



PROMES-CNRS



LESEE-2iE

PROCEDES DE DESSALLEMENT D'EAU DE MER PAR ENERGIE SOLAIRE A CONCENTRATION

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE
ENERGIE ET GENIE DES PROCEDES INDUSTRIELS**



Présenté et soutenu publiquement le 16 juin 2010

Par: TIADJOUÉ Benjamain

Travaux dirigés par:

Pr. Xavier PY

Directeur école doctorale de l'université de Perpignan-France

Laboratoire PROMES UPR CNRS 8521

Dr. Yao AZOUMAH

Responsable du laboratoire LESEE -2iE

Jury d'évaluation:

Président: Pr Yézouma COULIBALY

Membre: Dr Joël BLIN

Promotion 2009/2010

DEDICACE

A Dieu, source de toute intelligence et de mes efforts de chaque jour

A mes grands parents, parents, frères et sœurs

A mon grand frère et tuteur, Jean Vijay TAMIADJI

Qu'ils trouvent ici, tout l'honneur qui leur revient !

REMERCIEMENTS

Les travaux qui sont ici présentés ont été effectués au sein du Laboratoire d'Énergie Solaire et Économie d'Énergie (LESEE) du 2iE Ouagadougou, en collaboration avec le laboratoire Procédés, Matériaux et Énergie solaire (PROMES –CNRS UPR 8521) de l'université de Perpignan, qui nous a proposé ce thème.

Je remercie la direction de l'UTER Énergie et Génie des Procédés Industriels et du laboratoire LESEE, représentées respectivement par Pr Yézouma COULIBALY et Dr Yao AZOUMAH pour les moyens matériels qui m'ont été accordés et mis à ma disposition et surtout du soutien et des conseils de Dr Yao AZOUMAH en tant que second directeur de ce mémoire.

Je suis sensible à l'honneur que m'a fait mon directeur de mémoire, le Professeur Xavier PY, du laboratoire PROMES et responsable de l'école doctorale de l'université de Perpignan, en retenant ma candidature pour cette recherche, et aussi pour tout son encadrement. Je le prie de bien vouloir trouver ici l'expression de ma gratitude.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur MADIEUMBE Gaye, ingénieur-chercheur du LESEE qui m'a aidé au cours de la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à l'équipe administrative et académique du 2iE, pour leur disponibilité durant notre formation, plus particulièrement à Monsieur Paul GINIES, Directeur Générale du 2iE.

Mes remerciements s'adressent à tout le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France au Cameroun pour son soutien durant notre formation.

Enfin, je remercie toute ma famille pour son aide inestimable, en particulier ma maman, SIKONHE Christine pour son amour et ses prières formulées chaque jour pour moi.

Que tous mes amis et camarades du Laboratoire LESEE ainsi que ceux du laboratoire PROMES de Perpignan, Antoine MEFFRE, Jean Baptiste dont j'ai pu apprécier l'esprit d'entraide, soient ici remerciés.

RESUME/ ABSTRACT

De nombreux pays de notre planète sont menacés par des graves pénuries d'eau. Face à un accroissement des besoins en eau pour l'alimentation, l'agriculture et l'industrie et face à une démographie de plus en plus croissante, la difficulté d'approvisionnement en eau potable se présente comme un véritable fléau à la vie humaine sur terre et source de beaucoup de maladies autour de nous. Pour palier à ce problème majeur de notre siècle, le dessalement de l'eau de mer se présente comme un moyen industriel fiable de production pouvant couvrir les besoins en eau douce de la plus part des pays du monde. Cette technique qui existe depuis fort longtemps et appliquée dans des pays dits « riches en pétrole », comme l'Arabie Saoudite, l'Algérie, le Koweït, le Qatar, la Libye..., exige des grands investissements qui sont fréquemment au delà des moyens des pays en voie de développement. Le coût de ces investissements revient à la consommation de l'énergie au cours du cycle de production de l'eau douce.

L'approvisionnement en eau potable avec les besoins modestes de l'eau peut être assuré par une alimentation d'énergie primaire solaire thermodynamique. Par concentration des rayons solaire on arrive à produire de l'énergie thermique nécessaire pour le dessalement de l'eau. Dans cette étude nous nous limitons à une présentation de cette technique de dessalement, un aperçu sur les régimes qu'on observe au cours de l'ébullition de l'eau lors de l'évaporation. Nous finirons par une application avec la construction d'un concentrateur solaire parabolique et quelques analyses, faites à partir de ce prototype.

Mots clés : *Dessalement, concentration solaire, eau de mer, eaux saumâtre.*

Many countries of our planet are threatened by severe water shortages. Facing growing water needs for food, agriculture and industry and considering, the rapid pace of population growth, the increasing difficulty in assuring the supply of drinking water is an impediment to human welfare on earth and the source of many diseases around us. To overcome this major problem of our century, the desalination of seawater is seen as a means of reliable industrial that could cover the freshwater needs of the greater part of the world. This technique has long been available and applied in some oil rich countries, like Saudi Arabia, Algeria, Kuwait,

Qatar, Libya ..., but has proven to require huge investments that are often beyond the means of developing countries. The cost of these investments is the consumption of energy during the freshwater production.

The supply of drinking water with low water needs can be provided by primary thermal solar energy supply. By concentrating solar rays, we manage to produce thermal energy needed for desalination of water. In this study we limit ourselves to a presentation of this technique of desalination, an overview on regimes observed during the boiling of water by evaporation. We will finish by an application: the construction of a solar concentrator dish and some analysis made from this prototype.

Keywords: *desalination, solar concentration, sea water, brackish water*

ABREVIATIONS ET LEXIQUE

➤ LEXIQUES

τ	Efficacité optique du capteur	[-]
U	coefficient de pertes thermiques	[W/m ² /K]
I	puissance solaire directe incidente	[W/m ²]
S_c	surface du capteur	[m ²]
S_a	surface de l'absorbeur	[m ²]
T_{ext}	température extérieure	[°C]
T_e	température initiale de l'eau salée à l'entrée du récepteur	[°C]
\dot{m}	débit de l'eau dans le récepteur	[kg/s]
T_s	température de l'eau à la sortie du récepteur	[°C]
Q_{ex}	puissance thermique reçue par l'eau	[W]
P_{sat}	pression de saturation de l'eau dans le récepteur	[bar]
T_P ou T_W	température de la paroi chauffante	[°C]
T_e	température d'ébullition de l'eau	[°C]
T_{sat}	température de saturation de l'eau à la pression P	[°C]
Q_P	densité du flux de chaleur transmis par la paroi chauffante	[W]
ΔT_e	différence de température entre T_p et T_{sat}	[°C]
N	nombre de site de production de bulles dans le liquide	[-]
P	pression totale au sein du liquide	[bar]
R	rayon de courbure de la parabole	[m]
f	distance focale de la parabole/position du foyer	[m]
Q_C	puissance thermique reçue par le collecteur	[W]
S_o	section de la parabole	[m ²]
C_p	chaleur massique de l'eau	[kJ/kg°C]
$T_{Récepteur}$	température de la surface extérieure du récepteur	[°C]
T_{eau}	température de l'eau dans le récepteur	[°C]
$T_{ambiante}$	température ambiante	[°C]
Q_T	énergie thermique produit par l'eau dans le récepteur	[kJ]
T_{feau}	température finale de l'eau/température d'évaporation	[°C]

T_{ieau}	température initiale de l'eau au début de l'analyse	[°C]
m_{eau}	masse d'eau dans le récepteur	[kg]
$m_{évap}$	masse d'eau évaporée	[kg]
L_{eau}	chaleur latente d'évaporation de l'eau	[kJ/kg]
P	puissance thermique produite par l'eau	[W]
t	temps d'ébullition de l'eau du récepteur	[h]
« n »	nombre des « effets » de MSF ou MED	[-]
T_0	température d'entrée de l'eau de mer dans le 1 ^{er} « effet »	[°C]
T_1	température de sortie de l'eau de mer au dernier « effet »	[°C]
Q	consommation calorifique spécifique	[kJ/kg d'eau douce]
k	rapport entre le débit d'eau de mer et eau douce	[-]
ΔT	écart de température dans un effet entre l'eau de mer à la sortie du condenseur et l'eau en ébullition dans cet effet	[°C]
D	débit d'eau de mer à l'entrée des condenseurs	[kg/s]
P	production d'eau douce	[kg]
Q_{matin}	énergie thermique enregistrée le matin	[kJ]
P_{matin}	puissance thermique produite par l'eau le matin	[W]
Q_{soir}	énergie thermique enregistrée le soir	[kJ]
P_{soir}	énergie thermique produite par l'eau le soir	[kJ]
P_{ensol}	puissance d'ensoleillement	[W]

➤ ABREVIATIONS

LESEE : Laboratoire d'Énergie Solaire et Économie d'Énergie.

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

PROMES : Laboratoire Procédés, Matériaux et Énergie Solaire

CNRS : Centre National de Recherches Scientifiques

UTER : Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche

INES : Institut National pour l'Énergie Solaire

SCAC : Service de Coopération et d'Action Culturelle

PV : photovoltaïque

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique

UPR : Unité Pour la Recherche

LOCIE : Laboratoire Optimisation de la conception et Ingénierie de l'Environnement

ISPRA : Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale- Italie

JC: Jésus Christ

MSF: Multi-Stage Flash distillation

MED : Multi-Effet Distillation

LTV : Longs Tubes Verticaux ou VTE : Vertical tube Evaporator (en anglais)

THA : Tubes Horizontaux Arrosés ou HTME : Horizontal Tube Multiple Effet (en anglais)

MEC : Membrane Électrodialyse Cathodique

MEA : Membrane Électrodialyse Anodique

OI : Osmose Inverse ou RO : Réversible Osmose (anglais)

CPV : Solaire à Concentration Photovoltaïque

MDP : Mécanisme pour le Développement Propre

SIDEME : entreprise de construction des stationnements de dessalement

SOMMAIRE

<i>DEDICACE</i>	<i>i</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>ii</i>
<i>RESUME/ ABSTRACT</i>	<i>iii</i>
<i>ABREVIATIONS ET LEXIQUE</i>	<i>v</i>
<i>SOMMAIRE</i>	<i>viii</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES</i>	<i>xi</i>
<i>INTRODCUTION GENERALE</i>	<i>1</i>
<i>PRESENTATION DU LABORATOIRE</i>	<i>3</i>
<i>I- LES ACTIVITÉS DU LABORATOIRE</i>	<i>3</i>
<i>II- LES PARTENAIRES</i>	<i>3</i>
<i>II.1- Les partenaires scientifiques</i>	<i>3</i>
<i>II.2- Les partenaires entreprises</i>	<i>4</i>
<i>III- LES EQUIPEMENTS DU LABORATOIRE</i>	<i>4</i>
<i>IV- ORGANISATION DU LABORATOIRE</i>	<i>4</i>
<i>SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	<i>5</i>
<i>CHAPITRE 1 : DESSALEMENT DES EAUX</i>	<i>5</i>
<i>I- DÉFINITIONS ET HISTORIQUE</i>	<i>5</i>
<i>I.1- Définitions</i>	<i>5</i>
<i>I.2- Historique</i>	<i>5</i>
<i>II- LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE DESSALEMENT DES EAUX</i>	<i>6</i>
<i>II.1- Les procédés de distillation ou thermique</i>	<i>7</i>
<i>II.2- Les procédés membranaires</i>	<i>11</i>
<i>III- LES SOURCES D'ÉNERGIES POUR LE DESSALEMENT</i>	<i>13</i>
<i>III.1- Les centrales électriques</i>	<i>13</i>
<i>III.2- Dessalement grâce à des énergies renouvelables</i>	<i>13</i>
<i>IV- COMPARAISON DES PROCEDES DE DESSALEMENT</i>	<i>14</i>
<i>IV.1- Comparaison des procédés de distillation : MSF et MED</i>	<i>14</i>
<i>IV.2- Comparaison des procédés membranaires</i>	<i>14</i>
<i>IV.3- Comparaison du procédé de distillation et d'osmose inverse</i>	<i>15</i>
<i>V- PROBLEMES RENCONTRES EN DESSALEMENT</i>	<i>15</i>
<i>CHAPITRE 2 : ETUDE DE L'EBULITION DE L'EAU SALEE ET DIFFERENTS REGIMES</i>	<i>16</i>
<i>I- DEFINITIONS ET NOTIONS DE BASE SUR LE CHANGEMENT DE PHASE</i>	<i>16</i>

LIQUIDE-VAPEUR.....	Erreur ! Signet non défini.
II- ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSES	17
II.1- Dispositifs expérimentaux.	17
II.2- Manipulation de l'expérience.....	17
II.3- Observations et résultats de l'expérience.	17
II.4- Conclusion sur le processus d'ébullition.	18
III- LES DIFFERENTS REGIMES D'EBULLITION.	19
III.1- Notions de base.	19
III.2- Les différents régimes.	19
MATERIELS ET METHODES	23
CHAPITRE 3 : CONCENTRATION SOLAIRE THERMODYNAMIQUE.....	23
I- GENERALITES.	23
I.1- Les différentes formes de concentration solaire.....	23
I.2- Les différentes technologies de concentration solaire.	24
II- LES CAPTEURS PARABOLIQUES.	25
II.1- Schéma de principe.	25
II.2- principe de fonctionnement.	25
CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DE LA PARABOLE SOLAIRE.....	26
I- ÉQUATION GÉNÉRALE DE LA PARABOLE (VOIR ANNEXE)	26
II- APPLICATION DE L'ÉQUATION À NOTRE ÉTUDE.....	26
III - DIMENSIONS DES FEUILLES DE LA PARABOLE.....	27
II.1- Nombre de feuilles.....	27
III.2- Dimensions d'une feuille.....	27
IV- DIMENSIONNEMENT DU RÉCEPTEUR.....	27
IV.1- Irradiation directe.....	27
IV.2- Puissance thermique reçue par le capteur.....	28
IV.3- Puissance thermique reçue par le récepteur.....	28
IV.4- Dimensions du récepteur.....	29
VI- AUTRES ÉLÉMENTS DE CONCEPTION.....	29
CHAPITRE 5 : ETUDE EXPERIMENTALE.....	29
I- OBJECTIF DE L'EXPERIMENTATION.	29
II- INSTALLATION EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTATION ASSOCIEE.....	30
II.1- Schéma de principe	30
RESULTATS OBTENUS.....	32
II- EXPLOITATION DES DONNEES EXPERIMENTALES	34
II.1- La quantité d'énergie échangée au cours de l'ébullition.....	34

II.2- Puissance thermique transmise au cours de l'ébullition	35
II. 3- Production d'eau douce.	35
II.4- Puissance d'ensoleillement reçue au niveau du concentrateur.	36
DISCUSSIONS ET ANALYSES	38
I- ANALYSES DES TEMPERATURES ET IRRADIATIONS DIRECTES.....	38
II- ANALYSE DES GRANDEURS CALCULEES : ENERGIE ET PUISSANCE THERMIQUES ET PRODCUTION D'EAU DOUCE.....	39
III- ÉVALUATION ÉCONOMIQUE FAITE À PARTIR DU CONCENTRATEUR.	41
IV- ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU PROJET.	42
RECOMMANDATIONS.....	45
I- SUGGESTIONS DE SOLUTIONS AUX PROBLEMES TECHNIQUES.	45
II- SUGGESTIONS PAR RAPPORT AUX PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX.....	45
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	46
BIBLIOGRAPHIE.....	48
ANNEXES.....	50

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

➤ FIGURES

Figure 1: Distillateur par détente successives (MSF).....	8
Figure 2: Schéma de Principe d'un système d'évaporateurs multiples effets [1].....	10
Figure 3: Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse [3].....	11
Figure 4: Principe de l'osmose inverse [4]	12
Figure 5: Température d'ébullition de l'eau salée et eau pure	18
Figure 6: Température d'ébullition de l'eau en fonction de la salinité [10].....	19
Figure 7 : Température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression [1].....	19
Figure 8: Régime d'ébullition pour une plaque à température imposée (courbe de Nukiyama).[11]	20
Figure 9: Les principales technologies de concentration solaire. [12].....	24
Figure 10: Capteur parabolique [13].....	25
Figure 11: Courbe parabolique dans le repère ($S; i; j$).....	26
Figure 12: Constitution de la surface réfléchissante de la parabole.....	27
Figure 13: Schéma du principe d'expérimentation.....	30
Figure 14: irradiations enregistrées pendant nos expérimentations.(station météo LESEE 2iE)	32
Figure 15: Allure des températures enregistrées pendant les jours favorables.	33
Figure 16: Allures des températures pendant les périodes défavorables à l'ensoleillement. .	34
Figure 17: Principe de la distillation Membranaire [5].....	51
Figure 18: Installation hybride [6].....	51
Figure 19 : Distillateur solaire direct [6].....	53
Figure 20: Distillateur à effets multiples (MSF) associé à des capteurs solaires [6].....	54
Figure 21: Courbe parabolique dans le repère($S; i; j$).....	56
Figure 22: Constitution de la surface réfléchissante de la parabole.....	58
Figure 23 : Dimensions d'une feuille de la parabole	60

➤ TABLEAUX

Tableau 1: Répartition de la production d'eau dessalée: [3].....	6
Tableau 2: Comparaison des procédés membranaires [1].....	14

<i>Tableau 3: Résultats de l'expérience de l'ébullition de l'eau.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 5: Récapitulatifs de grandeurs calculées à partir des données expérimentales.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 6 : Investissements des différents procédés de dessalement [6]</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 7: Comparaisons entre les procédés de distillation.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 8: Rayon de courbure et foyer de la parabole</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 9: Dimensions du récepteur</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 10: Coefficients valables pour le calcul des pertes thermiques dans un concentrateur. [15].....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 11 : quelques valeurs de diamètre du récepteur</i>	<i>63</i>
<i>Tableau 12: irradiations enregistrées entre 7h 00 et 17h 00 entre le 28/2 et 4/3/2010</i>	<i>63</i>

INTRODCUTION GENERALE

L'eau est abondante sur la terre, elle représente environ 1400 millions de km³. L'essentiel toutefois est qu'elle est constituée d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,7 % de la ressource totale soit environ un million de km³. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet des études faites par **CNRS** Nancy montrent que dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. Dans ces pays, selon le **Water Resources Institute**, 250 millions d'individus, ne disposent pas aujourd'hui du minimum vital d'eau défini à 1000 m³ par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m³ par habitant et par an. Et on estime que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir de ce manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau.[1] Démographie qui justifie le développement d'une agriculture qui consomme environ 60% des ressources en eau. En raison de leur surexploitation et du réchauffement planétaire le niveau des lacs de surface ont considérablement baissé au cours des dernières décennies.

D'autre part, l'Afrique est perçue comme le domaine de la sécheresse. L'accès à l'eau potable est difficile car même abondante elle est rare et sa qualité est insuffisante. En Afrique du nord on parle d'une pénurie potentielle car les eaux de surface sont largement sollicitées et on note de ceci une irrégularité des précipitations. Taux de prélèvement : 50%. En Afrique saharienne, dont la plus part des pays de l'Afrique de l'ouest on note des aridités et sécheresses récurrentes. Le manque d'eau dans la plus part des pays comme au Burkina Faso, est un principal facteur de sous développement, voir de mortalité. [2]

La problématique qui se dégage de ce contexte est celle de l'accès à l'eau potable. Près d'un milliard et demi d'êtres humains n'ont pas accès à l'eau potable. Cette carence est l'une des principales causes de sous-développement endémique. Elle pourrait aussi devenir à terme une nouvelle source de tensions politiques et de guerres. C'est dire l'intérêt que présente toute possibilité d'accroître les capacités de production d'eau douce. Pour faire face à cette pénurie,

une solution prometteuse existe déjà. Grâce aux technologies de dessalement, une partie importante des 14 millions de mètres cubes d'eau salée ou saumâtre souterraine pourra être valorisée pour l'alimentation des régions enclavées au cœur des grandes masses continentales. Ces techniques de dessalement, opérationnelles depuis de nombreuses années, font face à un coût de production (de 1 à 2 euros / m³, selon la technique utilisée) qui limite souvent leur utilisation aux pays riches. [1] L'inconvénient majeur qui justifie ces gros investissements réside dans le coût élevé d'énergie, soit de 6 à 15 kW d'électricité/m³ d'eau selon la méthode utilisée. Ce niveau de prix reste prohibitif pour un dessalement à grande échelle dans les pays en développement.

Une réduction de ce coût suppose un recours à des énergies moins onéreuses, et moins polluantes par la même occasion. Quelques essais ont vu le jour avec le nucléaire utilisé rapidement comme une source de dessalement. Mais de nos jours, en raison des problèmes du changement climatique qui justifient la rareté des énergies primaires, la proposition d'une énergie solaire pour cette technique de dessalement s'avère très importante, en raison de sa pleine disponibilité dans la majeure partie du monde et en particulier dans la plus part de ces pays en situation de stress hydrique. Au-delà de l'aspect consommation d'énergie par les centres de dessalement, il se pose un problème de traitement des rejets en mer. En générale rien que 10% du volume d'eau de mer est traité et 90% environ est rejetée en mer avec des produits anticorrosion et anti-moussant dangereux pour l'environnement marin.

