

**THEME**

# **ETUDE DE LA PRODUCTION DE VAPEUR A PARTIR D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE PARABOLIQUE**

*MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER SPECIALISE EN GENIE  
ELECTRIQUE, ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES  
OPTION : GENIE ENERGETIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES*



.....  
*Présenté et soutenu publiquement le 13 décembre 2011*

*Par : FALIBAILE Nzapa-Hon-Yoro*

**TRAVAUX DIRIGES PAR :**

*M. GAYE Madieumbe*

*Ingénieur Chercheur du LESEE-2iE*

*M. TAPSOBA Gildas*

*Ingénieur Chercheur du LESEE-2iE*

**JURY D'EVALUATION :**

*Président : M. KOTTIN Henri*

*Membres : M. BASSOLE Justin*

*Promotion 2010/2011*

## DEDICACES

*A mon feu Père **FALIBAILE Pierre** de m'avoir donné la vie et d'avoir contribué efficacement à mon avancement dans les études. Qu'on trouve ici tout honneur qui lui revient. Que son âme repose en paix.*

*A ma mère **MBINOUNE Thérèse** qui ne cesse jamais d'adresser des prières et des bénédictions pour ma réussite.*

*A mes enfants **Mauricia, Sandra et Juvenal**, et leur maman **BERROT Rustine**.*

*A mon grand frère **FALIBAI Barnabé**.*

*A toute la famille **FALIBAILE, KOE et SENGUE**.*

## REMERCIEMENTS

Avant tout développement sur cette expérience, il apparaît opportun de commencer ce mémoire par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette formation, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de cette formation un moment très profitable.

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail que je cite en particulier :

Mon encadreur **M. GAYE Madieumbe**, Ingénieur chercheur du LESEE d'avoir accepté de diriger ce travail en m'orientant sans jamais imposer le point de vue et toujours à me donner des avis très pertinents.

Ensuite à mon second encadreur **M. TAPSOBA Gildas**, Ingénieur de recherche au LESEE d'avoir partagé ses connaissances et utiliser son temps pour m'aider à l'aboutissement de ce travail.

J'adresse mes meilleurs remerciements à **Dr. Yao AZOUMAH**, Directeur du Laboratoire d'Energie Solaire et Economie d'Energie de m'avoir accepté au LESEE et, pour les conseils et les suggestions prodigués qui ont permis à la réalisation de ce document.

J'adresse un très grand et sincère remerciement à **Pr. Yézouma COULIBALY**.

Mes remerciements à **M. KOTTIN Henri**, Ingénieur chercheur du LESEE pour les conseils que j'ai pu bénéficier.

Je remercie l'ensemble du corps professoral du Génie Electrique et Energies Renouvelables.

## RESUME

Le travail que nous avons réalisé dans ce document consistait à faire une étude sur l'optimisation du concentrateur solaire parabolique. Cette optimisation dépend de la transformation de l'eau en vapeur en fonction des paramètres influents. A l'issue des expérimentations effectuées, les résultats nous ont permis d'identifier ces paramètres qui engendrent des pertes thermiques entre le collecteur et le récepteur et, par la suite proposer les méthodes du fonctionnement optimal du système. Sur les plans économique et écologique, cette étude révèle que le système peut contribuer à la protection de l'environnement et permet également de réduire les dépenses.

Mots clés : optimisation, concentrateur solaire, vapeur d'eau, paramètres influents, récepteur.

## ABSTRACT

The work we have done in this paper was to study the optimization of parabolic solar concentrator. This optimization depends on the transformation of water to steam within the parameters of influence. After the conducted experiments, the results allowed us to identify those parameters that cause heat loss between the collector and receiver, and then propose methods of optimal system operation. On economically and environmentally side, this study reveals that the system can help to protect the environment and also reduces costs.

Keywords: optimization, solar concentrator, steam, influencing parameters, receiver.

## ABREVIATIONS

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

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

*UTER* : Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche

*PV* : photovoltaïque

*JC*: Jésus Christ

**LEXIQUES**

<b>Nomenclature</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$n_{opt}$	Rendement optique du concentrateur	–
$I_s$	Irradiation solaire incidente	$W/m^2$
$A_{réf}$	Surface du réflecteur	$m^2$
$A_{réc}$	Surface du récepteur	$m^2$
$Q_{réc1}$	Puissance du récepteur fournie par le concentrateur	$W$
$Q_{réc2}$	Puissance du récepteur calculée à partir de l'eau	$W$
$Q_{réf}$	Puissance du réflecteur	$W$
$Q_u$	Puissance utile	$W$
$Q_p$	Puissance perdue	$W$
$Q_{air}$	Puissance utile absorbée par l'air dans le récipient	$W$
$Q_{conv}$	Puissance perdue par convection	$W$
$Q_{cond}$	Puissance perdue par conduction	$W$
$Q_{ray}$	Puissance perdue par rayonnement	$W$
$h_{conv}$	Coefficient de transfert par convection	$W/m^2/K^3$
$h_{ray}$	Coefficient de transfert par rayonnement	$W/m^2/K^3$
$C_{pe}$	Chaleur massique de l'eau	$KJ/Kg/°C$
$C_{pa}$	Chaleur massique de l'air	$KJ/Kg/°C$
$\lambda_{réc}$	Conductivité du récepteur	$W/m/K$
$m_e$	Masse d'eau	$Kg$
$m_a$	Masse d'air	$Kg$
$T_{réc}$	Température du récepteur	$°C$
$T_{amb}$	Température ambiante	$°C$
$T_{eau}$	Température d'eau	$°C$
$\Delta T$	Différence de température	$°C$
$t$	Durée du chauffage	$s$
$e$	Epaisseur de l'absorbeur	$m$
$\varepsilon$	Emissivité de l'absorbeur	$m$
$\sigma$	Constante de Boltz-man	$W/m^2/K^4$
$T_{ie}$	Température initiale de l'eau	$°C$
$T_{fe}$	Température finale de l'eau	$°C$
$M_{vap}$	Masse de vapeur	$Kg$
$L_{vap}$	Chaleur latente d'ébullition	$KJ/Kg$
$\sigma_{réc}$	Rapport de puissance de l'absorbeur	$\%$
$\dot{Q}_{réf}$	Energie délivrée par le récepteur	$KJ$
$\dot{Q}_{réc}$	Energie reçue par le récepteur	$KJ$
$\dot{Q}_u$	Energie utile	$KJ$
$\dot{m}_{vap}$	Débit massique	$Kg/s$

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs caractéristiques du réflecteur .....	15
Tableau 2: Valeurs caractéristiques des récepteurs .....	15
Tableau 3: Conditions d'expérience.....	23
Tableau 4 : Récapitulatif des grandeurs calculées.....	37
Tableau 5 : Débit massique optimal .....	41



LISTE DES FIGURES

Figure 1: courbe de température de vaporisation de l'eau ..... 9

Figure 2: courbe d'enthalpie de vaporisation de l'eau ..... 9

Figure 3: principale technologie solaire ..... 12

Figure 4: Photo du concentrateur solaire parabolique ..... 14

Figure 5: Chauffage avec couvercle ..... 16

Figure 6: Chauffage sans couvercle ..... 16

Figure 7: Concentrateur parabolique ..... 20

Figure 8 : Schéma de câblage des sondes au récepteur ..... 20

Figure 9: schéma de principe de mesure ..... 22

Figure 10: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 13/06/2011 ..... 24

Figure 11: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 21/06/2011 ..... 25

Figure 12: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 22/06/2011 ..... 26

Figure 13: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 23/06/2011 ..... 27

Figure 14: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 24/06/2011 ..... 28

Figure 15: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 29/06/2011 ..... 29

Figure 16: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 30/06/2011 ..... 30

Figure 17: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 04/07/2011 ..... 31

Figure 18: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 05/07/2011 ..... 32

Figure 19: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 07/07/2011 ..... 33

Figure 20: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 08/07/2011 ..... 34

Figure 21: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 11/07/2011 ..... 35

## SOMMAIRE

DEDICACES .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ABREVIATIONS.....	v
LEXIQUES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	viii
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	7
CHAPITRE 1: GENERALITE SUR LA PRODUCTION DE VAPEUR D'EAU .....	7
<b>1.1. Définition.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Vapeur d'eau dans l'histoire .....</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Importance et propriété de la vapeur d'eau .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.1 Importance.....</b>	<b>8</b>
<b>1.3.2. Propriétés physiques .....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Différents procédés de production de vapeur d'eau.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5. Problématique sur la production de vapeur d'eau.....</b>	<b>10</b>
CHAPITRE 2 : ENERGIE SOLAIRE ET LES CAPTEURS THERMIQUES .....	11
<b>2.1. Energie solaire .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Capteurs solaires thermiques.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1. Principe.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2. Différents types de capteurs .....</b>	<b>11</b>
<b>2.3. Concentrateurs solaires thermiques .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.1. Généralités .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.2. Les différentes technologies de concentration solaire .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.3. Avantages et inconvénients de la concentration .....</b>	<b>13</b>
MATERIELS ET METHODES.....	14
CHAPITRE 3 : CONCENTRATEUR SOLAIRE PARABOLIQUE.....	14
<b>3.1. Description et fonctionnement du prototype .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.1. Description du réflecteur .....</b>	<b>14</b>

3.1.2.	Description du récepteur .....	15
3.2.	Dispositif expérimental .....	16
3.2.1.	Modèle expérimental .....	16
3.2.2.	Autres outils associés .....	16
3.3.	Calculs de puissance du récepteur et du débit massique théorique .....	16
3.3.1.	Calcul de puissance du récepteur .....	16
3.3.2.	Calcul du débit massique théorique .....	19
CHAPITRE 4:	EXPERIMENTATION .....	20
4.1.	Installation .....	20
4.2.	Câblage des sondes au récepteur .....	20
4.3.	Mesures .....	20
4.3.1.	Objectifs .....	21
4.3.2.	Protocole de mesures .....	21
4.3.3.	Principe de mesures .....	22
4.2.	Conditions et données de mesures .....	22
RESULTATS OBTENUS .....		24
5.1	Profils de l'ensoleillement direct et de températures .....	24
5.2.	Récapitulatifs des grandeurs calculées .....	36
DISCUSSIONS ET ANALYSES .....		38
6.1.	Influence des paramètres .....	38
6.1.1.	Influence de l'irradiation directe .....	38
6.1.2.	Influence du vent .....	38
6.1.3.	Influence du couvercle des récipients .....	38
6.1.4.	Influence de la taille des récipients .....	39
6.1.5.	Influence des méthodes de remplissage d'eau .....	40
6.1.6.	Masse de vapeur optimale .....	41
6.2.	Analyses économique et environnementale .....	41
6.2.1.	Analyse économique .....	41
6.2.2.	Analyse environnementale .....	42
RECOMMANDATIONS .....		43
CONCLUSION GENERALE .....		44
BIBLIOGRAPHIE .....		45

**ANNEXES** ..... I

## INTRODUCTION GENERALE

Connue depuis l'histoire du feu et considérée comme l'un des vecteurs de la révolution industrielle des XVIII et XIX siècle, la vapeur d'eau est produite dans la plupart des cas dans des chaudières chauffées par un combustible fossile ou le bois.

De nos jours, face à la perturbation climatique causé par l'émission des gaz à effet de serre et les risques d'accident dans la centrale nucléaire, l'enjeu majeur est l'utilisation des ressources énergétiques non polluantes afin de contribuer efficacement à la protection de l'environnement. C'est ainsi que beaucoup de pays s'intéressent aux énergies renouvelables au premier rang desquels figure l'énergie solaire.

Pour apporter notre contribution aux dispositifs qui utilisent l'énergie solaire, nous avons effectué une étude sur la production de la vapeur à partir d'un concentrateur solaire parabolique. Le modèle de notre système se compose d'un concentrateur solaire de 2 m de diamètre avec une surface de 3, 14 m<sup>2</sup> et de deux récipients de différentes tailles.

Nous avons présenté notre document d'abord en faisant une étude bibliographique sur la production de la vapeur avec l'énergie solaire. Ensuite, nous avons fait une description des matériels utilisés. Enfin, nous avons réalisé des expériences qui nous ont permis d'identifier des paramètres qui influent sur le rendement de notre système.

## **PRESENTATION DU LABORATOIRE**

Nos recherches pour ce mémoire de fin de formation, se sont déroulées au sein du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) d'UTER GEI du 2iE.

Ce laboratoire fait parti des jeunes laboratoires que compte le 2iE. Il a été créé en Novembre 2008 dans le but de contribuer à l'innovation de l'énergie solaire pour une production et utilisation rationnelle d'énergie électrique et thermique en Afrique.

### **1. LES ACTIVITES DU LABORATOIRE**

Elles peuvent se regrouper en trois grandes parties :

#### **1.1. Etudes des centrales 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)

#### **1.2. Habitat, architecture bioclimatique et systèmes solaire PV/thermique (basse température)**

- Conception des habitats bioclimatiques (économiques en énergie)
- Intégration fonctionnelle et architecturale des systèmes solaires PV et thermique dans les habitats
- Pompage photovoltaïque
- Production d'énergie photovoltaïque à grande échelle: Procédé hybride Solaire PV/Diesel, Couplage au réseau/ Production électrique décentralisée

#### **1.3. 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...).

## **2. LES PARTENAIRES**

### **2.1. 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.

### **2.2. Les partenaires entreprises**

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

## **3. 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 m<sup>2</sup>, une tour de 10 m un bloc électrique de petite puissance (10-25 kWél)

## **4. ORGANISATION DU LABORATOIRE**

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

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

Il a accueilli pour la période des stages académiques 2011 plusieurs stagiaires.

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Nous fixons comme objectif dans ce présent chapitre une brève présentation sur ce qu'est la vapeur d'eau, les différents procédés de production, les sources d'énergies utilisées et les problèmes liés à son utilisation. En suite nous parlerons de l'énergie solaire et les technologies utilisées pour sa conversion.

### CHAPITRE 1: GENERALITE SUR LA PRODUCTION DE VAPEUR D'EAU

#### 1.1. Définition

La vapeur d'eau est produite par évaporation ou sublimation à partir de la phase liquide ou solide. Dans le sens physique la vapeur d'eau est de l'eau sous forme de gaz.

Avec le temps, il s'établit lors de l'évaporation de l'eau un équilibre dynamique où autant de particules de la phase liquide ou solide passent en phase gazeuse et inversement. La vapeur est alors saturée. Le nombre de particules passant d'une phase à l'autre est fortement fonction de la pression et de la température du système considéré.

#### 1.2. Vapeur d'eau dans l'histoire

La vapeur d'eau est connue depuis l'utilisation du feu ; elle a été et produite involontairement lors de l'extinction du feu avec l'eau ou lors de la cuisson des aliments.

Les premières réflexions sur l'utilisation technique de la vapeur d'eau sont attribuées à Archimède<sup>1</sup> (287-212 avant JC) qui a conçu un canon à vapeur. Léonard de Vinci (1452-119) a effectué des premiers calculs dans ce domaine selon lesquels un boulet de 8kg tiré tomberait à 1250m environ.

On attribue à Denis papin<sup>2</sup> la conception pratique de l'autoclave (vers 1680). Ce premier réservoir à pression a été déjà équipé d'une soupape de sécurité après l'explosion d'un prototype lors des premiers essais. L'utilisation de la machine à vapeur à partir de 1770 environ a rendu nécessaire d'étudier plus attentivement le fluide de travail vapeur d'eau d'un point de vue théorique et pratique. L'on compte parmi les praticiens James Watt et Carl-Gustav Patrik de Laval qui se sont tous deux enrichis en commercialisant leurs machines [1].

---

<sup>1</sup> Source : chaudières à vapeur à combustible.

<sup>2</sup> Inventeur français qui a découvert la force de la vapeur.



### **1.3. Importance et propriété de la vapeur d'eau**

#### **1.3.1 Importance**

Dans les procédés industriels, la vapeur d'eau est un fluide énergétique très utilisé dès qu'il s'agit de chauffer. La vapeur est employée comme vecteur d'énergie et vecteur de substance chimiques dans un grand nombre de domaines de la production industrielle. Les domaines d'utilisation typiques sont entre autres les industries papetières et de matériaux de construction, les raffineries, l'industrie pharmaceutique, les industries agroalimentaires et le chauffage urbain. Elle vulcanise les produits en caoutchouc et stérilise les emballages. Injectée dans une centrale de traitement de l'air, la vapeur sert à maintenir l'humidité dans les locaux. Surchauffée puis détendue dans les turbines, la vapeur peut également servir à la production d'électricité. [2] Mais dans les usages domestiques, la vapeur d'eau est utilisée pour la cuisson des aliments, notamment au moyen d'un autocuiseur ; le repassage, fer à vapeur ou machine à repasser des pressings ; le nettoyage, nettoyeur à vapeur servant à l'entretien des sols et des murs d'un logement et la toilette.

Si tant d'industriels ont choisi et continuent de choisir la vapeur d'eau, c'est parce que ce fluide a des propriétés physiques particulièrement adaptées au transfert de chaleur. Par exemple, sa chaleur latente élevée permet d'obtenir un bon rendement thermique dans les échangeurs de chaleur ou encore la relation précise entre sa pression et sa température à l'état saturé autorise un bon contrôle de l'état du fluide.

#### **1.3.2. Propriétés physiques**

En raison de son usage la vapeur d'eau est caractérisée par des grandeurs telles que pression, température, enthalpie, volume massique ou encore masse volumique. Ces grandeurs, une fois liées, permettent de suivre le passage de l'eau à la vapeur. Nous citons entre autres :

- **Relation pression /température :**

La température de vaporisation de l'eau dépend de la pression. Par exemple, sous la pression atmosphérique normale, la température d'ébullition de l'eau est égale à la température de saturation<sup>3</sup>. A ce stade la pression atmosphérique de l'air est supérieure à la pression de vapeur saturante. Mais lorsque la pression ambiante est inférieure à la pression de vapeur, la température de vaporisation de l'eau est inférieure à 100°C. Cette relation est rigoureusement précise et immédiate à condition d'avoir des valeurs de pression et température inférieures à

---

<sup>3</sup> Température de saturation : appelée aussi température d'ébullition.

celle du point critique<sup>4</sup> (221,2 bar, 374,15 °C). Ainsi comme le montre la **figure 1** sous une pression de 1,00 bar absolu, on a une température d'ébullition de 100°C [3].

