

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie chimique**

Intitulé du mémoire

**Etude expérimentale et numérique des performances d'un distillateur à simple pente couplé à des capteurs solaires plans**

Présenté par :

ABDELBAKI Yousra

KRITLI Oussama

Proposé par :

Dr Zahia TIGRINE, UDES/CDER

Encadreurs :

Pr Rachid ISSAADI, USBD

Dr Zahia TIGRINE, UDES/CDER

Année universitaire 2015/2016

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail s'est déroulé dans le Laboratoire «Distillation et Dessalement des Eaux Saumâtre et de Mer DDESM » de l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES/CDER). Nous souhaitons remercier les responsables du laboratoire ainsi que tous les permanents et doctorants qui nous ont recueillis.*

*Nous remercions le Dr Zahia Tigrine Maître de recherche à l'UDES, qui a conseillé, suivi, encadré et permis la réalisation de ce projet. Merci pour sa patience et sa gentillesse.*

*Un grand merci au Pr Rachid ISSAADI, Professeur à l'Université de BLIDA d'avoir assuré la codirection de ce travail et de nous avoir accompagné dans nos débuts de recherche. Nous le remercions également de nous avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, son dynamisme et de sa rigueur intellectuelle.*

*Nos remerciements vont également à tous les responsables et enseignants du département de génie des procédés, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Nous souhaitons remercier nos parents, nos amis et nos camarades pour leur soutien.*

## **Résumé**

Ce travail est une approche expérimentale et numérique des performances d'un distillateur solaire à simple pente associé à deux capteurs solaires plans appliqués pour accélérer le préchauffage de l'eau dans l'évaporateur et le stockage d'énergie au niveau de la base en béton du distillateur. L'influence des différents paramètres internes et externes tels que la température, l'épaisseur de la masse d'eau à distiller, le taux de salinité de cette eau, la qualité du verre, le matériau de stockage (éponge) et l'intensité du rayonnement solaire, sur le rendement du distillateur a été étudiée. On montre en particulier, que la salinité de l'eau est favorable à une augmentation de la productivité. De plus, l'effet combiné du chauffage de l'eau et du stockage d'énergie dans la masse de béton donne un rendement important et supérieur à celui du cas de référence pour les deux configurations de distillateurs expérimentés. L'utilisation des cubes en éponge dans le bassin du distillateur rectangulaire permet également d'augmenter la capacité de stockage d'énergie et d'atteindre un rendement de distillation plus important. En effet, la production journalière augmente de 45% par rapport au système sans éponge.

Parallèlement, une simulation numérique en utilisant la CFD (Computational Fluid Dynamics) est réalisée sur le distillateur en 3D afin de prédire les conditions de fonctionnement du système de distillation. L'effet de la convection naturelle sur le procédé et les phénomènes « évaporation-condensation » avec paroi inférieure chauffante a été examiné. Les évolutions de la température, de la distribution de la densité, de la fraction volumique et massique et du champ de vitesse ont été évaluées.

**Mots clés :** Distillation, Energie solaire, CFD, Evaporation-Condensation.

## **Abstract**

This study is based on an experimental and numerical approach to the performances of a single slope solar still associated to double flat solar collectors used to accelerate the water preheating in the evaporator as much as the power storage at the base of the distiller concrete made.

The influence of different internal and external parameters such as temperature, thickness of the mass of water to be distilled, water salinity, glass quality, storage material (sponge) and solar radiation intensity on the distiller performance has been studied. The results show particularly that the water salinity favors an increase of the productivity. Furthermore, the combined effect of the water heating and the energy storage in the concrete mass gives a significant yield which is greater than that of the reference case for the two experienced distillers configurations.

The use of the sponge cubes in the basin of the rectangular distiller also allows the increase of the energy storage capacity and the reach of a more significant distillation performance. Indeed, the daily output increases by 45 % compared to the system without sponge.

Meanwhile, a numerical simulation using the CFD (Computational Fluid Dynamics) software is performed on the 3D distiller to predict the operating conditions of the distillation system. The effect of natural convection on the process and the «evaporation - condensation" phenomenon with heated bottom wall was examined. The temperature evolution, the density distribution, volume and mass fractions and the velocity field were evaluated.

**Keywords:** Distillation, Solar energy , CFD, evaporation - condensation.

## ملخص

هذه الدراسة تنحصر في منهجية تجريبية و رقمية لتقييم أداء و فعالية جهاز تقطير شمسي (يعتمد على الطاقة الشمسية)، ذو منحدر واحد، مرتبط بجامعين شمسيين مسطحين مستعملين لتسريع تسخين المياه على مستوى المبخر و كذلك تخزين الطاقة على مستوى القاعدة الإسمنتية لجهاز التقطير. تأثير عدة عوامل، داخلية و خارجية، كدرجة الحرارة، سمك كتلة الماء الموجهة للتقطير، مقدار التملح لهذه المياه، طبيعة أو جودة الزجاج، مادة التخزين (إسفنج) و شدة الإشعاع الشمسي على مردود المقطر تم دراسته.

يتبين لنا بالخصوص أن تملح الماء مواتي لارتفاع في الإنتاج.

فوق ذلك، التأثير المشترك لتسخين الماء مع تخزين الطاقة على مستوى كتلة الإسمنت يعطي مردودا معتبرا، أعلى من مردود الحالة المرجعية لكلا التنظيمين لأجهزة التقطير المجربة. استعمال مكعبات أسفنجية داخل حوض المقطر المستطيلي يسمح كذلك بزيادة قدرة تخزين الطاقة و بلوغ مردود تقطير عالي فهكذا الإنتاج اليومي يرتفع بنسبة 45% بالنسبة للنظام بدون إسفنج. في نفس الوقت، محاكاة رقمية باستعمال برنامج CFD طبقت على المقطر بثلاثة أبعاد للتنبؤ بظروف تشغيل نظام التقطير تم فحص تأثير الحمل الحراري الطبيعي على العملية و ظاهرة، التبخر- تكثف، بوجود جدار سفلي مسخن.

تم كذلك تقييم تطور درجة الحرارة، توزع الكثافة، النسبة الكتلية و الحجمية، و حقل السرعة.