L'objectif principale de notre étude est donc de proposer le solaire à concentration comme source d'énergie efficace pour le dessalement des eaux salées, tout en limitant ou alors à remettre à zéro les rejets en mer. En raison du problème de manque d'eau en Afrique qui croit au fil du temps, cette étude pourra trouver son importance, avec des idées d'interconnexions des réseaux de distributions d'eau, à partir des pays les plus proches de la mer. Pour parvenir à cette tâche il sera question pour nous dans un premier temps de présenter les techniques de dessalement qui existent dans le monde. Nous passerons en suite au dimensionnement et conception de notre capteur parabolique comme prototype du laboratoire à utiliser pour nos analyses et discussions finales.

PRESENTATION DU LABORATOIRE

Nos recherches pour ce mémoire de fin d'études, se sont déroulé au laboratoire Énergie Solaire et Économie d'Énergie (**LESEE**) d'UTER GEI du 2iE de Ouagadougou.

Ce laboratoire fait partir des jeunes laboratoires que compte le 2iE. Créé en Novembre 2008, il a pour objectif de contribuer à l'innovation dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle d'énergie électrique ou thermique en Afrique.

I- LES ACTIVITÉS DU LABORATOIRE.

Les activités du laboratoire peuvent se regrouper en trois grands axes comme suit :

- ✓ Étude des centrales solaire à concentration
 - Élaboration de base de données et des cartes de DNI (ensoleillement direct) en Afrique
 - Élaboration des cartes des besoins en énergie pour l'Afrique (au sud du Sahara)
 - Test des composants des centrales solaires à concentration (héliostats, miroirs de Fresnel, boucles thermiques)
 - Conception optimale de nouveaux modèles de centrales solaires thermodynamiques (couplage & hybridation solaire/biomasse)
- ✓ Habitat, architecture bioclimatique et Systèmes solaire PV/thermique (basse température)
 - Conception des habitats bioclimatiques (économiques en énergie)
 - Intégration fonctionnelle et architecturale des systèmes solaires PVet thermique dans les habitats
 - Pompage photovoltaïque
 - Production d'énergie photovoltaïque à grande échelle: Procédé hybride Solaire PV/Diesel, Couplage au réseau/ Production électrique décentralisée
- ✓ Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques
 - Optimisation thermodynamique des procédés énergétiques
 - Conception optimale des procédés en utilisant des outils thermodynamiques couplés aux approches géométriques multi-échelles (approche constructale...).

II- LES PARTENAIRES.

II.1- Les partenaires scientifiques.

- Kwame Nkrumah University of Science and Technology- Ghana,

- PROMES-CNRS- Université de Perpignan- France,
- INES/CEA- France,
- LOCIE-Université de Savoie- France,
- John Research Center- ISPRA- Italie,
- Duke University- USA.

II.2- Les partenaires entreprises.

- MicroSow- Burkina Faso,
- PPI- Burkina Faso.

III- LES EQUIPEMENTS DU LABORATOIRE.

- Une station météo entièrement équipée
- Une station de pompage photovoltaïque (800Wc, HMT 45 m)
- Un prototype de centrale hybride solaire PV/ Groupe électrogène (2,85 kWc et 11,5 KVA)

En cours d'acquisition :

- Une plateforme solaire PV (PRISME) composée de 60kWc de champ PV, de bancs de test de modules PV, un simulateur/analyseur de réseaux.
- Une plateforme solaire à concentration composée de: un héliostat de 25 m², une tour de 10 m un bloc électrique de petite puissance (10-25 kWél)

IV- ORGANISATION DU LABORATOIRE.

Le laboratoire actuellement dirigé par Dr Yao AZOUMAH est composé d'une équipe de :

- trois enseignants chercheurs,
- quatre doctorants,
- quatre ingénieurs de recherche,
- un technicien de laboratoire et travaille également avec deux professeurs associés.

Il a accueilli pour la période des stages académiques 2010, 15 stagiaires dont 8 étudiants de master 2 du 2iE en fin de formation, 3 de master spécialisé GEI, 4 venants des universités françaises et partenaires avec le laboratoire, dont l'université de Perpignan (2).

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Notre objectif dans cette partie est de présenter un aperçu général sur ce qu'est le dessalement, les techniques utilisées pour ce procédé jusqu'à nos jours dans le monde. En suite nous présenterons une synthèse sur l'ébullition de l'eau salée et ses différents régimes.

CHAPITRE 1 : DESSALEMENT DES EAUX

I- DÉFINITIONS ET HISTORIQUE.

I.1- Définitions.

Le dessalement de l'eau, également appelé **dessalage** est un processus qui permet de retirer le sel de l'eau de mer ou des eaux saumâtres pour la rendre potable.

Une eau saumâtre est une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés.

Les eaux de mer est une eau donc la concentration en sel ou alors la salinité est très importante. La salinité moyenne de l'eau de mer est de l'ordre de 35 g/l, cependant cette valeur varie fortement selon les régions et la saison : Mer Baltique : 7g/l, Mer méditerranée : 36 à 39 g/l, Golfe Persique : 40 à 70 g/l, Mer morte : 270 g/l. [3]

I.2- Historique.

Compte tenu de la situation actuelle de pression démographique et de réchauffement climatique, le dessalement est une technique intéressante au vu de l'abondance de la matière première : l'eau de mer et les eaux saumâtres. Cette technique aujourd'hui à l'échelle industrielle tient ses origines des longues dates avant JC.

- Dès le IV^e siècle avant JC, **Aristote** observe le principe de distillation et le conseille aux marins pour produire de l'eau douce à partir des « bouilloires ».
- Au XII^e siècle, **Adélarde de Bath** dans les *Quoestiones naturales* : explique que « au soleil, après l'évaporation sur un rocher, l'eau de mer se transforme en sel ; également si on chauffe

de l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformer en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales »

- Les premiers procédés industriels ont été mis au point dans les années 60
- 1978 : mise en service de la première unité de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, à Djeddah en Arabie Saoudite.
- Au 1^{er} janvier 2000, 13 600 usines de dessalement fonctionnaient dans plus de 120 pays et totalisaient une capacité installée au niveau mondial d'environ 26 millions de m³/jour.
- De nos jours on assiste à une très forte augmentation (+10% par an) du volume d'eau produit par dessalement : 52 millions m³/jour, soit 42 millions pour les eaux de mer et 10 millions pour les eaux saumâtres.

Les usines de dessalement se multiplient dans de nombreux pays (Libye, l'Australie, la Grande Bretagne); surtout dans les pays en prise à des pénuries d'eau (Algérie, Libye, pays du golfe) mais aussi dans les pays d'Europe du sud (Espagne, Italie, Grèce) et aux États-Unis

Tableau 1: Répartition de la production d'eau dessalée: [3]

Désignations	Volume (Mm3/j)	Pourcentage (%)
Moyen Orient	21	50
Amérique du Nord	7,56	18
Asie	5,46	13
Europe	5,46	13
Afrique	2,52	6
TOTAL	42	100

Historiquement, les pays du golfe ont été les premiers à utiliser le dessalement et sont actuellement les plus gros producteurs d'eau dessalée dans le monde. Certains pays comme le Qatar dépendent même à 95% de cette ressource. En Europe, c'est l'Espagne qui est de loin le premier pays producteur d'eau dessalée. [3]

II- LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE DESSALEMENT DES EAUX.

Pour dessaler l'eau il existe diverses techniques ; adaptables selon la nature de l'eau à dessaler, l'environnement et les besoins à pouvoir. Les technologies actuelles sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

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

Parmi ces procédés, la distillation et l'osmose inverse sont ceux dont les performances ont été prouvées pour le dessalement et sur lesquels nous allons nous attarder. Les autres procédés pourront être présentés en annexe et selon l'importance. Quelque soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent quatre étapes :

- une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- un pré-traitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- le procédé de dessalement lui-même,
- le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

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

II.1- Les procédés de distillation ou thermique.

Les procédés de distillation, consiste à chauffer l'eau de mer pour en 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, qui s'évapore chaque jour de l'océan vers les nuages où elle s'accumule avant de retomber sous forme de précipitations.

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 1 kg d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilojoules (si le changement d'état se fait à 100°C). 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.

Deux procédés se partagent ainsi le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation **MSF**) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation **MED**).

II.1.1- Le Procédé de distillation à détentes étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF).

➤ Schéma de principe du MSF.

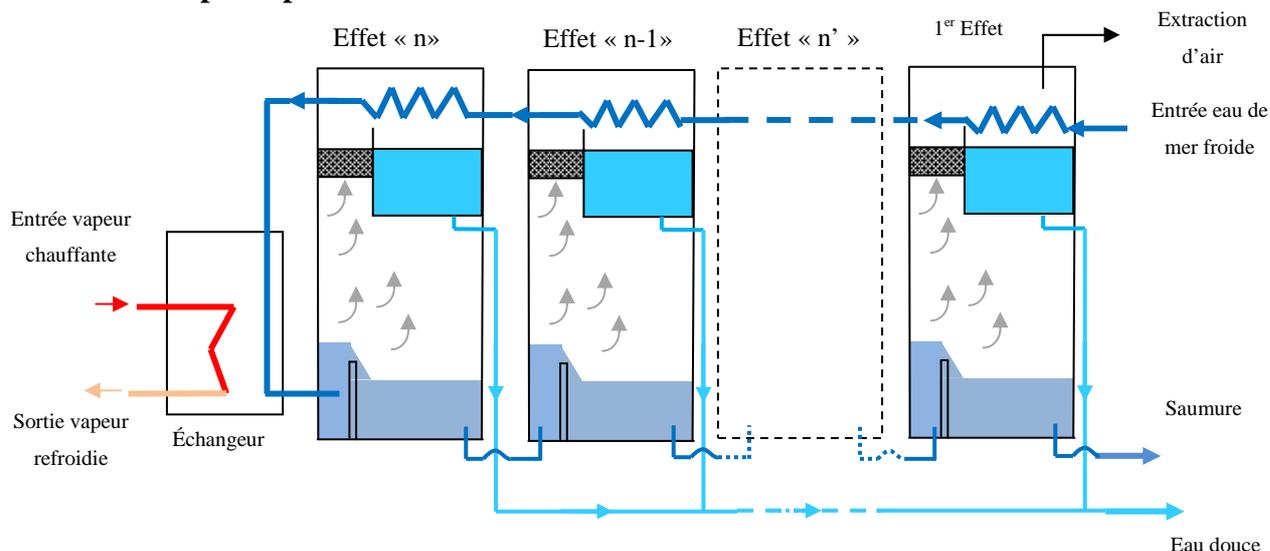


Figure 1: Distillateur par détentes successives (MSF) [1]

➤ Principe de fonctionnement.

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 (*figure 1*) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des récipients en dessous des tubes. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites.

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière 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 *dévésiculeur* constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. La plus grande capacité du MSF en service de nos jours est celle de Shuaiba 3 en Arabie saoudite avec 880 000 m³/j. Pour une capacité typique de 25 000 m³/j, le coût de production de l'eau est de 0,88 €/m³.

➤ **Avantages et inconvénients.**

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 « flashe » et ceci limite les risques d'entartrage. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique fournie par la chaudière, cette énergie 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. Le coût d'investissement du procédé reste encore très élevé et limite les utilisations à des majorités de pays pétroliers et riches.

II.1.2- Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).

➤ **Principe de fonctionnement.**

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs.

La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1^{er} effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2^{ème} effet où règne une pression inférieure. La chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2^{ème} effet et ainsi de suite (*figure 3*). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite).

➤ **Schéma de principe du MED.**

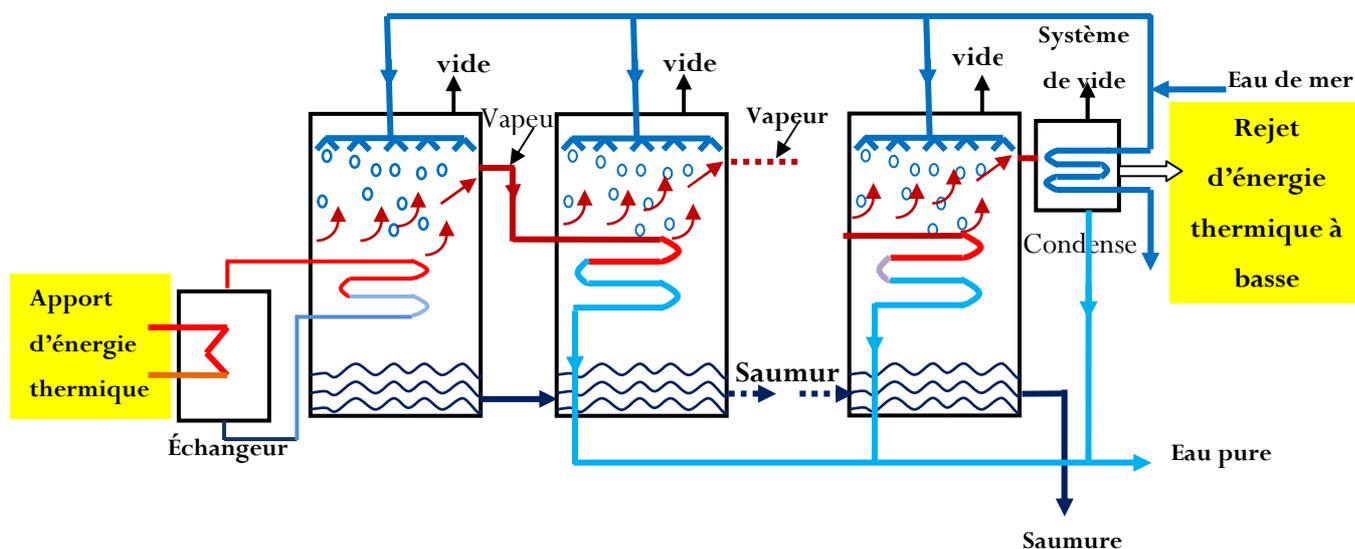


Figure 2: Schéma de Principe d'un système d'évaporateurs multiples effets [1]

L'énergie requise pour les multiples effets (MED) est principalement l'énergie thermique à fournir par la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80°C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide. Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la **compression mécanique de vapeur**. La plus grande capacité MED en service est celle d'Al Hidd 2 en Arabie Saoudite, avec une production de 272 520 m³/j. Pour une capacité de production de 10 000 m³/J le coût de production est de l'ordre de 0,64 €/m³.

➤ **Avantages et inconvénients.**

Dans le procédé MED, l'ébullition de l'eau de mer au sein de chaque cellule (effet) se fait au contact de la surface d'échange de chaleur, il y a des risques d'entartrage dû à la précipitation de sels tels que CaSO₄ ou CaCO₃ dont la solubilité diminue quand la température augmente. Pour limiter ces risques, il faut donc utiliser un traitement à l'acide et limiter la température de tête (du 1^{er} effet ou étage) à moins de 70°C. Comme pour le cas précédent le coût d'investissement est élevé.

II.2- Les procédés membranaires.

II.2.1- L'électrodialyse.

➤ Principe de fonctionnement.

Le principe de fonctionnement est représenté schématiquement sur la figure 4. Les deux compartiments sont alimentés avec une solution saline MX (chargée d'ions M^+ , X^-) de concentration C_0 . Sous l'effet du courant, les cations M^+ , qui migrent vers la cathode, traversent les MEC (membrane d'électrodialyse cathodique) et sont stoppés par les MEA (membrane d'électrodialyse anodique). De la même manière, les anions X^- , qui migrent vers l'anode, traversent les MEA et sont stoppés par les MEC. On obtient ainsi, en sortie d'empilement, deux solutions : une solution MX « déminéralisée », appelée diluât, dont la concentration est inférieure à la concentration d'entrée, et une solution MX « concentrée », appelée concentrât, dont la concentration est supérieure à la concentration d'entrée. La plus grande capacité du procédé membranaire par électrodialyse est celle d'Azzawiya en Libye avec une production de 80 000 m³/j. Pour une capacité de production de 3 000 m³/j le coût correspondant est de 0,53€/m³. [4]

➤ Schéma de principe.

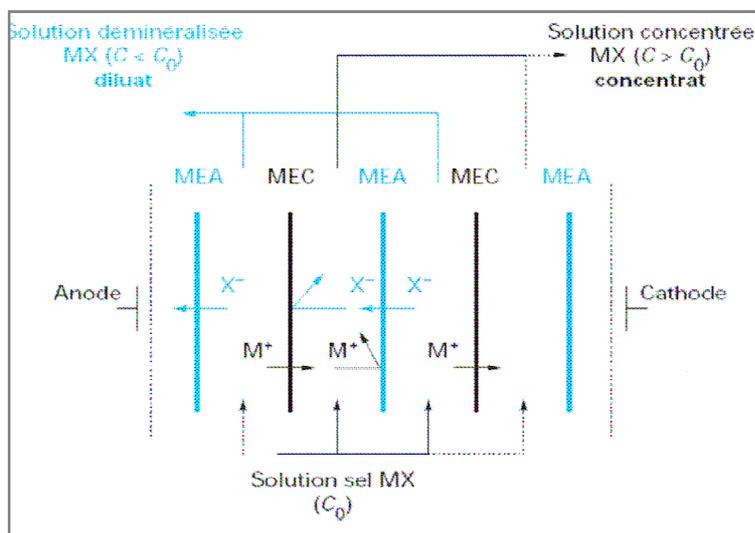


Figure 3: Schéma de principe d'une unité d'électrodialyse [3]

II.2.2- L'osmose inverse.

➤ Principe de fonctionnement.

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 système à

deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (*figure 4*). 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, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (*figure 4*), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse. Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord un pré-traitement très poussé de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension sur les membranes qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits. Afin de limiter la consommation d'énergie du procédé, on peut placer sur le circuit du retentât une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute pression. La plus grande capacité maximale en service est celle Sulaibiya au Koweït avec 375 000 m³/j. Pour une capacité de production de 6 000 m³/j le coût correspondant est de 0,56€/m³.

➤ **Schéma de principe.**

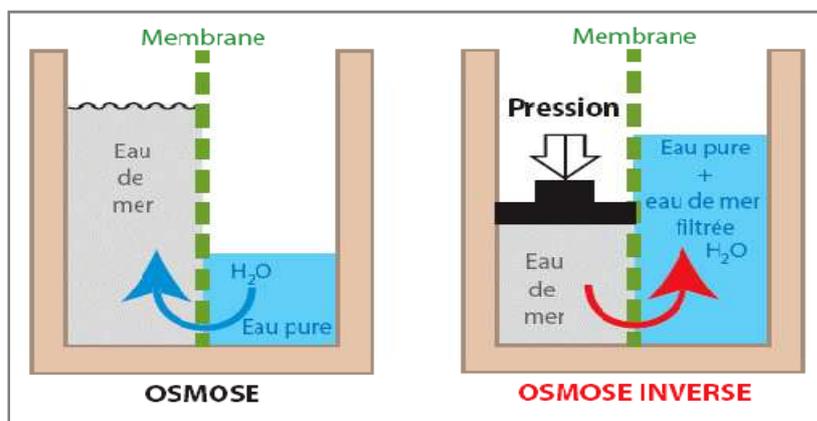


Figure 4: Principe de l'osmose inverse [4]

En plus de ces procédés qui semblent plus anciennes, des nouvelles voient le jour et sont le plus souvent une amélioration des précédents. Parmi elles nous notons le système hybride encore à l'étape de recherche et développement qui couple plusieurs formes de dessalement, comme nous présente la structure de fonctionnement en annexe 1.

III- LES SOURCES D'ÉNERGIES POUR LE DESSALEMENT.

III.1- Les centrales électriques.

La plupart du temps et en particulier pour de grandes usines, le coût de production de l'eau potable est lié au coût de l'énergie utilisée. C'est ainsi que pour ramener ce coût le plus bas possible on observe parfois l'accouplement d'une centrale électrique et d'une unité de production d'eau, les vapeurs d'échappement des turbines étant utilisées pour alimenter les unités de dessalement. C'est ainsi qu'on peut avoir des accouplements suivant :

- **Turbine à gaz et usine de dessalement** : Puissance électrique 1MW pour une production de 450 m³/jour d'eau douce.
- **Turbine à vapeur et usine de dessalement** : les proportions Puissance/eau produite sont de 500MW d'électricité pour 450m³/jour d'eau douce produite.

➤ Centrale nucléaire et usine de dessalement.

Cette association est particulièrement efficace puisqu'elle permet de produire de l'eau douce très bon marché. [8] Une étude faite par **CEA/FRAMATOME**, évalue que pour des réacteurs nucléaires de 600 MWth, on peut produire 284 MWe nécessaire pour 42 000 m³ d'eau douce par jour. L'avantage de ce denier réside dans la compétitivité économique en particulier dans les régions ne disposant pas de ressources fossiles, et aussi la protection de l'environnement par réduction des émissions de CO₂, SO₂, NO₂. Mais l'investissement initial reste encore élevé et aussi l'acceptation du public : problème des déchets nucléaires, problème de sécurité.