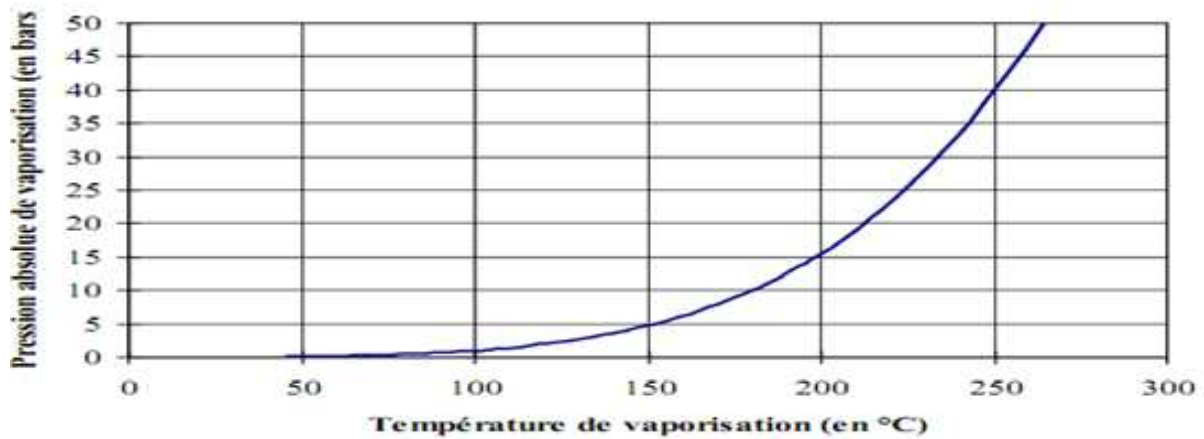


Figure 1: courbe de température de vaporisation de l'eau

**-Enthalpie de vaporisation :**

Si l'on continue à chauffer notre masse d'eau à 100 °C sous la pression atmosphérique, on constate que sa température reste constante et égale à 100°C. Les premières fumerolles de vapeur apparaissent jusqu'à la disparition totale de l'eau à l'état liquide. La transformation du kilogramme d'eau liquide en gaz ou vapeur d'eau, appelée vaporisation, nécessite une quantité importante d'énergie appelée chaleur latente de vaporisation ou enthalpie de vaporisation<sup>5</sup>. La **figure 2** illustre ces étapes successives de transformation de l'eau à la vapeur.

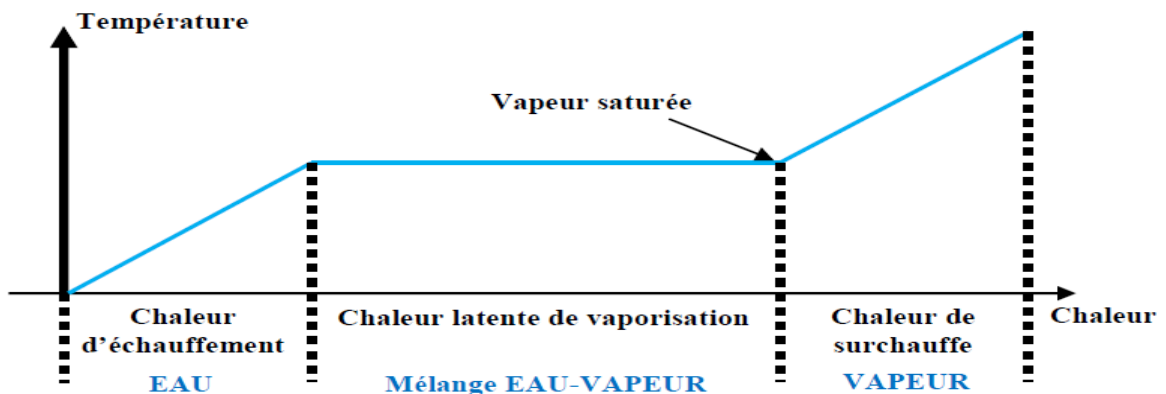


Figure 2: courbe d'enthalpie de vaporisation de l'eau

<sup>4</sup> Point critique : c'est le point pour lequel le volume massique de la vapeur et celui du liquide en équilibre, sont égaux.

<sup>5</sup> L'enthalpie de vaporisation est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 Kg d'eau (à température et pression constantes) pour obtenir 1 Kg de vapeur saturée.

#### **1.4. Différents procédés de production de vapeur d'eau**

Le passage de l'eau à la vapeur fait appelle à diverses techniques dépendant de la condition à laquelle se trouve cette dernière. Selon les phénomènes observés, cette transformation peut se faire naturellement ou soit industriellement.

D'une manière naturelle, l'eau se transforme en vapeur par évaporation. Elle peut être observée lorsque l'on fait étendre le linge. L'évaporation est une étape importante pour le cycle <sup>6</sup>bien connu de L'eau.

Industriellement, on utilise les chaudières pour produire la vapeur. Dans ce cas la source de chaleur peut être fournie par un combustible (gaz, fioul, charbon, déchets), une résistance électrique ou l'uranium dans le cas d'une centrale nucléaire. Selon les systèmes de transfert de chaleur, les chaudières à vapeur sont classées en deux catégories: les chaudières à tube de fumée dans lesquelles les gaz brûlés parcourent des tubes noyés dans l'eau et les chaudières à tube d'eau dans lesquelles l'eau de la chaudière circule dans des tubes chauffés par les fumées qui les enveloppent [4].

La vapeur d'eau est aussi produite par géothermie en utilisant la chaleur de la terre profonde, par voie solaire à l'aide des capteurs à concentrations et par des générateurs électriques.

#### **1.5. Problématique sur la production de vapeur d'eau**

Il est certes qu'il ya d'autres problèmes posés lors de la production de la vapeur d'eau, dans notre étude nous allons nous basés sur la problématique au niveau des sources d'énergies de production. Alors cela dit, les énergies fossiles sont toujours très utilisées aujourd'hui par les industriels dans des chaudières. On peut penser qu'elles vont poser deux problèmes principaux. Le premier est que leurs raretés vont créer des tensions géopolitiques dans le monde, elles sont destinées à finir. Le second problème est que les émissions de CO<sub>2</sub>, qu'elles engendrent, sont élevées et contribuent fortement au réchauffement climatique. C'est dans cette optique que le recours aux énergies propres et durables est nécessaire, une possibilité est l'utilisation du soleil pour produire la vapeur d'eau bien vraie qu'il existe actuellement dans ce domaine quelques contraintes comme la mal vulgarisation des technologies de productions, et la discontinuité du fonctionnement du système due aux conditions climatiques [5].

Dans notre étude nous allons nous basé sur la production à partir du soleil.

---

<sup>6</sup> Cycle de l'eau: Eau liquide devient nuage, puis retombe en pluie ou neige.

## CHAPITRE 2 : ENERGIE SOLAIRE ET LES CAPTEURS THERMIQUES

### 2.1. Energie solaire

L'énergie solaire provient des rayons du soleil qui atteignent la Terre. Le premier point important à noter est que cette énergie est présente dès le lever du soleil. De même, bien qu'elle soit plus puissante par beau temps, elle est également présente et utilisable par temps nuageux. En effet, l'énergie solaire tire à la fois partie des rayons directs du soleil mais aussi des rayons diffus à travers l'atmosphère.

Le dernier point intéressant à noter est que chaque année, les rayons du soleil arrivant jusqu'à nous permettent de produire assez d'énergie pour combler les besoins énergétiques de tous les habitants de la Terre. En théorie, il suffit donc d'installer des matériaux qui captent cette énergie et la transforment en électricité, chauffage etc. pour arriver à une énergie propre et renouvelable. [6] L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales: la conversion photothermique qui consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur et la conversion photovoltaïque pour la production d'électricité.

Nous traiterons dans le cadre de ce travail seulement la première voie de conversion.

### 2.2. Capteurs solaires thermiques

#### 2.2.1. Principe

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur<sup>7</sup> (eau, air, ...).

L'énergie solaire thermique est captée par la surface absorbante du capteur solaire. Dans de nombreux types de capteurs, les revêtements sélectifs sont appliqués sur les surfaces absorbantes pour augmenter l'efficacité. Un fluide caloporteur absorbe et véhicule une partie de l'énergie captée par l'absorbeur.

#### 2.2.2. Différents types de capteurs

Il existe des différents types de capteurs solaires pour chauffer les liquides. Leur choix dépend de la température désirée, de l'eau chaude et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. Les technologies les plus courantes sont [6]:

- Les capteurs à liquide plans sans vitrage,
- Les capteurs à liquide plans vitrés,

---

<sup>7</sup> Fluide caloporteur : également appelé fluide de transfert, il est chargé de transporter la chaleur collectée et concentrée par le miroir.

- Les capteurs à concentration,
- Les capteurs solaires à tubes sous vide.

Notre étude sera basée sur les capteurs à concentration.

### 2.3. Concentrateurs solaires thermiques

#### 2.3.1. Généralités

Quand les températures plus élevées sont exigées, des capteurs solaires à concentration sont utilisés. Ils utilisent l'énergie solaire arrivant sur une grande surface réfléchissante réfléchiée sur une plus petite surface avant qu'elle ne soit convertie en chaleur qui entrainerait de température plus élevées. La plupart des collecteurs à concentration peuvent seulement concentrer le rayonnement solaire parallèle venant directement à partir du disque soleil, donc ils doivent suivre le mouvement apparent du soleil [7].

#### 2.3.2. 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 nous présente la figure 3, cette production fait appel à des capteurs à concentration qui se présentent sous plusieurs technologies, regroupées en deux principaux systèmes à concentration :

- **Les systèmes à concentration en ligne :** Capteurs cylindro-parabolique et capteurs linéaire de Fresnel
- **Les concentrateurs points:** Les tours à héliostats et capteurs paraboliques.

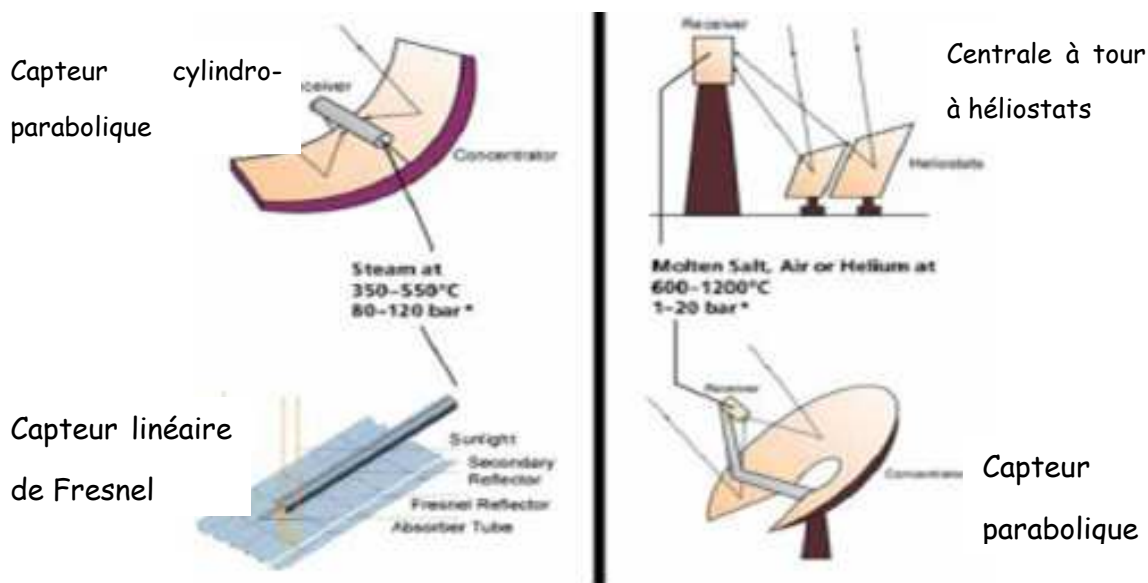


Figure 3: principale technologie solaire [8].

La majorité des systèmes utilise des miroirs de verre pour réfléchir la radiation solaire et peu d'entre eux des feuilles d'aluminium.

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 car elle n'a pas de direction. La centrale solaire ne peut donc fonctionner que si le ciel est dégagé. Nous allons par la suite dans notre étude se baser sur le capteur parabolique.

### **2.3.3. Avantages et inconvénients de la concentration**

Les avantages que présentent les systèmes à concentration sont :

- Réduction des surfaces absorbantes ;
- La densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide caloporteur peut travailler à température plus élevée pour la même surface de captation d'énergie.

Comme tous systèmes ont des avantages et des inconvénients, ces systèmes présentent aussi un certain nombre d'inconvénients :

- Les pertes optiques peuvent être importantes. Elles sont dues aux phénomènes de réflexion et de réfraction et aux caractéristiques géométriques du système ;
- Le rayonnement diffus est très mal utilisé dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré ;
- Les systèmes à forte concentration nécessitent des montages optiques précis et par conséquent relativement chers ;
- Il faut aussi maintenir les qualités optiques du système ( contre l'oxydation.....) ;
- Dans la plus part des cas, le flux n'est pas distribué de façon uniforme sur l'absorbeur ;
- L'absorbeur est soumise à de grandes variations de température lors du passage nuageux ;
- Les systèmes à forte concentration ont un champ étroit. Il est donc nécessaire de pointer pour capter le rayonnement direct et ceci demande des mécanismes d'orientation [9].

Cette étude nous permet d'avoir un aperçu sur la conception et le fonctionnement d'un concentrateur solaire parabolique. L'étude suivante nous conduira à la description du prototype puis à son utilisation dans le cas de ce projet.

## MATERIELS ET METHODES

Dans la plupart des cas, on produit la vapeur en utilisant les combustibles fossiles dont le prix devient de plus en plus cher. L'enjeu aujourd'hui est d'utiliser comme combustible le rayonnement solaire afin de produire la vapeur lorsque celui-ci est concentré par la parabole. Mais, lors de la production, des paramètres dus aux phénomènes de transfert de chaleur engendrent des pertes thermiques non négligeables. C'est ainsi qu'il nous a été soumis une étude de production de vapeur à partir d'un concentrateur solaire parabolique en vue d'optimiser le prototype existant à LESEE. Nous allons, dans ce qui suit, décrire notre prototype et ses éléments constitutifs, proposer un modèle expérimental, passer aux méthodes de calculs des grandeurs et terminer par des mesures.

### CHAPITRE 3 : CONCENTRATEUR SOLAIRE PARABOLIQUE

#### 3.1. Description et fonctionnement du prototype

Il a été construit au LESEE fonctionnant avec un système de poursuite manuel suivant deux axes vertical et horizontal. Les deux axes permettent de suivre le soleil dans course et aussi de maximiser le rayonnement solaire concentré à l'absorbeur. Il a un support rigide posant au sol et qu'on peut le déplacer d'un point à l'autre. Il est constitué de deux parties à savoir : le réflecteur et le récepteur.

##### 3.1.1. Description du réflecteur

C'est la parabole recouverte de feuilles d'aluminium dont la surface intérieure brillante est face au soleil. Sa partie centrale est constituée d'un trou ne recouvrant pas la feuille d'aluminium et qui reçoit l'ombre de la marmite comme l'indique la figure 4.

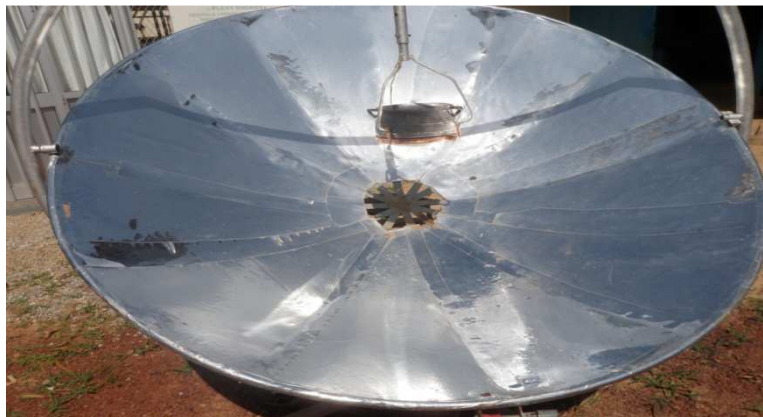


Figure 4: Photo du concentrateur solaire parabolique

Ces dimensions sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Valeurs caractéristiques du réflecteur [10]

<b>Diamètre</b>	<b>2m</b>
<b>Distance focale</b>	<b>0,5 m</b>
<b>Surface d'ouverture de la parabole</b>	<b>3,14 m<sup>2</sup></b>
<b>Largeur de la feuille d'aluminium</b>	<b>0,52 m</b>
<b>Longueur de la feuille d'aluminium</b>	<b>1,14 m</b>

### 3.1.2. Description du récepteur

Il est le foyer de la parabole et est vertical. C'est la partie dont les rayons solaires sont concentrés et la température est très élevée. Nous utilisons deux récipients à fond circulaire, de matériau de fabrication identique (aluminium) et de tailles différentes. Leur métal est un bon conducteur thermique supportant la chaleur à très haut degré et est teinté de noire pour éviter la réflexion de rayon lumineux. Leurs dimensions sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2: Valeurs caractéristiques des récepteurs

	<b>MARMITE N°1</b>	<b>MARMITE N°2</b>
<b>Volume (L)</b>	<b>4,78</b>	<b>10,58</b>
<b>Rayon (m)</b>	<b>0,15</b>	<b>0,18</b>
<b>Surface (m<sup>2</sup>)</b>	<b>0,071</b>	<b>0,10</b>



### 3.2. Dispositif expérimental

#### 3.2.1. Modèle expérimental

Nos expériences se feront selon le modèle suivant :

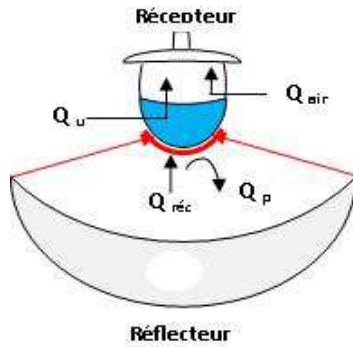


Figure 5: Chauffage avec couvercle

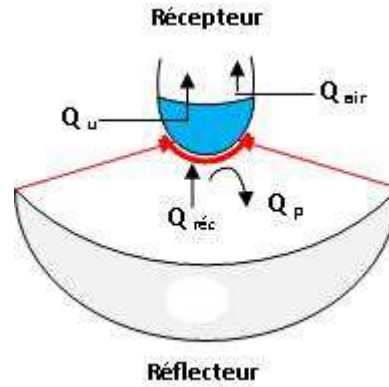


Figure 6: Chauffage sans couvercle

#### 3.2.2. Autres outils associés

Nous citons les instruments suivants :

- Un chronomètre
- Une balance sensible
- Un bécher de 2000 ml
- Deux thermocouples
- Une paire de gants anti chaleur et lunette
- La station météorologique

### 3.3. Calculs de puissance du récepteur et du débit massique théorique

#### 3.3.1. Calcul de puissance du récepteur

Comme le montre notre modèle, nous allons calculer la puissance reçue par nos marmites suivant deux méthodes afin d'évaluer l'écart entre ce qui a été envoyée et celle réellement reçue. Ceci nous permettra de déterminer la plage d'énergie que peut apporter notre concentrateur à l'absorbeur et d'autre part d'envisager des solutions par rapport aux pertes.