## الكلمات الرئيسية

تقطير، طاقة شمسية، تبخر- تكثف

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

## CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Généralités sur l'eau .....	03
1.1.1. Eau dans le monde .....	03
1.1.2. Critères de qualité de l'eau potable .....	04
1.2. Généralités sur les procédés de dessalement .....	04
1.2.1. Classification des procédés de dessalement selon le principe de fonctionnement .....	05
1.2.1.1. Les procédés thermiques .....	05
a) La distillation .....	05
b) La congélation .....	05
1.2.1.2. Les procédés membranaires.....	06
a) L'Osmose inverse .....	06
b) L'électrodialyse.....	07
1.2.1.3. La distillation membranaire .....	08
1.3. Distillation solaire .....	09
1.3.1. Etat de l'art des travaux antérieurs.....	09
1.3.2. Les différents types des distillateurs solaires.....	20
1.3.2.1. distillateur solaire a effet de serre .....	20
a) Distillateur solaire sphérique à balayage .....	20
b) Distillateur solaire à multi étages .....	21
c) Distillateur solaire à bassin simple et à double vitrage .....	22
d) Distillateur solaire à cascade.....	23
1.3.3. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire à effet de serre .....	23
1.3.3.1. Paramètres de fonctionnement .....	23
a) Paramètres de construction .....	23
b) Paramètres météorologiques .....	24
c) Epaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller .....	24
1.3.3.2. Caractéristiques de fonctionnement .....	24
1.3.4. Transfert thermique .....	26
a) Conduction .....	26
b) Convection .....	26
c) Rayonnement .....	27
Conclusion .....	27

## CHAPITRE 2: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODES DE MESURES

2.1. Dispositifs expérimentaux.....	28
2.2. Conception du distillateur solaire .....	29
a) Distillateur carrée.....	29
b) Distillateur rectangulaire .....	29
2.3. Etapes de construction .....	30
2.4. Source d'irradiation .....	31
2.4.1. Capteur solaire .....	31
2.4.2. Rayonnement solaire .....	32
2.5. Méthode de mesures et d'analyses .....	33
2.5.1. Mesure des caractérisations du distillat .....	33

2.5.2. Mesure de la température .....	33
a) Distillateur rectangulaire .....	34
b) Distillateur carré .....	34
2.6. Caractéristiques physicochimiques des eaux utilisées pour le dessalement .....	35

### CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Production .....	36
3.1.1. Effet de l'isolation des parois du distillateur .....	36
3.1.2. Effet du volume d'eau à dessaler .....	39
3.1.3. Effet de température de la masse d'eau à dessaler .....	39
3.1.4. Effet de la salinité de l'eau .....	40
3.1.5. Effet de l'irradiation solaire .....	41
3.1.6. Effet du système de préchauffage et de stockage .....	43
3.1.7. Effet du vitrage .....	46
3.1.8. Effet de matériau de stockage d'énergie (Eponge) .....	47
3.2. Evolution des températures en fonction du temps.....	48
3.3. Variation des paramètres physico-chimiques .....	48

### CHAPITRE 4 : ETUDE NUMERIQUE

4.1. Description du code de calcul .....	51
4.1.1. GAMBIT (le Mailleur) .....	53
a) Construction d'un maillage : .....	53
b) Conditions aux limites : .....	55
4.1.2. L'outil ANSYS-fluent .....	55
4.2. Formulation du problème et simulation sous fluent .....	56
4.2.1. Présentation du système.....	56
4.2.2. Hypothèses simplificatrices .....	57
4.2.3. Equations gouvernantes .....	58
4.3. Simulation numérique .....	61
4.3.1. Simulation de l'évaporation et condensation dans la chambre de distillation .....	61
4.3.1.1. Méthode VOF (Volume Of Fluid): .....	61
4.3.1.2. Méthode couplée ' Level-Set et VOF' .....	62
4.3.2. La méthodologie .....	63
4.3.3. Les étapes de simulation .....	64
4.3.4. Paramètres physico-chimiques des fluides .....	65
4.4. CFD POST .....	66
4.5. Résultats numériques et discussions.....	67
4.5.1. Production.....	67
4.5.2. Coefficient de transfert de chaleur .....	69
4.5.3 Distribution de la température .....	70
4.5.4. Distribution de la densité .....	74
4.5.5. Distribution de la fraction volumique et massique de l'eau .....	80
4.5.6. Effet de la température sur le champ de vitesse .....	81
CONCLUSION GENERALE.....	84

Références Bibliographiques

Annexes

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.1 : Réservoir d'eau sur terre d'après QA International (2005) .....	03
Figure 1.2 : Dessalement par congélation sous vide inventé par Gunairis .....	06
Figure 1.3 : Représentation schématique du procédé de dessalement par osmose et osmose inverse .....	07
Figure 1.4 : Schéma de principe d'une électrodialyse .....	08
Figure 1.5 : Schéma de principe de la distillation membranaire .....	09
Figure 1.6 : Evolution du taux de production pour différents matériaux .....	12
Figure 1.7 : Production journalière du système pour les différents essais .....	14
Figure 1.8: Comparaison de l'efficacité entre le distillateur modifié et le système conventionnel .....	14
Figure 1.9: Effet de couplage de tubes à vide et gravier noir sur la production de distillat du distillateur solaire à double bassin .....	15
Figure 1.10 : Variation du taux de distillat pour différentes modifications du bassin .....	16
Figure 1.11 : Evolution de la productivité de l'eau fraîche d'un distillateur solaire à cascades modifié et conventionnel .....	17
Figure 1.12 : Effet de refroidissement du verre sur la productivité du distillateur passif et actif sous les mêmes conditions .....	18
Figure 1.13 : Variation du taux de production en fonction du nombre d'étages pour différentes valeurs de température de l'évaporateur .....	19
Figure 1.14 : Performance du système dans différents climats .....	19
Figure 1.15 : Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire plan à effet de serre .....	20
Figure 1.16 : Distillateur solaire sphérique .....	21
Figure 1.17 : Distillateur solaire a multi étages .....	22
Figure 1.18 : Distillateur solaire a double vitrage .....	22
Figure 1.19 : Distillateur solaire incliné a cascade .....	23

