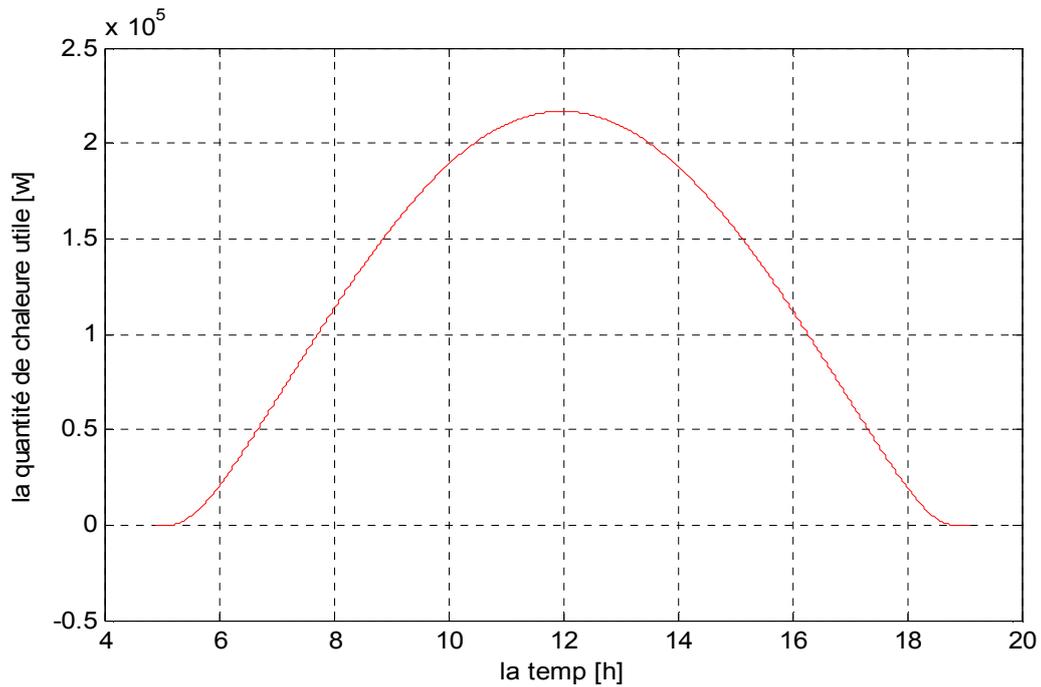


Figure 3.30: Graphe de la quantité de chaleur utile en fonction du temps pour le site de Touggourt

- La production de distillat :

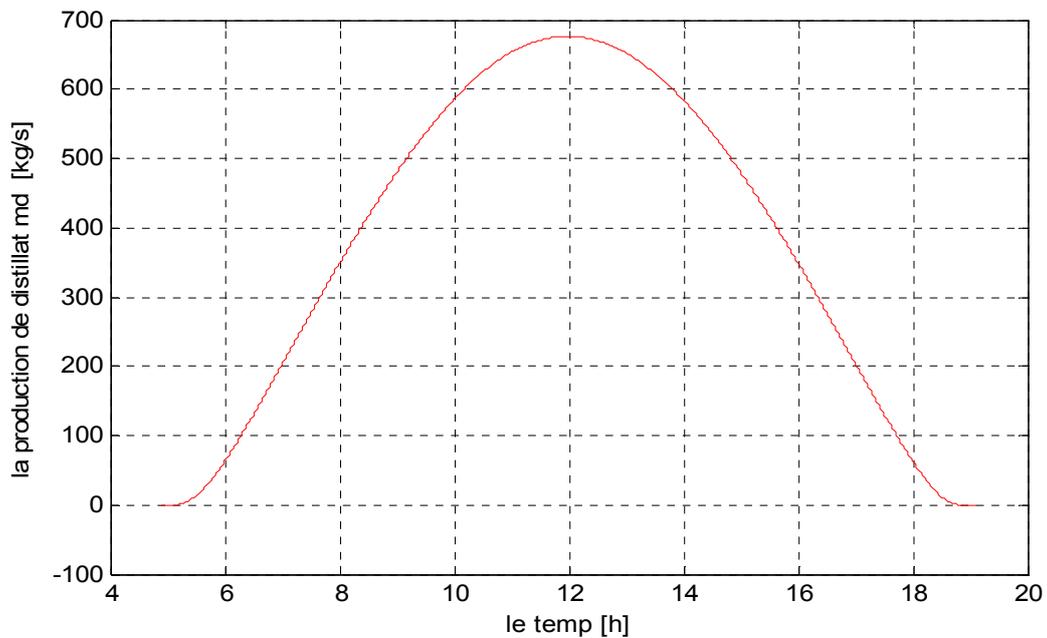


Figure 3.31: Graphe du débit de distillat en fonction du temps pour le site de Touggourt

3.4.4.3 Site de Tamanrasset : Les résultats sont donnés pour le mois de juin

- L'éclairement global :

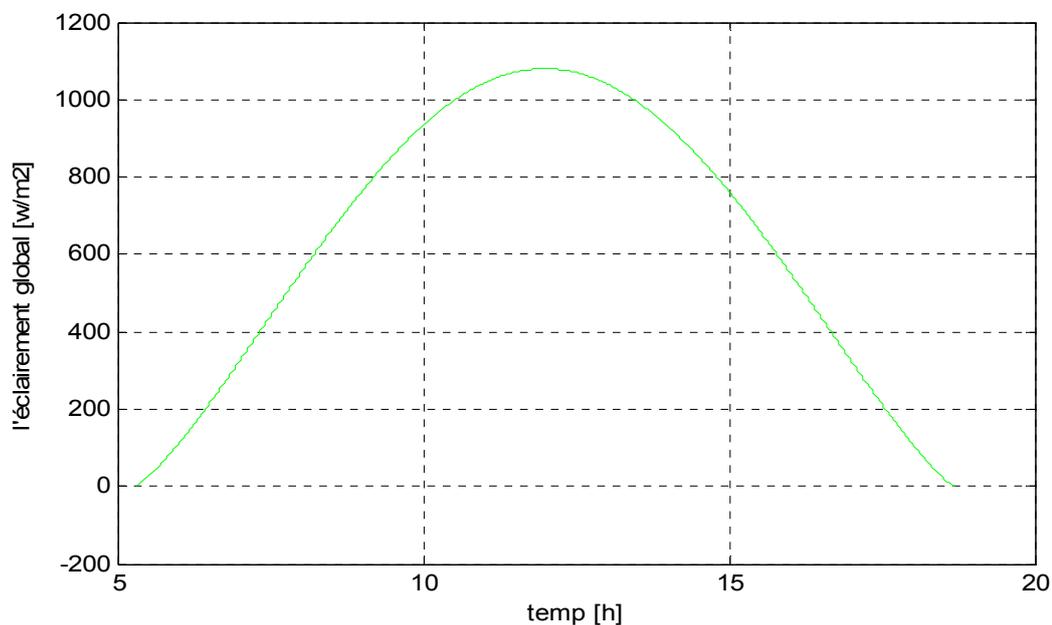


Figure 3.32: Graphe de l'éclairement global en fonction du temps pour le site de tamanrasset