##### Méthode 1 :

Nous évaluons cette puissance en se situant entre la parabole et la marmite. Elle est donnée par la relation suivante [11] :

$$Q_{\text{réc1}} = \eta_{\text{opt}} * Q_{\text{réf}} \quad (3-1)$$

$Q_{\text{réf}}$  : Puissance reçue à l'ouverture du collecteur parabolique

$$Q_{\text{réf}} = I_s * A_{\text{réf}} \quad (3-2)$$

L'équation (3-1) devient :

$$Q_{\text{réc1}} = \eta_{\text{opt}} * I_s * A_{\text{réf}} \quad (3-3)$$

$\eta_{\text{opt}}$  : Rendement optique du concentrateur

$I_s$  : Irradiation solaire incidente arrivant à la surface du réflecteur

$A_{\text{réf}}$  : Surface du réflecteur

### Méthode 2 :

Si nous considérons le système eau marmite, d'après le dispositif expérimental, le bilan de puissance est :

$$Q_u + Q_{\text{air}} = Q_{\text{réc2}} - Q_p \quad (3-4)$$

Alors :

$$Q_{\text{réc2}} = Q_u + Q_{\text{air}} + Q_p \quad (3-5)$$

$Q_u$  : Puissance utile ou absorbée par l'eau

$Q_p$  : Puissance perdue

$Q_{\text{air}}$  : Puissance absorbée par l'air dans la marmite

Nous observons que lorsque le rayonnement solaire se concentre sur la surface absorbante, il se transmet par conduction de l'extérieur vers l'intérieur du récipient puis à l'eau. Ce qui permet l'élévation de sa température et ensuite sa vaporisation. La puissance reçue par cette dernière s'écrit :

$$Q_u = [m_e * c_{pe} * \Delta T + m_{\text{vap}} * L_{\text{vap}}] / T \quad (3-6)$$

$T_i$  : température initiale de l'eau

$T_f$  : température finale de l'eau

$\Delta T = T_f - T_i$

$c_{pe}$  : Chaleur massique de l'eau

$L_{\text{vap}}$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau

$t$  : Durée du chauffage

Mais une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante. Cette variation de température provoque un processus des pertes de chaleur par convection, par

rayonnement et par conduction. La puissance correspondante est donnée par l'expression suivante [11]:

$$Q_p = Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{ray} \quad (3-7)$$

✓ Les pertes par convection est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Elles sont proportionnelles à la surface captatrice de l'absorbeur et la différence de température entre l'ambiant et la surface captatrice. Ces pertes sont données par la relation :

$$Q_{conv} = h_{conv} * A_{réc} * (T_{réc} - T_{amb}) \quad (3-8)$$

$T_{réc}$  : Température du récepteur

$T_{amb}$  : Température ambiante

$h_{conv}$  : Coefficient de transfert par convection naturelle est donné par [12] :

$$h_{conv} = (1,141 + \frac{0,0843}{R}) * (T_{réc} - T_{amb})^{(0,233)} \quad (3-9)$$

✓ Les pertes par rayonnement dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur. On l'écrit sous la forme [11]:

$$Q_{ray} = A_{réc} h_{ray} (T_{réc} - T_{amb}) \quad (3-10)$$

Le coefficient de rayonnement est [14] :

$$h_{ray} = \epsilon \sigma \frac{T_{réc}^4 - T_{amb}^4}{T_{réc} - T_{amb}} = 4\epsilon \sigma T^3 [1 - (\frac{\Delta T}{2T})^2] \quad (3-11)$$

✓ Les pertes par conduction sont liées à la nature du matériel utilisé. Elles sont habituellement petites par rapport aux pertes par convection ou par rayonnement. Dans la plupart des cas on peut les combiner avec les pertes par convection. Elles sont données par la relation suivante [11]:

$$Q_{cond} = \lambda_{réc} e A_{réc} (T_{réc} - T_{amb}) \quad (3-12)$$

$e$  : Epaisseur de l'absorbeur

$\lambda_{réc}$  : Conductivité du récepteur

– Nous ajoutons à ces pertes, la puissance absorbée par l'air dans la marmite :

$$Q_{air} = [m_a * C_{pa} * (T_{eau} - T_{amb})] / t \quad (3-13)$$

$m_a$  : Masse de l'air dans la marmite

$C_{pa}$  : Chaleur massique de l'air

Enfin, nous déduisons des équations (3-3) et (3-5) le rendement du concentrateur (rapport des puissances à l'absorbeur) :

$$\sigma_{réc} = \frac{Q_{réc2}}{Q_{réc1}} \quad (3-14)$$

### 3.3.2. Calcul du débit massique théorique

Nous allons utiliser les données de l'irradiation incidente de la station météorologique du LESEE sur le site de KAMBOINSE pour la période du 04/06/2011 que nous la résumons par le diagramme de l'annexe1.

Ce diagramme présente un bon ensoleillement direct à partir de 08H00 à 10H00 et une mauvaise irradiation directe de 10h00 jusqu'à 17h00. Pour la suite de nos travaux nous souhaitons travailler entre 08h00 et 13h00 avec une irradiation directe moyenne d'environ 400 W/m<sup>2</sup>. Car nous sommes en saison pluvieuse et les après-midis sont tout le temps perturbés par les nuages qui rendent l'irradiation directe faible. Nous supposons que le rendement optique de notre capteur est égal à 90% et que les puissances dues aux pertes sont de l'ordre de 40%. Ainsi, la puissance utile supposée être reçue par l'eau est égale à **678 W/m<sup>2</sup>**. Et comme nous souhaitons, pour nos mesures, chauffer des quantités d'eau équivalentes à 1 Kg et 2 Kg, et par hypothèse que la vaporisation n'est pas totale, par rapport à la puissance utile fournie par notre prototype, nous fixons respectivement la durée des chauffages égale à 1 heure et 2 heures. Mais nous tenons à souligner que puisque l'irradiation directe est inconstante, lors de nos mesures, les durées peuvent être au-delà d'une heure pour 1 Kg et 2 heures pour 2 Kg d'eau. Ensuite, après avoir effectué les calculs de masses théoriques pour 1 Kg et 2 Kg d'eau, nous parvenons à déterminer un débit massique théorique de vapeur d'eau égal à **264 mg/s** dont les détails des calculs se trouvent en annexes1. Ce résultat nous permettra, à la suite de nos expérimentations et selon le modèle expérimental proposé, à déterminer en fonction des paramètres influents (Ensoleillement, vent, taille des récepteurs, couvercle des récepteurs et méthodes de remplissage d'eau) la capacité optimale de production de notre prototype.

## CHAPITRE 4: EXPERIMENTATION

### 4.1. Installation

Nous savons que le concentrateur parabolique fonctionne quand les rayons solaires sont parallèles à son axe. Donc il faut le placer dans un environnement clair en évitant les zones d'ombres autour de l'équipement.

La partie contenant le récepteur recevra le rayon solaire concentré comme indique la figure 7.

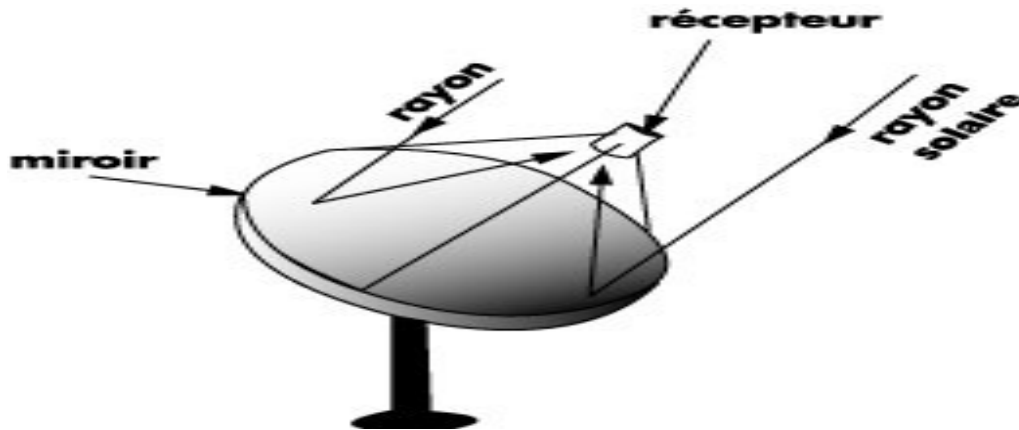


Figure 7: Concentrateur parabolique

### 4.2. Câblage des sondes au récepteur

La connexion des sondes au récepteur est faite comme nous l'indique le schéma suivant :

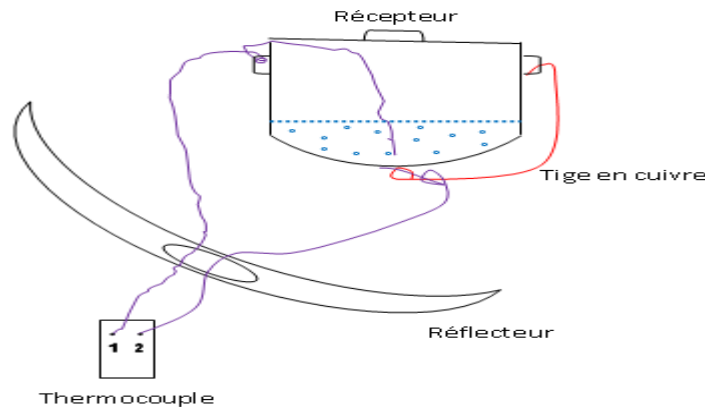


Figure 8 : Schéma de câblage des sondes au récepteur

Nous servirons de ce schéma lors des mesures pour pouvoir connecté les sondes du thermocouple à l'absorbeur et à l'eau.

### 4.3. Mesures

Les mesures concernent les températures de l'ambiance, de l'eau et de l'absorbeur puis l'ensoleillement du site. Pour les températures nous utilisons deux thermocouples à affichage numérique de marque K. Par contre les données de l'irradiation directe sont obtenues par la

station météorologique du LESEE. L'utilisation d'un chronomètre nous a permis à relever les temps de mesures.

#### **4.3.1. Objectifs**

Le passage de l'eau à la vapeur se fait par un apport de chaleur. C'est un phénomène endothermique. D'abord l'eau reçoit une quantité d'énergie, appelée chaleur sensible, qui permet d'élever sa température à 100°C ensuite celle qui contribue à sa vaporisation.

Selon le modèle expérimental, nos objectifs consiste à:

- La détermination de la quantité d'eau à évaporer en fonction du flux de chaleur que celui-ci peut produire au fil du temps. Ceci nous permet d'avoir une idée sur la production selon la taille du capteur parabolique,
- L'évaluation, en fonction de l'ensoleillement du lieu de mesure et du temps, de la quantité d'énergie absorbée par l'eau,
- L'évaluation de la quantité d'énergie absorbée par l'air dans la marmite,
- L'évaluation des quantités d'énergies perdues par convection et rayonnement,
- L'utilisation de méthodes de remplissage (continue et discontinue) des récepteurs de l'eau à évaporer et d'autres méthodes (récepteur avec et sans couvercle),
- L'évaluation du rapport des puissances du récepteur calculées à partir de l'ébullition de l'eau et celle délivrée par le réflecteur,
- L'évaluation de gains économique et environnemental en comparaison avec d'autre source d'énergie.

#### **4.3.2. Protocole de mesures**

- Au début, bien nettoyer la parabole avec de l'eau,
- Prendre le poids à vide du bécher sur la balance et tarer la balance par la suite,
- Peser la quantité d'eau à analyser (0,5Kg ou 1Kg ou 2Kg),
- Placer le récepteur au foyer et y mettre de l'eau,
- Câbler les sondes du thermocouple selon la figure 8,
- Relever les températures de l'eau, de l'ambiante et d'absorbeur au début de l'expérience puis toutes les cinq (5) minutes,
- Placer la parabole au soleil et l'orienter suivant les deux axes de sorte que le maximum de rayonnement soit concentré sur la surface de l'absorbeur,

- Orienter la parabole chaque quinze (15) minutes en suivant l'ombre de la marmite sur la parabole,
- Peser la quantité d'eau à la fin de l'expérience.

#### 4.3.3. Principe de mesures

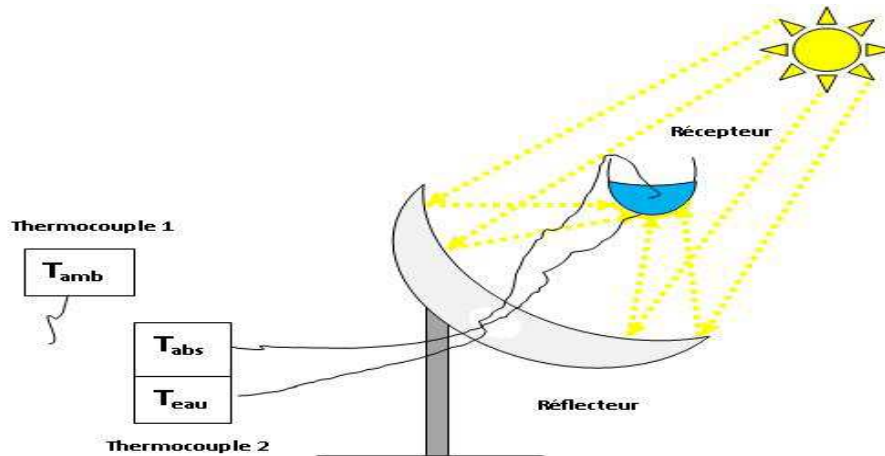


Figure 9: schéma de principe de mesure

Selon la **figure 9** le concentrateur reçoit le rayonnement solaire et le concentre sur la surface de l'absorbeur qui contient de l'eau. La chaleur ainsi concentrée est transmise par conduction de l'extérieur vers l'intérieur de la marmite puis à l'eau. Les sondes du thermocouple 2 dont l'une est placée dans l'eau, prend sa température et l'autre connectée au fond du récepteur, prend la température du rayonnement concentré par la parabole. Le thermocouple 1 est disposé pour la prise de la température ambiante.

Nous supposons évacuer l'eau par ébullition pendant un certains temps puis évaluer la quantité de vapeur produite.

#### 4.2. Conditions et données de mesures

Nous signalons que nos expériences ont commencé le 13/06/2011 et se sont achevées le 11/07/2011. Ce qui nous fait au total une douzaine de mesures dont nous consignons dans le tableau ci-dessous les conditions dans lesquelles nous menons nos différentes mesures. Elles concernent la quantité d'eau, la taille des récipients, le couvercle, l'ensoleillement et le passage du vent.

Nous soulignons que la température ambiante est prise à l'ombre de la parabole et que le chauffage des marmites se fait d'une manière continue jusqu'à un certain temps. Egalement, le remplissage discontinu se fait toutes les trente minutes avec une quantité d'eau initiale

équivalente à 0,5Kg et concerne les expériences 9, 10, 11 et 12. Les données de nos mesures sont en annexe2.

**Tableau 3: Conditions d'expérience**

	<b>Quantité d'eau</b>	<b>Taille marmite</b>	<b>Couvercle</b>	<b>Ensoleillement</b>	<b>Passage du Vent</b>
<b>Expérience1</b>	2 Kg	petite	fermé	Bon	faible
<b>Expérience2</b>	1 Kg	petite	fermé	Faible	très faible
<b>Expérience3</b>	2 Kg	grande	ouvert	Bon	excessif
<b>Expérience4</b>	2 Kg	grande	fermé	Faible	faible
<b>Expérience5</b>	2 Kg	petite	ouvert	Moins bon	faible
<b>Expérience6</b>	1 Kg	petite	ouvert	Moins bon	faible
<b>Expérience7</b>	1 Kg	grande	ouvert	Moins bon	Très faible
<b>Expérience8</b>	1 Kg	grande	fermé	Bon	Très faible
<b>Expérience9</b>	0,5Kg 2 fois	petite	ouvert	Moins bon	Faible
<b>Expériennce10</b>	0,5Kg 4 fois	petite	ouvert	Bon	très faible
<b>Expérience11</b>	0,5Kg 2 fois	grande	ouvert	Bon	Faible
<b>Expérience12</b>	0,5Kg 4 fois	grande	ouvert	Moins bon	Excessif



## RESULTATS OBTENUS

Nous présentons dans cette partie les profils de températures et ceux de l'ensoleillement direct relevés lors de nos manipulations. Ceci pour bien comprendre la variation brutale des températures d'absorbeur et d'eau que nous avons enregistrée au cours de ces mesures. Ensuite nous allons présenter les résultats des grandeurs calculées selon les objectifs que nous fixons préalablement pour les différents cas de nos expérimentations.

### 5.1 Profils de l'ensoleillement direct et de températures

Ces courbes sont en fonction du temps. L'évolution de l'irradiation directe est en orange et, celle de températures d'absorbeur en rouge, l'eau en verte et l'ambiante en bleue.