## CHAPITRE 2: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODES DE MESURES

Figure 2.1. Schéma de l'installation expérimentale .....	29
Figure 2.2. Schéma de dalle en béton .....	30
Figure 2.3. Schéma de l'évaporateur .....	30
Figure 2.4: vue en coup d'un capteur solaire plan à eau .....	31
Figure. 2.5 : Dispositifs expérimentaux couplé à des capteurs solaires plans .....	32
Figure 2.6: Evolution temporelle du flux lumineux durant une journée ensoleillée typique à l'UDES .....	33
Figure 2.7: L'emplacement des thermocouples dans un le distillateur .....	34

## CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure 3.1: Evolution de la production journalière en fonction du volume à dessaler, configuration rectangulaire avec et sans isolation.....	38
Figure 3.2: Evolution de la production journalière en fonction du volume à dessaler, configuration carrée avec et sans isolat .....	38
Figure 3.3 : Evolution de la production journalière en fonction du volume à dessaler dans les deux géométries avec isolat.....	39
Figure 3.4 : Evolution du volume horaire cumulé d'eau distillée en fonction de la température de l'eau pour les deux géométries .....	40
Figure 3.5 : Evolution temporelle du flux solaire.....	42

Figure.3.6 : Variation de la température ambiante et la vitesse du vent en fonction du temps .....	42
Figure 3.7 : Evolution de la production quotidienne d'eau distillée pour différents flux solaire .	43
Figure 3.8: Histogramme représentant la production journalière d'eau distillée en Présence de différentes sources d'énergie, géométrie rectangulaire .....	44
Figure 3.9: Histogramme représentant la production journalière d'eau distillée en Présence de différentes sources d'énergie, géométrie carrée .....	45
Figure 3.10: Evolution du volume horaire cumulé, verre trempé et verre ordinaire .....	46
Figure 3.11 : Evolution du volume horaire cumulé, avec et sans éponge .....	47
Figure 3.12: Variation de différentes températures en fonction du temps (14 Avril V=35l).....	48
Figure 3.13 : Variation temporelle de la conductivité et du pH de l'eau distillée géométrie rectangulaire .....	49
Figure 3.14 : Variation temporelle de la conductivité et du pH de l'eau distillée géométrie carrée .....	50

## CHAPITRE 4 : ETUDE NUMERIQUE

Figure 4.1 : Etapes utilisées dans la méthode des volumes finis .....	52
Figure 4.2 : Schéma des étapes utilisées dans la simulation par ANSYS-fluent .....	53
Figure 4.3: Maillages structurés et non structurés.....	54
Figure 4.4 : Description de la géométrie du système .....	57
Figure 4.5 : Taux de présence en fluide bleu dans les volumes de contrôle.....	62
Figure 4.6 : Comparaison de trois méthodes de suivi de l'interface.....	63
Figure 4.7 : Géométrie de distillateur en 3D.....	64
Figure 4.8 : Maillage structuré de distillateur 3D. ....	64
Figure 4.9: Evolution des résidus de calcul (encours).....	67
Figure 4.10 : Evolution temporelle du rendement d'eau distillée, configuration Rectangulaire .....	68
Figure 4.11 : Evolution temporelle du rendement d'eau distillée, configuration carrée .....	69
Figure 4.12 : Evolution horaire des coefficients de transfert thermique par convection : géométrie rectangulaire (R) et carrée (C) .....	70
Figure 4.13 : Evolution horaire des coefficients de transfert thermique par évaporation géométrie rectangulaire (R) et carrée (C) .....	70
Figure 4.14.a : Distribution de la température à $t = 0s$ .....	71
Figure 4.14.b : Distribution de la température à $t = t_{17}$ .....	72
Figure 4.14.c : Distribution de la température en fonction de la position Y .....	73
Figure 4.14.d: Distribution de la température en fonction de la .....	73
Figure 4.14.e: Distribution de la température de l'eau en fonction de la position à l'interface (eau-air) .....	74
Figure 4.15.a : Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 0s$ .....	75
Figure 4.15.b: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 1/8 t_f$ .....	76
Figure 4.15.c: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 2/8 t_f$ .....	76
Figure 4.15.d : Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 3/8 t_f$ .....	77
Figure 4.15.e: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 4/8 t_f$ .....	77
Figure 4.15.f: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 5/8 t_f$ .....	78
Figure 4.15.g: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 6/8 t_f$ .....	78
Figure 4.15.h: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t = 7/8 t_f$ .....	79
Figure 4.15.i: Evolution de la densité dans le plan (y,z) à $t=t_f$ .....	79
Figure 4.15.j: Evolution de la densité sur la vitre à $t=t_f$ .....	80
Figure 4.16.a : Evolution de la fraction volumique de l'eau dans le plan (y,z) à $t=0s$ .....	81

Figure 4.16.b : Evolution de la fraction volumique de l'eau dans le plan (y,z) à $t=t_f$ .....	81
Figure 4.16.c : Evolution de la fraction volumique de l'eau sur la vitre .....	82
Figure 4.17 : Distribution de la fraction massique de l'eau .....	82
Figure 4.18 : Evolution de la fraction massique d'eau en fonction de position.....	83
Figure 4.19 : Evolution de la vitesse du mélange dans le plan (y,z).....	84
Figure 4.20 : Evolution de la vitesse du mélange dans le plan (x, y).....	85
Figure 4.21 : Variation de la vitesse en fonction de la position (x). .....	85

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1. Effet des modifications sur la productivité du distillateur solaire.....	11
---	----

## CHAPITRE 2: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODES DE MESURES

Tableau 2.1 : caractéristiques du capteur solaire plan a eau .....	32
Tableau 2.2 : Résultats des analyses physicochimiques de l'eau de Mer de Bou-Ismaïl et l'eau de puits de l'UDES. ....	35
Tableau 2.3 : Résultats des analyses physicochimiques des eaux salines préparées.....	35

## CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau 3.1 : Valeurs des rendements d'eau distillée obtenus par les deux configurations avec et sans isolat pour différents volume d'eau à dessaler .....	37
Tableau 3.2 : Valeurs des rendements d'eau distillée obtenus dans les deux configurations pour différentes salinités de l'eau à distillée. ....	41
Tableau 3.3: Effet des modifications sur le rendement du distillateur solaire .....	45