III.2- Dessalement grâce à des énergies renouvelables.

Face à une crise d'eau potable, on constate que de nombreux pays qui souffrent de cette pénurie disposent de ressources hydriques salines considérables et d'un gisement solaire tout aussi important, doivent utiliser les techniques de dessalement, dont la fiabilité n'est plus à démontrer, en les associant à des sources d'énergies renouvelables. Cette solution constitue un moyen assez fiable pour produire de l'eau potable. Il faut cependant signaler que ce moyen reste économiquement fiable seulement pour des unités de petites capacités allant de quelques m³ à des dizaines (voire centaines) de m³ d'eau potable par jour. Pour de grandes capacités, l'association des procédés de dessalement avec les énergies renouvelables nécessitent des coûts d'investissement élevés et la fiabilité de tels systèmes n'est pas toujours assurée. (Voir annexe 2)

IV- COMPARAISON DES PROCÉDES DE DESSALEMENT.

IV.1- Comparaison des procédés de distillation : MSF et MED.

D'une façon générale, les procédés MED présentent divers avantages sur le procédé MSF :

- très grande souplesse de fonctionnement ; la production d'une unité de MED peut varier de 15 à 100% du régime nominal sans problème ce qui est impossible avec le procédé MSF,
- mise en circulation d'un débit de saumure beaucoup plus faible d'où consommation d'énergie de pompage faible (2 à 3 kWh/m³ pour MED et 4 à 5 kWh/m³ pour FLASH),
- sécurité accrue du point de vue de la salinité de l'eau produite : en effet, un perçage de tube dans le cas de MED se traduit par un passage de la vapeur dans l'eau de mer, alors que, dans le cas de MSF c'est l'inverse (passage de l'eau de mer dans l'eau douce),
- concentration d'eau de mer la plus faible correspondant à la température la plus élevée (du moins pour un système à co-courant), ce qui est favorable pour limiter l'entartrage,
- investissements inférieures à ceux des procédés FLASH d'environ 10 à 20%.
- Le seul inconvénient étant dans la taille des installations unitaires qui est inférieure à celle du procédé FLASH, mais la technologie évolue rapidement : 22 500 m³/jour par unité en dix ans pour MED. [6]

IV.2- Comparaison des procédés membranaires.

Les procédés membranaires s'il faut le rappeler concerne l'électrodialyse qui est utilisé principalement pour l'eau saumâtre et l'osmose inverse qui est utilisé tant pour l'eau saumâtre que pour l'eau de mer. Nous avons résumé quelques éléments de comparaison dans le tableau suivant :

Tableau 2: Comparaison des procédés membranaires [1]

DESIGNATIONS	PROCEDES	
	OI	ED
Énergie Utilisée	Mécanique (via électricité)	Électrique
Température de fonctionnement (°C)	< 45	< 45
Consommation électrique (kWh/m ³)	4 à 7	1
Salinité de l'eau brute (g/l)	1 à 45	0,1 à 3
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 500	< 500
Capacité d'un train (m ³ /j)	1 - 10 000	1- 12 000
Avantage	Modularité	

Il ressort de ce tableau que l'électrodialyse n'est compétitive à l'OI qu'en dessous d'une concentration de sel de 3 mg/l dans l'eau.

IV.3- 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. [4]

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. D'autre part, le coût de l'énergie qui est très différent d'un pays à l'autre, influencera également sur le choix d'un type de procédé. (Annexe 3)

V- PROBLEMES RENCONTRES EN DESSALEMENT.

Les problèmes liés aux stations de dessalement, sont d'ordre technique et environnemental. Comme problème techniques nous pouvons citer de façon non exhaustive :

– Le problème d'entartrage

L'entartrage est un dépôt des sels minéraux qui a tendance à se former sur les surfaces d'échanges. Pour qu'il y ait dépôt de tartre sur une surface,

- Il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est-à-dire qu'il y ait saturation, pour la plus part des sels la solubilité augmente avec la température,
- Il faut ensuite que la vitesse de déposition soit suffisamment rapide.

– Le problème de corrosion.

L'agressivité marquée de l'eau de mer surtout à des températures élevées a plusieurs raisons :

- Composition chimique et en particulier teneur élevée en ions chlorures,
- Conductivité élevée et par suite facilité du développement des effets galvaniques,
- Corrosion résultant de l'oxygène dissous,
- Présences des bactéries, d'organismes marins divers et d'H₂S dans certains cas de pollution.

– **Le problème de colmatage.**

Les eaux naturelles (eau de mer ou eau saumâtres) contiennent la plupart du temps des matières organiques en suspension qui vont avoir tendance à se déposer sur les surfaces d'échange et les colmater. Il va en résulter une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production de l'installation.

CHAPITRE 2 : ETUDE DE L'EBULLITION DE L'EAU SALEE ET DIFFERENTS REGIMES.

Les systèmes faisant intervenir le phénomène d'ébullition en fonctionnement normal dissipent et permettent d'extraire de grande quantité de chaleur à des écarts de température faibles. Cependant sous certaines conditions appelées «*conditions critiques* » la vapeur produite forme une barrière thermique entraînant une montée brusque de la température. Ce phénomène est brutal et destructif qu'il faut à tout prix éviter et demande une attention particulière dans des études de ce type.

Notre objectif dans ce chapitre est de présenter une synthèse sur l'ébullition de l'eau, et de ressortir par la suite les différents régimes qu'on peut y avoir. Le flux de chaleur est transmis par un matériau céramique issu de la vitrification des déchets de l'amiante. (Matériau à même de supporter des contraintes thermophysiques importantes ainsi que des milieux corrosifs et disponible à très faible coût) comme nous propose le cahier des charges.

I- DEFINITIONS ET NOTIONS DE BASE SUR LE CHANGEMENT DE PHASE.

L'évaporation est un phénomène souvent lent, qui découle de l'existence d'un gradient de pression partielle de vapeur entre le liquide et un gaz. Elle a lieu naturellement dès que du

liquide est en contact avec de l'air dont la pression est supérieure à la pression de vapeur saturante.

L'ébullition est la formation de bulles lors d'un changement violent d'un corps de l'état liquide vers l'état vapeur. Elle se produit lorsque localement, la température du liquide est supérieure à la température de saturation, que le liquide soit globalement au-dessus de la température de saturation (surchauffé), ou en dessous de la température de saturation (sous-refroidie).

II- ETUDE EXPERIMENTALE ET ANALYSES

II.1- Dispositifs expérimentaux.

- 02 ballons : un contenant une solution d'eau pure et l'autre une solution d'eau salée,
- 02 chauffe-ballons,
- 02 sondes thermométriques et 01 chronomètre

II.2- Manipulation de l'expérience

- placer les deux ballons respectivement sur chaque chauffe-ballon,
- plonger une sonde thermométrique dans chaque ballon,
- déclencher le bouton de mise en marche des chauffe ballons au même moment que celui du chronomètre,
- relever à chaque minute les températures respectives données par les deux sondes

II.3- Observations et résultats de l'expérience.

Nous présentons ci-dessus les résultats d'une étude réalisée sur <http://physiquecollege.free.fr>.

Tableau 3: Résultats de l'expérience de l'ébullition de l'eau

Temps (min)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Température eau pure (°C)	23	30	37	45	52	60	68	75	83	91	98	100	100	100	100,05	100,05
Température eau salée (°C)	26	34	42	50	58	65	73	81	89	96	100	100,50	101	101,50	102	102,50

On observe que Pour l'eau pure, la température se stabilise aux environs de 100 °C, même si on chauffe fort et longtemps. A partir de cette température, l'énergie apportée par le chauffe-ballon ne sert qu'à augmenter considérablement l'agitation des molécules d'eau qui s'éloignent alors les unes des autres : *des bulles de vapeur d'eau se forment*. L'énergie nécessaire à une mole d'une espèce pour passer à l'état gazeux est appelée *enthalpie de vaporisation*, également appelée dans le cas d'un corps pur *énergie de vaporisation*. C'est lorsque la totalité des particules est à l'état gazeux que la température du système se remet à augmenter. Avec l'eau salée, la température augmente toujours à l'ébullition, on atteint en quelques minutes environ 105 °C. Ce qui nous permet de tracer les deux courbes suivantes :

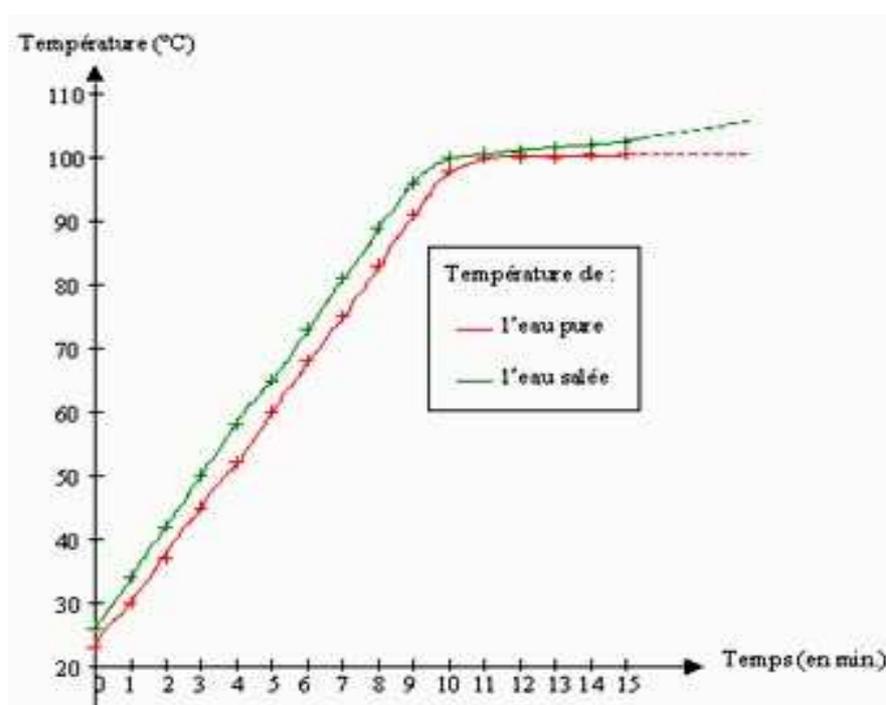


Figure 5: Température d'ébullition de l'eau salée et eau pure

II.4- Conclusion sur le processus d'ébullition.

A la suite de cette expérience, il convient de noter que :

- l'eau salée peut avoir des concentrations différentes qui agissent plus ou moins sur les températures d'ébullitions,
- la température d'ébullition varie en fonction de la pression extérieure. Au niveau de la mer par exemple, la pression atmosphérique vaut 1 bar, et la pression de saturation P_{sat} ne devient égale à 1 bar qu'à 100°C. Donc l'eau bout à 100°C au bord de la mer. En haute montagne la pression est plus faible qu'au niveau de la mer. Donc on a besoin de moins chauffer pour que

la pression de vapeur saturante devienne égale à la pression extérieure. Par exemple pour une pression de 0,7 bar (altitude environ 3000 m), la température d'ébullition vaut 89°C. Nous résumons ces deux phénomènes par les figures 6 et 7.

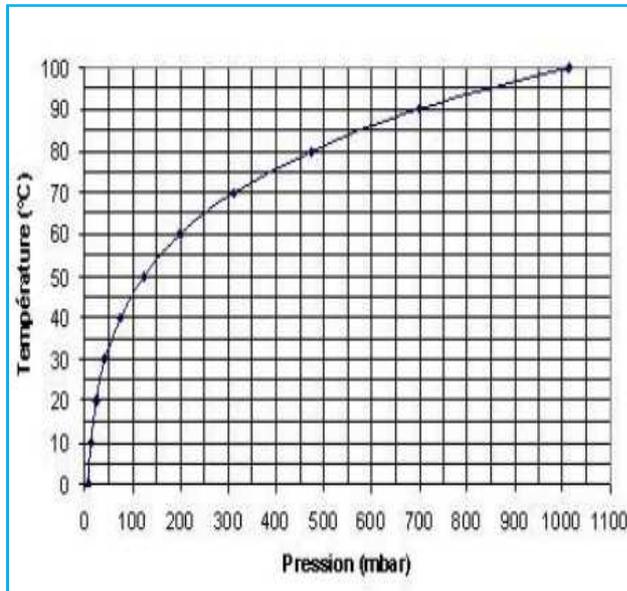


Figure 7 : Température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression [1]

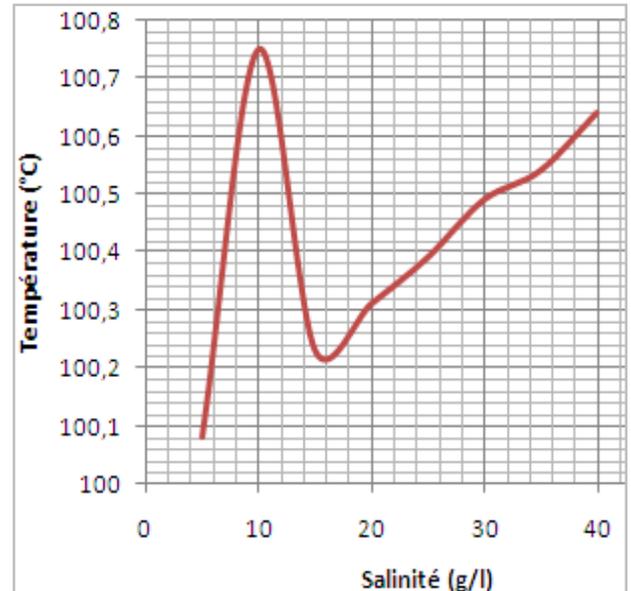


Figure 6: Température d'ébullition de l'eau en fonction de la salinité [10]

III- LES DIFFERENTS REGIMES D'EBULLITION.

III.1- Notions de base.

On considère un élément chauffant (ou paroi chauffante) plongé dans le liquide porté à une température supérieure à la température d'ébullition ($T_p \geq T_e = T_{sat}(P)$). On note ΔT_e la différence entre les températures de paroi et de saturation. L'eau liquide est supposée pure et désaérée (pas de formation de bulles dans la masse liquide). L'objectif est de décrire de manière qualitative et quantitative la relation liant la densité de flux Q_p à la différence de température entre la paroi (élément chauffant) et l'eau liquide. La pression de l'eau variant très peu, on peut supposer que la température d'ébullition est constante ($T_e = T_{sat}(P) = Cste$).

III.2- Les différents régimes.

La figure 8 représente le flux d'échange entre la paroi chauffante et le liquide en fonction de l'écart de température entre ces deux milieux (courbe de Nukiyama). Nukiyama fut le premier à identifier en 1934 en utilisant un fil chauffant dont la température T_p (ou encore la surchauffe ΔT_e) est la variable dépendante et la puissance électrique (représentant le flux de

chaleur Q_p) est la variable indépendante. L'expérience consiste à chauffer progressivement le fil par effet Joule et à tracer la courbe donnant la densité de flux thermique Q_p en fonction de la surchauffe $\Delta T_{sat} = T_p - T_{sat}$. On voit ainsi apparaître les régimes distincts de transfert de chaleur par ébullition.

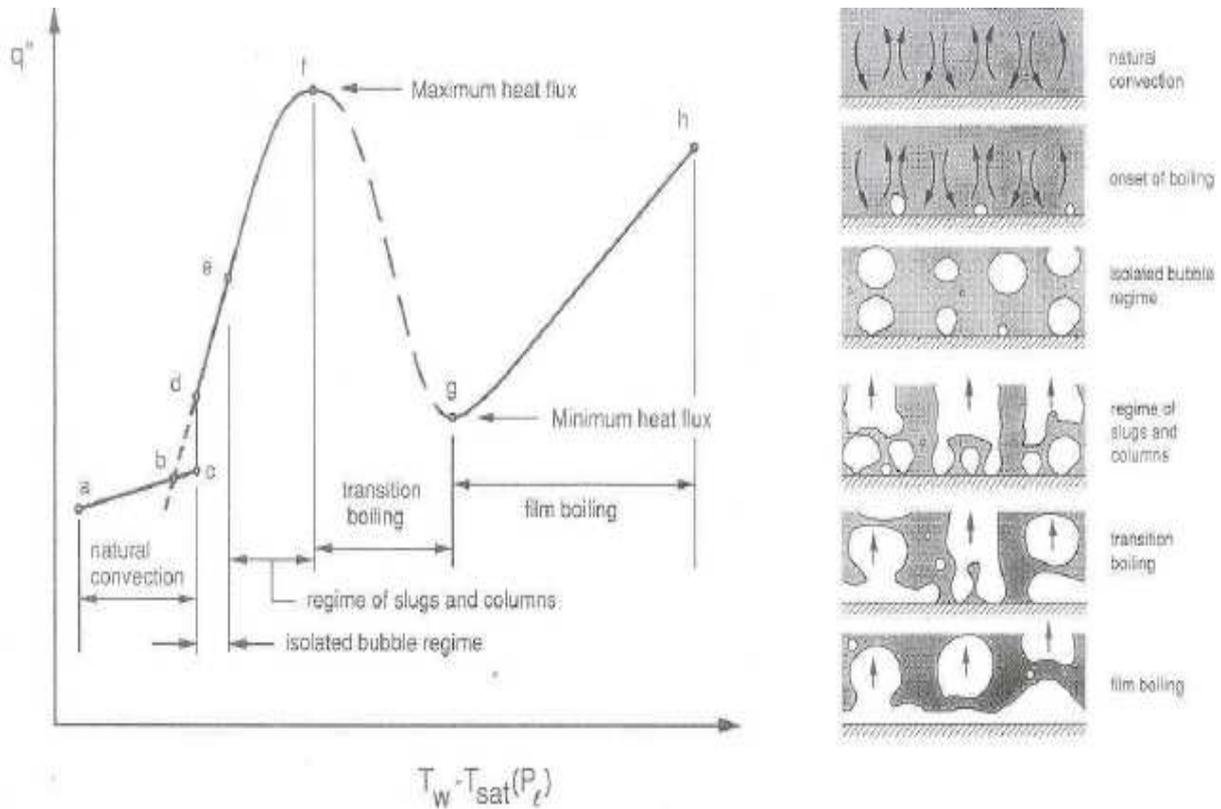


Figure 8: Régime d'ébullition pour une plaque à température imposée (courbe de Nukiyama).[11]

III.2.1- Régime (ab) : convection naturelle.

Nukiyama observa que l'ébullition, détectée par la présence de bulles, ne démarrait pas tant que $\Delta T_e \approx 5^\circ C$ (à la pression atmosphérique). Il faut donc une certaine surchauffe pour que l'ébullition se mette en œuvre, c'est-à-dire pour amorcer des germes. Tant qu'il n'y a pas de bulles, l'échange se fait par convection naturelle uniquement et le coefficient d'échange peut être calculé avec corrélations classiques à ce régime.

III.2.2- Régime (be) : ébullition nucléée à bulles séparés.

Pendant cette phase de l'ébullition, les bulles (composées de vapeur et d'air) montent en colonnes à partir de points isolés de la paroi que l'on appelle des *sites*. Si l'écart de température augmente, les bulles sont de plus en plus nombreuses. On peut de façon

empirique relier le nombre (N) de site par m^2 au flux échangé selon $N = 1,2 \times 10^{12} \times Q_p \times P$ (où P est la pression totale exprimée en bars).

Dans ce régime, l'échange thermique est de la forme $Q_p = h \times \Delta T^n$, avec n une constante comprise entre 3 et 4 pour l'eau à la pression atmosphérique. Le coefficient h du régime d'ébullition nucléée à bulles séparées dépend de la nature et de la pression du liquide, de la géométrie, de la nature et de l'état de l'élément chauffant. La puissance échangée entre la paroi et le liquide est nettement plus importante que celle du régime précédent pour lequel l'échange est de type convectif.

III.2.3- Régime (ef) : ébullition nucléée avec colonnes continues.

Le flux évacué croît très lentement du fait de la présence de bulles de plus en plus nombreuses à la surface de l'élément chauffant. Ces bulles forment une colonne de gaz qui isole le liquide de la paroi chauffante. Du point de vue industriel, la zone (ef), régime pour lequel les échanges sont très efficaces, présente le plus d'intérêt. Au point f , il existe une couche de vapeur continue qui isole complètement le liquide de la paroi. Or le gaz, composé de vapeur et d'air, est très faiblement conducteur ce qui se traduit par une difficulté à évacuer de la chaleur. Au-delà du point f , on distingue deux cas :

1) Le flux est imposé entre la paroi chauffante et le liquide (expérience de Nukiyama).