#### ➤ Expérience 1

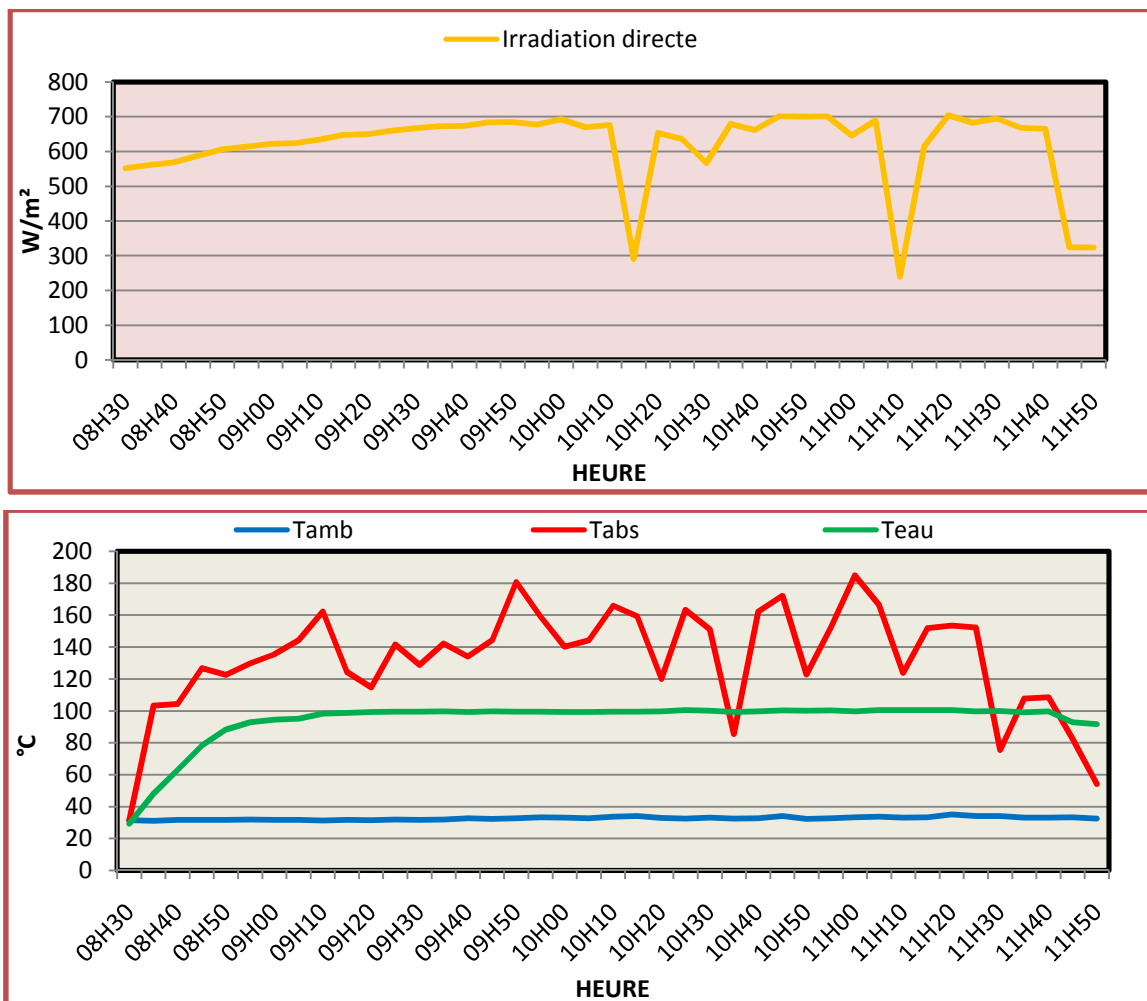
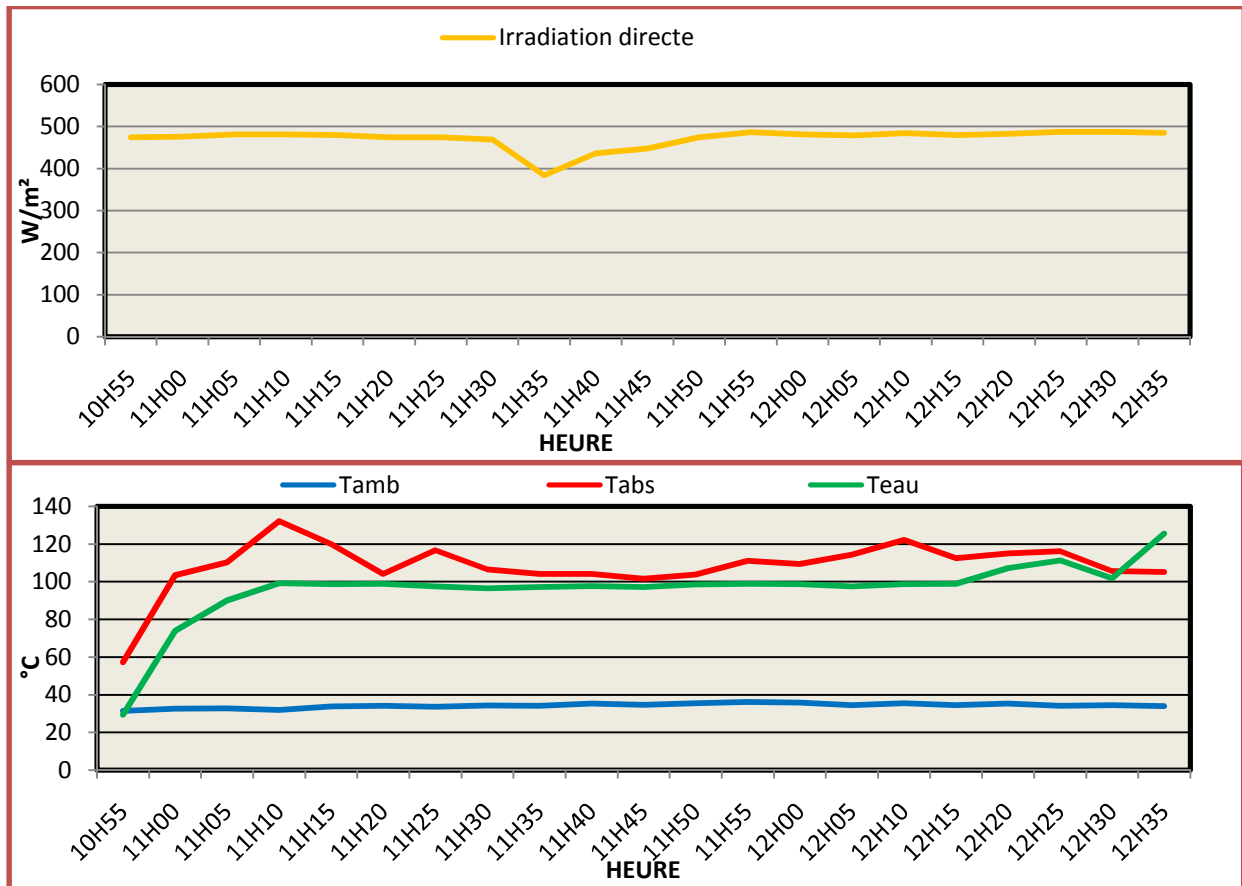


Figure 10: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 13/06/2011

La figure 10 nous révèle la chute de la température d'absorbeur lorsque l'intensité du rayonnement solaire direct est affectée par un ciel nuageux. Nous voyons là que le concentrateur parabolique ne peut concentrer l'irradiation diffuse comme nous indique dans la plupart des littératures. Mais, au-delà de ces perturbations, nous remarquons des fluctuations de la température d'absorbeur lesquelles pourraient être attribuées à un mauvais contact de la sonde à l'absorbeur. Ce qui fait qu'à moindre passage du vent, le thermocouple indique la température de l'air dans la zone environnante au dépend d'absorbeur. Nous disons que ceci est l'influence de la sonde sur la température d'absorbeur et n'a aucun effet sur la production.

➤ **Expérience 2**

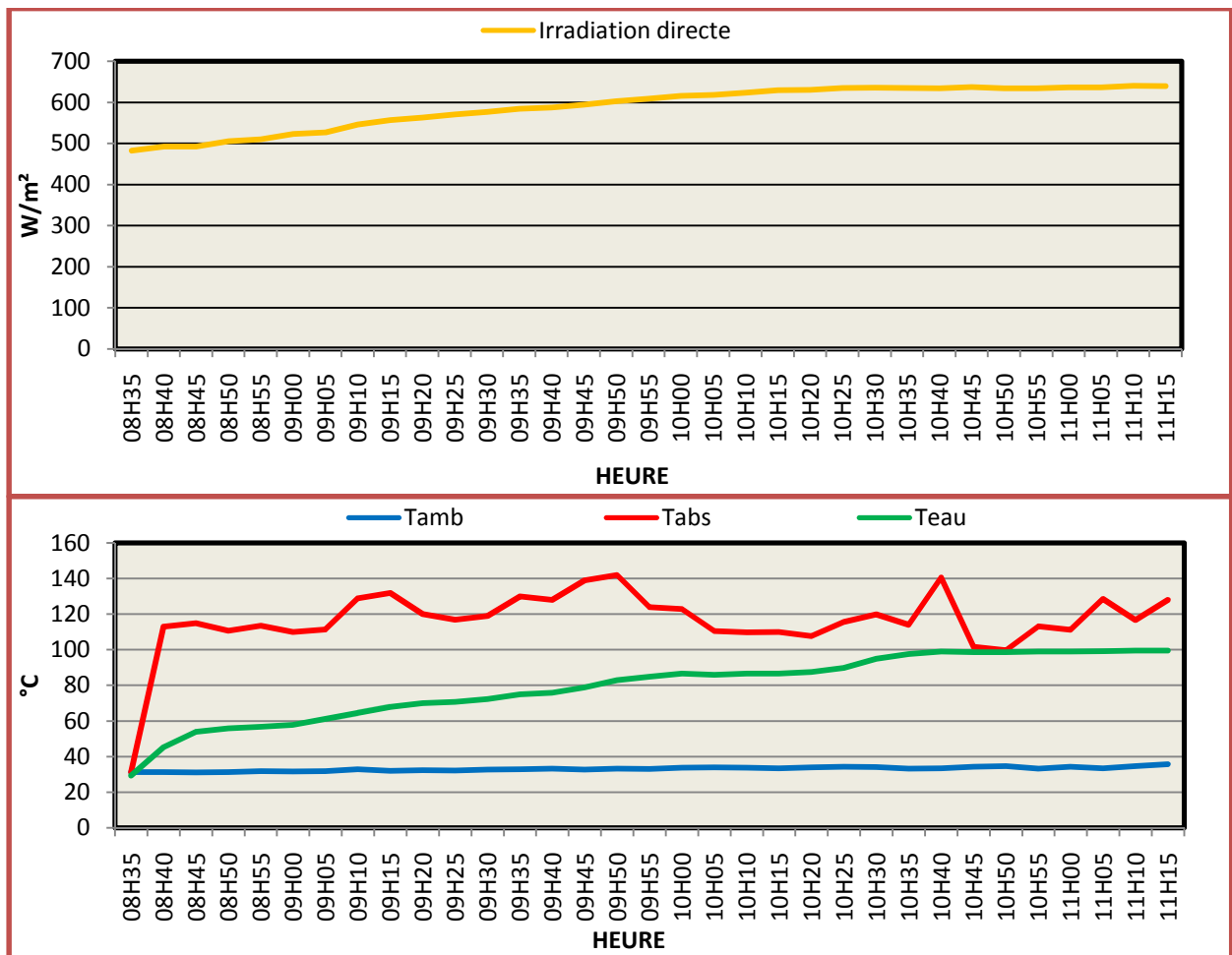


**Figure 11: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 21/06/2011**

Dans cette figure nous notons que le déplacement de la tache du flux solaire sur la surface absorbante affecte la température mesurée par la sonde du thermocouple à l'absorbeur. Nous disons que après les 15 minutes du chauffage du début, le rayonnement solaire concentré n'est pas bien orienté et la température d'absorbeur à baisser d'environ de 40°C. Et comme nous avons constaté cette chute, nous avons réorienté la parabole de nouveau et la température à

ainsi passer environ, à partir de 11h20 à 11h25, de 100°C à 120°C. D'autre part, dans le cas de cette mesure, nous disons que la température d'eau ne peut être au-dessus de 100°C. Mais nous remarquons par deux fois qu'elles avaient dépassées les 100°C. Ceci peut être justifié par le simple fait que la sonde placée n'est pas en contact avec l'eau mais plutôt avec la marmite. Et puisque sa partie vide contient de l'air qui absorbe moins de chaleur que l'eau, la chaleur fournie ne fait qu'augmenter la température d'air et donc du récipient. Egalement, nous notons que la température d'absorbeur n'est pas identique à celle de l'ambiance tout simplement que cette manipulation a commencée presque à 11h00 et, par rapport à la position du soleil, la parabole reçoit de tout bord l'irradiation incidente.

➤ **Expérience 3**



**Figure 12: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 22/06/2011**

Cette figure nous laisse voir une montée sans perturbation de l'irradiation directe qui va de 500 W/m² à 700W/m² environ durant la période expérimentale. Mais nous remarquons des

baisses de la température d'absorbeur. Elles pourraient être occasionnées par le passage du vent car le récipient est utilisé sans couvercle et la température d'eau malgré la croissance d'irradiation monte très lentement pour atteindre la température d'ébullition.

➤ **Expérience 4**

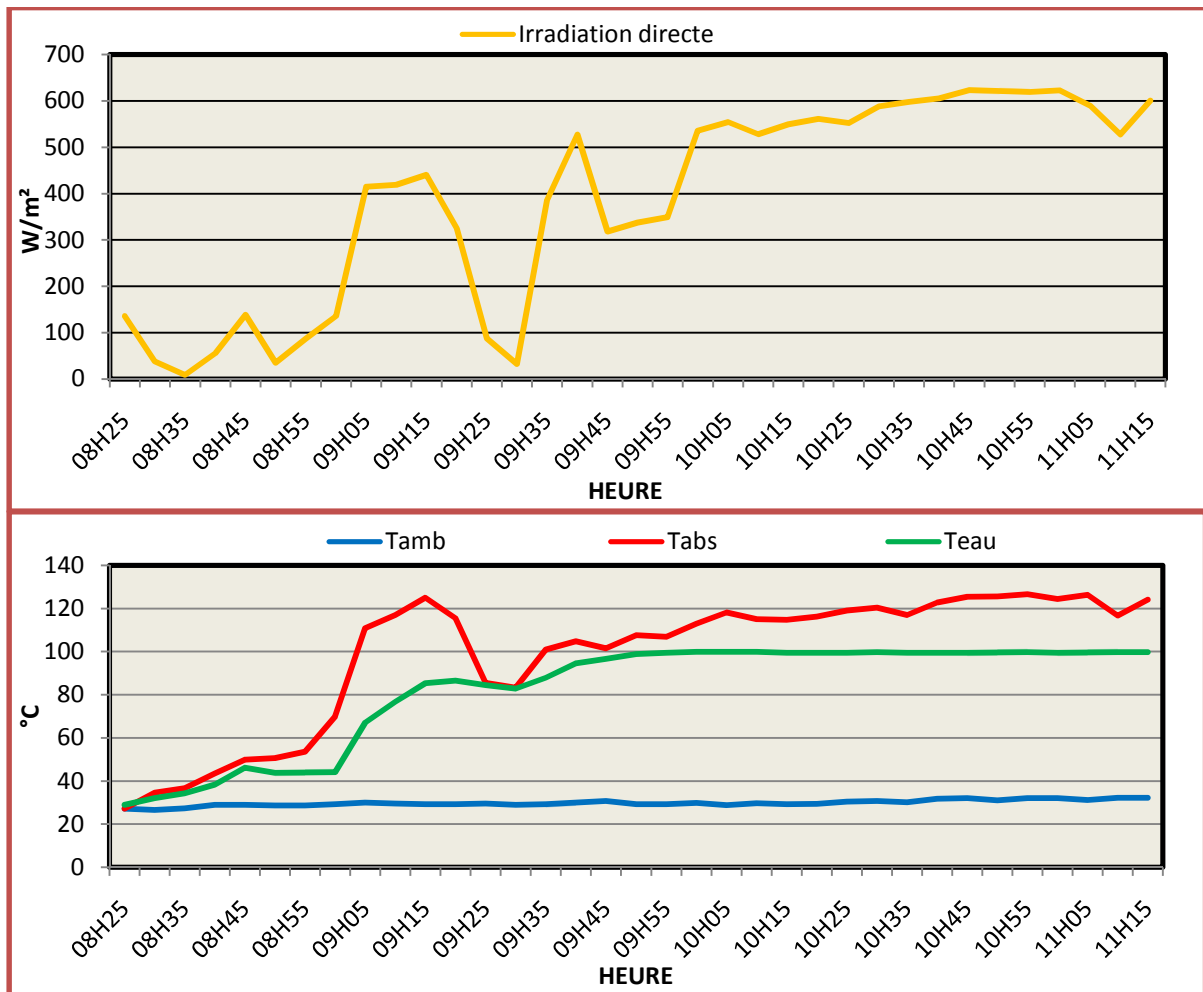
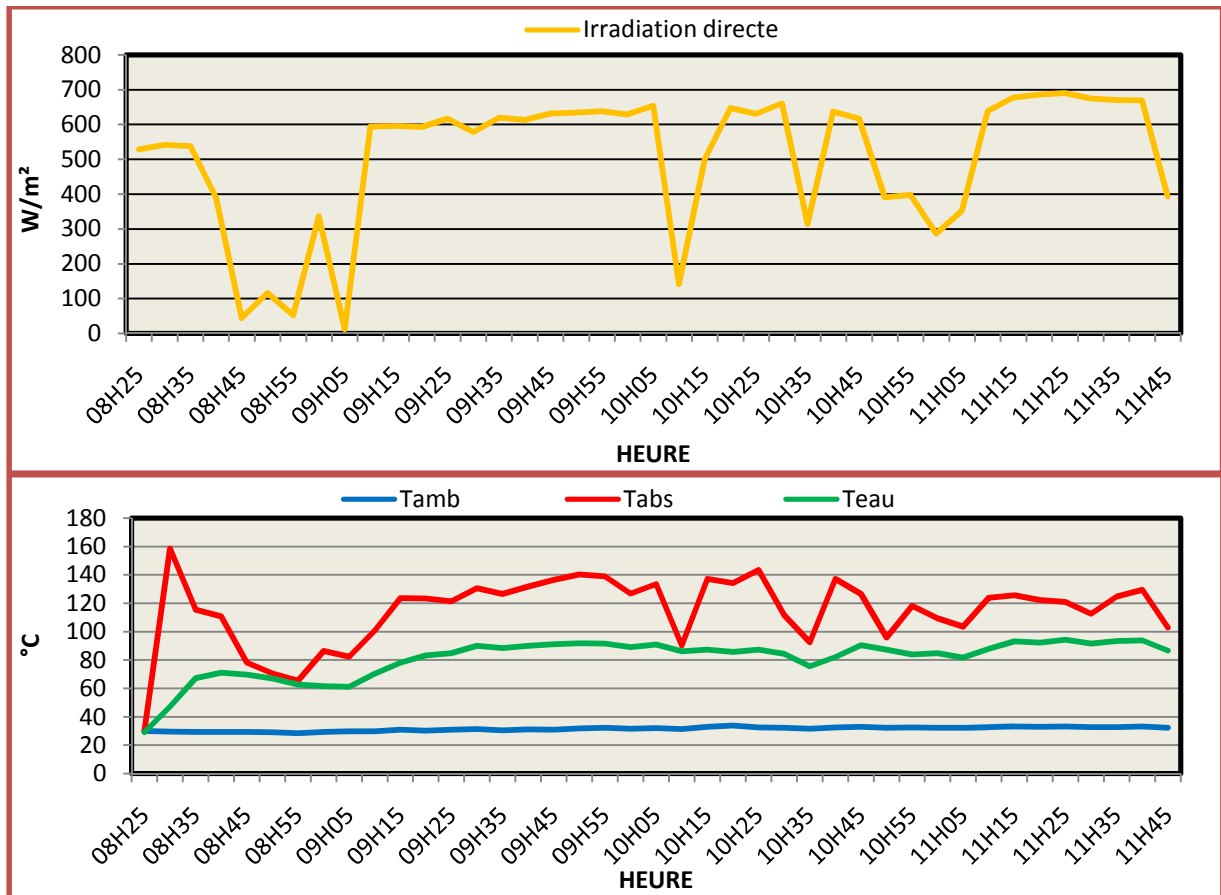


Figure 13: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 23/06/2011

La figure13 montre un début de la manipulation très perturbé avec une irradiation qui s'annule progressivement sous un ciel couvert de nuages. Mais, à partir de 09h30, lorsque l'ensoleillement croit, nous constatons une montée très lente de la température d'absorbeur. Ceci s'explique par le fait que la chute considérable d'irradiation jusqu'à environ 32 W/m² qui a suivi cette montée à contribuer entre temps au refroidissement de la surface absorbante. Et comme le ciel se dégage, il faut que le récipient se réchauffe de nouveau pour que sa température puisse remonter.