## CHAPITRE 4 : ETUDE NUMERIQUE

Tableau 4.1 : statistique des mailles. ....	64
Tableau 4.2 : Conditions aux limites.....	65
Tableau 4.3 : Paramètres physico-chimiques de l'eau .....	65
Tableau 4.4 : Paramètres physico-chimiques de l'air.....	66
Tableau 4.5 : Paramètres physico-chimiques de la vapeur d'eau en fonction de la température (en Celsius) .....	66

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

### Lettres latines

$A_w$	Surface d'évaporation	$m^2$
$C$	Concentration	moles/ $m^3$
$C'$	Constante de Nusselt	
$C_p$	Chaleur spécifique	J/kg.K
$D$	Coefficient de diffusion	$m^2/s$
$d$	dimension caractéristique	m
$Gr$	Nombre de Grashof	
$g$	Accélération de la pesanteur	$m/s^2$
$h$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$w/m^2\text{°C}$
$h_{cw}$	Coefficient de transfert de chaleur par conversion (eau-verre)	$w/m^2\text{°C}$
$h_{ew}$	Coefficient de transfert de chaleur par évaporation (eau-verre )	$w/m^2\text{°C}$
$I_G$	Puissance du rayonnement solaire incident par unité de surface	$w/m^2$
$k$	Conductivité thermique	$w/m\text{°C}$
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	J/kg
$\dot{m}_{ev}$	Débit évaporé	$Kg/m^2h$
$n$	Constante de Nusselt	
$Nu$	Nombre de Nusselt	
$P_g$	Pression partielle de vapeur saturée à la couverture de condensation	$N/m^2$
$P_w$	Pression partielle de vapeur saturée d'eau	$N/m^2$
$Pr$	Nombre de Prandtl	
$\Phi$	Flux de chaleur transmis par convection	w
$\Phi$	Flux de chaleur transmis par conduction	w
$q_{ew}$	Densité de flux de chaleur par évaporation	$w/m^2$
$Q_{ev}$	Flux de chaleur utilisé pour l'évaporation de l'eau	w
$Q_w$	Flux de chaleur reçu par la masse d'eau	w
$S$	Surface d'échange	$m^2$
$t$	Temps	s
$T$	Température	$\text{°C}$
$X$	Fraction volumique	
$x$	Variable d'espace dans la direction du flux	m

## Lettres grecques

$\beta$	Coefficient d'expansion	$1/^{\circ}\text{C}$
$\sigma$	Constante de Stéphan Boltzmann	$\text{w/m}^2 \cdot \text{K}^4$
$\mu$	viscosité	$\text{Kg/ms}$
$\rho$	densité	$\text{kg/m}^3$
$\alpha_t$	Coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau	
$\alpha_e$	Coefficient d'absorption de l'eau	
$\alpha_f$	Coefficient d'absorption du fond du distillateur	
$\tau_e$	Coefficient de transmission de l'eau	
$\tau_v$	Coefficient de transmission de la vitre	
$\varepsilon$	Coefficient d'émission de la surface ( $\varepsilon=1$ pour un corps noir)	$\text{w/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$
$\lambda$	Coefficient de transfert de chaleur par conduction	

## Abréviations

CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CFD	computational fluid dynamics
Ext	Extérieure
FPB	Facteur de Performance Brut
FPH	Facteur de Performance Horaire
Int	Intérieure
MD	Distillation Membranaire
MED	Distillation à Multiples Effets
MES	Matière En Suspension
MSF	Distillation Flash Multi-étage
OI	Osmose Inverse
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
QA	Assurance Qualité
UDES	Unité de Développement d'Equipements Solaire
TDS	Total des Solides Dissous
VOF	Volume De Fluide

## Indices

f	fluide
g	Verre
p	Paroi
s	Surface
v	Vapeur
w	Eau



## INTRODUCTION GENERALE

Au XX<sup>e</sup> siècle, la population mondiale a triplé et la consommation d'eau a sextuplé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, chaque année, 3,4 millions de personnes, principalement des enfants, meurent de maladies dues à la mauvaise qualité de l'eau et 2,4 milliards de personnes manquent d'eau pour leur besoin d'hygiène élémentaire. Les ressources en eau douce sont limitées : l'accroissement prévisible de la population (70 % de la consommation d'eau est destinée à l'agriculture et 10 % pour l'usage domestique), le développement industriel (l'industrie consomme 20 % de l'eau produite), font craindre une rupture des ressources en eau aux conséquences bien plus graves que celles qui résulteront de la fin des réserves pétrolières. Il y a des substituts au pétrole, pas à l'eau.

Pour satisfaire la demande en eau douce dans des régions où les réserves sont insuffisantes, plusieurs pays ont fait appel aux procédés de dessalement. Celles qui ont eu un grand succès à nos jours sont la distillation et l'osmose inverse. Ces deux techniques sont implémentées à l'échelle industrielle et ont connu des développements technologiques considérables afin de les rendre plus compétitifs.

En Algérie le problème d'approvisionnement en eau potable persiste à nos jours. L'une des solutions est la production de l'eau douce à partir de l'eau saumâtre ou l'eau de mer. Néanmoins, le dessalement nécessite une énergie dont le coût est important. Pour cela des projets dans le domaine de l'énergie solaire ont montré depuis 1872, que la distillation solaire est économiquement, la plus compétitive lorsque la demande en eau douce n'est pas trop grande. Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du Bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire Algérien dépasse les 2000 heures annuelles ce qui situe le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres par distillation solaire comme l'une des techniques les plus prometteuses pour certaines régions de notre pays. Il répond principalement à deux objectifs: l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation des surfaces agricoles.

Cette technique répond aux exigences du développement durable, elle permet de combler les déficits hydriques en augmentant les ressources en eau et ce tout en étant respectueuses de l'environnement en limitant les rejets polluants ce qui les rend compétitives par rapport au techniques conventionnelle de traitement des eaux. Un dernier avantage de la distillation solaire est qu'elle soit relativement simple à automatiser et à contrôler. Les recherches dans ce domaine ont pour but l'optimisation de la production en eau douce en utilisant différentes techniques de dessalement. Beaucoup de chercheurs ont

proposé des modèles mathématiques pour décrire les transferts de chaleur et de matière dans les distillateurs solaires afin d'optimiser la production du système.