Pour évacuer le flux thermique imposé, la température de la paroi va augmenter considérablement, les échanges sont régis par le rayonnement et la convection vapeur. On passe donc directement au point g . Le point f est appelé crise d'ébullition (flux critique), il correspond à la limite de fonctionnement des dispositifs mettant en œuvre l'ébullition.

2) La température de la paroi chauffante est imposée.

Si le point de fusion de l'élément chauffant est suffisamment élevé pour supporter de hautes températures, le régime (fg) est décrit par la courbe en pointillé qui traduit le fait que le flux échangé diminue fortement (à cause de la pellicule de gaz) à mesure que la température de l'élément chauffant augmente et passe par un minimum. Le régime (fg) à température imposée peut également être fluctuant du fait de la mouillabilité de l'élément chauffant. En effet, il peut, même dans ce régime, y avoir localement de l'eau au contact de la paroi qui

s'évapore instantanément en évacuant un flux important. En résumé le régime (**fg**) est une zone instable qui ne peut se décrire qu'à température imposée en la faisant varier.

III.2.4- Régime (*gh*) : ébullition en film.

Si l'élément chauffant est à haut point de fusion, pour pouvoir dépasser le stade du point **g**, le transfert de chaleur se fait par rayonnement et convection vapeur. A cause de la pellicule de gaz qui isole la paroi chauffante, cette zone est dite à vaporisation pelliculaire.

Comme nous l'avons précisé plus haut, l'objectif est de décrire de manière qualitative et quantitative la relation liant la densité de flux Q_p à la différence de température entre la paroi et l'eau liquide. La source de chaleur sur laquelle Nukiyama dans son expérience jouait était une puissance électrique. Dans notre étude il nous est demandé de mettre en œuvre une source de chaleur par interface céramique de type *cofalit* (céramique issue de la vitrification de déchets amiantés).

MATERIELS ET METHODES

Toutes les techniques de dessalement que nous venons de présenter dans ce qui précède sont consommatrices d'énergie. L'enjeu de notre étude est de proposer le solaire à concentration comme source d'énergie pour le procédé de dessalement. Il nous a été demandé de concevoir et de réaliser un prototype de concentrateur parabolique pour notre étude. Dans ce qui suit nous allons faire une brève généralité de la concentration solaire thermodynamique, en suite nous passerons au dimensionnement de notre prototype et nous finirons par les analyses faites à partir de ce prototype.

CHAPITRE 3 : CONCENTRATION SOLAIRE THERMODYNAMIQUE.

I- GENERALITES.

On désigne par « *solaire thermodynamique* » l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique ou électrique à travers un cycle thermodynamique. Le principal avantage de cette technologie réside dans la possibilité de stocker la chaleur emmagasinée avant sa conversion en électricité. Contrairement au photovoltaïque, cette technologie permet ainsi de **fournir de l'électricité au réseau en permanence.**

I.1- Les différentes formes de concentration solaire.

Il existe deux grandes formes de concentration d'énergie solaire : **le solaire thermique à concentration** et **le solaire photovoltaïque à concentration (CPV).**

I.1.1- Le solaire thermique à concentration.

Des **miroirs** font converger les rayons du soleil vers un tube dans lequel circule de l'eau. Cette dernière va s'échauffer sous l'effet des rayons lumineux, et se transformer en vapeur. Cette vapeur est utilisée pour entraîner une turbine qui produit l'électricité.

I.1.2- Le solaire photovoltaïque à concentration (CPV).

Le système de Concentration PV, quant à lui convertit l'énergie des rayons du soleil directement en électricité en faisant converger grâce à des miroirs et des lentilles, la lumière sur des **cellules photovoltaïques** dites multi-jonction.

I.2- Les différentes technologies de concentration solaire.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables. Comme présente la **figure 9**, cette production fait appel à des capteurs à concentration qui se présentent sous plusieurs technologies, regroupées en deux principaux systèmes de concentration. Les **systèmes à concentration en ligne** et les **concentrateurs point** qui diffèrent par leurs facteurs de concentration (facteur moins important pour les concentrateurs en ligne).

✓ **Les systèmes à concentration en ligne** : Capteurs cylindro-parabolique et capteurs linéaire de Fresnel

✓ **Les concentrateurs point** : Les tours à héliostats et capteurs paraboliques.

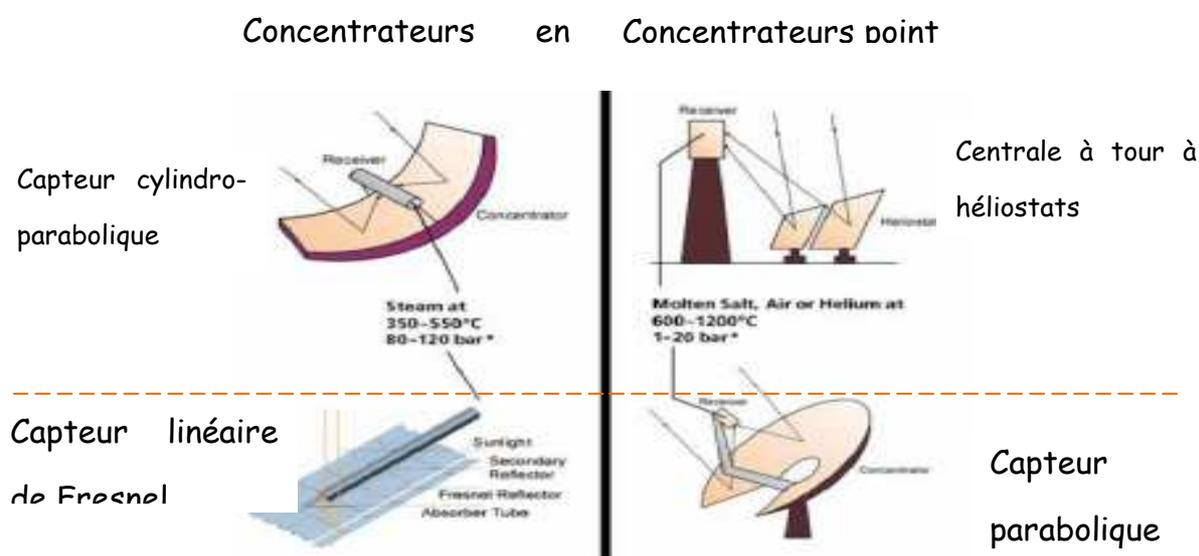


Figure 9: Les principales technologies de concentration solaire. [12]

Un aspect très important des systèmes à concentration est que seule l'irradiation directe peut être mise à profit, la radiation diffuse ne pouvant pas être focalisée par le concentrateur. La centrale solaire ne peut donc fonctionner que si le ciel est dégagé.

Pour la suite de notre étude nous allons nous intéresser à la concentration solaire à partir d'un capteur parabolique, dont nous allons faire une brève description du fonctionnement avant de passer à son dimensionnement et sa conception par la suite.

II- LES CAPTEURS PARABOLIQUES.

II.1- Schéma de principe.

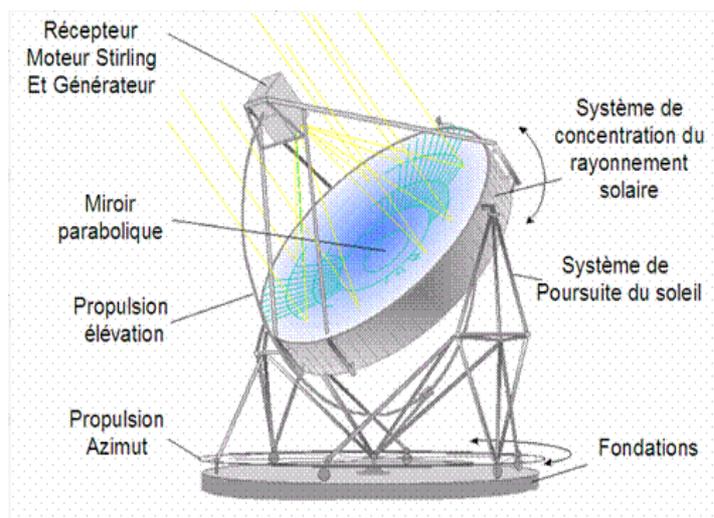


Figure 10: Capteur parabolique [13]

II.2- principe de fonctionnement.

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Les rayons du soleil arrivent sur la surface du concentrateur qui constitue le champ solaire. Le rayonnement est en suite concentrer au foyer de la parabole. Le récepteur absorbe ainsi l'énergie réfléchié par le concentrateur et la transfère au fluide de travail du cycle de puissance. Ces capteurs suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le maximum de rayonnement sur le foyer. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C.

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%). Un de leurs principaux avantages est qu'ils peuvent être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement. Comme ordre de grandeur, on peut considérer qu'un concentrateur de 10 m de diamètre peut fournir jusqu'à 25 kW d'électricité sous une insolation de 1000 W/m².

CHAPITRE 4 : DIMENSIONNEMENT DE LA PARABOLE SOLAIRE.

Ce chapitre présente le dimensionnement de notre parabole solaire, et l'inventaire du matériel pour sa conception, afin de réaliser nos analyses. Il ne s'agit que d'un prototype de simulation de distillation, car le principe en elle-même est beaucoup plus à l'échelle industrielle. Les différentes équations utilisées sont présentées de façon plus détaillées en annexe.

I- ÉQUATION GÉNÉRALE DE LA PARABOLE (VOIR ANNEXE 4)

Soit F le foyer de la parabole ; (Δ) l'axe focale et K le point d'intersection de l'axe et la directrice (D) de la parabole. Posons S le milieu de $[F, K]$; On choisit le repère orthonormé $(S; \vec{i}; \vec{j})$ tel que l'axe des ordonnées soit l'axe focal et orienté de K vers F .

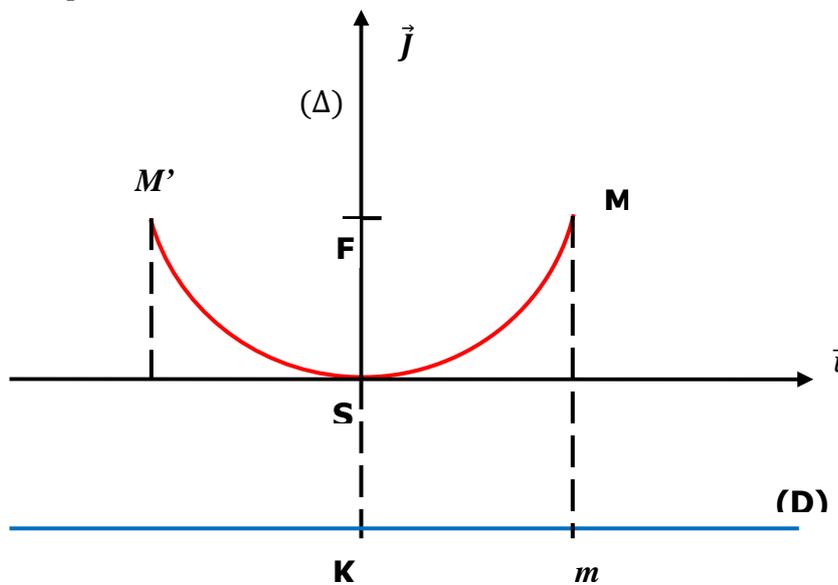


Figure 11: Courbe parabolique dans le repère $(S; \vec{i}; \vec{j})$

L'équation de la parabole est de la forme $y = \frac{x^2}{4f}$ (voir tout le développement en Annexe 4)

II- APPLICATION DE L'ÉQUATION À NOTRE ÉTUDE.

Pour notre étude, le diamètre de notre prototype est de 2 m. Nous allons estimer le rayon de courbure de la parabole et déterminera la position du foyer F . Pour notre étude, dans l'optique de diminuer le coût d'investissement et faciliter la manipulation, nous allons éviter de choisir une distance focale assez grande. Après différents calcul présentés en Annexe nous avons

$f = R = 50 \text{ cm}$

III - DIMENSIONS DES FEUILLES DE LA PARABOLE.

II.1- Nombre de feuilles.

Il n'existe pas une technique idéale pour déterminer le nombre de feuilles de la parabole, mais il convient de noter que plus nombre est élevé ou trop réduit, il se posera des difficultés d'accolage de sorte à avoir une surface du concentrateur uniforme et esthétique. Pour notre parabole nous estimons le nombre de feuilles à 12 ; à partir duquel nous allons calculer les dimensions de chacune.

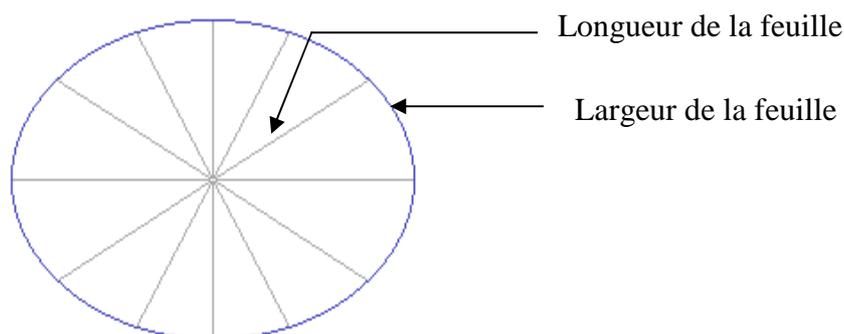


Figure 12: Constitution de la surface réfléchissante de la parabole

III.2- Dimensions d'une feuille.

✓ Largeur de la feuille.

La largeur de la feuille correspond au petit rayon de courbure qui revient à une feuille sur la circonférence de la section d'ouverture du concentrateur solaire.

$$\text{largeur de la feuille} = \frac{\pi \times \text{diamètre}}{\text{nombre de feuille}} = \frac{\pi \times 200}{12} = 52,3598 \approx 52,36 \text{ cm}$$

✓ Longueur de la feuille.

La longueur de la feuille, correspond à la longueur d'arc de la parabole. Son calcul n'est pas aussi facile mais nous avons essayé par une approche mathématique, que nous présentons avec détails en Annexe 3. La longueur de l'arc de la courbure ainsi trouvée est de **114,8 cm**.

IV- DIMENSIONNEMENT DU RÉCEPTEUR

IV.1- Irradiation directe

Selon les données de la station météorologiques du LESSE, pour la période du 28 février au 4 mars 2010, sur le site de KAMBOINSE nous avons relevé des données des irradiations que nous résumons par le diagramme de l'Annexe 5.

Ce diagramme nous présente des irradiances directes très faibles en début de la matinée jusqu'à presque 8h. Alors nous proposons travailler entre 9h30 et 15h période pendant laquelle les irradiances atteignent sont supérieures à 200 W/m. La moyenne des irradiances directes enregistrées du 28 février au 4 mars entre 9h 30 et 15h est d'environ 319, 3 W/m², moyenne que nous allons utiliser pour la suite de nos travaux.

IV.2- Puissance thermique reçue par le capteur.

Soit S_0 la section d'ouverture du collecteur. Nous supposons que la parabole est orientée de telle sorte que le flux incident soit parallèle à l'axe focal. En d'autres termes la section de passage du rayonnement solaire entrant dans le capteur est égale à la section d'ouverture. La puissance thermique reçue au niveau du collecteur est :

$$Q_c = I \times S_0 \quad (1)$$

I : Irradiation directe (W/m²)

$$S_0 : \text{Section d'ouverture du collecteur} : S_0 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$Q_c = 1005,81 \text{ W}$$

IV.3- Puissance thermique reçue par le récepteur.

La puissance thermique reçue par la parabole n'est pas totalement transmise au récepteur. On note des pertes thermiques :

✓ **par convection** : Ces pertes en régime transitoire se justifient par l'instabilité des paramètres comme la vitesse du vent, la température ambiante du milieu...

✓ **par rayonnement** : Lorsque le rayonnement concentré arrive au niveau du récepteur, toute la chaleur n'est pas transmise à l'intérieur du récipient comme on le solliciterait ; on note un rayonnement qui dépend cette fois des caractéristiques du matériau dont est fait le récepteur.

$$Q_{ex} = \dot{m} C_p (T_s - T_e) = [\tau I - U (T_m - T_{ext})] S_c \quad (2)$$

(Voir nomenclature au lexique plus haut)

La plus grande difficulté réside dans le calcul du coefficient de pertes thermiques U . Pour la suite de notre étude nous allons estimer les pertes thermiques à 30% et nous allons aussi supposer que l'efficacité optique du capteur τ égale à 90%.

Ainsi la quantité de d'énergie supposée être reçue à l'intérieur du récipient est de :

$$Q_{ex} = \tau Q_0 - \text{Pertes} \rightarrow Q_2 = \tau Q_0 - 30\% \tau Q_0 \quad (3)$$

$$Q_{\text{ex}} = 70\% \times \tau \times Q_0 = 0,63 \text{ kW} : \text{Puissance thermique reçue par le récepteur}$$

IV.4- Dimensions du récepteur.

La quantité d'énergie reçue à l'intérieure du récepteur se fait par conduction. Nous allons déterminer grâce à cette énergie la surface d'échange de notre récepteur, proposer le matériau de conception, sa forme géométrique et autres grandeurs susceptibles de prendre en compte pour le concevoir. Nous avons exploité deux méthodes que nous présentons en Annexe 4 et qui nous ont permis de proposer un récepteur en aluminium de diamètre **89,5 mm**.

VI- AUTRES ÉLÉMENTS DE CONCEPTION

Les autres éléments à prendre en compte sont :

- les supports porteurs de notre parabole : une précision est à signaler en ce qui concerne la rotation sur deux axes pour l'orientation suivant la course du soleil.
- Les matériaux de protection contre les influences externes dont l'antirouille
- Les appareils de soudures et de montage de la parabole reviennent à la société que nous avons rencontrée et à qui nous avons sous-traité les travaux de soudure.

Nous regrouperons tous ces éléments dans le tableau de l'annexe 5 qui fera ressortir les propositions de prix que nous avons trouvé.

CHAPITRE 5 : ETUDE EXPERIMENTALE

Il est question dans ce chapitre d'évaluer la production de la vapeur comme énergie primaire susceptible de démarrer le cycle secondaire, celui du dessalement. Cette production selon la littérature passe par une ébullition qui présente des problèmes non encore maîtrisés de nos jours et qui font objet de nombreuses études sur la *crise d'ébullition*.

L'idéal pour nous aurait été d'analyser avec le cas du flux de chaleur issu de la concentration solaire, les différents régimes de l'ébullition de l'eau, de présenter physiquement ce qui se passe et de déterminer les grandeurs des flux à chaque phase. Mais avec l'outil que nous avons à notre disposition nous allons limiter nos objectifs come suit :

I- OBJECTIF DE L'EXPERIMENTATION.

L'ébullition est liée à un transfert thermique qui se caractérise par des différents régimes et présente à certains niveaux de sérieux problèmes comme la crise d'ébullition. L'identification

des régimes d'ébullition peut se faire physiquement à l'œil, ce qui suppose que le récepteur qui contient de l'eau à analyser doit être en verre (Pyrex par exemple) pour nous permettre d'observer les différents régimes et les autres phénomènes qui accompagnent la production de la vapeur. Mais pour le cas de notre première expérimentation dans ce domaine, nous allons :

- Évaluer la quantité d'énergie que peut produire notre parabole en fonction du temps, et des irradiations directes du lieu de l'analyse.
- Déterminer l'apport du soleil c'est-à-dire le flux de chaleur que celui-ci peut produire au fil du temps,
- Faire un rapprochement avec la littérature pour évaluer la quantité d'eau douce que notre prototype peut produire. Ceci nous permet d'avoir une allure de production d'eau douce selon la taille de capteur parabolique.
- Évaluer le gain économique en utilisant une telle énergie : comparaison avec les autres stations de dessalement trouvées dans la littérature.

II- INSTALLATION EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTATION ASSOCIEE.

II.1- Schéma de principe

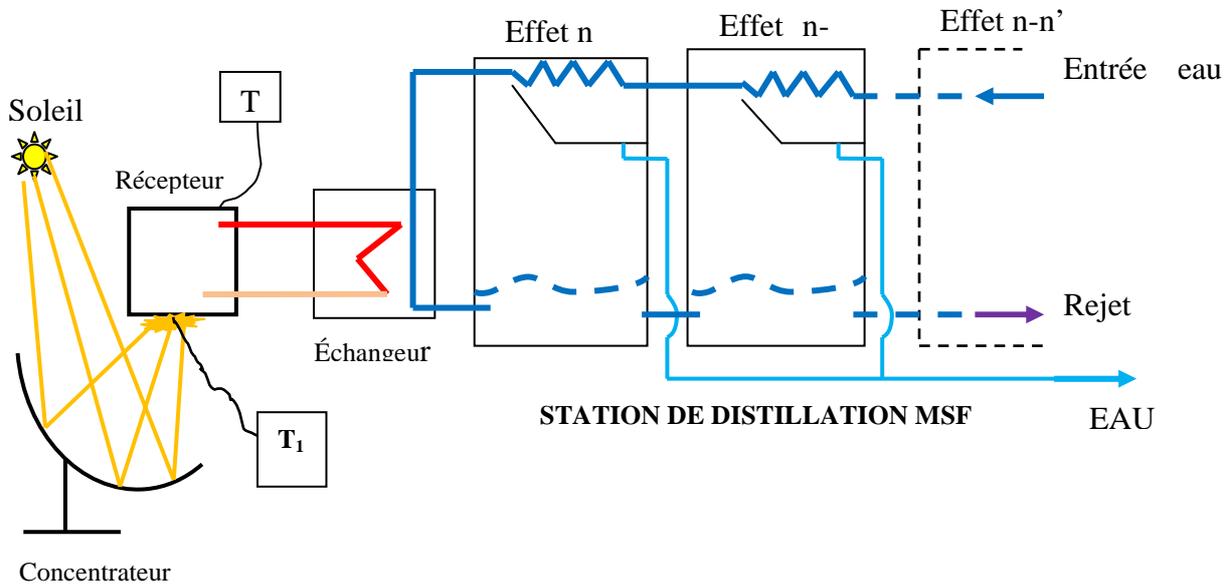


Figure 13: Schéma du principe d'expérimentation.

