Université Kasdi Merbah Ouargla

FACULTE DES SCIENCES
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

N° d'ordre : 8 / 114
N° de série :

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Physique
Option : Physique énergétique

Présenté par :
Souad Babay

Thème

CONTRIBUTION A L'AMELIORATION ET AU DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE DE LA DISTILLATION SOLAIRE SOUS SERRE DANS LA REGION DE OUARGLA

Soutenu publiquement le : 21 / 05/ 2008
Devant le jury composé de :

Mr.	M. T. Mefteh	Professeur	Université de Ouargla	Président
Mr.	B. Bouchekima	Professeur	Université de Ouargla	Examinateur
Mr.	H. Ben Moussa	Professeur	Université de Batna	Examinateur
Mr.	H. Bouguettaia	Maître de Conférences	Université de Ouargla	Rapporteur
Mr.	Dj. Bechki	M.A. chargé de cours	Université de Ouargla	Co-rapporteur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A celle qui porte un cœur plein de tendresse et d'amour, à ma chère mère.

A celui qui a éclaire le chemin de ma vie, à mon cher père.

Et à ma deuxième mère.

A l'âme de mon chér frère Nour Eddine.

A touts mes frères et sœurs et leurs enfants.

A toute ma famille.

A toutes mes chères amies et camarades.

Souad

Remerciements

Tous les travaux de ce mémoire ont été effectues au niveau de l'unité de recherche du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) de la faculté des sciences et sciences d'ingénieur de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

Je remercie Dieu d'avoir pu réaliser ce modeste travail.

J'exprime tous mes remerciements d'abord à mes encadreurs; Mr. Hamza Bouguettaia maître de conférences à l'université Kasdi Merbah Ouargla et Mr. Djamel Bechki maitre assistant chargé de cours à l'université Kasdi Merbah Ouargla pour tous leurs efforts, leurs soigneux conseils et tout leur soutien moral et physique dont j'avait besoin. Je les remercie beaucoup pour leur patience et tout le temps qu'ils m'ont consacré, en leur souhaitant une vie de prospérité et de sérénité.

Je tiens à remercier Mr. M.T. Meftah professeur à l'université d'Ouargla qui m'a fait honneur d'accepter de présider le jury.

Je remercie Mr. B. Bouchekima professeur à l'université d'Ouargla qui m'à fait honneur en acceptant de participer à ce jury pour son aide et ses encouragements.

Je remercie Mr. H. Ben Moussa professeur à l'université de Batna qui m'à fait l'honneur en acceptant de participer à ce jury.

Je remercie également Messieurs: S. Boughali, R. Bouannane, A. Doubi, , Y. Babi, D. Mennouche, M. Tekha, H. Mohcen pour leur encouragements.

Je remercie aussi Mr. Houti Ahmed le technicien du laboratoire du physique pour ne pas s'être attardé à me donner conseil et aide surtout durant la realisation de la partie experimentale dans le cadre de ce memoire.

Un remerciement spécial aux professeurs du lycée Oubira Salah pour leurs appuies pendant mes années etudes secondaires et universitaires.

Je remercie tous mes collègues du laboratoire: Belhadj Mohamed Mustapha, Marif Yacine, Belachi Warda, Nadir Nadia et Mahdadi Roukia.

Sans oublier de remercier toutes les personnes qui m'ont aide de prés ou de loin (Documentations, réponses aux questionnaires, prière...)

Mes remerciements à tous les enseignants de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

Remerciements

Tous les travaux de ce mémoire ont été effectues au niveau de l'unité de recherche du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) de la faculté des sciences et sciences d'ingénieur de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

Je remercie Dieu d'avoir pu réaliser ce modeste travail.

J'exprime tous mes remerciements d'abord à mes encadreurs; Mr. Hamza Bouguettaia maître de conférences à l'université Kasdi Merbah Ouargla et Mr. Djamel Bechki maitre assistant chargé de cours à l'université Kasdi Merbah Ouargla pour tous leurs efforts, leurs soigneux conseils et tout leur soutien moral et physique dont j'avait besoin. Je les remercie beaucoup pour leur patience et tout le temps qu'ils m'ont consacré, en leur souhaitant une vie de prospérité et de sérénité.

Je tiens à remercier Mr. M.T. Meftah professeur à l'université d'Ouargla qui m'a fait honneur d'accepter de présider le jury.

Je remercie Mr. B. Bouchekima professeur à l'université d'Ouargla qui m'à fait honneur en acceptant de participer à ce jury pour son aide et ses encouragements.

Je remercie Mr. H. Ben Moussa professeur à l'université de Batna qui m'à fait l'honneur en acceptant de participer à ce jury.

Je remercie également Messieurs: S. Boughali, R. Bouannane, A. Doubi, , Y. Babi, D. Mennouche, M. Tekha, H. Mohcen pour leur encouragements.

Je remercie aussi Mr. Houti Ahmed le technicien du laboratoire du physique pour ne pas s'être attardé à me donner conseil et aide surtout durant la realisation de la partie experimentale dans le cadre de ce memoire.

Un remerciement spécial aux professeurs du lycée Oubira Salah pour leurs appuies pendant mes années etudes secondaires et universitaires.

Je remercie tous mes collègues du laboratoire: Belhadj Mohamed Mustapha, Marif Yacine, Belachi Warda, Nadir Nadia et Mahdadi Roukia.

Sans oublier de remercier toutes les personnes qui m'ont aide de prés ou de loin (Documentations, réponses aux questionnaires, prière...)

Mes remerciements à tous les enseignants de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

Remerciements

Tous les travaux de ce mémoire ont été effectues au niveau de l'unité de recherche du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) de la faculté des sciences et sciences d'ingénieur de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

Je remercie Dieu d'avoir pu réaliser ce modeste travail.

J'exprime tous mes remerciements d'abord à mes encadreurs; Mr. Hamza Bouguettaia maître de conférences à l'université Kasdi Merbah Ouargla et Mr. Djamel Bechki maitre assistant chargé de cours à l'université Kasdi Merbah Ouargla pour tous leurs efforts, leurs soigneux conseils et tout leur soutien moral et physique dont j'avait besoin. Je les remercie beaucoup pour leur patience et tout le temps qu'ils m'ont consacré, en leur souhaitant une vie de prospérité et de sérénité.

Je tiens à remercier Mr. M.T. Meftah professeur à l'université d'Ouargla qui m'a fait honneur d'accepter de présider le jury.

Je remercie Mr. B. Bouchekima professeur à l'université d'Ouargla qui m'à fait honneur en acceptant de participer à ce jury pour son aide et ses encouragements.

Je remercie Mr. H. Ben Moussa professeur à l'université de Batna qui m'à fait l'honneur en acceptant de participer à ce jury.

Je remercie également Messieurs: S. Boughali, R. Bouannane, A. Doubi, , Y. Babi, D. Mennouche, M. Tekha, H. Mohcen pour leur encouragements.

Je remercie aussi Mr. Houti Ahmed le technicien du laboratoire du physique pour ne pas s'être attardé à me donner conseil et aide surtout durant la realisation de la partie experimentale dans le cadre de ce memoire.

Un remerciement spécial aux professeurs du lycée Oubira Salah pour leurs appuies pendant mes années etudes secondaires et universitaires.

Je remercie tous mes collègues du laboratoire: Belhadj Mohamed Mustapha, Marif Yacine, Belachi Warda, Nadir Nadia et Mahdadi Roukia.

Sans oublier de remercier toutes les personnes qui m'ont aide de prés ou de loin (Documentations, réponses aux questionnaires, prière...)

Mes remerciements à tous les enseignants de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

	Nomenclature	Unité
a	Azimut	$(^0)$
C	Correction de distance terre-soleil.	(UA)
C	Concentration.	
C_p	Chaleur spécifique à pression constante.	$(J/Kg.K)$
d	Rayonnement solaire direct.	(W/m^2)
d_0	Durée du jour.	(h)
$d(n)$	Distance entre la terre et le soleil.	
D	Rayonnement solaire diffus.	(W/m^2)
e	Epaisseur de la vitre.	(m)
E_t	Correction du temps.	$(\text{min}ute)$
g	Accélération de la pesanteur.	(m/s^2)
G	Rayonnement solaire global.	(W/m^2)
Gr	Nombre de Grashof.	
H	Enthalpie.	(J)
h	Hauteur angulaire.	$(°)$
h	Coefficient d'échange thermique.	$(W/m^2.K)$
i	Angle d'incidence du rayonnement solaire.	$(°)$
I_0	Constante solaire.	(W/m^2)
L_w	Chaleur latente de vaporisation.	(KJ/Kg)
m	Masse.	(Kg)
M	Masse moléculaire.	$(g/mole)$
m_d	Débit d'eau évaporée.	(Kg/s)
n	Nombre du jour dans l'année.	
Nu	Nombre de Nusselt	

P_{gi}	Pression partielle de la vapeur d'eau saturée a la température T_{gi}	(N/m^2)
Pr	Nombre de Prandtl.	
P_T	Pression totale du mélange.	(N/m^2)
P_w	Pression partielle de la vapeur d'eau saturée à la température T_w	(N/m^2)
Q	Densité du flux de chaleur.	(W/m^2)
r	Humidité absolue.	$\begin{pmatrix} Kg\ d'eau/Kg \\ d'air\ \text{sec} \end{pmatrix}$
Ra	Nombre de Rayleigh.	
Re	Nombre de Reynolds.	
S	Surface d'échange.	(m^2)
T	Facteur de trouble de Linke.	
T	Température.	$(°C, K)$
TL	Temps local.	(h)
TSM	Temps solaire moyen.	(h)
TSV	Temps solaire vrai.	(h)
TU	Temps universel.	(h)
V	Vitesse du vent.	(m/s)
V	Volume.	(m^3)
W	Degré de saturation.	
Z	Altitude.	(Km)

	Lettres grecques:	***Unité***
α	Coefficient d'absorption.	
α_t	Coefficient d'absorption effectif.	
β	Inclinaison de la vitre.	$(°)$
δ	Déclinaison solaire.	$(°)$

ε	Emissivité.	
η_g	Efficacité globale.	$(\%)$
η_i	Efficacité interne.	$(\%)$
φ	Latitude.	$(°)$
ψ	Humidité relative.	$(\%)$
λ	Conductivité thermique.	$(W/m.K)$
λ	Longitude.	$(°)$
μ	Viscosité dynamique.	$(N.s/m^2)$
ν	Viscosité cinématique.	(m^2/s)
ρ	Masse volumique.	(Kg/m^3)
ρ	Réflexivité.	
σ	Constante de Stephan Boltzmann.	$(W/m^2.K^4)$
τ	Coefficient de transmission.	
ω	Angle horaire.	$(°)$
ω_0	Angle horaire $(h=0)$.	$(°)$

	Les indices:	
a	Air ambiant.	
b	Absorbeur.	
ah	Air humide.	
c	Convection.	
cb	Conduction à travers le bassin.	
cd	Conduction.	
cd	Conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre.	
c,ga	Convection entre la vitre et l'ambiant.	
c,ia	Convection entre l'isolant et l'ambiant.	
c,wb	Convection entre l'eau et l'absorbeur.	

c,wg	Convection entre l'eau et la vitre.	
d	Rayonnement direct.	
D	Rayonnement diffus.	
e	Evaporation.	
e,wg	Evaporation entre l'eau et la vitre.	
f	Fond du distillateur.	
g	Vitre.	
ge	Face extérieure de la vitre.	
gi	Face intérieure de la vitre.	
*gi*1	Face intérieure Nord.	
*gi*2	Face intérieure Sud.	
i	Isolant.	
l	Liquide.	
r	Rayonnement.	
rg	Rayonnement entre les deux faces (Nord/sud)	
r,ga	Rayonnement entre la vitre et l'ambiant.	
r,wg	Rayonnement entre l'eau et la vitre.	
sky	Ciel efficace.	
v	Vapeur.	
w	Eau.	

Table de matières:

	Page
Dédicaces.	I
Remerciements.	II
Nomenclature.	III
Table de matières.	VII
Introduction générale:	01
Chapitre 1: Etude bibliographique:	
1.1. Problématique de l'eau.	03
1.1.1. La molécule d'eau.	03
1.1.2. Cycle de l'eau.	04
1.1.3. Répartition de l'eau sur la planète.	04
1.1.4. Types des eaux.	06
1.1.4.1. L'eau potable.	06
1.1.4.2. L'eau salée.	06
1.1.5. Le problème de consommation de l'eau dans le monde.	08
1.1.6. Le problème de consommation de l'eau en Algérie.	09
1.1.7. Les potentialités en eau dans l'Algérie.	10
1.1.8. L'eau dans le sud d'Algérie.	10
1.1.9.a. Analyse physico-chimique de l'eau souterraine de Ouargla.	10
1.1.9.b. Analyse physico-chimique de l'eau à l'Université Kasdi Merbah Ouargla: N^0 du forage (D1F144) à profondeur h=140 m:	11
1.2. Dessalement.	11
1.2.1. Distillation solaire.	11
1.2.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.	12
1.2.3. Types des distillateurs solaires.	12

1.2.3.1. Distillateur solaire à effet de serre. 12
1.2.3.1.1. Distillateur à simple effet.
1.2.3.1.2. Distillateur à multiples effets. 15
1.2.3.2. Distillateur solaire à film capillaire: DIFICAP. 17
1.2.3.3. Distillateur couplé (SERRE+DIFICAP). 18
1.2.4. Caractéristiques des distillateurs solaires à effet de serre. 20
1.2.5. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur. 23
1.2.6. Techniques de dessalement. 28
1.2.6.1. Procédés à membrane. 28
1.2.6.2. Procédés de distillation. 30

Chapitre 2: Transfert Thermique.

2.1. Introduction. 34
2.2. Transfert de chaleur. 34
2.2.1. Expression des flux d'énergie. 34
2.2.1.1. Conduction. 34
2.2.1.2. Convection. 35
2.2.1.3. Rayonnement. 36
2.2.1.3.a. Flux réfléchi, absorbé et transmis. 37
2.2.1.3.b. Corps noir, Emittance- loi de Stefan-Boltzmann. 37
2.2.1.3.c. Corps gris, Emissivité. 38
2.2.1.3.d. Echange par rayonnement entre deux corps. 39
2.2.1.3.e. Gisement solaire. 39
2.3. Transfert de masse. 50
2.4. Transfert de chaleur lors de l'évaporation et de la condensation. 52
2.4.1. Transfert de chaleur lors de l'évaporation. 52
2.4.2. Transfert de chaleur lors de la condensation. 54
2.5. Caractéristiques thermo-physiques du mélange air-vapeur (air humide). 59

Chapitre 3: Etude théorique:

3.1. Introduction. 66

3.2. Les différents transferts thermiques dans le distillateur solaire à effet de serre.67

3.3. Bilan thermique du distillateur solaire à effet de serre. 75

3.4. Analogie électrique. 76

Chapitre 4: Etude expérimentale:

4.1. Introduction. 78

4.2. Présentation de la région d'expérimentation. 78

4.3. Les composantes du système. 80

4.4. Conception du distillateur. 80

4.5. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérimentation. 82

4.6. Identification l'emplacement des thermocouples. 85

4.7. Les série d'expériences. 87

Chapitre 5: Résultat.

5.1. Introduction. 90

5.2. Les résultats. 91

5.3. L'efficacité globale, l'efficacité interne, la température moyenne d'ambiant et la vitesse moyenne du vent. 136

Chapitre 6: Discussion du résultat.

6.1. Introduction. 138

6.2. Discussion des résultats. 138

6.3. Résultat. 146

Conclusion et recommandations. 147

Bibliographie. 149

Annexes. 154

Annexe A. 155

Annexe B. 164

Introduction générale

L'eau ressource vitale primordiale, bien économique convoitée de plus en plus, n'en continue pas moins d'être gaspillée et peu respectée.

Malgré que la terre reste une planète de l'eau (71 % de la surface en est recouverte), 97% de cette eau est salée (3 % d'eau douce) deux tiers de l'eau douce est gelée dans les régions polaires ou les régions glaciers. Beaucoup de régions du monde souffrent du manque d'eau potable. L'eau de rivière n'est accessible, en quantité suffisante, qu'à très peu d'endroits et souvent à une qualité qui ne répond pas aux normes d'hygiène [1].

L'Algérie est considérée comme l'un des pays du monde qui souffre de la rareté des eaux potables.

C'est ce qui a poussé l'Algérie a adopter une méthode qui est le dessalement de l'eau de mer.

Il est certain que les ressources naturelles en eau potable en Algérie sont très limitées pour satisfaire les besoins nécessaires qui sont en augmentation croissante. Il est évident et logique de réfléchir à l'utilisation d'autres méthodes afin de combler le déficit substantiel, par l'extraction du sel de l'eau de mer, dans le but de la rendre potable. Ainsi, l'eau est considérée comme une substance changeable d'un état à un autre. Par conséquent, l'eau peut chauffer et s'évaporer (état gazeux), et peut également refroidir et geler (état solide). En se basant sur cette caractéristique, qui est la stabilité de l'eau, l'homme est arrivé à extraire de l'eau potable des différentes eaux salines, dans le but de réaliser l'équilibre entre l'offre et la demande en ce produit. Le dessalement cherche avec différentes manières l'eau potable en quantités suffisantes et surtout à des coûts raisonnables. Le dessalement de l'eau de mer constitue donc un facteur de sécurité intéressant. Il permet de produire de l'eau douce quand une partie de l'eau de mer d'alimentation d'une usine se transforme en débit d'eau douce. Et cela s'effectuera en utilisant l'énergie électrique ou thermique. Bien que le raisonnement d'aujourd'hui se concentre sur l'utilisation d'une énergie gratuite renouvelée et qui est l'énergie solaire.

La distillation solaire est considérée comme l'une des solutions proposées pour résoudre le problème du manque d'eau potable dans les zones arides sahariennes: c'est le thème de notre travail dans le cadre de ce mémoire. Où nous avons utilisé un distillateur solaire simple à effet de serre. Le prototype existe déjà au niveau de la terrasse de l'unité de recherche du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) de la faculté des sciences et sciences d'ingénieur de l'université Kasdi Merbah Ouargla. La région de Ouargla est caractérisée par des paramètres météorologiques spécifiques (rayonnement solaire considérable, durée d'ensoleillement prolongé et la température ambiante convenable…)

L'objectif de ce travail est d'étudier en déterminant la quantité d'eau distillée, les efficacités globale et interne du distillateur solaire à effet de serre au niveau de toutes les séries des expériences réalisées.

Ce mémoire thèse englobe six chapitres:

Le premier chapitre est l'étude bibliographique: nous avons abordé le problème de l'eau (mondialement, algérien, sud algérien (Ouargla)). Puis le dessalement: la distillation solaire, le principe de fonctionnement du distillateur, les différents types de distillateurs solaire et les caractéristiques ainsi que les paramètres influant leur fonctionnement, et les autres procédés de dessalement.

Le deuxième chapitre décrit le transfert thermique: les différents modes de transfert de chaleur, le gisement solaire, le transfert de masse, l'évaporation, la condensation et les caractéristiques de l'air humide.

Le troisième chapitre décrit l'étude théorique du distillateur solaire proposé dans notre étude.

Le quatrième chapitre concerne l'étude expérimentale: nous avons évoqué l'installation du système, les appareils de mesure et exposé les différentes séries d'expériences.

Le cinquième chapitre concerne les résultats: dans ce chapitre en expose les résultats expérimentaux obtenus à partir des séries d'expériences réalisées.

La discussion des résultats obtenus est contenue dans le sixième chapitre.

1

Etude bibliographique

1.1. Problématique de l'eau:

1.1.1. La molécule d'eau:

La plus petite quantité d'eau "possible" dans un gramme d'eau est appelée molécule. Il y a 33 000 milliards de milliards de molécules qui ont chacune toutes les propriétés physiques et chimiques de l'eau. La forme d'une molécule d'eau ressemble à une tête de Mickey. Les deux "oreilles" sont des atomes d'hydrogène, la "tête" est un atome d'oxygène. Ces trois parties sont reliées entre elles par des forces électriques importantes.

L'eau est un composé chimique. Sa molécule (H_2O) est le résultat de la combinaison d'une mole d'hydrogène (H_2) avec une demi-mole d'oxygène (O_2) selon la réaction suivante:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad (1.1)$$

La nature polaire de l'eau est une propriété très importante. La molécule d'eau forme un angle de 104.45^0 au niveau de l'atome d'oxygène entre les deux atomes d'hydrogène. Puisque l'oxygène a une éléctronégativité plus forte que l'hydrogène [2].

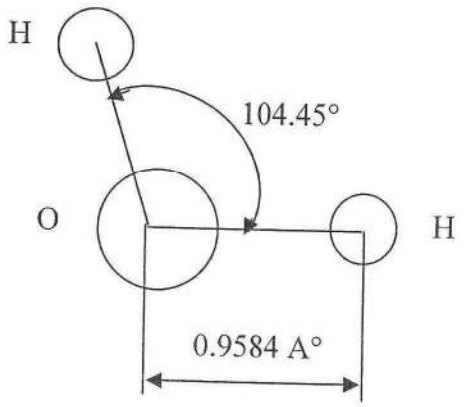


Figure (1.1): Géométrie de la molécule d'eau

1.1.2. Cycle de l'eau:

La quantité d'eau totale sur Terre est restée stable depuis plus de 3.5 milliards d'années qu'elle est apparue. L'eau s'évapore, forme la vapeur d'eau qui, en se transformant en pluie, va alimenter les mers, les cours d'eau et les nappes souterraines.

On peut appliquer au cycle de l'eau la fameuse de Lavoisier: "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme".

Dans l'atmosphère, l'eau est surtout présente à l'état de vapeur. Puis sous l'effet du refroidissement, l'eau passe de l'état de vapeur à l'état liquide (pluie) ou à l'état solide (neiges, glaces polaires). Il y a toujours autant d'eau qui s'évapore que d'eau qui tombe en précipitations, mais pas au même endroit, ni au même moment.

Le moteur de ce cycle est le soleil, ou plus exactement l'énergie solaire qu'il dégage. En effet, c'est cette dernière qui entraîne les changements d'état de l'eau: la formation et la fonte des glaces, ou encore l'évaporation de l'eau et son élévation dans l'atmosphère.

1.1.3. Répartition de l'eau sur la planète:

Dans l'optique de son utilisation par l'homme, les aspects quantitatifs et qualitatifs de l'eau sont étroitement liés [3].

Le volume d'eau contenu par la terre est de 14.10^8 Km^3. Cela présente un cube de plus de 1000 kilomètres de coté, ou 400 fois le volume de la Méditerranée. Cependant,

- 97 % de l'eau se trouve dans les océans…, mais elle est salée;
- L'atmosphère, qui retient seulement un cent millième de l'eau douce, joue cependant un rôle clé dans le cycle hydrologique par le recyclage rapide qu'elle assure (Tableau 1.1);
- Les calottes polaires, notamment celles de l'Antarctique, stockent les trois quarts de l'eau douce de la planète, cette réserve étant malheureusement inaccessible;
- L'eau que nous utilisons provient principalement des lacs et des cours d'eau, soit seulement de 3 % du réservoir d'eau douce;
- Les nappes souterraines constituent un lieu important de stockage, probablement sous-estimé. Leur exploitation, déjà entamée, présente les mêmes risques que celle des énergies fossiles, car les réserves ne se renouvellent pas à l'échelle humaine. Elles peuvent, en outre, devenir inutilisables soit par suite d'intrusion saline (exemple de la nappe éocène en Aquitaine) soit par suite d'une pollution (cas des nitrates par exemple).

En comparant les flux des différentes parties de l'hydrosphère aux volumes de chacun des réservoirs, on peut estimer la durée de renouvellement moyen de chacun d'eux .

La figure (1.2) représente cette répartition.

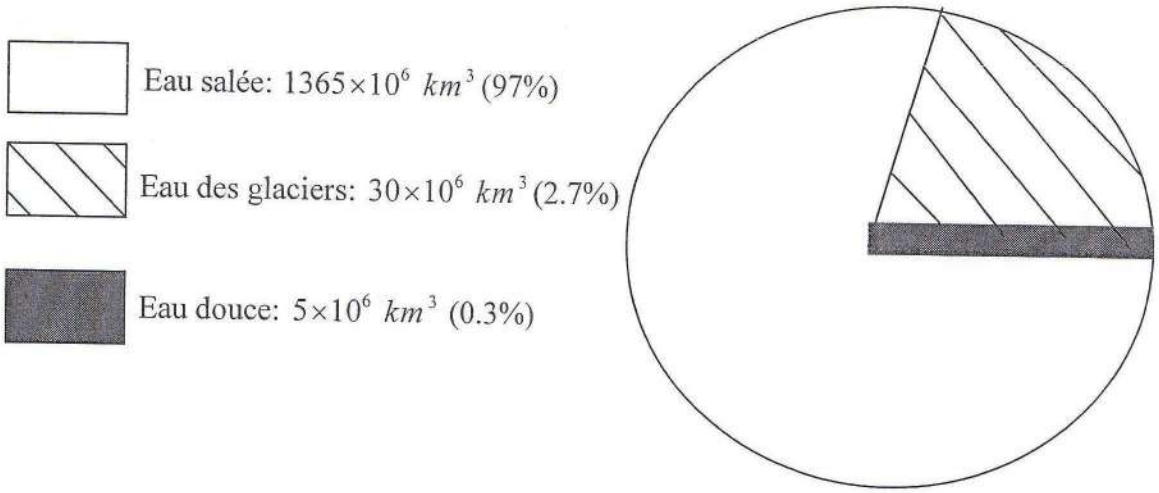


Figure (1.2): Diagramme des ressources mondiales en eau.

Réservoirs	Volume ($x10^{15}m^{3}$)	% Total	Temps de résidence
Océans	1350	97	2500 ans
Glaciers (calotte glacière)	33	2.4	1000 à 10000 ans
Eaux souterraines	8	0.6	1500 ans
Lacs	0.1	<0.01	17 ans
Eau dans le sol	0.070	<0.01	1an
Eau dans l'atmosphère	0.013	<0.001	8 jours
Rivières	0.0017	0.0001	16 jours
Eau dans la matière vivante	0.0011	0.0001	Quelques heures
Total	1391	100 %	

Tableau (1.1): Répartition de l'eau dans le monde [3].

En comparant les flux des différentes parties de l'hydrosphère aux volumes de chacun des réservoirs, on peut estimer la durée de renouvellement moyen de chacun d'eux.

La figure (1.2) représente cette répartition.

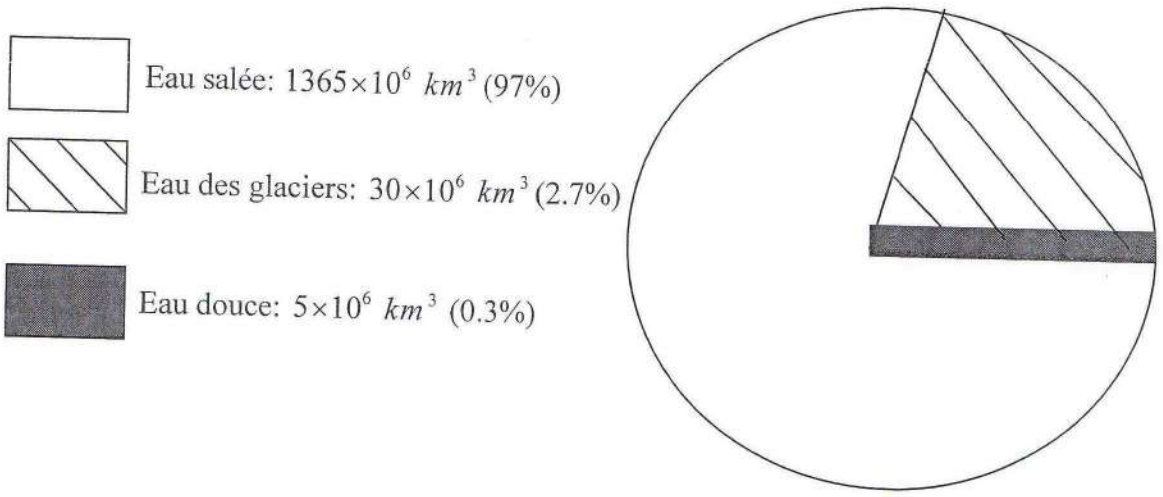


Figure (1.2): Diagramme des ressources mondiales en eau.

Réservoirs	Volume ($x10^{15}m^3$)	% Total	Temps de résidence
Océans	1350	97	2500 ans
Glaciers (calotte glacière)	33	2.4	1000 à 10000 ans
Eaux souterraines	8	0.6	1500 ans
Lacs	0.1	<0.01	17 ans
Eau dans le sol	0.070	<0.01	1an
Eau dans l'atmosphère	0.013	<0.001	8 jours
Rivières	0.0017	0.0001	16 jours
Eau dans la matière vivante	0.0011	0.0001	Quelques heures
Total	1391	100 %	

Tableau (1.1): Répartition de l'eau dans le monde [3].

1.1.4. Types des eaux:

1.1.4.1 L'eau potable:

Une eau potable selon l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) doit être dépourvue de germes pathologiques véhiculant toute sorte de maladies, en terme de salinité, une eau destinée aux usages domestiques, ne doit pas contenir une quantité de sels supérieure à 500 mg/L. De plus elle ne doit pas contenir plus de 250 mg/L de Chlorures, ni plus de 250 mg/L de Sulfates. Pour les besoins industriels et agricoles, il est préférable que la salinité ne soit pas supérieure à 1000 ou à 1500 mg/L [4].

1.1.4.2. L'eau salée:

1.1.4.2.1. Salinité :

La salinité est la quantité totale de sels dissous, mais le chlorure de sodium est le principal composant, c'est la raison pour laquelle on exprime souvent la salinité en fonction de ce seul composé. La présence de sels modifie les propriétés de l'eau : densité, températures de congélation et d'ébullition, viscosité… [5].

- ✓ Les eaux qui peuvent être distillées sont:
- L'eau de mer;
- L'eau saumâtre.

1.1.4.2.2. L'eau de mer:

La composition de l'eau de mer est très variée, elle contient environ une cinquantaine de corps simples, le chlore à lui seul constitue environ 55 % du poids totale des sels dissouts, la salinité moyenne de l'eau de mer est proche de 35 g/L, mais elle varie d'une mer à une autre (Tableau 1.2) [3].

Mers	Salinité en (g/L)
Mer Baltique	7
Mer Caspienne	13.5
Mer Noir	20
Mer Adriatique	25
Océan pacifique	33.5
Océan Indien	33.8
Océan Atlantique	36
Mer Méditerranée	39
Golf Arabique	43
Mer Rouge	43
Mer Morte	270

Tableau (1.2): Salinité des principales eaux de mer.

1.1.4.2.3. L'eau saumâtre:

L'eau saumâtre est une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 33 g/L. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme d'eaux souterraines [3]. Les eaux saumâtres peuvent être identifiées par leur degré de salinité selon [6]:

- Les eaux dites "légèrement saumâtres" ont une salinité comprise entre 1 et 3 g/L.
- Une eau dite "modérément saumâtre" a une salinité comprise entre 3 et 10 g/L.
- Une eau dite "très saumâtre" pour une salinité dépassant 10 g/L.

Les deux premières catégories sont les plus répandues, on les trouve souvent, en Afrique du Nord, au Moyen Orient, et dans certaines régions des U.S.A. La composition chimique de ces eaux varie non seulement d'une région à une autre, mais aussi pour une même région, d'une saison à une autre, et ces variations sont dépendants de plusieurs paramètres qui sont généralement:

- La structure physique des roches traversées par les eaux;
- La vitesse de circulation de l'eau dans les roches donc le temps du contact;
- La matière déjà dissoute;
- Les phénomènes d'évaporation.

1.1.5. Le problème de consommation de l'eau dans le monde:

A l'échelle mondiale, les ressources en eau potable sont reparties entre les trois types de besoin, les besoins agricoles représentent 70 % des ressources en eau utilisées suivis des besoins industriels avec 22 % et enfin les besoins domestiques estimés à 8 %. Ces chiffres représentent une moyenne mondiale ponctuelle évoluant dans le temps et dans l'espace. Ils évoluent différemment d'un continent à l'autre et entre les pays (Tableau (1.3)) mais ils nous renseignent sur la consommation dominante du secteur agricole. Un secteur qui consomme prés de trois quart des ressources en eau de la majorité des pays. Cela ne peut se faire qu'au détriment des autres utilisateurs et notamment les populations.

Le niveau de consommation d'eau potable d'un pays, comme celui de l'énergie, est devenu un indicateur de son niveau de développement économique, comme le montre le tableau [7].

Zone	Consommation en m^3/habitant.an	Consommation en L/habitant.j
Afrique	17	47
Asie	31	87
Europe	122	334
USA, Japon	210	578
Moyen mondial	50	137

Tableau (1.3): Consommation mondiale d'eau.

Les ressources en eaux renouvelables offertes par la nature peuvent être estimées à partir des flux du cycle de l'eau et plus particulièrement des flux de circulation des eaux continentales aux environs de 40 km^3/an .

Compte tenu de la population actuelle de la planète qui est d'environ 6 milliards d'habitant, la quantité moyenne d'eau renouvelable disponible est de l'ordre de 7 000 m^3/an/habitant , soit 20 m^3/jour/habitant , ce qui est très largement supérieur aux besoins[3].

En fait, les problèmes actuels et futurs sont multiples:

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

1.1.6. Le problème de consommation de l'eau en Algérie:

En Algérie, les besoins en eaux potables et industrielles se fond de plus en plus ressentir, surtout dans les régions sahariennes dont la superficie avoisine les 2 millions de km^2 et où les eaux souterraines sont disponibles en grande quantité environ 60×10^3 milliard de m^3. Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables; et 4 à 5 milliards de m^3 sont exploitables annuellement, et dans le Nord de l'Algérie les eaux souterraines sont évaluées à 1.8 milliard de m^3. Dans leur état naturel, ces eaux sont inutilisables alors qu'elles peuvent constituer un facteur important de développement et d'amélioration des conditions de vie dans ces régions.

L'Algérie occupe actuellement le 14eme rang mondial parmi les pays qui souffrent de manque d'eau, et si il n'y aura pas de démarches réelles et efficaces, elle sautera à la 6eme place d'ici l'an 2025 [8].

L'Algérie reçoit 65 milliards de mètres cubes de pluie par an dont [9]:

- 15 milliards vont vers les oueds.
- 3 milliards alimentent les eaux souterraines.
- 47milliards s'évaporent.

La capacité réelle de stockage actuelle des barrages est de 7 milliards de mètre cube, il faut considérer 40 % de pertes par canalisation qu'on doit être en mesure de réduire à 10 % à moyen terme. Par conséquent, on doit faire des efforts considérables en vue de:

1. Réduire les pertes en changeant les canalisations qui datent du temps de la colonisation;

2. Augmenter la production d'eau dessalée en réalisant des unités de dessalement tout en veillant à réduire les coûts de process des eaux usées en confiant la gestion de ces unités à des professionnels et non pas aux collectivités locales comme auparavant.

1.1.7. Les potentialités en eau dans l'Algérie:

Année	1962	1990	1995	1998	2000	2020
m^3/habitant	1500	720	680	630	500	430

Tableau (1.4): les potentialités en eau dans l'Algérie [8].

1.1.8. L'eau dans le sud Algérien:

Le sud de l'Algérie couvre 85% du territoire global du pays, avec un superficie d'environ $2.156\times10^6\ km^2$, et une population qui a dépassé aujourd'hui les 3 millions d'habitants. Considéré comme une zone désertique, où les précipitations sont quasi nulles, les crues sont violentes et dévastatrices: le charriage est considérable et l'érosion les berges participe au transport solide dans les cours d'eau avec un débit appréciable [10].

Le sud algérien est constitué des wilayas suivantes: Adrar, Laghouat, Biskra, Bechar, Tamanrasset, Ouargla, Illizi, El Oued, Ghardaïa, El Bayadh, Naama et Tindouf.

1.1.9.a. Analyse physico-chimique de l'eau souterraine de Ouargla:

La willaya de Ouargla est considérée comme l'une des wilayas du sud Algérien, qui souffre de la rareté des eaux potables et de la disponibilité des eaux salées sous forme d'eau souterraine. Sa superficie est de $2.7\times10^5\ Km^2$, et sa population est estimé à 445 619 habitants[11,12]. Le tableau (1.5) ci-dessous présente les valeurs moyennes des concentrations des importants ions existant dans l'eau saumâtre de Ouargla [13]:

SO_4^{-2} *mg / L*	Na^+ *mg / L*	Mg^{+2} *mg / L*	Ca^{+2} *mg / L*	Dureté °F	HCO_3^- *mg / L*	CO_3^{-2}	K^+ *mg / L*	Cl^- *mg / L*	NO_3^- *mg / L*	pH
965	625	107	249	106	103	--	19	749	38	7.54

Tableau (1.5): Les compositions chimiques moyennes de l'eau souterraine de Ouargla.

1.1.9.b. Analyse physico-chimique de l'eau à l'Université Kasdi Merbah Ouargla: N^0 du forage (D1F144) à profondeur h=140 m:

Dans notre étude, nous visons, distiller l'eau de l'Université de Kasdi Merbah d'Ouargla, donc prendre part à la disponibilité de l'eau potable. Le tableau (1.6) ci-dessous présente les valeurs moyennes des concentrations des importants ions existant dans l'eau Ouargla [14]:

SO_4^{-2} *mg / L*	Na^+ *mg / L*	Mg^{+2} *mg / L*	Ca^{+2} *mg / L*	HCO_3^- *mg / L*	CO_3^{-2}	K^+ *mg / L*	Cl^- *mg / L*	NO_3^- *mg / L*	pH
750	675	85.06	248.496	143.266	00	17	792.98	7	7.39

Tableau (1.6): Les compositions chimiques moyennes de l'eau de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla.

1.2. Dessalement:

Le dessalement est une technique considérée comme solution pour le problème d'eau potable mondialement.

1.2.1. Distillation solaire:

La technique de dessalement de l'eau de mer par l'énergie solaire utilisant un distillateur simple basé sur le principe de l'effet de serre n'est pas nouvelle; elle a été pour la première fois utilisée à grande échelle en 1872 par Ch. Wilson pour alimenter en eau potable la localité de salinas. Dans le désert d'Atacama au Chili, la seule eau naturelle qu'on y trouve contient $140\,g$ de sels par litre. Avec une surface de verre de $4400\,m^2$ on obtenait en été environ $23\,m^3$ d'eau douce par jour, et ce système fit ses preuves pendant des années [15].

Depuis lors, le principe de construction n'a pas changé, même si quelques améliorations on été obtenues quand à la forme aux matériaux de construction et aux méthodes de travaille.

Il fonctionna jusqu'à seulement 1910, à cause d'un problème majeur de la rapide accumulation des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier des distillateurs [6].

1.2.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire:

La distillation solaire est un phénomène naturel, elle a le même principe du phénomène réel qui se déroule dans la nature, où le rayonnement solaire incident sur l'eau de la mer (ou l'Océan, le lac, la rivière...) échauffe cette eau, cette dernière s'évapore et s'élève haut. Puis cette vapeur se transporte par l'intermédiaire du vent jusqu'à ce qu'elle arrive un endroit plus froid, donc elle se condense et les nuages se formant a après donnent de la pluie.

Cependant, l'homme a reproduit en un modèle miniaturisé, le cycle naturel, ce modèle est appelé distillateur solaire.

Le distillateur solaire est un bassin isolé, enfermant une quantité d'eau, à parois adiabatiques, coffré d'une couverture en verre transparent, dont le fond est noirci.

L'énergie solaire entrant par la couverture est absorbée par l'eau et le fond noirci, puis elle est transmise à l'air par conduction, convection et rayonnement, comme les parois sont hermétiquement closes et le verre opaque à la radiation infra-rouge de grandes longueurs d'onde, l'énergie solaire se trouve ainsi emprisonnée (effet de serre) et l'air chauffé.

La température de la couverture qui baigne dans l'air atmosphérique étant inférieure à celle du mélange air-vapeur d'eau, il se produit une condensation de la vapeur d'eau sur la surface de la couverture inclinée. L'eau s'écoule suivant un film mince pour être recueillie.

1.2.3. Type des distillateurs solaires :

Tous les types des distillateurs solaires ont le même principe de fonctionnement. Mais ils peuvent être différents en terme de conception et de matériaux utilisés. On distingue trois types de distillateurs solaires :

1.2.3.1. Distillateur à effet de serre :

C'est le distillateur le plus utilisé dans le monde, il est constitué d'un bassin peint en noir pour capter le maximum de radiation solaire, rempli d'eau et couvert d'une vitre transparente en verre; il faut que cette dernière soit inclinée pour que la vapeur condensée dans la partie intérieure de la couverture coule vers une gouttière qui est placée en bas de celle-ci [6]. Ce type est divisé en deux grandes catégories:

1.2.3.1.1. Distillateur à simple effet :

Le distillateur solaire à simple effet est constitué d'un seul évaporateur. Il y a plusieurs modèles de ce type.

1.2.3.1.1.a. Distillateur à pente unique :

C'est un distillateur à capteur unique incliné d'un angle (β) (figure (1.3)) [13].

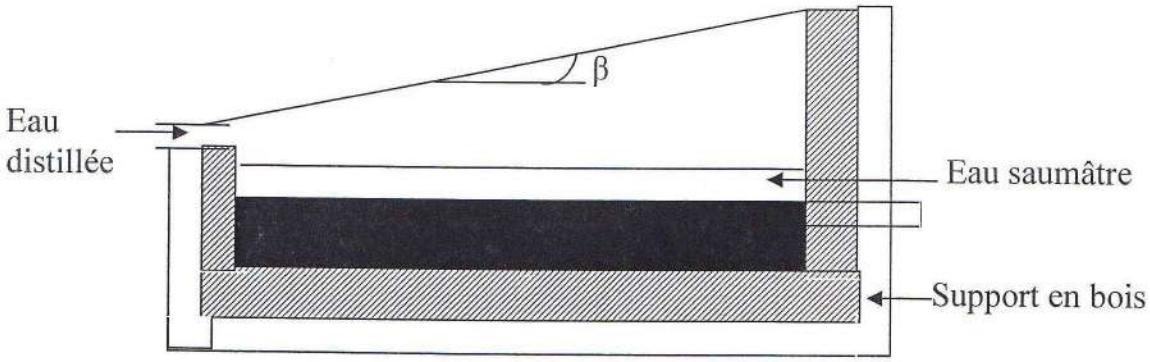


Figure (1.3): Distillateur à simple effet avec un seul capteur.

1.2.3.1.1.b. Distillateur à double pente :

C'est un distillateur à double capteur où chacun deux est incliné d'angle (β), son avantage est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation (figure (1.4)) [13].

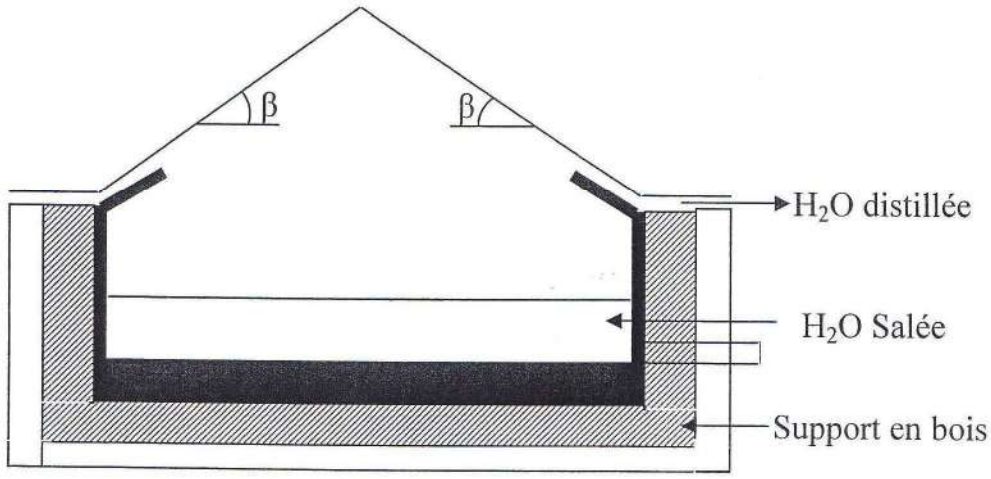


Figure (1.4): Distillateur simple à doubles capteurs (2 pentes).

1.2.3.1.1.c. Distillateur solaire Terre-eau:

De grandes quantités d'humidité sont accumulées dans la terre durant la saison froide, de même dans les zones arides; cette humidité est retournée à l'atmosphère durant la saison chaude pour compléter le cycle hydrologique naturel. Pour exploiter ceci, on utilise le distillateur solaire Terre-eau. Il est similaire à celui de l'effet de serre, sauf que le sol remplace le bassin noir [6]. (Figure (1.5)).

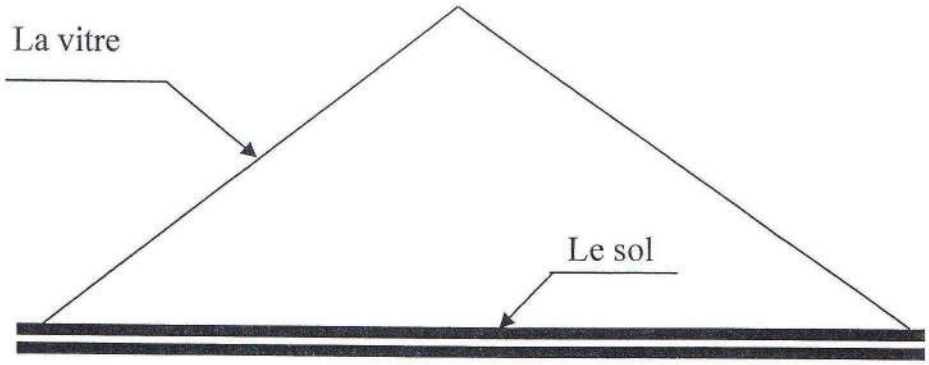


Figure (1.5) : Distillateur Solaire Terre-eau.

1.2.3.1.1.d. Distillateur sphérique à balayage :

Ce type de distillateur mis au point par le Pr. MENGUY de l'Université de LYON (figure (1.6)) est constitué d'une sphère en plexiglas à l'intérieur de laquelle est placé un bac contenant l'eau saline. La condensation s'effectue sur la demi-sphère supérieure et le condensât est recueilli à la base de la demi-sphère inférieure [16,17].

Parmi les inconvénients de ce type de distillateur c'est que la surface horizontale de la solution intercepte moins de radiation solaire que les surfaces inclinées [18].

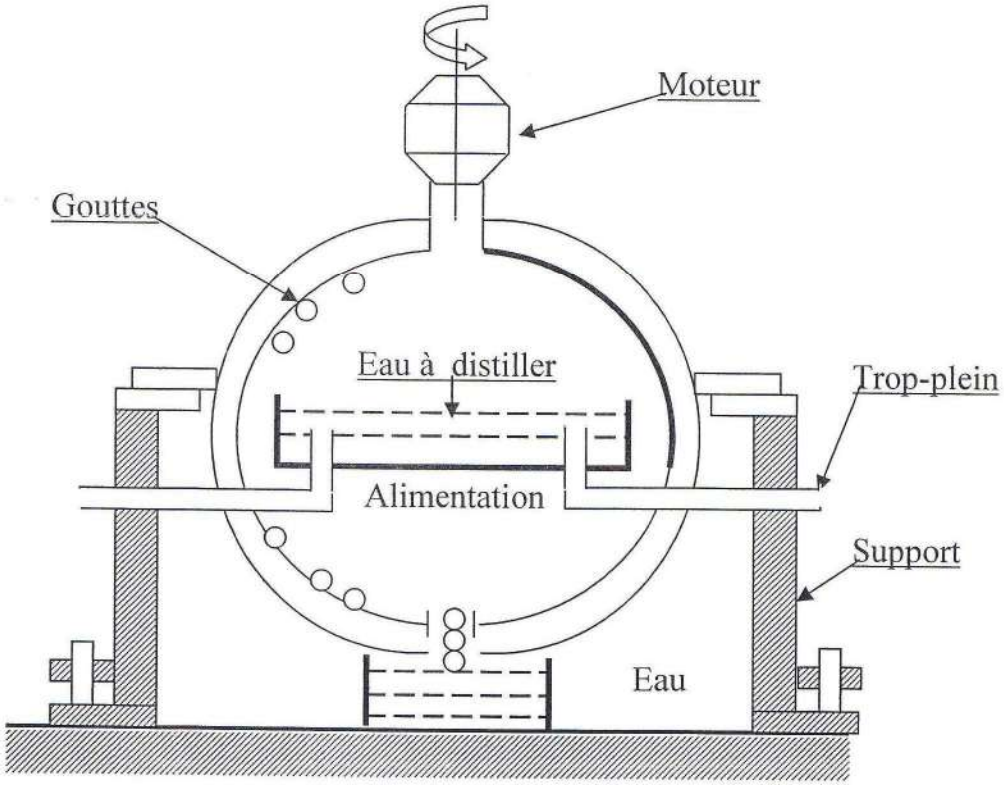


Figure (1.6): Distillateur solaire sphérique à balayage.

1.2.3.1.2. Distillateur à multiples effets :

Le distillateur solaire à multiples effets est constitué de plusieurs évaporateurs, mais il a plusieurs modèles.

1.2.3.1.2.a. Distillateur à plusieurs bassins :

Le distillateur à plusieurs bassins est similaire au distillateur à doubles pentes, sauf que ce modèle est constitué de plusieurs bassins repartis sur plusieurs étages (munis de réflecteur) [13] (figure (1.7))

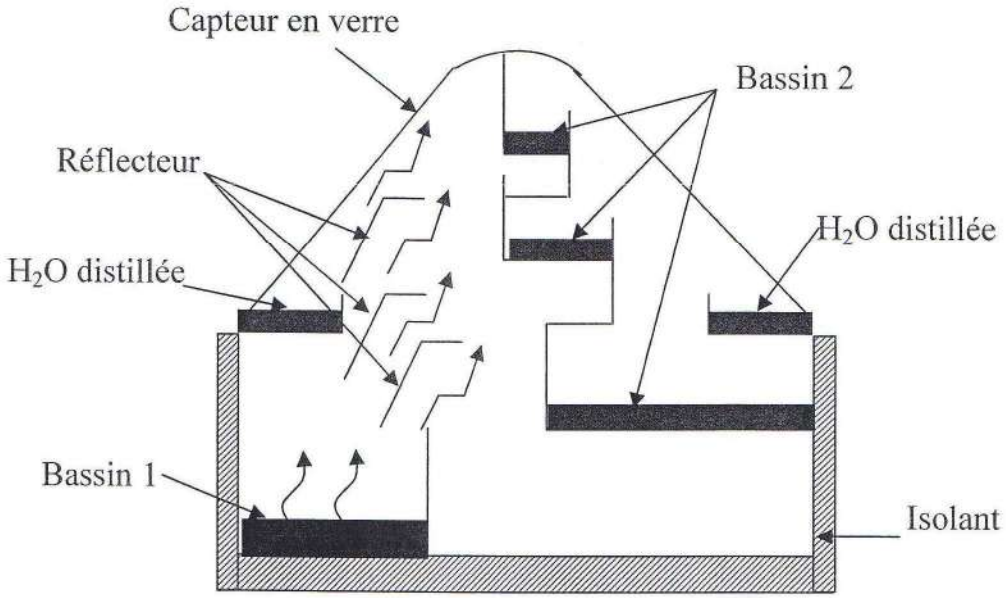


Figure (1.7): Distillateur solaire à plusieurs bassins.

1.2.3.1.2.b. Distillateur solaire incliné à cascade :

Cet appareil présente deux avantages : la lame d'eau est très faible et l'orientation par rapport au rayonnement incident se rapproche davantage de l'optimum. Un modèle de ce type est représenté sur la (figure (1.8)). Il est commercialisé par la société française SOLEFIL de PERPIGNAN [16].