L'objectif de notre étude consiste à développer un équipement de dessalement et production d'eau distillée par distillation solaire à effet de serre avec stockage d'énergie et préchauffage de l'eau à traiter. Notre démarche a pour but de déterminer les conditions opératoires influençant le rendement du distillateur solaire en utilisant des capteurs solaires thermiques pour le préchauffage de l'eau et le stockage d'énergie. Le distillateur solaire en béton développé repose sur une géométrie simple à réaliser (carrée et rectangulaire) avec un coût minimum. Un modèle en trois dimensions sera développé pour le processus d'évaporation et de condensation dans les distillateurs solaires en utilisant la (CFD) *computational fluid dynamics* pour simuler le modèle. La simulation sera réalisée pour prédire la distribution de température de l'eau, l'évolution de la densité, la fraction volumique et massique ainsi que la vitesse au sein du distillateur solaire.

Ce travail a été structuré en quatre chapitres principaux, dans le premier chapitre, les concepts et principes nécessaires à la compréhension du mémoire sont présentés. Des références bibliographiques, des exemples et les modèles pertinents par rapport à nos travaux sont expliqués. Ce chapitre commence par des généralités concernant les eaux et les procédés de dessalement (définition, classification). Par la suite, une section importante portera sur la distillation solaire (principe et paramètres de fonctionnement, classification).

Le deuxième chapitre est consacré à la description des dispositifs expérimentaux et les instruments de mesure utilisés.

Le troisième chapitre regroupera les résultats expérimentaux, leurs exploitations et leurs interprétations. Il présente l'étude expérimentale de la distillation solaire.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation numérique. Les étapes à suivre lors de la construction de la géométrie sous GAMBIT et la description du code de calcul FLUENT, ainsi que les résultats de la simulation sont présentés et discutés.

Enfin, une conclusion générale sur le problème étudié est présentée. Elle comporte des suggestions par rapport à des travaux qui pourraient être menés pour approfondir et éclaircir davantage certains aspects de la présente étude.

## CHAPITRE 1

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Le premier chapitre de ce mémoire s'attache à présenter les différents procédés de dessalement appliqués industriellement ainsi que les facteurs qui ont concouru au développement de ces procédés dans le secteur du traitement de l'eau.

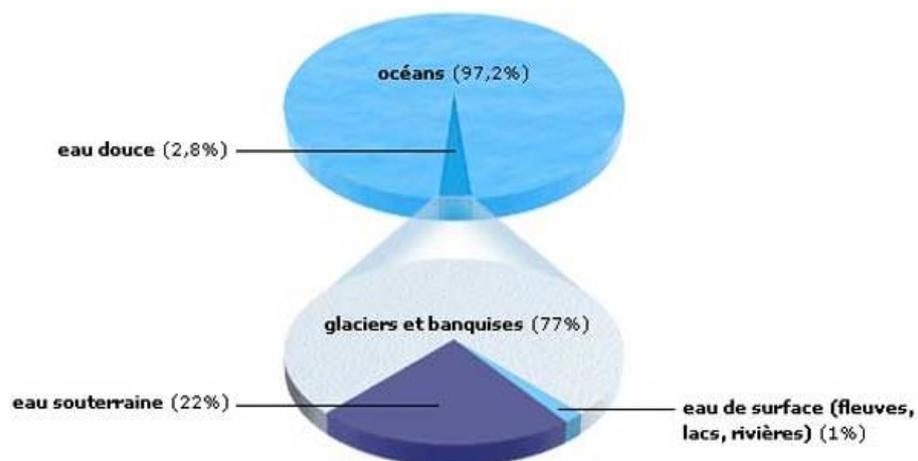
Puis, une attention particulière sera portée sur la distillation solaire pour laquelle une revue des travaux de recherche dans le cadre du traitement de l'eau sera proposée.

#### **1.1. Généralités sur l'eau**

##### **1.1.1. Eau dans le monde**

« Que d'eau, que d'eau à perte de vue et pas une goutte à boire ». Partout, on manque d'eau douce, les ressources en eau douce sont très inégalement réparties et ne représentent qu'un faible pourcentage du volume d'eau existant sur la Terre. Un quart de la population mondiale souffre et vit dans des zones de ressources limitées en eau douce, les besoins en eau douce sont donc de plus en plus importants.

Une bonne partie des zones consommatrices se trouvant proches des rivages océaniques, une solution intéressante consiste à dessaler l'eau de mer et les eaux saumâtres [1]. La figure 1.1 illustre la répartition d'eau dans le monde d'après QA International.



**Figure 1.1** : Réservoir d'eau sur terre d'après QA International (2005).

### **1.1.2. Critères de qualité de l'eau potable**

Toutes les eaux de la nature ne sont pas bonnes à boire, l'eau potable est une eau propre à la consommation humaine. L'eau est consommable par l'homme dès lors qu'elle répond à des exigences de qualité définies par L'organisation Mondiale de la Santé (OMS). Cette dernière a proposé six caractéristiques auxquelles une eau potable devrait se conformer à savoir [2]:

- Sans organismes pathogènes,
- Faible concentration des composés chimiques fortement toxiques ou toxiques à long terme,
- Clair,
- Non saline,
- Sans composés pouvant causer un mauvais goût ou une mauvaise odeur,
- Non corrosive

### **1.2. Généralités sur les procédés de dessalement**

Pour répondre à cette pénurie annoncée d'eau potable, différentes technologies de production d'eau potable ont été développées pour satisfaire les besoins de la population croissante à court et à long terme. Les procédés de dessalement en particulier, présentent un enjeu important et stratégique pour l'avenir de certaines régions arides du monde.

Lors du premier symposium d'Athènes en 1962, plusieurs procédés de dessalement ont été recensés et mis en application dans de nombreuses usines de dessalement à travers le monde. Actuellement, la plupart des procédés utilisés mettent en jeu des techniques très performantes [3].

Le recours au dessalement des eaux marines et saumâtres associé aux énergies renouvelables introduit un élément appréciable de la ressource en eau et, constitue une solution techniquement possible, moins onéreuse, rentable, simple et opérationnelle.

A l'heure actuelle les principales techniques de dessalement des eaux sont classées en deux grandes catégories, selon le principe appliqué.