La figure ci-dessus représente le schéma de principe de l'installation d'expérimentation. Le concentrateur reçoit les rayons du soleil et les renvoie vers le récepteur qui contient de l'eau. Le thermocouple (1) placé sur le fond du récepteur qui reçoit la concentration, prend la température du récepteur et celui de (2) plongé dans l'eau permet de relever les températures

de l'eau au cours de l'ébullition. La vapeur ainsi produite alimente le réseau secondaire celui du dessalement par distillation. Dans cette première expérience nous nous sommes fixés l'hypothèse de la production d'énergie primaire par le concentrateur pour alimenter le circuit secondaire, celui du dessalement par distillation. Nous avons également trop limité notre dispositif en ceci qu'au niveau du récepteur qui est simplement fermé avec un couvercle plus ou moins étanche, nous avons laissé un orifice d'environ 2,5 cm de diamètre pour laisser échapper la vapeur à l'air libre. Dans la réalité cette vapeur devait sortir par une tuyauterie qui devrait le conduire au niveau d'un échangeur où il cèdera sa chaleur à l'eau de mer.

Les autres instruments pouvant nous servir durant l'expérimentation sont :

- Un chronomètre pour relever les temps d'analyse et thermocouples
- Des câble-sondes pour relier les câbles aux différents endroits précis de mesure
- Notamment les appareils de la station météorologique
- Une balance sensible, un bécher de 2000 ml, colle adhésive ou scotch
- Les dispositifs de sécurité (gangs en cuir, les lunettes contre soleil etc....)

III- METHODE D'EXPERIMENTATION

- Au début, bien nettoyer la parabole pour ne pas limiter les rayonnements solaires
- Câbler les thermocouples selon le schéma indiqué plus haut (**figure 1 3**)
- Prendre le poids à vide du bécher sur la balance et tarer la balance par la suite
- Peser la quantité d'eau à choisir pour l'expérience : 2 kg, 1kg ou 1,5kg
- Placer le récepteur au foyer et y mettre de l'eau
- Placer la parabole au soleil et l'orienter suivant les deux axes de sortes que le maximum des rayonnements soient concentrés sur le fond du récepteur
- Relever les températures du récepteur, de l'eau, et ambiante au début de l'expérimentation
- Après chaque 10 min orienter la parabole suivant les deux axes de rotation de façon à concentrer le maximum des rayons solaires sur le récepteur. Cette orientation manuelle n'est pour autant précis comme on l'aurait obtenu avec un dispositif de suivie automatique du soleil. Nous jouons sur l'ombre portée la parabole comme et nous orientons manuellement la parabole et vérifions que le maximum de concentration arrive au niveau du récepteur.
- Prendre les données pendant les écarts de temps (10, 15 ou 20 min) et vérifier toujours l'orientation de la parabole suivant la course du soleil.

RESULTATS OBTENUS

I- DONNÉES EXPÉRIMENTALES.

Les données relevées au cours de nos expérimentations concernent :

- La température au niveau du récepteur en tant que élément chauffant
- La température d'ébullition de l'eau et la température ambiante
- Les irradiations directes relevées au niveau de la station météorologique du LESEE
- Les différentes heures de relevés des données
- La quantité d'eau au début et à la fin de l'expérimentation

Les premières expérimentations que nous avons réalisées avec notre prototype nous permettent de regrouper les données expérimentales dans les tableaux que nous présentons à la partie annexe. A partir des ces données nous pouvons représenter les courbes d'évolution des températures relevées en fonction du temps et des irradiations enregistrées.

✓ Irradiations directs enregistrées.

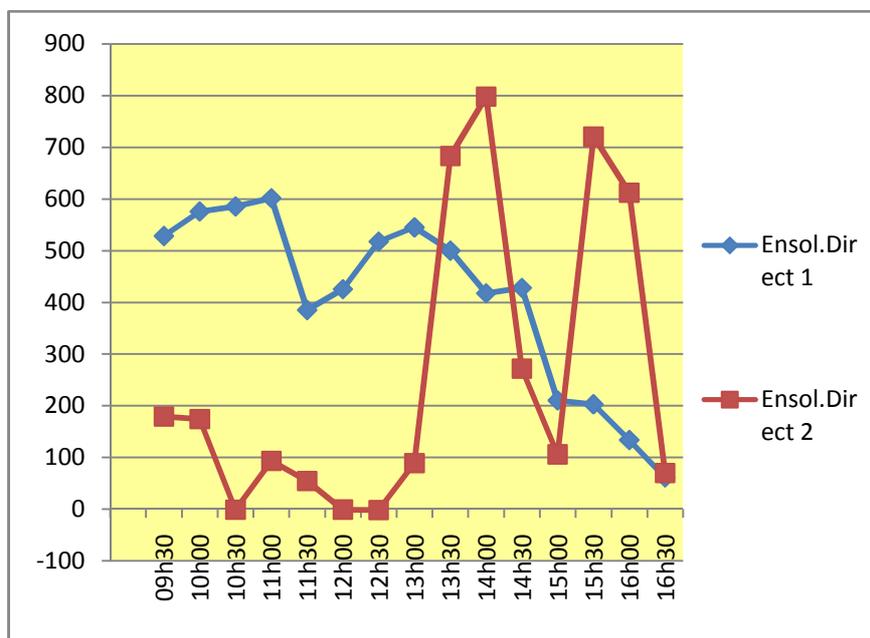


Figure 14: irradiations enregistrées pendant nos expérimentations.(station météo LESEE 2iE)

Cette figure nous présente les irradiations enregistrées pendant nos analyses. La courbe en bleue (*ensol.Direct 1*) représentant les irradiations pendant les périodes favorables avec un pic de 600 W/m² et un minimum de 61W/m² ; et la courbe en rouge (*ensol.Direct 2*) pour

une période défavorable à l'ensoleillement, mais à partir de 12h30 les irradiances sont bonnes et on constate un pic de 800 W/m^2 , mais qui subit une chute rapide suite à un passage de nuage suivi de pluie.

✓ **Différentes températures enregistrées pendant les périodes à l'ensoleillement.**

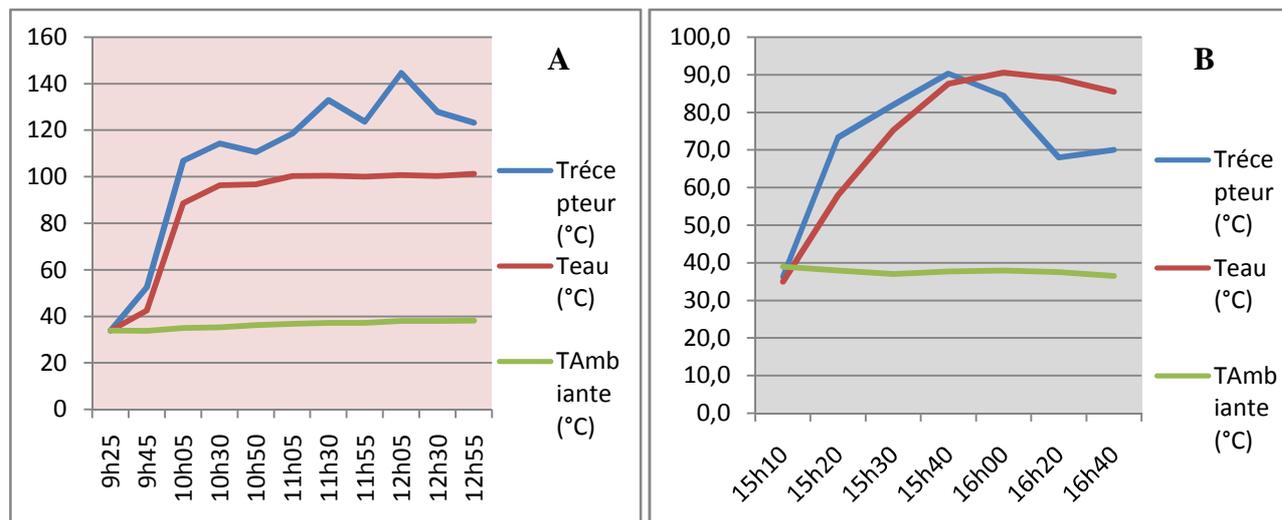


Figure 15: Allure des températures enregistrées pendant les jours favorables.

Cette figure nous laisse voir l'allure des températures du récepteur, de l'eau en ébullition dans le récepteur et ambiante, températures mesurées ici pendant des périodes favorables, c'est-à-dire les périodes pendant lesquelles les irradiances sont bonnes. Une matinée (A) pratiquement ensoleillée et on constate une croissance de la température du récepteur (courbe en bleu) de même que celle de l'eau (courbe en rouge) jusqu'à la température d'évaporation où elle se stabilise. A la **figure 15.B**, nous avons presque la même allure croissante avec les deux températures précédentes jusqu'à presque 15h où le ciel commence à s'obscurcir et les températures commencent à chuter considérablement au fur et à mesure que les nuages empêchent les irradiances directes.

✓ **Différentes températures pendant les périodes défavorables à l'ensoleillement.**

Il s'agit ici de présenter l'évolution des températures enregistrées au cours des expérimentations pendant les périodes dites défavorables aux irradiances et marquées ici par des pluies ou tout simplement un passage brusque et inattendu des nuages dans le ciel.

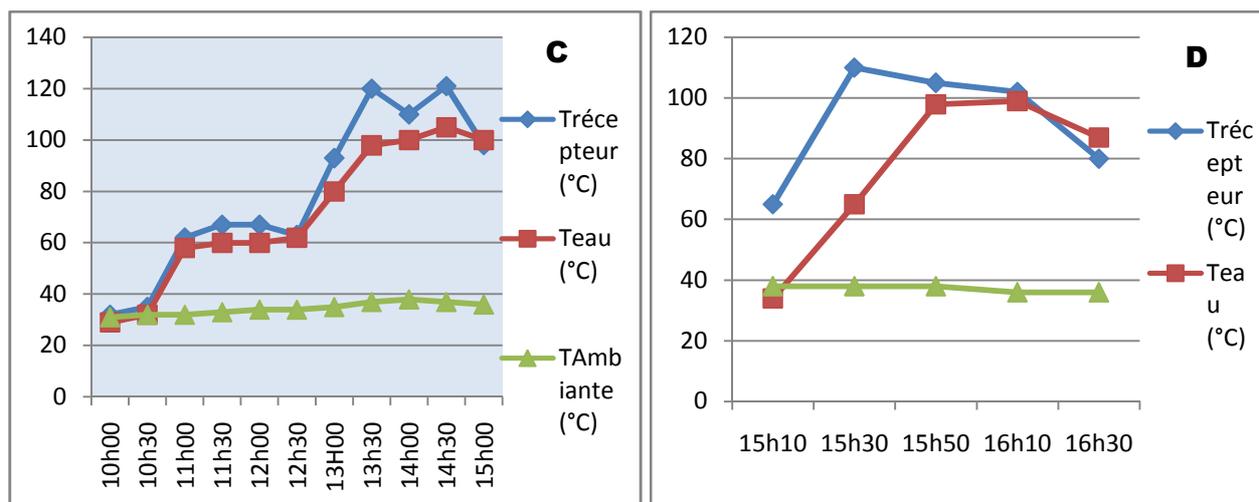


Figure 16: Allures des températures pendant les périodes défavorables à l'ensoleillement.

La figure 16.C présente une matinée totalement défavorable à l'ensoleillement et les températures enregistrées sont très basses (< 65°C) et ne permettent pas à l'eau de s'évaporer. A presque 12h30 où ces températures commencent à s'accroissent suite à un ciel dégagée et un bon ensoleillement (figure 14) qui monte jusqu'à presque 800 W/m². Une fois la première expérimentation terminée nous avons rapidement rempli le récepteur de l'eau sans attendre que le récepteur se refroidisse, ce qui justifie la hausse rapide des températures du récepteur ainsi que de l'eau comme nous montre la Figure 16.D mais quelques temps après c'est-à-dire vers 16 h le ciel se couvre de nuages et on constate une chute de ces températures.

II- EXPLOITATION DES DONNEES EXPERIMENTALES

II.1- La quantité d'énergie échangée au cours de l'ébullition.

La quantité de l'eau contenue dans le récepteur subit une élévation de température de 34°C à 100°C, température à partir de laquelle elle commence à s'évaporer à la pression atmosphérique. A partir de cet instant la quantité de chaleur apportée permet de vite évaporer l'eau. Soit Q la quantité d'énergie apportée dans tout le cycle d'évaporation. (Annexe 6)

$$Q_T = m_{eau} \times C_p (Tf_{eau} - Ti_{Eau}) + m_{\text{évap}} \times L_{eau} \quad (4)$$

m_{eau} : masse de l'eau dans le récepteur (kg) et $m_{\text{évap}}$ celle évaporer (Kg)

C_p : Chaleur massique de l'eau : 4180 J/kg/°C

T_i : température initiale de l'eau : 34°C, Tf_{eau} : température d'évaporation de l'eau : 100 °C à la pression atmosphérique

L_{eau} : Chaleur latente d'évaporation de l'eau : 2256 kJ/kg à 100°

II.2- Puissance thermique transmise au cours de l'ébullition

Il s'agit ici de la puissance thermique reçue par l'eau au cours de son cycle d'ébullition. Cette puissance étant transmise à cette eau par conduction à travers la surface d'échange du récepteur qui reçoit le maximum de concentration. (Voir tableau 5)

$$Q_T = P \times t \longrightarrow P = \frac{Q_T}{t} \quad (5)$$

II. 3- Production d'eau douce.

Selon la *figure 13* présenté plus haut la vapeur produite par concentration solaire va alimenter le cycle secondaire, celui de la distillation pour notre cas.

A. Maurel [6] constate que la chaleur à fournir à une unité MED est uniquement celle qui est nécessaire pour réchauffer l'appoint d'eau de mer dans le premier « effet » et pour vaporiser la production de ce seul « effet ». Si les productions de « n » effets sont identiques, la consommation spécifique de chaleur est en négligeant les pertes et certains effets secondaires :

$$Q = \frac{L}{n} + k.C_p.\Delta T \quad (6)$$

Pour une distillation à détente successive (MSF), il constate que l'échauffement total du débit de l'eau de mer circulant dans les condenseurs, qui est égale à $T_1 - T_0 = n.\Delta T$ est provoqué par la condensation de la production d'eau douce P et par le refroidissement de cette eau dont le débit varie de P/n à P entre la chambre 1 et la chambre n . On a donc :

$$D.C_p.n\Delta T = P.L + P.C_p.\frac{n\Delta T}{2} \quad \text{D'où la production d'eau douce}$$

$$P = \frac{D.C_p.n\Delta T}{L + C_p.\frac{n\Delta T}{2}} \quad (7)$$

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

n : nombre d'effets de l'installation

k : rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite : dans la littérature plusieurs études prennent le débit d'eau de mer 2 fois celui d'eau douce produite

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

D : débit d'eau de mer à l'entrée des condenseurs (kg/s) P : production d'eau douce (kg/s)

C_p : chaleur spécifique à pression constante de l'eau de mer et eau douce en kJ/kg/°C

– **Applications numériques**

Nous prenons l'exemple de l'étude proposé par A. Maurel [6] où le nombre d'effets $n = 7$. La chaleur latente de vaporisation de l'eau à entre 75 et 100°C est environ 2319 kJ/kg. La chaleur massique de l'eau de salinité 35g/l est d'environ 4,035 kJ/kg/°C, et nous prenons $k = 2$, et $\Delta T = 6^\circ\text{C}$.

$$Q = \frac{L}{n} + k \cdot C_p \cdot \Delta T = 379 \text{ kJ/kg d'eau douce produite. (6)}$$

Dans le second cas c'est-à-dire celui du **MSF**

$$\frac{P}{D} = \frac{C_p \cdot n \Delta T}{L + C_p \cdot \frac{n \Delta T}{2}} = 7,5\% \quad (7)$$

en d'autres termes la production d'eau douce ici est égale à **7,5%** du débit d'eau de mer entrant dans l'installation.

Pour notre cas nous avons trouvé des valeurs de consommation thermique en fonction du temps de l'expérimentation, ce qui nous permet de déterminer la production d'eau douce équivalente au bout de ces temps dit temps d'ébullition ou de production de vapeur, et que nous résumons dans le tableau 5 . Les pertes thermiques étant oubliées, c'est-à-dire nous supposons que la production de l'énergie thermique primaire qui arrive au niveau de l'échangeur est totalement transmise à l'eau de mer qui entre dans la première chambre encore appelée « effets ».

II.4- Puissance d'ensoleillement reçue au niveau du concentrateur.

Cette puissance en fonction des irradiances directes que nous avons enregistrées pendant le même temps de nos expérimentations, est aussi fonction de la section du collecteur à savoir 3,14 m². En fonction de cette puissance nous allons analyser plus bas le rapport avec celle absorbée par l'eau dans le récepteur. Nous résumons tous les calculs précédents dans le tableau suivant :

Tableau 4: Récapitulatifs de grandeurs calculées à partir des données expérimentales.

		EXPERIMENTATION 1	EXPERIMENTATION 2	EXPERIMENTATION 3	EXPERIMENTATION 4
MATIN	Masse d'eau initiale (kg)	2	2	2	1
	Masse d'eau finale (kg)	0,476	0,546	0,423	0
	Temps d'ébullition	4h 20	3h 30	3h 20	5h
	Énergie absorbée par l'eau Q_{matin} (kJ)	3964,82	3806,90	4084,39	2519,34
	Puissance thermique de l'eau P_{matin} (W)	254,16	302,14	340,37	139,96
	Irradiation Moyenne (w/m ²)	664,91	422,86	472,92	206,36
	Puissance d'ensoleillement P_{ensol} (W)	2087,82	1327,78	1484,97	647,97
	Rapport: $P_{\text{matin}}/P_{\text{ensol}}$	12,17%	22,75%	22,92%	21,60%
	Production d'eau douce (kg)	10,46	10,04	10,78	6,65
SOIR	Masse d'eau initiale (kg)	2	2	2	1,5
	Masse d'eau finale (kg)	1,73	1,56	1,32	1
	Temps d'ébullition	1h 20	1h 30	2h	1h
	Énergie absorbée par l'eau Q_{soir} (kJ)	993,68	1510,96	2052,40	1516,74
	Puissance thermique de l'eau P_{soir} (W)	207,02	279,81	285,06	421,32
	Irradiation Moyenne (w/m ²)	364,02	233,04	352,11	467,53
	Puissance d'ensoleillement P_{ensol} (W)	1143,02	731,74	1105,62	1468,04
	Rapport: $P_{\text{soir}}/P_{\text{ensol}}$	18,11%	38,24%	25,78%	28,70%
	Production d'eau douce (kg)	2,62	3,99	5,42	4,00

Ce tableau regroupe entre autre la masse de l'eau au début et à la fin de chaque expérience, ainsi que le temps mis pour l'ébullition. En fonction des températures que nous avons représentées par les graphiques de la figure 22 nous avons également les puissances thermiques fournies à l'eau lors de l'ébullition, puissance que nous pouvons comparer avec la puissance d'ensoleillement enregistrée en fonction des irradiations.

DISCUSSIONS ET ANALYSES

I- ANALYSES DES TEMPERATURES ET IRRADIATIONS DIRECTES.

Lors de notre première étude sur le dimensionnement de la parabole solaire (chapitre 4), nous avons constaté des irradiations directes très faibles en début de matinée avant 9h. Pour nos analyses nous avons opté commencer nos expériences au-delà de 9h et jusqu'à 16h environ, période pendant laquelle la moyenne des irradiations sont supérieures à 200 W/m².

Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, la température du récepteur, ainsi que de l'eau en ébullition (*Figure 15.A-B*) sous l'effet de la concentration solaire, évoluent en fonction de l'ensoleillement direct ici représenté par la *figure 14*. Également nous avons constaté à la *figure 14* que l'ensoleillement direct pour des périodes favorables est compris entre 61 et 602 W/m². Cette grandeur influence de façon particulière sur l'évolution des différentes températures (récepteur, eau en ébullition et température ambiante). Les irradiations sont d'autant plus importantes lorsque le ciel est pratiquement clair or, le mois de mai étant pratiquement pluvieux se caractérise par des passages des nuages lourds dans le ciel qui influencent sur les données des irradiations qui peuvent baisser considérablement comme nous montre la courbe en rouge « Ensol.Dir 2 » pour les périodes défavorables où nous avons noté des passages nuageux suivis des pluies.

Nous constatons également au cours de notre étude, que lorsque les irradiations ne sont pas bonnes, la température du récepteur baisse rapidement par rapport à celle de l'eau. Par exemple lorsque l'eau a atteint une température de l'ordre de 100°C, si l'irradiation directe chute, automatiquement la température du récepteur chute et peut passer brusquement en dessous de celle de l'eau qui, par contre va baisser lentement. Ceci peut être justifié par le fait que les pertes thermiques au niveau de la surface du récepteur sont plus importantes que celles de l'eau dans le récepteur. En effet sous l'influence du vent, la température à la surface de contact avec l'air, connaît des perturbations. Par contre le récepteur est peint en noir pour limiter par exemple les pertes de chaleur une fois celle-ci transmise à l'eau. Cette perte thermique pourra être limitée de façon considérable avec un matériau qui ne perd pas assez vite de la chaleur une fois que l'eau a reçue une bonne quantité de cette chaleur. Mais un autre paramètre important est à prendre en compte : le matériau doit pouvoir résister à la fusion en

cas de hautes températures lors des ensoleillements très grands. C'est ce que l'on fera en utilisant le *Cofalit* c'est-à-dire de la céramique issue des déchets de l'amiante, qui résiste jusqu'à des températures de 1200°C sous air.

II- ANALYSE DES GRANDEURS CALCULEES : ENERGIE ET PUISSANCE THERMIQUES ET PRODCUTION D'EAU DOUCE.

✓ Énergie et puissance thermique transmise à l'eau.

Lorsque nous regardons la puissance thermique absorbée par l'eau au cours des différentes expérimentations, nous constatons que, le matin elle est comprise entre 140 et 341 Watts, et représente un pourcentage par rapport à la puissance d'ensoleillement reçue de l'ordre de 12 à 23%. Également en soirée on enregistre une puissance thermique absorbée par l'eau qui est comprise entre 207 et 421 Watts avec un pourcentage par rapport à la puissance d'ensoleillement compris entre 18 et 38%.

Nous constatons qu'au cours de nos expérimentations les puissances thermiques enregistrées en soirées sont nettement supérieures à celles du matin, ceci peut s'expliquer par le fait qu'à partir de 13h les irradianations sont importantes jusqu'à 16h, ceci permettant en un temps moins réduit que celui du matin de produire une énergie un peu plus considérable. Mais il faut noter que ceci se justifie uniquement lorsqu'aucun obstacle n'intervient comme les nuages.

En regardant les pourcentages que les puissances thermiques représentent par rapport à la puissance d'ensoleillement enregistrée grâce à des irradianations pendant ces temps, on constate que ceux-ci sont très bas par rapport à ce qu'on aurait attendu. En effet en prenant la moyenne de la puissance ensoleillement au cours des 4 études, les valeurs sont respectivement 1387 W pour les moyennes du matin, et 1112 W pour le soir. Les différentes pertes thermiques qui peuvent s'opposer au transfert de chaleur sont :

- Les pertes optiques au niveau de la surface du concentrateur
- Les pertes thermiques par convection naturelle (vitesse du vent qui passent)
- Les pertes par rayonnement au niveau de la surface du récepteur
- Les pertes par conduction entre l'eau et le récepteur

En supposant que ces différentes pertes peuvent représentées environ 45% de la puissance d'ensoleillement, la puissance qu'on aurait estimée au niveau de l'eau dans le récepteur

devrait être d'environ 750 W pour le matin et 600 W le soir. Hors en regardant les valeurs des puissances, nous avons la plus grande valeur enregistrée le matin qui de l'ordre de 340 W, et le soir de 421 W, valeurs qui restent nettement inférieures à ce qu'on aurait attendu (750 et 600 W). Alors ceci peut trouver une justification :

- Déjà au niveau de la limite de la conception de la parabole, pour pouvoir concentrer le maximum de concentration : homogénéité de surface et matériau réfléchissante,
- L'expérience se fait à l'air libre dont la vitesse du vent peut jouer énormément sur les pertes thermiques,
- Les limites de la manipulation manuelle : l'orientation de la parabole se fait manuellement, ce qui ne pourrait pas pour autant être précis qu'un dispositif de suivi du soleil, tout ceci réduisant énormément la concentration au niveau du récepteur,
- Les pertes dues à la poussière qui se dépose sur la surface réfléchissante de la parabole, bien que celle-ci soit nettoyée en début des expérimentations
- Nous notons également des pertes au cours de l'ébullition de l'eau. En effet au cours de l'ébullition, une partie de la vapeur d'eau se condense sur la surface intérieure du couvercle. Les gouttelettes d'eau qui se forment, retombent dans l'eau du récepteur, et exigent de ce fait un autre apport d'énergie.
- Des erreurs pendant l'expérimentation : par exemple l'écart de temps fixé pour prendre les relevés peut être grand de sorte que le soleil se déplace vite et diminue la concentration avant que nous ne passions prendre les données. Les erreurs peuvent aussi survenir aux niveaux des appareils de mesure comme les thermocouples.

Nous pouvons donc conclure que tous ces facteurs peuvent justifier des énormes pertes thermiques, et sont à prendre en compte pour une meilleure étude, surtout voir la manipulation au niveau de l'orientation de la parabole pour pouvoir concentrer le maximum des rayons au foyer.

✓ **Production d'eau douce.**

Au cours de notre étude chaque expérimentation comprenait deux phases. Une le matin allant de 9h30 à 12h30 et l'autre soir 14h ou 15h à 16h voir 16h30. Le temps moyen de l'expérimentation étant presque égal à 5h 35, pour une production d'eau douce d'environ 13,5 litres. Nous notons des intervalles de temps entre 7h (heure de levée du soleil voir même 6h30) on peut toujours exploiter ces quelques irradiations. Aussi entre 12h 30 et 14h ou 15h10 les irradiations sont assez considérables. Alors parfois lors de nos manipulations pour

repandre une autre analyse le soir, nous pouvons accuser des non-conformités de temps qui nous font perdre quelques puissances thermiques qu'on aurait enregistrées. Alors en incluant ces écarts nous pouvons passer à une production d'eau journalière de l'ordre de 20 litres avec notre parabole solaire de 3,14 m². Nous pouvons conclure que pour des zones de très bon ensoleillement ce type de projet serait efficace sur le point économique et environnemental que nous allons essayer de présenter dans la suite.

III- ÉVALUATION ÉCONOMIQUE FAITE À PARTIR DU CONCENTRATEUR.

La conversion de l'eau de mer en eau douce implique une consommation d'énergie : thermique dans le cas des procédés de distillation, électrique dans le cas de l'électrodialyse, purement mécanique dans le cas de l'osmose inverse. Selon A. Maurel [6] l'énergie minimale de dessalement de l'eau de mer à 25°C est égale à 0,70 kWh/m³. En d'autres termes l'énergie minimale nécessaire pour le dessalement de l'eau de mer a pour valeur 0,7 ; 1,1 ou 1,8 kWh/m³ selon que le taux de conversion est de 0 ou 50 ou 80%, le taux de conversion étant le rapport de la quantité d'eau douce produite à la quantité d'eau brute traitée.

D'après le tableau 5, à partir de notre prototype de concentrateur la moyenne de production de l'eau douce est de l'ordre de 13,5 litres. Nous avons également trouvé que l'eau douce produite représente 75% d'eau de mer (*voir, II. 3 de la partie résultats obtenus plus haut*). L'énergie correspondante à cette tranche de conversion est de l'ordre de 1,8 kWh/m³. Pour une production de 13,5 litres/jour, l'énergie consommée est de 24,3 W, correspondant à une économie que notre prototype permet d'enregistrer par jour (temps d'analyse évalué à 5h 35 en moyenne).

Nous allons pousser l'évaluation économique plus loin en prenant l'exemple de la station de distillation à détentes successives (MSF), d'**Al Khobar** en **Arabie Saoudite** telle que présenté *Alain Maurel [6] P.36-37*. Cette station est constituée de 10 unités de production d'une capacité de 27 000 m³/jour par unité et construite par SIDEM. Une seule unité FLASH à recyclage de 27 000 m³/jour nécessite un groupe électropompe pour le recyclage de l'eau de mer de 4 100 kW (15 000 m³/h-73 mètres), ce qui représente une consommation électrique de 3,6 kWh/m³. L'étude faite sur le dessalement de l'eau de mer par A. Maurel [6] donne l'ordre de grandeurs des investissements des différentes techniques de dessalement comme présente le tableau 5:

Tableau 5 : Investissements des différents procédés de dessalement [6]

Type d'eau	Procédés	Prix (\$US par m ³ /J)
Eau de mer	Multi-Flash	1 270 – 2 540
	Multi Effets	1 140 – 2 280
	Compression à vapeur	1 140 – 2 280
	Osmose inverse	1 000 – 2 000
Eaux saumâtres	Osmose inverse	250- 570
	Électrodialyse	370

Il ressort également de cette étude menée par A. *Maurel* que pour un procédé à Multiples Flash de ration 8, la consommation thermique est de 293 MJ/m³ et une consommation électrique de 4 kWh. En supposant que l'énergie primaire pour la production de la vapeur était du fuel, il arrive à une consommation de 9,2 kg de fuel par m³ de production d'eau douce si l'unité sert uniquement au dessalement, et 3,7 kg si l'unité est utilisée à double fin.

- En s'appuyant sur la consommation électrique de 4 kWh m³ d'eau douce, la consommation électrique de production de 2 7000 m³/J sera 108 000 kWh par jour. Pour les 10 unités de toute la station d'Al Khobar la consommation électrique journalière sera de 1 080 000 kWh.
- En supposant que l'unité de dessalement est à simple fin, et en supposant que l'énergie primaire est à base de fioul, la quantité nécessaire pour une seule unité de 27 000 m³/J est de 248 400 kg par jour soit 2 484 000 kg pour les 10 unités. Et si l'unité est utilisée à double fin on aura une consommation 999 000 kg pour les 10 unités.

En s'arrêtant à ce niveau, nous dirons qu'avec l'utilisation de la concentration solaire comme source d'énergie, on éviterait d'une part cette consommation d'énergie électrique, et de même que des dépenses engendrées pour l'achat du fioul en tant que combustible. Mais néanmoins un système d'appoint ne sera pas ignoré et devra être dimensionné en fonction des besoins.

IV- ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU PROJET.

Comme tout projet technique de nos jours, le volet développement durable n'est pas à ignorer pour notre étude. Nous pouvons citer comme impacts environnementaux liées au dessalement de l'eau de mer :

- Les prises d'eau en mer qui peuvent perturber le fond marin et interférer avec des routes maritimes,

- le rejet des saumures à la mer cause un problème de salinité et température: l'exposition continue à une plus forte salinité (1,5 à 2 fois celle du milieu) et à une température plus élevée (jusqu'à + 5°C) nuit à certaines espèces et en favorise d'autres. Le principal inconvénient est donc l'impact de la saumure sur l'environnement, surtout dans le cas de l'osmose inverse où les rejets sont plus concentrés. Si la station est située en bord de mer, on utilisera des diffuseurs pour diluer le concentrât le plus loin possible des côtes. Si l'usine est à l'intérieur des terres (parfois le cas pour les eaux saumâtres), on utilise des marais salants pour évaporer le reste d'eau de la saumure. (Maurel A., 2006)[6]
- Par ailleurs, la production d'eau douce demandant beaucoup d'énergie, la production des gaz à effets de serre par l'intermédiaire des centrales thermiques est élevée.
- dans la plupart des usines de dessalement, du chlore est ajouté à l'eau pour réduire le colmatage, ce qui mène à la formation d'hypochlorite et d'hypobromite dans l'eau de mer,
- des alliages Cuivre-Nickel sont généralement utilisés comme matériaux pour les échangeurs thermiques. La contamination de la saumure avec du cuivre due à la corrosion peut être une source de pollution, le cuivre étant toxique à fortes doses, [9]
- l'utilisation des antitartres comme des polyphosphates cause un problème d'eutrophisation,
- le chlorure ferrique utilisé dans les stations d'osmose inverse augmente la turbidité, de la saumure en sortie pouvant causer une gêne pour la faune et la flore,
- Le poly glycol contenu dans l'anti-mousse est faiblement biodégradable,

A la suite des inconvénients que nous venons de présenter, il convient de signaler que le dessalement de l'eau de mer a des aspects positifs à ne pas oublier :

- Le dessalement est un enjeu stratégique à court à moyen et à long terme comme solution aux besoins en eau douce, estimé en 2002 à environ 5000 km³ par an. 1 personne sur 5 sur la planète n'a pas accès à l'eau potable, et plus de 40% de la population mondiale ne dispose pas d'un service d'assainissement de base, d'où de grandes maladies hydriques liées à la grande variabilité de la qualité des ressources en eau. [16]
- Pour le cas de la contribution du solaire à concentration, nous ne manquerons pas de signaler le volet économique comme nous l'avons démontré à la partie précédente. Un autre volet très important est la gestion de l'environnement. Pour mieux expliciter ce volet nous allons évaluer la quantité de CO₂ que notre projet peut nous aider à éviter.

Nous prenons toujours pour référence le projet de la station de dessalement de d'Al Khobar
Nous considérons que l'énergie est produite à base de fioul. Une étude réalisée par C. CROS

et TABET J.P dans la cadre des travaux d'ADEME [19], une centrale électrique consommant du fioul comme combustible, génère des émissions de CO₂ de l'ordre de 676 g de CO₂ pour 1 kW d'électricité produit. La consommation d'électricité de cette station est de l'ordre de 10 080 000 kW en un jour. En référence à cette étude de l'ADEME on éviterait 731 tonnes de CO₂ par jour soit 266 815 tonnes de CO₂ évitée en un an, ce qui nous laisse voir que ce projet est intéressant d'après MDP qui signale qu'un projet qui permet d'éviter par an 50 000 t de CO₂ est dite « intéressant » ; donc peut être bénéfique en terme de vente de CO₂ évité.

RECOMMANDATIONS

I- SUGGESTIONS DE SOLUTIONS AUX PROBLEMES TECHNIQUES.

- Pour le cas d'une MSF nous avons vu plus haut qu'en cas de perçage d'une tuyauterie conduisant de l'eau de mer, il y a pollution de toute l'eau douce préparée. Alors il convient d'utiliser une tuyauterie avec du matériel adaptable.
- Le danger de pollution précédent n'est pas citer avec une MED, mais par contre l'évaporation se fait au contact de la surface d'échange, ce qui favorise l'entartrage également. Alors l'interpellation par rapport aux matériaux résistants est importante.
- Nous avons noté des problèmes techniques tels que le colmatage, la corrosion et l'entartrage. L'utilisation des produits chimiques pour lutter contre ses effets constituent un risque pour l'environnement. Nous proposons un plan de maintenance conséquent et une utilisation de façon optimale des quantités des inhibiteurs en cas de besoin.

II- SUGGESTIONS PAR RAPPORT AUX PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX.

Le problème particulier lié à la station de dessalement de l'eau de mer est la gestion des rejets des saumures dans la mer qui comme nous l'avons montré plus haut, cause un problème de salinité et température. Généralement rien que 10% de la quantité d'eau prise en mer est transformée en eau douce, soit 90% de rejet en mer et parfois à des températures élevées provoquant de dangers contre l'espèce aquatique. Pour réduire la température de la saumure le recyclage avec récupération de la chaleur de la saumure est une solution importante.

Une autre proposition est d'augmenter le pourcentage d'eau de mer transformée par caléfaction de celle-ci, ceci suppose une ébullition à des températures très élevées, ce qui demande des matériaux solides, car au cours de l'ébullition on note une phase de crise d'ébullition qui jusqu'à nos jours constitue un problème majeure en matière de transfert thermique. Donc tenir compte de ces paramètres serait idéal dans le cadre de la gestion de l'environnement par la limitation des rejets des stations de dessalement.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Parvenu à ce point de notre recherche, il convient de noter que l'approvisionnement en eau potable, sur l'ensemble de la planète, prend de plus en plus d'ampleur en raison de l'évolution démographique et industrielle mondiale. En plus des ressources naturelles en eau douce, le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer peut constituer une solution intéressante pour couvrir ces besoins croissants, surtout dans les régions naturellement pauvres en eau. Cette technique de dessalement se regroupe en procédés de distillation et membranaires qui s'appliquent selon l'environnement et la taille des besoins.

Mais cette technique qui existe depuis longtemps fait face à un réel problème de coût d'investissement et d'exploitation. En effet près de la moitié du coût d'exploitation des usines de dessalement d'eau de mer, provient de la consommation d'énergie. [17] C'est la raison pour laquelle son application se réserve jusqu'à nos jours à la majorité des pays dit « en pétrole ». Il est donc intéressant au regard des problèmes de l'eau potable qui croit de jour en jour de trouver des moyens et alternatives pour réduire de façon conséquente ce coût de dessalement.

Notre étude portant sur la contribution de la concentration solaire à ce principe de dessalement, nous a emmené à évaluer l'apport du soleil à partir d'un prototype de parabole solaire de 2 m de diamètre soit 3,14 m² de section. Notre parabole solaire pour une moyenne d'ensoleillement de 5h30 par jour fournit une moyenne d'énergie thermique de 2550 kJ à la station de dessalement. Par hypothèse que notre station est celui de MSF, nous avons évalué le coût de l'énergie pour une production de 1 kg d'eau douce à 379 kJ d'énergie thermique. Notre prototype peut ainsi produire environ 13,5 litres d'eau douce par jour pour un ensoleillement de 5h 30.

Cette contribution de l'énergie solaire à concentration, il faut le noter révèle deux aspects : économique et environnemental. Pour ce qui est de l'aspect économique ; avec une étude comparative à la station de dessalement d'Al Khobar en Arabie Saoudite, avec 10 unités d'une capacité de production de 270 000 m³/jour, nous réalisons une économie de 1 080 000

kWh de consommation d'énergie par jour. Pour ce qui est de l'aspect environnemental ce projet contribue de façon conséquente une limitation de rejet de SO₂ et CO₂. La quantité de CO₂ que cette station de dessalement adapté à une énergie solaire permettra d'éviter est de l'ordre de 1788 tonnes de CO₂ par jour ; ce qui convient de conclure que ce projet réserve énormément de grand gain par rapport au financement des programmes comme le MDP. Financement évaluée à environ à 10 € par tonne de CO₂ évitée, soit pour ce projet 17880 € de bénéfice par jour.

Au-delà de tous les avantages que le projet regroupe, nous notons le problème de la gestion de la saumure et tout autre rejet que nous considérons comme perspectives innovantes pour la suite de ce projet. Nous proposons donc une étude technico environnemental de la saumure pour parvenir pour une contribution de l'énergie solaire à concentration au dessalement de l'eau de mer avec zéro déchet. Pour le laboratoire LESEE qui nous a accompagné, nous proposons une étude sur les données thermodynamiques du concentrateur parabolique que nous avons conçu, afin d'avoir une base de données efficaces pour des prochaines études de concentration solaire thermodynamique qui pourront voir le jour.

Nous avons constaté de sérieuses pertes thermiques entre le collecteur et le récepteur, au cours de nos expérimentations: on peut améliorer les performances du récepteur en diminuant ces pertes thermiques. Le choix d'une peinture sélective à apposer sur celui-ci (récepteur) est une des meilleures solutions, mais son coût est assez considérable. On peut plus simplement rajouter une paroi de pyrex autour du récepteur ceci réduisant les pertes par convection naturelle et bloquant le rayonnement infra-rouge et la température du récepteur va alors monter considérablement.

Nous rappelons qu'à plus haute température, on pourra passer en régime de caléfaction et par conséquent éviter la formation d'une croûte de sel dans le récepteur. On pourra alors passer à un système continu et récupérer le sel sous forme de cristaux. Dans ce cas il faudra utiliser un récepteur en *Cofalit* actuellement réalisé par le labo PROMES.