- L'éclairement direct :

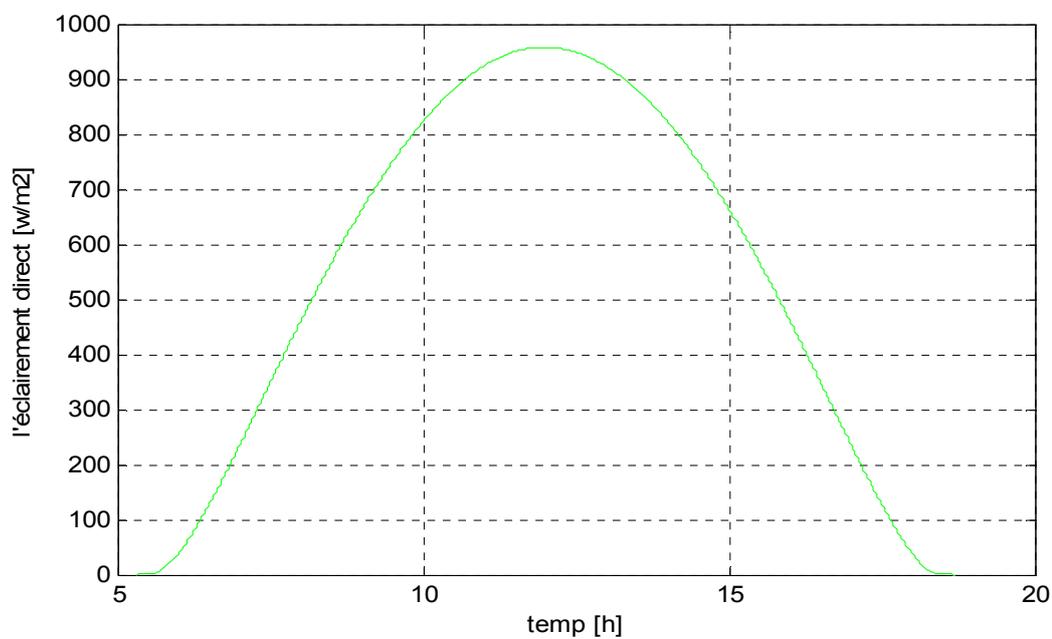


Figure 3. 33: Graphe de l'éclairement direct en fonction du temps pour le site de Tamanrasset

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- La température de sortie de cylindro-parabolique :

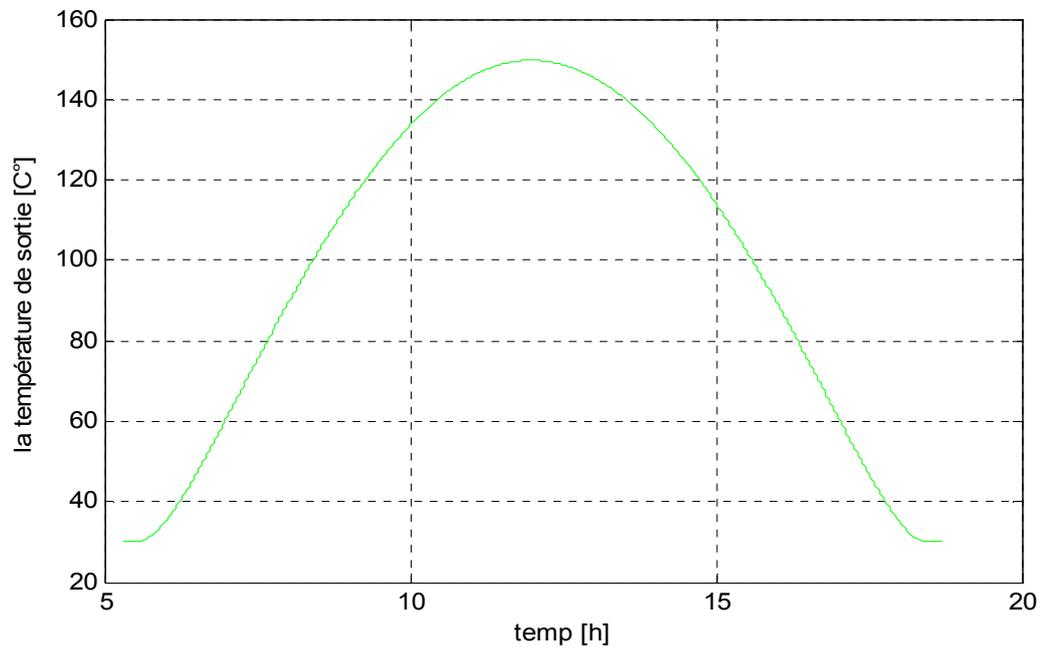


Figure 3.34: Graphe de la température de sortie en fonction du temps

- La quantité de chaleur utile :

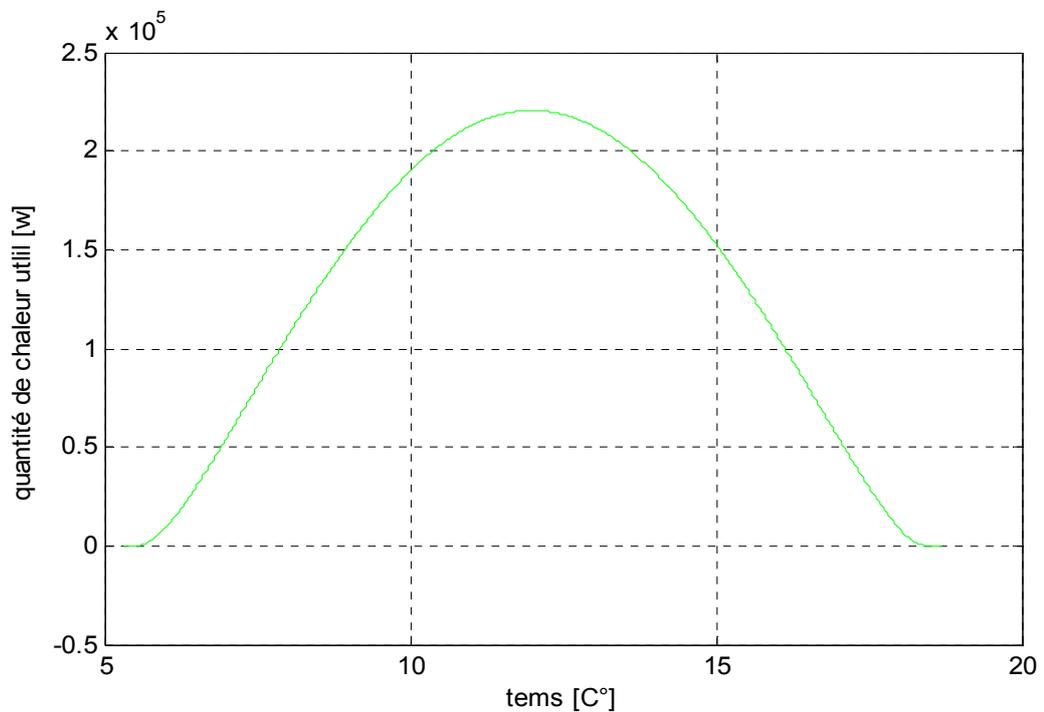


Figure 3. 35: Graphe de la quantité de chaleur utile en fonction du temps pour le site de tamanrasset