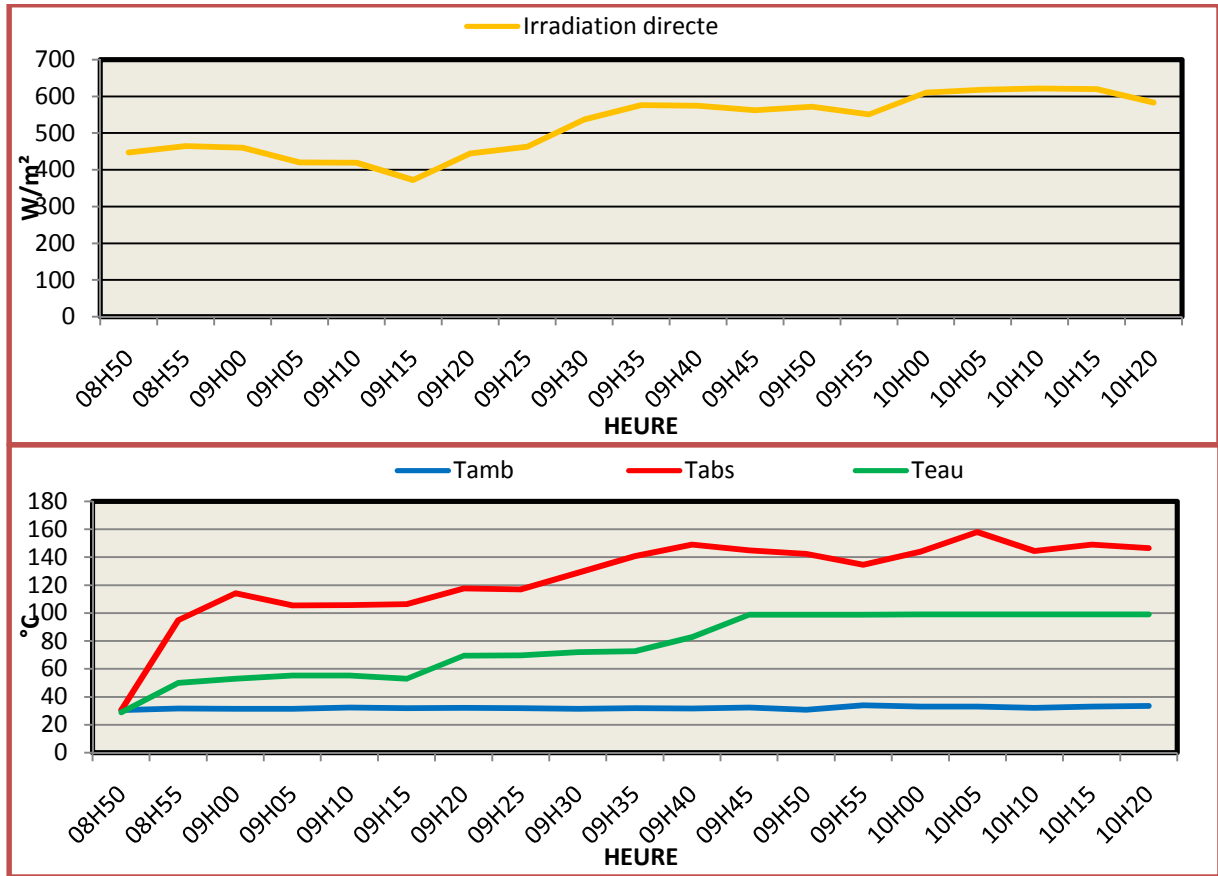
➤ **Expérience 5**



**Figure 14: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 24/06/2011**

La figure 14 présente une période de la manipulation totalement défavorable à l'ensoleillement direct qui est sans cesse perturbée par le passage de nuages. Ce qui fait que les températures d'absorbeur et d'eau sont affectées et ne permettent pas à l'eau d'atteindre la température d'ébullition. C'est dire quand l'éclairement baisse de manière significative, tel que l'on observe à partir de 08h35 à 08h45, le récipient devient une source de chaleur. Et par la suite cède sa chaleur à l'ambiance du simple fait de l'augmentation de la variation de la température entre le récipient et l'environnement. Ainsi, le transfert de chaleur constaté entraîne le refroidissement du récipient et donc la baisse de la température d'eau. Mais, une fois que le ciel se dégage, l'éclairement réapparaît et, la température d'eau remonte presque à la température de vaporisation. Alors, il faut noter que dans ce cas de figure, la vaporisation d'eau se fasse surtout du côté de la paroi la plus chaude, celle qui a reçu plus du rayonnement concentré.

➤ **Expérience 6**



**Figure 15: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 29/06/2011**

Dans la figure 15, nous voyons que l'irradiation directe est peu perturbée. Elle décroît de 400 W/m<sup>2</sup> environ à 300 W/m<sup>2</sup> pendant les 25 minutes du début de la manipulation. Ce qui fait que la température d'absorbeur, après avoir atteint les 100°C environ à 09h00, décroît légèrement et est presque constante pendant 15 minutes. Puisque l'éclairement diminue, la température de l'eau qui est à 50 °C ne peut subir une forte variation mais monte lentement. Nous voyons là que la chaleur fournie à l'eau ne peut élever sa température car le chauffage s'opère sans le couvercle. Cependant, à partir de 09h15, sous un faible éclairement, la température d'eau a varié de 19 °C. Le même phénomène a été observé en expérience 7 à 09h25. Et le jour suivant, à 12 Minutes de la manipulation, avec le même thermocouple, nous avons observé une montée brusque cette fois-ci pour les deux températures (absorbeur et l'eau) sous un faible ensoleillement. Cela a duré pendant au moins deux minutes quand le thermocouple s'est affiché batterie défectueuse et nous a conduits à l'arrêt de l'expérience pour la reprendre le 04/07/2011. Donc nous pourrions dire que les variations brutales que

nous venons de souligner pourraient être dues à un problème technique lieu à la faible intensité de la batterie de notre thermocouple.

➤ **Expérience 7**

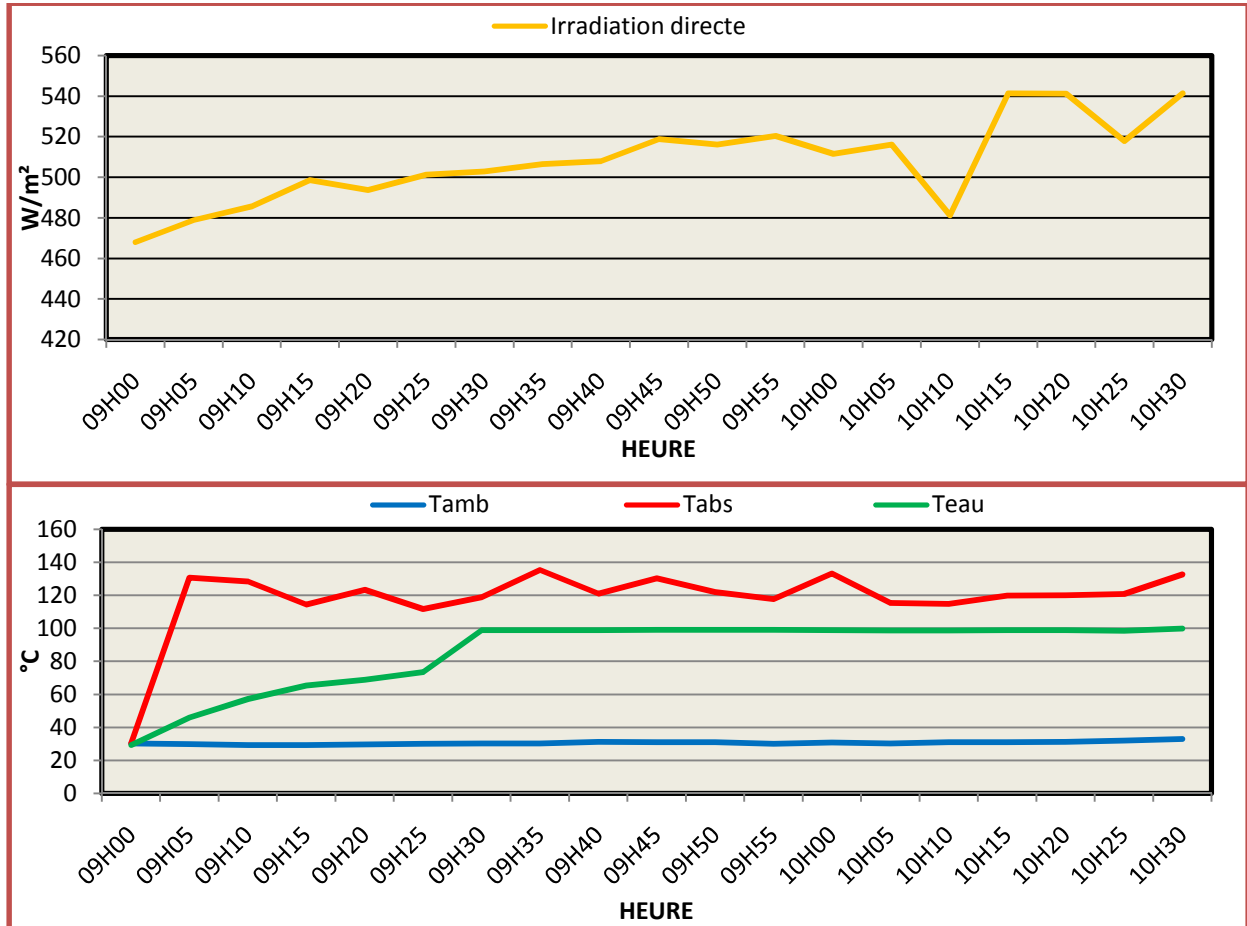


Figure 16: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 30/06/2011

Puisque nous l'avons déjà souligné en expérience 6, la montée de la température d'eau à 09h25 est occasionnée suite à une faible intensité de la batterie du thermocouple. D'autre part, nous constatons, à partir de 09h45 à 10h05, la baisse d'irradiation sur le profil de la température d'absorbeur et une montée d'irradiation qu'indique le pas de l'horloge météorologique, et vis versa. Cela suppose qu'il y a un problème de synchronisation entre le pas de l'horloge météorologique et celui du concentrateur. Ce qui fait que, à un moment donné, l'évolution du profil d'ensoleillement ne suit pas celle indiquée par la température d'absorbeur.

➤ **Expérience 8**

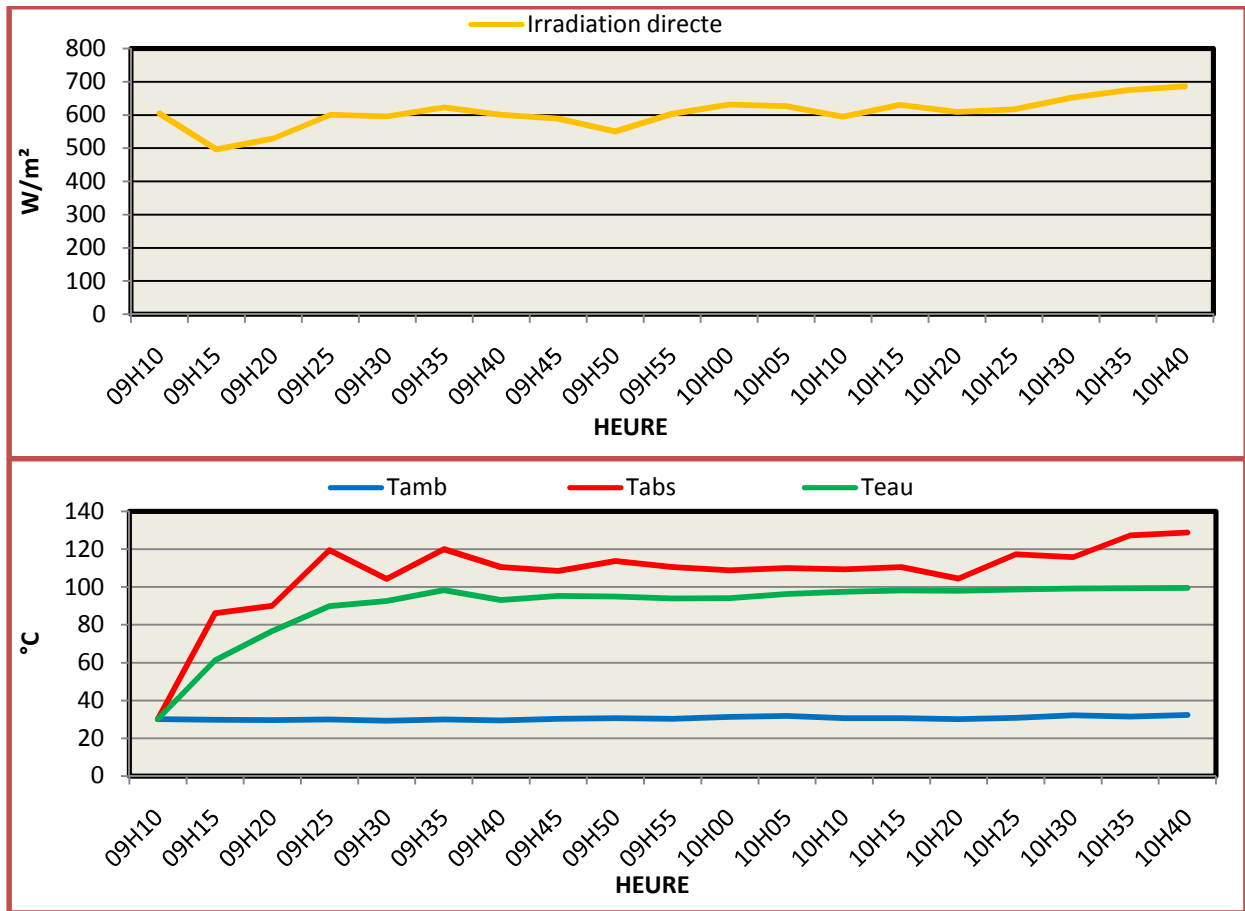
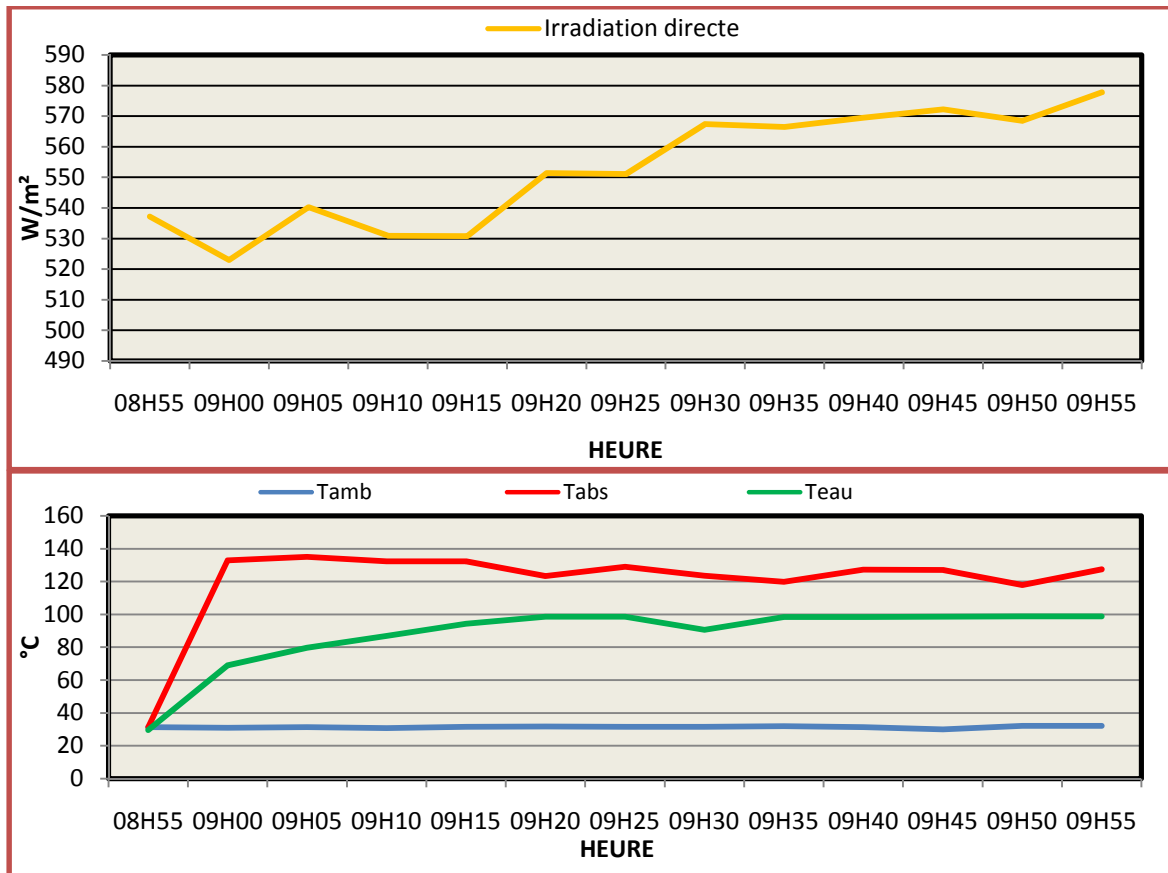


Figure 17: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 04/07/2011

Cette figure présente un profil d'irradiation directe peu perturbé par l'obstacle nuageux. La température de l'absorbeur varie peu ainsi que celle de l'eau. Mais, elle nous révèle une mauvaise orientation de la parabole qui dévie le flux du rayonnement concentré à l'absorbeur quand l'éclairement est bon. Elle se justifie par la baisse simultanée des températures d'eau et d'absorbeur à partir de 09h35 à 10h00. Nous en déduisons que la chaleur concentré contribue non seulement à chauffer la partie vide du récipient mais est perdue.