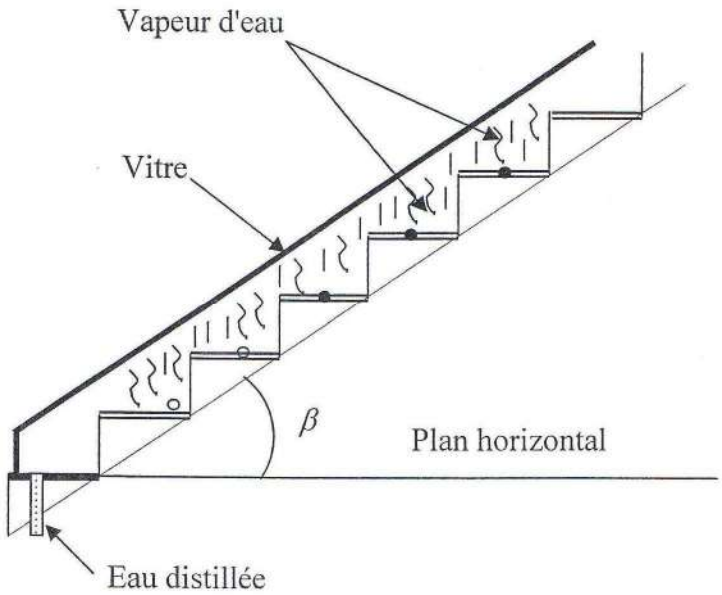


Figure (1.8): Distillateur solaire incliné à cascades.

1.2.3.2. Distillateur solaire à film capillaire : DIFICAP

1.2.3.2.a. Distillateur à film capillaire :

Dans cet appareil mis au point par le professeur LE GOFF au laboratoire des sciences du Génie chimique de NANCY en collaboration avec le professeur OUAHES de l'Université d'ALGER. Au lieu d'un épais tissu éponge, ils préconisent une "feuille" très mince composée d'une seule nappe tissée à fines mailles. Ce tissu se maintient, de lui-même, au contact de la plaque surplombante, par les forces de tension interfaciale, nettement supérieures à la force de pesanteur. Il se forme un film capillaire à l'interface plaque-tissu. L'eau saumâtre s'écoule lentement dans un tissu de faible épaisseur qui adhère au « plafond » du distillateur. La vapeur qui s'en échappe va se condenser sur la paroi froide située juste en face [16,19] (Figure (1.9)).

Il est prévu que l'appareil produise 10 à 15 $\left(L/m^2.jour\right)$ d'eau distillée [20].

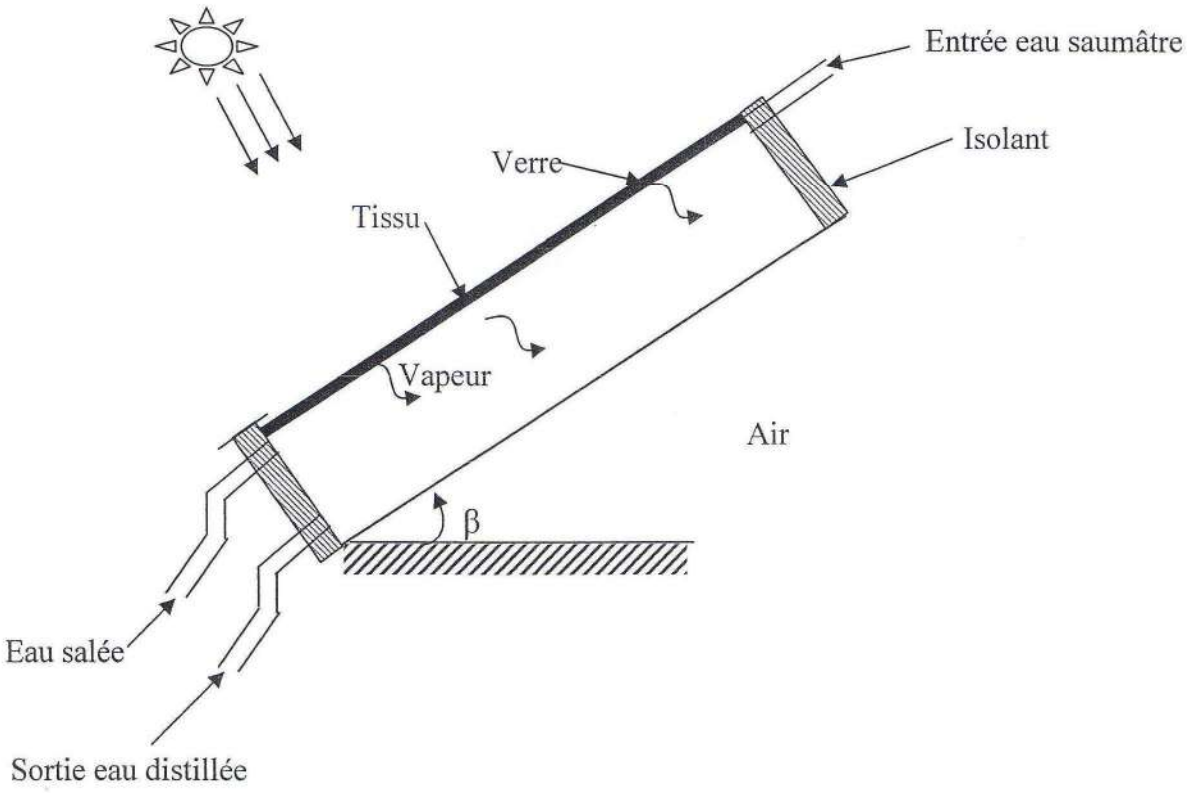


Figure (1.9): Distillateur solaire à film capillaire (DIFICAP).

1.2.3.2.b. Distillateur à film capillaire avec plusieurs étages:

Dans chaque étage, l'évaporateur est revêtu d'un tissu capillaire mouillé par un apport d'eau salée à faible débit, les vapeurs provenant de l'étage (n) se condensent au dessus de l'étage (n-1) et cèdent leur chaleur latente qui aide à chauffer l'eau de l'étage (n-1).

L'inconvénient de ce modèle est difficile à entreprendre ainsi qu'un contrôle permanent du débit d'eau salée [13] (Figure (1.10)).

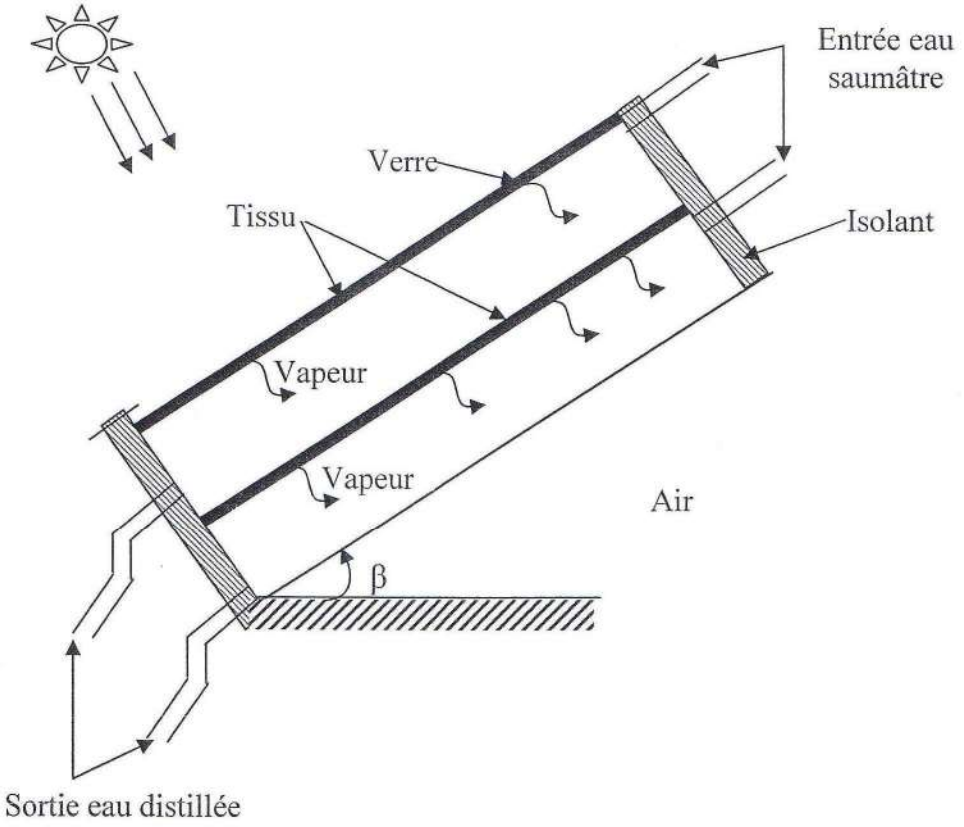


Figure (1.10): Distillateur à plusieurs étages avec film capillaire.

1.2.3.3. Distillateur couplé (SERRE+DIFICAP) :

C'est un distillateur constitué de deux distillateurs solaires, le premier est un distillateur solaire à effet de serre et l'autre est un distillateur solaire à film capillaire (DIFICAP). (Figure (1.11))

Les avantages de cet appareil sont: La récupération de l'énergie perdue par le distillateur solaire à effet de serre et l'augmentation la quantité d'eau distillée.

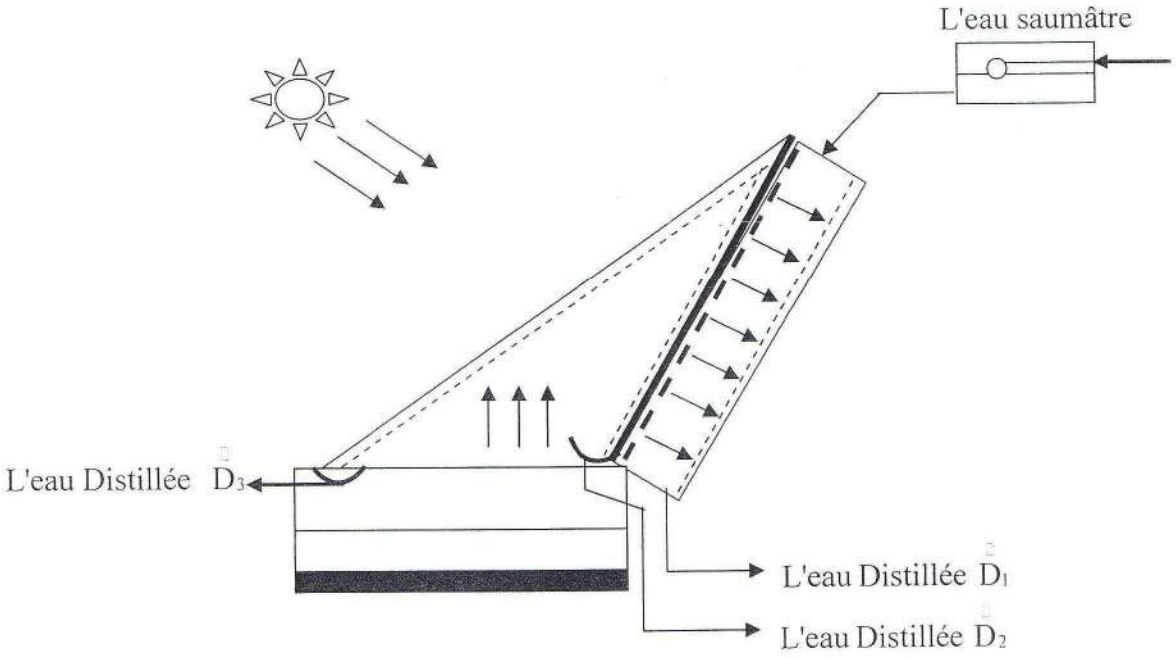


Figure (1.11): Distillateur solaire couplé (SERRE+DIFICAP).

Remarque:

Il existe une autre classification du distillateur solaire, selon la position de l'eau, c'est-à-dire, est-ce que l'eau à distiller est en mouvement ou stationnaire:

1- **Distillateur statique:**

2- **Distillateur à ruissellement:**

Ce sont les distillateurs dont l'eau à distiller est en mouvement, ce type de distillateur existe sous différentes géométries [21]:

- Distillateur à equi-courant;
- Distillateur à contre-courant;
- Distillateur à courant croisés;
- Distillateur à mèche, simple et double vitrage;
- Distillateur auto alimenté.

Ils présentent, d'une manière générale, une faible inertie thermique et beaucoup d'inconvénients tels que: le réglage du débit qui est difficile et la perte de chaleur sensible qui est emportée par l'excédent d'eau non évaporée.

1.2.4. Caractéristiques des distillateurs solaires à effet de serre:

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs. On distingue: la production du distillat (rendement), l'efficacité globale et interne, le rendement d'absorption, la performance et pression à l'intérieur du distillateur.

1.2.4.1. La production du distillat:

La production du distillat d'un distillateur solaire, représente la quantité d'eau distillée, produite par le distillateur, par mètre carré de surface d'évaporation et par jour.
Le débit de l'eau distillée est donné par la relation suivante [17]:

$$m_d = \frac{q_e}{L(T_w)} \tag{1.2}$$

Où:

q_e : Le flux de chaleur utilisé pour l'évaporation de l'eau (J/s).

$L(T_w)$: La chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température (T_w) (J/Kg).

1.2.4.2. L'efficacité:

Cooper [22] a défini deux types d'efficacités instantanées suivantes:

1.2.4.2.1. L'efficacité globale η_g:

L'efficacité globale est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie globale incidente par unité de temps, qui peut être calculée par la formule suivante:

$$\eta_g(\%) = \frac{Q_e}{G} 100 \tag{1.3}$$

Où:

Q_e : Chaleur d'évaporation par mètre carré durant la journée (J/m^2).

G : Énergie solaire globale incidente reçu sur une surface horizontale d'un mètre carré pendant la même journée (J/m^2).

1.2.4.2.2. L'efficacité interne η_i:

L'efficacité interne est le rapport entre la quantité de chaleur utilisée pour l'évaporation par unité de temps et la quantité d'énergie effectivement absorbée par la saumure et le plan noir par unité de temps, elle se calcule comme suit:

$$\eta_i\,(\%) = \frac{Q_e}{\alpha_t G} 100 \tag{1.4}$$

$\alpha_t G$: Quantité de chaleur absorbée par l'eau et le plan noir durant la journée (J).

α_t : Coefficient d'absorption effective du distillateur.

α_t : Partir de la radiation solaire qui est absorbée utilement (par l'eau et le plan noir) pour être ensuite utilisée dans les différents phénomènes de transfert de chaleur à partir de et vers l'eau. Où:

$$\alpha_t = \tau_v \times \alpha_w + \tau_v \times \tau_w \times \alpha_f \tag{1.5}$$

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

τ_w : Coefficient de transmission de l'eau.

α_w : Coefficient d'absorption de l'eau.

α_f : Coefficient d'absorption du fond du distillateur.

Le coefficient α_t dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident par rapport à la vitre. Le tableau (2.1) donne les valeurs de réflexion, absorption et de transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur. Pour l'angle d'incidence du rayonnement entre 0° et 30° $\alpha_t = 0.85$).

Angle d'incidence du rayonnement en degrés		0-30°	45°	60°
Vitre	Réflexion	5%	6%	10%
	Absorption	5%	5%	5%
	Transmission	90%	89%	85%
Nappe d'eau	Réflexion	2%	3%	6%
	Absorption	30%	30%	30%
	Transmission	68%	67%	64%
Fond du distillateur	Réflexion	5%	5%	5%
	Absorption	95%	95%	95%
	Transmission	0%	0%	0%

Tableau (1.7): Réflexion, absorption et transmission vis-à-vis du rayonnement solaire pour les différentes parties d'un distillateur.

1.2.4.3. Le rendement d'absorption:

Selon Cooper [23] le rendement d'absorption $(Rabs)$ traduit la fraction d'énergie solaire utilement absorbée par l'eau et le bac absorbant au cours d'une journée.

$$Rabs = \int_{t_0}^{t} \alpha_t \frac{Q}{G} dt \qquad (1.6)$$

t_0 , t ; Temps correspondants au lever du soleil et à la durée d'ensoleillement.

$Rabs$: Rendement d'absorption.

Q : Flux solaire global reçu sur une surface horizontale par mètre carré et par unité de temps.

G : Énergie solaire globale reçue dans la journée par unité de surface horizontale.

$$Q = \frac{\pi}{2T_s} Q_T \sin\left(\frac{\pi\theta}{T_s}\right)\left(1+\cos\left(\frac{V\pi\theta}{T_s}\right)\right) \text{[24]} \quad (1.7)$$

Ou encore

$$Q = \frac{\pi Q_T}{7.2\times10^3 T_s} \sin\left(\frac{\pi\theta}{T_s}\right) \text{[22]} \quad (1.8)$$

V : est un nombre sans dimension, positif qui simule l'intermittence des nuages;

θ : Durée du jour;

T_s : Temps écoulé depuis le lever du soleil.

1.2.4.4. La performance:

Satcunanathan et Hansen [25] ont défini deux types de facteurs de performance; un facteur de performance brute (F.P.B) et un facteur de performance horaire (F.P.H).

$$F.P.B = \frac{\text{Quantité d'eau produite en de } 24h}{\text{Quantité d'energie entrée en de } 24h} \quad (1.9)$$

$$F.P.H = \frac{\text{Quantité d'eau produite en une heure}}{\text{Quantité d'energie reçue en une heure}} \quad (1.10)$$

1.2.4.5. Pression à l'intérieur du distillateur:

La pression à l'intérieur du distillateur est égale à la pression atmosphérique puisque les rigoles de récupération de l'eau distillée sont en communication avec les atmosphères interne et externe.

1.2.5. Paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur:

Alors que pour "'tester" un distillateur, il faut le placer dans les conditions réelles de fonctionnement,"au soleil", pour en étudier le transfert de chaleur et de masse et le débit d'eau distillée, il suffit d'expérimenter en laboratoire en maîtrisant tous les paramètres. On peut diviser ces paramètres en deux grands groupes :

- Les paramètres externes par rapport au système de distillateur;
- Les paramètres internes par rapport au système de distillateur.

1.2.5.1. Paramètres externes:

Ce sont les paramètres qui influent sur le bon fonctionnement et le rendement du distillateur, ces paramètres liés au site:

1.2.5.1.1. Paramètres géographiques:

Tels que la longitude, la latitude, l'altitude et la hauteur du soleil.

1.2.5.1.2. Paramètres météorologiques:

Les plus fréquemment retenus sont: l'intensité du rayonnement solaire, l'intermittence des nuages, pourcentage du rayonnement diffus, la vitesse du vent et la température ambiante.

1.2.5.1.2.a. Intensité du rayonnement solaire:

C'est le facteur essentiel dans le fonctionnement du distillateur solaire, c'est une énergie rayonnante de longueur d'onde $(0.17\ à\ 4\mu m)$ [19, 26, 27,28].

1.2.5.1.2.b. L'intermittence des nuages:

L'influence de l'intermittence des nuages représentée par le facteur "V" apparaît clairement dans la formule donnant l'énergie Q reçue sur une surface horizontale par unité de temps.

$$Q = \frac{Q_T \pi}{2T_s} \sin\left(\frac{\pi\theta}{T_s}\right)\left(1+\cos\left(\frac{V\pi\theta}{T_s}\right)\right) \qquad (1.11)$$

Cela revient à considérer la radiation solaire comme une fonction, oscillant à la fréquence V qui représente la fréquence de passage des nuages. Cooper a étudié l'absorptance effective moyenne α_t en fonction de V [24]. L'effet de V sur α_t est insignifiant.

1.2.5.1.2.c. Pourcentage du rayonnement diffus:

Pour l'ensemble des autres variables fixées, Cooper [24] a trouvé que l'absorptance effective moyenne α_t varie linéairement en fonction de la fraction de rayonnement diffus.

L'hypothèse selon laquelle la radiation diffuse est un pourcentage constant de la radiation totale à chaque instant de la journée est juste aux grandes et petites fractions diffuses. Pour une radiation totale donnée, α_t sera d'autant plus petit que la fraction diffuse sera grande.

1.2.5.1.2.d. Vitesse de vent et la température ambiante de l'air:

La vitesse du vent est liée à la convection forcée qui se produit au niveau des vitres avec l'ambiant, donc elle influe inversement proportionnellement sur les températures des vitres [26, 27, 28,29].

- Pour des températures élevées de saumure, d'une part, l'augmentation de la vitesse du vent, de l'écart entre les températures de la saumure et de la vitre, d'autre part, l'abaissement de la température ambiante ou le refroidissement de la surface de condensation, contribuent à l'élévation du taux d'évaporation.
- Pour les basses températures de la saumure, augmenter la vitesse du vent revient à faire baisser le taux d'évaporation. Il apparaît que l'augmentation de la vitesse du vent et l'abaissement de la température ambiante équivalent à un refroidissement de la surface de condensation (importante relative de la conduction sur l'évaporation).

1.2.5.1.2.e. Autres facteurs météorologiques:

L'humidité de l'air et la pluviométrie doit être prises en considération dans la mesure où ces deux facteurs modifient le bilan thermique du distillateur.

1.2.5.2. Paramètres internes:

1.2.5.2.1. Paramètres de position:

1.2.5.2.1.a. L'emplacement du distillateur: Distillateurs doit être placés de façon à éviter les obstacles "l'effet de masque", qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.

1.2.5.2.1.b. L'orientation : elle dépend essentiellement du fonctionnement du distillateur pendant la journée, où on distingue:

Fonctionnement pendant la matinée ⟶ Orientation Est

Fonctionnement pendant l'après midi ⟶ Orientation Ouest

Fonctionnement durant toute la journée ⟶ orientation Sud

1.2.5.2.1.c. L'inclinaison: Elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année:

Fonctionnement estival $\longrightarrow \beta = \varphi - 10^0$

Fonctionnement hivernal $\longrightarrow \beta = \varphi + 20^0$

Fonctionnement annuel $\longrightarrow \beta = \varphi + 10^0$

Tel que:

β : L'inclinaison de la vitre.

φ : L'altitude de la région.

1.2.5.2.2. Paramètres de construction:

1.2.5.2.2.a. La couverture:[21]

Elle intervient essentiellement au niveau des facteurs suivants :

1.2.5.2.2.a.1. La nature de la couverture:

Elle détermine trois éléments très importants pour le fonctionnement du distillateur; la transmisivité de la couverture, sa mouillabilité et sa résistance.

1.2.5.2.2.a.2. Inclinaison de la couverture:

1.2.5.2.2.a.3. Nombre de vitre de la couverture:

1.2.5.2.2.b. Le plan noir:

Des tests menés par certains chercheurs ont montré que le plan noir peut être construit en béton, en ciment, en bois, en matière synthétique ou en métal ordinaire. Le choix de la matière dépend de son inertie thermique, de sa résistance à l'oxydation par l'eau, des dépôts de minéraux et surtout de son coût [21,30].

1.2.5.2.2.c. Distance entre la saumâtre et la vitre:

S. Satcunanathan et H. Phansen [25] ont constaté que la performance du distillateur augmente quand la distance eau saumâtre-vitre diminue, ceci a été interprété par les travaux effectués par d'autres chercheurs qui ont montré que les transfert de chaleur et de masse dans un distillateur solaire utilisant l'effet de serre, ne se font qu'au niveau d'une mince couche adjacente de la surface d'évaporation à la surface de condensation, cette couche est de

l'ordre de 15 *mm* , tout le reste, constitue une couche appelée couche Tampon, qui est une couche ayant une température constante et ne participant pas aux différents transferts. Par conséquent, une augmentation de la hauteur, fait augmenter l'épaisseur de la couche tampon qui tend à s'opposer aux échanges entre la surface de condensation et la surface d'évaporation.

1.2.5.2.2.d. Epaisseur de l'eau à distiller:

Etudier l'influence de ce paramètre revient à considérer les effets d'accumulation thermique sur la production du distillateur.

La différence entre les distillateurs, à petite et à grande épaisseur de l'eau saumâtre, est notable pour les distillateurs dont la base est isolée thermiquement. La production est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible ; d'autre part, plus l'épaisseur de l'eau saumâtre est grande, plus longtemps dure la distillation après le coucher du soleil [21,26,28,31].

1.2.5.2.2.e. La température de l'eau saumâtre. M.MAALEM à observé, sur le distillateur étudie sur le site de Bouzareah le phénomène suivant:

Lorsque la température de l'eau saumâtre augmente, il observe un dépôt blanc sur la surface libre de l'eau du à la formation de carbonates insolubles dans l'eau saumâtre. Ceci empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface absorbante, entraînant ainsi une baisse dans la production [30].

1.2.5.2.2.f. Effet de la concentration de sels sur le processus d'évaporation:

La production diminue lorsque la concentration est élevée, ce qui fait augmenter la corrosion des structures physiques du distillateur. D'où la nécessite d'utiliser des matériaux qui ne s'oxydent pas [21,30].

1.2.5.2.3. Paramètres optiques:

Les paramètres optiques sont: l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmissivité de la surface absorbante et de la couverture.

1.2.5.2.4. Paramètres thermo-physiques:

Les paramètres thermo-physiques sont représentés par:

- La couverture et la surface absorbante: la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.
- L'eau saumâtre: la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique.
- Le mélange air-vapeur: la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique et le coefficient de dilatation thermique.

En plus de cette technique de dessalement (distillation solaire) citée précédemment, il existe d'autres techniques.

1.2.6.1. Procédés à membrane :

On peut envisager une séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives. Il existe deux procédés utilisant de telles membranes qui sont actuellement commercialisés : ce sont l'osmose inverse et l'électrodialyse.

1.2.6.1.1. Osmose inverse :

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère le système suivant (figure (1.12)) [32, 33] constitué d'un récipient divisé en deux parties contenant d'un coté la solution concentrée et de l'autre de d'eau douce, il y a un flux d'eau douce qui se traduit par l'abaissement du niveau du compartiment d'eau douce et l'élévation du niveau dans la partie concentrée. La différence de niveau correspond à la pression osmotique [15, 33].

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte. Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique : c'est le phénomène d'osmose inverse.

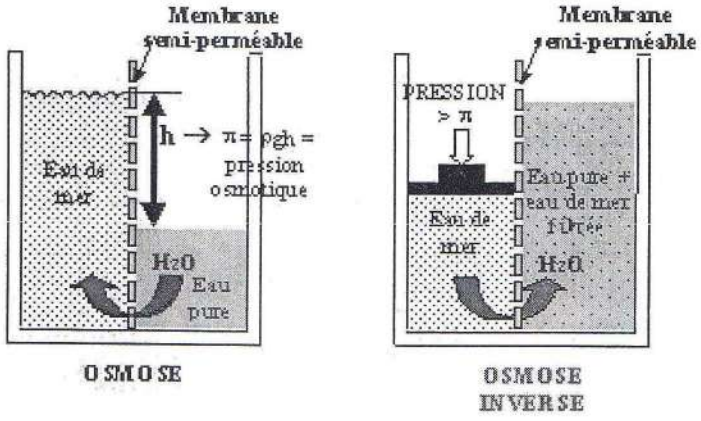


Figure (1.12) : Principe de l'osmose et l'osmose inverse.

1.2.6.1.2. Electrodialyse :

L'électrodialyse est le procédé à membranes le plus ancien puisque la première installation date des années 1960. Ce procédé consiste à éliminer les sels dissous dans l'eau saumâtre par migration à travers des membranes sélectives sous l'action d'un champ électrique.

L'électrodialyse est une méthode électrochimique. Le principe de l'électrolyse est bien connu. (La figure (1.13) représente ce principe [32]). Les ions d'un sel dissous dans l'eau, comme le chlorure de sodium par exemple, se déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide. Les ions positifs ou cations (Na^+) sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont attirés par l'électrode positive [33, 34].

Dans l'électrodialyse, on ajoute alternativement des membranes filtrantes soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration.

Ce procédé est particulièrement intéressant pour le traitement des eaux saumâtres, surtout pour celle dont la salinité ne dépasse pas 5 g/l [34], mais rien ne s'oppose techniquement à ce qu'on applique ce procédé pour dessaler des eaux beaucoup plus chargées en sels et même de l'eau de mer, bien que la consommation d'énergie électrique soit alors beaucoup plus grande.

Les membranes utilisées en électrodialyse laissent passer les ions mais sont imperméable à l'eau, c'est exactement l'inverse pour les membranes utilisées en osmose inverse.

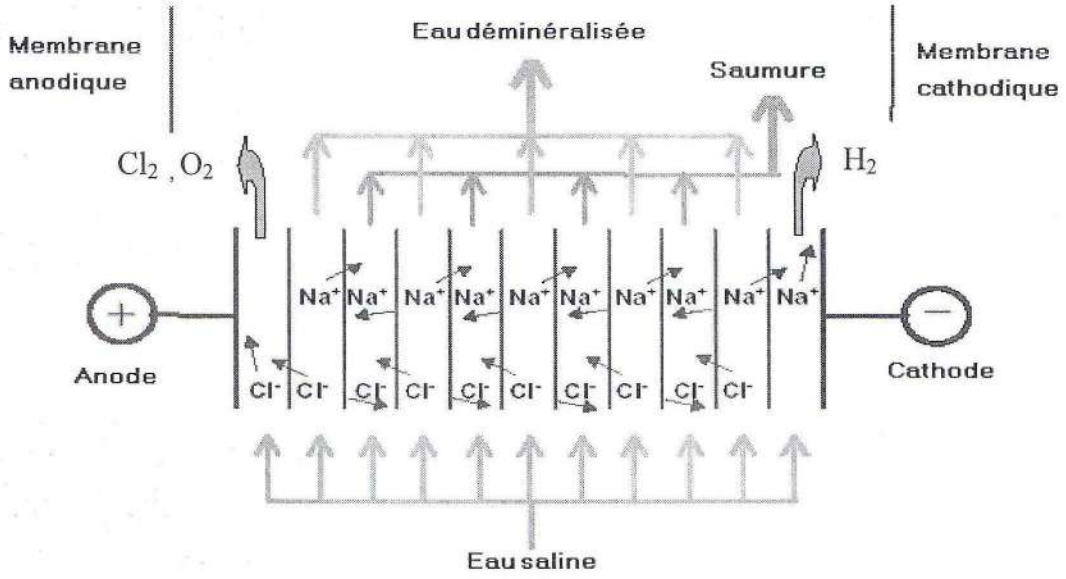


Figure (1.13) : Principe du dessalement par électrodialyse.

1.2.6.2. Procédés de distillation :

C'est une opération qui transforme par chauffage, l'eau salée en vapeur. Lorsque de l'eau s'évapore, la vapeur ne contient plus de sels et l'eau obtenue en la condensant est donc douce. Tous les procédés de distillation suivent ce principe qui comporte trois phases : production de vapeur, transfert à un condenseur et condensation. Cependant les techniques utilisées ainsi que les mécanismes de récupération d'énergie sont nombreuses.

1.2.6.2.1. Multiple effets :

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1^{er} effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le $2^{ème}$ effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le $2^{ème}$

effet et ainsi de suite (voir figure (1.14) [32, 33]). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m^3 d'eau douce produite) [33, 35]. Il existe plusieurs variantes d'évaporateurs multiples effet. Nous n'en citerons que deux :

1. Les évaporateurs multiple effets à longs tube verticaux appelée couramment LTV (ou VTE pour Vertical Tube Evaporator) ont été brevetés en 1905 par le français KESTNER [35].
2. Les évaporateurs multiples effet à tubes horizontaux arrosés et à tubes horizontaux noyés, appelles THA (ou HTME pour Horizontal Tube Multiple Effet) [36,37].

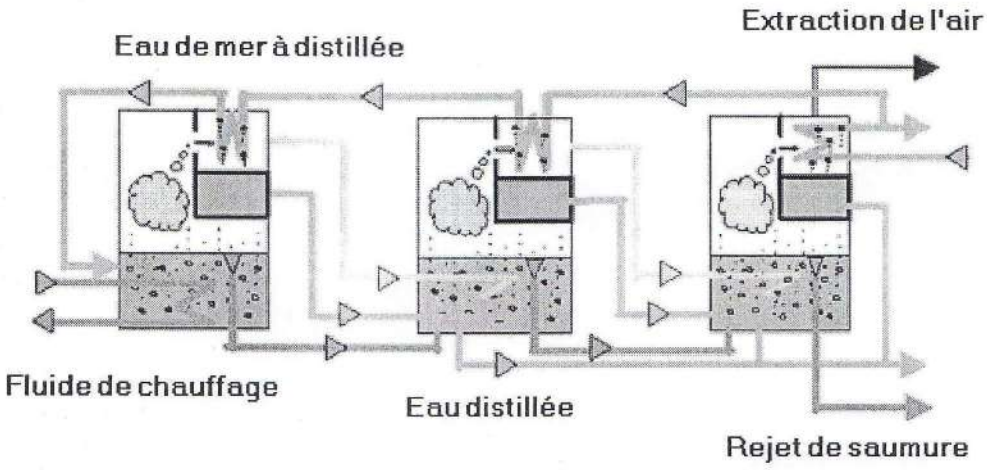


Figure (1.14) : Schéma du procédé de distillation multiple effet.

1.2.6.2.2. Procédés par détentes successives ou « Multi Stage Flash » MSF :

Ce procédé s'est tout particulièrement développé à partir de 1950 [36] par suite des difficultés dues à l'entartrage des surfaces d'échange de la distillation à multiples effets en particulier dans les évaporateurs noyés [38]. En effet, dés que, dans l'eau de mer chaude une bulle de vapeur se forme le long d'un tube d'échange, il y a concentration sur les parois des sels peu solubles.

La première installation industrielle fonctionnant suivant le procédé Multiple Stage Flash « MSF » à été construite au Koweït en 1957 et depuis lors ce procédé a connu un développement considérable principalement dans les pays du Golf.

Dans le procédé de distillation par détentes successives, l'eau de mer est maintenue sous pression pendant toute la durée du chauffage d'abord dans les condenseurs placés en série puis dans un préchauffeur : les risques d'entartrage sont donc réduits. L'eau de mer chaude est ensuite introduite dans une chambre où règne une pression inférieure à la pression de saturation. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente : une fraction de l'eau s'évapore, va se condenser sur les tubes de condenseurs et est recueillie dans des réceptacles. (Voir la figure (1.15) [32, 33]).

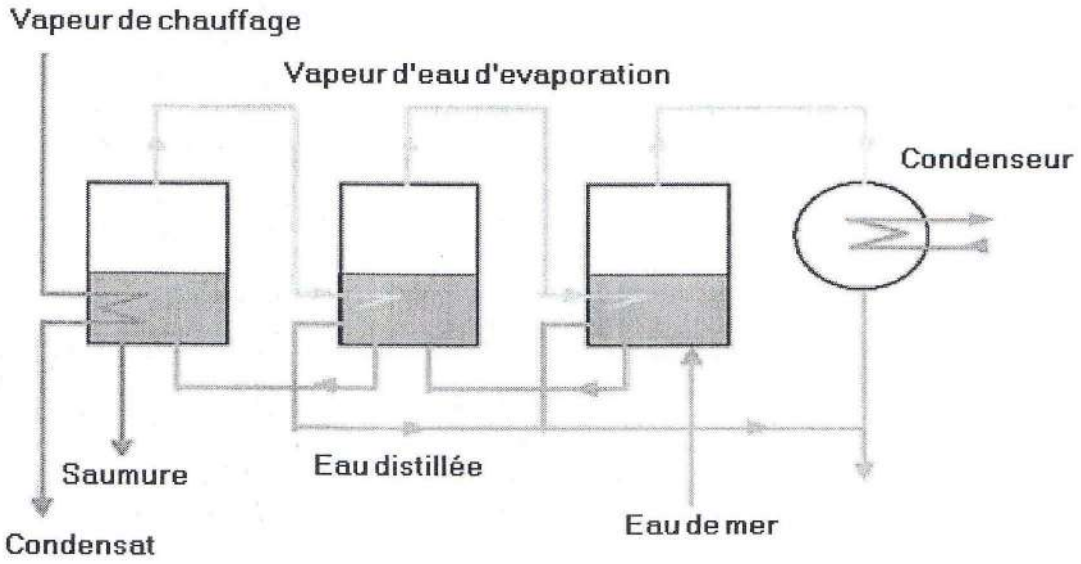


Figure (1.15) : Schéma du procédé de distillation flash.

1.2.6.2.3. Compression de la vapeur :

Ce procédé fonctionne exactement sur le principe d'une pompe à chaleur où c'est un compresseur qui fournit de l'énergie (Figure (1.16) [32]). La vapeur produite est comprimée adiabatiquement ce qui accroît sa température de saturation. Lors de sa condensation elle peut donc transmettre sa chaleur de vaporisation à l'eau salée avec un bon gradient thermique, ce qui permet un bon rendement. Le compresseur assure une faible pression dans la cellule

2

Transfert thermique

2.1. Introduction :

La distillation de l'eau a pour but la séparation des sels et des particules des matières solides de l'eau qui les tient en dissolution.

Le principe de la distillation solaire à effet de serre est assez simple. Il s'agit en effet de faire évaporer de l'eau sous l'action du flux solaire puis condenser la vapeur qui en résulte sur une surface froide. Les mécanismes mis en jeu sont le transfert de chaleur, le changement de phase et la diffusion moléculaire c'est-à-dire les transferts simultanés de chaleur et de masse.

2.2. Transfert de chaleur :

2.2.1. Expression des flux d'énergie :

Il faut maintenant établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, nous obtiendrons l'équation différentielle dont la résolution permettra de connaître l'évolution de la température en chaque point de distillateur solaire.

2.2.1.1. Conduction :

La conduction c'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [39].

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \vec{grad}(T) \qquad (W) \qquad (2.1)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu $(W/m.°C)$

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

2.2.1.2. Convection :

Dans un processus de convection le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [40].

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty) \qquad (W) \qquad (2.2)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection $(W/m^2.°C)$

T_p : Température de la surface solide $(°C)$

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide $(°C)$

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

On distingue deux sortes de convection :

2.2.1.2.a. La convection libre ou naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences des températures sur les frontières et d'un champ de force extérieur (la pesanteur).

2.2.1.2.b. La convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur…).

2.2.1.2.c. Détermination du coefficient h :

Le coefficient h est un élément essentiel des calculs d'échange de chaleur par convection. Il est lié avec le nombre de Nusselt par la relation suivante :

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \qquad \text{Nombre de Nusselt} \qquad (2.3)$$

Et:

$$Nu = f(Gr, \mathrm{Pr}) \qquad \text{Pour la convection naturelle} \qquad (2.4)$$

$$Nu = f(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}) \qquad \text{Pour la convection forcée} \qquad (2.5)$$

Où:

$$Gr = \frac{\beta\, g\, \Delta T\, \rho^2\, L^3}{\mu^2} \qquad \text{Nombre de Grashoff} \qquad (2.6)$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{c_p\, \mu}{\lambda} \qquad \text{Nombre de Prandtl} \qquad (2.7)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho\, \mathrm{V}\, L}{\mu} \qquad \text{Nombre de Reynolds} \qquad (2.8)$$

Avec : $h = \dfrac{\lambda\, Nu}{L}$ (2.9)

2.2.1.3. Rayonnement :

La radiation thermique caractérise un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Contrairement au processus de transfert de chaleur par conduction ou par convection. Le transfert thermique par radiation n'est pas lié à la matière. On prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation [41] :

$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S\left(T_p^4 - T_\infty^4\right) \tag{2.10}$$

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stephan-Boltzmann $\left(\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ W\ /m^2.K^4\right)$

ε_p : Facteur d'émission de la surface (émissivité)

T_p : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

S : Aire de la surface $\left(m^2\right)$

A une température définie, un corps noir émet une valeur maximale en énergie par radiation, caractéristique à cette température.

2.2.1.3.a. Flux réfléchi, absorbé et transmis :

Lorsqu'un récepteur reçoit un rayonnement thermique en général [40].

Une fraction ρ du flux incident ϕ_i, est réfléchie ou diffuse.

Une fraction a du flux incident ϕ_i , est absorbée par le récepteur.

Et une fraction τ du flux incident ϕ_i est transmise.

Les fractions ρ, a et τ dépendent du domaine de longueur d'onde du rayonnement incident et sont liées par la relation évidente :

$$\rho + a + \tau = 1 \tag{2.11}$$

2.2.1.3.b. Corps noir. Emittance. Loi de Stefan :

1- Définition d'un corps noir :

C'est un récepteur thermique qui absorbe intégralement toute l'énergie incidente qu'il reçoit ; son facteur d'absorption [40]:

$$a = \frac{\phi_{absorbé}}{\phi_{incident}} = 1 \qquad (2.12)$$

2- Emittance d'une source rayonnante :

On caractérise une source de rayonnement par son émittance M définie par la puissance totale émise par unité de surface de la source :

$$M = \frac{dP_{emise}}{dS_{source}} = \frac{d\phi_{emis}}{dS_{source}} \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (2.13)$$

L'émittance M s'exprime en $\left(W / m^2\right)$

3- Loi de Stefan :

Un corps noir, isotherme à la température T, émet un rayonnement dont l'emittance est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température T.

$$M^0 = \left(\frac{d\phi_{emis}}{dS}\right)_{corps\ noir} = \sigma T^4 \qquad (2.14)$$

En simplifiant, on lui donne la forme suivante [42, 43]:

$$Q_S = C_S\left(\frac{T}{100}\right)^4 \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (2.15)$$

C_S : Constante de radiation du corps noir, $C_S = 5.67\ W / m^2$

T : Température en degré $\left(°C\right)$

2.2.1.3.c. Corps gris. Emissivité :

1- Définition d'un corps gris [40] :

C'est un récepteur thermique qui absorbe partiellement l'énergie incidente qu'il reçoit, donc son facteur d'absorption n'est pas égal à l'unité : $0 < a < 1$.

2- Coefficient d'émissivité global ε :

L'émissivité d'un corps gris à la température T est :

$$M = \left(\frac{d\phi_{emis}}{dS_{source}} \right)_{corps\ gris} = \varepsilon \sigma T^4 \Rightarrow \varepsilon = \frac{M}{M^0} \quad (2.16)$$

Où ε est le coefficient d'émissivité globale du corps gris : $0 < \varepsilon < 1$.

2.2.1.3.d. Echange par rayonnement entre deux corps:

Entre deux corps noirs, l'un chaud (température T_1), l'autre froid (température T_2), en vis-à-vis total (c'est-à-dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre), le flux net échangé s'écrit $\phi = flux\ emis - flux\ absorbé = S\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)$.

Si les deux corps ne sont pas en vis-à-vis total, on fait intervenir un facteur de forme $F_{1,2}$ qui tient compte de la géométrie considérée.

De la même façon, le flux net échangé entre deux corps gris s'écrit $\phi = S_1 F_{1,2} \sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)$, où le facteur de forme fait intervenir cette fois la géométrie considérée et les émissivités de deux corps [40].

- Dans le cas de deux surfaces grises parallèles: $F_{1,2} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1}$

- Dans le cas de deux surfaces grises dont l'une (S_2) entoure complètement l'autre (S_1): $F_{1,2} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1} + \dfrac{S_1}{S_2}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$

2.2.1.3.e. Gisement solaire:

1. Introduction:

Le soleil est une sphère gazeuse d'hélium et d'hydrogène (80 % H_2, 19 % H_e, 1 % autre éléments) son diamètre d'environ $1.39 \times 10^9\ m$, et sa masse est de l'ordre de $2 \times 10^{30}\ Kg$, son age est d'environ $4.6 \times 10^6\ ans$. Sa distance moyenne à la terre est de $1495 \times 10^5\ Km$. Sa densité moyenne au centre est de $76 \times 10^3\ Kg/m^3$ au centre [44], la masse du soleil représente 99.85 % de la masse totale du système solaire et 33×10^4 fois celle de la terre.

La température de cœur est de l'ordre de $10^7\ K$ tandis que la température à la surface du soleil $5760\ K$ [45].

La terre est considérée ici comme une sphère ayant un diamètre égal à $1.27\times10^7\ m$ donc 100 fois plus petit que celui du soleil. Elle est entourée de l'atmosphère où la pression de l'air diminue quant l'altitude augmente.

2. Mouvement de la terre :

2.1. Révolution autour du soleil :

La terre se déplace autour du soleil d'une trajectoire elliptique, la révolution complète s'effectue en une année sidérale de 365 jours, 6 heures, 9 minutes et 10 secondes [46].

Cette révolution faite varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices :

- Equinoxe de printemps correspond à 21 Mars.
- Equinoxe d'automne correspond à 23 Septembre.
- Solstice d'été correspond à 22 Juin.
- Solstice d'hiver correspond à 22 Décembre.

2.2. Rotation sur elle-même :

La rotation de la terre autour de l'axe des pôles d'Ouest en Est (fois/jour), s'effectue en une journée sidérale de 23 heures, 56 minutes et 4 secondes[47].

L'axe des pôles fait une inclinaison de 23.45 degrés par rapport à la normale à l'écliptique.

Cette rotation produit l'alternance du jour et de la nuit.

3. Les coordonnées célestes [45]:

3.1. Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre :

3.1.1. La longitude : λ

C'est un angle donné par rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les deux pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'Est.

3.1.2. La latitude : φ

La distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (0- 90° dans l'hémisphère Nord).

3.1.3. L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer). On l'exprime généralement en mètre.

Les coordonnées géographiques sont représentées dans la figure (2.1).

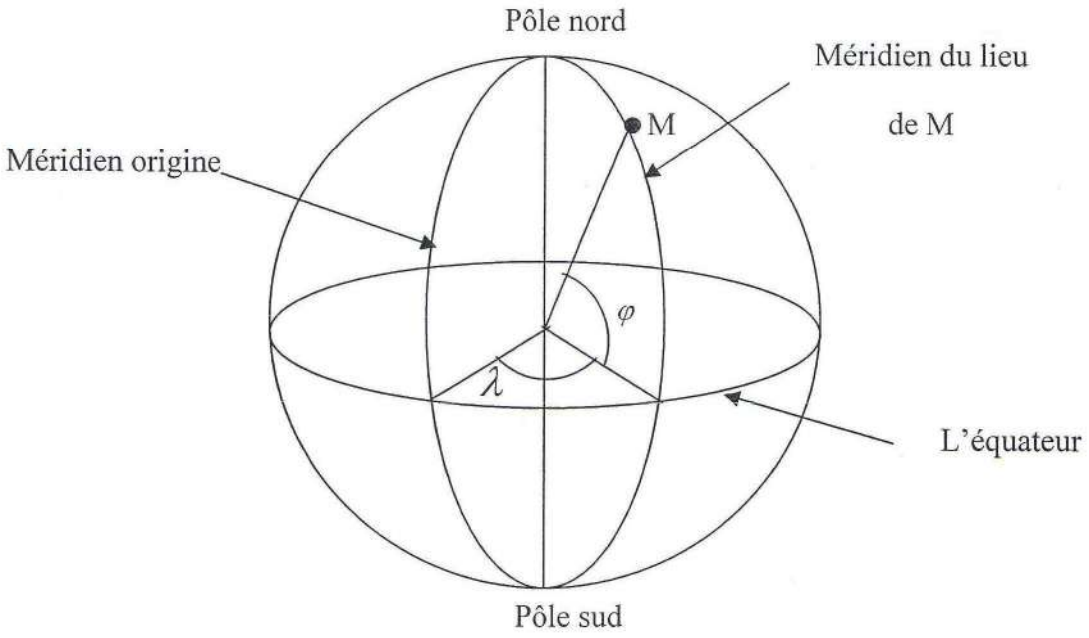


Figure (2.1): Représentation des coordonnées géographiques.

3.2. Les coordonnées horaire :

3.2.1. La déclinaison : δ

C'est un angle formé par l'axe terre-soleil avec le plan de l'équateur à un mouvement donné de l'année. Elle vaut 23° 27 au solstice d'Eté et -23° 27 au solstice d'Hiver et est nulle aux équinoxes et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{284+n}{365}360\right) \quad (°) \qquad (2.17)$$

Où :

n : Le numéro du jour dans l'année compte à partir du 1er Janvier.

3.2.2. L'angle horaire : ω

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360°.

Les coordonnées horaires sont représente dans la figure (2.2).

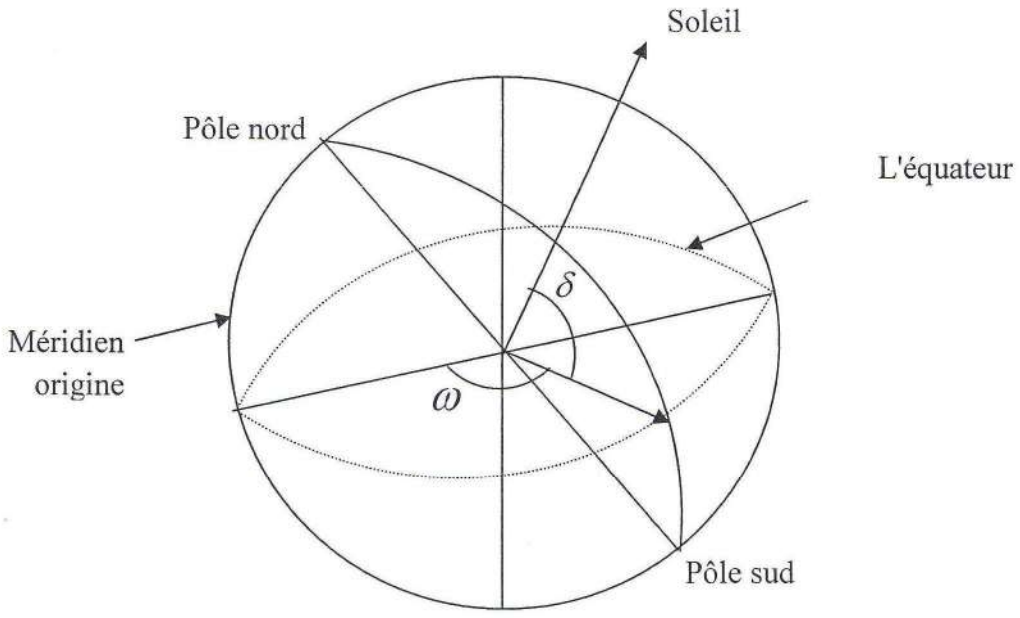


Figure (2.2): Représentation des coordonnées horaires.

3.3. Les coordonnées horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

3.3.1. L'azimut : a

Ou angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Il est compté de 0° à 360° d'Ouest en Est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'Ouest.

3.3.2. La hauteur : h

Ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le Zénith de 0° à 90° vers le Nadir.

On appelle quelquefois distances Zénithal le complément de l'angle h.

Les coordonnées horizontales sont représentées dans la figure (2.3).

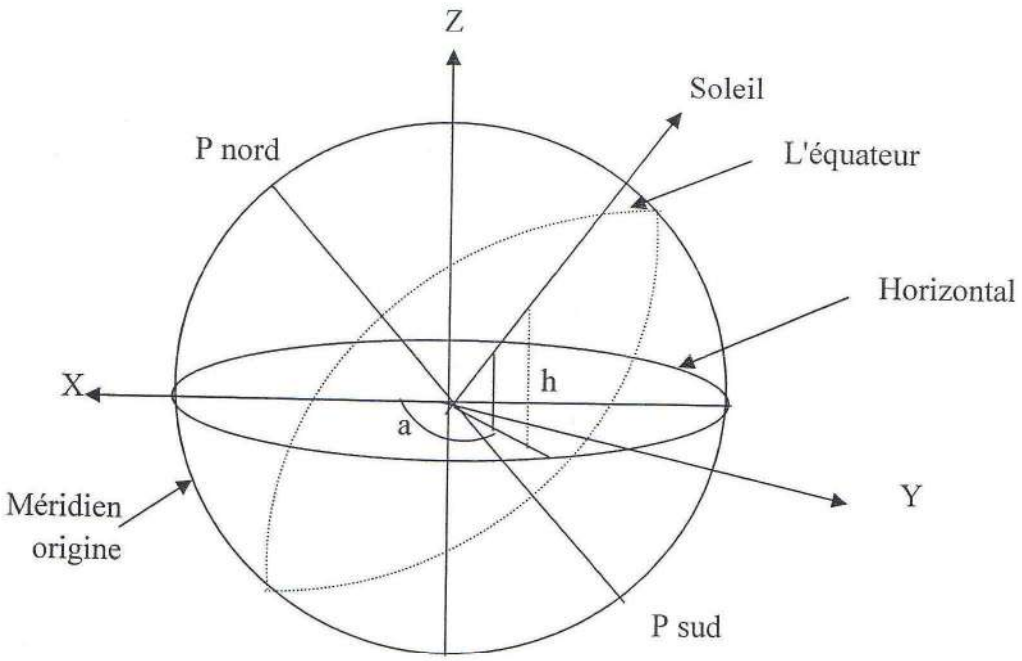


Figure (2.3): Représentation des coordonnées horizontales.