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

- La production de distillat :

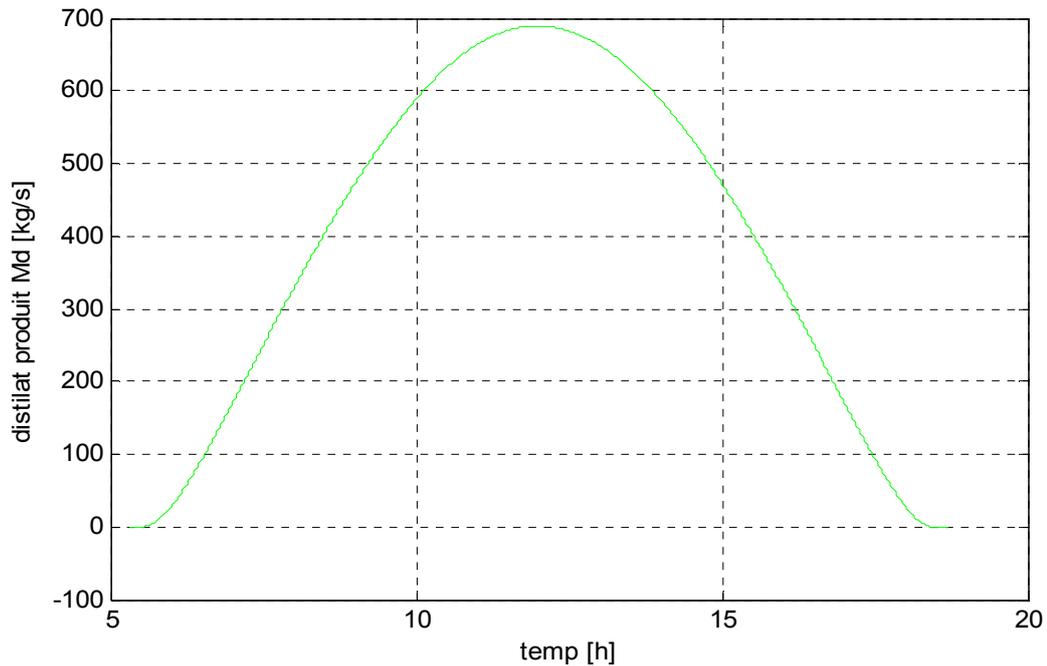


Figure 3. 36: Graphe de la production de distillat en fonction du temps

3.4.4.4 Interprétation des résultats:

Pour les trois sites étudiés, on constate que :

- Les graphes de l'éclairement direct et l'éclairement global ont une forme en cloche pour tous les jours de mois.
- La variation de la quantité de chaleur de cylindro-parabolique suit la même allure de celle de l'éclairement : si l'éclairement augmente, la quantité de chaleur augmente aussi. La même chose est remarquée pour la variation de la température de sortie du cylindro-parabolique et la production de distillat en fonction du temps.

En comparant les résultats entre les différents sites on remarque que le site de Tamanrasset présente les meilleures propriétés de fonctionnement, à savoir :

- Eclairement global le plus grand.
- Quantité de chaleur utile la plus importante.
- Production de distillat la plus élevée.

Chapitre 3 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Suite à ces résultats, on remarque que le site de Tamanrasset est le plus adapté pour réaliser une station de dessalement couplée avec un cylindro-parabolique.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats des modèles mathématiques utilisés, à savoir le modèle d'éclairement, le modèle de cylindro-parabolique et le modèle de système MSF-OT.

Ensuite, nous avons fait une étude paramétrique dans laquelle nous avons varié la température de la vapeur de chauffage, la température de l'eau de mer, la consommation de vapeur de chauffage, le débit d'eau de mer et le site. Nous avons trouvé que la production de distillat augmente linéairement avec la température d'eau de mer et la consommation de vapeur de chauffage.

En comparant les résultats entre les différents sites étudiés (Oran, Touggourt et Tamanrasset), nous avons remarqué que le site de Tamanrasset présente les meilleures propriétés de fonctionnement, à savoir :

- Eclairement global le plus grand ;
- Quantité de chaleur utile la plus importante ;
- Production de distillat la plus élevée.

Suite à ces résultats, on remarque que le site de Tamanrasset est le plus adapté pour réaliser une station de dessalement couplée avec un cylindro-parabolique.

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail était d'étudier la faisabilité du dessalement d'eau de mer à partir de la méthode MSF-OT fonctionnant en énergie solaire et plus précisément un concentrateur solaire cylindro-parabolique sur le site de Bousmail. Pour ce faire trois sous-modèles ont été élaborés, chacun représente un composant de la station étudiée. Il est utile de noter que le sous-modèle du système MSF comporte deux composants essentiels (Un réchauffeur de saumure. Une section de récupération de chaleur.). Un programme en MATLAB a été développé afin d'estimer les différentes performances du système considéré dans cette étude.

Dans ce travail, un ensemble de tâches ont été exécutées et des conclusions tirées :

- présentation une simulation dynamique d'une variation annuelle d'éclairement direct et global.
- Présentation une simulation dynamique d'un capteur cylindro-parabolique.

On obtient, comme résultat, la variation d'éclairement direct et global en fonction de temps pour le site de Bousmail

- Présentation une simulation dynamique d'un system MSF-OT

On obtient, comme résultat la variation de la quantité de distillat produit de système MSF-OT on fonction de nombre d'effets.

- nous avons faire une étude paramétrique de système MSF-OT couplé avec le concentrateur cylindro-parabolique on a varié la température de chauffage, la température d'eau de mer et la consommation de la vapeur de chauffage et on a observé l'influence sur le system MSF-OT
- nous avons changé le site de dessalement MSF-OT couplé avec le concentrateur cylindro-parabolique on a choisie 3 site algérienne Oran, Touggourt et Tamanrasset et on a comparé les résultats obtenue.
- le site de Tamanrasset est adéquat pour ce type d'installations