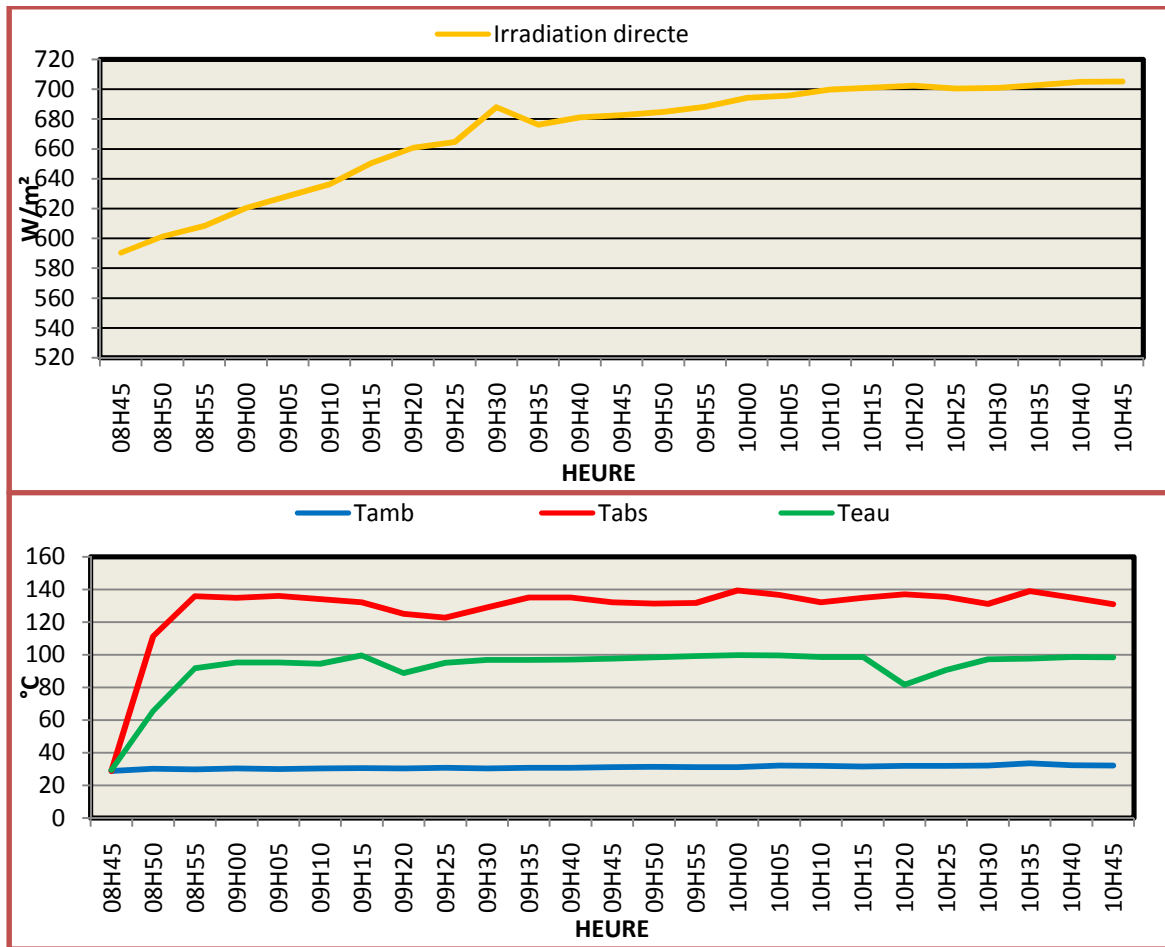
➤ **Expérience 9**



**Figure 18: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 05/07/2011**

Pour le cas de cette figure, nous signalons que la marmite est un peu inclinée dans le foyer. Et pour ne pas perdre la chaleur, nous orientons la tâche du flux concentré là où se trouve l'eau. C'est ce qui a occasionné la baisse de la température d'absorbeur car la sonde à l'absorbeur par rapport à sa position reçoit moins de rayonnement solaire concentré. Concernant la température d'eau, nous disons que l'application de la méthode discontinue nous a conduit à subdiviser notre quantité d'eau équivalente à 0,5 Kg dont l'une est versée dans le récipient au début du chauffage et l'autre est ajoutée à trente minutes du chauffage de la première. Comme nous venons de souligner, nous avons effectivement remarqué après cet ajout, une baisse de la température d'eau qu'indique notre thermocouple à 09h25. Elle s'explique par le fait qu'il y a un transfert de chaleur de l'eau chaude vers celle moins chaude. Et puisque nous faisons un mélange entre deux corps de même nature et de températures différentes, il est évident que l'établissement de la température d'équilibre enregistre une baisse.

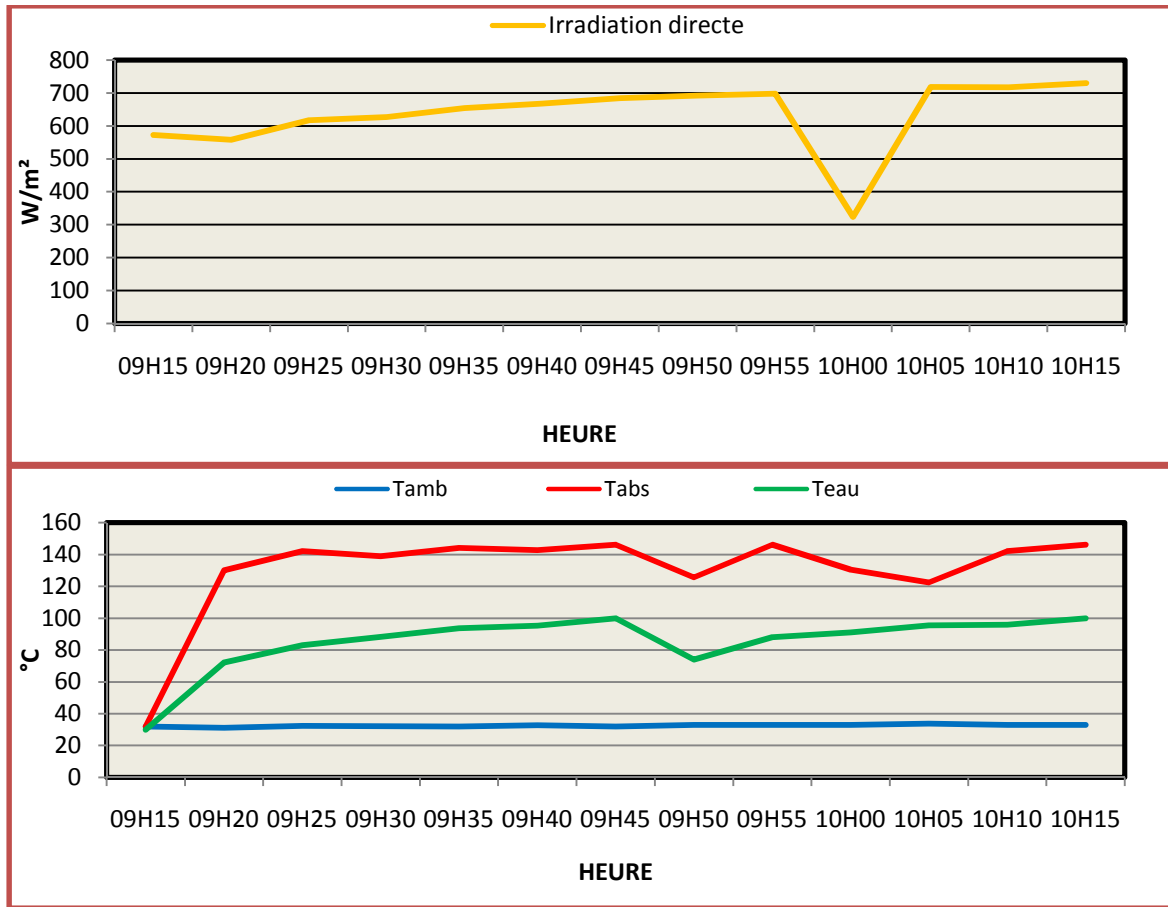
➤ **Expérience 10**



**Figure 19: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 07/07/2011**

Nous voyons ici une journée favorable qui est caractérisée par un ciel sans obstacle nuageux. Le profil de l'irradiation directe en démontre par une croissance qui va de 600 à 700 W/m² environ durant l'expérimentation. C'est ce qui justifie la hausse de la température d'absorbeur qui oscille autour de 150 °C. Mais, nous constatons par deux fois des chutes de la température de l'eau lesquelles pourraient être attribuées à des ajouts d'eau à chaque trente minute comme nous l'avons expliqué en expérience 9.

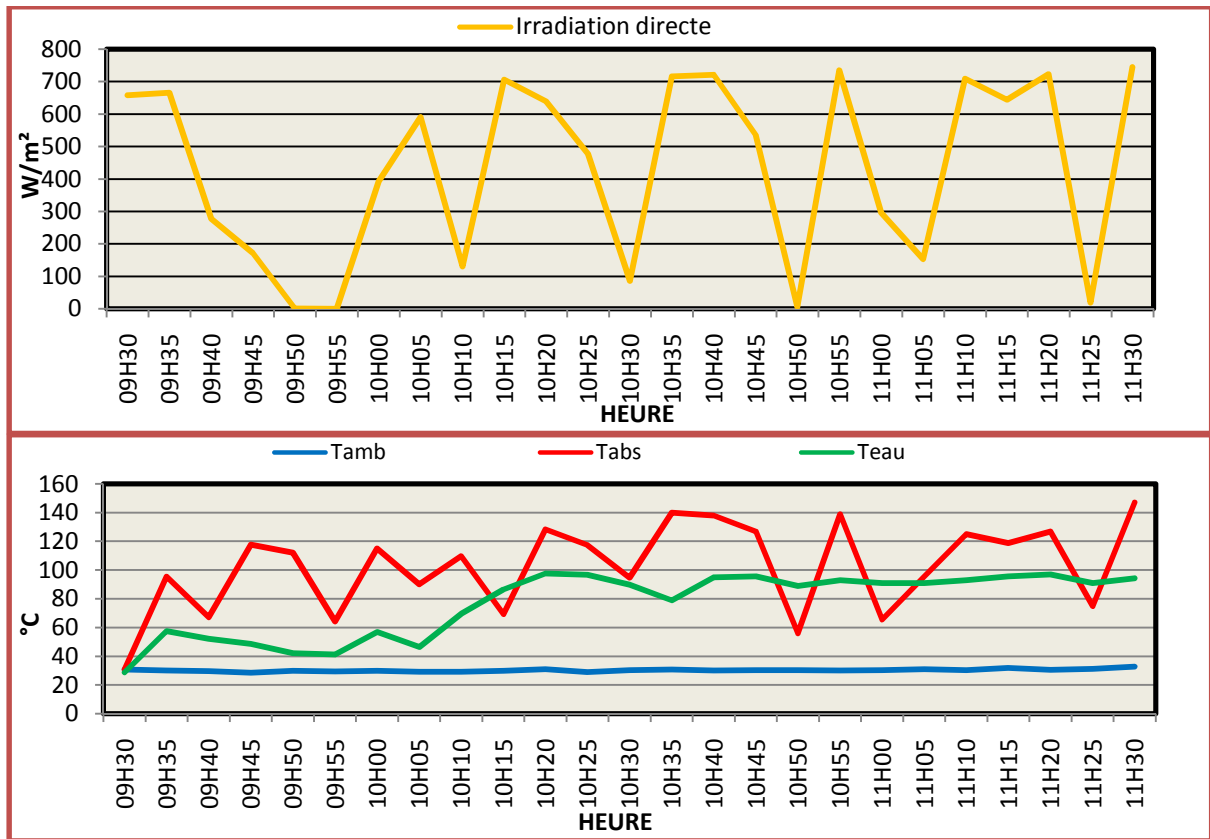
➤ **Expérience 11**



**Figure 20: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 08/07/2011**

La figure 20 nous montre un passage nuageux à 09h55 sur le profil de l'ensoleillement mais sur le profil des températures cette baisse est remarquée à 09h45. Cela montre que le pas de l'horloge de la station météorologique n'est pas identique à celui du concentrateur. Donc ce problème de synchronisation a fait que, à un moment donné, le profil de l'ensoleillement ne suit pas l'évolution de la température d'absorbeur.

➤ **Expérience 12**



**Figure 21: Profils de l'irradiation directe et de températures pour la journée du 11/07/2011**

Cette figure illustre une période de la journée très menacée par un ciel couvert de nuages. Mais nous notons une montée d'irradiation à 10h00 et une baisse de la température de l'absorbeur pour le même temps de mesure. Nous disons que quand l'irradiation baisse, la température de l'absorbeur baisse également, et comme l'irradiation remonte et redescend, ce qui fait que la température de l'absorbeur continue parfois à baisser. Bien que l'irradiation et la température de l'absorbeur baissent à 11h30 et se remontent, la température de l'eau quant à elle ne fait que chuter. Elle nous indique tout simplement l'ajout de la quantité d'eau après le relevé des températures à chaque trente minutes. Ce qui veut dire que lorsque nous ajoutons la quantité d'eau sa température tend vers une température d'équilibre et se stabilise par la suite pour être remontée sous l'influence de l'ensoleillement. Vers la fin de la manipulation la baisse de la température de l'eau peut être justifiée par la variation d'ensoleillement de  $722W/m^2$  à  $19W/m^2$  pendant au moins cinq minutes et par le renouvellement du vent car la marmite est utilisée sans couvercle. Face à ces perturbations notre production est affectée car la marmite qui à un moment donné est chauffée se refroidit entrainant la baisse de la

température de l'eau et se réchauffe de nouveau. De ce fait, nous constatons que l'eau s'évapore du côté de la paroi du récipient qui a reçu le plus de concentration lumineuse.

## 5.2. Récapitulatifs des grandeurs calculées

D'abord les calculs ont commencé par une évaluation de la quantité de vapeur d'eau en faisant la différence entre les masses initiale et finale de l'eau que nous avons mesuré avant et après nos différentes manipulations. Ceci nous a amené à chiffrer ces différentes masses en pourcentage. Puisque nous relevons la durée de mesures, nous avons calculé le débit massique de vapeur produite en appliquant la formule :  $\dot{m}_{vap} = m_{vap} / t$ . Par la suite, nous supposons identique les températures finale et initiale d'eau ( $T_{ef}=100^\circ\text{C}$ ,  $T_{ei}=29^\circ\text{C}$ ) et procédons à l'évaluation d'énergie utile en appliquant l'équation  $\dot{Q}_U = m_e C_{pe} \Delta T + m_{va} L_{vap}$ . Une fois déterminée celle-ci, nous calculons les énergies dues aux pertes. Pour les pertes par convection et rayonnement, nous utilisons respectivement les équations  $\dot{Q}_{conv} = [h_{conv} A_{réc} (T_{réc} - T_{amb})] \times t$  et  $\dot{Q}_{ray} = [h_{ray} A_{réc} (T_{réc} - T_{amb})] \times t$ . Mais nous soulignons que quand les marmites sont ouvertes, nous calculons les pertes par convection en bas et au dessus des récipients en prenant respectivement la différence des températures entre l'absorbeur et l'ambiance et, celle de l'eau et l'ambiance. Nous n'oublions pas la quantité d'énergie absorbée par l'air au-dessus de l'eau quand les récipients sont fermés et l'incluons dans les énergies perdues. Elle a été calculée par la formule  $\dot{Q}_{air} = m_a C_{pa} (T_{eau} - T_{amb})$ . Alors, nous déduisons l'énergie incidente absorbée par l'absorbeur pour le système eau marmite en se référant à l'équation  $\dot{Q}_{réc2} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p$ . Nous ne nous limitons pas à ces calculs. Comme l'ensoleillement varie aussi vite, il peut y avoir des erreurs de mesures sur sa valeur. Et pour pouvoir utiliser la valeur d'irradiation directe avec une marge d'erreur réduite, nous avons subdivisé le profil d'ensoleillement en petits rectangles lesquels ont des surfaces équivalentes à des énergies incidentes délivrées par notre prototype en appliquant l'équation  $\dot{Q}_{réf} = I_s \times A_{réf} \int dt$ . Cette équation nous aide, après avoir évaluée la somme de ces énergies, à déterminer l'énergie reçue à l'absorbeur du côté du réflecteur par la formule  $\dot{Q}_{réc1} = n_{opt} \times \dot{Q}_{réf}$ . Ceci nous permet de le rendement du concentrateur en appliquant:  $\sigma_{réc} = \dot{Q}_{réc2} / \dot{Q}_{réc1}$ . Ces résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Récapitulatif des grandeurs calculées

	$m_e$ Kg	$m_{vap}$ (%)	$m_{vap}$ (Kg)	Durée	$\dot{m}_{vap}$ mg/s	$\dot{Q}_{réf}$ (KJ)	$\dot{Q}_{réC1}$ (KJ)	$\dot{Q}_U$ (KJ)	$\dot{Q}_P$ (KJ)	$\dot{Q}_{réC2}$ (KJ)	$\sigma_{réC}$ (%)
Exp1	2	85	1,70	03H20	142	11747	10572	4430	1103	5533	52
Exp2	1	94	0,94	01H40	157	8426	7583	2418	659	3077	41
Exp3	2	86	1,72	02H40	179	17181	15463	4476	1945	6421	42
Exp4	2	54	1,08	02H50	106	7824	7042	3031	1122	4153	59
Exp5	2	85	1,68	03H20	140	12875	11588	4385	1714	6099	53
Exp6	1	96	0,75	01H30	139	6622	5960	1990	1157	3147	53
Exp7	1	75	0,96	01H30	178	7459	6713	2464	494	2958	44
Exp8	1	88	0,70	01H30	130	8857	7971	1877	710	2587	32
Exp9	1	77	0,77	01H00	214	5200	4680	2035	426	2461	53
Exp10	2	83	1,66	02H00	231	14875	13375	4340	971	5311	40
Exp11	1	78	0,78	01H00	217	4917	4425	2057	772	2829	64
Exp12	2	48	0,96	02H00	133	6738	6064	2760	1272	4032	66

## DISCUSSIONS ET ANALYSES

Dans cette partie nous allons parler de l'influence des paramètres tels que l'ensoleillement direct, le vent, la taille des récepteurs et leur couvercle sur nos différents résultats et finirons par une évaluation économique puis environnementale.

### 6.1. Influence des paramètres

#### 6.1.1. Influence de l'irradiation directe

Comme nous l'avons vue dans la partie présentation des résultats, l'évolution des températures de l'absorbeur et de l'eau dépend de l'ensoleillement direct. Nous citons en exemple, au début de certaines manipulations la température d'absorbeur qui est égale à celle de l'ambiance augmente quand nous réorientons la parabole vers le soleil. Cette croissance peut aussi chuter lorsqu'il y a un obstacle nuageux. Ce qui montre la variabilité de l'irradiation directe par rapport à la saison et l'heure du jour. Puisque nous produisons pendant une période pluvieuse, nous remarquons 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. Cette perte thermique pourra être limitée si le foyer est amélioré par un principe d'effet de serre.

#### 6.1.2. Influence du vent

Nous voyons également le passage du vent qui parfois accompagné par un temps orageux influence de manière significative sur notre production. Cela est constaté surtout sur la température de l'eau qui croît lentement lorsque la marmite est sans couvercle. Ceci peut être justifié par une observation des profils de l'ensoleillement direct et des températures en expérimentation 12. Alors, l'énergie qui était fournie pour élever la température de l'eau et ensuite contribuer à sa vaporisation est sans cesse emportée par un passage excessif du vent. Et comme nous l'avons déjà souligné ci-haut, les pertes thermiques pourraient être limitées si notre foyer était amélioré, et en ce qui concerne la hausse très lente de la température de l'eau, il serait intéressant de fermer la marmite.

#### 6.1.3. Influence du couvercle des récipients

Il s'agit là de comparer les débits massiques de chaque récipient pour les chauffages avec et sans couvercle pour une quantité d'eau identique.

#### **Petit récipient avec et sans couvercle**

Selon nos différentes mesures, à quelques minutes du chauffage sous l'influence d'une bonne irradiation, la température d'eau monte rapidement quand le récipient est avec couvercle. Mais, lorsque le récipient est sans couvercle, la température d'eau évolue lentement. Ceci nous permet de dire que le couvercle constitue en quelque sorte une barrière thermique en réduisant les pertes de chaleur du fait de renouvellement excessif d'air dans le récipient. Donc, il peut permettre à l'eau d'atteindre à un temps si peu la chaleur sensible et ensuite d'être en ébullition. Dans ce cas, l'utilisation du récipient avec couvercle peut justifier une bonne vaporisation. En effet, nous relevons respectivement pour **1 kg** et **2 kg** d'eau chauffées : **157 mg/s** (en exp2) et **142 mg/s** (en exp1) contre **139 mg/s** (en exp6) et **140 mg/s** (en exp5) quand celui-ci est sans couvercle.