4. Les différents temps solaire :

4.1. Durée du jour:

Au coucher ou au lever du soleil $(\sinh = 0)$, et puisque:

$\sinh = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega$; Aussi: $\cos\varphi \cos\delta (\cos\omega + tg\,\delta tg\,\varphi) = 0$

On tire: $\cos(\omega_S) = -tg\,\delta tg\,\varphi$ $\omega_C > 0$, $\omega_L < 0$; $\omega_C = -\omega_L$

La durée du jour (d) est donnée en heures par l'équation [45]:

$$d = \frac{\omega_C - \omega_L}{15} \tag{2.18}$$

Avec:

$$d(h) = \frac{2}{15}\left(\cos^{-1}\left(-tg\,(\delta) tg\,(\varphi)\right)\right) \tag{2.19}$$

4.2. Temps solaire vrai : TSV

Le temps solaire vrai (TSV) représente l'angle horaire formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan méridien vertical du lieu [45].

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \tag{2.20}$$

ω : L'angle horaire.

4.3. Temps solaire moyen : TSM

Le temps solaire moyen (TSM) est défini par le temps local d'origine [47]:

$$TSM = TSV - E_t \tag{2.21}$$

Où:

$$E_t = 9.87\ \sin(2x) - 7.53\ \cos(x) - 1.5\ \sin(x) \tag{2.22}$$

$$x = \frac{360}{365}(n-81) \tag{2.23}$$

E_t : L'équation du temps donnée en minute.

4.4. Temps Universel : TU :

Le temps universel est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)[46].

$$TU = TL - N = TSM - \frac{\lambda}{15} \tag{2.24}$$

Où :

λ : Longitude en degré.

4.5. Temps légal : TL

Le temps légal est lié au temps universel TU par une différence fixe par un nombre (N) [45].

Avec:

$$TL = TU + N \tag{2.25}$$

N : Le décalage horaire entre le Méridien de Greenwich et l'état considéré.

$N = 1$ heure : Pour l'Algérie.

5. Rayonnement solaire :

L'énergie solaire est une énergie rayonnante de courte longueur d'onde, l'intensité globale du rayonnement solaire arrivant aux confins de l'atmosphère est constante et égale à 1.94 $cal / mm.cm^2$ normale au rayon. Soit $I_0 = 1353\,W/m^2$, cette valeur s'appelle constante solaire qui dépend de la distance terre-soleil est corrigée par le facteur de correction C [47] :

$$C(n) = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(n-2)\right) \tag{2.26}$$

5.1. Rayonnement solaire et l'atmosphère :

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère. Il subit diverses atténuations que l'on peut classer en deux types : atténuation par absorption et atténuation par diffusion.

5.1.1. Structure et composition de l'atmosphère :

On peut considérer que l'atmosphère est constituée de trois couches [45]:

- La troposphère qui s'étend jusqu'à 10 à 15 Kms où la température décroît avec latitude.
- La stratosphère qui s'étend jusqu'à 16 à 55 Kms où la température croit faiblement.
- L'ionosphère qui s'étend jusqu'à 700 Kms .

Les deux premières couches sont constituées de 78% d'azote, 21% d'oxygène, 0.9% d'argon, 0.03 % de CO_2 et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère.

L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère.

5.2. Rayonnement solaire au sol :

Le rayonnement solaire arrivant au sol a deux composantes : un composante directe d et une composante diffuse D [48].

5.2.1. Le rayonnement directe : C'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modification.

5.2.2. Le rayonnement diffus : C'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilège.

5.2.3. Le rayonnement global : C'est la somme du rayonnement direct et diffus.

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le Tableau (1) [45].

Irradiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée (W/m^2) où (Kwh/m^2)	Directe	d	$G = d + D$
	Diffuse	D	
	Globale	G	
Eclairement solaire Flux instantané W/m^2	Direct	d^*	$G^* = d^* + D^*$
	Diffus	D^*	
	Globale	G^*	

Tableau (2.1): Rayonnement solaire sur un plan horizontal: notations utilisées.

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par H. Nous désignerons par :

I : L'énergie reçue (irradiation en KWh/m^2).

I^* : Le flux reçu (éclairement en W/m^2).

Nous avons la relation suivante :

$$d^* = I^* \sin(h) \tag{2.27}$$

5.3. La puissance du rayonnement solaire :

5.3.1. Rayonnement direct :

5.3.1.1. Eclairement d* :

L'éclairement solaire direct d^* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

a- Par mesure de G^* et D^*, on en déduit $d^* = G^* - D^*$ (à partir de l'expérience).

b- A partir de la mesure de l'irradiation journalière globale G, on évalue l'irradiation journalière diffuse D par la corrélation de Collares-Pereira et Rabl [45]:

$$\begin{cases} D = 0.99\ G & K_T \leq 0.17 \\ D = \left(1.188 - 2.272\ K_T + 9.473\ K_T^2 - 21.865\ K_T^3 + 14.648\ K_T^4\right) G & 0.17 \leq K_T \leq 0.75 \\ D = \left(-0.54\ K_T + 0.632\right) G & 0.75 \leq K_T \leq 0.80 \\ K_T = \dfrac{G}{G_0} & \end{cases} \quad (2.28)$$

G_0 : étant l'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au-dessus de l'atmosphère calculable par :

$$G_0 = \frac{24}{\pi} I^* \cos(\varphi)\cos(\delta)\left(\sin(\omega_s) - \frac{\pi\omega_s}{180}\cos(\omega_s)\right) \quad (2.29)$$

$$I^* = I_0(1 + 0.033\cos 0.984n)$$

Où:

I_0 : Constante solaire. $I_0 = 1353\ W/m^2$

ω_s : est en degré, et G_0 en Wh/m^2

On calcule ensuite $d = G - D$ on est ramené au cas précédent.

c-On ne dispose d'aucune mesure : on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation suivante [45]:

$$I^* = 1370\ \exp\left(-\frac{T_L}{0.9 + 9.4\sin(h)}\right) \quad (2.30)$$

Où T_L est le facteur de trouble de Linke calculable par :

$$T_L = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta)\ln(P_v) \quad (2.31)$$

β : Coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à :

β =0.05 en zone rurale.

β=1 en zone urbaine.

β=0.2 en zone industrielle ou polluée.

P_v : est la pression partielle de la vapeur d'eau exprimée en $mmHg$

On en déduit $d^* = I^* \sin(h)$.

5.3.1.2. Irradiation directe journalière d :

L'irradiation directe journalière d sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

a- Par mesure directe de G et de D on en déduit $d = G - D$.(à partir de l'expérience).

b- Par intégration sur la journée des valeurs de $d^* = I^* \sin(h)$, I^* étant calculé par la formule (2.30).

5.3.2. Rayonnement diffus :

5.3.2.1. Eclairement D* :

L'éclairement solaire diffus D^* sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs méthodes en fonction des données disponibles :

a- Par mesure directe (l'expérience).

b- Par utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure:

$$D^* = 54.8\left(\sin(h)\right)^{1/2}\left(T_L - 0.5 - \left(\sin(h)\right)^{1/2}\right) \qquad (2.32)$$

Où :

T_L : est le facteur de trouble de Linke calculable par la formule (2.31).

5.3.2.2. Irradiation D :

L'irradiation diffuse journalière D sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs méthodes :

a- Par mesure directe (à partir l'expérience).

b- Par intégration des valeurs de D^* données par la corrélation (2.32) en l'absence de toute donnée.

2.3. Transfert de masse :

Dans un milieu de compensation hétérogène, où les concentrations, les températures et les vitesses locales sont différentes, on constate un déplacement d'un point à un autre. Ce transport de matière, effectué par brassage, par convection ou par diffusion moléculaire, est appelé transfert de masse. La loi de Fick traduit ce transfert.

2.3.1. Lois de Fick [49, 50]:

2.3.1.1. Equation de conservation de la masse:

L'équation de conservation de la masse est obtenue à partir d'un bilan dans un volume de contrôle qui s'écrit:

$$\left\{\text{Débit entrant}\right\} - \left\{\text{Débit sortant}\right\} = \left\{\text{Débit accumulé}\right\} \tag{2.33}$$

$$-div\left(\rho\vec{u}\right)=\frac{\partial\rho}{\partial t} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial\rho}{\partial t}+div\,\vec{\phi}=0 \tag{2.34}$$

Pour un constituant dans un mélange, l'équation de conservation de la masse s'écrit:

$$\left\{\text{Débit de i entrant}\right\} - \left\{\text{Débit de i sortant}\right\} + \left\{\text{Débit de i produit}\right\} = \left\{\text{Débit de i accumulé}\right\} \tag{2.35}$$

Soit:

$$-div\left(\overline{c_i}\ \overline{u_i}\right)+p_i=\frac{\partial\overline{c_i}}{\partial t} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial\overline{c_i}}{\partial t}-p_i+div\,\vec{\phi}=0 \tag{2.36}$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} - p_i^* + div\,\overrightarrow{\phi_i^*} = 0 \qquad (2.37)$$

p_i : Débit volumique de i produit par réaction chimique (c'est la masse de i produite par unité de temps et de volume de réaction chimique).

2.3.1.2. 1er loi de Fick:

La première loi de Fick exprime que la densité de flux de diffusion d'un constituant A, au sein d'une phase est proportionnel au gradient de la teneur de ce constituant. Elle s'écrit:

$$\overrightarrow{J_i} = -cD_{ij}\,\overrightarrow{gradr_i} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{J_i} = -\rho D_{ij}\,\overrightarrow{grad\,\omega_i} \qquad (2.38)$$

D_{ij} : est appelée coefficient de diffusion de i dans j (dans le cas d'un binaire) ou diffusivité. Il est fonction de la température, de la pression, du binaire considéré et parfois de la concentration totale.

Dans le cas où la concentration totale est constante, la loi de Fick s'écrit:

$$\overrightarrow{J_i} = -D_{ij}\,\overrightarrow{gradc_i} \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{J_i} = -D_{ij}\,\overrightarrow{grad\,c_i} \qquad (2.39)$$

2.3.1.3. 2éme loi de Fick:

La densité de flux de transport d'un constituant i est égale à la somme de deux termes: un terme de convection et un terme de diffusion. Il est exprimé par la relation suivante:

$$\overrightarrow{\phi_i} = \overline{c_i}\,\vec{u} + \overrightarrow{J_i} \quad \text{où} \quad \overrightarrow{\phi_i^*} = c_i\,\overrightarrow{u^*} + \overrightarrow{J_i} \qquad (2.40)$$

En substituant l'équation (2.39) dans l'équation (2.37) et en utilisant l'équation (2.40), on obtient:

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} - p_i + div\left(\overline{c_i}\,\vec{u} - D_{ij}\,\overrightarrow{grad\,\overline{c_i}}\right) = 0 \qquad (2.41)$$

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} - p_i + \vec{u}.\overrightarrow{grad\,\overline{c_i}} + \overline{c_i}\,div\,\vec{u} - D_{ij}\Delta\overline{c_i} - \overrightarrow{grad\,\overline{c_i}}.\overrightarrow{gradD_{ij}} = 0$$

Dans le cas où ρ c'est-à-dire $\overline{c}$ et D_{ij} sont constantes, l'équation (2.34) donne:

$$div\,\vec{\phi} = div\,\rho\vec{u} = \rho div\,\vec{u} = 0$$

Et on obtient:

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} + p_i + \vec{u}.\overrightarrow{grad\,c_i} = D_{ij}\Delta\overline{c_i} \qquad (2.42)$$

Dans le cas d'un système immobile (par exemple fermé) et en l'absence de réaction chimique, l'équation précédente devient:

$$\frac{\partial \overline{c_i}}{\partial t} = D_{ij}\Delta\overline{c_i} \qquad \text{ou} \qquad \frac{\partial c_i}{\partial t} = D_{ij}\Delta c_i \qquad (2.43)$$

Cette équation est appelée 2^{éme} loi de Fick.

2.3.2. Transfert de masse isotherme :

Le transfert de masse est dit isotherme lorsqu'il concerne un milieu matériel au repos et à la température constante, le mouvement de matière (transfert de masse) est dû uniquement au gradient de concentration entre les différents points du milieu.

Dans ce cas, l'équation de transfert de chaleur est analogue à celle de la diffusion moléculaire telle que l'équation de Fourier au transfert de chaleur est remplacée par l'équation de Fick au transfert de masse. Ceci s'effectue par remplacement de température par la concentration. Ainsi, les nombres de Nusselt, Prandtl, et de Grashoff thermique sont remplacés respectivement par les nombres de Sherwood, Schmidt et de Grashoff massique, et la conductivité thermique par le coefficient de diffusion massique.

2.4. Transfert de chaleur lors de l'évaporation et de la condensation:

2.4.1. Transfert de chaleur lors de l'évaporation :

L'évaporation de l'eau se compose de deux phénomènes, le premier est le moteur de l'opération, et le deuxième n'est qu'une conséquence à savoir [41]:

Dans le premier temps le gradient de pression partielle provoque le déplacement des molécules de vapeur d'eau c'est la diffusion en phase gazeuse.

Dans le deuxième temps, au niveau de l'interface eau-air la transformation liquide-vapeur a lieu afin de maintenir l'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur qui est perturbée par le mouvement de diffusion. Ce phénomène est la vaporisation.

La vaporisation s'accompagne généralement de la formation de la vapeur dans le liquide qui atteint une température un peu supérieure à celle de saturation du même liquide à pression considérée.

L'écart de température entre l'eau et l'air produit simultanément un transfert de chaleur, appelé transfert de chaleur sensible et un transfert de masse accompagné d'un transfert de chaleur, appelé « transfert de chaleur latente », pour caractériser ces échanges sur un élément de surface liquide, on introduit des coefficients de transfert définis par les relations suivantes :

- **Transfert de chaleur sensible :**

$$dq_s = h(T_w - T_0)dS \tag{2.44}$$

- **Transfert de masse :**

$$dm^{\bullet} = h_{cc}(c_w - c_0)dS \tag{2.45}$$

Avec :

$dm^{\bullet}$: Débit d'eau évaporée sur la surface du liquide (Kg/s).

h_{cc} : Coefficient de transfert de masse, relatif à la concentration (m^2/s).

$c_{w.0}$: Concentration en vapeur d'eau (Kg/m^3).

Comme la concentration est liée à la pression partielle P_v, on a la relation :

$$dm^{\bullet} = \frac{h_{cc}}{R_v T}(P_{sat}(T_w) - P_{v0})dS \tag{2.46}$$

Ce transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur latente dq_L défini par la relation :

$$dq_L = L_v(T_w)dm^{\bullet} = L_v(T_w)\frac{h_{cc}}{RT}(P_{sat}(T_w) - P_{v0})dS \tag{2.47}$$

La puissance totale échangée entre l'air et l'eau est donc :

$$dq_T = dq_s + dq_L \tag{2.48}$$

$$dq_T = \left(h(T_w - T_0) + L_v(T_w)\frac{h_{cc}}{RT}(P_{sat}(T_w) - P_{v0}) \right) dS \tag{2.49}$$

2.4.2. Transfert de chaleur lors de la condensation :

Le passage d'une substance de l'état gazeux (vapeur) à l'état liquide est appelé condensation.

Le modèle théorique fondamental de ce processus a été établi par Nusselt en 1916, sur la base des hypothèses suivantes [51, 52]:

- La vapeur est pure, au repos, saturée à la température du saturation T_{sat} correspondant à la pression d'alimentation P_v de l'enceinte.
- La température T_p de la paroi est constante sur toute sa surface et le phénomène est permanent (les paramètres en chaque point sont indépendants du temps)
- Le film liquide s'écoule vers le bas sous l'effet de la force de pesanteur et son épaisseur reste suffisamment faible pour que le régime d'écoulement dans le film soit laminaire.
- En se condensant, la vapeur libère sa chaleur latente de vaporisation et le liquide formé est refroidi à une température inférieure à T_{sat}. La chaleur ainsi dégagée se transmet par conduction à travers le film.

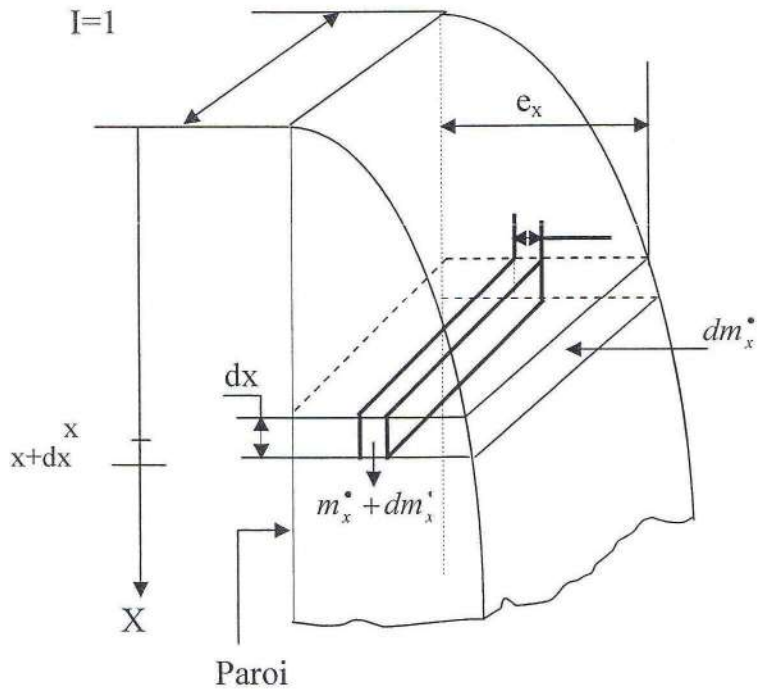


Figure (2.4): Condensation en film d'un fluide sur une paroi verticale.

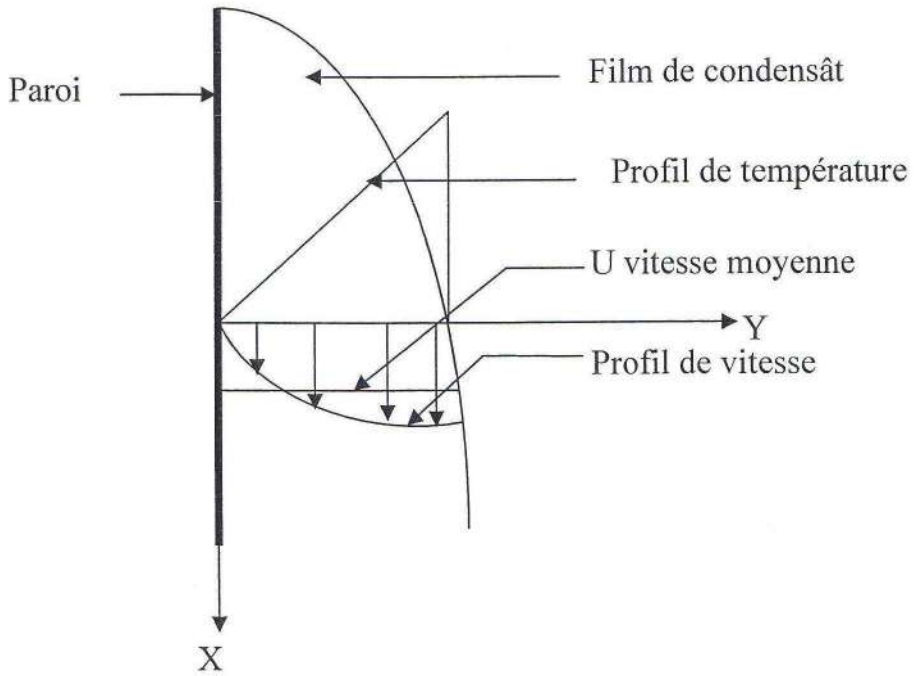


Figure (2.5): Condensation en film d'un fluide sur une paroi verticale.

Le volume $1dxdy$ est en équilibre sous l'effet de la force de pesanteur (diminuée de la poussée d'Archimède due à la vapeur) et des contraintes tangentielles de viscosité. On a donc selon l'axe X :

$$(\rho_l - \rho_v)gLdxdy + \left(\mu_l L dx \frac{dU}{dy}\right)_{y+dy} - \left(\mu_l L dx \frac{dU}{dy}\right)_y = 0 \qquad (2.50)$$

D'où :

$$\frac{d^2U}{dy^2} = -\frac{\rho_l - \rho_v}{\mu_l} g \qquad (2.51)$$

Les indices l et v se référant respectivement aux phases liquide et vapeur.

Compte tenu des conditions $\frac{dU}{dy} = 0$ pour $y = e_x$ (contrainte tangentielle nulle à la surface du film) et $U = 0$ pour $y = 0$, on trouve le profil de vitesse dans le film du condensât.

On en tire le débit massique $m_x^{\bullet}$ par unité de largeur de paroi :

$$m_x^{\bullet} = g\rho_l \frac{(\rho_l - \rho_v)}{3\mu_l} e_x^3 \qquad (2.52)$$

La masse du condensât $dm_x^{\bullet}$, formée sur l'intervalle dx, entraîne donc un accroissement de_x, d'épaisseur du film, tel que :

$$\frac{dm_x^{\bullet}}{dx} = g\rho_l \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l} e_x^2 \frac{de_x}{dx} \qquad (2.53)$$

Le dégagement de chaleur correspond à $dm_x^{\bullet}$ est égal à :

$$dQ = L_v' dm_x^{\bullet} \qquad (2.54)$$

Avec :

$$L_v^{'} = L_v + 0.68\, C_p \left(T_{sat} - T_p\right) \quad [53] \tag{2.55}$$

L_v : désignant la chaleur latente de vaporisation de la vapeur considérée (KJ/Kg).

Cette quantité de chaleur se transmet intégralement à la paroi, soit :

$$\frac{dQ}{dS} = \frac{\lambda_l}{e_x}\left(T_{sat} - T_p\right) = L_v^{'} \frac{dm_x^{\bullet}}{dx} \tag{2.56}$$

L'élimination de $dm_x^{\bullet}$ entre les relations (2.53) et (2.56) donne l'expression suivante de l'épaisseur (e_x) à l'abscisse x (pour une largeur égale à l'unité).

$$e_x = \left(\frac{4\mu_l \lambda_l x\left(T_{sat} - T_p\right)}{g\rho_l\left(\rho_l - \rho_v\right)L_v^{'}}\right)^{1/4} \tag{2.57}$$

Et le coefficient local d'échange est égal à :

$$h_x = \frac{\lambda_l}{e_x} = \left(\frac{g\rho_l\left(\rho_l - \rho_v\right)L_v^{'}\lambda_l^3}{4\mu_l x\left(T_{sat} - T_p\right)}\right)^{1/4} \tag{2.58}$$

Remarquons que le terme $0.68\, C_p\left(T_{sat} - T_p\right)$ qui apparaît dans l'expression de $L_v^{'}$ correspond au refroidissement du condensât à une température inférieure à T_{sat}.

- **Cas d'une plaque plane inclinée d'un angle (β) par rapport à l'horizontale :**

En ce qui concerne la condensation sur une plaque plane inclinée d'un angle (β) par rapport à l'horizontal (applicable dans notre cas à la vitre du distillateur double pente à effet de serre), il suffit de remplacer la force de pesanteur par sa composante suivant l'axe x comme le montre la figure (2.6).

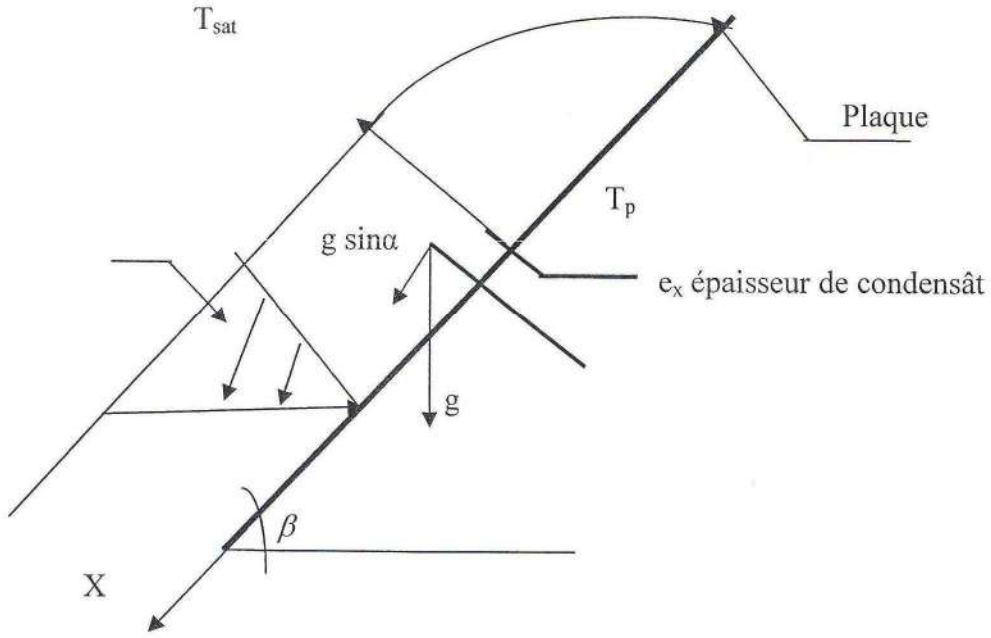


Figure (2.6): Condensation en film d'un fluide sur une paroi inclinée.

Dans ce cas on aura :

$$U = \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\mu_l} g \sin(\beta)\left(e_x y - \frac{1}{2} y^2\right) \tag{2.59}$$

Et:

$$m_x^{\bullet} = \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)}{3\mu_l} g \sin(\beta) e_x^3 \tag{2.60}$$

$$e_x = \left(\frac{4\mu_l x(T_{sat} - T_p)}{\rho_l(\rho_l - \rho_v) g \sin(\beta) L_v^{'}}\right)^{1/4} \tag{2.61}$$

$$h_x = \frac{\lambda_l}{e_x} = \left(\frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v) g \sin(\beta) L_v^{'} \lambda_l^3}{4\mu_l x(T_{sat} - T_p)}\right)^{1/4} \tag{2.62}$$

L'air humide existe entre les deux composantes du distillateur, l'évaporateur (plaque noire) et le condenseur (la vitre). Le transfert de chaleur et de masse à l'intérieur du distillateur solaire à effet de serre est le produit de l'évaporation de l'eau saumâtre et de la condensation de vapeur d'eau.

2.5. Caractéristiques thermo-physiques du mélange Air-vapeur (air humide) :

2.5.1. Introduction:

Nous allons considérer le mélange air-vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur à effet de serre, comme un mélange de gaz parfait et nous utilisons donc la loi de Dalton qui nous dit que "la pression, l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie d'un mélange de gaz parfaits sont respectivement égales à la somme des pressions partielles, des énergies internes partielles, des enthalpies partielles et des entropies partielles qu'auraient les gaz constituants s'ils occupaient seuls le volume total à la température du mélange".

2.5.2. Hypothèses:

Nous supposons que:

- L'air et la vapeur d'eau comme étant des gaz parfaits.
- La pression du mélange air –vapeur d'eau à l'intérieur du distillateur, constante et égal à la pression atmosphérique.

2.5.3. Les principaux paramètres caractérisant l'air humide :

On considère un volume V d'air humide à la température T.

2.5.3.1. Pression partielle:

La pression partielle (P_v) de la vapeur d'eau est la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait seule le volume (V) du mélange. (Même définition pour la pression partielle (P_a) de l'air).

D'après la loi de Dalton la pression totale du mélange (P_T) s'écrit:

$$P_T = P_v + P_a \qquad \left(N / m^2\right) \tag{2.63}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{lll} P_V = \rho_V \dfrac{RT}{M_V} & ; & \dfrac{R}{M_V} = 461.51\, J / Kg.K \\ P_a = \rho_a \dfrac{RT}{M_a} & ; & \dfrac{R}{M_a} = 287.05\, J / Kg.K \\ \rho = \rho_V + \rho_a & & \end{array} \right\} \tag{2.64}$$

2.5.3.2. Concentration de la vapeur d'eau dans l'air:

La concentration de la vapeur d'eau dans l'air (ou bien la fraction massique de l'air humide) s'écrit:

$$C = \frac{\rho_v}{\rho} \tag{2.65}$$

En tenant compte des relations (2.63) et (2.64) et en introduisant les valeurs des masses molaires de l'air et de la vapeur d'eau, l'expression de la concentration (C) devient:

$$C = \frac{0.622}{\dfrac{P_T}{P_v} - 0.378} \tag{2.66}$$

Entre 0^0C et 100^0C. La pression de la vapeur d'eau saturée est donnée par la relation suivante [28, 54, 55]:

$$P_v = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 273.15}\right) \qquad P_v \ \left(\mathrm{N/m^2}\right) \text{ et } T \ \left(^{\circ}C\right) \tag{2.67}$$

2.5.3.3. Coefficient de viscosité dynamique:

Le coefficient de viscosité dynamique est défini comme suit [30]:

$$\mu_{ah}(T) = \frac{1}{P_v\left(\dfrac{1}{\mu_v} - \dfrac{1}{\mu_a}\right) + \dfrac{P_T}{\mu_a}} \tag{2.68}$$

Soit:

$$\mu_{ah}(T)=\frac{1}{\frac{P_v}{\mu_v}+\frac{P_a}{\mu_a}} \qquad \left(N.s/m^2\right) \qquad (2.69)$$

μ_v et μ_a en $(N.s/m^2)$, P_v et P_a en $(atms)$ et T en K .

Les coefficients de viscosité dynamique de l'air et de la vapeur d'eau sont donnés par la relation suivante:

$$\mu=\mu_0\frac{1+\frac{C}{273}}{1+\frac{C}{T}}\left(\frac{T}{273}\right)^{1/2} \qquad \left(N.s/m^2\right) \qquad (2.70)$$

Où: $\mu_0=0.87\times10^{-5}$; $C=673$ (Pour la vapeur d'eau)

$\mu_0=1.755\times10^{-5}$; $C=122$. (Pour l'air)

2.5.3.4. Coefficient de viscosité cinématique:

La viscosité cinématique est définie comme suit:

$$\nu_{ah}=\frac{\mu_{ah}(T)}{\rho_{ah}(T)} \qquad \left(m^2/s\right) \qquad (2.71)$$

Avec:

$$\rho_{ah}(T)=\frac{P_T-0.378\times P_v}{\frac{RT}{M_a}\times10^{-2}} \qquad [19] \qquad \left(Kg/m^3\right) \qquad (2.72)$$

P_T et P_v en $(atms)$, R en $(J/mole.K)$ et T en (K).

2.5.3.5 Humidité relative:

L'humidité relative (ψ) est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (P_v) et la pression de saturation $(P_{vs\theta})$ de cette vapeur d'eau à la température θ:

$$\psi = \frac{\rho_v}{\rho_{vs\theta}} = \frac{m_v \times P_v}{m_{vs\theta} \times P_{vs\theta}} = \frac{P_v}{P_{vs\theta}} \qquad (\%) \qquad (2.73)$$

ρ_v : Masse volumique de la vapeur d'eau $\left(Kg/m^3\right)$;

$\rho_{vs\theta}$: Masse volumique de la vapeur d'eau saturée à la température θ $\left(Kg/m^3\right)$;

m_V : Masse molaire de la vapeur d'eau $\left(g/mole\right)$.

2.5.3.6 Humidité spécifique:

Par définition, l'humidité spécifique $\left(r^s\right)$ est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume $\left(V\right)$ d'air humide à la masse d'air sec contenue dans ce même volume [56].

L'humidité spécifique (on devrait même préciser humidité spécifique en vapeur d'eau) est encore parfois appelée rapport de mélange, humidité absolue, teneur en eau, etc...).

$$r^s = \frac{\rho_v}{\rho_a} = 0.622 \frac{P_V}{P_T - P_V} \qquad \left(Kg\ d'eau/Kg\ d'air\ \text{sec}\right) \qquad (2.74)$$

2.5.3.7 Degré de saturation:

Le degré de saturation est le rapport de l'humidité spécifique de l'air r_a^s à l'humidité spécifique de l'air saturé r_{as}^s à la même température:

$$W = \frac{r_a^s}{r_{as}^s} \qquad (2.75)$$

Dans le cas où P_v et P_s sont petits devant P (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des T peu élevées), on peut écrire:

$$W = \psi = \frac{P_v}{P_s} \qquad (2.76)$$

2.5.3.8 Conductivité thermique:

La conductivité thermique est donnée par la relation suivante [30]:

$$\lambda_{ah}(T) = \lambda_{air-sec}(T) + 0.0041 \times r^s \qquad (Kcal/m.h.K) \qquad (2.77)$$

2.5.4. Les grandeurs spécifiques :

2.5.4.1. Chaleur spécifique:

La chaleur spécifique de l'air humide sous pression constante cp^s n'est pas une notion très utile.

La chaleur spécifique C_p^s de l'air humide est:

$$C_p^s = C_{pa} + r^s \times C_{pv} \qquad (J/Kg.°C) \qquad (2.78)$$

Avec:

C_{pa} : Capacité thermique massique sous pression constante de l'air sec $(J/Kg.K)$.

C_{pv} : Capacité thermique massique sous pression constante de la vapeur d'eau $(J/Kg.K)$.

2.5.4.2. Volume spécifique :

Soit V un volume d'air humide ; il contient la masse m d'air humide qui se décompose ainsi :

*Une masse m_v de vapeur.

*Une masse m_a d'air sec.

La constante caractéristique r_m du mélange s'écrit :

$$r_m = \frac{m_v}{m_h}\frac{R}{M_v} + \frac{m_a}{m_h}\frac{R}{M_a} \qquad (2.79)$$

De sorte que V s'écrit :

$$V = m\frac{T}{P_T}r_m = m\frac{T}{P_T}\left(\frac{m_v}{m}\frac{R}{M_v}+\frac{m_a}{m}\frac{R}{M_a}\right)$$

La simplification par m donne une expression plus simple:

$$V = \frac{RT}{P_T}\left(m_v\frac{1}{M_v}+m_a\frac{1}{M_a}\right)$$

Le volume spécifique du mélange s'écrit, alors :

$$V_s = \frac{V}{m_a} = \frac{RT}{P_T}\left(\frac{m_v}{m_a}\frac{1}{M_v}+\frac{1}{M_a}\right) \qquad \left(m^3/Kg\ d'air\ \text{sec}\right) \qquad (2.80)$$

2.5.4.3. Enthalpie spécifique:

L'enthalpie est la chaleur totale contenue dans l'air humide, l'origine des enthalpies correspondant à l'air sec et à l'eau liquide à 0^0C.

L'enthalpie est une grandeur extensive de sorte que l'on écrit :

$$H = m_a\left(C_{pa}T\right)+m_v\left(C_{pv}T+L_0\right) \qquad (2.81)$$

On en titre l'expression de l'enthalpie spécifique de l'air humide :

$$h_s = \frac{H}{m_a} = C_{pa}T + r^s\left(C_{pv}T+L_0\right) \qquad \left(KJ/Kg\ d'air\ \text{sec}\right) \qquad (2.82)$$

L_0 : La chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0^0C.

$L_0 = 2501\ KJ/Kg$

2.5.5. Les grandeurs massiques :

2.5.5.1. Chaleur massique:

Grandeur rencontrée quelquefois, c'est la chaleur mise un œuvre pour faire varier de 1°C (ou 1K) la température de $1\ m^3$ d'air humide:

$$C_{vol} = \frac{C_{ps}}{V^s} \qquad \left(KJ/m^3\ \text{d'air humide}\right) \qquad (2.83)$$

2.5.5.2. Volume massique :

Le volume massique V^* est le volume occupé par l'unité de masse d'air humide. Un volume V renfermant une masse $m_h = m_a + m_v$ d'air humide, on a :

$$V^* = \frac{V}{m} = \frac{V}{m_a + m_v} = \frac{V}{m_a}\left(\frac{m_a}{m_a + m_v}\right) = V_s\left(\frac{1}{r^s + 1}\right) \tag{2.84}$$

En fonction de la pression de vapeur d'eau et de la température T , la relation précédente devient :

$$V^* = \frac{1}{\rho_a + \rho_v} = \frac{T}{\frac{P_T + P_v}{287.05} + \frac{P_v}{461.51}} \qquad \left(m^3 / Kg \text{ d'air humide}\right) \tag{2.85}$$

2.5.5.3. Enthalpie massique :

L'enthalpie massique est le rapport de l'enthalpie de l'air humide à sa masse :

$$h_m = \int_0^T C_{ph} dT = \frac{H}{m_a} \qquad \left(KJ / Kg \ d'air \ humide\right) \tag{2.86}$$

C_{ph} : Chaleur massique de l'air humide.

3

Etude théorique du distillateur solaire à effet de serre

3.1. Introduction:

Le rayonnement solaire entrant dans le distillateur et emprisonné par effet de serre entraîne:

1. La production de vapeur d'eau dûe à l'augmentation de la température de l'eau à cause de l'absorption de l'énergie solaire incidente.
2. Le transfert d'air humide par convection dû à la différence de températures entre le verre et la surface d'eau.
3. La condensation de vapeur d'eau sur la vitre froide, formant des gouttelettes qui sont rassemblées par les canaux.

Pour formuler les équations dans le bilan énergétique, on pose les hypothèses suivantes :

1. Les températures des faces intérieure et extérieure de la vitre, de la saumure, de l'absorbeur, et de l'isolant sont toutes uniformes.
2. La couche d'eau au-dessus de l'absorbeur est assez mince, afin que la température du fluide au-dessus de la plaque (absorbeur) soit presque la même que celle de l'absorbeur.
3. La plaque de l'absorbeur est très mince, et son 'inertie thermique est négligée.
4. Au début de l'expérience, les températures de toutes les surfaces sont égales à la température ambiante.
5. On néglige les ondes courtes réfléchies parce qu'elle n'ont aucun effet sur la formation de la vapeur sur la condensation.
6. Les pertes latérales du distillateur sont négligeables.
7. La saumure dans la plaque est statique.
8. Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.

3.2. Les différents transferts thermiques dans le distillateur solaire à effet de serre :

1. L'énergie solaire incidente sur la vitre :

L'énergie solaire incidente est distribuée sur un l'intervalle de longueur d'onde $0.17\ a\ 4\ \mu m$ [19].

L'énergie solaire totale incidente par jour est la quantité du rayonnement rassemblée par une surface horizontale pendant les heures de la lumière du soleil [57].

$$G = \int q_s(t)dt \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.1)$$

2. L'énergie solaire transmise à travers la vitre :

L'énergie transmise à travers la vitre dépend de la transmisivité du verre utilisé. L'intervalle de transmisivité est (70 à 95 %) pour les différents types de verre [57]. Par conséquent, la quantité d'énergie solaire qui traverse le verre et la surface de l'eau est :

$$Q_t = \tau_g G \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.2)$$

τ_g : Coefficient de transmission de la vitre.

3. Transfert de chaleur interne par rayonnement (eau-vitre) :

Le flux d'échange thermique par rayonnement entre l'eau saumâtre et la vitre se calcule par la formule suivante [57, 58]:

$$Q_{r,wg} = F\sigma\left(T_w{}^4 - T_{gi}{}^4\right) \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.3)$$

F : est le facteur de forme, $F = 0.8$

σ : Constante de Stefan Boltzmann, $\sigma = 5.67\times10^{-8}\ W/m^2K^4$

Et :

$$Q_{r,wg} = h_{r,wg}\left(T_w - T_{gi}\right) \qquad (3.4)$$

Donc :

$$Q_{r,wg} = 0.8\sigma\left(T_w^2 + T_{gi}^2\right)\left(T_w + T_{gi}\right)\left(T_w - T_{gi}\right) \qquad (3.5)$$

D'où $$h_{r,wg} = 0.8\sigma\left(T_w^2 + T_{gi}^2\right)\left(T_w + T_{gi}\right) \qquad \left(W/m^2{}^\circ C\right) \qquad (3.6)$$

$h_{r,wg}$: Coefficient de transfert thermique par rayonnement $\left(W / m^2 °C\right)$.

4. Transfert de chaleur interne par convection naturelle (eau-vitre) :

L'expression de l'équation de chaleur par convection en régime turbulent est :

$$Q_{c,wg} = h_{c,wg}\left(T_w - T_{gi}\right) \qquad \left(W / m^2\right) \tag{3.7}$$

Le flux de chaleur d'échange thermique par convection entre l'eau saumâtre et la vitre est défini par Dunkle [22, 59] est:

$$Q_{c,wg} = 0.884\left(\left(T_w - T_{gi}\right) + \frac{P_w - P_{gi}}{268.9\times10^3 - P_w}\left(T_w + 273.15\right)\right)^{1/3}\left(T_w - T_{gi}\right) \tag{3.8}$$

Cette expression est valable pour le transfert convectif de chaleur entre deux parois parallèles et infinies, mais dans notre cas la vitre est inclinée d'un angle β. Donc, l'équation de transfert de chaleur interne par convection devient [59, 60]:

$$Q_{c,wg} = 0.884\left(\left(\left(T_w - T_{gi}\right) + \frac{P_w - P_{gi}}{268.9\times10^3 - P_w}\left(T_w + 273.15\right)\right)\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\right)^{1/3}\left(T_w - T_{gi}\right) \tag{3.9}$$

D'où:

$$h_{c,wg} = 0.884\left(\left(\left(T_w - T_{gi}\right) + \frac{P_w - P_{gi}}{268.9\times10^3 - P_w}\left(T_w + 273.15\right)\right)\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\right)^{1/3} \tag{3.10}$$

$h_{c,wg}$: Coefficient d'échange thermique par convection interne $\left(W / m^2 °C\right)$.

5. L'énergie transférée par évaporation et condensation (eau-vitre) :

Le transfert d'énergie, dans ce cas, dépend de la quantité d'eau transférée du bassin du distillateur vers la vitre.

L'expression du flux de chaleur transporté par évaporation est [17, 60]:

$$Q_{e,wg} = m_w^{\cdot} L_v \qquad \left(W / m^2\right) \tag{3.11}$$

Dunkle propose la quantité de chaleur transportée par évaporation comme suit [22,59]:

$$Q_{e,wg} = 16.276 \times 10^{-3} q_{c,wg} \frac{P_w - P_{gi}}{T_w - T_{gi}} \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.12)$$

$h_{e,wg}$: Coefficient d'échange thermique par évaporation $\left(W / m^2 °C\right)$.

6. Transfert de chaleur par convection à l'extérieur du distillateur (vitre-ambiant) :

L'intensité de cet échange dépend de la vitesse du vent, et dépend très faiblement de l'inclinaison de la vitre. On a coutume d'utiliser pour le coefficient d'échange "$h_{c,ga}$"l'expression [21, 26, 61, 62]:

$$h_{c,ga} = 5.7 + 3.8\ V \qquad \left(W / m^2 °C\right) \qquad (3.13)$$

V : Vitesse du vent $\left(m / s\right)$

Donc la perte de chaleur par convection entre le verre et l'extérieur est donnée par :

$$Q_{c,ga} = h_{c,ga}\left(T_{ge} - T_a\right) \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.14)$$

7. Transfert de chaleur par rayonnement à l'extérieur de distillateur (vitre-ambiant) :

Le transfert de chaleur par rayonnement dans ce cas dépend de la température du ciel clair.

Le coefficient d'échange $h_{r,ga}$ est donné par la loi de Stefan; dans ce cas, on fixe l'émissivité du ciel comme égale à 1 et sa température T_{sky} égale à une fonction de la température de l'air ambiante et le facteur de forme F_{1-2} est égale à 1, avec:

$$h_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma \left(T_g^2 + T_{sky}^2\right)\left(T_g + T_{sky}\right) \qquad \left(W / m^2 °C\right) \qquad (3.15)$$

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad [21, 63, 64] \qquad (3.16)$$

Où T_{sky} et T_a en Kelvin.

Un autre communément la relation utilisée est donnée par Whillier (1967) [61, 65]:

$$T_{sky} = T_a - 12 \qquad (3.17)$$

La perte d'énergie par rayonnement à l'extérieur du distillateur solaire est donnée par la relation suivante :

$$Q_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma \left(T_{ge}^4 - T_{sky}^4 \right) \qquad \left(W / m^2 \right) \tag{3.18}$$

$$Q_{r,ga} = \varepsilon_g \sigma \left(T_{ge}^4 - (T_a - 12)^4 \right) \tag{3.19}$$

$\varepsilon_g = 0.9$ [58, 63]

8. L'échange par conduction entre l'intérieur et l'extérieur de la vitre :

Dans la vitre, il y a un mécanisme de transfert de chaleur par conduction entre la face extérieure et la face intérieure de la vitre, q_{cd} tel que :

$$Q_{cd} = \frac{\lambda_g}{e} \left(T_{gi} - T_{ge} \right) \qquad \left(W / m^2 \right) \tag{3.20}$$

e : Épaisseur de la vitre.

λ_g : Conductivité thermique de la vitre.

9. Perte de chaleur par conduction à travers le bassin :

Il y a une petite quantité de chaleur échangée entre le bassin et l'isolant. Cette quantité est donnée par expression suivante :

$$Q_{cb} = \frac{\lambda_b}{x} \left(T_b - T_i \right) \qquad \left(W / m^2 \right) \tag{3.21}$$

10. L'énergie apportée dans l'eau de l'alimentation froide :

Le niveau d'eau au-dessus de la plaque de l'absorbeur est maintenu constant. La masse d'afflux de l'eau à tout instant est égale au taux de masse d'évaporation sous condition du régime permanent. Donc l'énergie apportée avec l'eau de l'alimentation est [57]:

$$Q_{in} = m_w C_{pw} \left(T_w - T_{fw} \right) \qquad \left(W / m^2 \right) \tag{3.22}$$

11. L'énergie transmise par le distillat :

Le flux de chaleur perdue par le distillat est proportionnel à la quantité d'eau distillée en régime permanent et peut être exprimé comme suit [57]:

$$Q_{out} = m_w C_{pw} \left(T_{dist} - T_a\right) \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.23)$$

- **Pertes par réflexion et par absorption au niveau de la vitre :**

L'énergie solaire incidente n'est pas totalement transmise à l'intérieur du distillateur, une faible quantité est réfléchie vers l'atmosphère et une partie est absorbée par la vitre, tel que [66]:

$$G = Q_t + Q_r + Q_a \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.24)$$

12. Le coefficient d'absorption pour les différents types de matières transparentes est de 5-20% de l'énergie totale incidente, donc l'énergie solaire absorbée est donnée par :

$$Q_a = \alpha_g G \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.25)$$

α_g : Coefficient d'absorption de la vitre.

13. l'énergie solaire réfléchie est donnée par :

$$Q_r = \rho_g G \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.26)$$

ρ_g : Coefficient de réflexion de la vitre.

- **L'énergie absorbée et l'énergie réfléchie par l'eau au-dessus de la plaque de l'absorbeur :**

L'énergie solaire transmise à l'intérieur du distillateur est l'énergie incidente sur la surface de l'eau. Une faible partie de cette énergie est absorbée par l'eau et l'autre est réfléchi.

L'énergie incidente sur la surface de l'eau est [57]:

$$Q_{iw} = Q_t = \tau_g G \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.27)$$

14. L'énergie absorbée par l'eau est donnée comme suit:

$$Q_{aw} = \alpha_w \tau_g G \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.28)$$

α_w : Coefficient d'absorption de l'eau.

15. L'énergie réfléchie par l'eau est donnée par la relation suivante :

$$Q_{rw} = \rho_w \tau_g G \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.29)$$

ρ_w : Coefficient de réflexion de l'eau.

16. Transfert d'énergie par convection entre l'eau et l'absorbeur :

Ce transfert de chaleur est dû à la différence de températures entre l'eau et l'absorbeur. Cette quantité est donnée par l'expression suivante [57]:

$$Q_{c,wb} = h_{c,wb}\left(T_b - T_w\right) \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.30)$$

17. Transfert de chaleur par rayonnement entre les faces intérieures (Nord-sud) de la vitre du distillateur :

La quantité de chaleur échangée entre la face intérieure de la vitre inclinée vers le Nord et la face intérieure inclinée vers le Sud est donnée par la relation suivante [30]:

$$Q_{rg} = \varepsilon_g \sigma\left(T_{gi1}^4 - T_{gi2}^4\right) \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.31)$$

Et

$$h_{rg} = \varepsilon_g \sigma\left(T_{gi1}^2 + T_{gi2}^2\right)\left(T_{gi1} + T_{gi2}\right) \qquad \left(W/m^2{}^\circ C\right) \qquad (3.32)$$

18. Transfert de chaleur par rayonnement entre l'isolant et l'ambiance :

La quantité de chaleur par rayonnement entre l'isolant et l'ambiance se calcule comme suit [66]:

$$Q_{r,ia} = \varepsilon_i \sigma\left(T_{ie}^4 - T_a^4\right) \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.33)$$

Et :

$$h_{r,ia} = \varepsilon_i \sigma \left(T_{ie}^2 + T_a^2\right)\left(T_{ie} + T_a\right) \qquad \left(W / m^2 °C\right) \qquad (3.34)$$

19. Transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'ambiance :

La quantité de chaleur par convection naturelle entre l'isolant et l'ambiance est donnée par [66]:

$$Q_{c,ia} = h_{c,ia}\left(T_{ie} - T_a\right) \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.35)$$

20. L'énergie absorbée par l'absorbeur :

L'absorbeur absorbe une faible quantité d'énergie qui lui est transmise par l'eau. Cette quantité est donnée par la relation suivante :

$$Q_{ab} = \alpha_b \tau_w \tau_g G \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.36)$$

21. L'énergie absorbée par l'isolant :

L'isolant absorbe une faible quantité d'énergie qui lui est transmise par l'absorbeur. Cette quantité est:

$$Q_{ai} = \alpha_i \tau_b \tau_w \tau_g G \qquad \left(W / m^2\right) \qquad (3.37)$$

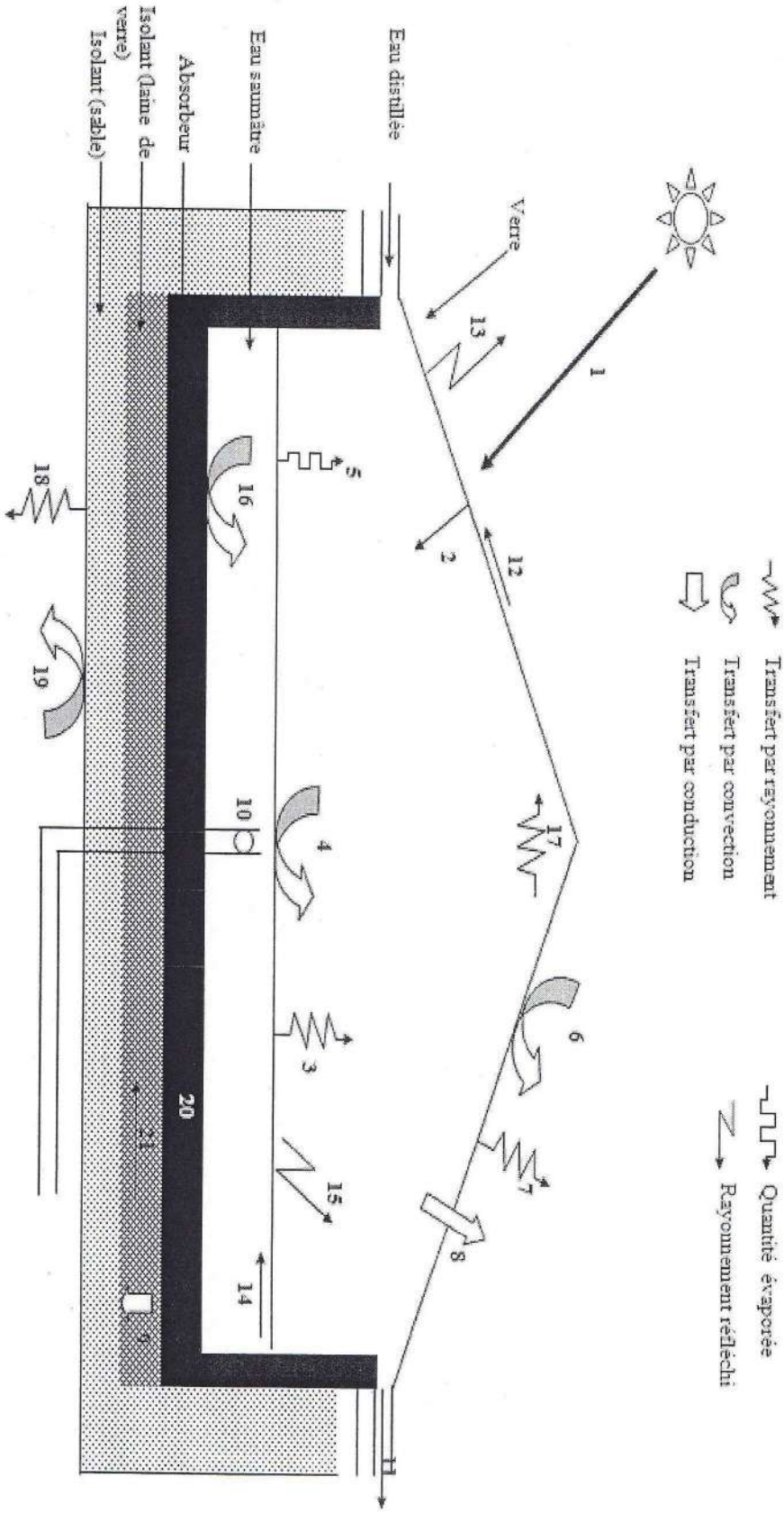


Figure (3.1) : Les différents transferts thermiques dans le distillateur solaire à effet de serre.