## **1.2.1. Classification des procédés de dessalement selon le principe de fonctionnement**

### **1.2.1.1. Les procédés thermiques**

Ces procédés font intervenir un changement de phase (eau-vapeur).

#### a) La distillation

La distillation est le procédé de dessalement le plus ancien et découle du cycle naturel de l'eau : A la surface des océans, l'eau s'évapore sous l'action du soleil, puis se condense et se précipite sur les différents lieux en fonction de leur altitude. Ce cycle naturel a été à l'origine des premières applications de dessalement fondées sur un apport artificiel de chaleur ou énergie nécessaire pour l'obtention d'eau douce à partir d'eau salée. Dans les installations modernes, c'est le même principe simple qui est appliqué, bien que les appareillages soient très complexes, en fournissant de la chaleur (procédé thermique) ou sous forme de travail mécanique (procédés de compression de vapeur ou thermo compression). On vaporise une partie de l'eau salée à traiter, puis, en condensant la vapeur produite, on obtient de l'eau pure, tandis que les sels se trouvent concentrés dans la saumure, qu'il reste à évacuer.

Actuellement, il existe de nombreuses techniques de distillation parmi lesquelles, nous pouvons, sans être exhaustif citer :

- ❖ Distillation à multiples effets (MED) (Distillation par longs tubes verticaux/ et ou par tubes horizontaux).
- ❖ Distillation à détente successives ou à multiples étages (MSF) [Multi-stage - Flash].
- ❖ Distillation par compression de vapeur

#### b) La congélation

La technologie de dessalement par congélation a été proposée comme alternative de la distillation et de l'osmose inverse [4] (figure 1.2), cette technologie repose sur trois étapes essentielles :

- ❖ La congélation partielle de l'eau à dessaler jusqu'à  $-2^{\circ}\text{C}$
- ❖ La séparation des cristaux de glace et de la saumure
- ❖ La fusion des cristaux de glace pour obtenir l'eau douce à l'état liquide

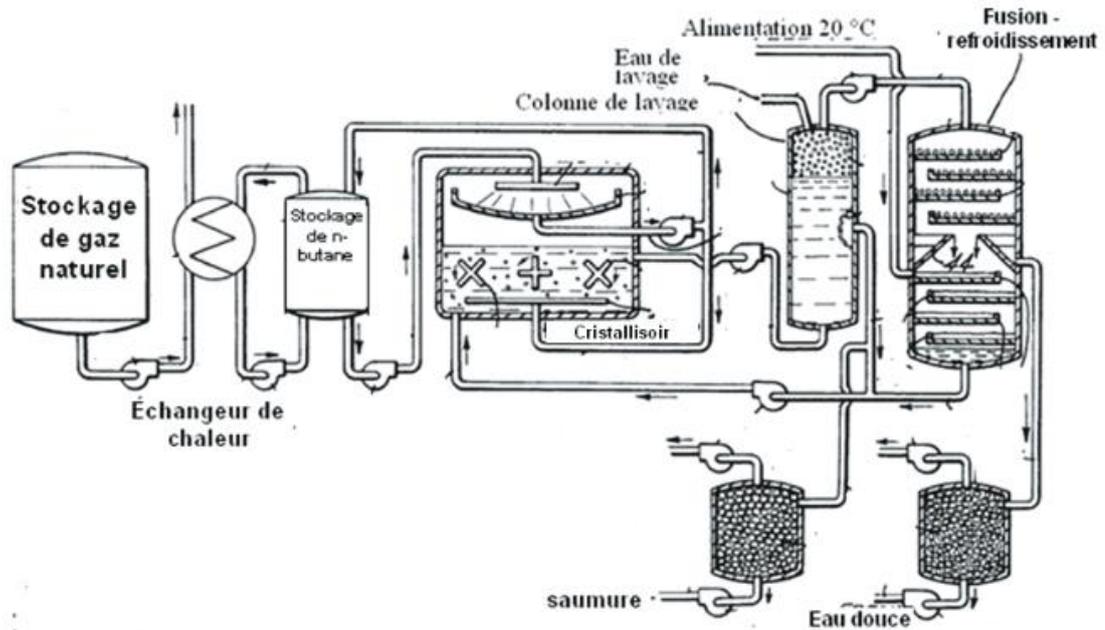


Figure 1.2 : Dessalement par congélation sous vide inventé par Ganairis [4] .

### 1.2.1.2. Les procédés membranaires

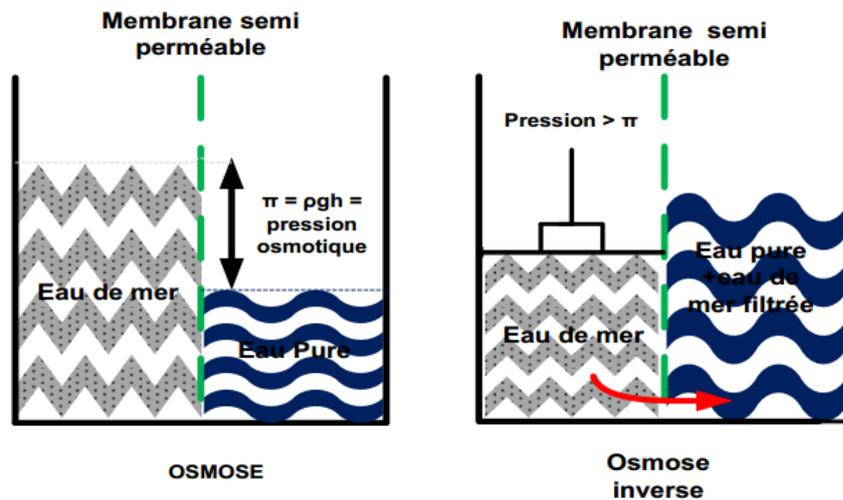
Les opérations de séparation par membranes sont bien placées pour aider à résoudre ces problèmes. En effet, comme les membranes jouent le rôle de barrière physique, elles produisent avec une grande fiabilité une eau de qualité pour la consommation humaine et l'industrie.