#### **Grand récipient avec et sans couvercle**

Nous avons vu dans le cas du petit récipient lorsque le chauffage se fait sans couvercle, l'eau perd plus de chaleur et la vaporisation est moins bonne. Mais nous avons relevé pour le grand récipient une bonne vaporisation quand celui-ci est sans couvercle. Elle l'est de **178 mg/s** (en exp7) contre **130 mg/s** (en exp8) pour **1 kg** d'eau, et **179 mg/s** (en exp3) contre **106 mg/s** (en exp4) pour **2 kg** d'eau. Ces résultats sont contraires à la réalité car plus le récipient est sans couvercle plus l'eau perd de chaleur et ne peut pas être mieux vaporisé. Et comme nous avons constaté durant les expérimentations, par rapport à la taille, le grand récipient reçoit le rayon solaire global qu'absorbe l'eau directement à travers l'ouverture. Cette contribution d'énergie supplémentaire emporte donc sur les pertes thermiques, ce qui a pu favoriser une bonne vaporisation dans ce cas.

#### **6.1.4. Influence de la taille des récipients**

Il est question de faire la comparaison entre les productions des deux récipients pour le chauffage d'une quantité d'eau identique lorsqu'ils sont fermés et ensuite ouverts.

#### **Petit et Grand récipients fermés**

Durant nos expériences, nous avons observé la tâche du rayon solaire concentré, pour le grand récipient, beaucoup plus à l'absorbeur mais débordée sur la surface absorbante du petit récipient. Ceci veut dire que la chaleur ainsi concentrée contribue, pour le cas du petit récipient, à chauffer la partie vide et, dans ce cas, la vaporisation ne peut pas être bonne. Et comme dans le cas du grand récipient la cible est bien atteinte, la chaleur est supposée être transmise intégralement à l'eau. Cela suppose que la vaporisation peut être bonne dans ce cas.



En effet, les chauffages de **1 Kg** et **2 Kg** d'eau pour le récipient de petite taille donnent respectivement **157 mg/s** (en exp6) et **142 mg/s** (en exp1), tandis que le récipient de grande taille vaporise pour les mêmes quantités d'eau **130 mg/s** (en exp8) et **106 mg/s** (en exp4). Alors ces résultats démontrent que, plus le récipient est de grande taille et fermé plus grandes sont les pertes d'énergie par convection du fait de sa surface absorbante et celles absorbées par l'air par rapport à sa capacité. Donc il ne peut mieux vaporiser l'eau.

#### **Petit et grand récipient ouverts**

Comme nous l'avons déjà souligné dans le cas influence du couvercle, le grand récipient a reçu une énergie supplémentaire venant du rayonnement solaire global qu'absorbe l'eau et ne peut que donner une meilleure production. Ainsi, il produit pour les chauffages de **1 Kg** et **2 Kg** d'eau : **178 mg/s** (en exp2) et **179 mg/s** (exp3), par contre le petit récipient, pour les mêmes quantités d'eau, vaporise respectivement **139 mg/s** (en exp6) et **140 mg/s** (en exp5).

#### **6.1.5. Influence des méthodes de remplissage d'eau**

Pour ce qui est des méthodes de remplissage d'eau dans les récipients, nous tenons à souligner qu'avec la marmite de grande taille, il nous est impossible d'ouvrir et fermer en même temps lorsqu'elle se trouve dans le foyer. Ce qui fait que nous nous sommes limités dans le remplissage discontinu à produire sans couvercles. Ces productions seront comparées pour chacune des marmites ouvertes en remplissage continu pour les mêmes quantités d'eau chauffées.

#### **Petite marmite**

En tenant compte de la fluctuation d'irradiation et d'influence d'autre paramètre comme le vent, nous avons constaté durant les manipulations, avec une petite quantité d'eau (0,5kg) et malgré l'utilisation du récipient sans couvercle, la température d'eau monte rapidement quand l'irradiation est bonne. Par exemple en expérience 10, à 10 minutes du chauffage du début, lorsque l'irradiation directe passe environ de  $600 \text{ W/m}^2$  à  $620 \text{ W/m}^2$  la température d'eau est presque égale à celle d'ébullition ( $100^\circ\text{C}$  environ). Nous voyons là que la faible quantité d'eau favorise une absorption rapide de la chaleur et donc peut justifier une bonne vaporisation. Dans ce cas, pour les chauffages de **1 Kg** et **2 Kg** d'eau, nous relevons respectivement pour le remplissage discontinu **214 mg/s** (en exp9) et **231 mg/s** (en exp10) contre **139 mg/s** (en exp6) et **140 mg/s** (en exp5) pour le cas continu.

## Grande marmite

Cependant, le grand récipient pour 1 kg en discontinu vaporise 217 mg/s (en exp11) contre 178 mg/s (en exp7) en continu. Mais pour les 2 Kg d'eau, le continu produit 179 mg/s (en exp3) contre 133mg/s (en exp12). Par rapport à ce dernier cas, nous disons que malgré la forte perturbation d'irradiation directe, nous arrivons à une vaporisation de 133 mg/s. Donc nous pourrions conclure que le remplissage discontinu est la meilleure méthode car même à un temps très perturbé on peut obtenir une vaporisation aussi bonne.

### 6.1.6. Masse de vapeur optimale

Tableau 5 : Débit massique optimal

Expérience	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\dot{m}_{vap}$ (mg/s)	136	157	179	106	140	139	178	130	214	231	217	133
$\frac{\dot{m}_{vap}}{\dot{m}_{vapther}}$ (%)	52	59	68	40	53	52	67	49	81	87	82	50

Ce tableau nous permet de déduire que le débit massique optimal de notre concentrateur est égal à 87% de la valeur théorique, soit une production optimale égale à **231 mg/s** de masse de vapeur.

## 6.2. Analyses économique et environnementale

### 6.2.1. Analyse économique

Comme nous l'avons déjà souligné dans les objectifs de la manipulation, nous supposons que la vapeur est produite à base du fioul. Et pour évaluer l'apport du concentrateur solaire, nous allons calculer la masse de vapeur produite dans la chaudière en adoptant les hypothèses suivantes :

- La masse du fioul  $m_f = 1\text{Kg}$
  - Le Pouvoir Calorifique Interne du fioul  $\text{PCI} = 41 \text{ MJ/Kg}$
  - Le rendement de la chaudière  $\rho_{ch} = 80\%$
  - L'énergie qu'il faut pour pouvoir produire 1 Kg de vapeur  $E = 2,661 \text{ MJ}$  [15].
- L'énergie que dispose la chaudière est :

$$E_{ch} = \text{PCI} \times m_f \times \rho_{ch}$$

$$E_{ch} = 41 \times 1 \times 0,8 = 32 \text{ MJ}$$

- La masse de vapeur produite dans la chaudière vaut:

$$M_{vapch} = \frac{E_{ch}}{E} \times m_{vap}$$

$$M_{vapch} = 32 \times 1/2,661 \approx 12 \text{ Kg}$$

En considérant 1,66 Kg de vapeur produite par le concentrateur comme la capacité optimale, et en supposant que 1 Kg de fioul coût 0,92€, le prix d'achat du fioul évité (PAFE) est :

$$PAFE = \frac{m_{vapc}}{m_{vapch}} \times PAF$$

$$PAFE = 1,66 \times 0,92 / 12 \approx 0,127 \text{€ soit } \mathbf{83 \text{ FCFA}}$$

Nous signalons qu'un autre volet très important à ne pas ignorer est la gestion de l'environnement et allons s'appuyer sur le volet économique pour procéder à son évaluation.

### 6.2.2. Analyse environnementale

Pour évaluer l'impact environnemental de notre projet, nous allons considérer la même source d'énergie en analyse économique et citons comme l'inconvénient majeur pour sa consommation, la production de CO<sub>2</sub> (production de vapeur = production de CO<sub>2</sub>) rejeté dans l'atmosphère.

Nous supposons que 1 kg de fioul pour une production de 1 kWh d'électricité rejette environ 0,72 Kg de CO<sub>2</sub> [9].

→ En se référant à l'énergie fournie par le concentrateur pour la production de 1,66 Kg de vapeur, la masse de CO<sub>2</sub> évitée est :

$$m_{CO_2\text{év}} = \frac{E_{vapc}}{E_{elec}} \times m_{CO_2\text{rej}}$$

$$m_{CO_2\text{év}} = (4340 \times 0,72) / 3600 \approx 0,87 \text{ Kg de CO}_2$$

→ En prenant 10€ par tonne de CO<sub>2</sub> comme dans le cas des projets MDP (Mécanisme pour le Développement Propre), cette quantité de CO<sub>2</sub> économisée peut générer de gain de financement (GF) équivalent à :

$$GF = 0,87 \times 10 / 10^3 \approx 0,0087 \text{€ soit } \mathbf{5,69 \text{ FCFA.}}$$

Ce taux de CO<sub>2</sub> économisé pourrait générer d'énorme gain si la production est faite à grande échelle.

### RECOMMANDATIONS

Au regard des résultats expérimentaux, nous pensons que pour améliorer le système, il serait plus judicieux de prendre en compte les recommandations suivantes :

- ✓ Améliorer le système avec un dispositif en verre qui permettra d'emprisonner la chaleur absorbée ;
- ✓ Utiliser un récipient hermétiquement fermé avec un couvercle adéquat ;
- ✓ Utiliser un système mécanique de poursuite du soleil pour maximiser le rayonnement concentré à l'absorbeur.

## CONCLUSION GENERALE

Arrivé au terme de notre recherche, il faut noter que l'utilisation de la parabole pour la production de vapeur, prend de plus en plus ampleur en raison des besoins croissant en énergie dans le monde et constitue une solution écologique à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles dont le prix ne cesse d'augmenter. De plus, il peut constituer, une solution très intéressante pour des pays qui ont un potentiel d'ensoleillement non négligeable. Egalement, ce procédé qui s'inscrit dans la technique de dessalement d'eau de mer peut représenter une véritable source d'approvisionnement d'eau douce pour des régions à stress hydrique. Mais son utilisation est souvent confrontée à un problème d'adaptation aux conditions climatiques. C'est la raison pour laquelle son application nécessite une étude préalable de l'influence des paramètres qui engendrent des pertes thermiques entre le collecteur et le récepteur.

En fait, notre travail consistait à produire la vapeur à partir d'un concentrateur solaire parabolique en vue de son optimisation. Nous avons proposé pour notre système (ensemble capteur et récepteur) un modèle expérimental à partir duquel nous avons fixé comme paramètres : l'ensoleillement, le vent, la taille des récipients, le couvercle des récipients et le remplissage d'eau. A la suite des expérimentations, les résultats obtenus nous ont montrés qu'avec un débit massique d'eau égal à  $2,77 \cdot 10^{-4}$  Kg/s, notre concentrateur peut vaporiser un débit massique de vapeur équivalente à 231 mg/s. Nous estimons ce résultat satisfaisant pour notre expérience. Egalement, il ressort des analyses de l'influence des paramètres qu'il était possible de faire fonctionner le concentrateur d'une manière optimale en utilisant un récipient de petite taille avec couvercle et contenant une quantité d'eau modérée (0,5 Kg). Toutes fois, l'amélioration du foyer par le principe d'effet de serre permettra de limiter les pertes thermiques occasionnées par l'augmentation de la vitesse du vent et la baisse d'ensoleillement direct, et renforcera la performance du système.

L'étude financière abordée dans ce document nous a montré que notre système est économiquement rentable car la matière première (soleil) utilisée nécessite pas un investissement et a un impact positif sur l'environnement (réduction de la coupe abusive du bois et de l'émission du CO<sub>2</sub>).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **VISSMAN** Brochure technique [en ligne]. France : les chaudières à vapeur, 2008.
- [2] **Vapeur d'eau Wikipédia**, encyclopédie libre.
- [3] **R. Positello** La vapeur d'eau industrielle Connaissance. Production Etude des tuyauteries de distribution [Livre], Août 1983.P
- [4] **Christophe Alleau**, Enseignant de BTS CIRA Lycée pilote Innovant, Chaudières à vapeur à combustible, Edition 2007.
- [5] <http://www.energiepositive.info/fr/pourquoi/energies-fossiles.html>
- [6] <http://www.france-energie-solaire.info/energie-solaire.html>
- [7] **M. Audibert**, La concentration du rayonnement solaire. International center for theoricol physics, 3<sup>e</sup> séminaire sur l'énergie solaire, 6-17 Septembre 1983.
- [8] **QUOLIN Sylvain** Centrales solaires à concentration. Université de Liège- Faculté des sciences appliquées – 2007.
- [9] **ABDELKARIM BOURAS** Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire Université Mentouri constantine Faculté des science exactes departement de physique-2007.
- [10] **TIADJOUÉ Benjamin**, Dessalement d'eau de mer par procédé solaire à concentration. Master en ingénierie énergie et génie des procédés industriels, 2iE, 16 Juin 2010, 58-63 P.
- [11] **Dr. Y. AZOUMAH**, Solaire thermique, 2009-2010, 37-40 P.
- [12] **Pr. Y. COULIBALY**, Thermodynamique et transfert thermique, ETHER-EIER, Juin 1987, 108 P.
- [13] **N.M. Bahadori**, Design of solar autoclave. Solar Energy, Vol.18, pp. 489- 496. Pergamon press 1976.
- [14] **David Faiman**, Solar thermal Collectors. Introduction to solar energy .*lecture 5 version 3.1 2003*.
- [15] [http://jean.boubour.pagesperso-orange.fr/c\\_Docu/Chap6.pdf](http://jean.boubour.pagesperso-orange.fr/c_Docu/Chap6.pdf)

ANNEXES

ANNEXE 1 : Calculs de puissance du récepteur et du débit massique théorique..... I  
ANNEXE 2 : DONNEES DE MESURES ..... 7

**ANNEXE 1 : Calculs de puissance du récepteur et du débit massique théorique**

**Calcul de puissance du récepteur**

Comme le montre nos modèles, nous allons calculer la puissance reçue par nos marmites suivant deux méthodes afin d'évaluer l'écart entre ce qui a été envoyée et celle réellement reçue. Ceci nous permettra de déterminer la plage d'énergie que peut apporter notre concentrateur à l'absorbeur et d'autre part d'envisager des solutions par rapport aux pertes.

**Méthode 1 :**

Nous évaluons cette puissance en se situant entre la parabole et la marmite. Elle est donnée par la relation suivante [11] :

$$Q_{réc1} = \eta_{opt} * Q_{réf} \tag{3-1}$$

$Q_{réf}$  : Puissance reçue à l'ouverture du collecteur parabolique

$$Q_{réf} = I_s * A_{réf} \tag{3-2}$$

L'équation (3-1) devient :

$$Q_{réc1} = \eta_{opt} * I_s * A_{réf} \tag{3-3}$$

$\eta_{opt}$  : Rendement optique du concentrateur

$I_s$  : Irradiation solaire incidente arrivant à la surface du réflecteur

$A_{réf}$  : Surface du réflecteur

**Méthode 2 :**

Si nous considérons le système eau marmite, d'après les dispositifs expérimentaux, le bilan de puissance est :

$$Q_u + Q_{air} = Q_{réc2} - Q_p \tag{3-4}$$

Alors :

$$Q_{réc2} = Q_u + Q_{air} + Q_p \tag{3-5}$$

$Q_u$  : Puissance utile ou absorbée par l'eau

$Q_p$  : Puissance perdue

$Q_{air}$  : Puissance absorbée par l'air dans la marmite

Nous observons que lorsque le rayonnement solaire se concentre sur la surface absorbante, il se transmet par conduction de l'extérieur vers l'intérieur du récipient puis à l'eau. Ce qui permet l'élévation de sa température et ensuite sa vaporisation. La puissance reçue par cette dernière s'écrit :

$$Q_u = [m_e * c_{pe} * \Delta T + m_{vap} * L_{vap}] / T \quad (3-6)$$

$T_i$  : température initiale de l'eau

$T_f$  : température finale de l'eau

$\Delta T = T_f - T_i$

$c_{pe}$  : Chaleur massique de l'eau

$L_{vap}$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau

$t$  : Durée du chauffage

Mais une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, elle relève sa température au-dessus de la température ambiante. Cette variation de température provoque un processus des pertes de chaleur par convection, par rayonnement et par conduction. La puissance correspondante est donnée par l'expression suivante [11]:

$$Q_p = Q_{conv} + Q_{cond} + Q_{ray} \quad (3-7)$$

✓ Les pertes par convection est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Elles sont proportionnelles à la surface captatrice de l'absorbeur et la différence de température entre l'ambiant et la surface captatrice. Ces pertes sont données par la relation :

$$Q_{conv} = h_{conv} * A_{réc} * (T_{réc} - T_{amb}) \quad (3-8)$$

$T_{réc}$  : Température du récepteur

$T_{amb}$  : Température ambiante

$h_{conv}$  : Coefficient de transfert par convection naturelle est donné par [12] :

$$h_{conv} = (1,141 + \frac{0,0843}{R}) * (T_{réc} - T_{amb})^{(0,233)} \quad (3-9)$$

✓ Les pertes par rayonnement dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur. On l'écrit sous la forme [11]:

$$Q_{ray} = A_{réc} h_{ray} (T_{réc} - T_{amb}) \quad (3-10)$$

Le coefficient de rayonnement est [14] :



$$h_{ray} = \varepsilon \sigma \frac{T_{réc}^4 - T_{amb}^4}{T_{réc} - T_{amb}} = 4\varepsilon \sigma T^3 \left[ 1 - \left( \frac{\Delta T}{2T} \right)^2 \right] \quad (3-11)$$

✓ Les pertes par conduction sont liées à la nature du matériel utilisé. Elles sont habituellement petites par rapport aux pertes par convection ou par rayonnement. Dans la plupart des cas on peut les combiner avec les pertes par convection. Elles sont données par la relation suivante [11]:

$$Q_{cond} = \lambda_{réc} e A_{réc} (T_{réc} - T_{amb}) \quad (3-12)$$

e : Epaisseur de l'absorbeur

$\lambda_{réc}$  : Conductivité du récepteur

– Nous ajoutons à ces pertes, la puissance absorbée par l'air dans la marmite :

$$Q_{air} = [m_a * C_{pa} * (T_{eau} - T_{amb})] / t \quad (3-13)$$

$m_a$  : Masse de l'air dans la marmite

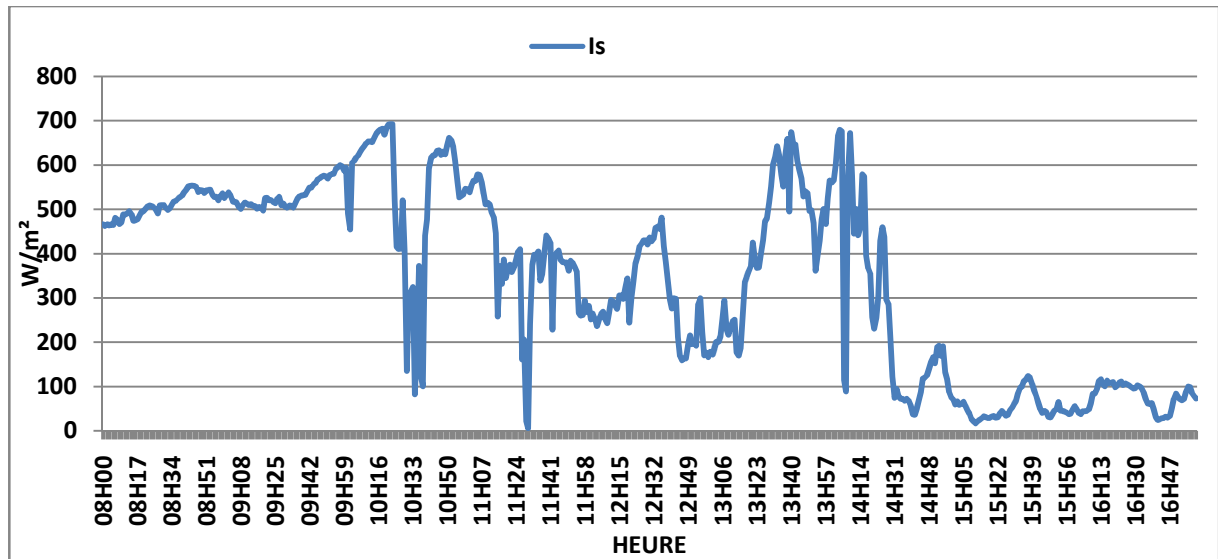
$C_{pa}$  : Chaleur massique de l'air

Enfin, nous déduisons des équations (3-3) et (3-5) le rapport des puissances à l'absorbeur :

$$\sigma_{réc} = \frac{Q_{réc2}}{Q_{réc1}} \quad (3-14)$$

#### Calcul du débit massique théorique

L'irradiation directe du 04/06/2011 enregistrée à partir de 08H00 à 17H00.