3.3. Bilan thermique du distillateur solaire à effet de serre :

Les équations ont été établies selon la loi suivante :

$$C_{pi}\frac{M_i}{S_i}\frac{dT_i}{dt}=\sum_{i=1}^{N}Q_{ij} \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.38)$$

On considère cinq niveaux dans le distillateur solaire à effet de serre :

- **Le premier niveau :** la face extérieure de la vitre :

$$C_{pg}\frac{M_g}{S_g}\frac{dT_{ge}}{dt}=\alpha_g G+Q_{cd}-Q_{r,ga}-Q_{c,ga} \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.39)$$

- **Le deuxième niveau :** la face intérieure de la vitre :

$$C_{pg}\frac{M_g}{S_g}\frac{dT_{gi}}{dt}=Q_{e,wg}+Q_{c,wg}+Q_{r,wg}-Q_{cd} \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.40)$$

- **Le troisième niveau :** la surface de l'eau :

$$C_{pw}\frac{M_w}{S_w}\frac{dT_w}{dt}=\alpha_w\tau_g G+Q_{c,wb}-Q_{e,gw}-Q_{c,gw}-Q_{r,gw}-Q_{in}-Q_{out} \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.41)$$

- **Le quatrième niveau :** la plaque de l'absorbeur :

$$C_{pb}\frac{M_b}{S_b}\frac{dT_b}{dt}=\alpha_b\tau_w\tau_g G-Q_{cb}-Q_{c,wb} \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.42)$$

- **Le cinquième niveau :** l'isolant :

$$C_{pi}\frac{M_i}{S_i}\frac{dT_i}{dt}=\alpha_i\tau_b\tau_w\tau_g G+Q_{cb}-Q_{r,ia}-Q_{c,ia} \qquad \left(W/m^2\right) \qquad (3.43)$$

3.4. Analogie électrique :

Le tableau (3.1) comparatif ci-dessous résume les analogies entre la loi de Fourier de diffusion thermique et la loi d'Ohm électrocinétique.

Ce tableau met en évidence les correspondances entre les grandeurs :

Grandeur thermique	**Grandeur électrique**
Température T	Potentiel électrique V
Flux thermique Q	Courant électrique I
Densité de flux thermique φ	Densité de courant électrique j
Résistance thermique R	Résistance électrique R
Conductivité thermique λ	Conductivité électrique γ
Capacité thermique C	Capacité électrique C

Tableau (3.1): Représentation des analogies électriques.

La densité du flux de chaleur échangé entre un point de température T_1 et un autre point à la température T_2 qui est semblable à la loi d'Ohm qui autorise les analogies entre les grandeurs thermiques et électriques, peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q_{2-1} = h_{2-1} S(T_2 - T_1) \qquad (W/m^2) \tag{3.44}$$

Tell que:

$$R = \frac{1}{h_{2-1}} \tag{3.45}$$

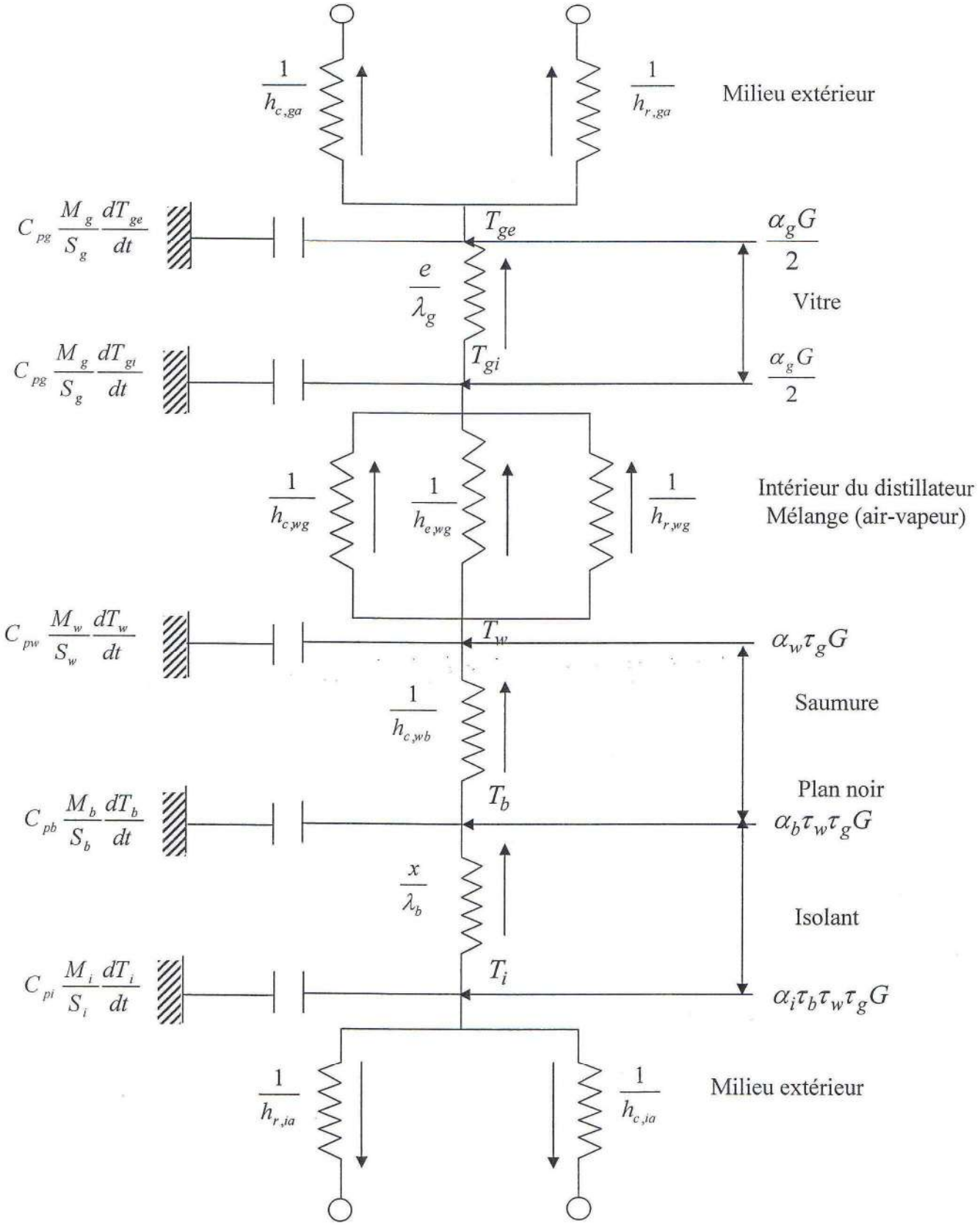


Figure (3.2) : Représentation de l'analogie électrique.

4

Etude expérimentale

4.1. Introduction:

Notre étude a pour but d'améliorer la productivité de l'eau distillée du distillateur solaire à effet de serre (double pente). Ce distillateur existe déjà au niveau de la terrasse de l'unité de recherche du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes (LENREZA) de la faculté des sciences et sciences de l'ingénieur de l'Université Kasdi Merbah Ouargla.

4.2. Présentation du lieu d'expérimentation:

4.2.1. Situation et limites:

La ville de Ouargla est le chef lieu de la troisième plus grande wilaya d'Algérie, elle est située au sud-est Algérien, au fond d'une cuvette très large de la vallée de L'OUED M'YA. Cette wilaya s'étend sur une superficie de $2.7\times10^{5}\ Km^{2}$ [11]. Ses coordonnées géographiques sont:

Altitude: $164\,m$;

Latitude: $31^{0}57'$ Nord;

Longitude: $5^{0}19'$ Est.

4.2.2. Etude climatique:

Les paramètres climatiques (température, évaporation, l'humidité relative, précipitation, vent ...) sont les facteurs les plus déterminants pour production de l'eau distillée, les valeurs de ces paramètres sont disponibles à l'office national météorologique régional de Ouargla [67].

4.2.2.1. La température:

La température est le facteur le plus important dans le climat, à cause de la liaison directe ou indirecte avec les autres facteurs climatiques. Elle a une grande influence sur la partition de la vie humaine, végétale et animale.

Ouargla est une région saharienne avec un climat très chaud en été et très froid en hiver, la température varie entre (5-44°C) dans l'année.

4.2.2.2. L'évaporation:

L'évaporation augmente quand la température augmente, elle sera intense si elle est renforcée par le vent.

L'évaporation moyenne annuelle $Evap(moy) = 265.48\ \%$.

4.2.2.3. Humidité relative:

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation de cette vapeur. Elle est inversement proportionnelle à la température, l'humidité dans la région de Ouargla est limitée entre 24-62% dans l'année.

4.2.2.4. La pluviométrie:

La pluviométrie de la zone d'expérimentation (Ouargla) est caractérisée par des précipitations peu abondantes et irrégulières.

La pluviométrie moyenne annuelle $RR(moy) = 1.94\ mm$.

4.2.2.5. Le vent:

Dans la région de Ouargla le vent souffle du Nord-est et du Sud, les vents les plus fréquents en hiver sont les vents de l'Ouest, tandis qu'au printemps ce sont les vents du Nord-est et l'Ouest qui dominent, en été ils soufflent du Nord-est et du Sud-ouest.

La vitesse moyenne annuelle $Vmoy = 3.70\ m/s$.

4.2.2.6. L'insolation :

L'ensoleillement est considérable à Ouargla, car l'atmosphère présente une ciel clair durant toute l'année avec 138 jours en moyenne de l'année où le ciel est totalement clair [67], ce facteur est considéré comme avantage et économique.

Plus de détails sur la région de Ouargla sont présentés dans l'annexe (B).

4.3. Les composantes du système:

Le dispositif expérimental qui nous a permis de réaliser notre travail se compose essentiellement de:

- Distillateur solaire à effet de serre, orienté sur un axe Sud-nord.
- Un appareillage de mesure physique.

L'étude expérimentale entreprise a donné lieu à la mesure systématique de:

- Le rayonnement solaire global;
- Les différentes températures relatives à la description des phénomènes physiques régissant le distillateur solaire;
- La vitesse de vent;
- La pression atmosphérique;
- L'humidité relative, la température ambiante et la température de rosée;
- Le débit horaire du distillat.

Tous les essais ont été réalisés à l'intérieur du laboratoire LENREZA.

4.4. Conception du distillateur:

Le distillateur utilisé lors de nos expériences est en fait d'une conception très simple. Il s'agit de distillateur solaire à effet de serre, il présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à maintenir.

L'installation est essentiellement constituée comme le montre la figure (4.1) de:

1. un bac absorbant (plaque noire);
2. une couverture verrière;
3. une cuve à niveau constant;
4. un réservoir d'alimentation en eau saumâtre;
5. les tuyauteries;
6. deux cuves graduées pour la récupération du distillat;
7. tubes graduées;
8. du sable.

1- bac absorbant (plaque noire):

Le bac absorbant comme son nom l'indique est réalisé dans le but d'absorber le maximum de rayonnement solaire global afin de le restituer en forme de chaleur à l'eau saumâtre, c'est pour cette raison qu'il est peint en noir mat (dans notre cas pour des raisons d'indisponibilité sur le marché on a utilisé une peinture noire ardoisée).

Le bac absorbant est constitué de plaque en aluminium ou plaque en galvanisé ayant un coefficient de conduction thermique très faible.

Les dimensions de la surface du bac sont:

Longueur: 112.5 cm .

Largeur: 96 cm .

Superficie: 1.08 m^2 .

2- la couverture verrière:

Pour sa simplicité et son coût relativement bas, on a utilisé le distillateur solaire à doubles pentes symétriques, chaque pente de verre ordinaire est de dimensions:

Longueur: 126 cm .

Largeur: 56 cm .

Epaisseur: 4 mm .

L'inclinaison de cette couverture est 10°.

Elle présente les avantages suivants:

- un bon coefficient de conductivité thermique.
- Une bonne transmission du rayonnement visible et son opacité aux rayons infra-rouges.
- Une bonne mouillabilité.

En ce qui concerne l'étanchéité entre la vitre et le bac absorbant, elle a été réalisée à l'aide du silicone renforcé par du mastic ordinaire.

3- une cuve à niveau constant:

Cette cuve est munie d'un flotteur qui permet de maintenir la hauteur de l'eau saumâtre constante dans le distillateur la hauteur $(L = 1.5\ cm)$.

4- un réservoir d'alimentation en eau saumâtre:

Ce réservoir pour alimenter la cuve à niveau constant.

5- les tuyauteries:

Ce sont des tuyaux en plastique, de diamètre 10 à 15 mm pour lier les différentes parties du distillateur et afin de transporter l'eau sans prendre en considération sa qualité (l'eau saumâtre- l'eau distillée).

6- deux cuves graduées pour la récupération du distillat:

Ce sont deux récipients graduées l'un pour rassembler l'eau distillée au Nord, et l'autre pour rassembler l'eau distillée au Sud.

7- tubes graduées:

Ce sont des tubes gradués utilisés pour la mesure de la quantité d'eau distillée à chaque moment. Nous calculons ensuite les débits massique ou volumique de l'eau distillée.

8- le sable (isolant):

C'est du sable pur entourant le bas et les pourtours du bassin à profondeur 10 cm pour diminuer la perte d'énergie.

4.5. Les appareils de mesure utilisés dans l'expérience:

4.5.1. Appareil de mesure du rayonnement solaire global: (Solari mètre)

Il est constitué d'une partie posée sur la vitre, et un appareil électronique qui transforme le rayonnement en une lecture directe sur un petit écran numérique, et donne une réelle valeur du rayon incident sur la vitre en W/m^2 ainsi que la quantité d'énergie en $Wh/m^2.jour$.

4.5.2. Appareil de mesure de la vitesse du vent: (Anémomètre à fil chaud) (Testo 425)

Il fonctionne avec un fil très fin traversé par un courant électrique faible, ce dernier est exposé à l'atmosphère qui est relativement froide. Un appareil électronique lié à ce fil va montrer' le degré de refroidissement qui a été effectué par l'air, sous forme de deux lectures, la première exprime la vitesse du vent, et l'autre exprimant la température ambiante.

4.5.3. Appareil de mesure de la pression atmosphérique:

Pour mesurer la pression atmosphérique on utilise un Baromètre qui mesure la pression absolue dans la région où l'expérience a été effectuée.

4.5.4. Appareil de mesure de la température ambiante:

C'est un appareil qui est installé à l'air libre à une hauteur entre $(1-1.5\ m)$ sur la surface de la terre pour mesurer les trois grandeurs: température ambiante, humidité relative et température de rosée.

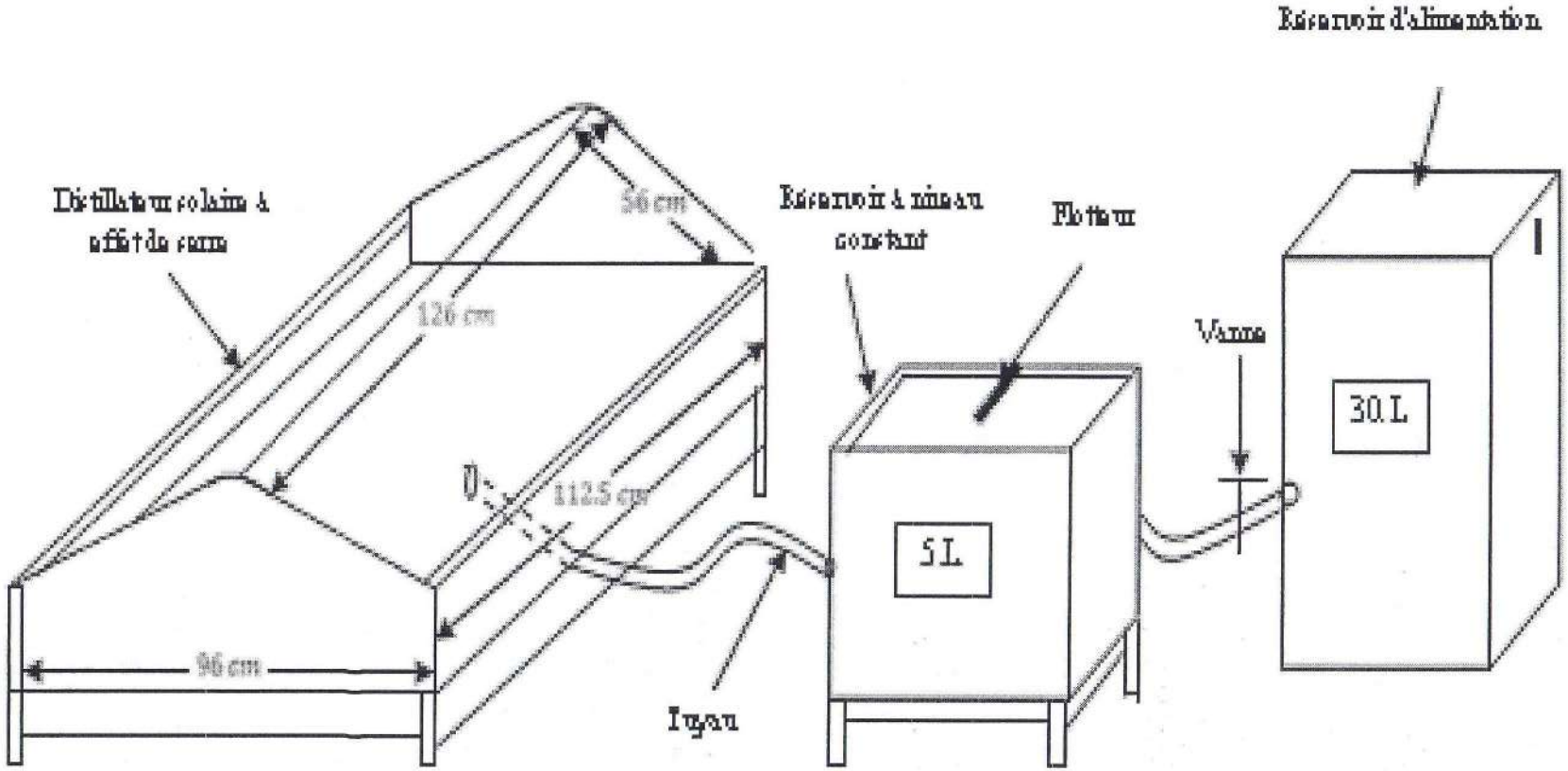
4.5.5. Appareil de mesure de la température:

C'est une paire de métal en forme de deux fils soudés avec une soudure autonome. Chaque thermocouple est lié à un appareil (milli voltmètre spécial) contenant un écran numérique. Cet appareil transforme la température en un courant électrique, d'où on peut lire à la suite la valeur de la température à l'endroit où les thermocouples ont été mit. Le nombre de thermocouples doit être suffisant pour mesurer la température de toutes les surfaces et endroits (emplacements) dans le distillateur solaire à effet de serre.

4.5.6. Appareil de mesure de conductivité électrique: (conductimètre):

Pour mesurer la conductivité électrique de l'eau distillée et afin de connaitre ses propriétés pour les comparer aux normes connus de l'eau pur.

Figure (4.1): Installation du système de l'expérience.



4.6. Identifier l'emplacement des thermocouples:

Dans notre cas, l'essentiel de la mesure des températures a été assuré pour les points matériels suivants:

1 Température de l'eau saumâtre à l'intérieur du distillateur (T_w).

2 Température de la face intérieure de la vitre qui est orientée vers le nord $(T_g(\text{int}-N))$.

3 Température de la face intérieure de la vitre qui est orientée vers le sud $(T_g(\text{int}-S))$.

4 Température de l'absorbeur (plaque noire) (T_b).

5 Température de l'eau distillée au nord $(T_D(N))$.

6 Température de la face extérieur de la vitre qui est orienté vers le nord $(T_g(ext-N))$.

7 Température de la face extérieur de la vitre qui est orienté vers le sud $(T_g(ext-S))$.

8 Température de l'eau distillée au sud $(T_D(S))$.

9 Température du sable.

10 Température de la surface extérieure sous le distillateur $(T_{is}(ext))$.

11 Température de la surface en dessous de la plaque noire $(T_b(ext))$.

12 Température de l'air à l'extérieur du distillateur $(T_a(bas))$.

13 Température de l'air ambiant du distillateur qui est mesurée à la longueur de $(1-1.5\ m)$ sur la terre.

14
- Température de la face extérieure de l'isolant, dans l'expérience où l'on recouvre le coté nord d'un isolant (polystyrène).
- Température de la face extérieure de la plaque métallique (galvanisée), dans l'expérience où l'on recouvre le coté nord de cette plaque métallique.

15 Température de l'eau à l'intérieur du réservoir d'alimentation $(T_{res}(refroi))$.

16 Température de réservoir qui compose le flotteur $(T_A(eau))$.

Le schéma suivant montre les composantes du système et l'emplacement des thermocouples.

4.6. Identifier l'emplacement des thermocouples:

Dans notre cas, l'essentiel de la mesure des températures a été assuré pour les points matériels suivants:

1 Température de l'eau saumâtre à l'intérieur du distillateur (T_w).

2 Température de la face intérieure de la vitre qui est orientée vers le nord $(T_g(\text{int}-N))$.

3 Température de la face intérieure de la vitre qui est orientée vers le sud $(T_g(\text{int}-S))$.

4 Température de l'absorbeur (plaque noire) (T_b).

5 Température de l'eau distillée au nord $(T_D(N))$.

6 Température de la face extérieur de la vitre qui est orienté vers le nord $(T_g(ext-N))$.

7 Température de la face extérieur de la vitre qui est orienté vers le sud $(T_g(ext-S))$.

8 Température de l'eau distillée au sud $(T_D(S))$.

9 Température du sable.

10 Température de la surface extérieure sous le distillateur $(T_{is}(ext))$.

11 Température de la surface en dessous de la plaque noire $(T_b(ext))$.

12 Température de l'air à l'extérieur du distillateur $(T_a(bas))$.

13 Température de l'air ambiant du distillateur qui est mesurée à la longueur de $(1-1.5\ m)$ sur la terre.

14
- Température de la face extérieure de l'isolant, dans l'expérience où l'on recouvre le coté nord d'un isolant (polystyrène).
- Température de la face extérieure de la plaque métallique (galvanisée), dans l'expérience où l'on recouvre le coté nord de cette plaque métallique.

15 Température de l'eau à l'intérieur du réservoir d'alimentation $(T_{res}(refroi))$.

16 Température de réservoir qui compose le flotteur $(T_A(eau))$.

Le schéma suivant montre les composantes du système et l'emplacement des thermocouples.

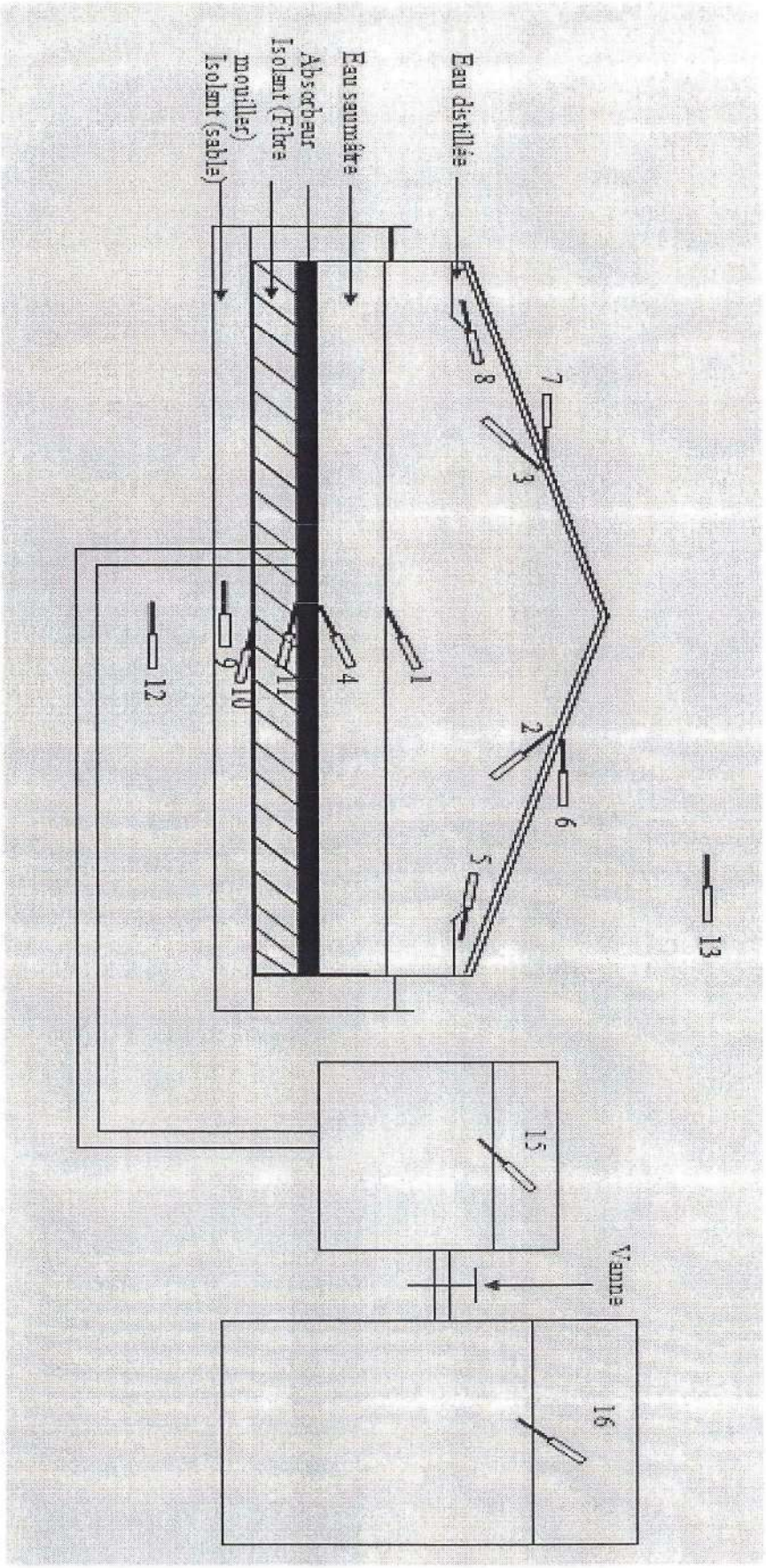


Figure (4.2): Les composantes du système et l'emplacement des thermocouples.

4.7. Les séries des expériences:

4.7.1. Première série:

Cette série réalisées en Août 2004 [68], en utilisant le distillateur solaire simple à effet de serre à double pente ayant les dimensions suivantes:

- **Les dimensions du bassin:**

  Longueur: 1.125 m ;

  Largeur: 0.96 m ;

  Superficie: 1.08 m^2 ;

  La couleur: noire.

- **Les dimensions de la vitre:**

Le distillateur solaire à double pente symétrique, chaque pente ayant les dimensions suivantes:

Longueur: 1.26 m ;

Largeur: 0.56 m ;

Epaisseur: 4 mm ;

L'inclinaison de cette couverture est 10°.

Durant cette expérience on a mesuré:

1. Les différentes températures à chaque point du distillateur.
2. Le rayonnement solaire global.
3. La vitesse du vent.
4. La température ambiante, température de rosée et l'humidité relative.
5. Pression atmosphérique.
6. Débit d'eau distillée dans des deux côtés (Nord/Sud).

4.7.2. Deuxième série:

En utilisant le même distillateur précédent mais en couvrant la base et les côtés du bassin de sable d'une hauteur 10 cm .

Ensuite nous effectuons les mêmes mesures précédentes en ajoutant la mesure de la température du sable.

Les séries des expériences qui suivent comporteront les mêmes caractéristiques du distillateur solaire, utilisé dans la deuxième expérience.

4.7.3. Troisième série:

Couvrir le côté nord d'un isolant de type polystyrène, d'épaisseur estimée à 0,5 *cm* et ayant les dimensions suivantes:

Longueur: 126 *cm* ;

Largeur: 56 *cm* .

4.7.4. Quatrième série:

Couvrir le côté nord d'une plaque galvanisée d'une épaisseur de 0,6 *mm* et ayant la conductivité thermique $\lambda = 54\ W\ /m^2.K$ [69] et les dimensions suivantes:

Longueur: 126 *cm* ;

Largeur: 56 *cm* .

4.7.5. Cinquième série:

Ombrage du côté nord, on effectuée des expériences selon les étapes suivantes:

- **Première étape:**

  La distance entre la vitre et l'obstacle : $(L = 30\ cm)$.

- **Deuxième étape:**

  La distance entre la vitre et l'obstacle : $(L = 60\ cm)$.

- **Troisième étape:**

  La distance entre la vitre et l'obstacle : $(L = 80\ cm)$.

Dans les trois étapes précédentes, l'utilisation de l'ombre était prise en considération du début de l'expérience jusqu'à sa fin.

En vue, les résultats obtenus: le déclin de la quantité totale de l'eau distillée et sa quantité élevée au côté nord plus qu'au côté sud et cela parce qu'on n'a pas chauffé d'eau d'où la proposition de l'utilisation de l'ombre à des périodes discontinues qui sont:

1. **Première période**:

L'utilisation de l'ombre de 11 heures du matin continuellement jusqu'à la fin de l'expérience.

2. **Deuxième période:**

L'utilisation de l'ombre de 10:30 à 12:30 et de 13:30 à 15:30.

3. **Troisième période:**

L'utilisation de l'ombre de 12:30 à 14:00.

4. **Quatrième période:**

L'utilisation de l'ombre de 11:45 à 13:45.

5. **Cinquième période:**

L'utilisation de l'ombre de 12:00 à 13:45.

On a remarqué que la cinquième période où l'on a utilisé l'ombre (côté nord) de 12:00 à 13:45 été la période la plus convenable.

5

Résultats

5.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons exposer les résultats expérimentaux obtenus pendant les expériences effectuées:

Dans chaque série expérimentale, nous avons exposé les courbes suivantes:

Les courbes des variations des températures interne et externe de la vitre (Nord-sud) et du rayonnement solaire en fonction du temps.

On constate l'influence directe de la température de la vitre et du rayonnement solaire sur la quantité d'eau distillée. Donc nous avons présenté les courbes suivantes concernant l'eau distillée:

1. La variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps $\left(L/m^2.h\right)$.
2. La variation du cumul journalier en fonction du temps $\left(L/m^2.jour\right)$.
3. Le pourcentage de la quantité d'eau distillée instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.
4. Le pourcentage de la quantité d'eau distillée instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Puisque l'efficacité du distillateur solaire a une relation directe avec les températures du: la face interne de la vitre, l'eau saumâtres, l'air ambiant avec la vitesse du vent. Il est donc nécessaire de présenter les courbes qui font montrer la variation de : les températures de la face intérieure de la vitre (Nord-sud), de l'eau saumâtre, de l'air ambiant et la vitesse du vent en fonction du temps.

Enfin, nous avons résumé tous ces résultats, avec une présentation de l'efficacité globale et de l'efficacité interne, ainsi que la température moyenne de l'air ambiant et la vitesse moyenne du vent du distillateur solaire pour chaque série.

5.2. Les résultats:

Première série: serre simple 2004:

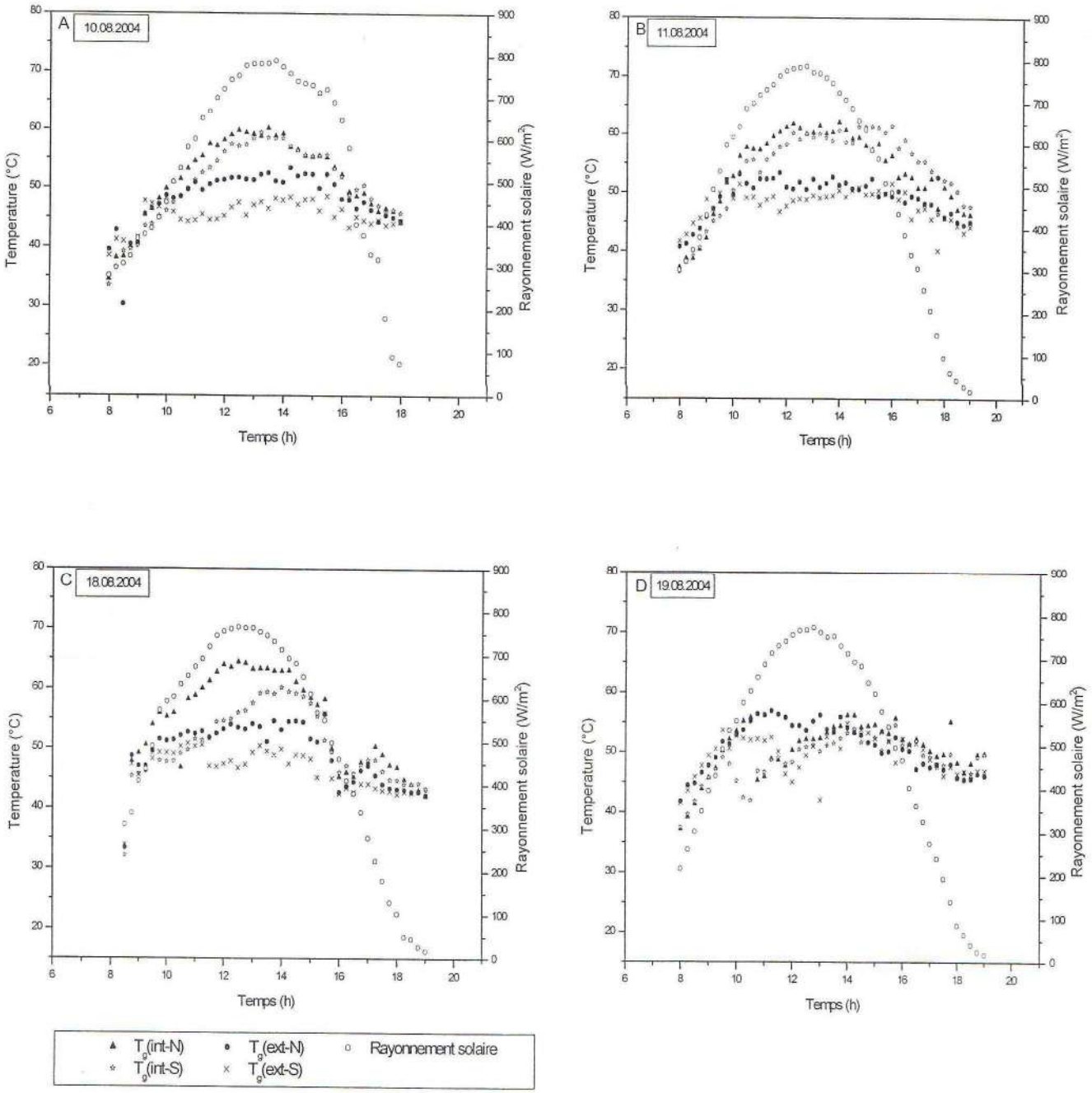


Figure (5.1) : Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Première série: serre simple 2004:

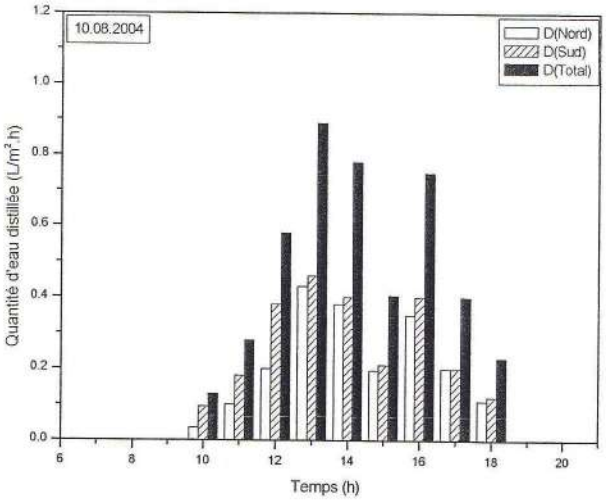


Figure (5.2): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

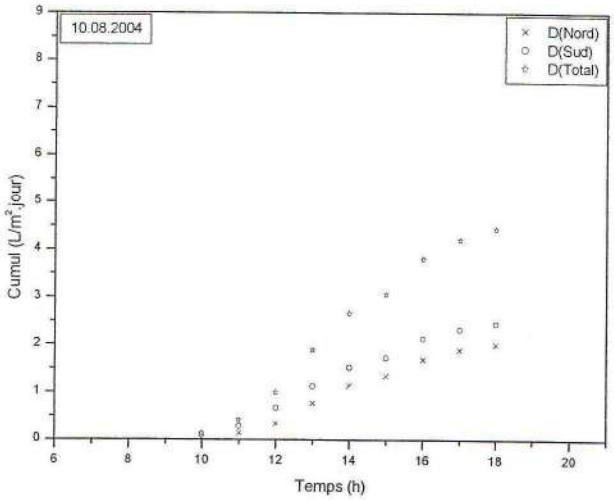


Figure (5.3): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

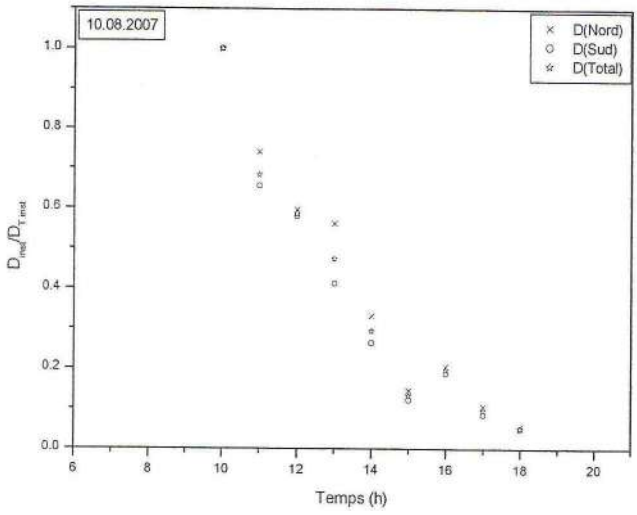


Figure (5.4): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

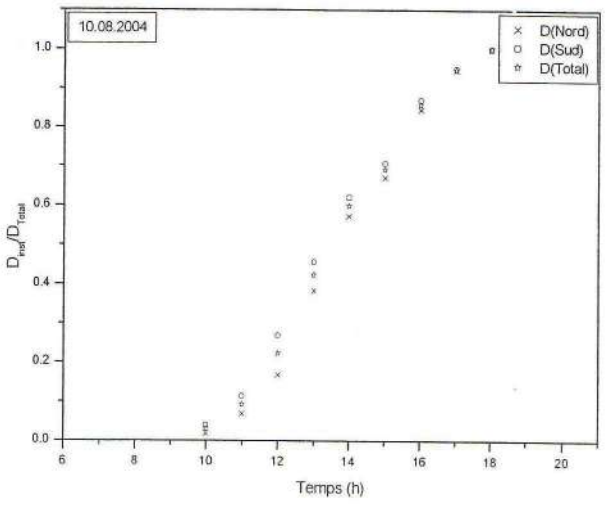


Figure (5.5): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Première série: serre simple 2004:

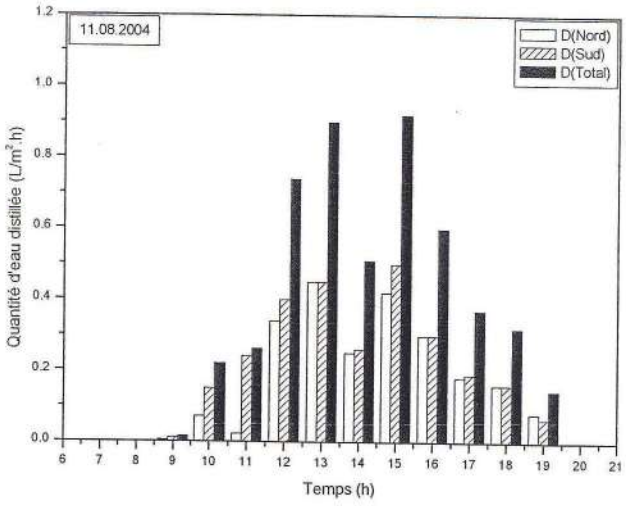


Figure (5.6): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

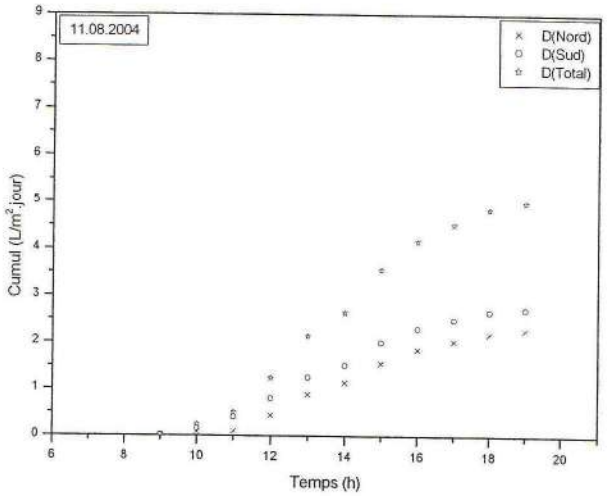


Figure (5.7): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

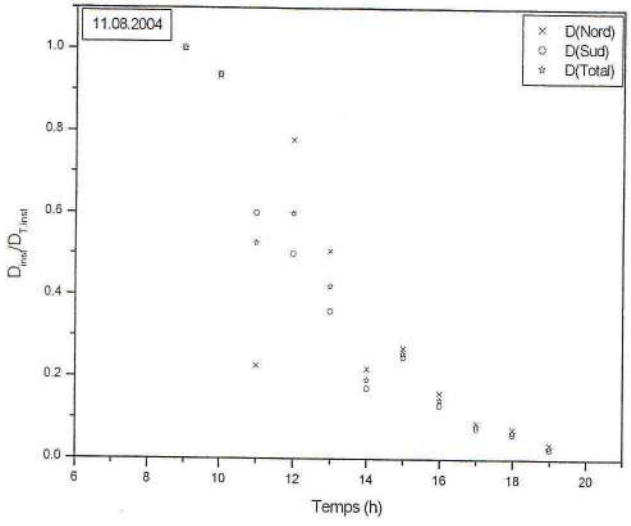


Figure (5.8): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

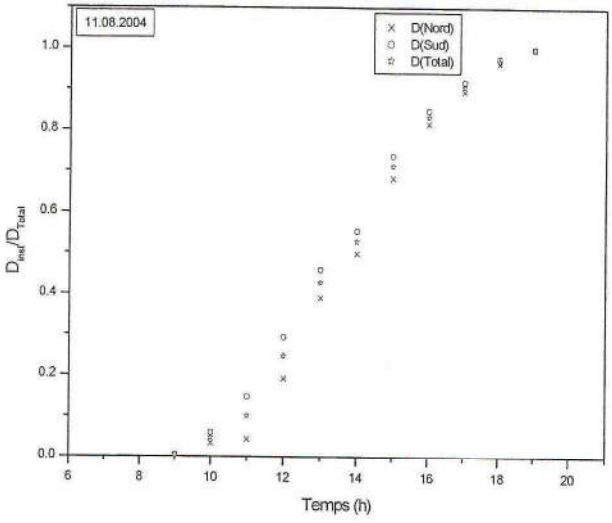


Figure (5.9): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Première série: serre simple 2004:

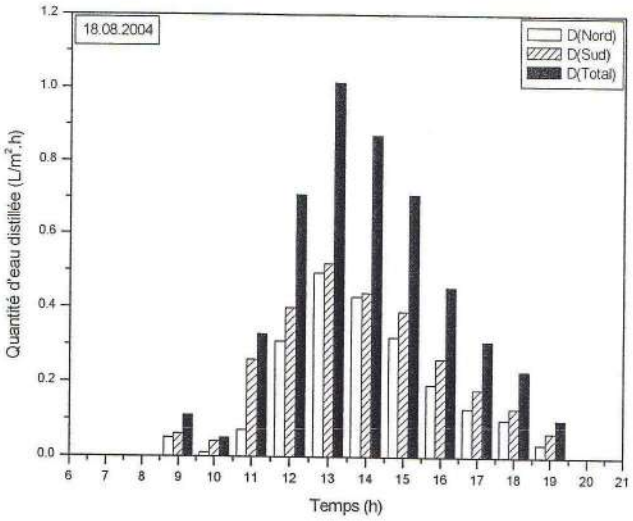


Figure (5.10): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

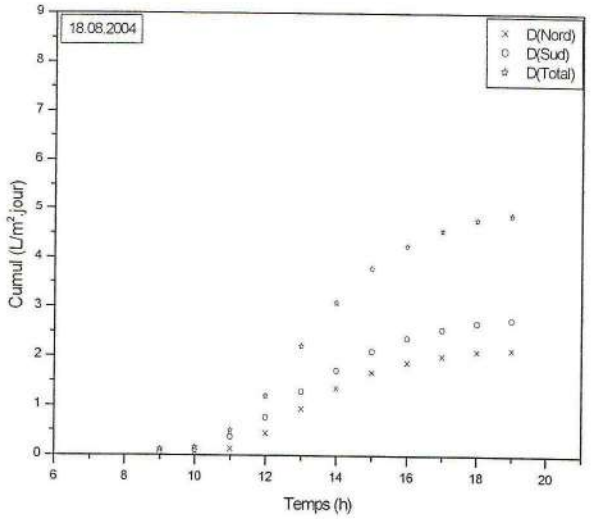


Figure (5.11): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

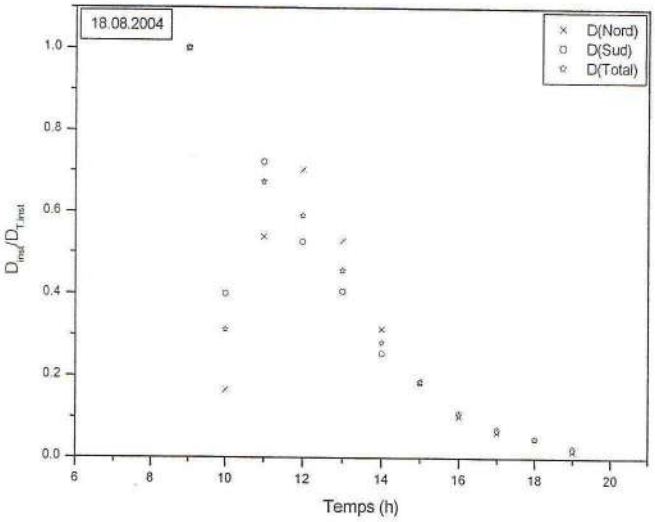


Figure (5.12): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

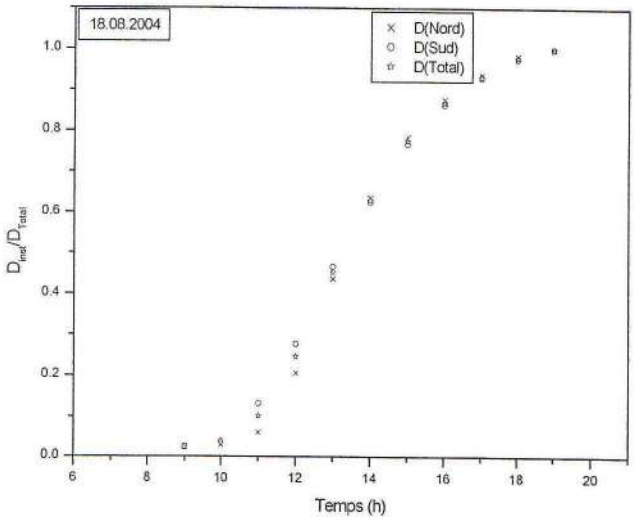


Figure (5.13): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Première série: serre simple 2004:

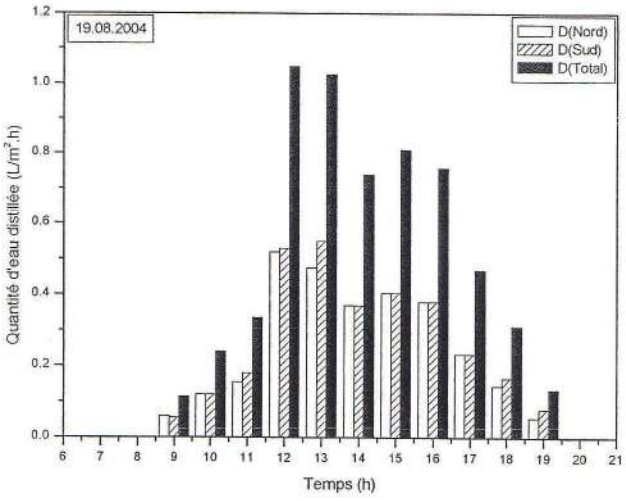


Figure (5.14): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

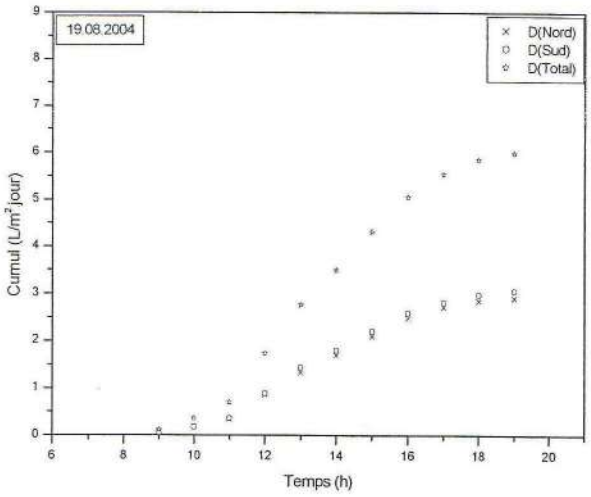


Figure (5.15): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

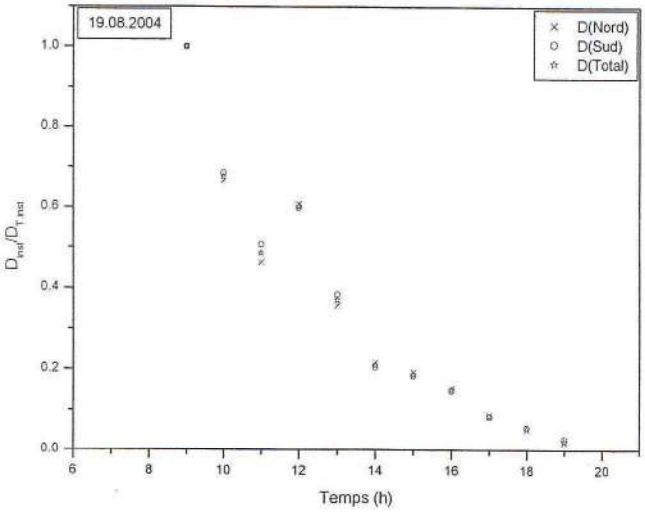


Figure (5.16): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

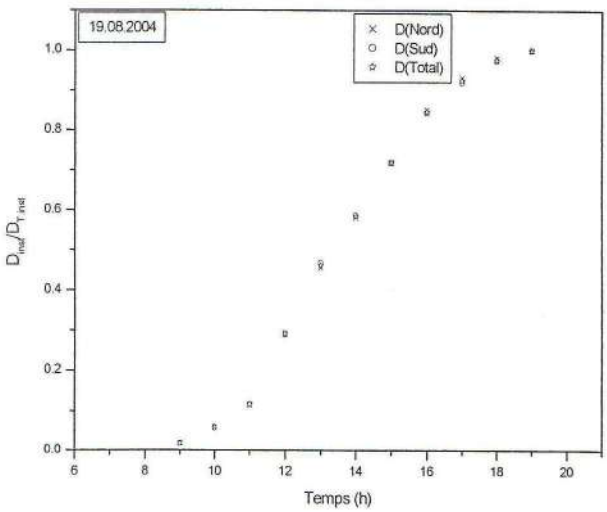


Figure (5.17): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Première série: serre simple 2004:

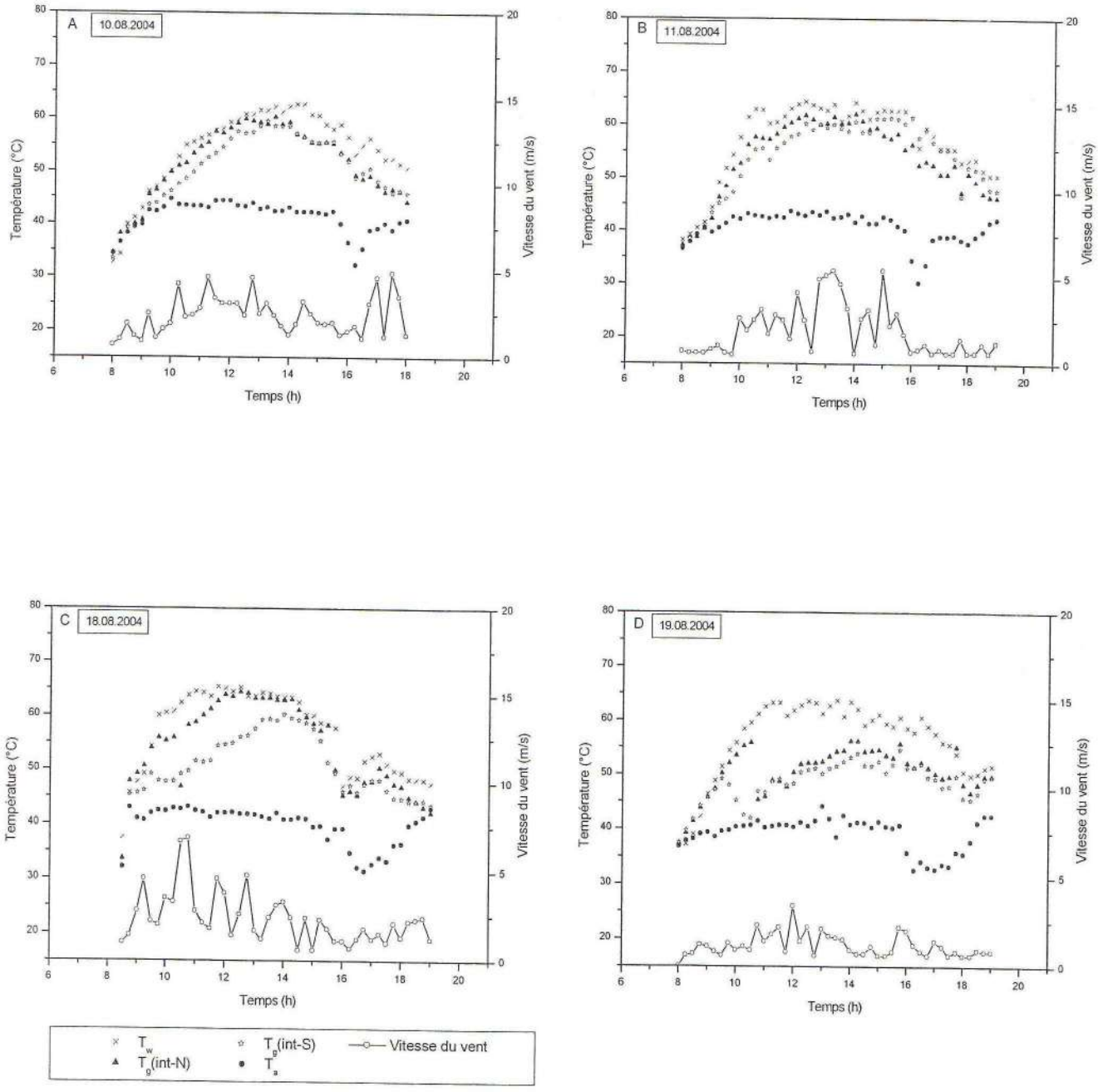


Figure (5.18): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Deuxième série: serre simple 2007:

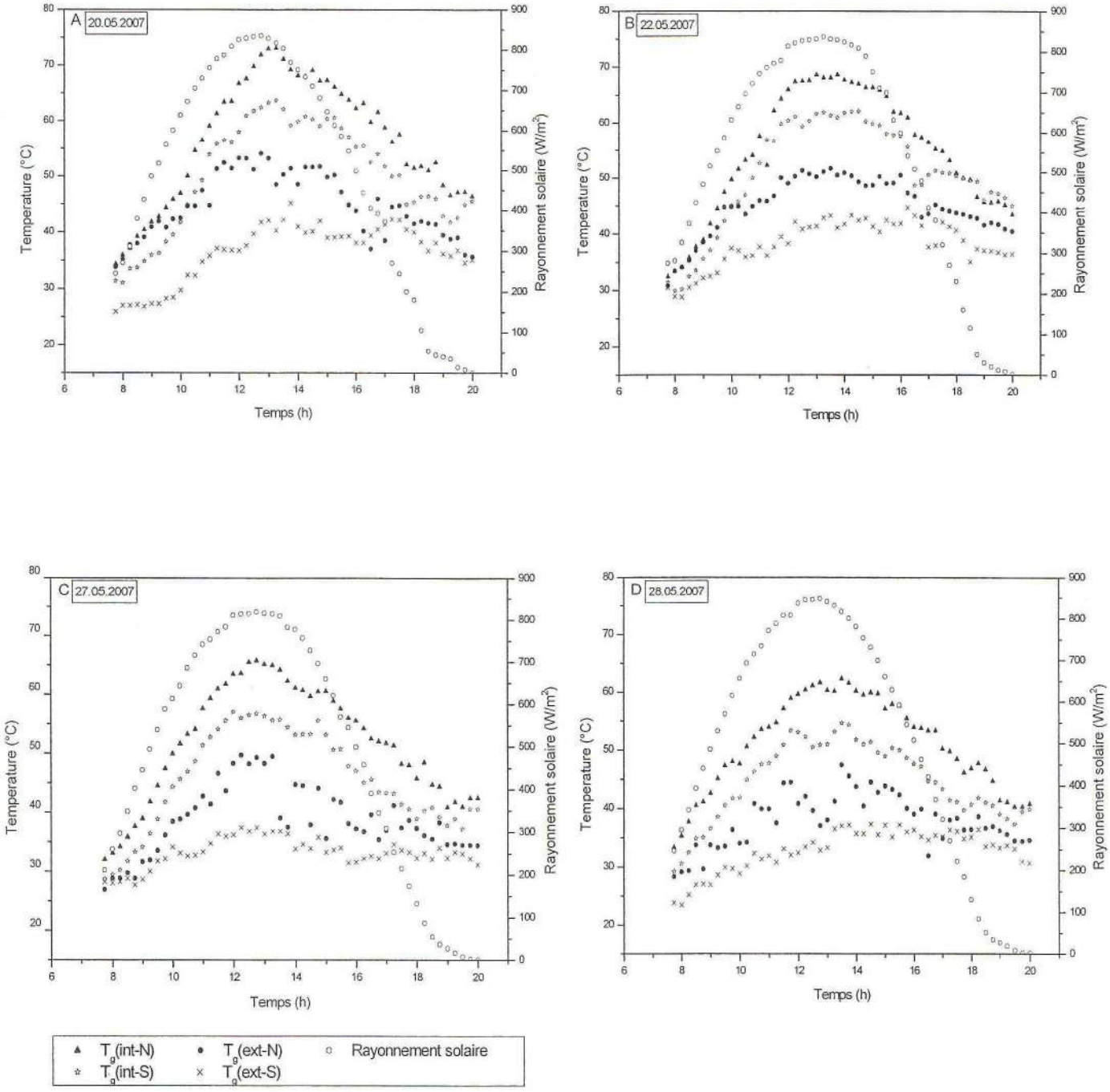


Figure (5.19): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Deuxième série: serre simple 2007:

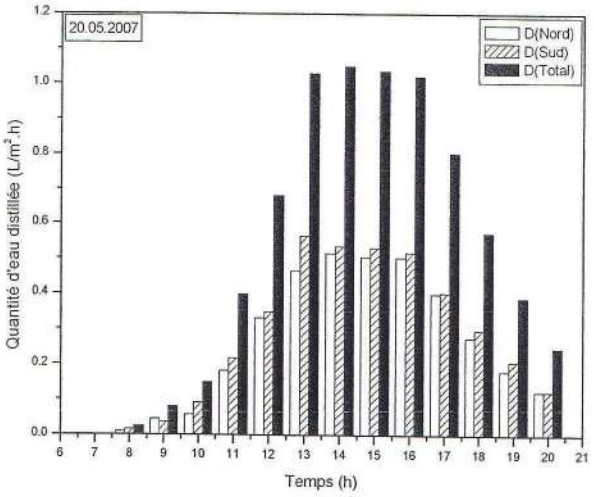


Figure (5.20): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

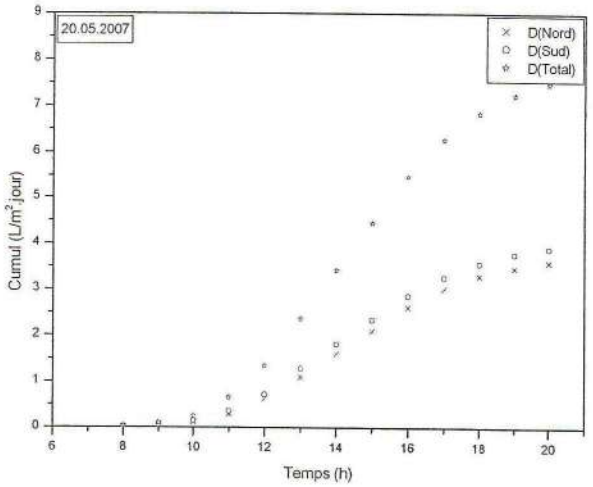


Figure (5.21): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

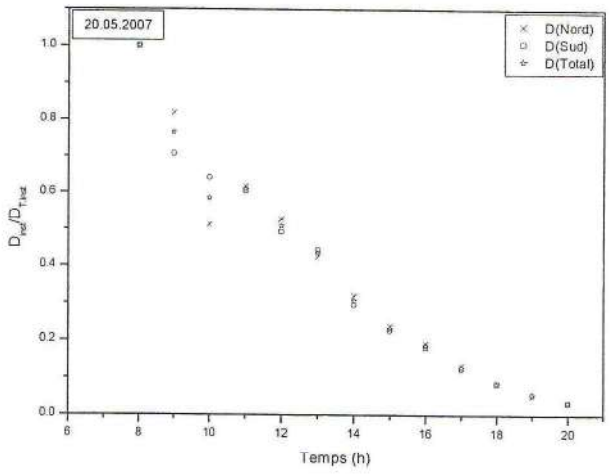


Figure (5.22): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

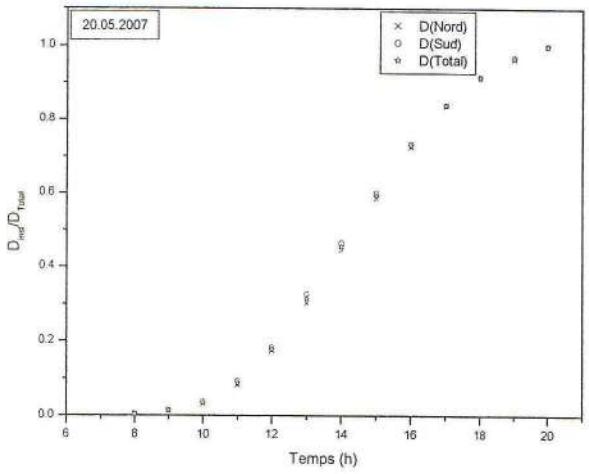


Figure (5.23): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Deuxième série: serre simple 2007:

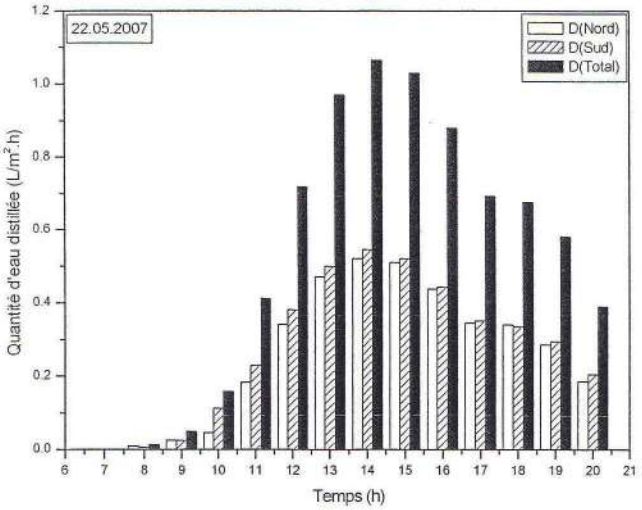


Figure (5.24): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

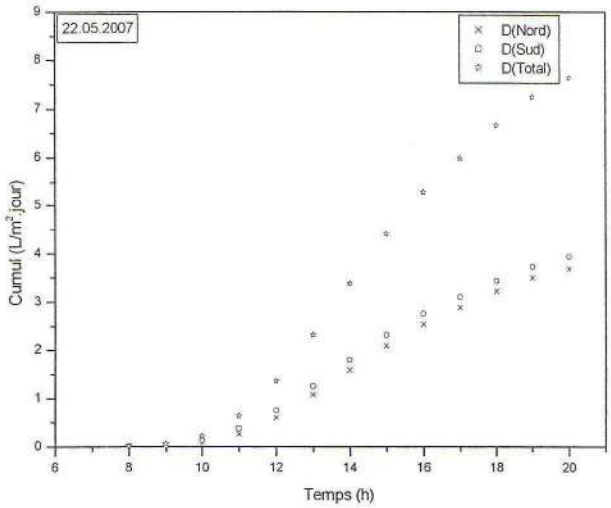


Figure (5.25): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

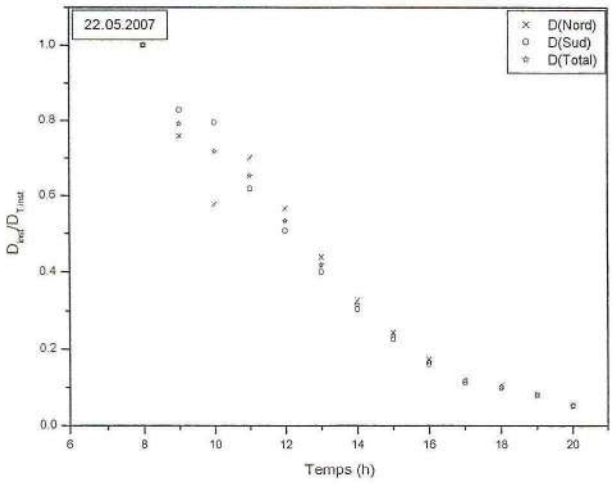


Figure (5.26): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

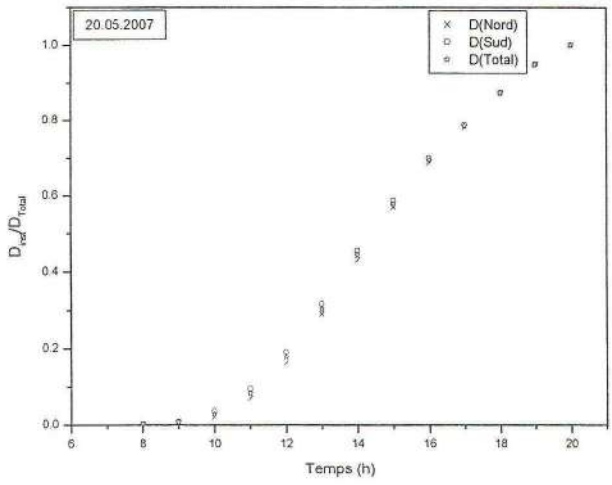


Figure (5.27): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Deuxième série: serre simple 2007:

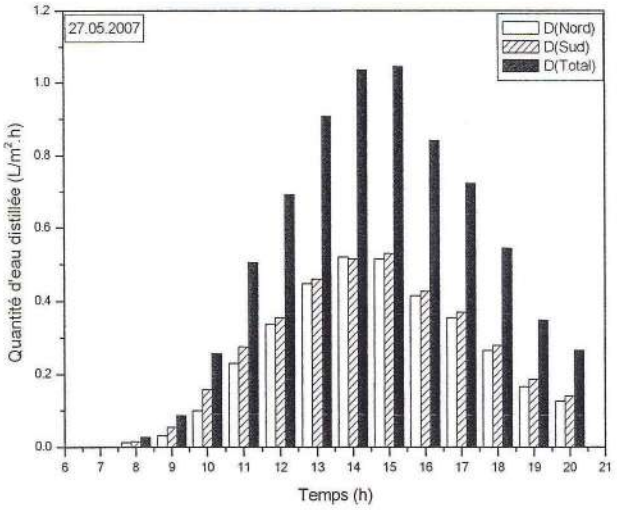


Figure (5.28): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

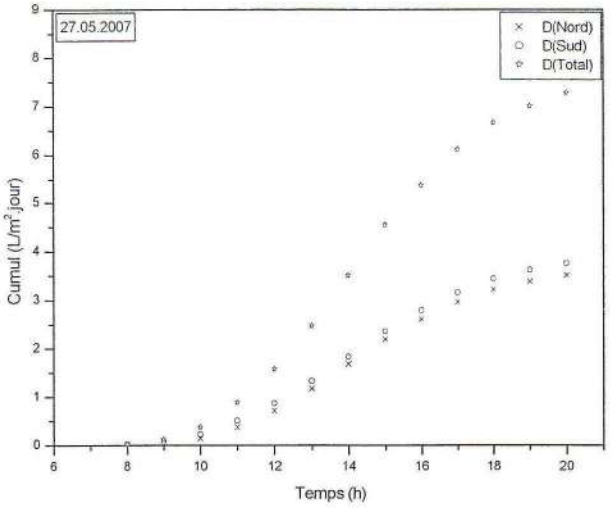


Figure (5.29): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

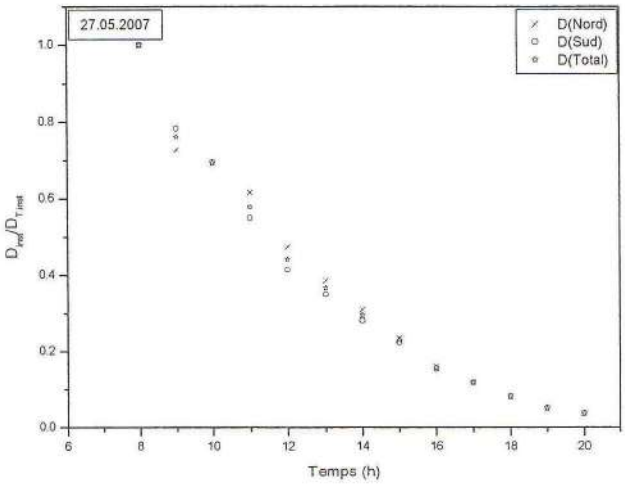


Figure (5.30): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

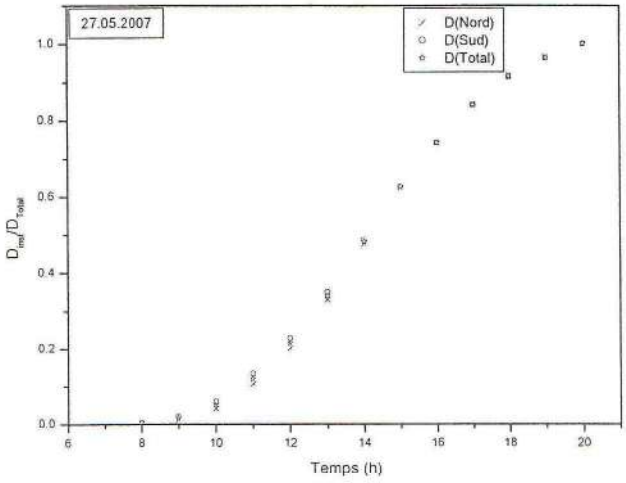


Figure (5.31): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Deuxième série: serre simple 2007:

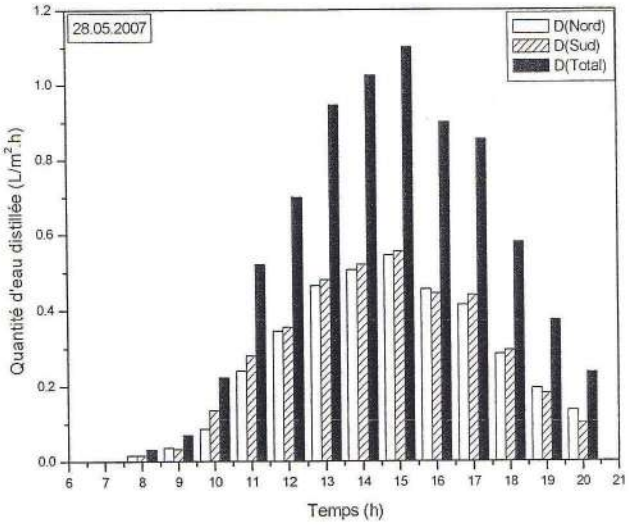


Figure (5.32): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

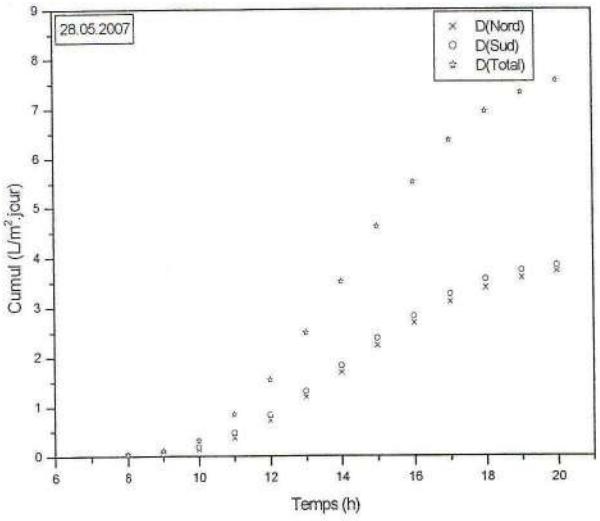


Figure (5.33): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

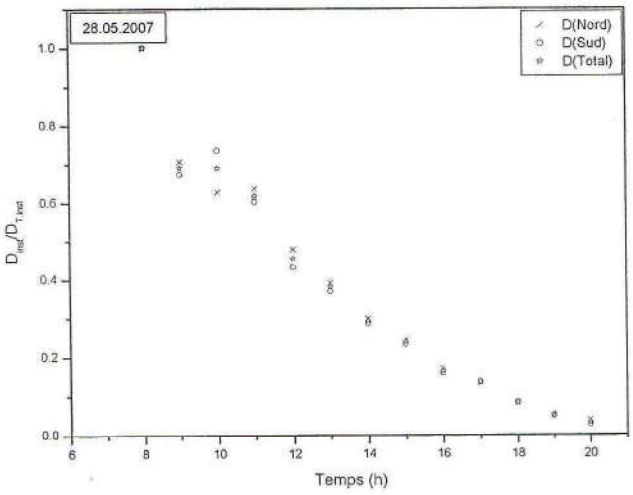


Figure (5.34): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

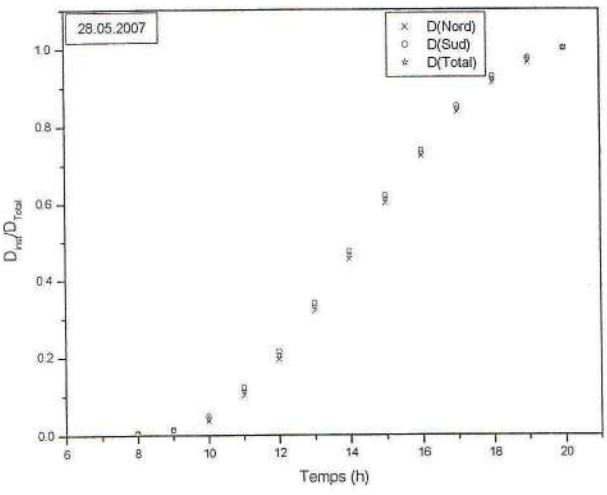


Figure (5.35): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Deuxième série: serre simple 2007:

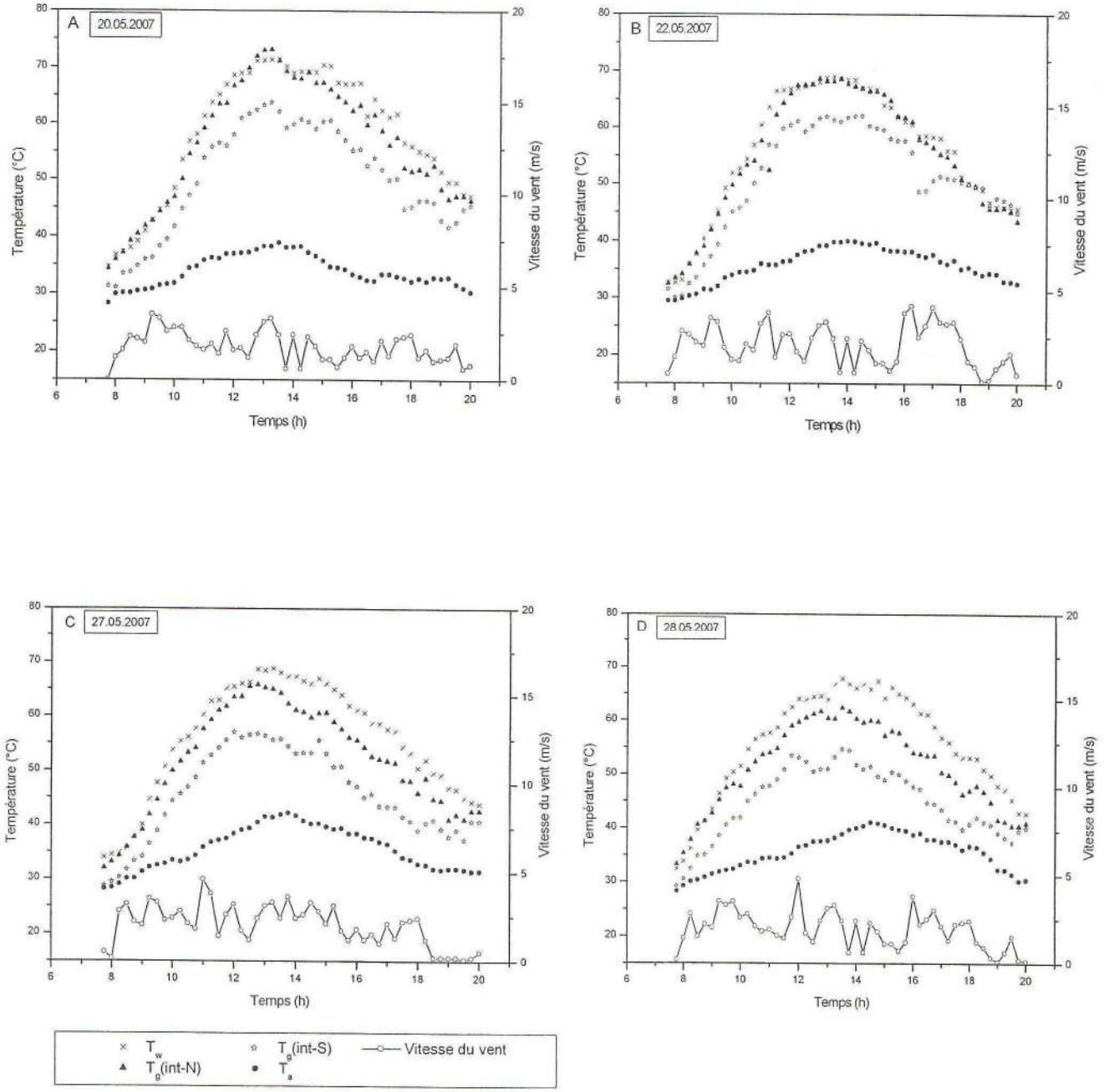


Figure (5.36): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Troisième série: Isolant 2007

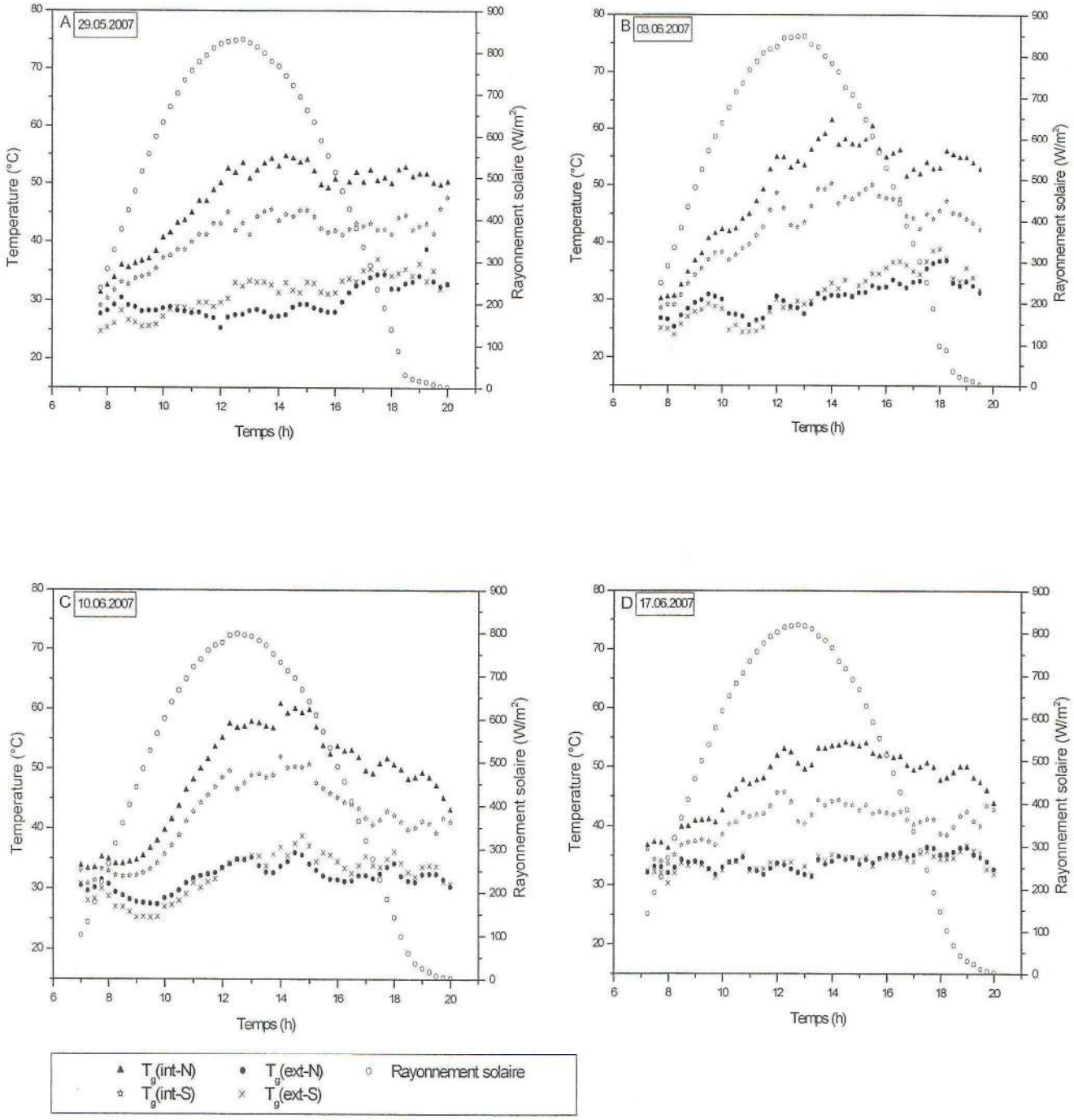


Figure (5.37): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Troisième série: Isolant 2007

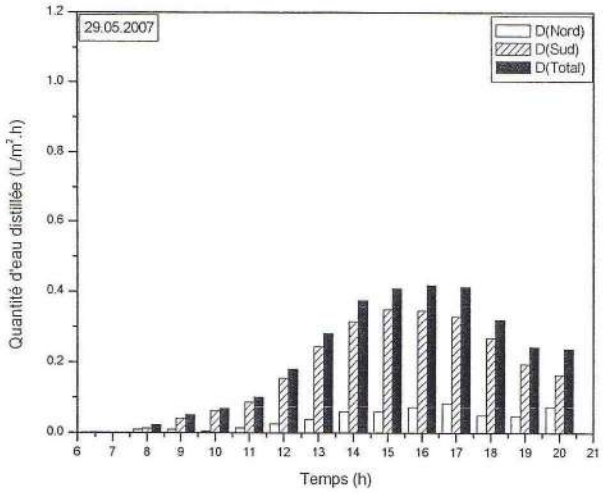


Figure (5.38): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

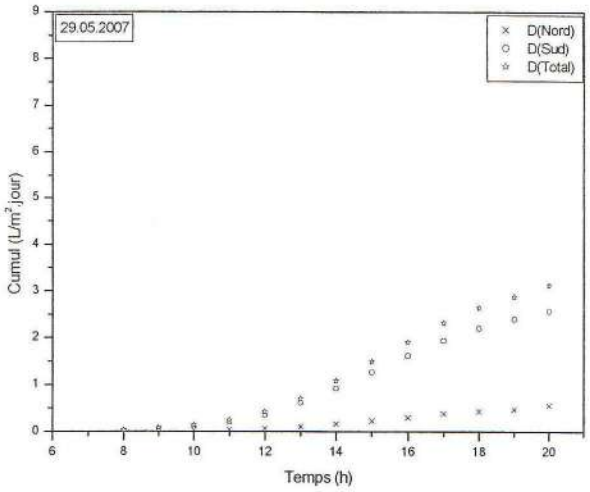


Figure (5.39): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

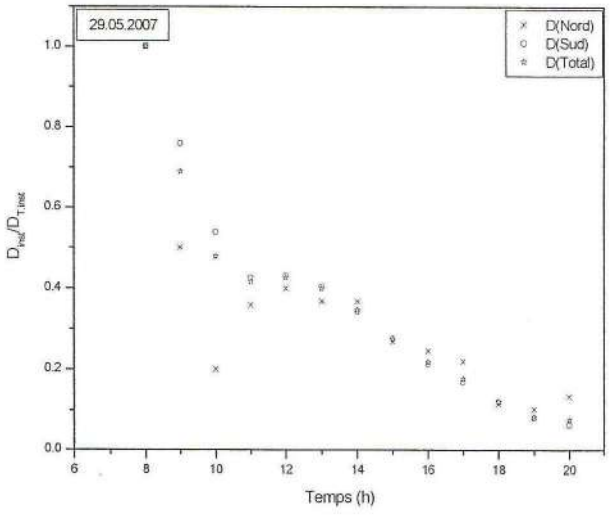


Figure (5.40): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

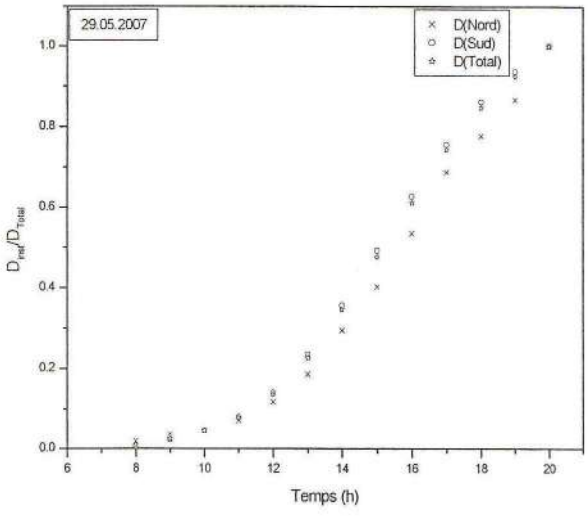


Figure (5.41): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Troisième série: Isolant 2007

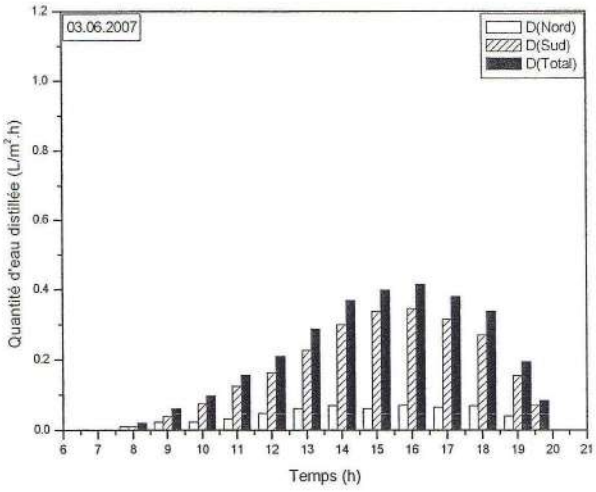


Figure (5.42): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

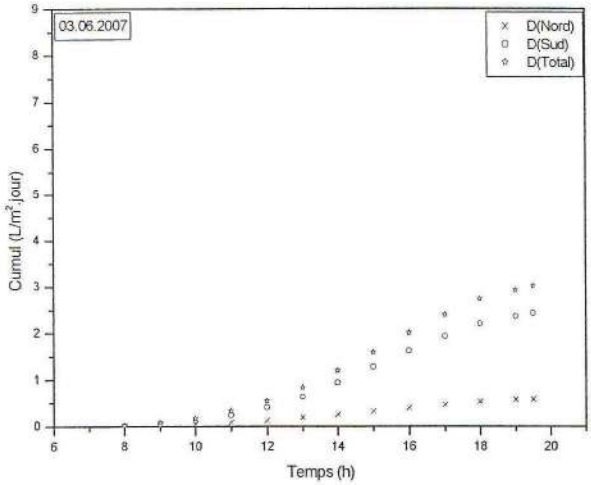


Figure (5.43): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

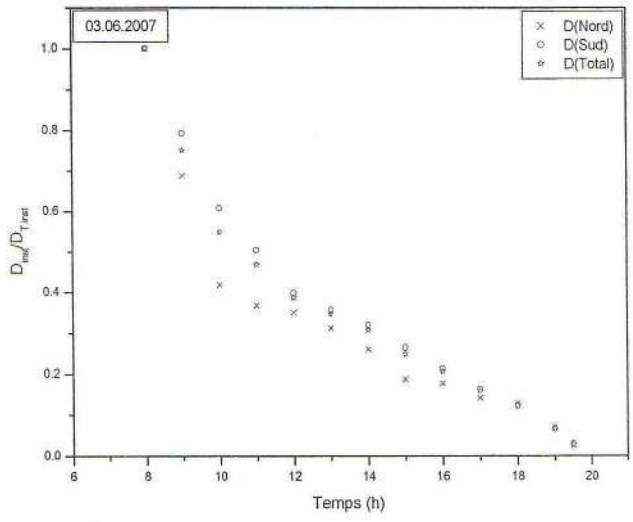


Figure (5.44): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

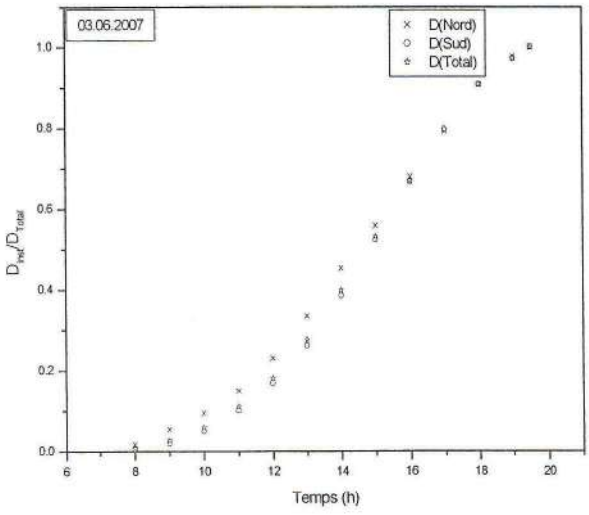


Figure (5.45): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Troisième série: Isolant 2007

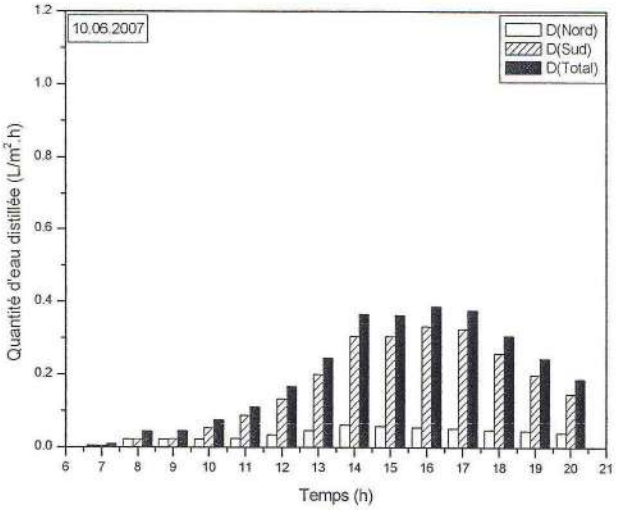


Figure (5.46): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

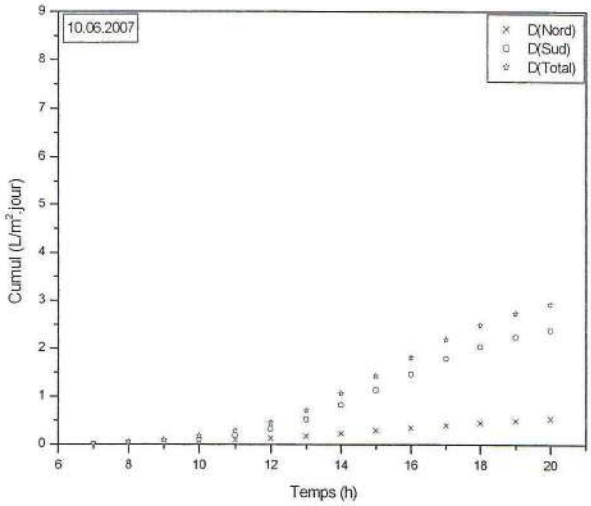


Figure (5.47): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

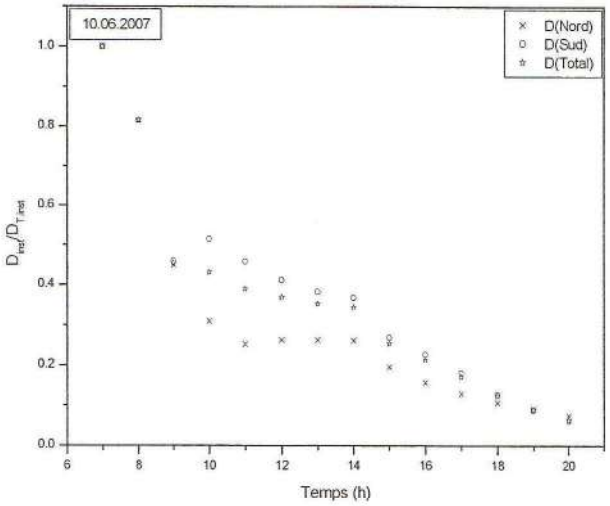


Figure (5.48): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

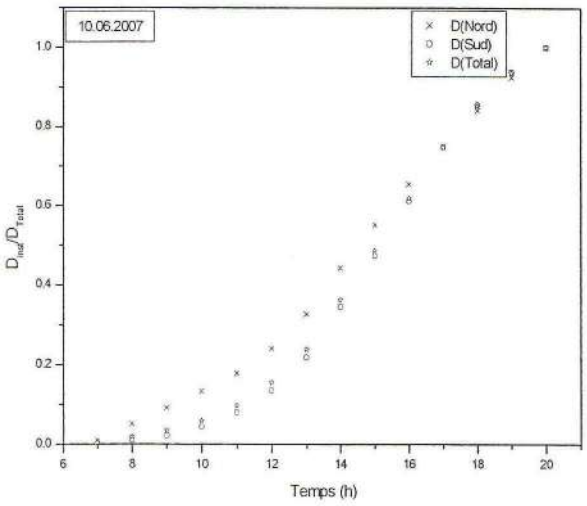


Figure (5.49): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Troisième série: Isolant 2007

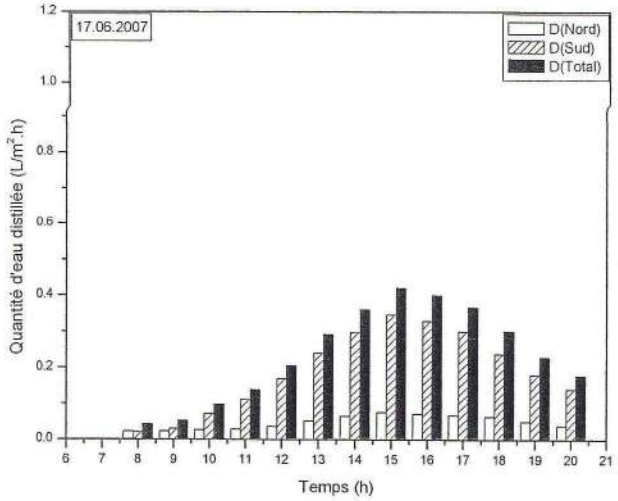


Figure (5.50): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

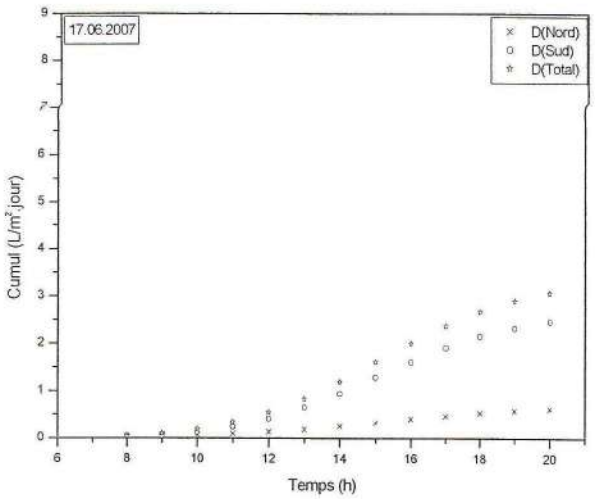


Figure (5.51): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

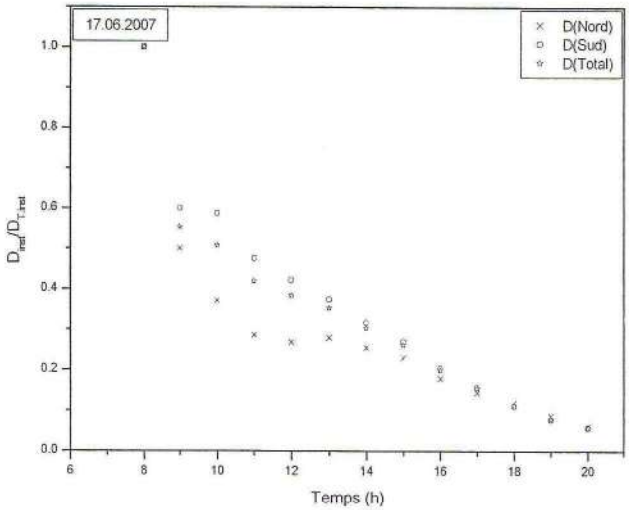


Figure (5.52): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

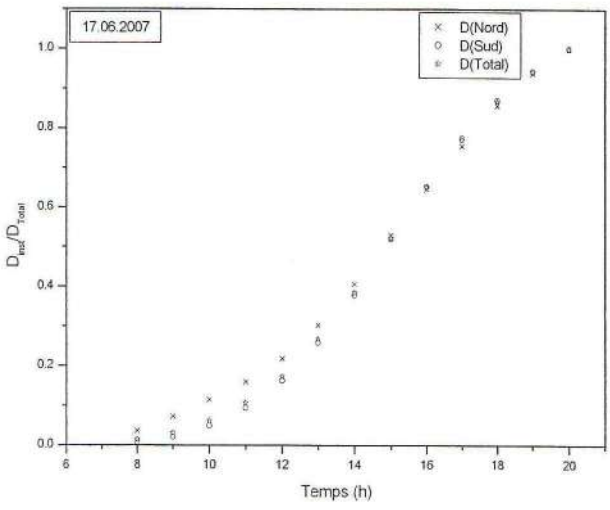


Figure (5.53): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Troisième série: Isolant 2007

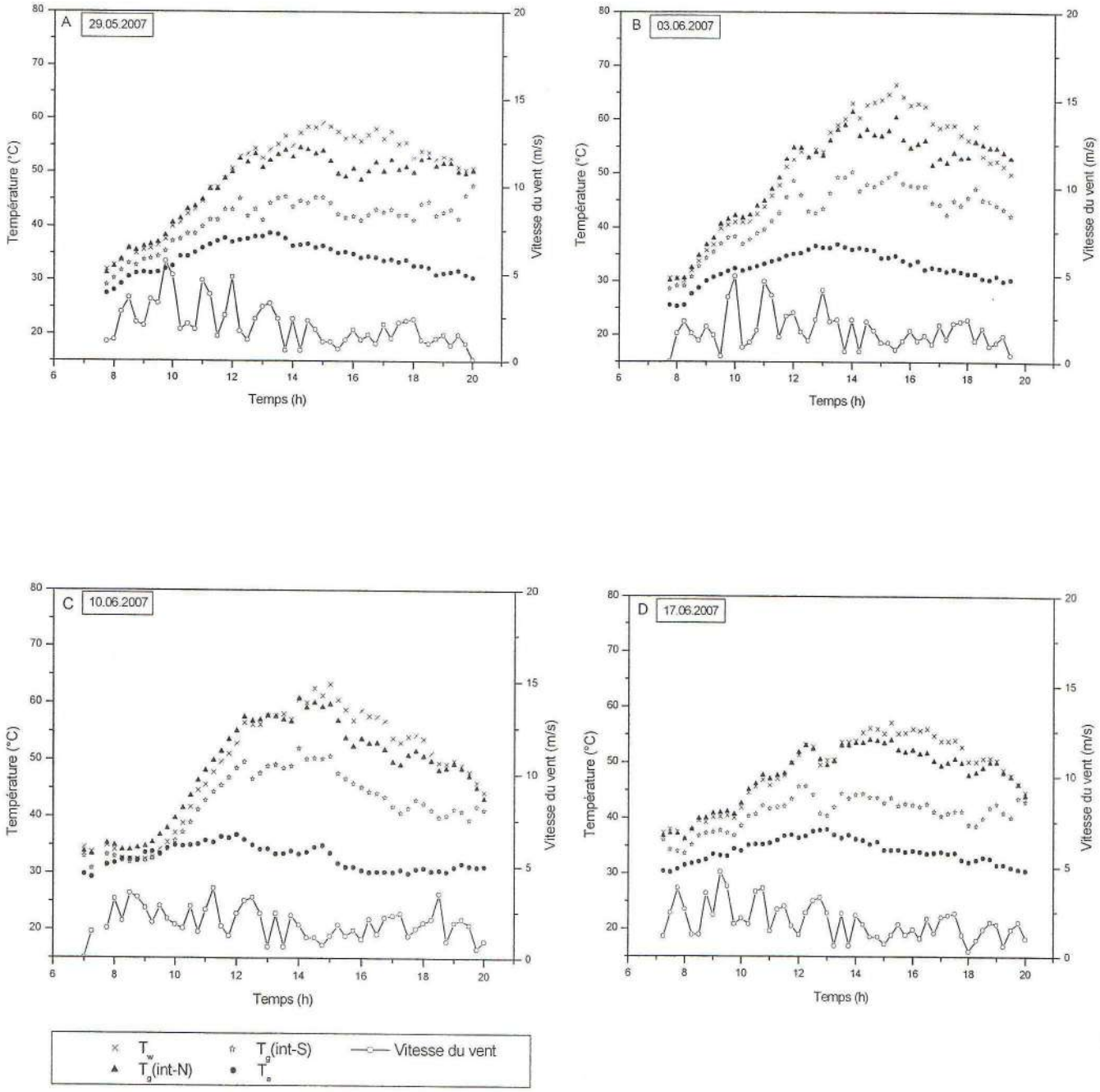


Figure (5.54): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Quatrième série: galvanisée 2007