Nous proposons une récupération de la chaleur de condensation via un échangeur de chaleur qui va préchauffer l'eau d'alimentation. On récupère ainsi une bonne partie de la chaleur [$m C_p (T_{eb} - T_{ini})$] sur l'eau et on augmente donc le rendement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **RENAUDIN Viviane** Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [Revue]. - Nancy Brabois : Educsol, 18 novembre 2003.
- [2] **Sylvie BRUNEL, JEANNE Bernard** Les risques et les paradoxes de l'eau en Afrique [Conférence] // Festival de Géographie de Saint-Dié. - Saint-Dié : [s.n.], 2003
- [3] **Danis P.** Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'ingénieur – J2700 [Livre]. - Juin 2003.
- [4] **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.
- [5] **Macédonio F., Driolis E.** Pressure-driven membrane operations and membrane distillation technology integration for water purification. - 2008.
- [6] **Alain Maurel** Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. [Livre]. - [s.l.] : Tec&Doc, 2006
- [7] **A.M. Helal** Optimal design of hybrid RO, MSF desalination plants, Desalination. [Livre]. - 2004.
- [8] **Mistra B.M. 2004.** Role of nuclear desalination in meeting the potable water needs in the water scarce areas in the coming decades, Desalination. - 2004.
- [9] **Lattemann S., Höpner T.** – Lattema Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. Desalination. - 2008.
- [10] **Gérard COPIN-MONTEGUT** Propriétés physiques de l'eau
- [11] **Marseille École Centrale** Physique des transferts de chaleur et de masses en thermodynamique diphasique.
- [12] **QUOLIN Sylvain** Centrales solaires à concentration. Université de Liège- Faculté des sciences appliquées – 2007.
- [13] **R. BENCHRIFA, D. ZEJLI, A BENNOUNA et G. KNIES** Potentiel de l'introduction de la technologie dish-sterling au Maroc. - Tétouane-Maroc : [s.n.], 8-10 mai 2002.
- [14] www.solaire-chauffe-eau.info/parabole-solaire-construction.php [En ligne].

[15] **R.Gicquel** Modèle de capteur solaire à concentration. - Avril 2006.

[16] **Maxime POINTIE** L'eau potable: diagnostic, remèdes et développement durable [Conférence] // Séminaire Internationales d'énergies. - Nouakchot-Mauritanie : [s.n.], 19-21 Novembre 2007.

[17] **Guénaëlle CARTIER et Pierre CORSIN** Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse: les avancées acquises et à venir. [Article] // L'eau, l'industrie, les nuisances. – n°290.

[18] **KHEDIM A.** Mesure et caractérisation thermodynamique d'un nouveau système solaire de dessalement de l'eau de mer avec récupération de chaleur. [Conférence] // 11èmes Journées Internationales de Thermique. - 1er décembre 2003.

[19]: **C. Cros ; Tabet J.P.** Éléments de calcul des émissions de gaz à effet de serre dans les installations énergétiques **ADEME- 9 février 2000**

PNUE Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : évaluation d'impacts sur l'environnement et ligne directrice pour la gestion de la saumure [Revue]. – Vénise-Italy, 28-31 mai 2002.

Pr Xavier PY Concentration du rayonnement solaire-PROMES UPR8521 CNRS

DIOP Salif, REKACEWICZ Philippe Atlas mondial de l'eau: une pénurie annoncée -Paris: Ed Autrement, 2003, 63p

BALLIF Jean Louis Pascal L'eau ressource vitale. Paris. Johanet, 2001, 136p

Miche DUTANG- Le dessalement de l'eau de mer-Veolia Environnement

CNRS Dessaler l'eau de mer sans saler la facture- Info n° 377 se septemebre 1999

A. Sadi; Le Dessalement Solaire - Considérations Techniques-Centre de Développement des Énergies Renouvelables : Chemss 2000- 91-97p

ANNEXES

<i>Annexe 1 : Nouvelles technologies de dessalement.....</i>	<i>51</i>
<i>Annexe 2 : Dessalement et énergies renouvelables.....</i>	<i>53</i>
<i>Annexe 3 : Comparaison des procédés de distillation.....</i>	<i>55</i>
<i>Annexe 4 : Dimensionnement de la parabole solaire.....</i>	<i>56</i>
<i>Annexe 5 : Diagramme des irradiances solaires enregistrées.....</i>	<i>61</i>
<i>Annexe 6 : Tableau des données des expérimentations.....</i>	<i>64</i>
<i>Annexe 7 : Inventaire des matériaux de construction et vue de la parabole.....</i>	<i>65</i>
<i>Annexe 8 : Quelques photos de la parabole solaire conçue</i>	<i>66</i>

ANNEXE 1 : NOUVELLES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT DE L'EAU

II.3- Le procédé par distillation membranaire (MD).

➤ Schéma de Principe.

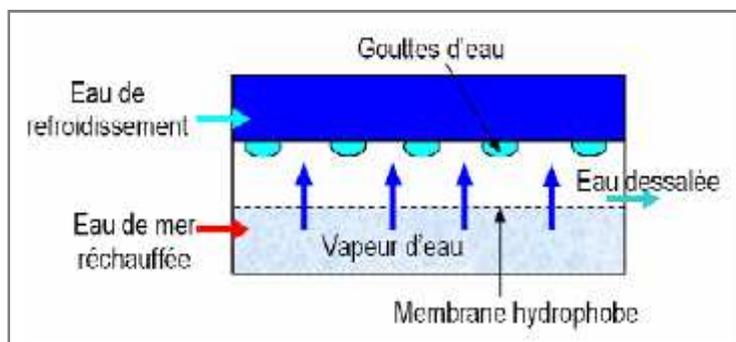


Figure 17: Principe de la distillation Membranaire [5]

➤ Principe de fonctionnement.

Elle diffère des autres technologies membranaires : la force agissante pour le dessalement est la différence de la pression de vapeur d'eau à travers la membrane, plutôt que la pression totale. Les membranes de MD sont hydrophobes, ce qui permet à la vapeur d'eau (mais pas à l'eau liquide) de passer. Le gradient de pression de vapeur est créé par chauffage de l'eau, élevant ainsi sa pression de vapeur. Le besoin majeur en énergie est pour l'énergie thermique.

II.4- Le procédé Hybride.

➤ Schéma de Principe.

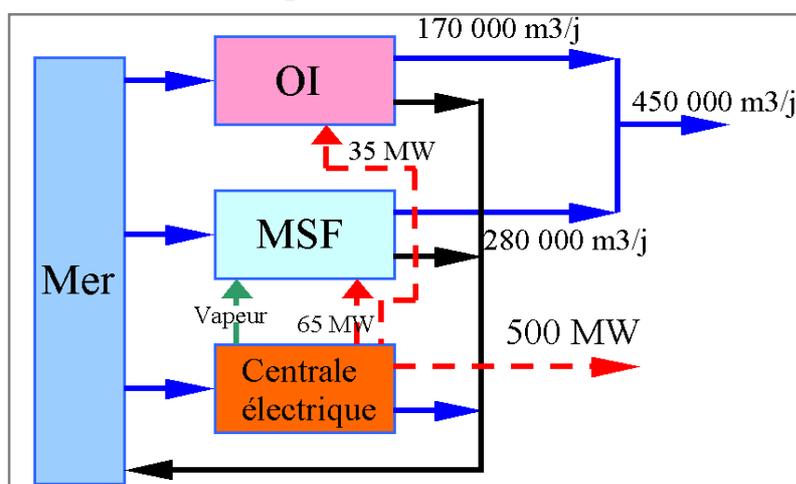


Figure 18: Installation hybride [6]

➤ **Principe de fonctionnement.**

Le concept de dessalement par voie *hybride* combine deux ou trois procédés pour fournir une meilleure solution technico-économique. [7]

Les trois éléments qui sont intégrés sont :

- une unité de distillation en général « Multi-Stages 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, tout ou partie de l'excès de production d'électricité est utilisé pour le dessalement par osmose inverse. 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. [6] La seule installation actuelle est celle de Fujairah 1, Emirats Arabes Unis avec une capacité maximale de 454 000 m³/j soit un coût de production de 0,41 €/m³. [4]

ANNEXE 2 : DESSALEMENT ET ÉNERGIES RENOUVELABLES

III.1.1- Distillation avec l'énergie solaire.

✓ La distillation solaire directe à effet de serre.

➤ Schéma de principe.

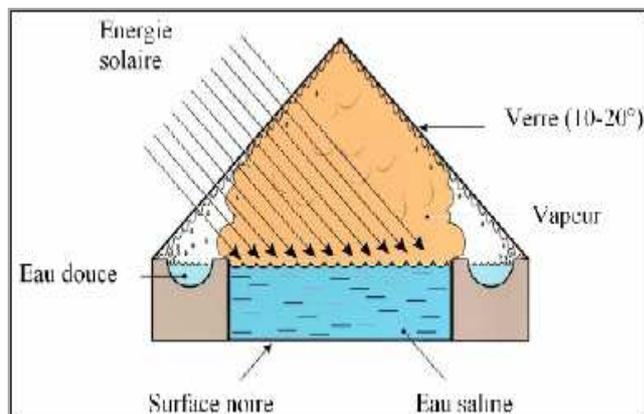


Figure 19 : Distillateur solaire direct [6]

➤ Principe de fonctionnement

Ce procédé consiste à chauffer de l'eau directement par le rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte de vitrage. La vapeur produite, qui se condense sur le vitrage plus froid et légèrement incliné, est recueillie sous forme de condensât dans des gouttières. Le principe est très simple, fiable et ne nécessite aucun entretien. Mais son rendement est relativement faible, 4 à 5 litres/jours/m². La plus grande capacité en service de 36 m³/jour est celle de Gwadar 2 au Pakistan. Pour une capacité typique de 1 m³/j le coût de production est de 10 €/m³.

✓ Distillateur à effets multiples (MSF) associé à des capteurs solaires

➤ Principe de fonctionnement.

Le principe de distillation reste le même tel que décrit à la partie II.1.1 de ce chapitre. La nouveauté est notamment la source de chaleur qui vient des capteurs solaires qui transforment ainsi les rayons solaires reçus. Pour un fonctionnement en plein temps un stockage thermique est nécessaire comme nous présente la figure 10. La capacité maximale en service déjà installée est le prototype d'Almeria en Espagne, avec une production 72 m³/jour. Pour une capacité de 10 m³/J le coût correspondant est de 10 €/m³.

➤ Schéma de principe.

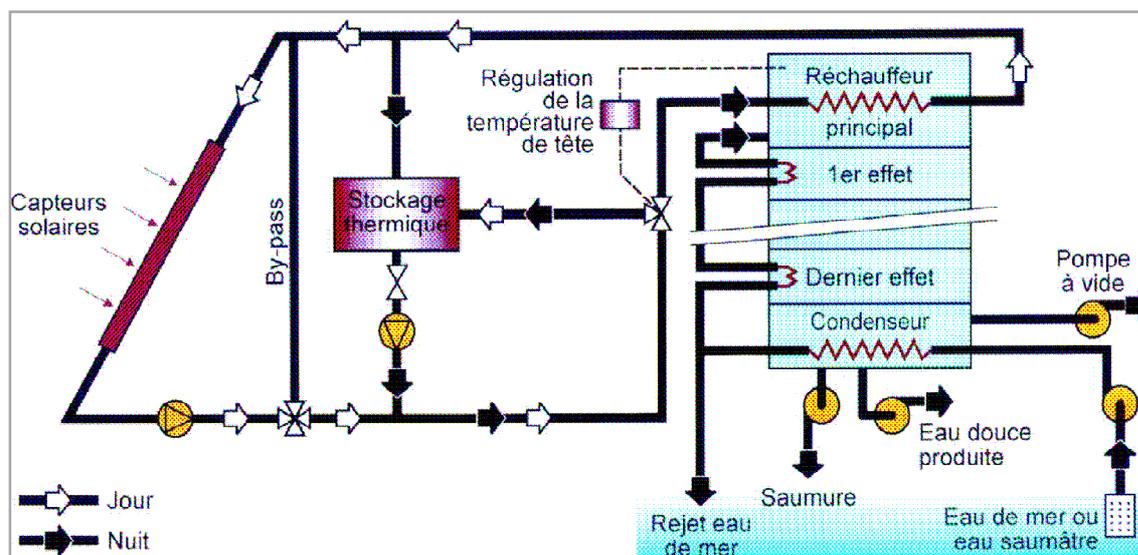


Figure 20: Distillateur à effets multiples (MSF) associé à des capteurs solaires [6]

III.1.2- Osmose Inverse et l'énergie solaire photovoltaïque.

Le procédé utilise de l'énergie électrique ou mécanique; énergie nécessaire pour actionner une pompe haute pression. Cette énergie électrique est fournie via les panneaux PV. Il est le plus performant du point de vue énergétique soit 2kWh/m³ dans le cas de l'eau de mer. Un prototype est actuellement installé dans le village **Ksar Ghilène** en **Tunisie**, village de 300 habitants, pour une production de 2 m³/h (eau saumâtre), soit 15m³/j pour un ensoleillement de 7 h. La puissance nécessaire pour cette unité est de 3,57 kW ; la consommation est de 1,7 kW/m³. Le coût de l'eau produite revient ainsi à 5,3 €/m³ contrairement au coût de 8,5 m³ pour le transport d'eau utilisé comme moyen d'approvisionnement précédente de cette localité. [4]

III.1.3- Osmose Inverse et énergie éolien.

Le principe de ce procédé consiste à faire passer, sous l'effet d'une pression, de l'eau pure à travers une membrane semi-perméable. Donc on a besoin de l'énergie nécessaire à alimenter une pompe haute pression, ce qui peut être fournie de façon économique (pour les petites installations) par un aérogénérateur.

Dans le cas des petites capacités d'installations, le stockage se fait via les batteries ce qui entraîne des coûts élevés (durée de vie limitée, pertes d'énergie ...). Dans le cas des grandes capacités d'installations, un stockage d'énergie par batteries n'étant guère envisageable, un raccordement à un réseau électrique s'avère nécessaire.

ANNEXE 3 : COMPARAISONS DES PROCÉDÉS DE DISTILLATION [4]

Tableau 6: Comparaisons entre les procédés de distillation.

DESIGNATIONS	PROCEDES DE DESSALEMENT				
	MSF	MED	MED-TVC	MVC	OI
Température de fonctionnement (°C)	< 120	< 70	< 70	< 70	< 45
Principale source d'énergie	Thermique	Thermique	Thermique	Mécanique (Via électricité)	Mécanique (Via électricité)
Consommation thermique (kWh/m ³)	12	6	21	Pas applicable	Pas applicable
Consommation électrique (kWh/m ³)	3,5	1,5	1,5	8 à 14	4 à 7
Salinité de l'eau brute (g/l)	30 - 100	30 - 100	30 - 100	30 - 50	1 à 45
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 500
Capacité d'un train (m ³ /l)	5 000 - 60 000	500 - 12 000	100 - 20 000	100 - 20 000	1 - 10 000
Avantages	Techniques éprouvée	20% moins cher que MSF	Capacité robuste	Simplicité	Modularité
Inconvénients	Investissement, consommation	Capacité plus faible que MSF	consommation	Capacité limitée	Fragilité

ANNEXE 4 : DIMENSIONNEMENT DE LA PARABOLE SOLAIRE.

1- Équation générale de la parabole

Soit F le foyer de la parabole ; (Δ) l'axe focale et K le point d'intersection de l'axe et la directrice (D) de la parabole. Posons S le milieu de $[F, K]$; On choisit le repère orthonormé $(S; \vec{i}; \vec{j})$ tel que l'axe des ordonnées soit l'axe focal et orienté de K vers F. Posons $P = d(F, (D))$ la distance du foyer F à la droite directrice (D).

D'après la figure ci-dessous, $K(0, -\frac{P}{2})$ et $F(0, \frac{P}{2})$. Soit $M(x, y)$ un point de la parabole :

$$MF^2 = x^2 + \left(y - \frac{P}{2}\right)^2 \quad \text{Soit } m \text{ le projeté orthogonal de } M \text{ sur } (D) \quad Mm^2 = \left(y + \frac{P}{2}\right)^2$$

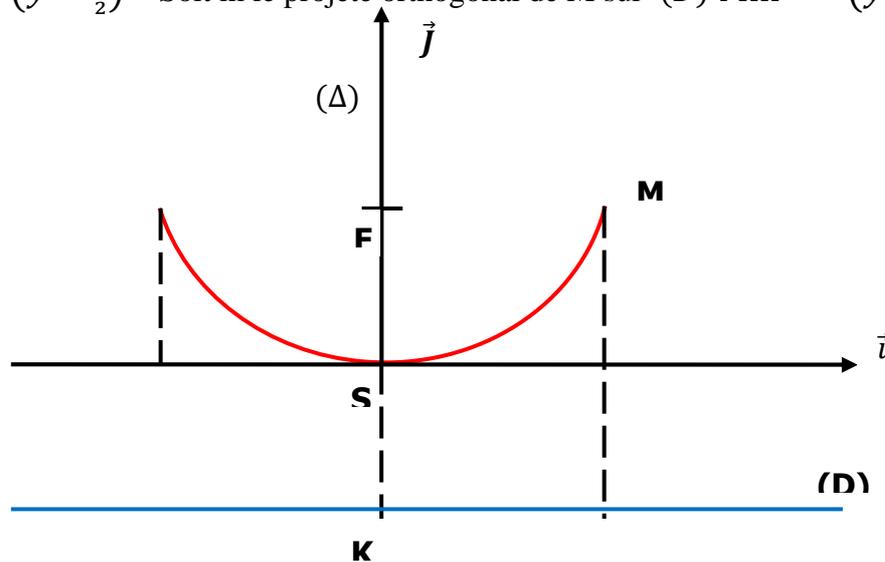


Figure 21: Courbe parabolique dans le repère $(S; \vec{i}; \vec{j})$

La parabole est une conique de directrice (D) de foyer F et d'excentricité $e = 1$, tel qu'à tout point M appartenant à la parabole, et admettant pour projeté orthogonal sur (D) le point m, on a la relation :

$$\frac{MF}{Mm} = 1 \quad \rightarrow \quad MF^2 = Mm^2 \quad \rightarrow \quad x^2 + \left(y - \frac{P}{2}\right)^2 = \left(y + \frac{P}{2}\right)^2 \quad \rightarrow \quad y = \frac{x^2}{2P} \quad (1)$$

Posons $FS = f$; la distance focale de la parabole, c'est-à-dire la distance du sommet S au foyer F de la parabole. $P = FK$; $FK = 2FS$ d'où $P = 2FS = 2f$. En remplaçant P par sa valeur dans l'équation (1), on obtient l'équation de la parabole de sommet S et de distance focale f

qui s'exprime comme suit : $y = \frac{x^2}{4f}$

2- Application de l'équation à notre étude.

Pour notre étude, le diamètre de notre prototype est de 2 m. Nous allons estimer le rayon de courbure de la parabole et déterminera la position du foyer F équivalente. Il est à noter que si le rayon de courbure est trop grand, la surface totale des feuilles de la parabole sera très grande et par conséquent induira un coup d'investissement énorme. Par contre si le rayon est très réduit également, le foyer sera trop distant du sommet de la parabole et induira également plus de matériaux dans la conception d'où coût d'investissement élevé.

Le diamètre de la section d'ouverture de la parabole est de 200 cm ; nous allons fixer un rayon de courbure R tel que, $R \leq \frac{\text{diamètre}}{4}$.

En un point M(x_M, R) avec $x_M = 100\text{cm}$; $y = \frac{x^2}{4f} = R \rightarrow f = \frac{50^2}{4R}$

Tableau 7: Rayon de courbure et foyer de la parabole

Rayon de courbure (cm)	30	35	40	45	50
Distance focale f (cm)	83,34	71,42	62,5	55,5	50

Pour notre étude, dans l'optique de diminuer le coût d'investissement, nous allons éviter de choisir une distance focale assez grande. Dans un second temps, nous rappelons que notre parabole ne sera pas fixe et pourra être déplacée d'un point à l'autre aussi pour des raisons de bonnes manipulation par une seule personne lors des nos analyses, il est plus judicieux de placer le foyer à une distance égale au rayon de courbure de la parabole ou encore juste à la section d'ouverture de la parabole. Donc nous aurons $f = R = 50\text{ cm}$

3- Dimensions des feuilles de la parabole

La surface du collecteur, dont la parabole est constituée de feuilles accolées entre elles. Il sera question pour nous dans la suite de déterminer le nombre de feuilles à accoler pour constituer la surface réfléchissante de notre parabole, les dimensions d'une feuille et autres précisions à prendre en compte pour la conception, étant donné que notre premier objectif spécifique dans cette partie revient à fabriquer nous même notre parabole.

3.1- Nombre de feuilles

Il n'existe pas une technique idéale pour déterminer le nombre de feuilles de la parabole, mais il convient de noter que plus le nombre est élevé, il induit des difficultés d'accolage. De même si le nombre est très réduit ce qui suppose la surface d'une feuille assez considérable, alors il se posera un problème pour bien accoler les feuilles et obtenir une surface totale de la parabole uniforme et esthétique. Pour notre parabole nous estimons le nombre de feuilles à 12 à partir duquel nous allons calculer les dimensions de chaque feuille.