L'irradiation moyenne directe entre 08H00 et 13H00 vaut:

$$I_s = 400 \text{ W/m}^2$$

- Calcul de la puissance du réflecteur

$$Q_{\text{réf}} = I_s \times A_{\text{réf}}$$

Application numérique :  $Q_{\text{réf}} = 400 \times 3,14 \approx 1256 \text{ W}$

- Calcul de la puissance du récepteur

$$Q_{\text{réc}} = \eta_{\text{opt}} \times Q_{\text{réf}}$$

Application numérique :  $Q_{\text{réc}} = 0,9 \times 1256 \approx 1130 \text{ W}$

- Calcul de la puissance due aux pertes

$$Q_p = 40\% \times Q_{\text{réc}}$$

Application numérique :  $Q_p = 0,4 \times 1130 \approx 452 \text{ W}$

- Calcul de la puissance utile

$$Q_u = Q_{\text{réc}} - Q_p$$

Application numérique :  $Q_u = 1130 - 452 \approx 678 \text{ W}$

**Calcul du débit massique de vapeur produite pour le chauffage de 1 Kg d'eau pendant 1Heure.**

La masse de vapeur d'eau produite est :

$$m_{\text{vap}} = \frac{\dot{Q}_U - Q_S}{L_{\text{vap}}}$$

- Calcul de l'énergie utile

$$\dot{Q}_U = Q_U \times t$$

Applications numériques :

$$t = 1\text{H} = 3600\text{s}$$

$$Q_U = 678 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_U = 678 \times 3600 \approx 2441 \text{ KJ}$$

- Calcul de la chaleur sensible

$$Q_S = m_e \times C_{pe} \times \Delta T$$

Applications numériques:

$$m_e = 1 \text{ Kg}$$

$$C_{pe} = 4,18 \text{ KJ/Kg/}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_{ef} - T_{ei} = 100 - 29 = 71^\circ\text{C}$$

$$Q_s = 1 \times 4,18 \times (100 - 29) \approx 297 \text{ KJ}$$

D'où la masse de vapeur est égale:

$$\text{Application numérique: } m_{vap} = (2441 - 297) / 2257 \approx 0,95 \text{ Kg}$$

**Le débit massique pour 1 Kg d'eau vaut :**

$$\dot{m}_{vap} = \frac{m_{vap}}{t}$$

$$\text{Application numérique: } \dot{m}_{vap} = 0,95 / 3600 \approx 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/s}$$

$$\text{Soit } \dot{m}_{vap} \approx 264 \text{ mg/s}$$

**Calcul du débit massique de vapeur produite pour le chauffage de 2 Kg d'eau pendant 2Heures.**

La masse de vapeur d'eau produite est :

$$m_{vap} = \frac{\dot{Q}_U - Q_s}{L_{vap}}$$

– Calcul de l'énergie utile

$$\dot{Q}_U = Q_U \times t$$

Applications numériques :

$$t = 2\text{H} = 7200\text{s}$$

$$Q_U = 678 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_U = 678 \times 7200 \approx 4882 \text{ KJ}$$

– Calcul de la chaleur sensible

$$Q_s = m_e \times C_{pe} \times \Delta T$$

Applications numériques:

$$m_e = 2 \text{ Kg}$$

$$C_{pe} = 4,18 \text{ KJ/Kg/}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_{ef} - T_{ei} = 100 - 29 = 71^\circ\text{C}$$

$$Q_s = 2 \times 4,18 \times 71 \approx 594 \text{ KJ}$$

D'où la masse de vapeur est égale:

Applications numériques:

$$L_{vap} = 2257 \text{ KJ/Kg}$$

$$m_{vap} = (2441 - 297) / 2257 \approx 1,90 \text{ Kg}$$

Le débit massique pour 2 Kg d'eau vaut :

$$\dot{m}_{vap} = \frac{m_{vap}}{t}$$

Application numérique:  $\dot{m}_{vap} = 1,90 / 7200 \approx 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/s}$

$$\text{Soit } \dot{m}_{vap} \approx 264 \text{ mg/s}$$

## Production de vapeur à partir d'un concentrateur solaire parabolique

### ANNEXE 2 : DONNEES DE MESURES

EXPERIENCE 1					EXPERIENCE 2					EXPERIENCE 3					EXPERIENCE 4				
Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )
08H30	31,4	31,4	29,3	552	10H55	31,4	57,3	29,4	475	08H35	31,4	31,4	29,4	482	08H25	27,2	27,2	29	136
08H35	31,1	103,3	48,1	561	11H00	32,6	103,6	74	476	08H40	31,3	113	45,4	493	08H30	26,6	34,6	32,1	38
08H40	31,8	104,3	62,9	569	11H05	32,8	110,4	90	482	08H45	31,2	115	54	492	08H35	27,4	36,7	34,4	9
08H45	31,8	126,9	78,3	588	11H10	31,9	132,3	99,2	482	08H50	31,4	110,7	55,9	505	08H40	28,9	43,6	38,4	56
08H50	31,8	122,6	88,2	607	11H15	33,7	120,1	98,8	480	08H55	31,9	113,5	56,8	510	08H45	28,9	49,9	46,3	139
08H55	31,9	129,9	92,8	614	11H20	34,1	104,3	99	475	09H00	31,7	110	57,8	523	08H50	28,6	50,7	43,9	36
09H00	31,8	135,5	94,4	622	11H25	33,5	116,9	97,5	475	09H05	31,9	111,4	61,3	527	08H55	28,7	53,6	44	87
09H05	31,8	144,3	95,1	624	11H30	34,2	106,7	96,5	470	09H10	32,9	128,9	64,6	546	09H00	29,3	70	44,2	136
09H10	31,3	162,3	98,2	634	11H35	34,1	104,2	97,3	384	09H15	32	132	67,9	557	09H05	30	111	67,1	414
09H15	31,8	124,5	98,7	648	11H40	35,3	104,2	97,8	437	09H20	32,4	120,1	70	563	09H10	29,6	117	76,8	419
09H20	31,4	114,8	99,3	649	11H45	34,6	101,7	97,2	448	09H25	32,3	117	70,7	570	09H15	29,2	125	85,4	440
09H25	31,9	141,7	99,4	660	11H50	35,5	103,9	98,6	475	09H30	32,8	119	72,3	577	09H20	29,2	115,6	86,6	325
09H30	31,8	128,8	99,5	667	11H55	36,1	111,2	99	487	09H35	32,9	130	75	584	09H25	29,5	85,6	84,5	88
09H35	32	142,3	99,6	672	12H00	35,8	109,5	98,8	482	09H40	33,3	128	75,9	587	09H30	28,9	83,3	82,9	32
09H40	32,8	134,1	99,3	673	12H05	34,4	114,5	97,5	480	09H45	32,7	139	78,9	594	09H35	29,2	101	88	386
09H45	32,4	144,2	99,6	684	12H10	35,4	122,2	98,7	485	09H50	33,3	142	83	603	09H40	30	104,8	94,6	527
09H50	32,8	180,8	99,5	685	12H15	34,5	112,5	99	480	09H55	33,1	124	85	608	09H45	30,7	101,6	96,8	318
09H55	33,3	159,1	99,4	678	12H20	35,3	115,1	107,3	483	10H00	33,8	123	86,7	615	09H50	29,2	107,7	98,9	337
10H00	33,1	140,2	99,3	693	12H25	34,1	116,3	111,3	488	10H05	33,9	110,6	86	618	09H55	29,2	107	99,5	349
10H05	32,7	144,2	99,2	670	12H30	34,5	105,7	101,8	488	10H10	33,8	109,8	86,7	624	10H00	29,9	113	100	535
10H10	33,7	165,9	99,4	676	12H35	34	105,3	125,6	486	10H15	33,4	110	86,7	629	10H05	28,8	118,2	100	554
10H15	34	159,4	99,5	290						10H20	34	107,8	87,6	630	10H10	29,7	115,1	100	528
10H20	32,9	120	99,6	653						10H25	34,4	115,7	89,8	634	10H15	29,3	114,8	99,6	549
10H25	32,6	163,4	100,4	636						10H30	34,2	119,9	95	636	10H20	29,4	116,3	99,6	560
10H30	33	151,2	100,1	567						10H35	33,3	114	97,7	635	10H25	30,4	119,1	99,6	552
10H35	32,6	85,5	99,3	679						10H40	33,4	140,5	99,1	634	10H30	30,7	120,4	99,9	588
10H40	32,7	162,2	99,7	662						10H45	34,4	101,7	98,7	637	10H35	30,1	117	99,6	597
10H45	34,2	172,2	100,3	701						10H50	34,6	99,8	98,7	634	10H40	31,8	122,9	99,5	605
10H50	32,2	122,9	100	700						10H55	33,2	113,2	99	634	10H45	32,1	125,5	99,5	623
10H55	32,8	152,3	100,3	701						11H00	34,3	111,2	99	636	10H50	31	125,7	99,7	621
11H00	33,3	185	99,7	646						11H05	33,5	128,5	99,2	637	10H55	32	126,7	99,8	619
11H05	33,7	166,4	100,5	689						11H10	34,7	116,8	99,6	640	11H00	32	124,4	99,5	622
11H10	33,1	123,9	100,5	239						11H15	35,7	128,1	99,6	640	11H05	31,2	126,4	99,7	589
11H15	33,4	151,9	100,5	615											11H10	32,2	116,7	99,9	527
11H20	35,1	153,6	100,5	704											11H15	32,2	124,2	99,9	600
11H25	34,2	152,3	99,6	683															
11H30	34	75,5	99,9	695															
11H35	33,1	107,7	99,1	668															
11H40	33,1	108,7	99,6	665															
11H45	33,3	82,6	92,8	324															
11H50	32,6	54,2	91,7	323															

Production de vapeur à partir d'un concentrateur solaire parabolique

EXPERIENCE 5					EXPERIENCE 6					EXPERIENCE 7					EXPERIENCE 8				
Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )
08H25	30,1	30,1	29,1	529	08H50	30,5	30,5	29	447	09H00	30,2	30,2	29,3	468	09H10	30,1	30,1	30	604
08H30	29,5	158,5	47,2	542	08H55	31,6	94,9	50,1	465	09H05	29,8	130,7	46	479	09H15	29,7	86,1	61,2	497
08H35	29,29	115,4	67,2	538	09H00	31,5	114,1	53,1	460	09H10	29,2	128,5	57,2	486	09H20	29,6	90	76,7	529
08H40	29,3	110,8	71,2	390	09H05	31,4	105,4	55,3	420	09H15	29,2	114,5	65,3	499	09H25	29,8	119,5	90	601
08H45	29,3	78,3	69,8	43	09H10	32,4	105,8	55,2	419	09H20	29,6	123,3	68,9	494	09H30	29,2	104,3	92,6	595
08H50	29,2	70,7	67,1	115	09H15	31,9	106,5	53,1	372	09H25	30	111,7	73,5	501	09H35	29,9	120	98,4	623
08H55	28,4	65,5	62,8	52	09H20	32,2	117,6	69,5	445	09H30	30,3	118,9	98,9	503	09H40	29,4	110,5	93,2	601
09H00	29,3	86,4	61,7	336	09H25	31,8	117	69,8	463	09H35	30,3	135,4	98,9	506	09H45	30,2	108,4	95,4	589
09H05	29,9	82,4	61,1	11	09H30	31,5	128,9	72	537	09H40	31,2	121	98,9	508	09H50	30,5	107,8	95,1	550
09H10	29,8	100,9	70,4	595	09H35	31,9	140,7	72,8	576	09H45	31	130,3	99	519	09H55	30,2	110,6	94	603
09H15	30,9	123,5	78,2	596	09H40	31,7	149	82,7	575	10H00	30,9	122	99	516	10H00	31,2	108,8	94,1	631
09H20	30,2	123,4	83,3	594	09H45	32,4	145	98,8	562	10H05	30	117,8	99,1	520	10H05	31,7	110	96,3	627
09H25	31	121,3	84,8	617	09H50	30,7	142,4	98,8	572	10H10	30,8	133,3	98,9	512	10H10	30,6	109,4	97,6	595
09H30	31,4	130,6	90	579	09H55	33,9	134,6	98,7	551	10H15	30,2	115,5	98,7	516	10H15	30,6	110,6	98,3	631
09H35	30,6	126,5	88,6	620	10H00	33,1	143,9	98,9	610	10H20	31	114,8	98,7	481	10H20	30,1	104,5	98,1	609
09H40	31,2	131,8	90	613	10H05	33	158	99	618	10H25	31,3	120	98,9	541	10H25	30,7	117,3	98,7	617
09H45	31	136,5	91,3	632	10H10	32	144,5	99	622	10H30	32	120,9	98,4	518	10H30	32,1	115,7	99,2	651
09H50	32	140,3	92	635	10H15	33	149	98,9	620	10H35	32	120,9	98,4	518	10H35	31,4	127,2	99,5	674
09H55	32,4	138,9	91,8	638	10H20	33,4	146,5	98,9	583	10H40	33	132,6	99,8	541	10H40	32,2	128,8	99,6	686
10H00	31,7	126,8	89,3	629															
10H05	32,1	133,6	90,9	654															
10H10	31,5	90,2	86,2	141															
10H15	33	137,1	87,3	501															
10H20	34	134,2	85,8	648															
10H25	32,5	143,3	87,5	631															
10H30	32,4	111,7	84,5	662															
10H35	31,7	92,5	75,7	315															
10H40	32,6	137,1	82,3	638															
10H45	33	126,5	90,5	618															
10H50	32,4	95,9	87,4	391															
10H55	32,6	118,2	84	398															
11H00	32,4	109,3	84,8	287															
11H05	32,4	103,6	81,7	352															
11H10	32,9	123,7	87,8	639															
11H15	33,2	125,5	93,3	678															
11H20	33,1	122,3	92,4	686															
11H25	33,3	120,8	94,4	691															
11H30	32,9	112,6	91,6	675															
11H35	32,9	124,6	93,6	671															
11H40	33,3	129,4	93,9	670															
11H45	32,4	102,8	86,7	394															

## Production de vapeur à partir d'un concentrateur solaire parabolique

EXPERIENCE 9					EXPERIENCE 10					EXPERIENCE 11					EXPERIENCE 12				
Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )	Tps	T <sub>amb</sub> (°C)	T <sub>abs</sub> (°C)	T <sub>eau</sub> (°C)	Is (W/m <sup>2</sup> )
08H55	31,4	31,4	29,7	537	08H45	28,8	28,8	29,4	591	09H15	32	32	30	572	09H30	30,8	30,8	28,8	658
09H00	31	132,9	68,9	523	08H50	30,3	111,12	65,5	601	09H20	31,1	129,9	72,2	558	09H35	30,1	95,4	57,6	666
09H05	31,5	135	79,7	540	08H55	29,8	135,8	91,8	608	09H25	32,4	142	83	617	09H40	29,6	67,2	52,3	278
09H10	30,9	132,3	86,8	531	09H00	30,5	134,9	95,2	621	09H30	32,2	138,7	88,1	627	09H45	28,5	117,7	48,7	173
09H15	31,6	132,2	94,3	531	09H05	30	136	95,2	628	09H35	32	143,9	93,5	654	09H50	29,8	112,3	42,2	2
09H20	31,8	123,4	98,6	551	09H10	30,4	134,1	94,6	636	09H40	32,7	142,5	95,2	667	09H55	29,4	64,2	41,2	1
09H25	31,6	128,9	98,6	551	09H15	30,6	132,1	99,7	651	09H45	31,9	146	99,8	684	10H00	29,8	115,2	56,9	393
09H30	31,7	123,5	90,6	567	09H20	30,5	125,1	88,8	661	09H50	33	125,5	74	692	10H05	29,1	90,1	46,4	591
09H35	32,1	119,8	98,4	566	09H25	30,7	122,8	95	665	09H55	32,9	146	88	697	10H10	29,1	109,7	69,7	131
09H40	31,5	127,3	98,4	569	09H30	30,5	129	96,8	688	10H00	32,9	130,3	90,9	323	10H15	29,9	69,3	86,6	706
09H45	30	127,1	98,6	572	09H35	30,8	135	96,8	676	10H05	33,8	122,4	95,3	718	10H20	30,9	128,4	97,7	639
09H50	32,2	117,9	98,7	568	09H40	30,9	135,1	97	681	10H10	33	142	95,8	717	10H25	29	117,6	96,8	477
09H55	32,2	127,5	98,7	578	09H45	31,2	132,2	97,7	683	10H15	33	146	99,7	730	10H30	30,3	94,7	90	86
					09H50	31,4	131,3	98,4	685						10H35	30,7	140	78,9	717
					09H55	31,3	131,8	99,2	688						10H40	30,1	138	95	721
					10H00	31,2	139,4	99,8	694						10H45	30,2	127	95,8	536
					10H05	32,2	136,7	99,7	696						10H50	30,2	56	89	6
					10H10	32	132,2	98,7	700						10H55	30	138,9	93	735
					10H15	31,6	134,9	98,7	701						11H00	30,4	65,6	91	296
					10H20	32,1	137	81,6	702						11H05	30,9	95,8	91	154
					10H25	32,1	135,5	90,6	701						11H10	30,2	125,2	93	709
					10H30	32,2	131,1	97,2	701						11H15	31,8	118,9	95,7	644
					10H35	33,6	139	97,7	703						11H20	30,6	127	97	723
					10H40	32,4	135	98,6	705						11H25	31,3	75	91	19
					10H45	32,2	131	98,4	705						11H30	32,8	147,2	94,4	745