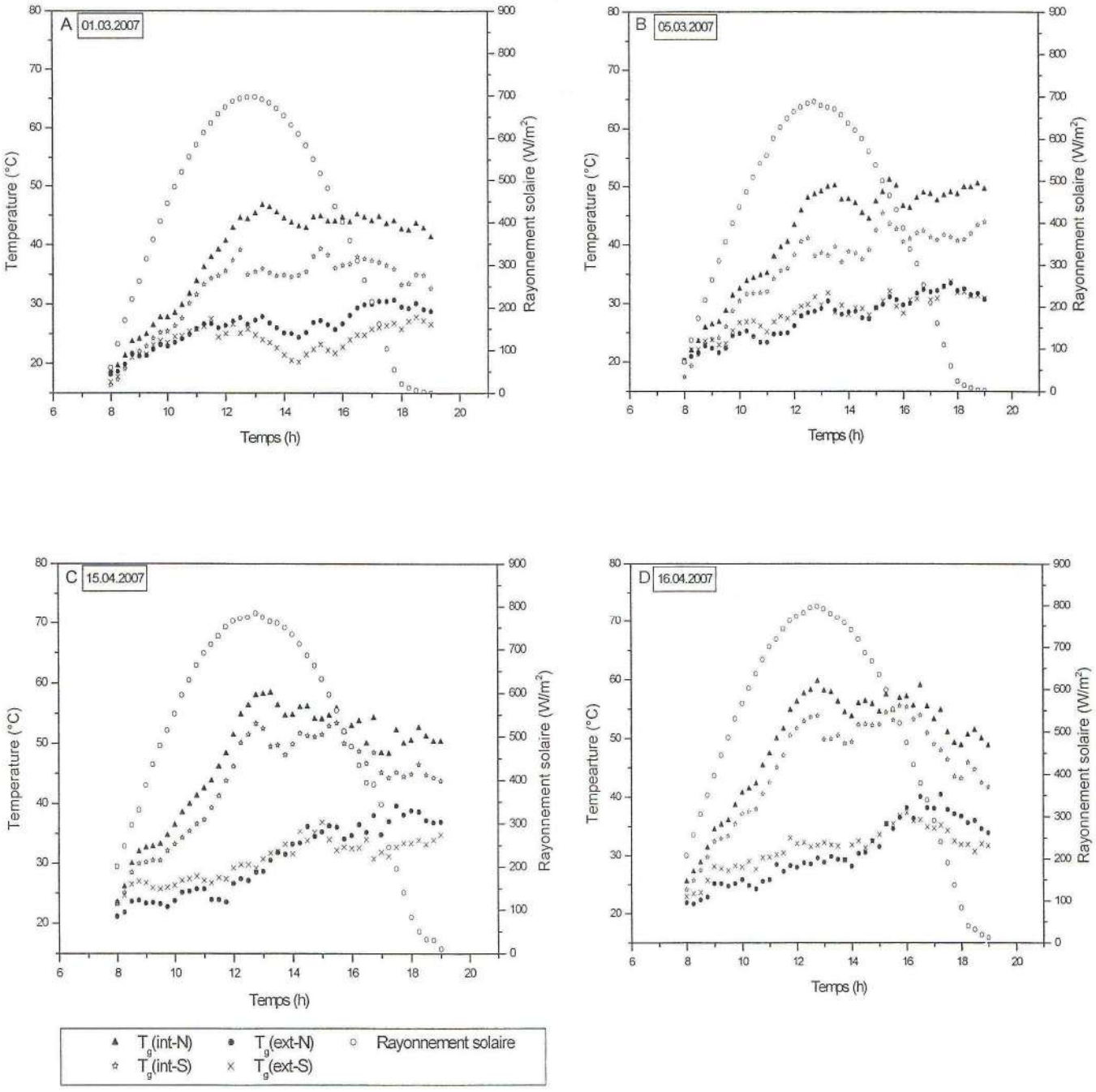


Figure (5.55): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Quatrième série: galvanisée 2007

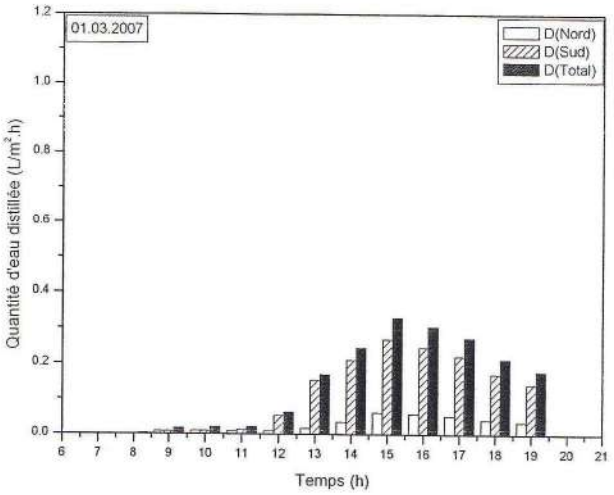


Figure (5.56): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

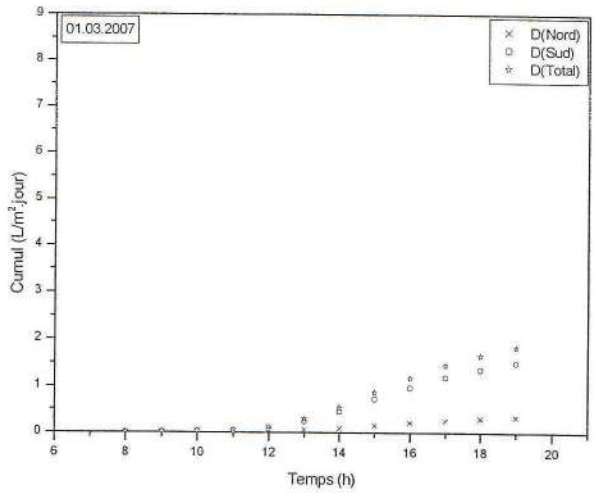


Figure (5.57): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

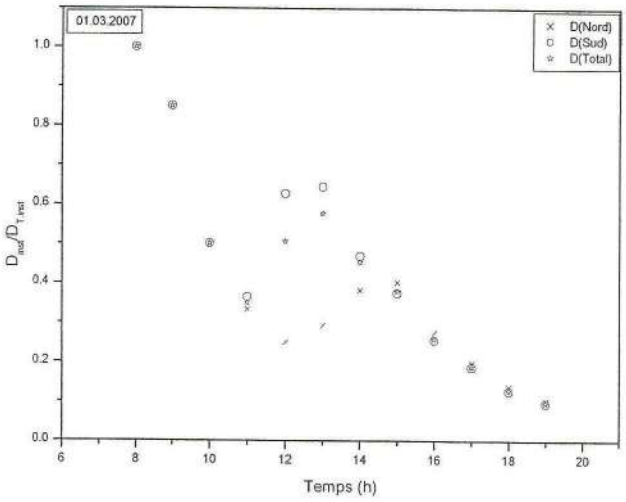


Figure (5.58): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

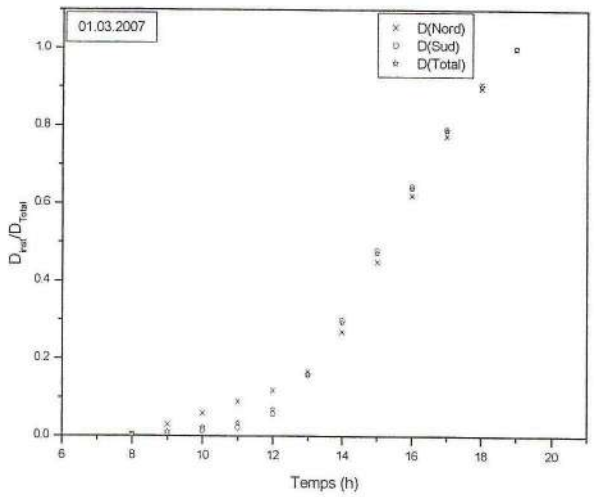


Figure (5.59): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Quatrième série: galvanisée 2007

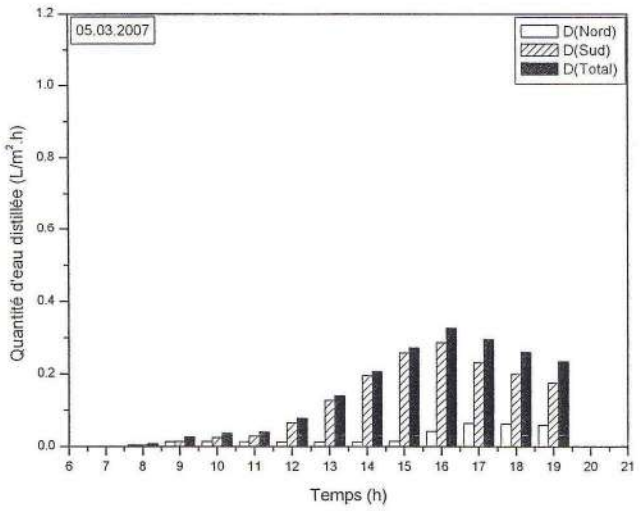


Figure (5.60): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

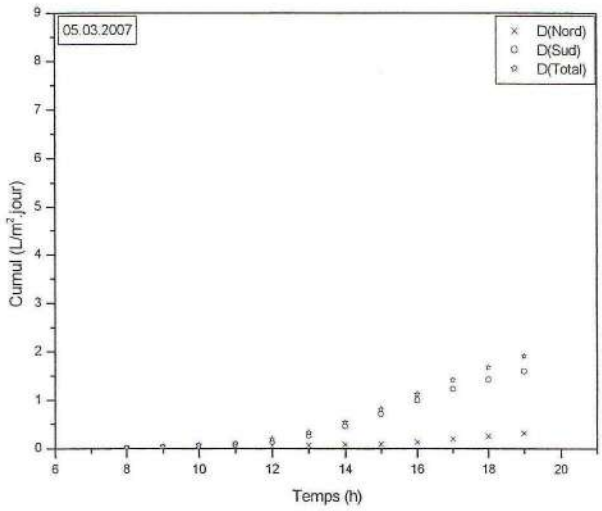


Figure (5.61): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

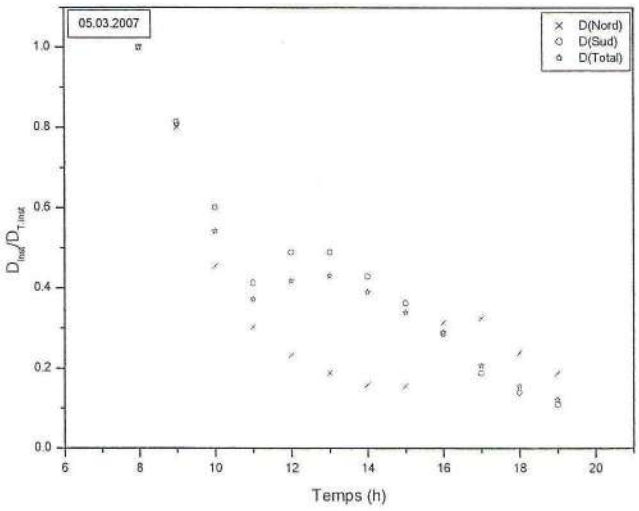


Figure (5.62): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

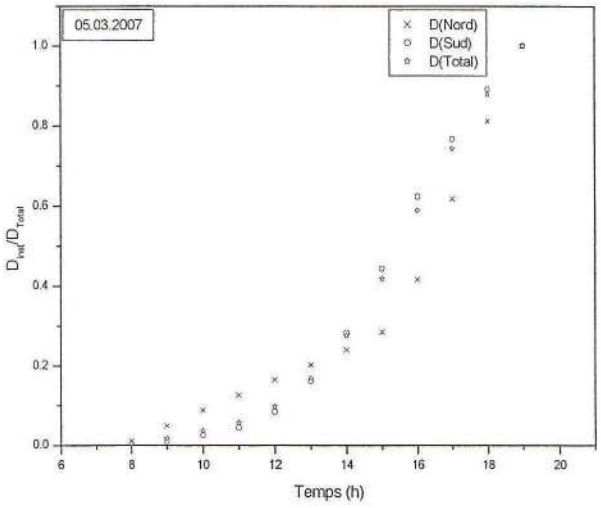


Figure (5.63): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Quatrième série: galvanisée 2007

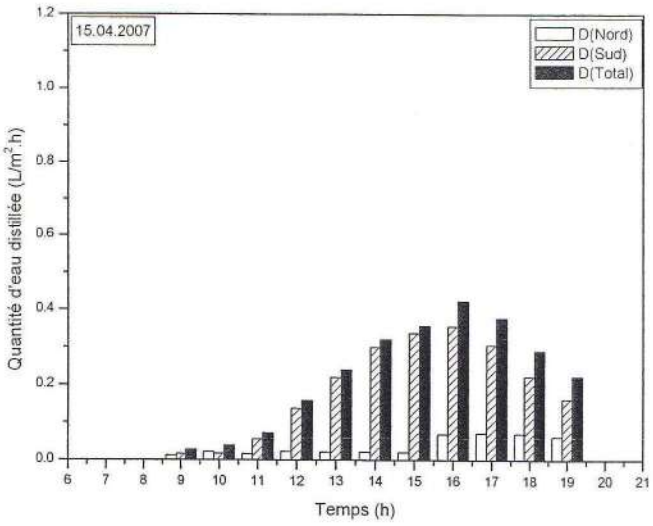


Figure (5.64): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

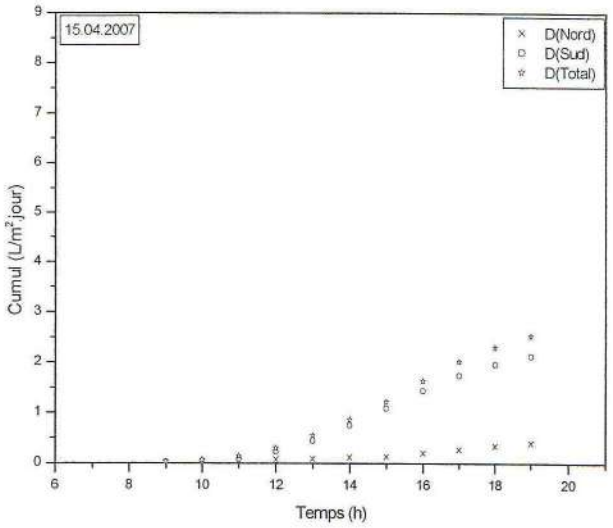


Figure (5.65): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

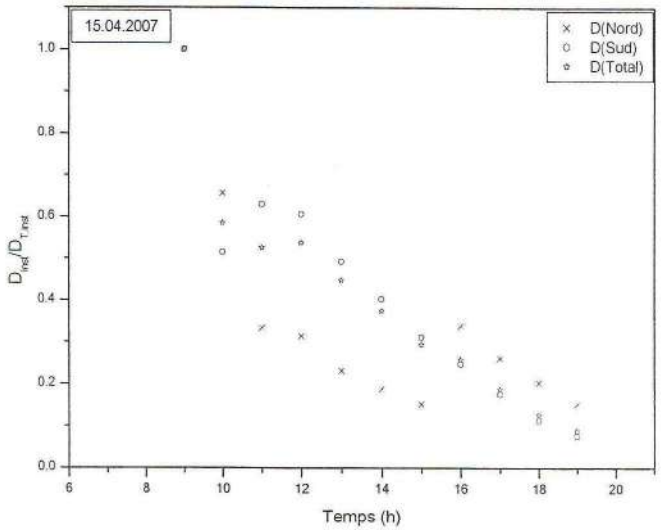


Figure (5.66): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

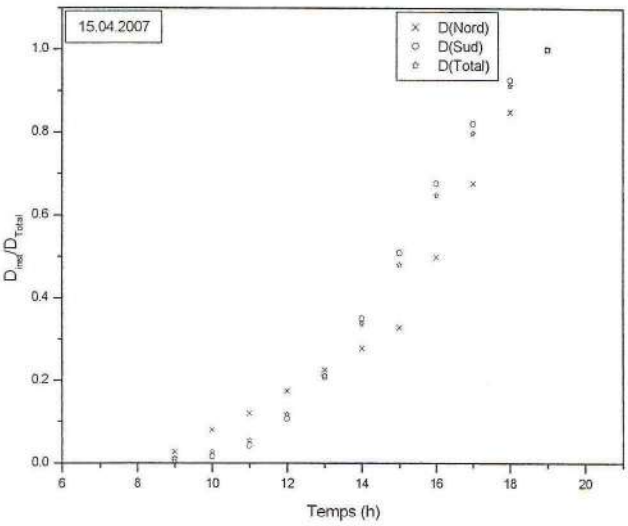


Figure (5.67): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Quatrième série: galvanisée 2007

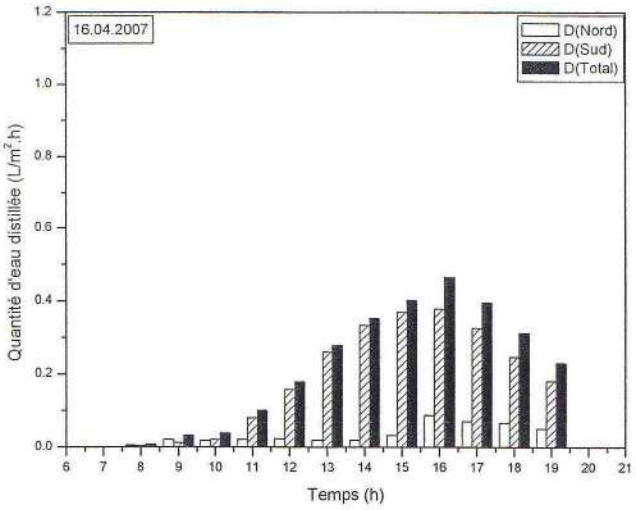


Figure (5.68): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

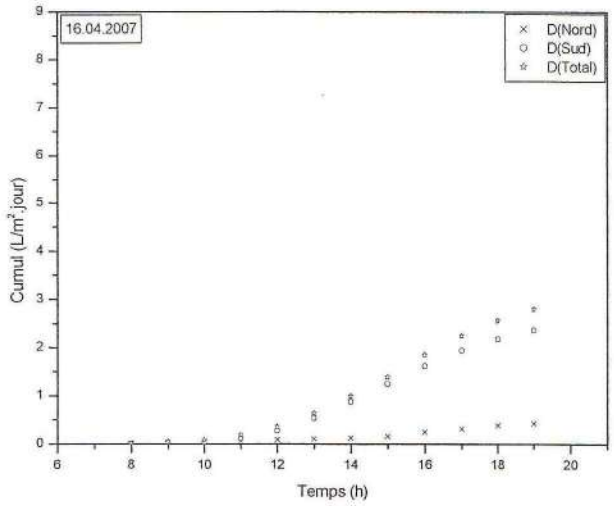


Figure (5.69): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

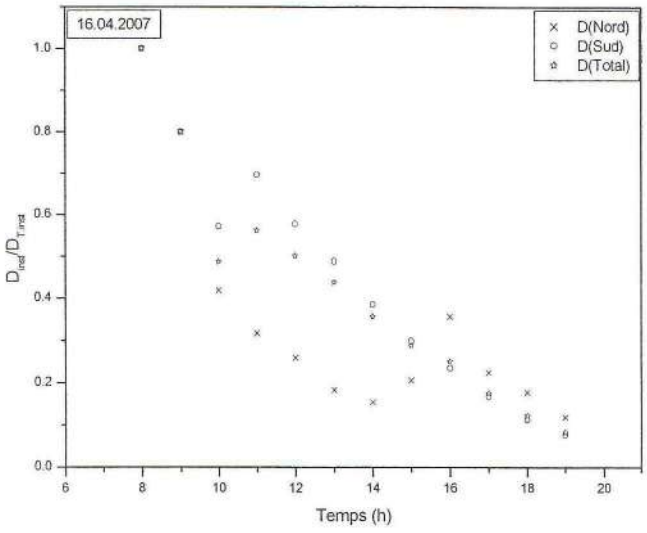


Figure (5.70): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

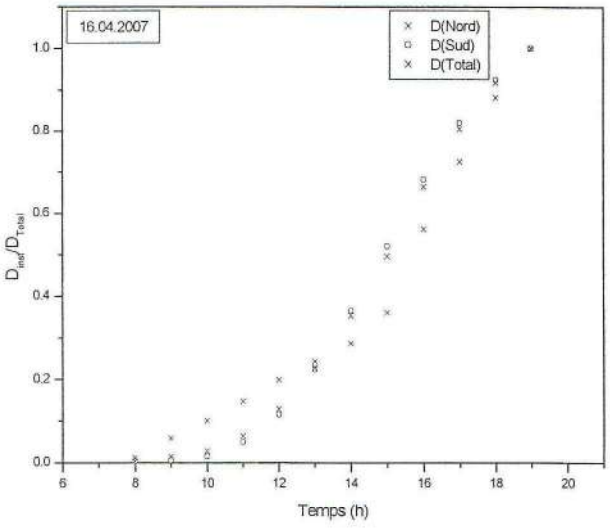


Figure (5.71): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Quatrième série: galvanisée 2007

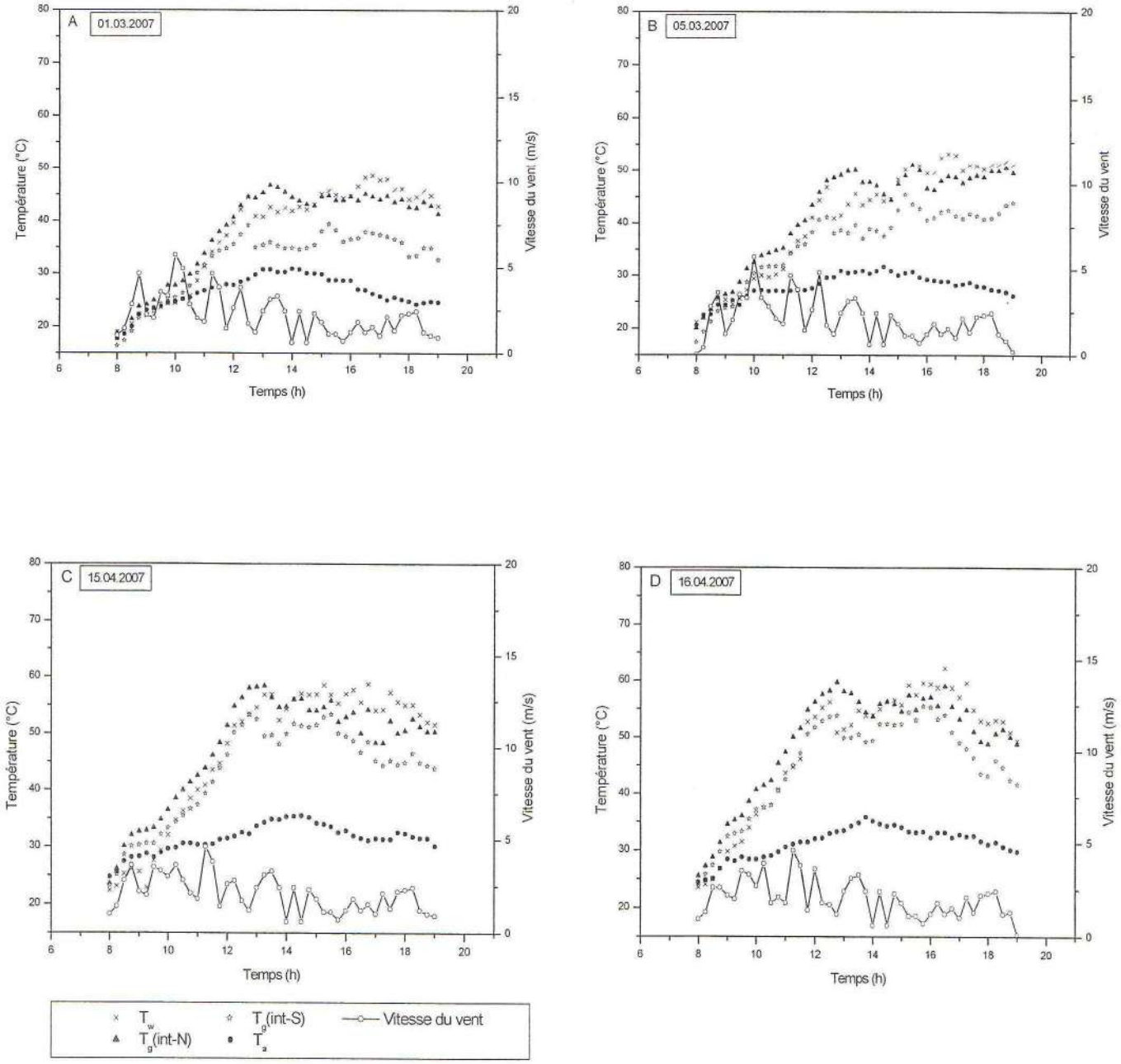


Figure (5.72): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

Ombrée le côté nord, et effectuée selon les étapes suivantes:

- **Première étape:**

  La distance entre l'ombre et la vitre : $L = 30\ cm$.

- **Deuxième étape:**

  La distance entre l'ombre et la vitre : $L = 60\ cm$.

- **Troisième étape:**

  La distance entre l'ombre et la vitre : $L = 80\ cm$.

Cinquième série: Ombre 2007

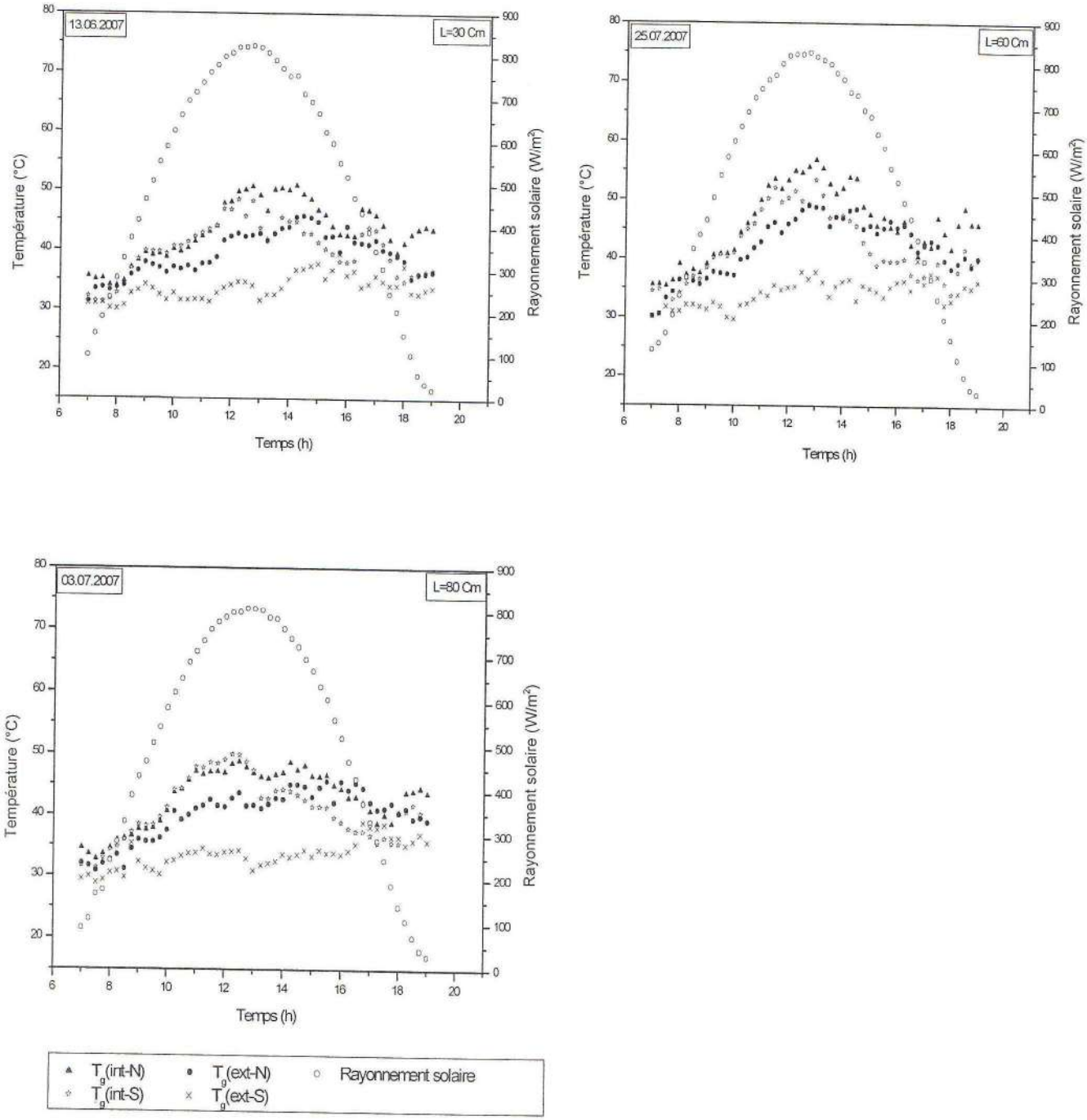


Figure (5.73): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007 (L = 30 *cm*)

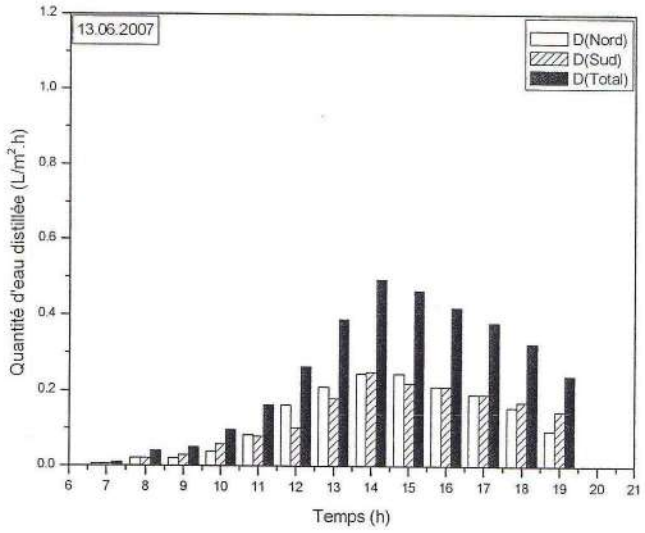


Figure (5.74): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

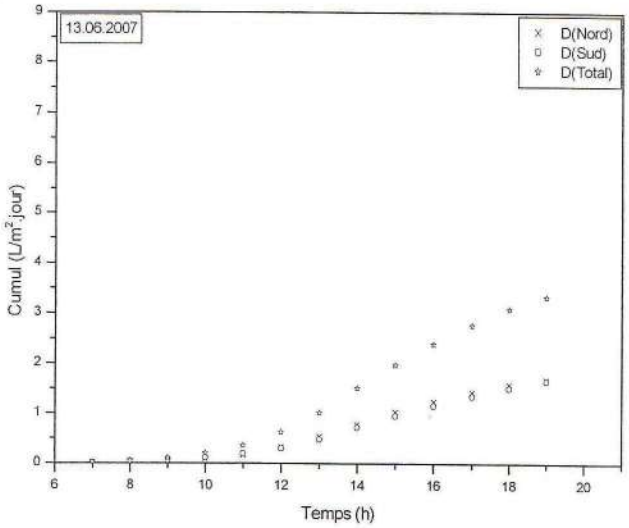


Figure (5.75): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

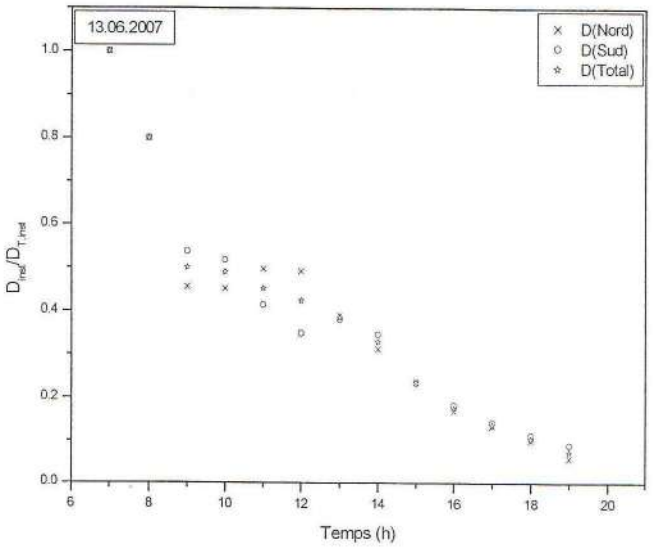


Figure (5.76): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

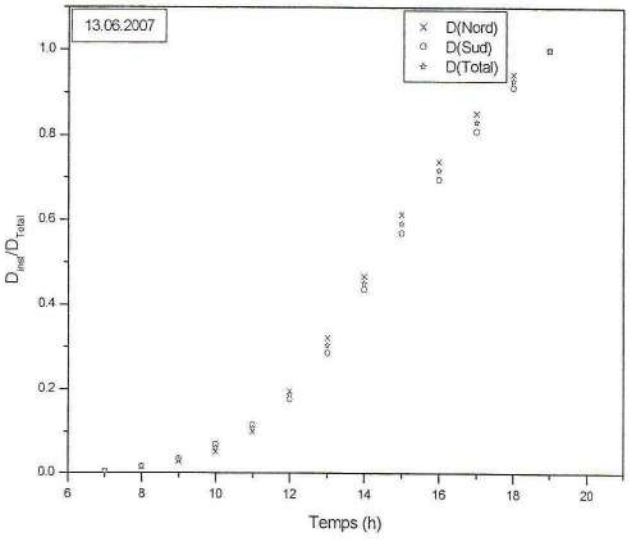


Figure (5.77): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007 (L = 60 *cm*):

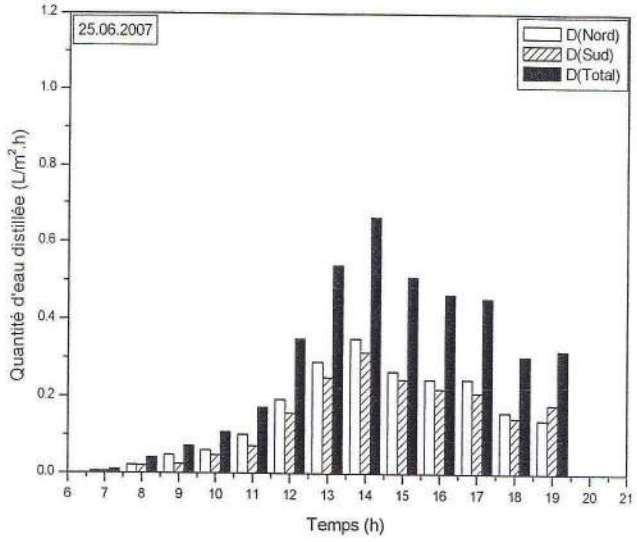


Figure (5.78): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

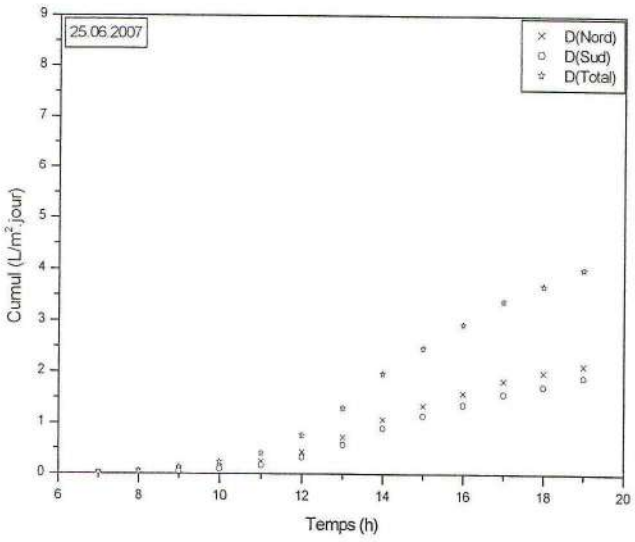


Figure (5.79): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

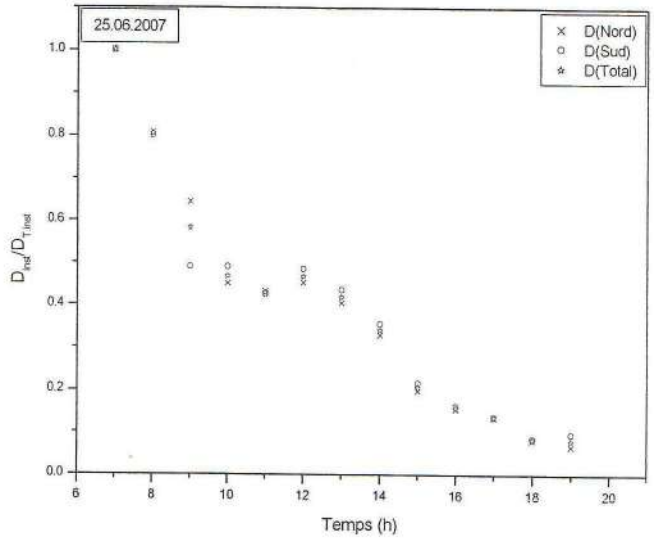


Figure (5.80): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

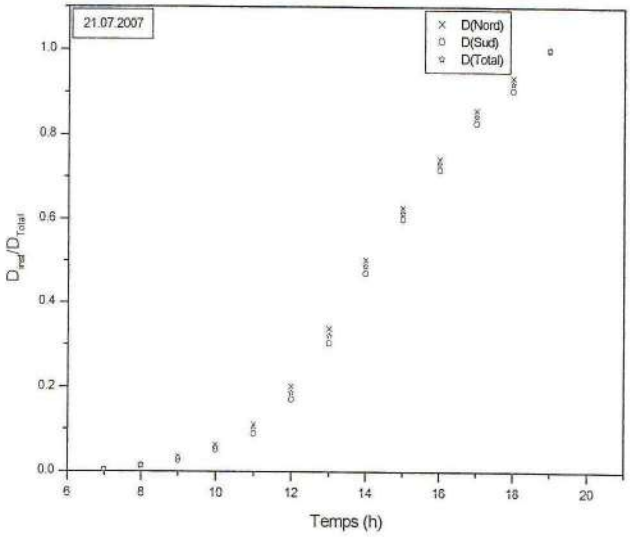


Figure (5.81): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007 (L = 80 *cm*)

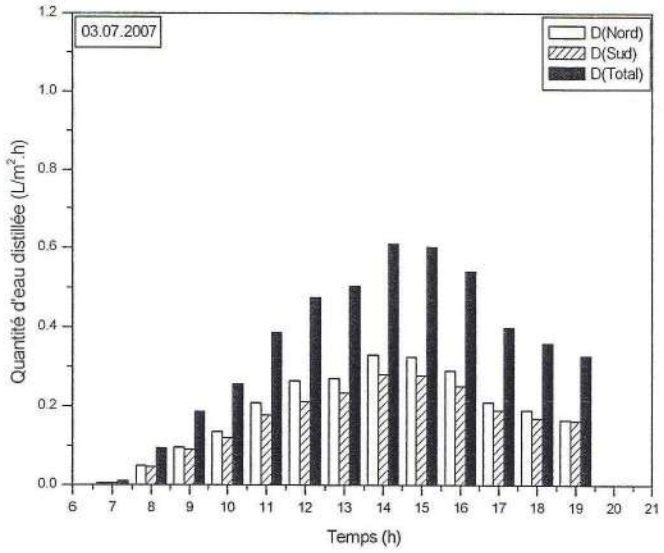


Figure (5.82): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

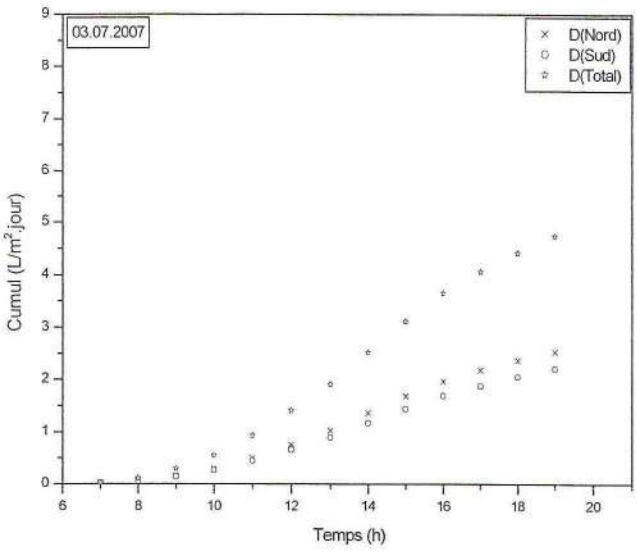


Figure (5.83): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

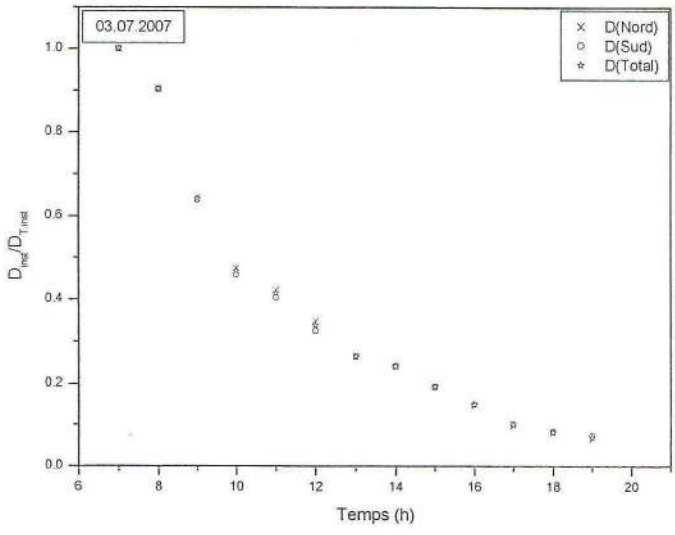


Figure (5.84): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

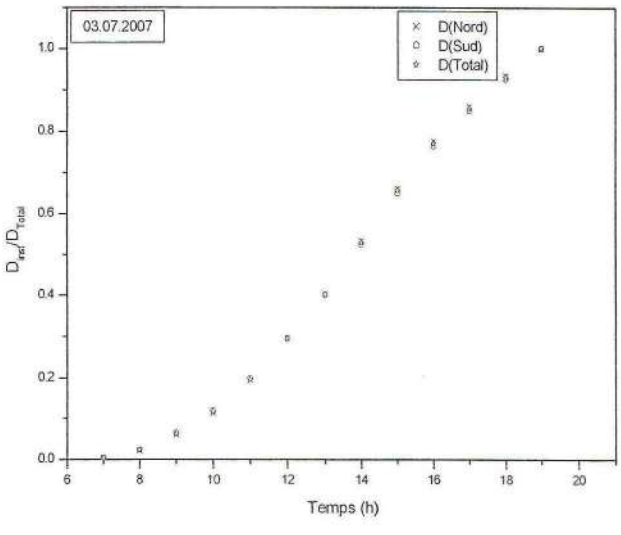


Figure (5.85): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

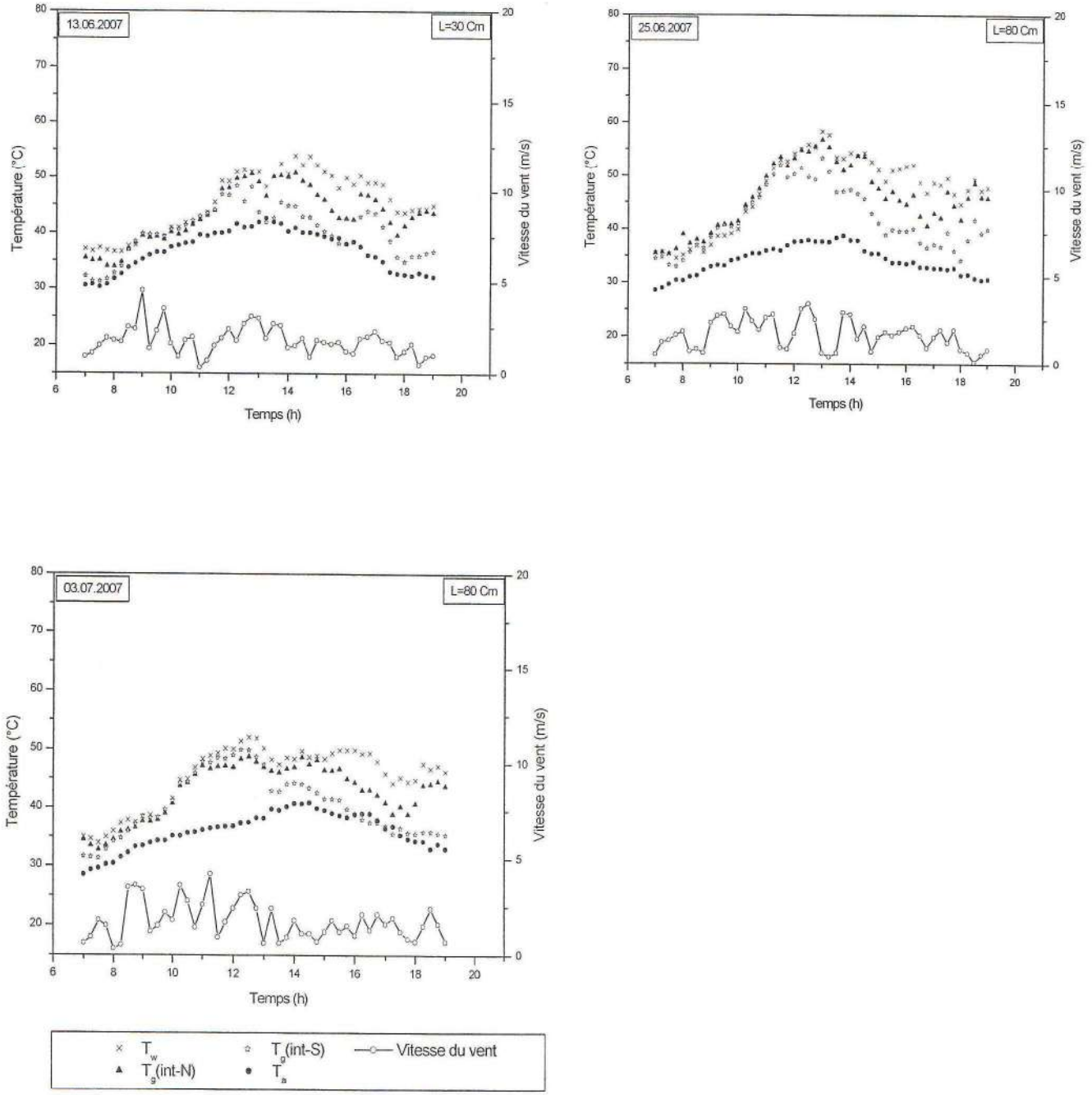


Figure (5.86): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

1. Première période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 11:00 à 19:00

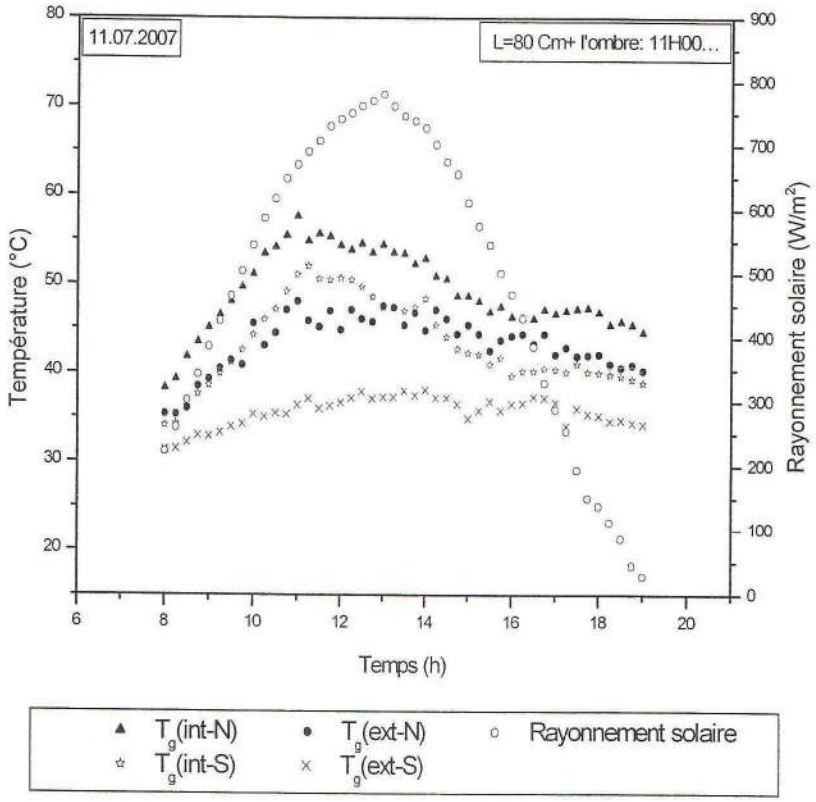


Figure (5.87): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

1. **Première période**:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 11:00 à 19:00.

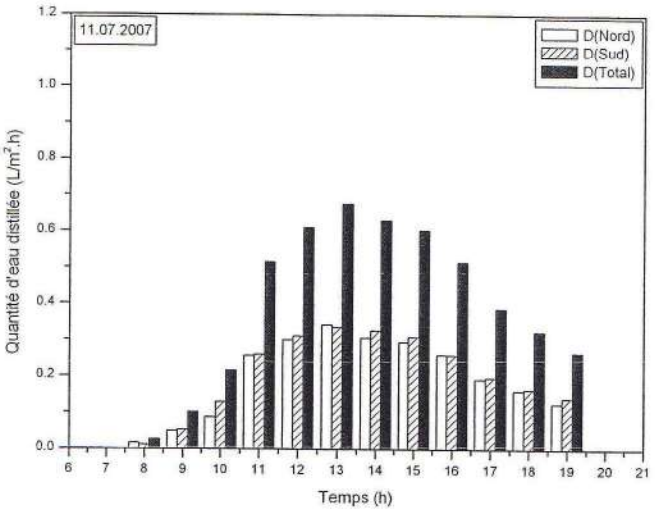


Figure (5.88): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

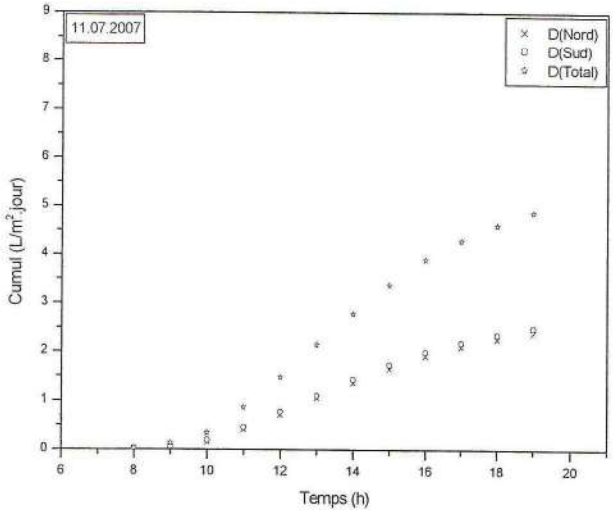


Figure (5.89): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

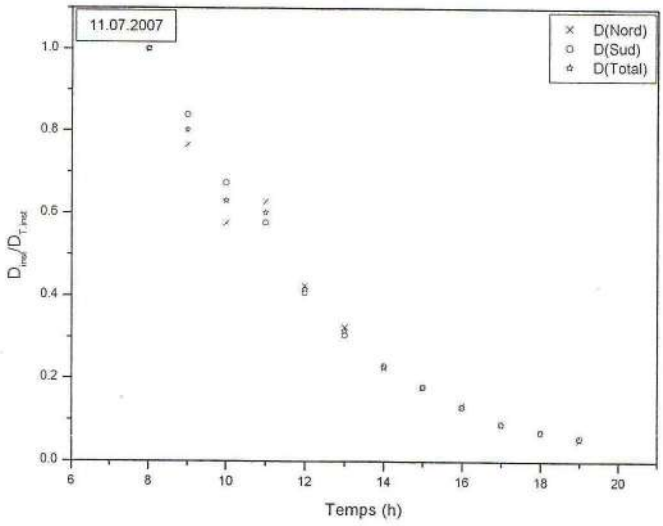


Figure (5.90): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

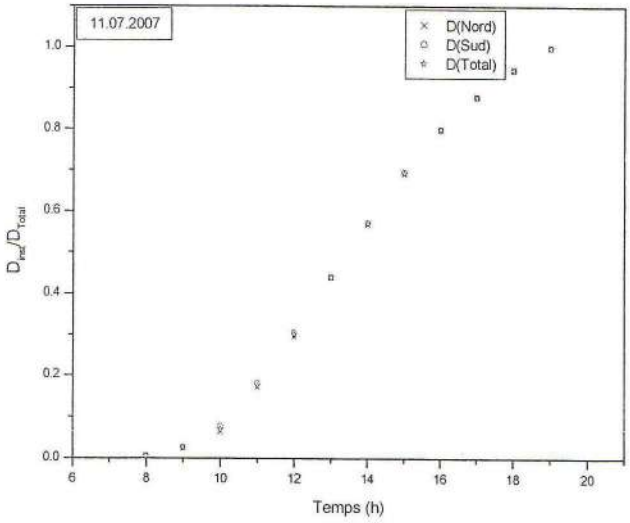


Figure (5.91): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

1. **Première période**:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 11:00 à 19:00.