References

- [1] Le dessalement de l'eau de mer, quelle méthode de désalinisation de l'eau est actuellement la plus envisageable pour répondre aux problèmes de pénurie d'eau douce ? 2010, Recherches et Publications de Documents Oboulo.com
- [2] K. Abdul Mohsen Al-Shayji, Modeling, simulation and optimization of large scale commercial desalination plants, Thèse PhD 1998, Blacksburg – Virginia.
- [3] Office National des Statistique algérien.
- [4] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Edition Technique & Documentation Paris 2006.
- [5] Article rédigé par Viviane Renaudin (Maître de Conférences au Département Génie Chimique Génie des Procédés de l'IUT de Nancy Brabois, chercheur au LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique), CNRS, Nancy), relu par Guillaume Champion (Professeur agrégé à l'ENS).
- [6] T. Altman, New power and water co-generation concept with application of reverse osmosis (RO) desalination, Salzgitter Anlagenbau GmbH 2000.
- [7] P. Vaurs, Le dessalement de l'eau de mer, Juillet 2005.
- [8] BRUN, J.P. procédés de séparation par membranes, MASSON, (1989).
- [9] J. Wisniewski and A. Rozanska, Donnan Dialysis with anion-exchange membranes as a pretreatment step before electrodialytic desalination, Desalination 2006.
- [10] Dessalement d'eau de mer, Agro Paristech et Agence Française de Développement, Montpellier, 2009.
- [11] Patrick DANIS. dessalement de l'eau de mer , technique de l'ingénieur, Doc.J2700
- [12] RENAUDIN Viviane Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [Revue]. -Nancy Brabois : Educsol, 18 novembre 2003.
- [13] NISAN, S. Dessalement de l'eau de mer par les réacteurs nucléaires ,pdf ,(2007)
- [14] H.T. El-Dessouky and H.M. Ettouney, Fundamentals of salt water desalination, Chapter 6 Amsterdam 2002: Elsevier Science Ltd.

- [15] V. G. Gude , N. Nirmalakhandan , S. Deng, « Renewable and sustainable approaches for desalination », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol.14 ,2010, pp.2641–2654.
- [16] A. Al-Karaghoul, D. Renne, L. Kazmerski, « Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol.13 ,2009, pp.2397–2407.
- [17] D. Sagiea, E. Feinermanb, E. Aharonib, « Potential of solar desalination in Israel and in its close vicinity », *Desalination* Vol.139, 2001, pp.21–33.
- [18] S. A. Kalogirou, « Seawater desalination using renewable energy sources », *Progress in Energy and Combustion Science* Vol.31 ,2005, pp.242–281.
- [19] E. E. Delyannis, « Status of solar assisted desalination: a review », *Desalination* Vol.67, 1987, pp.3–19.
- [20] H. Lu, J.C. Walton, A.H.P. Swift, « Zero discharge desalination », *International Desalination Water Reuse* Vol.10, 2000, pp.35–43.
- [21] European Commission, « Desalination guide using renewable energies », 1998.
- [22] G. Caruso, A. Naviglio, « A desalination plant using solar heat as s heat supply, not affecting the environment with chemicals », *Desalination* Vol.122, 1999, pp.225–34.
- [23] L. Rizzuti, H. M. Ettouney, A. Cipollina, « Solar Desalination for the 21st Century », Edition Springer, 2006.
- [24] R.K. Suri, A. M.R. Al-Marafie, A. A. Al-Homoud and G. P. Maheshwari, *Desalination*, 71, 165 (1989).
- [25] H. Sharon and K. S. Reddy, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41, 1080 (2015).
- [26] D. Singh and S.K. Sharma, *Desalination*, 73, 191 (1989).
- [27] R. Kriesi, *Desalination*, 39, 109 (1981).
- [28] S.M.A. Moustafa, D. I. Jarrar and H. I. El-Mansy, *Sol. Energy*, 35,333 (1985).
- [29] F. Trieb and H. Muller-Steinhagen, *Desalination*, 220, 165 (2008).
- [30] S. Kalogirou, *Appl. Energy*, 76, 337 (2003).
- [31] Ch. Li, Y. Goswami and E. Stefanakos, *Renew. Sustain. Energy Rev.*,19, 136 (2013).

[32] TATA-DUCRU Farid Dessalement de l'eau de mer: bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critiques en fonction des contextes. - Paris : [s.n.], janvier 2009.

[33] S.C. Mullick and S.K. Nanda, '*An Improved Technique for Computing the Heat Loss Factor of a Tubular Absorber*', Solar Energy, Vol. 42, N°1, pp. 1-7, 1989.

[34] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek, «Étude et réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire aveugle» Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 11, N°3 (2008) 437 – 451.

[35] Zhou X, Xiao B, Liu W, Guo X, Yang J, Fan J. Comparison of classical solar chimney power system and combined solar chimney system for power generation and seawater desalination. Desalination 2010;250:249–56.

[36] Hamani Nadjette, Mémoire de magister, « Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident », Université de Biskra, 2005.

[37]http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user3775/documents/actes/Congres_2014/Communications/8551.pdf consulté le 1/6/2017

[38] http://www.cder.dz/download/Art14-2_5.pdf consulté le 1/6/2017

[39] http://www.cder.dz/download/Art17-4_5.pdf consulté le 2/6/2017

[34]http://www.sdiarticle1.org/prh/BJAST_5/2014/Revisedmanuscript_version2_8772.pdf consulté le 2/6/2017

[31] <http://www.mdpi.com/2227-9717/1/3/279/pdf> consulté le 2/6/2017

[32]<https://www.scirp.org/Journal/PaperInformation.aspx?PaperID=26786> consulté le 2/6/2017

[43]<https://pdfs.semanticscholar.org/4199/f1b7023bae37d70cc1a50f4be6959fbafe23.pdf> consulté le 2/6/2017

[44][http://www.cherd.ichemejournals.com/article/S0263-8762\(04\)72578-2/pdf](http://www.cherd.ichemejournals.com/article/S0263-8762(04)72578-2/pdf) consulté le 2/6/2017

[45] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S038092X85901410> consulté le 2/6/2016

[46] N. Nouah , K. Dahmani, N. Djennaoui et M. Brahimi, 'Estimation du flux de masse et de chaleur d'une installation de distillation à détente étagée (MSF) couplée à un capteur cylindro parabolique pour le dessalement d'eau de mer', *Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 499 - 506*

[47] Prof. Dr. Mohamed F. El-Refaie (2009), Concentrated Solar Thermal Power (1). Teaching Material for REMENA Masters Program. pg. 40.

[48] N. Jonotte, S. Meiser, D. Krueger, E. Luepfert, R. Pitz-Paal, S. Fischer & h. Mueller. QUASI-DYNAMIC ANALYSIS OF THERMAL PERFORMANCE OF PARABOLIC TROUGH COLLECTORS.

[49] A. Rabl (1985). Active Solar Collectors and Their Applications, New York: Oxford University Press

[50] Darwish, M.A., Abdel-Jawad, M., Aly, G.S., Technical and economical comparison between large capacity multi stage flash and reverse osmosis desalting plants, *Desalination*, 72(1989)367-379.

[51] De Gunzbourg, J., and Larger, D., Cogeneration applied to very high efficiency thermal seawater desalination plants, A concept. *Int. Desalination & Water Reuse Quart.*, 7(1998)38-41

[52] El-Dessouky, H.T., and Ettouney, H.M., Simulation of combined multiple effect evaporation - vapor compression desalination processes, 1^{er} IDA Int. Desalination Conference in Egypt, Cairo, Egypt (Sept. 1997).