#### a) L'Osмосe inverse

Les membranes d'osmose inverse sont celles qui ont les structures les plus denses de toutes les membranes utilisées actuellement dans le domaine de l'eau potable. Ces membranes ont la capacité de retenir les ions monovalents, de très faible masse molaire ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ). Par conséquent, les pressions osmotiques, qui sont d'autant plus importantes que la taille du soluté est faible, peuvent être très fortes si les concentrations en sels ou en molécules de faible masse moléculaire sont élevées. Cela implique que la pression d'opération, qui doit être plus élevée que la pression osmotique, peut être très élevée comme dans le cas du dessalement d'eau de mer (5 à 8 MPa) [5].

Comme le montre la figure 1.3, dans le procédé d'OI, la mise sous pression de l'eau de mer provoque le transfert de l'eau à travers la membrane semi-perméable. On obtient de

l'eau pure dans un compartiment et une solution d'eau salée très concentrée dans l'autre. La teneur en sels de l'eau de l'osmoseur est de l'ordre de  $0,5 \text{ g.l}^{-1}$ .



**Figure 1.3 :** Représentation schématique du procédé de dessalement par osmose et osmose inverse [6].

#### b) L'électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de dessalement électro-membranaire qui permet d'éliminer des sels dissous d'une eau saline par migration à travers des membranes sélectives (cationique ou anionique) sous l'action d'un champ électrique. Une membrane anionique sélective s'oppose au passage des cations et permet le passage des anions uniquement tout en restant imperméable à l'eau sous pression. Ainsi, une membrane cationique sélective permet le passage des cations uniquement et s'oppose au passage des anions en restant imperméable à l'eau sous pression [7] (figure 1.4). Les membranes cationiques sont constituées de polystyrène sulfaté, tandis que les membranes anioniques sont constituées de polystyrène avec des ammoniums quaternaires.

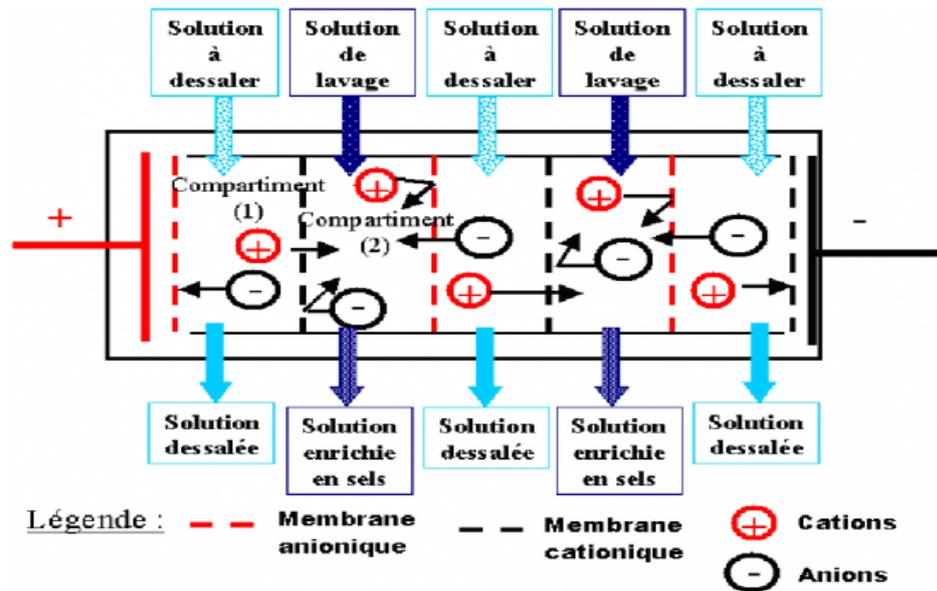


Figure 1.4 : Schéma de principe d'une électrodialyse [8].

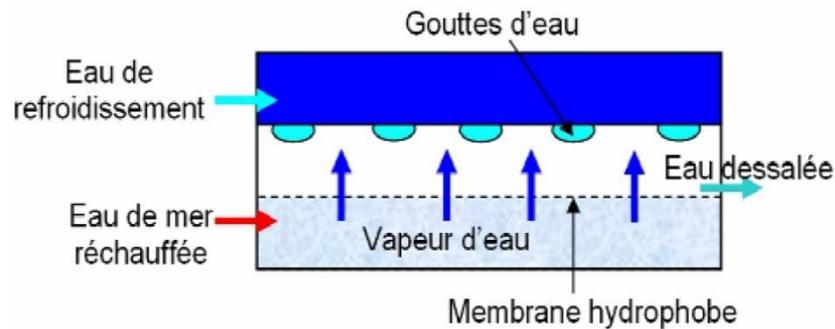
### 1.2.1.3. La distillation membranaire

La distillation membranaire (MD) est une nouvelle technologie combinant à la fois distillation et séparation membranaire, elle permet de récupérer des eaux à forte salinité dans un contexte de demande croissante en eau douce. C'est un processus de transport de vapeur à travers une membrane hydrophobe microporeuse sous l'effet de la température par des mécanismes de transfert de masse et de chaleur [9]. La figure 1.5 présente le schéma de principe de la une distillation membranaire.

Cependant, ce procédé n'est pas encore industrialisée à l'instar d'autres procédés de séparation tels que l'osmose inverse (OI) et la distillation multflash (MSF) et ce pour les soucis de performances suivants :

- Production/ taux de conversion inférieur en comparaison avec l'osmose inverse.
- Efficacité thermique inférieure à celle observée en distillation multflash ce qui engendre une consommation énergétique supplémentaire.

Ces paramètres de performance restent donc à améliorer et c'est cette direction que prennent les actuels travaux de recherche, c'est-à-dire, l'amélioration des performances par l'augmentation de la production (flux de vapeur) et de l'efficacité thermique des procédés de distillation membranaire [9].



**Figure 1.5 :** Schéma de principe de la distillation membranaire.

De nos jours, les procédés plus répandus et développés sont : la distillation à multiples effets, à multiples étages et l'osmose inverse.

### **1.3. Distillation solaire**

L'utilisation de l'énergie solaire pour le dessalement de l'eau a été envisagée dès 1872 dans le nord du Chili. La première usine mondiale de distillation solaire fut construite par Carlos Wilson 1873 [10]. Depuis des milliers de distillateurs solaires fonctionnent à travers le monde et dont la majorité pour un usage domestique et industriel. Suivant le climat et la saison, ils peuvent produire de 2 à 6 litres d'eau distillée par mètre carré par jour.