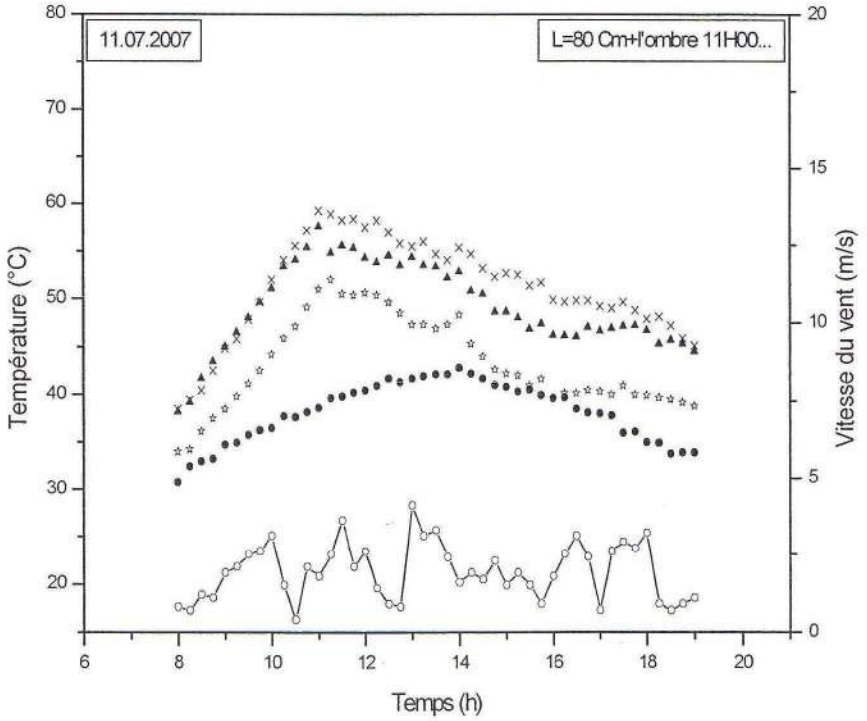


Figure (5.92): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

2. Deuxième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 10 :30 à 12 :30 et de 13 :30 à 15 :30.

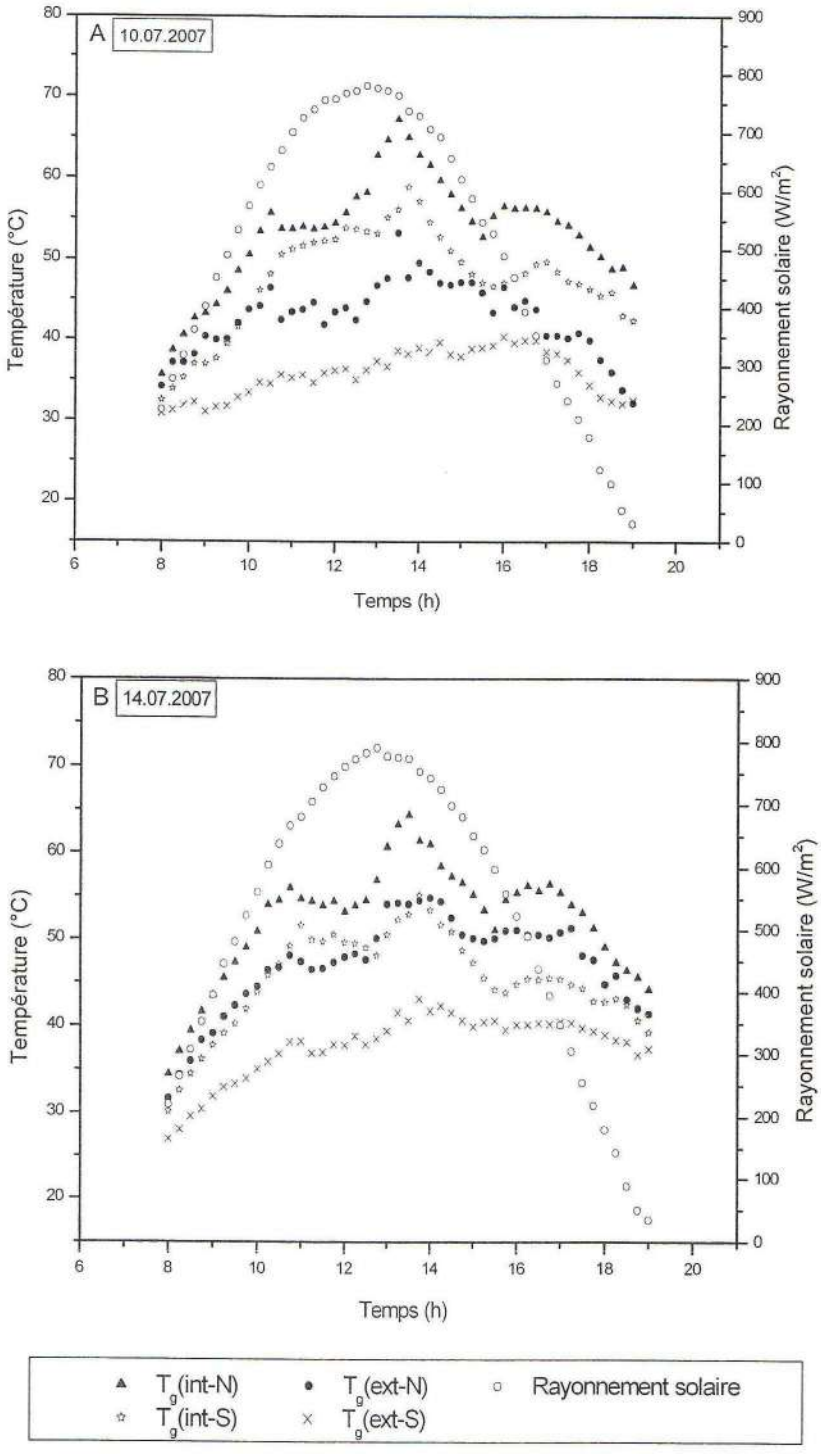


Figure (5.93): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

2. Deuxième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 10 :30 à 12 :30 et de 13 :30 à 15 :30.

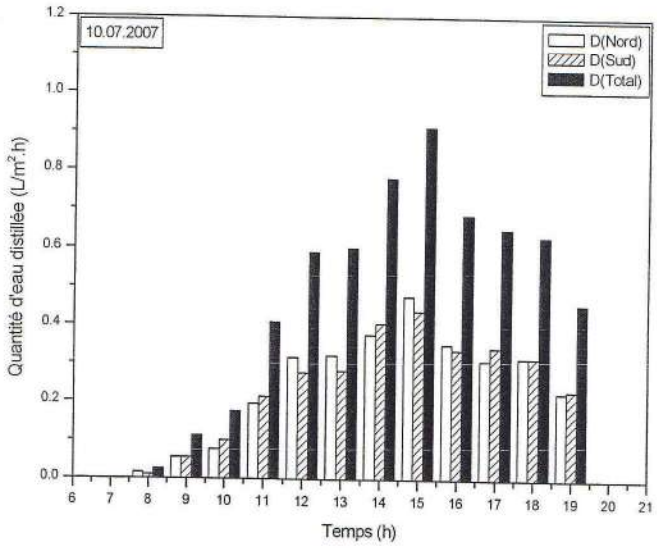


Figure (5.94): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

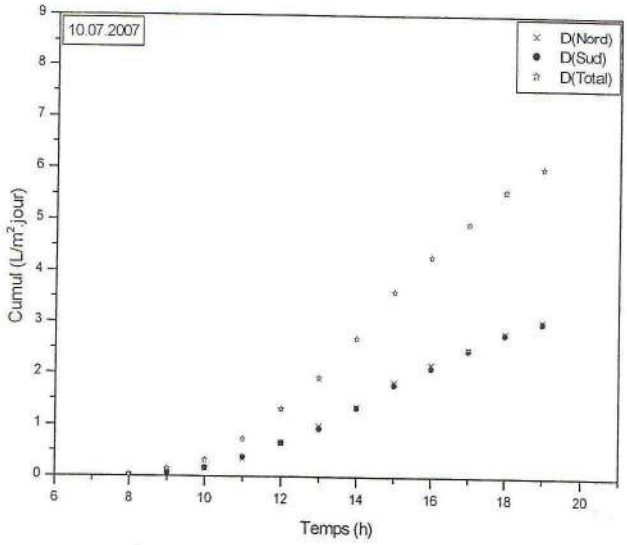


Figure (5.95): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

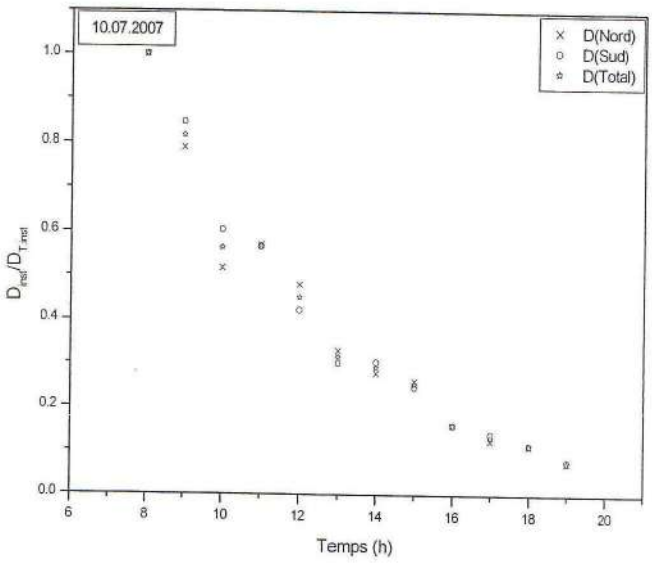


Figure (5.96): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

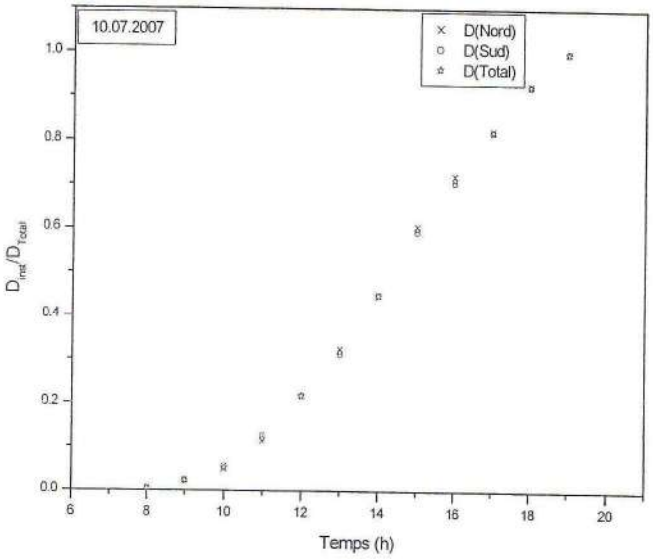


Figure (5.97): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

2. Deuxième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 10 :30 à 12 :30 et de 13 :30 à 15 :30.

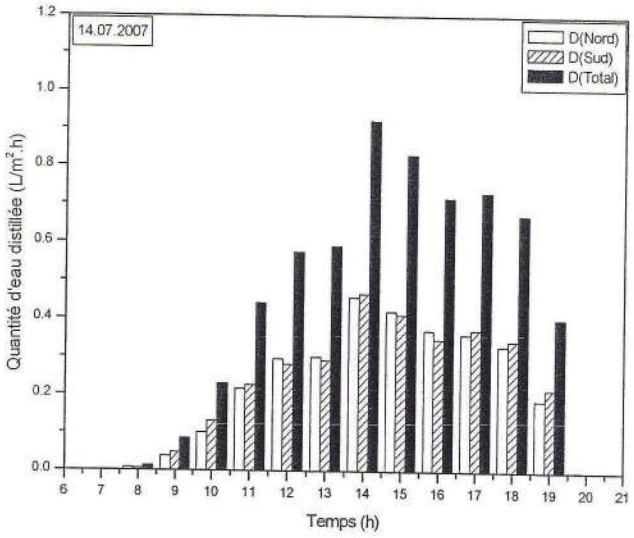


Figure (5.98): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

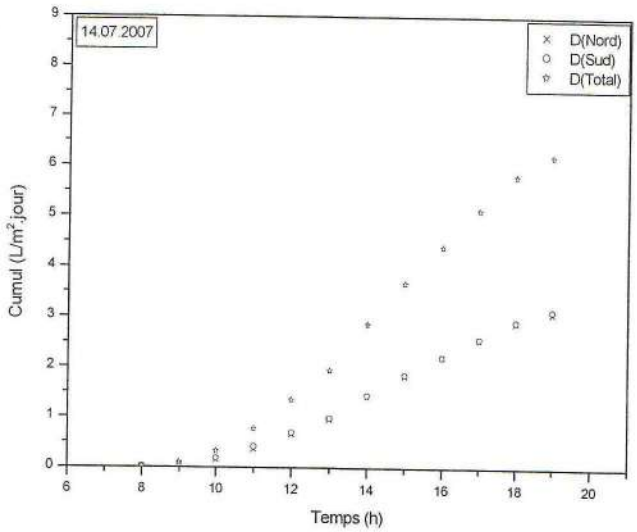


Figure (5.99): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

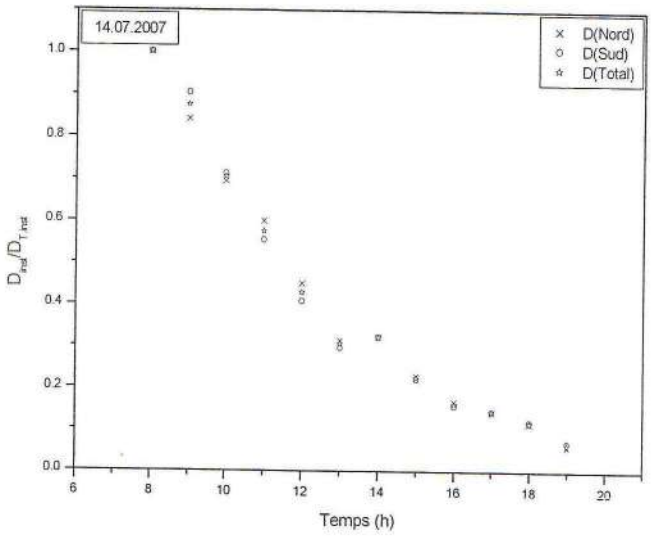


Figure (5.100): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

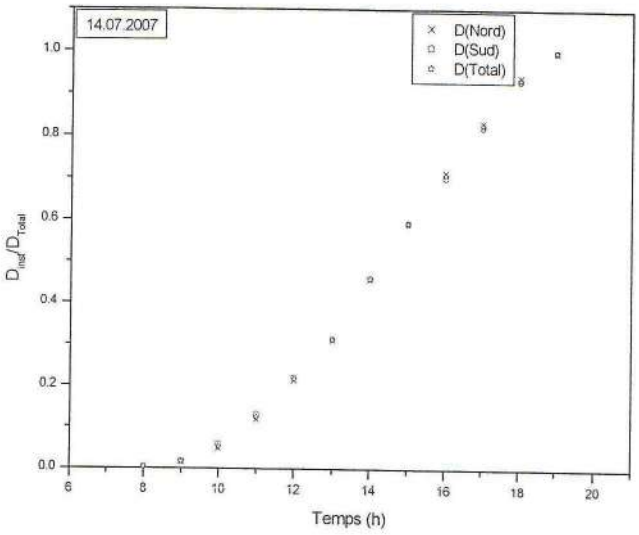


Figure (5.101): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

2. Deuxième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 10 :30 à 12 :30 et de 13 :30 à 15 :30.

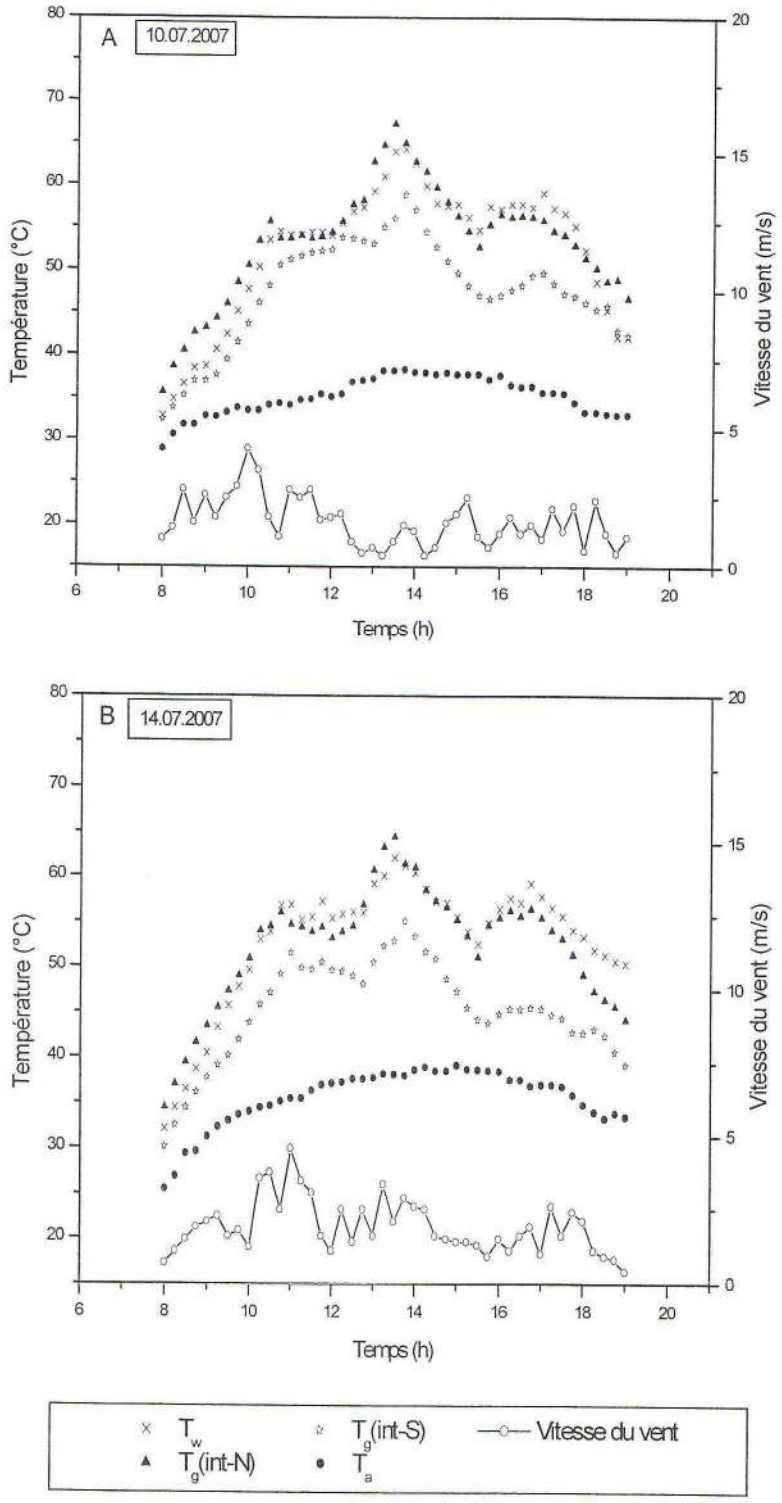


Figure (5.102): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

3. Troisième période et Quatrième période $(L = 80\ cm)$:

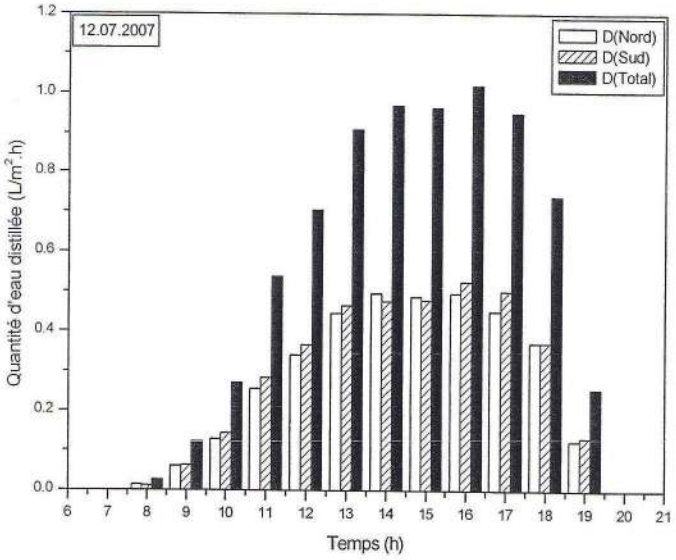


Figure (5.104): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

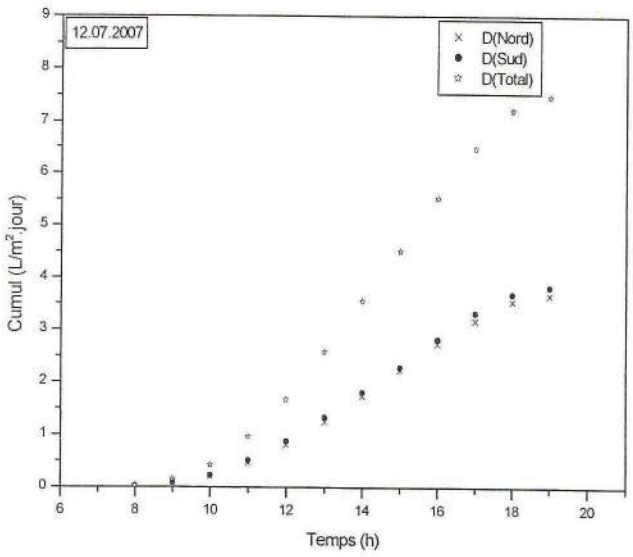


Figure (5.105): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

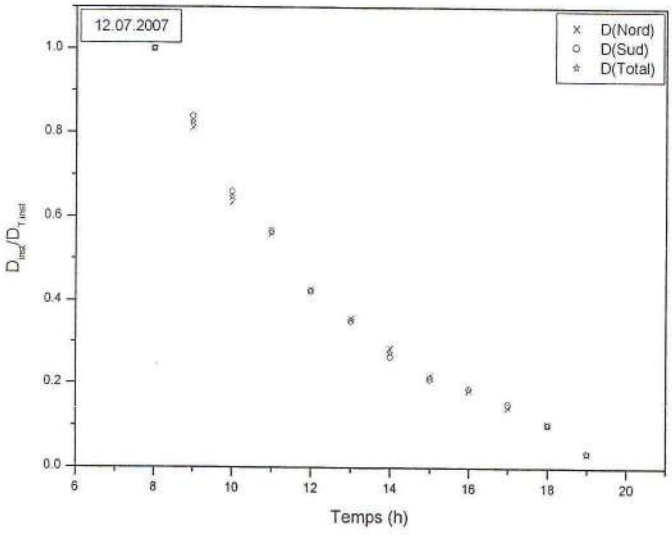


Figure (5.106): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

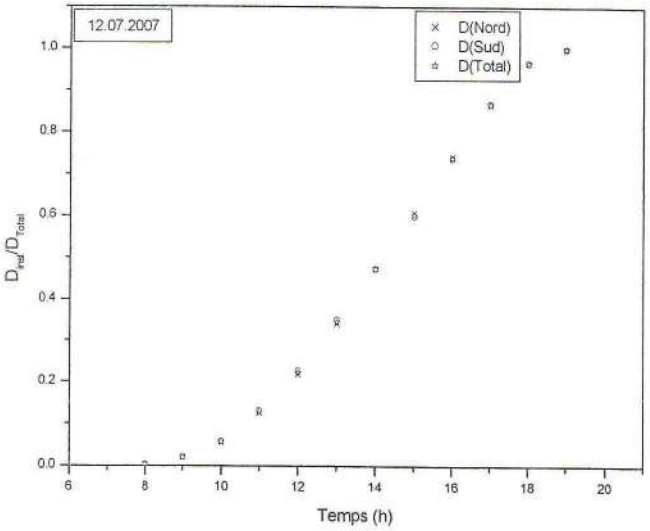


Figure (5.107): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

3. Troisième période et Quatrième période $(L = 80\ cm)$:

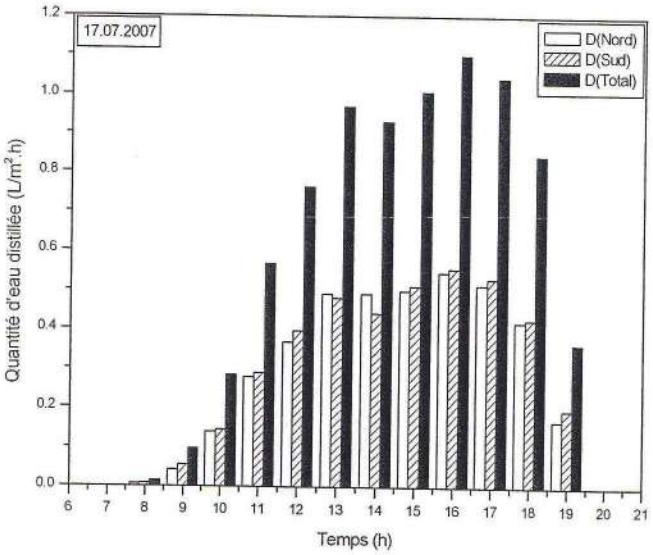


Figure (5.108): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

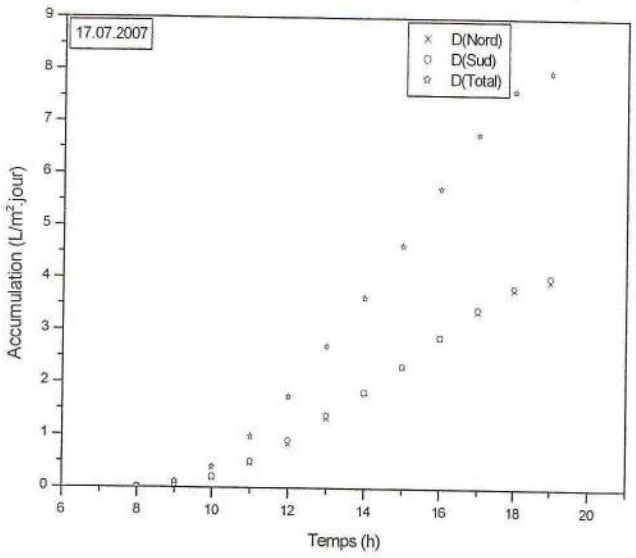


Figure (5.109): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

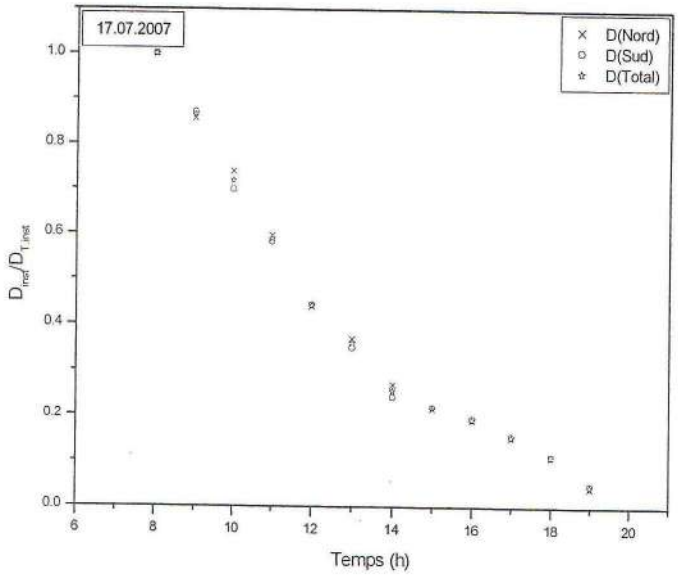


Figure (5.110): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

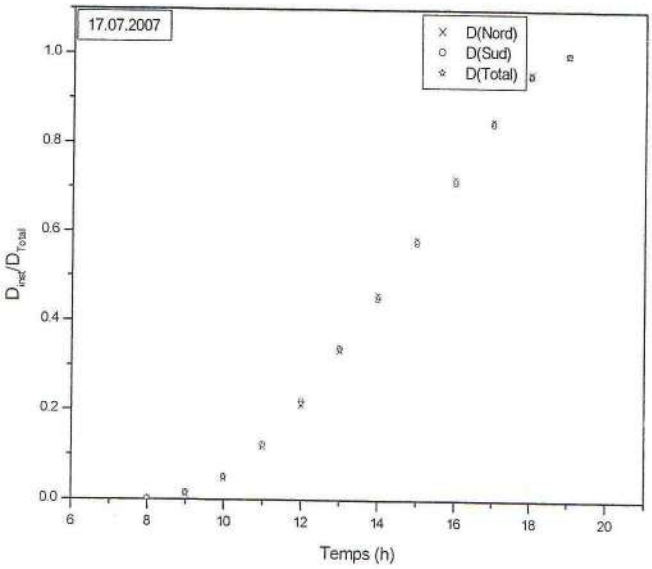


Figure (5.111): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

3. Troisième période et Quatrième période $(L = 80\ cm)$:

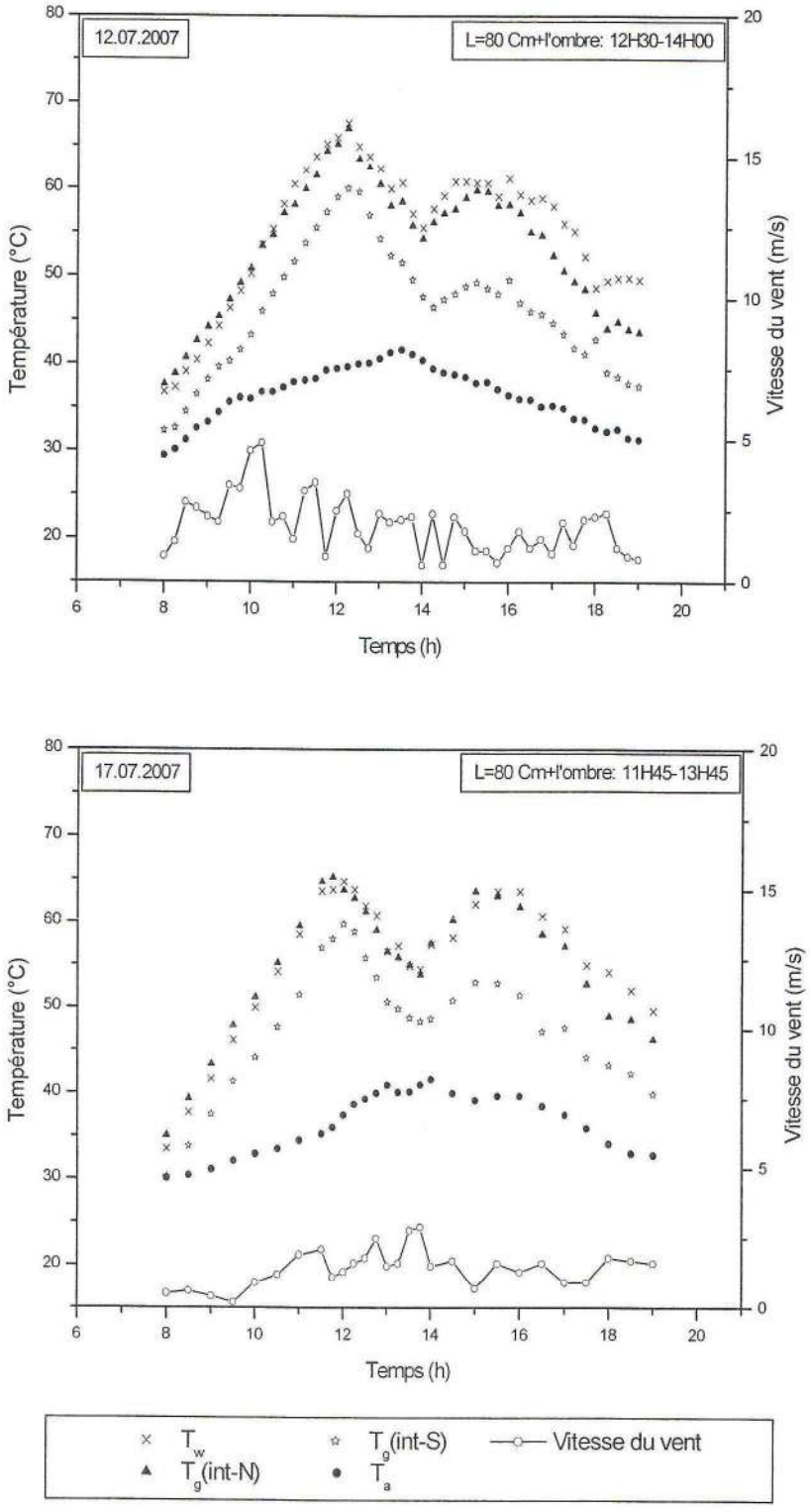


Figure (5.112): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

4. Cinquième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 12:00 à 13:45.

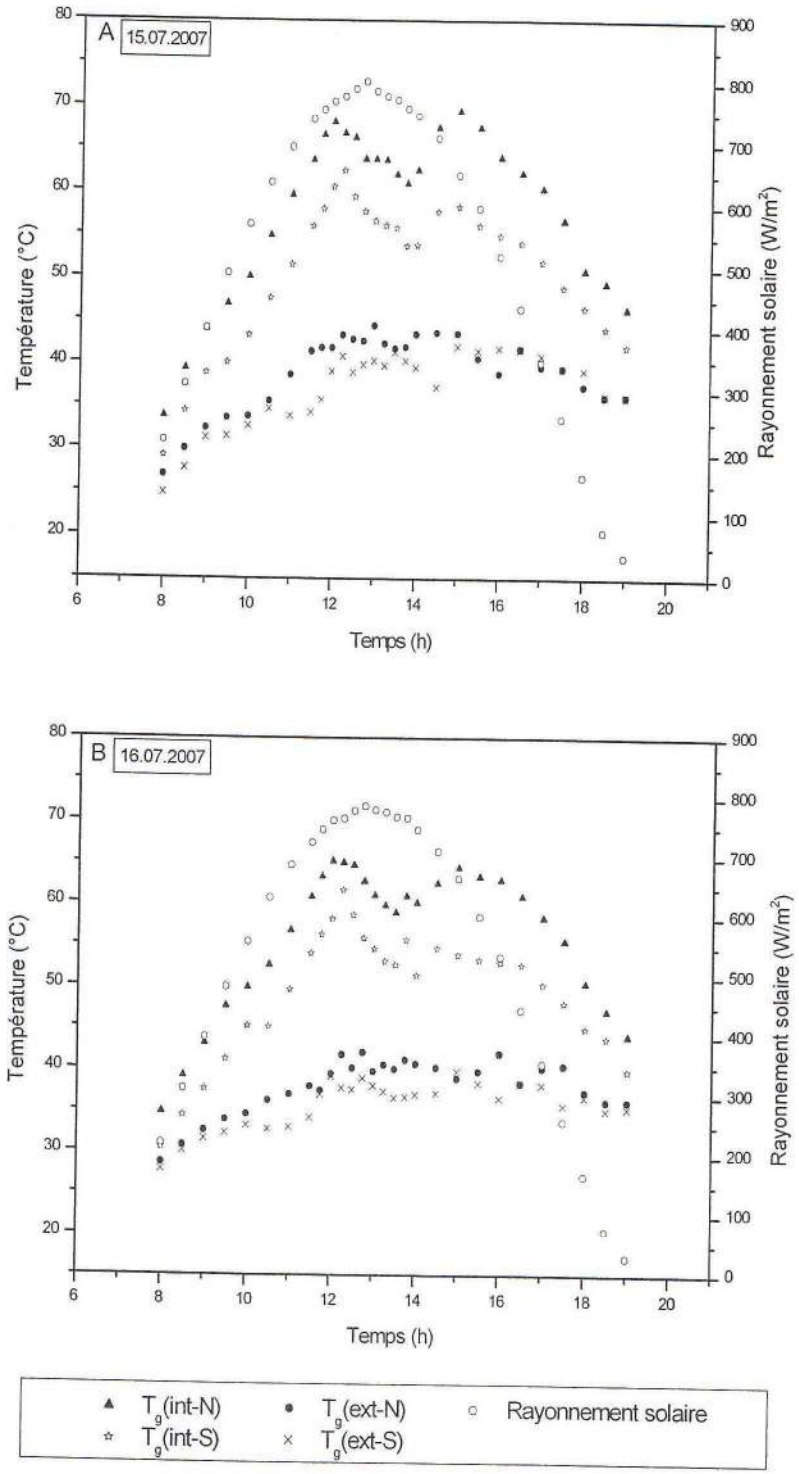


Figure (5.113): Variations des différentes températures et du rayonnement solaire en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

4. Cinquième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 12:00 à 13:45.

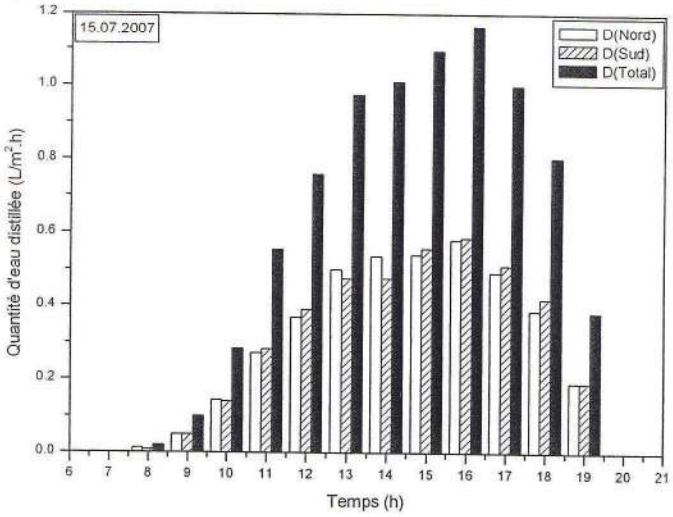


Figure (5.114): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

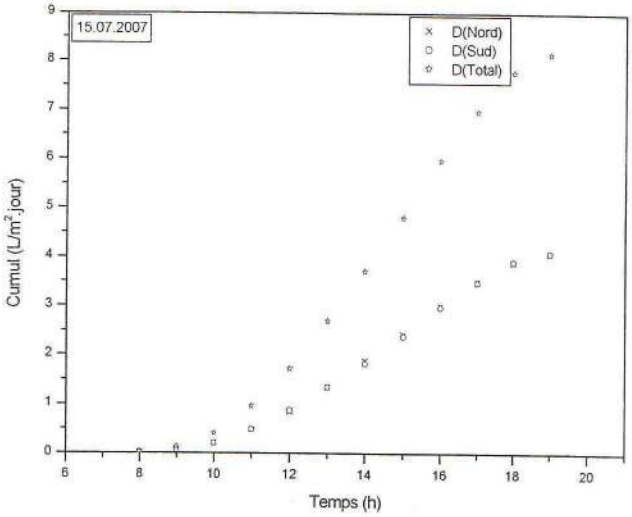


Figure (5.115): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

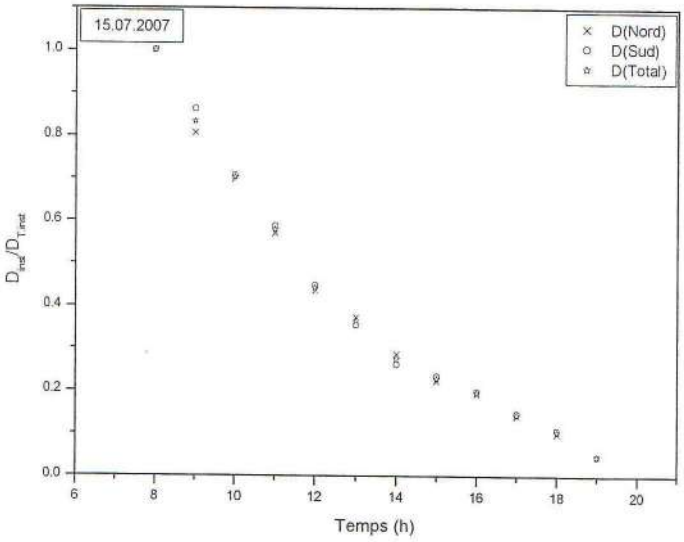


Figure (5.116): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

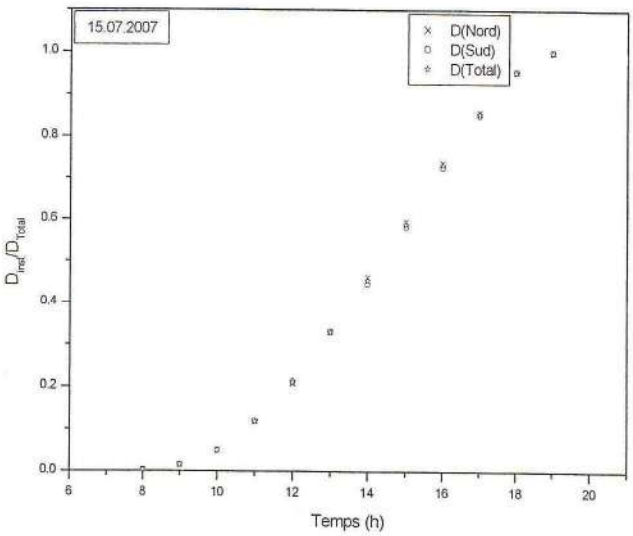


Figure (5.117): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

4. Cinquième période:

L'utilisation de l'ombre $(L = 80\ cm)$ de 12:00 à 13:45.

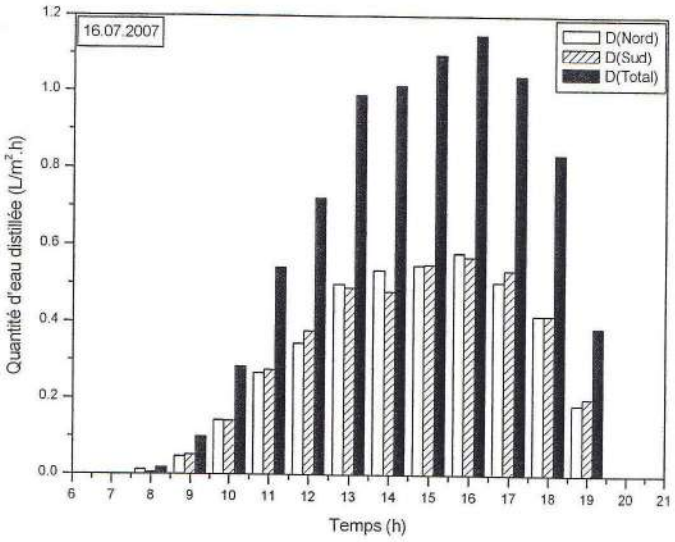


Figure (5.118): Variation de la quantité d'eau distillée en fonction du temps.

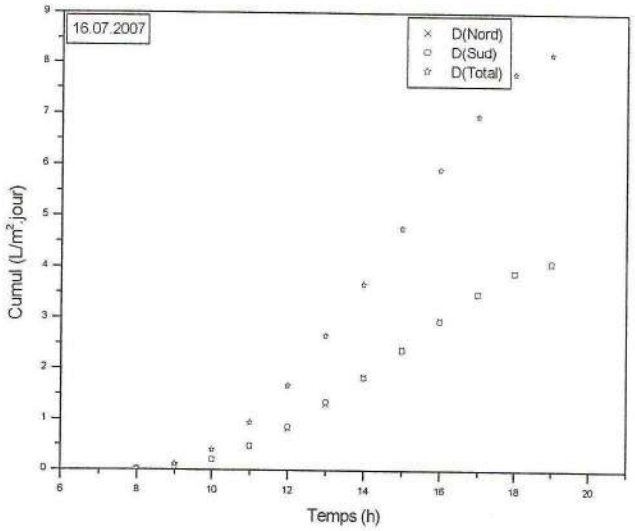


Figure (5.119): Variation du cumul journalier en fonction du temps.

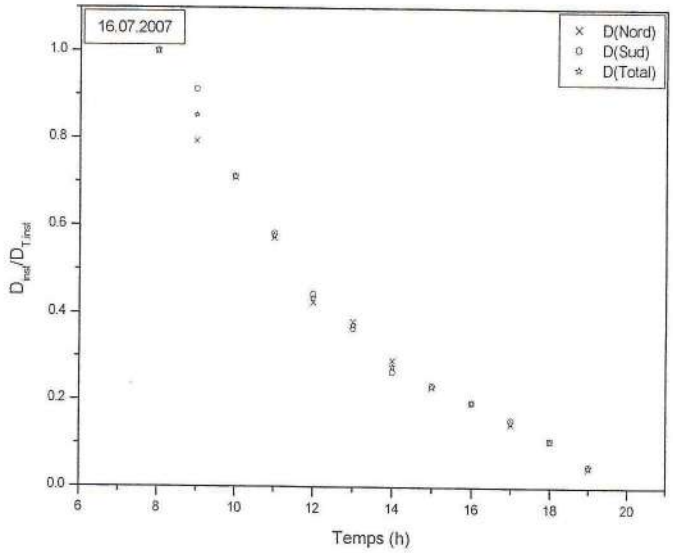


Figure (5.120): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale à cet instant en fonction du temps.

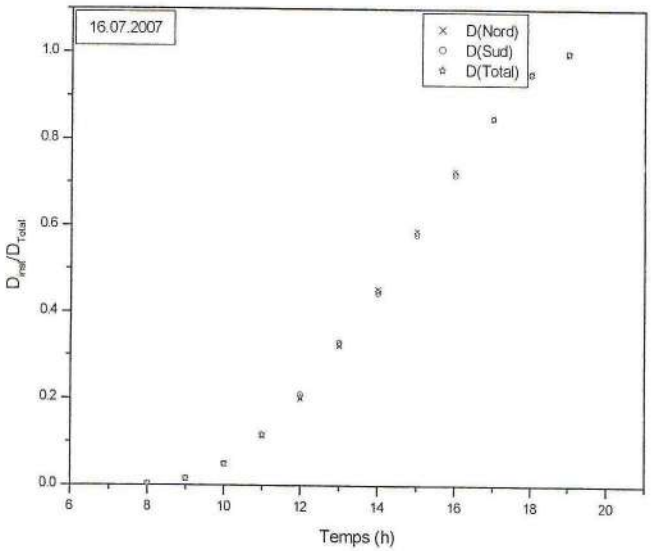


Figure (5.121): Pourcentage de la quantité instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Cinquième série: Ombre 2007

4. Cinquième période:

L'utilisation de l'ombre $\left(L = 80\ cm\right)$ de 12:00 à 13:45.

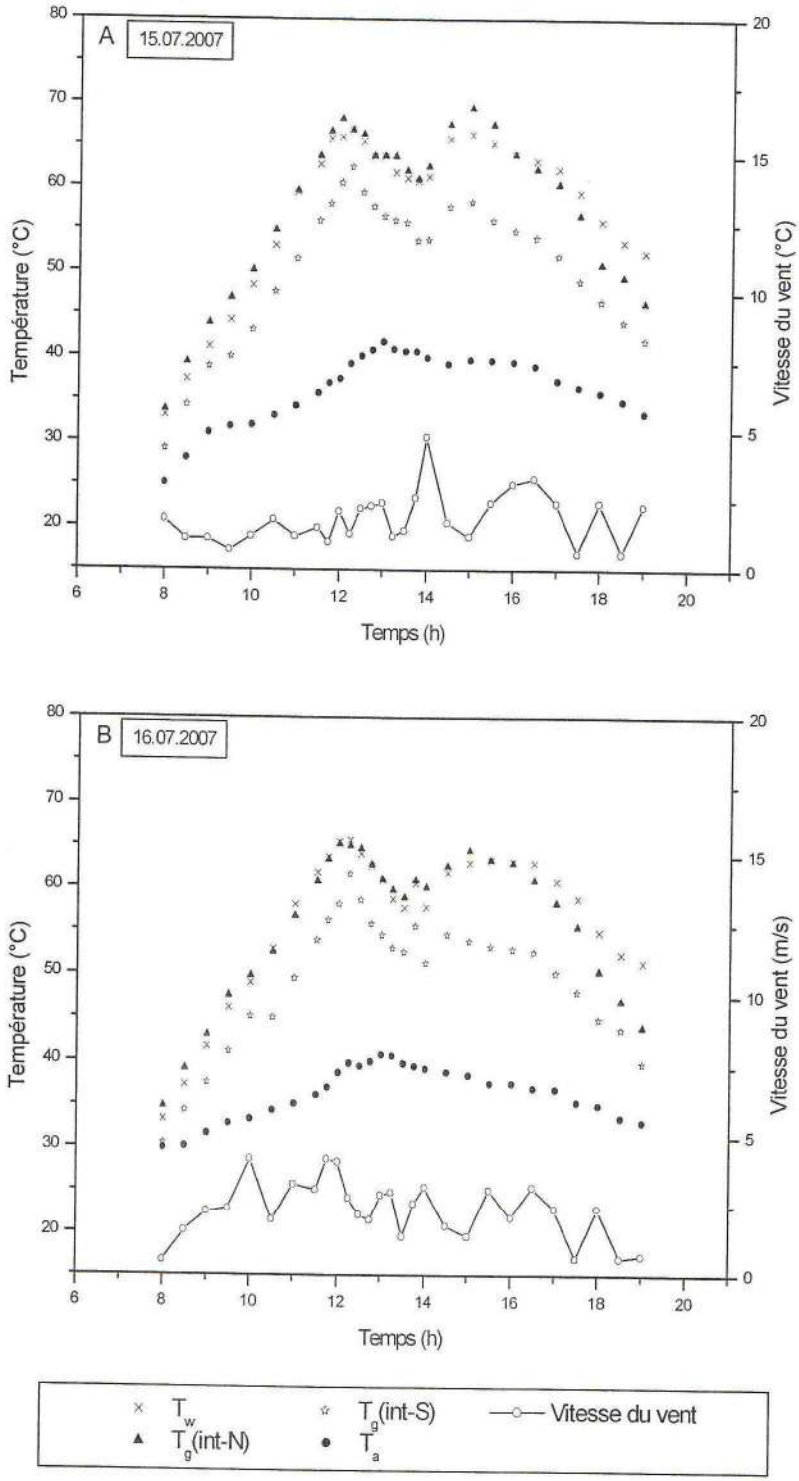


Figure (5.122): Variation des températures et la vitesse du vent en fonction du temps.