[53] El-Dessouky, H.T., Alatiqi, I., Bingulac, S., and Ettouney, H.M., Steady-state analysis of the multiple effect evaporation desalination process, *Chem. Eng. Tech.*, 21(1998)15-29.

[54] El-Dessouky, H.T., Ettouney, H.M., and Al-Juwayhel, F., Multiple effect evaporation/vapor compression desalination process. *Trans. I. Chem. E.*, 78(2000)662-676.

[55] Genthner, K., and El-Allawy, M.M., Solutions for coupling a mechanical vapour compression distiller with a multi-stage-flash evaporator. *Desalination*, 45(1983)143-152.

- [56] Glueckstern, P., Potential uses of solar energy for seawater desalination. *Desalination*, 101(1995)11-20.
- [57] Power, B.R., *Steam Jet Ejectors for Process Industries*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [58] Temstet, C, and Laborie, J., Dual purpose desalination plant-high efficiency multiple-effect evaporator operating with a turbine for power production, *Proc. IDA World Congress on Desalination and Water Science*, Abu Dhabi, vol. 3, pp. 297-308, 1995.
- [59] William B. Stine and Michael Geyer (2001). *Power From The Sun*, Chapter 3. Retrieved December 6, 2011 from
- [60] William B. Stine and Michael Geyer (2001). *Power From The Sun*, Chapter 4. Retrieved December 8, 2011 from
- [61] Z. Morvay & D. Gvozdenac, PartIII Fundamentals for Analysis and Calculation of Energy and Environmental Performance. *Applied Industrial Energy and Environmental Management*: 1-9.
- [62] M. Collares- Pereira and A. Rabi, '*The Average Distribution of solar Radiation Correlation between Diffuse and Hemispherical and Daily and Hourly Insulation Values*', *Solar Energy*, Vol. 22, N°2, pp .155 - 164, 1979.
- [63] Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B., Contribution à l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie, février (2004).

Annexe

LES EQUATIONS DE BASE

A.1 Angle de calculs d'incidence

Cette section présente les équations pour le calcul de l'angle d'incidence (θ) Défini comme l'angle entre rayons solaires et la surface normale. L'angle d'incidence a une signification majeure dans l'évaluation de la performance du percepteurs solaire Laissez-nous d'abord définir les trois angles de base : angle d'heure(ω), angle de latitude (ϕ) et l'angle de déclinaison (δ)

A.2 Angles de base

A.2.1 Angle horaire (ω)

C'est la distance angulaire entre le méridien de l'observateur et le méridien dont le plan contient le soleil. L'angle d'heure peut être calculé par :

$$w = 15 \cdot (T_s - 12) \quad (A.1)$$

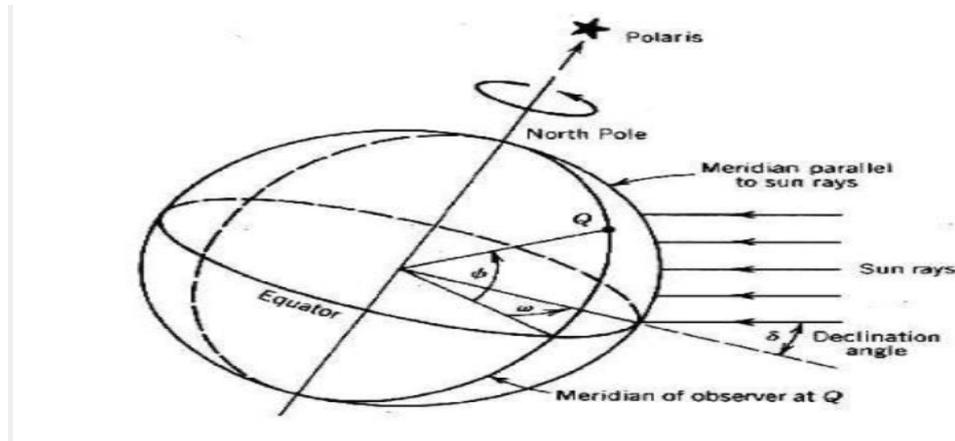


Figure A.1 Angles de Base

Où t_s est le temps solaire (égale 12 à solaire midi) qui diffère le local temps d'horloge (LCT). Pour n'importe quel point sur la terre, le solaire midi arrive quand le point fait face au soleil et son méridien est conformément aux rayons solaires. Le temps solaire peut être calculé (dans heures) par:

$$t_s = LCT + \left(\frac{EOT}{60}\right) - LC - DLS \quad (A.2)$$

Où EOT (l'équation du temps) est une correction en quelques minutes pour le vrai temps solaire, LC est la correction de longitude dans des heures et les DL sont la correction pour l'heure d'été qui est une heure si l'heure d'été est en vigueur.

L'équation du temps varie au cours de l'année et peut atteindre dix-sept minutes. L'approximation qui est précise dans 30 secondes [58] de l'équation du temps est :

$$EOT = 229.2 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B)$$

Où x est un angle qui est la fonction du jour numéroté N, commençant de janvier

1er (N = 1)

$$X = \frac{360(n-81)}{364} \quad (A.3)$$

La correction de longitude représente la différence entre l'heure locale et temps de méridien standard

$$L_c = \frac{(\text{longitude de méridien standard} - \text{longitude locale})}{15} \quad (A.4)$$

A.2.2 Angle de latitude (φ) :

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne dessinée d'un point sur surface de la terre au centre de la terre et le plan équatorial de la terre. Sud d'emplacements de l'équateur ont des angles de latitude négatifs et ceux-là au nord ont positif angles de latitude..

A.2.3 Angle de déclinaison (δ) :

C'est l'angle que l'orbite solaire fait avec le plan de l'équateur de la terre. Le l'angle varie comme la terre tourne autour du soleil. On montre l'angle de déclinaison

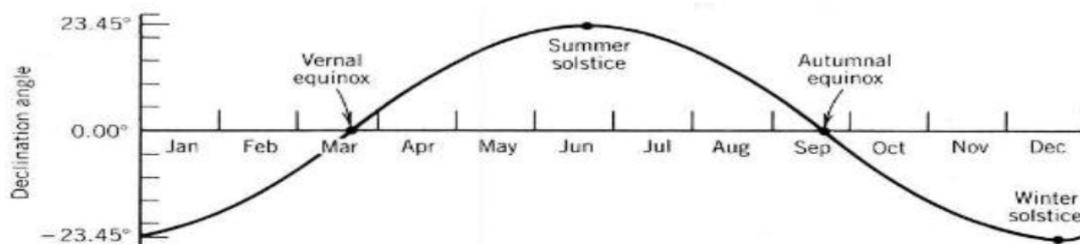


Figure A.2 : Variation d'angle de déclinaison [56].

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + J) \right] \quad (\text{A.5})$$

A.2.4 Angles solaires

Pour des demandes d'énergie solaire, nous devons définir la position du soleil de site (n'importe quel point sur la terre) pour calculer la quantité d'énergie solaire sera reçu par le système solaire. La position du soleil peut être décrite par deux angles : l'angle solaire d'altitude (α) et l'angle d'azimut solaire (β). Ceux-ci on montre des angles dans la figure A.3.