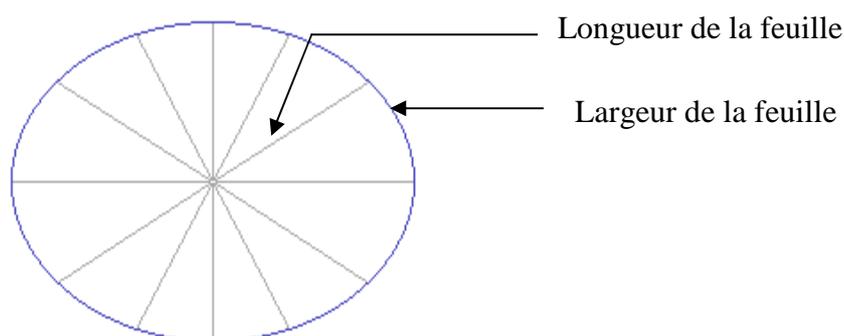


Figure 22: Constitution de la surface réfléchissante de la parabole

3.2- Dimensions d'une feuille.

✓ Largeur

La largeur de la feuille correspond au petit rayon de courbure qui revient à une feuille sur la circonférence de la section d'ouverture du concentrateur solaire. Il est égal au rapport de la circonférence de la section d'ouverture du concentrateur sur le nombre de feuille qui constitue la surface réfléchissante.

$$\text{largeur de la feuille} = \frac{\pi \times \text{diamètre}}{\text{nombre de feuille}} = \frac{\pi \times 200}{12} = 52,3598 \approx 52,36 \text{ cm}$$

✓ Longueur

La longueur de la feuille, correspond à la longueur d'arc de la parabole. Son calcul est un peu très difficile mais nous avons essayé par une approche mathématique, et nous avons comparé avec la valeur donnée par une fiche technique de découpage des segments de feuilles pour le réflecteur parabolique convenable à un cuiseur solaire (www.solaire-chauffe-eau.info/parabole-solaire-construction.php) que nous avons trouvé lors de nos recherches.

Pour la notion mathématique de calcul de longueur d'arc, soit une courbe (C) définie par : $y = f(x)$. Soient A et B deux points de la parabole d'abscisses respectifs x_A et x_B , la longueur de l'arc entre les deux points de la parabole est définie par :

$$\text{long(arc AB)} = \int_{x_B}^{x_A} \sqrt{1 + y'^2} dx$$

En application à l'énoncé nous avons

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad \rightarrow \quad y' = \frac{x}{2f} \quad \rightarrow \quad y'^2 = \frac{x^2}{4f^2}$$

$$\text{long(arc MS)} = \int_{x_S}^{x_M} \sqrt{1 + y'^2} dx = \int_{x_S}^{x_M} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4f^2}} dx$$

Soit une fonction $f : X \rightarrow \sqrt{1 + x^2}$. La primitive de la fonction ainsi définie est $F(X)$ définie par :

$$F(X) = \int \sqrt{1 + x^2} dx$$

Posons

$$u(x) = x \quad \rightarrow \quad u'(x) = 1 \text{ et}$$

$$v(x) = \sqrt{1 + x^2} \quad \rightarrow \quad v'(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}$$

$$F(X) = \int u'(x) \times v(x) dx = [u(x) \times v(x)] - \int u(x) \times v'(x) dx$$

$$F(X) = x\sqrt{1 + x^2} - \int \frac{x^2}{\sqrt{1+x^2}} dx \quad (2)$$

Posons

$$G(X) = \int \frac{x^2}{\sqrt{1+x^2}} dx = \int \frac{x^2+1}{\sqrt{1+x^2}} dx - \int \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} dx$$

$$G(X) = \int \frac{(x^2+1)\sqrt{1+x^2}}{(\sqrt{1+x^2}) \times (\sqrt{1+x^2})} dx - \int \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} dx$$

$$G(X) = \int \sqrt{1+x^2} dx - \int \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} dx = F(X) - \int \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} dx$$

Revenons à l'équation (2) :

$$F(X) = x\sqrt{1+x^2} - F(X) + \int \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} dx$$

$$2F(X) = x\sqrt{1+x^2} + \int \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} dx = x\sqrt{1+x^2} + \text{Arg} \sinh x$$

Posons

$$y = \text{Arg} \sinh x$$

$$\rightarrow x = \sinh y = \frac{e^y - e^{-y}}{2} \rightarrow y = \ln(x + \sqrt{1+x^2})$$

$$F(X) = \frac{1}{2}[x\sqrt{1+x^2} + \ln(x + \sqrt{1+x^2})]$$

Revenons à l'intégrale

$$\text{long}(\text{arc } AB) = \int_{x_S}^{x_M} \sqrt{1 + \frac{x^2}{4f^2}} dx$$

$$\text{Posons } u = \frac{x}{2f} \rightarrow u^2 = \frac{x^2}{4f^2} \rightarrow dx = 2f du$$

Si x tend vers $x_S = 0$ alors u tends vers 0

Si x tend vers $x_M = 100$ alors u tends vers $= \frac{50}{f}$

$$\text{long}(\text{arc } AB) = 2f \int_0^{\frac{50}{f}} \sqrt{1+u^2} du$$

$$\text{D'après } F(X) = \frac{1}{2}[x\sqrt{1+x^2} + \ln(x + \sqrt{1+x^2})]$$

$$\text{long}(\text{arc } AB) = 2f \left[F\left(\frac{50}{f}\right) - F(0) \right] = 2f \left[F\left(\frac{50}{f}\right) \right]$$

$$F\left(\frac{25}{f}\right) = 2f \left[\frac{1}{2} \left[\frac{50}{f} \sqrt{1 + \frac{50^2}{f^2}} + \ln\left(\frac{50}{f} + \sqrt{1 + \frac{50^2}{f^2}}\right) \right] \right] \text{ Or la distance focale } \mathbf{f = 50 \text{ cm}}$$

$$\text{long}(\text{arc } AB) = \mathbf{114,7793575 \approx 114,80 \text{ cm}}$$

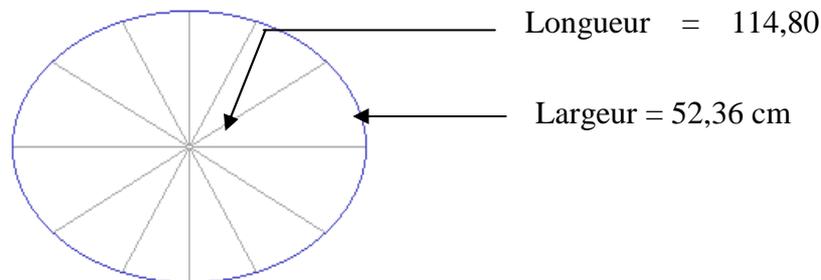


Figure 23 : Dimensions d'une feuille de la parabole

ANNEXE 5 : DIAGRAMME DES IRRADIATIONS DIRECTES DU 28 février au 4 mars 2010(entre 7h00 et 17h 30) À KAMBOINSÉ ET DIMENSIONS DU RÉCEPTEUR.

1- Dimensions du récepteur.

La quantité d'énergie reçue à l'intérieure du récepteur se fait par conduction à travers la paroi et par convection dans le liquide. Nous allons déterminer grâce à cette énergie la surface d'échange de notre récepteur, proposer le matériau de conception, sa forme géométrique et autres grandeurs susceptibles de prendre en compte pour le concevoir.

Premier cas :

Posons λ_R le coefficient de transfert thermique par conduction du récepteur. Soit e l'épaisseur du matériau du récepteur. La chaleur transmis à l'intérieure a pour expression

$$\frac{Q_R}{S_R} = \frac{\Delta\theta}{e/\lambda_R} \rightarrow S_R = \frac{Q_2 \times e}{\lambda_R(T_e - T_i)}$$

– $\Delta\theta$ est la **différence de température** entre la surface externe du récepteur et la température de l'eau saumâtre qui s'évapore.

Dans les capteurs paraboliques, la température de la source chaude se situe généralement entre 600 et 750°C [12] ; par ailleurs la température d'évaporation de l'eau saumâtre est fonction de sa salinité est fonction de la salinité nous présente la figure 2.3 du chapitre 2. Pour une eau de salinité de 35g/l, la température d'ébullition est de **100,54°C**.

– **Coefficient de transfert de chaleur par conduction λ_R**

Le transfert de chaleur à l'intérieure se fait par conduction. L'idéal serait d'avoir le maximum de chaleur concentrée. Pour cela il faut choisir un matériau de très bonne conductivité. Les trois premiers matériaux de bonne conductivité sont l'argent, le cuivre et l'aluminium de conductivités thermiques respectives **419 ; 386 et 204 W/m/°K**. Un autre facteur de choix est celui du coût d'achat du matériau et la température de fusion de celui-ci. L'argent et le cuivre coûtent cher et nous allons donc choisir comme matériau l'aluminium.

– **Épaisseur et du matériau.**

Il existe des épaisseurs standards des matériaux sur le marché. Nous allons proposer quelques épaisseurs et déterminer la surface d'échange du récepteur. En fonction des épaisseurs de l'aluminium sur le marché, nous pourrons calculer les surfaces d'échange du récepteur que nous allons résumer dans un tableau.

Tableau 8: Dimensions du récepteur

$Q_2(w)$	$e(m)$	$\lambda_R(W/m^{\circ}C)$	$T_e(^{\circ}C)$	$T_i(^{\circ}C)$	$S_R(m^2)$	$d(m)$
560	0,003	204	600	100,54	1,64884E-05	1,05022E-05
560	0,004	204	650	100,54	1,9984E-05	1,27286E-05
560	0,005	204	700	100,54	2,28964E-05	1,45837E-05
560	0,006	204	750	100,54	2,53604E-05	1,61531E-05

Deuxième méthode :

R Gicquel, a réalisé le modèle de capteur solaire à concentration. Au cours de son étude, Il ressort que les pertes thermiques d'un capteur à concentration suivent généralement une loi parabolique, le coefficient de pertes U peut souvent être bien représenté par une fonction affine de l'écart de température entre l'absorbeur (ici le récepteur) et l'air ambiant :

$$U = U_0 + U_1 (T_m - T_{ext})$$

A titre d'exemple, son étude présente le tableau ci-dessous des valeurs de coefficients valables pour quatre catégories de capteurs : des cylindro-parabolique (Luz représente des travaux de ce concepteur avec les cylindro-paraboliques), un concentrateur parabolique et un capteur à lentille de Fresnel linéaire.

Tableau 9: Coefficients valables pour le calcul des pertes thermiques dans un concentrateur. [15]

	Luz 2	Luz 3	Parabolique	Fresnel
τ	0,737	0,8	0,7	0,66
S_C/S_R	22,6	26,1	500	20
U_0	-0,0223	0,21	0,21	-0,031
U_1	0,000803	0,00089	0,000134	0,00061

Il ressort de ce tableau que les concentrateurs parabolique présentent un facteur de concentration plus performant que les autres types des concentrateurs. Cette concentration est le rapport de la section du capteur qui reçoit les rayons sur la surface du récepteur où sont concentrés les rayons réfléchis. Les études montrent également que ce facteur est supérieur à 2 000 pour une température de 750°C.

Pour déterminer le diamètre correspondant, nous supposons que notre récepteur a un fond circulaire et nous posons d son diamètre. Donc

$$S_R = \frac{\pi d^2}{4} \quad S_R = \frac{S_C}{F} \quad ; \quad d = \sqrt{\frac{4S_C}{\pi F}}$$

S_C : surface du concentrateur en m^2

d : diamètre du récepteur en mm

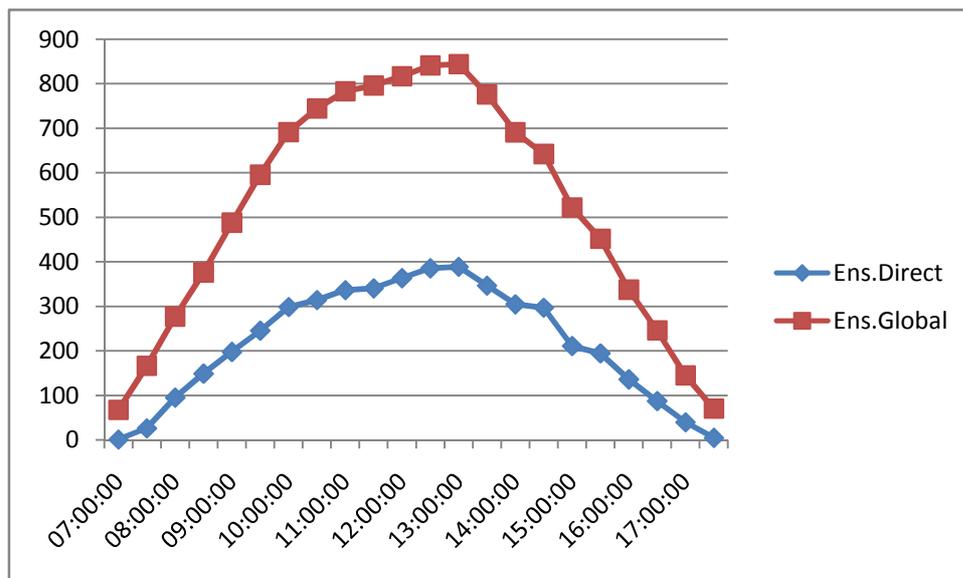
Tableau 10 : quelques valeurs de diamètre du récepteur

Facteur de concentration	500	1000	1500	2000
Diamètre du récepteur (mm)	89,5	63,2	51,6	44,7 cm

En raison de risque de fusion que l'aluminium pourra avoir suite aux hautes de température nous supposons pour la suite **$d = 89,5$ mm.**

2) Irradiations enregistrées.

Tableau 11: irradiations enregistrées entre 7h 00 et 17h 00 entre le 28/2 et 4/3/2010



Annexe 6 : Tableau de données des expérimentations

EXPERIMENTATION 1																	
Heure	9h30	9h50	10h10	10h30	10h50	11h10	11h30	11h50	12h10	12h30	13h50	14h00	14h30	14h50	15h20	NUAGE ET PLUIE	
T _{récepteur} (°C)	34	56	90	104	105	112	129	127	137	130	120	37	65	72	73		
T _{eau} (°C)	34	40	78	89	90	100	100	99	100	100,1	100	35	60	68	81		
T _{Ambiante} (°C)	34	34	34	35	37	37,5	37,5	36,5	37	37	37,5	39	36	35	35		

EXPERIMENTATION 2																		
Heure	9h25	9h45	10h05	10h30	10h50	11h05	11h30	11h55	12h05	12h30	12h55	15h10	15h20	15h30	15h40	16h00	16h20	16h40
T _{récepteur} (°C)	34	49	99	114	115	132	155	127	157	132	125	37	65	72	73	59	57	56
T _{eau} (°C)	34	45	88	100	100,1	100,5	100,8	100,1	100,2	100,1	102	35	60	68	81	81	80	77
T _{Ambiante} (°C)	34	34	35	35	36	37	37	37	38	38	38	38	38	36	37	36	36	35

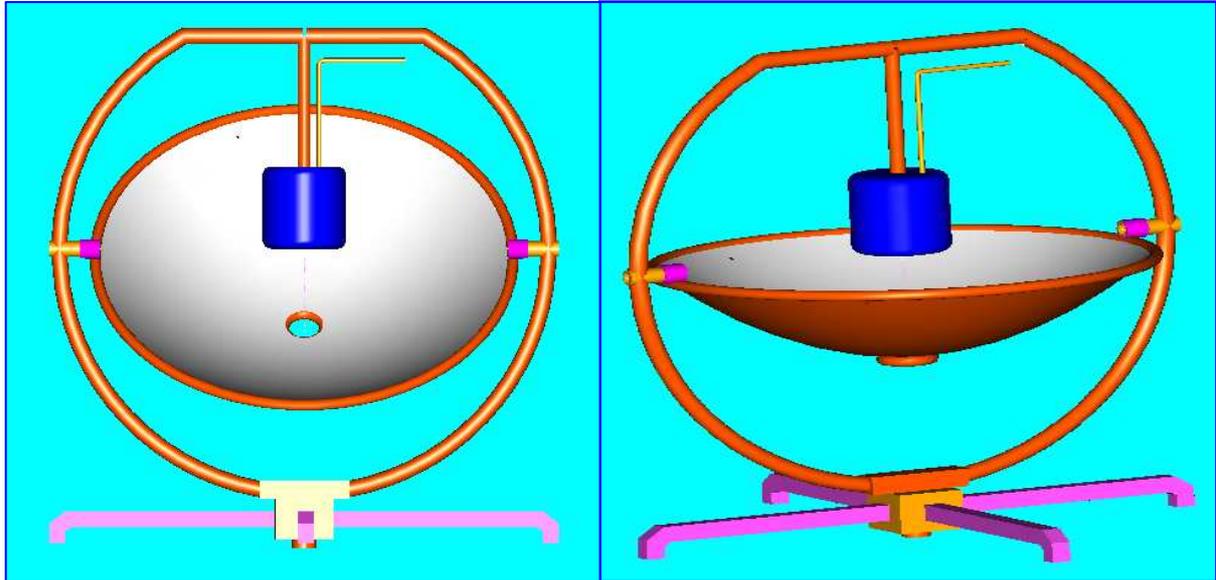
EXPERIMENTATION 3																		
Heure	9h20	9h40	10h00	10h20	10h40	11h00	11h20	11h40	12h00	12h20	12h40	14h10	14h20	14h30	14h40	14h50	16h00	16h10
T _{récepteur} (°C)	34	53	132	125	112	112	115	117	140	122	125	35	90	102	125	110	79	84
T _{eau} (°C)	34	43	100	100,1	100,2	100,5	100,8	101	102	101	102	35	54	90	100,8	100,2	98	94
T _{Ambiante} (°C)	34	33,5	36	36	36	36	37	38	39	39	39	40	40	40	41	40	39	38

EXPERIMENTATION 4																		
Heure	NUAGE DE PLUIE	10h00	10h30	11h00	11h30	12h00	12h30	13h00	13h30	14h00	14h30	15h00	15h10	15h30	15h50	16h10	16h30	
T _{récepteur} (°C)		32	35	62	67	67	63	93	120	110	121	98	65	110	105	102	80	
T _{eau} (°C)		29	32	58	60	60	62	80	98	100	105	100	34	65	98	99	87	
T _{Ambiante} (°C)		31	32	32	33	34	34	35	37	38	37	36	38	38	38	36	36	

MOYENNES DES TROIS PREMIERES EXPERIMENTATIONS																		
Heure	9h25	9h45	10h05	10h30	10h50	11h05	11h30	11h55	12h05	12h30	12h55	15h10	15h20	15h30	15h40	16h00	16h20	16h40
T _{récepteur} (°C)	34	52,7	107,0	114,3	110,7	118,7	133,0	123,7	144,7	128,0	123,3	36,3	73,3	82,0	90,3	84,5	68,0	70,0
T _{eau} (°C)	34	42,7	88,7	96,4	96,8	100,3	100,5	100,0	100,7	100,4	101,3	35,0	58,0	75,3	87,6	90,6	89,0	85,5
T _{Ambiante} (°C)	34	33,8	35,0	35,3	36,3	36,8	37,2	37,2	38,0	38,0	38,2	39,0	38,0	37,0	37,7	38,0	37,5	36,5

DONNEES D'ENSOLEILLEMENT																	
Trois 1 ^{eres} expériment		Heures	09h30	10h00	10h30	11h00	11h30	12h00	12h30	13h00	13h30	14h00	14h30	15h00	15h30	16h00	16h30
Expérimentation 4		Ensol.Direct 1	528,47	575,8	585,56	601,46	385,24	425,59	517,66	545,09	500,04	417,69	428,21	210,45	202,91	133,86	61,49
		Ensol.Direct 2	179,05	174,02	-1,08	93,39	54,46	-1	-1,8	89,07	683,21	798,16	271,62	105,93	720,69	612,31	69,59

ANNEXE 7 : INVENTAIRE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ET VUE DE LA PARABOLE.



Commande N°1				Date :		
Tél : 70 70 56 10						
N°	DESIGNATIONS	Qté/lot		PU estimé (FCFA)	Qté	Montant en FCFA
1	Tôle noire 2000 X 1000 X 0,8	1	[fl]	10 000	2	20 000
2	Fer à T 30 X 40	6	[m]	8 000	1	8 000
3	Fer plat 30 X 40	6	[m]	6 000	2	12 000
4	Tube rond 20 X 27	6	[m]	8 500	1	8 500
5	Tube rond 40 X 49	6	[m]	14 000	1	14 000
6	Tube carré 40 X 40 X 2	6	[m]	15 000	1	15 000
7	Profilé U 100 X 50	0,6	[m]	2 000	1	2 000
8	Tube rond 60 X 50	0,2	[m]	1 000	1	1 000
9	Colle	1	[-]	6 000	1	6 000
10	Antirouille	1	[-]	6 000	1	6 000
11	Rouletes	1	[-]	12 000	4	48 000
12	Tansport et main d'œuvre		[-]	70 000	1	70 000
TOTAL						210 500

ANNEXE 8 : QUELQUES PHOTOS DE LA PARABOLE SOLAIRE CONÇUE.