5.3. L'efficacité globale, efficacité interne, la vitesse moyenne du vent et la température moyenne d'ambiance:

Système	Jour	Efficacité globale	Efficacité interne	La vitesse moyenne du vent	La température moyenne d'ambiance
Serre simple 2004	10/08/2004	26.42	31.08	2.38	43.00
	11/08/2004	30.82	36.26	1.90	40.30
	18/08/2004	29.90	35.18	2.40	39.70
	19/08/2004	36.80	43.30	1.20	39.10
Serre simple 2007	20/05/2007	43.94	51.70	3.45	34.65
	22/05/2007	44.81	52.72	4.86	36.54
	27/05/2007	42.44	49.93	2.65	31.50
	28/05/2007	44.01	51.77	1.95	30.98
Isolant 2007	29/05/2007	18.31	21.54	1.86	31.55
	03/06/2007	17.49	20.58	1.52	32.24
	10/06/2007	17.00	20.00	2.12	34.70
	17/06/2007	17.92	21.08	2.30	35.50
Galvanisée 2007	01/03/2007	16.09	18.93	2.66	25.50
	05/03/2007	16.25	19.12	2.04	28.20
	15/04/2007	16.62	19.56	1.07	29.50
	16/04/2007	18.30	21.53	1.37	30.50
Ombre 2007	$(L = 30\ cm)$ 13/06/2007	19.44	22.87	1.60	34.30
	$(L = 60\ cm)$ 25/06/2007	23.31	27.42	0.95	38.07
	$(L = 80\ cm)$ 03/07/2007	27.82	32.73	1.02	37.37
	$(L = 80\ cm)$ 11:00 à 19:00 11/07/2007	28.51	33.54	1.26	34.5

	(L = 80 cm) 10:30 à 12:30 et 13:30 à 15:30 10/07/2007 14/07/2007	 35.18 36.40	 41.39 42.82	 0.66 0.54	 41.50 39.50
	(L = 80 cm) 12:30 à 14:00 12/07/2007	 43.64	 51.35	 1.12	 44.86
	(L = 80 cm) 12:00 à 13:45 15/07/2007 16/07/2007	 47.62 47.94	 56.02 56.40	 1.33 1.26	 43.66 42.11
	(L = 80 cm) 11:45 à 13:45 17/07/2007	 46.92	 55.20	 1.9	 43.6

Tableau (5.1): L'efficacité globale, efficacité interne, la vitesse moyenne du vent et la température moyenne d'ambiance.

6

Discussion des résultats

6.1. Introduction:

La production de l'eau distillée par distillation solaire dépend de plusieurs paramètres tel que le flux solaire, la température ambiante, la vitesse du vent, la température de l'eau saumâtre et les températures à l'intérieur et l'extérieur de la vitre (nord et sud).

6.2. Discussion des résultats:

Nous avons présenté la variation des températures à l'intérieur et l'extérieur de la vitre (Nord-sud) et le rayonnement solaire en fonction du temps. Pour pouvoir observer les variations des températures avec le rayonnement solaire cette dernière ayant la relation directe avec la production d'eau distillée, donc il faut présenter la variation de la quantité d'eau distillée $\left(L/m^2.h\right)$ et le cumul journalier $\left(L/m^2.jour\right)$ en fonction du temps. La courbe traduit la production de l'eau distillée instantanée sur la quantité d'eau distillée totale à cet instant et aussi la représentation de la production d'eau distillée instantanée sur la quantité totale journalière en fonction du temps.

Toutes les courbes précédentes existent dans toutes les séries des expériences réalisées.

6.2.1. Première série: en utilisant le distillateur solaire simple à effet de serre tel que réalisée, cette série en Août 2004 on a obtenu les résultats comme le montre les figures (5.1), (5.18):

- L'écart des températures entre les faces intérieur et l'extérieur de la vitre était faible ne dépassant pas 3 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
    1. La face intérieure nord, atteignant 57 °C.
    2. La face intérieure sud, atteignant 56 °C.
    3. La face extérieure nord, atteignant 54 °C.
    4. La face extérieure sud, atteignant 53 °C.

- Et la température de l'eau saumâtre et la plaque noire atteint 64 °C et 63 °C respectivement
- La quantité d'eau distillée ne dépasse pas $6\ L/m^2.jour$ comme le montre les figures (5.3), (5.7), (5.11), (5.15), avec une efficacité globale estimée à 30.82 % et avec une efficacité interne estimée à 36.26 % [70].

Toutes les séries de ces expériences suivantes ont été effectuées pendant les mois: de Mars, Avril, Mai, Juin et Juillet 2007.

6.2.2. Deuxième série: Dans cette série, en utilisant le même distillateur précédent, nous avons recouvert la base et les côtés de notre distillateur par du sable $(10\ cm$ d'épaisseur$)$.

Le sable fut utilisé comme isolant, pour isoler la base et les côtés du distillateur du milieu extérieur. Etant donné que le sable va accumuler la quantité d'énergie perdue par convection et par rayonnement, il va donc participer au réchauffement de la plaque noire dont la température a atteint 68 °C et la température de l'eau saumâtre 69 °C. On remarqua aussi ce qui suit comme la montre les figures (5.19), (5.36):

- L'écart de température entre les faces intérieure et extérieure de la vitre (nord et sud) a presque atteint 15 °C.
- La température du nord était plus élevée que celle du côté sud.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
    1. La face intérieure nord, atteignant 68 °C.
    2. La face intérieure sud, atteignant 60 °C.
    3. La face extérieure nord, atteignant 50 °C.
    4. La face extérieure sud, atteignant 38 °C.
- L'augmentation de la quantité d'eau distillée durant la période ensoleillée était de 27.41 %. L'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la période ensoleillée et pendant la nuit était de 36.59 %. Comparer a celui obtenu dans le distillateur simple. Et cela, avec une efficacité globale estimée à 44.01 % et avec une efficacité interne estimée à 55.77 %.

Le distillateur solaire simple à effet de serre est composé de deux parties principales: l'évaporateur (plaque noire) et le condenseur (la vitre). Il se caractérise par l'évaporation

continue et une faible condensation surtout dans la période où le rayonnement solaire est maximal, ce qui va provoquer l'augmentation de la température de la vitre.

C'est pour cela que nous avons donné une très grande importance au condenseur (la vitre) dans cette étude. Il subit un ensemble d'opérations dans le but de le refroidir.

Donc on a effectué les séries des expériences suivantes:

6.2.3. Troisième série: couvrir le côté nord en isolant de type polystyrène d'une épaisseur de 0.5 cm .

Le but de l'utilisation de l'isolant est le refroidissement du condenseur car nous avons pensé que le rayonnement solaire était responsable de l'échauffement de la vitre, mais après cette expérience, nous avons pu constater que l'effet de l'évaporation avait sur l'échauffement de la vitre plus que l'effet du rayonnement solaire. Nous avons obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.37), (5.54):

- L'écart des températures entre les faces intérieure et extérieure de la vitre (Nord-sud) atteignent 25 °C.
- La température du côté nord couvert en isolant est très élevée par rapport au côté sud $(\Delta T = 10\ °C)$.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
    1. La face intérieure nord atteignant 61 °C
    2. La face intérieure sud atteignant 50 °C.
    3. La face extérieure nord atteignant 37 °C.
    4. La face extérieure sud atteignant 39 °C.
- La saturation de la vitre en chaleur était remarquée par la stabilisation de la température de cette vitre, après l'écoulement d'une période, depuis le fonctionnement du distillateur comme il est montré dans la figure (5.37).
- La diminution de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 47.81 %, mais pour l'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée et pendant la nuit était 40.97 %. Comparer a celui obtenu dans le distillateur simple. Et cela, avec une efficacité globale estimée à 17.00 % et avec une efficacité interne estimée à 20.00 %.

6.2.4. Quatrième série:

En partant des remarques inscrites d'après la troisième série, on propose de recouvrir le côté nord d'une plaque métallique (galvanisée) d'une épaisseur de 0.6 *mm* pour parvenir au transfert de chaleur par convection et par rayonnement entre la vitre et le milieu ambiant (extérieur).

On a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.55), (5.72):

- L'écart des températures entre les faces intérieure et extérieure de la vitre (nord-sud) atteignant 20 °C.
- La température du côté nord recouverte d'une plaque galvanisée est élevée par rapport à celle au côté sud.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
    1. La face intérieure nord atteignant 45 °C
    2. La face intérieure sud atteignant 38 °C.
    3. La face extérieure nord atteignant 30 °C.
    4. La face extérieure sud atteignant 30 °C.
- La diminution de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 53.28 %, mais pour l'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée et pendant la nuit était de 43.77 % comparé à celui obtenu dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 18.30 % et avec une efficacité interne estimée à 21.53 %.

6.2.5. Cinquième série:

A partir des expériences précédentes qui sont: l'expérience comprenant la couverture du côté nord en isolant, puis d'une plaque galvanisée dont on a remarque l'absence de toute amélioration de la quantité d'eau distillée. On propose l'utilisation de l'ombre correspond aux étapes suivantes:

- **Première étape:**

Optimisation de la distance entre l'obstacle du côté nord et de la vitre.

Dans cette étape nous avons testé la distance entre l'obstacle et la vitre sur différentes valeurs.

1. L=30 cm:

Dans cette étape, on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.73), (5.86) :

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 5 °C.
  - ✓ Le côté sud: 10 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 50 °C
  2. La face intérieure sud atteignant 48 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 45°C.
  4. La face extérieure sud atteignant 39 °C.
- La diminution de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 44.30 %, mais pour l'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée et pendant la nuit était de 35.13 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 19.44 % et avec une efficacité interne estimée à 22.87 %.

2. L=60 cm:

Dans cette étape on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.73), (5.86):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord 7 °C.
  - ✓ Le côté sud 15 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 57 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 53 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 49 °C.
  4. La face extérieure sud atteignant 39 °C.
- La diminution de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 33.06 %, mais pour l'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée et pendant la nuit elle était de 24.71 % comparer a celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 23.31 % et avec une efficacité interne estimée à 27.42 %.

3. L=80 cm:

Dans cette étape on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.73), (5.86):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 5 °C.
  - ✓ Le côté sud: 16 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 48 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 50 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 45°C.
  4. La face extérieure sud atteignant 39 °C.
- La diminution de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 20.71 % mais pour l'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée et pendant la nuit était de 9.02 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 27.82 % et avec une efficacité interne estimée à 32.73 %.

Dans les trois étapes précédentes, l'utilisation de l'ombre était prise en considération du début de l'expérience jusqu'à sa fin.

En vue, les résultats obtenues: le déclin de la quantité totale de l'eau distillée et sa quantité élevée au côté nord plus qu'au côté sud et cela parce qu'on n'a pas chauffe d'eau d'où la proposition de l'utilisation de l'ombre à des périodes discontinues qui sont:

- **Deuxième étape:**

  Optimisation de la période de l'utilisation de l'ombre sur la vitre nord.

  Dans cette étape nous avons teste la période de l'utilisation de l'ombre sur la vitre du côté nord.

1. Première période: utilisation de l'ombre de 11:00 à 19:00

Dans cette période on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.87), (5.92):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 10 °C.
  - ✓ Le côté sud: 14 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 58 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 51 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 48 °C.
  4. La face extérieure sud atteignant 38 °C.
- La diminution de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 18.85 %, pour l'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée et pendant la nuit était de 5.50 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 28.51 % et avec une efficacité interne estimée à 33.54 %.

2. Deuxième période: Utilisation de l'ombre de 10:30 à 12:30 et de 13:30 à 15:30.

Durant cette période, on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.93), (5.102):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 14 °C.
  - ✓ Le côté sud: 20 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 67 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 59 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 49 °C.
  4. La face extérieure sud atteignant 40 °C.
- L'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 3.48 %, mais pour l'augmentation des deux durées ensemble la durée ensoleillée et celle de la nuit était d'un taux de 15.17 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 36.40 % et avec une efficacité interne estimée à 42.82 %.

3. Troisième période: Utilisation de l'ombre de 12:30 à 14:00.

Durant cette période on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.103), (5.112):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 25 °C.
  - ✓ Le côté sud: 22 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 67 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 60 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 42 °C.
  4. La face extérieure sud atteignant 39 °C.
- L'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée était d'un taux de 24.73 %, mais pour l'augmentation des deux durées ensemble la durée ensoleillée et celle de la nuit était d'un taux de 34.41 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 43.64 % et avec une efficacité interne estimée à 51.35 %.

4. Quatrième période: Utilisation de l'ombre de 11:45 à 13:45.

Dans cette période, on a obtenu les résultats suivants comme le montre les figures (5.103), (5.112):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 24 °C.
  - ✓ Le côté sud: 16 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 65 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 60 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 41 °C.
  4. La face extérieure sud atteignant 39 °C.
- L'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée a un taux de 33.19 %, mais pour l'augmentation des deux durées ensemble la durée ensoleillée et celle de la nuit était d'un taux de 41.87 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 46.92 % et avec une efficacité interne estimée à 55.20 %.

5. Cinquième période: Utilisation de l'ombre de 12:00 à 13:45.

Durant cette période on a obtenu les résultats suivants, comme le montre les figures (5.113), (5.122):

- L'écart des températures entre les deux faces des deux côtés:
  - ✓ Le côté nord: 25 °C.
  - ✓ Le côté sud: 15 °C.
- Les températures des faces de la vitre (nord et sud) sont:
  1. La face intérieure nord atteignant 69 °C.
  2. La face intérieure sud atteignant 62 °C.
  3. La face extérieure nord atteignant 44 °C.
  4. La face extérieure sud atteignant 42 °C.
- L'augmentation de la quantité d'eau distillée pendant la durée ensoleillée avait taux de 36.46 %, mais pour l'augmentation des deux durées ensemble la dure ensoleillée et celle de la nuit était d'un taux de 47.64 % comparé à celle obtenue dans le distillateur simple, avec une efficacité globale estimée à 47.94 % et avec une efficacité interne estimée à 56.40 %.

6.3. Résultat:

Après les remarques et les résultats obtenues par l'utilisation de l'ombre, pendant les périodes précédentes, nous avons constaté que la plus convenable période dans laquelle. On peut utiliser l'ombre du côté nord est celle dans laquelle la vitre chauffe et où la condensation de la vapeur d'eau est minime, la remarque était que cette période est celle du rayonnement solaire maximum.

A partir des expériences précédentes nous avons remarqué que la période la plus convenable était de 12:00 à 13:45.

Conclusions et recommandations

D'après l'étude effectuée dans ce mémoire, nous pouvons dire, que la distillation solaire par le distillateur solaire simple à effet de serre est considérée comme l'une des techniques simple à utiliser afin de fournir de l'eau distillée et/ou de l'eau potable, et l'utiliser pour les besoins ménagers et industriels, surtout dans les régions ensoleillées et riches en eaux saumâtres.

Notre mémoire dans le cadre de travail contient six chapitres. Il permet d'acquérir des connaissances sur la distillation solaire, les différents types de distillateurs solaires et leurs caractéristiques, les paramètres influençant leur fonctionnement, d'autres techniques de dessalement et l'étude théorique de notre distillateur solaire, et cela en faisant ressortir son bilan énergétique.

Comme nous avons élaboré une partie expérimentale qui a englobé l'identification des différentes composantes du système, les appareils de mesure et les différentes séries expérimentales qui ont été effectuées. Cette partie a été suivie par l'exposition des résultats obtenus à partir des expériences, durant les séries effectuées sous forme de courbes, traduisant l'influence des différents paramètres sur la production d'eau distillée, en utilisant le logiciel Origin 6.0, de plus le calcul de l'efficacité globale et l'efficacité interne journalière, en utilisant la langage Fortran 5.0, pour toutes les séries expérimentales.

Cette étude a été élaborée dans le but d'améliorer la production d'eau distillée du distillateur solaire simple à effet de serre. Après avoir effectué un ensemble d'expériences dans lesquelles, nous avons calculé: la quantité d'eau distillée et l'efficacité globale et interne de ce distillateur, nous avons tiré les conclusions suivantes:

- Le rayonnement solaire, la température de l'air ambiant, la température de l'eau saumâtre à l'intérieur de distillateur et la température des faces; internes et externes des vitres des deux côtés (Nord-sud) sont les paramètres principaux influant

directement sur l'efficacité du distillateur. La vitesse du vent influe également en faisant diminuer l'efficacité.

- Expérience avec l'ombre: c'est l'expérience convenable pour améliorer la production de l'eau distillée sous les conditions suivantes:

    1. la distance entre l'obstacle et la vitre du côté nord est $L = 80\ cm$.
    2. son utilisation est durant la période dans laquelle, le rayonnement solaire est maximum (12:00-13:45). Le taux d'augmentation, comparé à celui du distillateur simple était proche de 36.5 %, avec une efficacité globale estimée à 47.94 % et avec une efficacité interne estimée à 56.40 %.

Difficultés rencontrées et recommandations:

Parmi les difficultés que nous avons rencontrées:

- L'instabilité du climat pendant toute l'année.
- Certains jours étaient froids alors qu'on s'attendait à des jours chauds.

Pour la poursuite de ce travail nous proposons:

- L'utilisation de l'ombre sur le côté nord avec le réflecteur sur le côté sud.
- Le refroidissement de la vitre par de l'eau (nord-sud).
- L'utilisation de l'ombre au côté nord et le refroidissement par de l'eau du côté sud.
- L'utilisation de l'ombre au côté nord et le refroidissement par de l'eau du côté sud, avec l'ajout d'un réflecteur.
- L'utilisation du chauffage solaire pour chauffer l'eau avant son entrée dans le distillateur.
- Trouver un model mathématique adéquat pour le model expérimental.
- Effectuer une étude nous permettant de produire de l'eau potable à partir de l'eau distillée produite.

Bibliographie

[1] Khedim.A.H., Schawrzer. K, Faber. C. Nouveau système de dessalement de l'eau de mer à l'énergie solaire. Ginstereg Julich (Allemagne).

[2] R. Ouahes, B. Devallez. Chimie générale. Office de publications universitaires. E.P.A.U. Alger. Edition 2003.

[3] Alain Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnelles d'approvisionnement en eau douce. Paris. 2001.

[4] A. Montiel. Une législation nouvelle pour les eaux destinées à la consommation humaine .C.R. Géoscience 337 (2005).pp269-276.

[5] M. Rumeau. Chimie générale: Technique à membrane et dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Alger 2004.

[6] N. Smakdji. Impact de l'écart de température (eau-capteur) sur l'efficacité globale d'un distillateur solaire. Mémoire de magister, Université de Constantine, département génie climatique, 2002.

[7] L. Zella. L'eau pénurie ou incurie. Alger 2007.

[8] A. Kattab. Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. Desalination 136 (2001). pp. 25-33.

[9] M. Mahdad. La modélisation et le développement du secteur agricole. El watan.08.05.2006.

[10] B. Remini. La problématique de l'eau en Algérie. Alger. 2005.

[11] A. Djafour. Etude d'une station de pompage photovoltaïque dans une région saharienne. Mémoire de magister Université de Ouargla, 2000.

[12] L. Allal Benfkih. Recherches quantitatives sur le criquet migrateur Locusta migratoria (orth, oedipodinae) dans le Sahara Algérien. Perspectives de lutte biologique à l'aide de microorganismes pathogènes et de peptides synthétique. Thèse de doctorat. Université de Limoges. 2006.

[13] M.H. Selami. Utilisation de l'énergie solaire pour la déminéralisation des eaux saumâtres dans le sud Algérien. Mémoire de magistère, Centre universitaire de Ouargla.2000.

[14] EP. Algérienne des eaux (19/05/2007).

[15] J.R. Vaillantl. Problème du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. France 1975.

[16] A. Maurel. Dessalement solaire. CEA. CADARACHE. 1986.

[17] A. Chaker et G. Menguy. Efficacité interne d'un distillateur solaire sphérique. Rev. Energy. (2001) 53-58, p: 53, 85.

[18] Y. Bouallati. Investigation sur la performance d'un distillateur solaire. Mémoire de magister. Université de Ouargla, département de physique.2004.

[19] B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes, M. Diboun. Etude théorique et application pratique du distillateur solaire à film capillaire. Int. J. Therm. Sci.2000.

[20] C. et R. Ouahes et P. et J. le Goff.Un distillateur solaire multi-etages à film capillaire. Journées internationales de thermique. Lyon.1982.

[21] B. N'DOYE. Modélisation informatique des distillateurs solaires à effet de serre. Thèse de 3^{ieme} cycle, Perpignan.1979.

[22] P.I. Cooper. The maximum efficiency of single-effect solar stills. Solar energy. Vol. 15. (1973). pp.205-217. Pergamon Press.

[23] P.I. Cooper. The absorption of radiation in solar stills. Solar energy. Vol.12 (1969) pp.333-346.

[24] P.I. Cooper. Digital simulation of experimental solar still data. Solar energy. Vol, 14, (1973). pp. 451-468.

[25] S. Satcunanathan et H.P. Hansen. An investigation of some of the parameters involved in solar distillation .Solar Energy. Vol.14 (1973) .pp.353-363.

[26] Malik MAS, Tiwari G.N, Kumar A, Sodha MS. Solar distillation Oxford. UK. Pergamon Press. 1982.

[27] A. Sfwat Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A.A. Mabrouk. Parameters affecting solar still productivity. Energy conversion & Management 41 (2000). pp. 1797-1809.

[28] A. Al. Hinaa, M.S. Al-Nassri, B.A. Jubran. Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. Energy conversion & Management 43 (2002). pp. 1639-1650.

[29] A.A. El. Sebaii. Effect of wind speed on some designs of solar stills. Energy conversion & Management 41 (2000). pp. 523-538.

[30] M.S. Maalem. Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulière. Mémoire de magister. 1983.

[31] S. Suneja, G.N. Tiwari. Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double bassin solar still Energy conversion & Management 40 (1999). pp. 1885-1897.

[32] S. Nison. Les procèdes de dessalement.2000.

[33] A. Maurel. Le dessalement de l'eau de mer. Courrier de l'UNESCO.6-9 février 1978.

[34] K. Abdul Mohsen Al- Shaijji. Modeling, Simulation and optimization of large-scale commericial desalination plants. PhD. 1998. Blacksburg. Virginia.

[35] Laura.J. Banasiak, Thomas.W. Krittschmitt. Andrea. I. Schafer. Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration. Desalination 205. (2007). pp. 38-46.

[36] A. Dakkina. Etude d'un évaporateur solaire à multiple-effet pour la distillation de l'eau de mer. Thèse de doctorat. Maroc. 1984.

[37] Mohamed Al-bahou, Zanzam Al. Rakaf, Hassan Zaki, Hisham Ettouney. Desalination experience in Kuwait. Desalination 204 (2007). pp. 403-415.

[38] D. Larger. Dessalement d'eau de mer par compression de vapeur . (1979).pp. 125-130.

[39] R. B. Eyglument. Manuel de thermique, Théorie et pratique. 2eme édition revue et augmentée. Paris, 1997.

[40] H. Lumbroso. Thermodynamique, problème et résolus. Ediscience international. 1997.

[41] J.F. SACADURA. Initiation aux transferts thermiques. France 1977.

[42] H. Reitshel. Traité de chauffage et de climatisation. (Tome 2). Springer Verlag.1970.

[43] Pinar Ilber Ayav, Gurbuz Atagumduz. Theoretical and experimental investigation solar distillation or izitech campus area seawater. Desalination 208. (2007). pp. 169-180.

[44] D. Abdelmadjid. Climatisation solaire système à absorption. Mémoire de magistère. Centre universitaire d'Ouargla. Département physique. 2000.

[45] Pierre Henri COMMUNAY. Héliothermique. Le gisement solaire: Méthodes et calcul. 2002.

[46] A. Ricaud. Photopiles solaire de la physique de la conversion photovoltaïque au filières, matériaux et procédé. Press polytechnique et universitaire roman les CH-1015 Lausanne. (1997) .pp. 15-24.

[47] M. Capdrou. Atlas solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux, tome 1.

Office de publications universitaire. E.P.A.U. Alger. 1987, volume1, p: 40, 41, 282. volume 2, p: 507, 593, 608, 608.

[48] André Mermoud. Centrales photovoltaïques "Guide pour le dimensionnement de projet" (A l'usage des bureaux d'ingénieurs). Office fédéral des questions conjoncturelles. 1996.

[49] S. Ouzzan. Travaux diriges de transfert de matière, exercices avec solution. Université de Blida institut de chimie industrielle, office des publications universitaire. Alger. 1996.

[50] E.R.C. Eckert et R.M. Drake Jr. Analysis of heat and mass transfer. Mc. Graw-Hill, 1972.

[51] J.W. Rose. Condensation heat transfer Fundamentals. Trns.Chem. vol.76-Part A. 1998.

[52] L. Khezzer. Procédés de transfert de chaleur et de masse. Université de Constantine. Office de publications universitaires. Alger.1988.

[53] B.A. Jubran, M.I. Ahmed, A.F. Ismail, Y.A. Abakar. Numerical modeling of a multi-stage solar still. Energy Conversion Management 41.(2000).pp1107-1121.

[54] Sangeeta Suneeja, G.N. Tiwari, S.N. Rai. Parametric study of an inverted absorber double effect solar distillation system. Desalination 109. (1997). pp.177-186.

[55] Shruti Aggarwal, G.N. Tiwari. Convective mass transfer in a double-condensing chamber and a conventional solar still. Desalination 115. (1998).pp. 181-188.

[56] Berge Djebedjian, Magdy Abou Rayan Theoretical investigation on the performance prediction of solar still. Desalination 128. (2000). pp. 139-145.

[57] F. Golestench. Thermal performance of a low thermal inertia solar still. Thesis Master of science. University of Texas et El Paso. 1980.

[58] R.N. Morse, W.R.W. Read. Rational basis for engineering development of a solar still. Solar energy. Vol. 12. Pergamon (1968).pp. 5-17.

[59] R.V. Dunkle. Solar water distillation, the roof type still and multiple effect diffusion still, common wealth scientific and industrial research organization, Victoria, Australia, (1961). pp 895-902.

[60] G.N. Tiwari, A. Minocha, P.B. Sharma and M. Emran Khan. Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. Energy convers. Mgnt. Vol 38.No. 8. (1997). pp 761-770.

[61] S. Toure and P. Meukam. A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (cote d'ivoire). Renewable Energy. Vol. 11. No. 3. (1997). pp319-330.

[62] J.A. Duffie and W. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd Ed, Wiley, New York, 1972.

[63] Y.P. Yadav and A.S.P. Rasad. Performance analysis of a high temperature solar distillation system. Energy convers. Mgnt. Vol. 36. No. 5. (1995). pp 365-374.

[64] M.T. Chaibi. Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof. Desalination 128. (2000). pp. 123-138.

[65] Takeo S. Saitoh and hamdy H.El. Chetay. A pilot solar water disinfecting system performance analysis and testing. Solar energy. Vol 72. No.3. (2002). pp. 261-269.

[66] H. Hafi. Distillation solaire par serre agricole. Mémoire de magistère. Université de Constantine Institut de génie civil, 1994.

[67] Office National de Météorologie. Données climatiques de Ouargla, de l'année 1996 jusqu'à 2006.

[68] تخة محمد. دراسة مقارنة و تحسين لمختلف المقطرات الشمسية لإنتاج المياه الصالحة للشرب في المناطق الجافة الصحراوية. مذكرة ماجستير. جامعة ورقلة. 2004

[69] N. Benaouda, A Boulemtafes, M. Balhamel. Etude du comportement thermique et dynamique d'un séchoir solaire. 12eme journées Internationale de thermique. Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.

[70] C. Esteban, J. Franco, A. Fasulo. Construction and performance of an assisted solar distiller. Desalination 173 (2005). pp. 249-255.

[71] Eduardo H. Velasquez Calculations of daily output of a solar still as affected by changes in parameters. Thesis Master of science. University of Texas at El Paso. 1982.

Annexes

A

Détermination des cœfficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation dans un distillateur solaire à effet de serre

A.1. le coefficient de transfert thermique par convection:

Le flux de chaleur par convection entre l'eau saumâtre et la vitre $q_{c,wg}$ est défini par:

$$Q_{c,wg} = h_{c,wg}\left(T_w - T_{gi}\right) \qquad \left(W/m^2\right) \qquad \text{(A.1)}$$

Cette étude décrit la méthode de détermination de la valeur du coefficient de transfert thermique par convection libre entre le plan d'eau et la vitre:

$$h_{c,wg} = \frac{\lambda Nu}{x} \qquad \left(W/m^2.K\right) \qquad \text{(A.2)}$$

λ : Conductivité thermique de l'air humide.

x : La distance moyenne entre le plan d'eau et la vitre.

Le nombre de Nusselt est en rapport avec le nombre de Grashoff et le nombre de Prandtl:

$$Nu = f\left(Gr, \Pr\right) \qquad \text{(A.3)}$$

Le coefficient de transfert de chaleur $h_{c,wg}$ dû a la convection naturelle est obtenu de la relation empirique de Jakob (1949, 1957):

$$Nu = c\left(Gr.\Pr\right)^n \qquad \text{(A.4)}$$

Les valeurs de "c" et de "n" dépendent du nombre de Grashoff et on adopte généralement les valeurs suivantes:

a. $c = 1$ et $n = 0$ pour $Gr = 10^3$ (convection négligée)

b. $c = 0.21$ et $n = 1/4$ pour $10^4 \le Gr \le 3.2\times10^5$ (en régime laminaire)

c. $c = 0.075$ et $n = 1/3$ pour $3.2\times10^5 \le Gr \le 10^7$ (en régime turbulent)

Le choix les valeurs de "n" et "c" dépend de la distribution de la température, de l'humidité et de la géométrie du distillateur et s'arrête principalement sur la distance entre le verre et la surface de l'eau. Dans notre cas, la distance moyenne dépasse 75 *mm* et le nombre de Grashoff est situé entre $3.2\times10^5 \le Gr \le 10^7$ pour un écoulement turbulent. Donc on prend $c = 0.075$ et n=1/3.

Et comme à l'intérieur du distillateur le transfert de chaleur est accompagné d'un transfert de masse pour une évaporation non isotherme l'expression de Gr proposée par [Bolter et Sharply (1938)] est utilisée:

$$Gr = \frac{x^3 \rho^2 g}{\mu^2}\left(\frac{M_\infty T_0'}{M_0 T_\infty'} - 1\right) \qquad (A.5)$$

Où M est le poids moléculaire du mélange de l'air humide, ∞ en indice indique des points loin de la surface de l'eau, et, o indique un point sur la surface de l'eau:

Pour $M_\infty = M_0$ le terme $\left(\frac{M_\infty T_0'}{M_0 T_\infty'} - 1\right)$ se réduit à $\beta' \Delta T$, $\beta' \cong T_\infty'$.

w ,a relatifs y la diffusion de la vapeur d'eau et air inerte respectivement, en supposant la vapeur d'eau et l'air se comporte comme des gaz parfait (cette condition nécessaire pour qui modifier l'équation (A.5), et remembrement qui: $P_{w\infty} + P_{a\infty} = P_{w0} + P_{a0} = P_T$ (P_T : pression totale du gaz)

En calcule le terme $\left(\frac{M_\infty T_0'}{M_0 T_\infty'} - 1\right)$.

Avec:

M_0 : La masse moléculaire du mélange (air-vapeur d'eau).à la surface de l'eau.

M_∞ : La masse moléculaire du mélange (air-vapeur d'eau) à la face intérieure de la vitre.

T_0' : La température de l'air humide à la surface de l'eau.

T_∞' : La température de l'air humide à la face intérieure du verre.

M_{w0} : La masse moléculaire de la vapeur d'eau à la surface de l'eau.

$M_{w\infty}$: La masse moléculaire de la vapeur d'eau à la face intérieure du verre.

M_{a0} : La masse moléculaire de l'air à la surface de l'eau.

$M_{a\infty}$: La masse moléculaire de l'air à la face intérieure du verre.

X_i : La fraction massique.

$$M = \sum_{i=1}^{N} X_i M_i$$

$$X_i = \frac{P_i}{P_T}$$

$$M_\infty = X_{a\infty} M_{a\infty} + X_{w\infty} M_{w\infty}$$

$$M_0 = X_{a0} M_{a0} + X_{w0} M_{w0}$$

En remplaçant M_0 et M_∞ dans le terme $\left(\frac{M_\infty T_0^{'}}{M_0 T_\infty^{'}} - 1\right)$ on obtient:

$$\left(\frac{M_\infty T_0^{'}}{M_0 T_\infty^{'}} - 1\right) = \frac{\left(\frac{P_{a\infty}}{P_T} M_{a\infty} + \frac{P_{w\infty}}{P_T} M_{w\infty}\right) T_0^{'}}{\left(\frac{P_{a0}}{P_T} M_{a0} + \frac{P_{w0}}{P_T} M_{w0}\right) T_\infty^{'}} - 1 = \frac{\left(P_{a\infty} M_{a\infty} + P_{w\infty} M_{w\infty}\right) T_0^{'}}{\left(P_{a0} M_{a0} + P_{w0} M_{w0}\right) T_\infty^{'}} - 1 \qquad \text{(A.6)}$$

$$= \frac{\left(P_{a\infty} M_{a\infty} + P_{w\infty} M_{w\infty}\right) T_0^{'} - \left(P_{a0} M_{a0} + P_{w0} M_{w0}\right) T_\infty^{'}}{\left(P_{a0} M_{a0} + P_{w0} M_{w0}\right) T_\infty^{'}}$$

$$= \frac{M_{a\infty}\left(P_T - P_{w\infty}\right) T_0^{'} + M_{w\infty}\left(P_T - P_{a\infty}\right) T_0^{'} - M_{a0}\left(P_T - P_{w0}\right) T_\infty^{'} - P_{w0} M_{w0} T_\infty^{'}}{\left(P_{w0} M_{w0} + \left(P_T - P_{w0}\right) M_{a0}\right) T_\infty^{'}} =$$

$$\frac{M_{a\infty} P_{a0} T_0^{'} + M_{a\infty}\left(P_{w0} - P_{w\infty}\right) T_0^{'} + M_{w\infty} P_{w0} T_0^{'} + M_{w\infty}\left(P_{a0} - P_{a\infty}\right) T_0^{'} + M_{a0}\left(P_T - P_{w0}\right) T_\infty^{'} - P_{w0} M_{w0} T_\infty^{'}}{\left(P_{w0} M_{w0} + \left(P_T - P_{w0}\right) M_{a0}\right) T_\infty^{'}}$$

$$= M_{a\infty}\left(P_T - P_{w0}\right) T_0^{'} - M_{a\infty}\left(P_{w\infty} - P_{w0}\right) T_0^{'} + M_{w\infty} P_0 T_0^{'} + M_{w0}\left(P_T - P_{w0} - P_T + P_{w\infty}\right) T_0^{'} -$$
$$M_{a0}\left(P_T - P_{w0}\right) T_\infty^{'} - M_{w0} P_{w0} T_\infty^{'} / \left(P_{w0} M_{w0} + \left(P_T - P_{w0}\right) M_{a0}\right) T_\infty^{'} \qquad \text{(A.7)}$$

Tel que: $\begin{cases} M_\infty = M_0 \\ M_{w\infty} = M_{w0} = M_w \\ M_{a\infty} = M_{a0} = M_a \end{cases}$ Et $\begin{cases} T_0^{'} = T_w \,,\; T_\infty^{'} = T_{gi} \\ P_{w0} = P_w \,,\; P_{w\infty} = P_{gi} \end{cases}$

Donc:

$$(A.7)= \frac{\left(M_w P_w + M_a\left(P_T - P_w\right)\right)\left(T_w - T_{gi}\right)+\left(M_w - M_a\right)\left(P_{gi} - P_w\right)T_w}{\left(P_w M_w + M_a\left(P_T - P_w\right)\right)T_{gi}} \qquad (A.8)$$

$$=\frac{\left(T_w - T_{gi}\right)}{T_{gi}}+\frac{\left(M_w - M_a\right)\left(P_{gi} - P_w\right)T_w}{\left(P_w M_w + M_a\left(P_T - P_w\right)\right)T_{gi}}=\frac{\left(T_w - T_{gi}\right)}{T_{gi}}+\frac{\left(M_w - M_a\right)\left(P_{gi} - P_w\right)T_w}{\left(P_w\left(M_w - M_a\right)+M_a P_T\right)T_{gi}}$$

$$=\frac{\left(T_w - T_{gi}\right)}{T_{gi}}+\frac{\left(M_w - M_a\right)\left(P_{gi} - P_w\right)T_w}{\left(M_w - M_a\right)\left(P_w + \frac{M_a}{\left(M_w - M_a\right)}P_T\right)T_{gi}}=\frac{\left(T_w - T_{gi}\right)}{T_{gi}}+\frac{\left(P_{gi} - P_w\right)T_w}{\left(P_w + \frac{M_a}{\left(M_w - M_a\right)}P_T\right)T_{gi}}$$

$$=\frac{\left(T_w - T_{gi}\right)}{T_{gi}}+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)T_w}{\left(\frac{M_a}{\left(M_a - M_w\right)}P_T - P_w\right)T_{gi}} \qquad (A.9)$$

Avec: $\beta' = \frac{1}{T_{gi}}$

Donc:

$$\left(\frac{M_\infty T_w}{M_0 T_{gi}} - 1\right)=\frac{\left(T_w - T_{gi}\right)}{T_{gi}}+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)T_w}{\left(\frac{M_a}{\left(M_a - M_w\right)}P_T - P_w\right)T_{gi}}=\frac{1}{T_{gi}}\left(\left(T_w - T_{gi}\right)+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)T_w}{\left(\frac{M_a}{\left(M_a - M_w\right)}P_T - P_w\right)}\right)$$

$$=\beta'\left(\left(T_w - T_{gi}\right)+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)T_w}{\frac{M_a}{\left(M_a - M_w\right)}P_T - P_w}\right) \qquad (A.10)$$

Le terme $\left(\frac{M_\infty T_w}{M_0 T_{gi}} - 1\right)$ se réduit à $\beta'\Delta T \Rightarrow$

$$\Delta T' = (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)}P_T - P_w} = \Delta T + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)}P_T - P_w} \quad (A.11)$$

En remplaçant $\left(\frac{M_\infty T_w}{M_0 T_{gi}} - 1\right)$ par sa valeur dans l'équation (A.5) on obtient:

$$Gr = \frac{x^3 \rho^2 g}{\mu}\left(\frac{1}{T_{gi}}\left((T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)}P_T - P_w}\right)\right) \quad (A.12)$$

En remplaçant la valeur de Gr dans l'équation (A.4) on obtient:

$$Nu = 0.075\left(\frac{x^3 \rho^2 g}{\mu^2}\left(\frac{1}{T_{gi}}\left((T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)}P_T - P_w}\right)\right)\mathrm{Pr}\right)^{1/3} \quad (A.13)$$

$$Nu = \frac{hx}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{Nu\,\lambda}{x}$$

$$\Rightarrow \quad h_{c,wg} = 0.075\left(\frac{x^3 \rho^2 g}{\mu^2}\left(\frac{1}{T_{gi}}\left((T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)}P_T - P_w}\right)\right)\mathrm{Pr}\right)^{1/3}\frac{\lambda}{x} \quad (A.14)$$

$$h_{c,wg} = 0.075\left(\frac{\rho^2 \lambda^3 g\,\mathrm{Pr}}{\mu^2}\frac{1}{T_{gi}}\right)^{1/3}\left((T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})T_w}{\frac{M_a}{(M_a - M_w)}P_T - P_w}\right)^{1/3} \quad (A.15)$$

Avec : $M_w = 18.02\ (g/mole)$

$M_a = 28.96\ (g/mole)$

$P_T = 98.07 \times 10^3\ (Pa)$

$$\Rightarrow h_{c,wg} = 0.075\left(\frac{\rho^2 g \,\mathrm{Pr}\,\lambda^3}{\mu^2}\frac{1}{T_{gi}}\right)^{1/3}\left(\left(T_w - T_{gi}\right)+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)T_w}{268.9\times10^3 - P_w}\right)^{1/3} \qquad (A.16)$$

Le distillateur solaire à effet de serre fonctionne à pression atmosphérique telle que la température de l'eau saumâtre au début est de 27 °C et atteint à midi 67 °C. Ce résultat obtenu expérimentalement par Telks et utilisé par Dunkle pour simplifier les équations de transfert de chaleur par convection et trouver le coefficient moyen de transfert de chaleur ρ, μ, λ, Pr, ν et ρ_v sont presque constantes dans l'intervalle (27-67 °C). Évaluer ces variables de convection à la température moyenne d'opération (27+67)/2=47 °C, nous obtenons les valeurs suivantes par interpolation de Kreith et Black [71]:

$\rho = 1.12\ \mathrm{kg}/m^3$

$\mu = 19.4\times10^{-6} N\,s/m^2$

$\lambda = 28.35\times10^{-3}\ W/m.K$

$\mathrm{Pr} = 0.71$

$\nu = 17\times10^{-6}\ \mathrm{m}^2/s$

$\rho_v = 0.66\ \mathrm{kg}/m^2$

En remplaçant les valeurs de: ρ, μ, λ, Pr et ν dans l'équation (A.16) on obtient:

$$h_{c,wg} = 0.075\left(\frac{(1.12)^2\times9.81\times0.71\times\left(28.35\times10^{-3}\right)^3}{\left(19.4\times10^{-6}\right)^2}\frac{1}{300}\right)^{1/3}\left(\left(T_w - T_{gi}\right)+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)}{268.9\times10^3 - P_w}T_w\right)^{1/3}$$

Finalement:

$$h_{c,wg} = 0.884\left(\left(T_w - T_{gi}\right)+\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)}{268.9\times10^3 - P_w}T_w\right)^{1/3} \qquad \left(W/m^2.K\right) \qquad (A.17)$$

A.2. Transfert thermique par évaporation :

En se condensant sur la vitre, la vapeur d'eau dégage une chaleur de condensation qui est pratiquement égale à la chaleur latente de vaporisation.

La température du bassin est supérieure à la température de vapeur d'eau prés de la vitre, l'existence de ce gradient de température entraîne un gradient de pression ; et un transfert d'eau et de vapeur d'eau par convection.

La pression partielle de la vapeur d'eau prés du bassin est supérieure à celle au voisinage de la vitre, ce qui entraîne un mouvement vers le haut du distillateur, alors que l'air descend vers le plan d'eau, (les quantités de chaleur transportées dans les deux sens sont égales car la chaleur cédée par l'eau en se condensant est absorbée totalement par l'air ambiant intérieur).

$$Q_a = Q_{c,wg},\ Q_a = m_a c_{pa}\left(T_w - T_{gi}\right) \qquad (W) \qquad \text{(A.18)}$$

Tel que :

c_{pa} : Capacité calorifique de l'air $\left(J/Kg.K\right)$.

Et :

$$Q_{c,wg} = h_{c,wg}\left(T_w - T_{gi}\right) \qquad \text{(A.19)}$$

Ce qui résulte de la quantité d'eau transférée par unité de temps et de surface :

$$Q_a = Q_{c,wg} \quad \Rightarrow m_a = \frac{Q_{c,wg}}{c_{pa}\left(T_w - T_{gi}\right)} = \frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \qquad \left(Kg/s\right) \qquad \text{(A.20)}$$

Sachant que l'humidité spécifique (masse de vapeur d'eau/unité de masse d'air sec) :

$$r = \frac{M_w}{M_a}\frac{P_w}{\left(P_T - P_w\right)} \qquad \text{(A.21)}$$

M_w : Masse moléculaire de la vapeur d'eau.

M_a : Masse moléculaire de l'air sec.

La masse de vapeur d'eau transférée du plan d'eau vers la couverture :

$$m_w = \frac{M_w}{M_a}\frac{P_w}{\left(P_T - P_w\right)}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \qquad \text{(Flux ascendant)} \qquad \text{(A.22)}$$

Avec :

$h_{c,wg}$: Coefficient d'échange par convection entre le plan et la couverture $\left(W/m^2.K\right)$.

P_T : Pression totale de mélange (air-vapeur d'eau) en équilibre par analogie transférée de la vitre vers le plan d'eau :

$$m_w = \frac{M_w}{M_a}\frac{P_{gi}}{\left(P_T - P_{gi}\right)}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}} \quad \text{(Flux descendant)} \tag{A.23}$$

Alors la masse d'eau transportée par unité de surface et par unité de temps est égale à la différence de quantité entre le flux ascendant et le flux descendant :

$$\Delta m_w = \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\left(\frac{P_w}{\left(P_T - P_w\right)} - \frac{P_{gi}}{\left(P_T - P_{gi}\right)}\right) \tag{A.24}$$

Donc le flux échangé par évaporation est donné par :

$$Q_{e,wg} = \Delta m_w L_v \tag{A.25}$$

Avec :

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température T_w.

En remplaçant Δm_w par sa valeur, on aboutit à :

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\left(\frac{P_w}{\left(P_T - P_w\right)} - \frac{P_{gi}}{\left(P_T - P_{gi}\right)}\right)L_v \tag{A.26}$$

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\left(\frac{P_w\left(P_T - P_{gi}\right) - P_{gi}\left(P_T - P_w\right)}{\left(P_T - P_w\right)\left(P_T - P_{gi}\right)}\right)L_v$$

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\left(\frac{P_w P_T - P_w P_{gi} - P_{gi} P_T + P_{gi} P_w}{\left(P_T - P_w\right)\left(P_T - P_w\right)}\right)L_v$$

$$Q_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\left(\frac{P_T\left(P_w - P_{gi}\right)}{\left(P_T - P_w\right)\left(P_T - P_{gi}\right)}\right)L_v \tag{A.27}$$

En pratique : P_w et P_{gi} sont de petites pressions devant P_T, donc on peut les négliger devant P_T.

$$\Rightarrow \left(P_T - P_w\right)\left(P_T - P_{gi}\right) \cong P_T^2$$

Donc :

$$Q_{e,wg} \cong \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\left(\frac{P_T\left(P_w - P_{gi}\right)}{P_T^2}\right)L_v \tag{A.28}$$

$$Q_{e,wg} \cong \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)}{P_T}L_v = h_{e,wg}\left(P_w - P_{gi}\right) \tag{A.29}$$

$$\Rightarrow h_{e,wg} = \frac{M_w}{M_a}\frac{h_{c,wg}}{c_{pa}}\frac{1}{P_T}L_v \tag{A.30}$$

$$\Rightarrow \frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = \frac{M_w}{M_a}\frac{1}{c_{pa}}\frac{1}{P_T}L_v \tag{A.31}$$

Avec :

$$M_w = 18.02\ \left(g/mole\right)$$

$$M_a = 28.96\ \left(g/mole\right)$$

$$P_T = 98.07\times10^3\ \left(Pa\right)$$

$$L_v = 2454\ \left(KJ/Kg\right)$$

$$c_{pa} = 1181\ \left(J/Kg.K\right)$$

Donc:

$$\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = \frac{18.02}{(28.96)}\frac{1}{(1181)}\frac{1}{\left(98.07\times10^3\right)}2454\times10^3$$

$$\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = 0.013 \tag{A.32}$$

Cela vérifie les expressions faites par Bowen (1926), Dunkle (1961) [59], qu'on trouve expérimentalement que: $\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = 0.013$; cependant une récente publication de Malik [26] donne le rapport $\frac{h_{e,wg}}{h_{c,wg}} = 0.016273$.

Par cette étude on obtient le flux de chaleur transmis par évaporation du plan d'eau vers la vitre qui est donné par la relation suivante:

$$Q_{e,wg} = 16.273\times10^{-3} h_{c,wg}\left(P_w - P_{gi}\right) = 0.016273\frac{\left(P_w - P_{gi}\right)}{\left(T_w - T_{gi}\right)}Q_{c,wg} \qquad \text{(A.33)}$$

Cette relation montre que pour déterminer $Q_{e,wg}$, il suffit de connaître $Q_{c,wg}$.

B

Présentation du lieu d'expérimentation (Ouargla)

B.1. Situation géographique :

B.1.1. Situation et limites:

La ville de Ouargla est le chef lieu de la troisième plus grande wilaya d'Algérie, elle est située au sud-est Algérien, au fond d'une cuvette très large de la vallée de L'OUED MYA, cette wilaya s'étend sur une superficie de $270030 Km^2$. Ses coordonnées géographiques sont:

Altitude: $164\,m$;

Latitude: $31^0 57'$ Nord;

Longitude: $5^0 19'$ Est.

B.2. Etude climatiques:

Les paramètres climatiques (température, évaporation, l'humidité relative, précipitation, vent …) sont les facteurs les plus déterminants pour les productions de l'eau distillée, les valeurs de ces paramètres sont disponibles au niveau de l'office national météorologique de Ouargla.

B.2.1. La température:

La température est le facteur le plus important dans le climat, à cause de la liaison directe ou non directe avec les autres facteurs climatiques. Comme elle a une grande influence sur la partition de la vie humaine, végétale et animale.

Ouargla est une région saharienne avec un climat très chaud en été et très froid en hiver.

Les températures sont mesurées deux fois chaque jour.

La première fois a $(18^h : 00)$ et correspond à la température maximale. Le tableau (B.1) montre le calcul des températures maximales mensuelles sur 11 ans d'observation (de 1996 à 2006). Les températures maximales mensuelles sont représentées sur la figure (B.1).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TX (°C)	18.61	20.60	25.60	30.01	34.72	38.81	43.53	42.67	37.39	31.73	23.90	17.49

Tableau (B.1): Températures maximales mensuelles pour Ouargla.

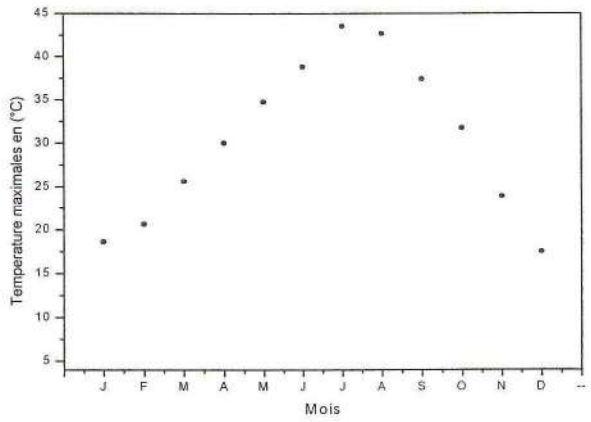


Figure (B.1) : Températures maximales mensuelles pour Ouargla

Deuxième fois a $(6^h : 00)$ et correspond la température minimale. Le tableau (B.2) montre le calcul des températures minimales mensuelles d'après 11 ans d'observation (de 1996 à 2006). Les températures minimales mensuelles sont représentées sur la figure (B.2).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TN (°C)	5.10	6.54	10.25	15.13	20.01	24.94	27.84	27.40	23.52	17.60	10.38	6.15

Tableau (B.2): Températures minimales mensuelles pour Ouargla.

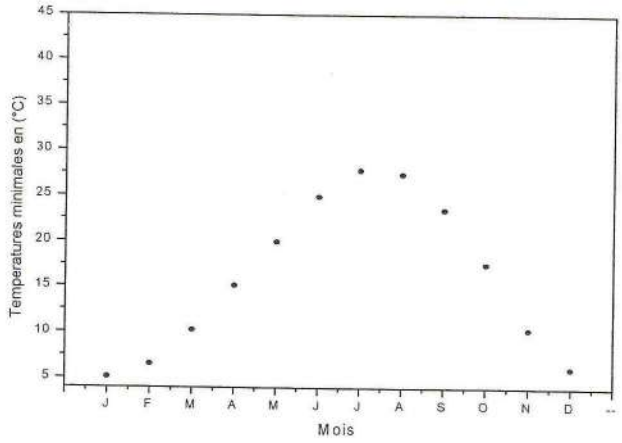


Figure (B.2) : Températures minimales mensuelles pour Ouargla.

A partir des deux températures : températures maximales et les températures minimales on peut obtenir la température moyenne. Le tableau (B.3) montre les valeurs des températures moyennes mensuelles sur 11 ans d'observation (de 1996 à 2006) . Les températures moyennes mensuelles sont représentées sur la figure (B.3).

Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**J**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**
TM (°C)	11.81	13.38	18.07	22.65	27.48	32.56	35.70	33.91	30.48	24.60	17.06	12.45

Tableau (B.3): Températures moyennes mensuelles pour Ouargla.

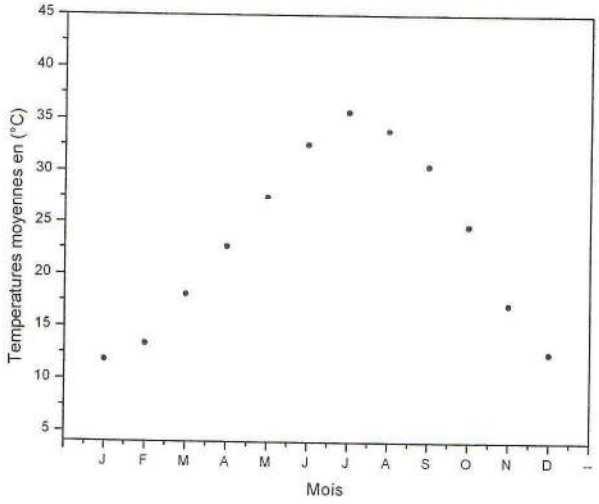


Figure (B.3) : Températures moyennes mensuelles pour Ouargla.