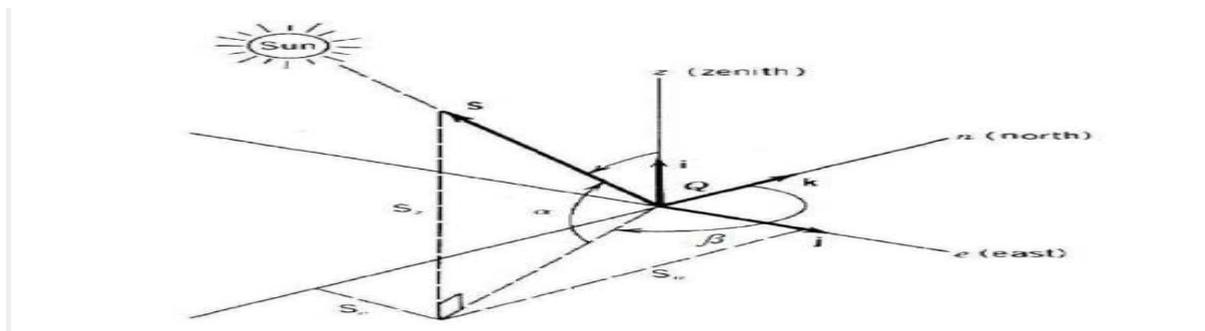


Figure A.3: système de coordonnées superficielles de la terre pour observateur à point Q exposition de l'angle d'azimut solaire β , l'angle solaire d'altitude α .

Ce est-ce que commode d'exprimer est les angles solaires en termes des trois angles de base ω , φ et δ pour identifier la position du soleil pour n'importe quel emplacement à tout moment. Référence [59] Fournit une dérivation détaillée des équations d'angles solaires comme les fonctions des trois angles de base.

A.2.5 la hauteur de soleil (α) :

La hauteur de soleil est l'angle entre la direction du centre géométrique du disque apparent du soleil et un plan horizontal contenant l'observateur. Il est donné par :

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (\text{A.6})$$

A.2.6 Angle d'azimut solaire (β) :

C'est l'angle, mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre sur le plan horizontal du nord indication d'axe de coordonnées à la projection du rayon centrale du soleil. Il est calculé comme :

$$\cos\beta' = \frac{\sin\delta \cdot \cos\varphi - \cos\delta \cdot \sin\delta \cdot \cos\omega}{\cos\alpha} \quad (\text{A.7})$$

$$\sin\omega > 0 \beta = 360 - \beta'$$

$$\sin\omega \leq 0 \beta = \beta'$$

A.2.7 Angle d'incidence (θ) :

Comme précédemment défini, l'angle d'incidence est l'angle entre les rayons solaires et la surface normale. Calcul θ est très important pour le système solaire la conception et l'évaluation de performance depuis la quantité (le montant) d'énergie solaire rassemblée sont réduit par le cosinus de cet angle. La figure A.4 dépeint une ouverture fixe qui est orienté à angle Ω (angle d'azimut d'ouverture) et incliné à angle λ (Inclinez l'angle). on donne l'angle d'incidence pour cette ouverture :

$$\cos\theta = \sin\alpha \cdot \cos\lambda + \cos\alpha \cdot \sin\lambda \cdot \cos(\Omega - \beta) \quad (\text{A.7})$$

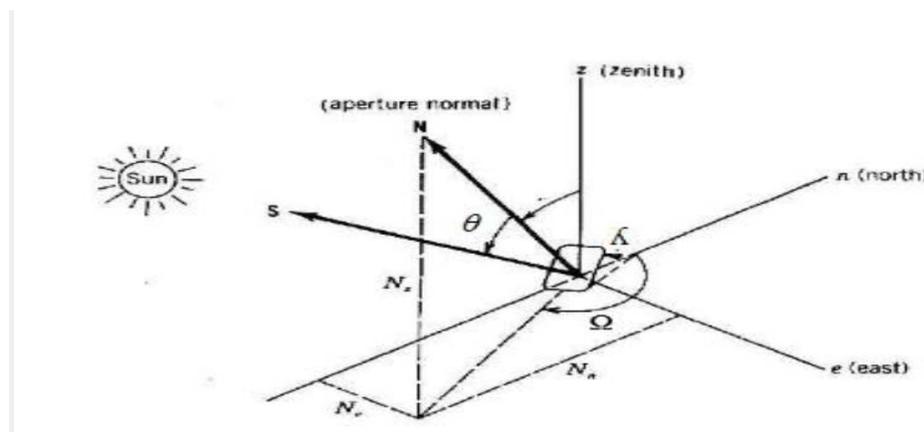


Figure A.4 : une ouverture fixe avec son orientation définie par l'angle (λ) d'inclinaison

A.2.8 Angle d'azimut d'ouverture (Ω) :

Pour une ouverture avec un système de traçabilité d'axe seul (comme cuvette parabolique), l'ouverture est tournée jusqu'à ce que les rayons solaires et l'ouverture normale ne sont coplanaire comme illustré dans la figure A.5.

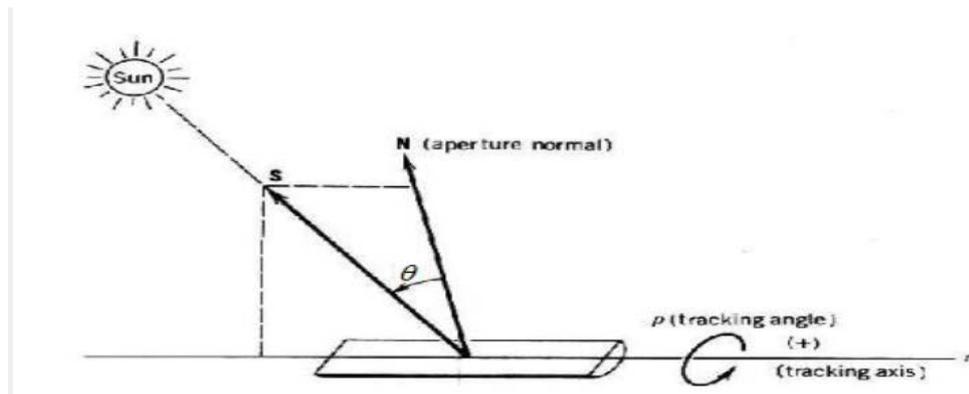


Figure A.5 : la trace ouverture tournant de l'axe r suivant un seul axe

L'angle de dépointage (ρ) rotation de mesures de l'axe de dépointage r avec ($\rho = 0$) quand N est vertical. a décrivez ce plan de dépointage en termes d'angles solaires, les coordonnées u, b et r doit être tourné par un angle Ω du z, e et des coordonnées de n cela ont été utilisé pour décrire les angles solaires. L'angle de dépointage peut être calculé par [60]

$$\tan \rho = \frac{\sin(\beta - \Omega)}{\tan \alpha} \quad (\text{A.8})$$

On donne la valeur de l'angle d'incidence pour cette ouverture [45]

$$\cos \theta = [1 - \cos^2(\alpha) \cdot \cos^2(\beta - \Omega)]^{1/2} \quad (\text{A.9})$$

Pour notre système, l'angle $\Omega = 71^\circ$

A.3 les pertes par effet d'ombres :

La largeur de concentrateur effective est donnée par :

$$W_e = X \cdot W \quad (\text{A.10})$$

Où $X \in [0; 1]$, une valeur de 0 pour X signifie des ombres complètes tandis qu'une valeur de 1

Pour X ne signifie aucune ombre du concentrateur. Aussi, X peut être écrite comme

$$\frac{W}{2} - W \cdot \left(\frac{1}{2-X} \right) = S \cdot \sin \alpha_p = X \cdot W \quad (\text{A.11})$$

$$X = \frac{s \cdot \sin \alpha_p}{W} \quad (\text{A.12})$$

Où α_p est l'angle de profil solaire qui est défini comme l'angle entre le plan horizontal et le plan qui contient l'axe de perceuteur et le rayon solaire. De la figure 4. 12 α_p peuvent écrit comme :

$$\tan\alpha_p = \frac{\tan\alpha \cdot \cos(90-\Omega)}{\cos(\beta-90)} \quad (\text{A.13})$$

Il est important de limiter X pour être dans l'intervalle [0,1]

$$X = \min \left[\max \left(0, s \cdot \frac{\sin\alpha_p}{W} \right); 1 \right] \quad (\text{A.14})$$

La substitution X dans l'équation 4.4.1 l'effectif peut être finalement écrite comme

$$W_e = \min \left[\max \left(0, s \cdot \frac{\sin\alpha_p}{W} \right); 1 \right] \cdot W \quad (\text{A.15})$$

Nous définissons maintenant la rangée hachurant le facteur (f_{RS}) qui représente la rangée mutuelle hachurant des pertes

$$f_{RS} = \frac{W_e}{W} \quad (\text{A.16})$$

L'effet d'ombre de rangée total dans le champ solaire est exprimé par la rangée solaire des champs ombres(Hachure) de facteur F_{RS}

$$F_{RS} = \frac{(W_e)t}{W_t} \quad (\text{A.17})$$

Où $(W_e)t$ est l'addition de la largeur effective W pour tous les perceuteurs et le W_t sommes L'addition de la largeur d'ouverture totale dans le champ solaire.

A.4 Les pertes de chaleur de Tuyauterie :

On montre une section mutuelle dans la conduite solaire des champs dans la figure 4. 14 avec le HTF Courant à l'intérieur de la conduite à température T_m (la température HTF moyenne à travers le champ solaire), les pertes de chaleur du HTF à l'environnement Q_p est dirigé par :

$$Q_p = U_p \cdot A_0 \cdot (T_m - T_a) \quad (\text{A.17})$$

$$A_0 = \pi \cdot D_3 \cdot L_p \quad (\text{A.18})$$

Où A_0 : la surface extérieure de la conduite isolée, [m²].

L_p : longueur de conduite totale, [m].

U_p : le coefficient de transfert thermique global de la conduite isolée, [W/m². K]

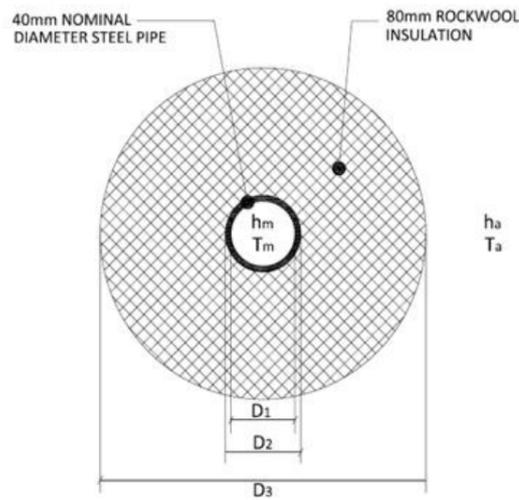


Figure A.6 : une section mutuelle de la conduite cylindro-parabolique .

Le modèle de base pour calculer U_p [W/m². K] est [61]

$$U_p = \frac{1}{\frac{D_s}{D_1 \cdot h_m} + \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \cdot D_s}{2K_p} + \frac{\ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right) \cdot D_s}{2K_i} + \frac{1}{h_a}} \quad (\text{A.19})$$

Où

h_m : Coefficient de transfert thermique à l'intérieur de la conduite à T_m [W/m². K]

h_a : Coefficient de transfert thermique à la surface d'isolation extérieure à T_a [W/m².K]

K_p : Conductivité thermique de conduite à T_m [W/m.K]

K_i : Conductivité thermique d'isolation à T_m [W/m.K]

La conductivité thermique d'acier au carbone s'étend de 55 W/m. K à 0.0°C à 45W/m. K à 200°C tandis que la conductivité thermique pour isolation Rockwool Gammes de 0.037 W/m. K à 50°C à 0.088 W/m. K à 300°C [58].

Les calculs du *coefficient* de transfert thermique convectif seront (hm) effectués en utilisant les équations citées supra.

$$h_m = \frac{K_w \cdot N_u}{D_1} \quad (\text{A.20})$$

$$R_e = \frac{D_1 \cdot V \cdot \rho_w}{\mu_w} \quad (\text{A.21})$$

$$P_r = \frac{\mu_w}{K_w} \quad (\text{A.22})$$

$$N_u = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (R_e - 1000) \cdot P_r}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \cdot (P_r^{0.67} - 1)} \quad (\text{A.23})$$

$$f = (0.79 \cdot \ln(R_e) - 1.64)^{-2} \quad (\text{A.24})$$

Où

K_w : Conductivité thermique du fluide à T_m [W/m. K]

N_u : Nombre de Nusselt

R_e : Nombre de Reynolds

P_r : Nombre de Prandtl

V : La vitesse moyenne du fluide [m/s]

ρ_w : Densité du liquide à T_m [kg/m³]

C_{p_w} : Chaleur spécifique du fluide à T_m [J/kg. K]

μ_w : viscosité dynamique à T_m [N.s/m²]

De même le coefficient de transfert thermique convectif sera a calculé utilisant les équations suivant pour la convection naturelle :

$$R_a = \frac{K_a \cdot N_u}{D_3} \quad (\text{A.25})$$

$$P_r = \frac{\mu_a \cdot C_{pa}}{K_a} \quad (\text{A.26})$$

$$G_r = \frac{D_3 \cdot \mu_a^2 \cdot g \cdot \Delta T \cdot b}{\mu_a^2} \quad (\text{A.27})$$

$$R_a = G_r \cdot P_r \quad (\text{A.28})$$

$$N_u = \left[0.6 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \quad (A.29)$$

Où

k_a : Conductivité thermique d'air à T_a , [W/m. K]

C_{p_a} : Chaleur spécifique d'air à T_a , [J/kg. K]

μ_a : Viscosité dynamique d'air à T_a , [N.s/m²]

b : Coefficient d'expansion pour air à T_a , [1/K]

G_r : Nombre de Grashof [sans dimensions]

g : Gravitation = 9.81, [m/s²]

R_a : Nombre de Rayleigh

ΔT : La différence de température entre l'ambient et la surface extérieure,[K]

A.5 Calcule la température de sortie en tout point X du tube absorbeur par l'équation [61] :

$$T_{fs}(x) = \left(\frac{C_{I_b}}{U_L} + T_{amb} - T_{fe} \right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{F' \pi U_L D_{Ae} X}{\dot{m} C_p}\right) \right] + T_{fe} \quad (A.30)$$

Le coefficient des pertes thermiques est donné par l'expression suivante :

$$U_L = \left(\frac{1}{C_1 \left[\frac{T_A - T_{amb}}{1+f} \right]^{0.25}} + \frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \times \frac{1}{h_v} \right)^{-1} + \left(\frac{\sigma (T_A^2 + T_{amb}^2) (T_A + T_{amb})}{\varepsilon_A - 0.04(1 - \varepsilon_A) \left(\frac{T_A}{450} \right) - \left[\frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \times \left(\frac{1}{h_v} \right) + f \varepsilon_v \right]} \right) \quad (A.31)$$

Le facteur tient compte des pertes dues au vent, et qui peut être obtenu par l'équation suivante: f

$$f = \frac{D_{A,i}}{D_{A,i}^{1.4}} (0.61 + 1.3 \varepsilon_A) h_v^{-0.9} \exp(0.00325(T_A - 273)) \quad (A.32)$$

Et où, h_v est le coefficient par convection du au vent, est donné par:

$$h_v = 4V_{vent}^{0.58} \times D_{v,e}^{-0.42} \quad (A.33)$$

Où C_1 , est donné par l'expression empirique suivante:

$$C_1 = \frac{1.45+0.96(\varepsilon_A-0.5)^2}{D_{A,i}(1/D_{A,i}^{0.6}+D_{A,i}^{0.6})^{1.25}} \quad (\text{A.34})$$

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_e \ln(D_e/D_i)}{2K} \right)} \quad (\text{A.35})$$

La concentration géométrique est donner par :

$$C = \frac{(W-D_{A,e})L}{\pi D_{A,e} L} \quad (\text{A.36})$$

Où

T_{amb} : la température ambiante [k°]

T_A : la température du tube absorbeur [k°]

$D_{A,i}$: Diamètre intérieure du tube absorbeur [m]

$D_{A,e}$: Diamètre extérieure du tube absorbeur [m]

$D_{v,e}$ Diamètre extérieure du verre [m]

σ : constant de Stefan Boltzmann [W m⁻² K⁻⁴]

ε_A : emissivité de l'absorbeur

ε_v : emissivité du vitrage

K : conductivité thermique [W/m. K]

Le fluide caloporteur choisi, est le **Biphenly-Diphenyl Oxide** (Therminol VP-1)

Chaleur spécifique :

$$C_p(T) = 100(1.509 + 0.002496 \times T + 0.0000007888 \times T^2) \quad (\text{A.37})$$

Conductivité thermique :

$$K(T) = 0.1381 - 0.00008708 \times T - 0.0000001729 \times T^2 \quad (\text{A.38})$$

Viscosité dynamique :

$$\nu(T) = \exp\left(\frac{544.149}{T+114.34} - 2.59578\right) \times 10^{-6} \quad (\text{A.39})$$

A.6 La corrélation utilisée dans le sous model de MSF :

La chaleur latente de la vapeur (λ_s), vapeurs de distillat (λ_i) et condenseur (λ_{ci}) peut être calculé en utilisant les équations suivantes :

$$\lambda_s = 2589.583 + 0.9156 \cdot T_s - 4.834 \cdot T_s^2 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.40})$$

$$\lambda_i = 2589.583 + 0.9156 \cdot T_i - 4.834 \cdot T_i^2 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.41})$$

$$\lambda_{ci} = 2589.583 + 0.9156 \cdot T_{ci} - 4.834 \cdot T_{ci}^2 \cdot 10^{-2} \quad (\text{A.42})$$

La pression de la vapeur (P_s) est obtenue par des corrélations développées par EI-DESSOUKY et d'autres. [63] :

$$p_s = 1000 \cdot \exp \left[\frac{-3892.7}{T_s + 273.15 - 42.6776} + 9.5 \right] \quad (\text{A.43})$$

Où P est en kPa et T est en °C.

La capacité thermique de l'eau est obtenue en utilisant la relation suivante :

$$C_p = [(a + b \cdot T) + (c \cdot T^2) + (d \cdot T^3)] \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.44})$$

Avec :

$$a = 4206.8 - (6.6197 \cdot s) + (1.2288 \cdot s^2 \cdot 10^{-2})$$

$$b = 1.12062 + (5.4178 \cdot s \cdot 10^{-2}) + (1.2288 \cdot s^2 \cdot 10^{-4})$$

$$c = 1.12062 \cdot 10^{-2} + (5.3566 \cdot s \cdot 10^{-4}) + (2.2719 \cdot s^2 \cdot 10^{-5})$$

$$d = 6.8777 \cdot 10^{-7} + (5.3566 \cdot s \cdot 10^{-6}) + (2.2719 \cdot s^2 \cdot 10^{-9})$$

$$s = \frac{X_f}{1000}$$

La corrélation de densité pour l'eau de mer est donnée par El-Dessouky et Ettouney (2002):

$$\rho = 10^3 (A_1 F_1 + A_2 F_2 + A_3 F_3 + A_4 F_4) \quad (\text{A.45})$$

$$A_1 = 4.032219 G_1 + 0.115313 G_2 + 3.26 \times 10^{-4} G_3$$

$$A_2 = -0.108199 G_1 + 1.571 \times 10^{-3} G_2 - 4.23 \times 10^{-4} G_3$$

$$A_3 = -0.012247 G_1 + 1.74 \times 10^{-3} G_2 - 9 \times 10^{-6} G_3$$

$$A_4 = 6.92 G_1 \times 10^{-4} - 8.7 \times 10^{-5} G_2 - 5.3 \times 10^{-5} G_3$$

$$B = \left(\frac{2C}{100} - 150 \right) / 150$$

$$G_1 = 0.5$$

$$G_2 = B$$

$$G_3 = 2B^2 - 1$$

$$A = (2T - 200) / 160$$

$$F_1 = 0.5, F_2 = A, F_3 = 2A^2 - 1, F_4 = 4A^3 - 3A$$

Dans les équations ci-dessus ρ est la densité de l'eau de mer en kg / m^3 , C est la salinité de l'eau de mer en ppm, et T est la température de l'eau de mer en $^\circ\text{C}$. Cette corrélation est valable sur l'intervalle suivant:

$$0 \leq C \leq 160000 \text{ ppm} \quad \text{et} \quad 10 \leq T \leq 180 \text{ } ^\circ\text{C}$$