#### **1.3.1. Etat de l'art des travaux antérieurs**

Depuis les années 70, plusieurs types de distillateurs ont été élaborés et étudiés afin d'améliorer le rendement en eau distillée. Parmi lesquels, nous pouvons citer :

- ❖ Le distillateur à effet multiple [11] ;
- ❖ Le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné [12] ;
- ❖ Distillateur solaire à cascades [13] ;
- ❖ Distillateur solaire modèle de type "MKI" et "MKII" [14] ;
- ❖ Distillateur solaire à effet de serre type hot-box [15] ;

**Akash et al.** [16] ont étudié expérimentalement l'efficacité d'un distillateur solaire à différents angles d'inclinaison du couvercle : 15°, 25°, 35°, 45° et 55°. Ils ont remarqué que la production en eau douce est maximale pendant le mois de Mai pour un angle d'inclinaison de 35°. Ce dernier correspond à l'inclinaison optimale.

Les résultats expérimentaux obtenus prouvent que la salinité de l'eau affecte la production de distillat, elle diminue avec l'augmentation de la salinité. L'effet de la profondeur d'eau a été également étudié dont la production de l'eau diminue avec l'augmentation de la profondeur d'eau dans le distillateur.

**Bassam A/K Abu-Hijleh et al. [17]** ont étudié expérimentalement la performance d'un distillateur solaire en plaçant des cubes en éponge de tailles différentes dans le bassin. Par ailleurs, ils ont étudié les différents paramètres à savoir, la taille des cubes, la profondeur de l'eau, la salinité, l'utilisation du charbon noir et des cubes en acier noir. Ce travail a montré que l'utilisation des cubes en éponge dans le bassin d'eau a entraîné une amélioration significative de la production du distillateur par rapport à un distillateur identique sans cubes en éponge dans les mêmes conditions.

**Chaker et Boukerzaza [18]** ont mené une étude comparative de deux types de distillateurs solaires à savoir le distillateur plan et le distillateur sphérique. Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques de fonctionnement du distillateur sphérique sont plus performantes que celles du distillateur solaire plan. Ils ont noté que les pertes thermiques qui se produisent dans le distillateur plan sont plus importantes que celles du sphérique. La comparaison des ces résultats numériques avec ceux obtenus dans l'étude expérimentale menée en parallèle, montre une bonne fiabilité du code de calcul.

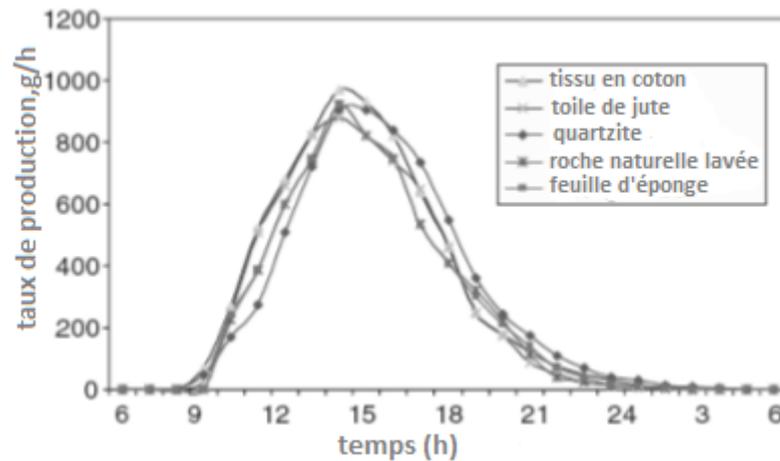
Dans le but d'accélérer le taux de production d'un distillateur solaire à bassin, **Velmuruga et al. [19]** ont réalisé une étude expérimentale et théorique. De diverses expériences ont été entreprises en apportant des modifications sur le dispositif considéré (ailette, éponge et mèche) afin d'examiner l'effet de ces matériaux sur la productivité du distillateur. Le tableau 1.1 ci-dessous présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et théoriques concernant le taux de production obtenu. Ils ont constaté que la productivité s'est améliorée de 1,88 à 2,8 kg/m<sup>2</sup>.

**Tableau 1.1.** Effet des modifications sur la productivité du distillateur solaire [19].

Distillateurs	Date	Radiation solaire moyenne (W/m <sup>2</sup> )	Taux de production en (kg/m <sup>2</sup> /jour)		Ecart %
			Expérimental	Théorique	
<b>Distillateur simple</b>	16.08.06	545	1,88	2,07	10,1
<b>Distillateur à éponge</b>	13.08.06	527	2,26	2,4	6,2
<b>Distillateur à mèche</b>	06.04.06	620	4,07	4,5	10,6
<b>Distillateur à ailette</b>	28.08.06	533	2,81	3,09	9,8

**Velmurugan et al.** [20] ont poursuivi leur étude expérimentale pour produire de l'eau distillée à partir des effluents industriels en utilisant un type de distillateur solaire ordinaire intégré par cinq ailettes rectangulaires en vue d'augmenter la surface de contact au fond du bassin. Les résultats expérimentaux ont prouvé que la productivité augmente considérablement en raison de cette modification, dont le taux d'évaporation a été augmenté jusqu'à 53%. Cette étude a prouvé que la productivité augmente de 29,6%, 15,3% et de 45,5% en utilisant un distillateur solaire à mèche, à éponge et à ailette respectivement.

**Kalidasa Murugavel et al.** [21] ont réalisé un distillateur solaire simple à double pente d'une superficie de 1,75 m<sup>2</sup>; il a été testé pour une couche d'eau de 3,4 Kg. Leur étude a mis en évidence l'effet de différents absorbeurs poreux (coton, tissu en jute, éponge et roche de quartz) sur la performance du distillateur en présence d'une résistance électrique de 2 kW placée sous le bassin intérieur de ce système. Les résultats expérimentaux sont indiqués dans la figure 1.6, on remarque que le distillateur à coton est plus productif.



**Figure 1.6 :** Evolution du taux de production pour différents matériaux [21]

**Retiel et al. [22]** ont réalisé un prototype d'un distillateur solaire plan classique, sur lequel ils ont essayé d'apporter quelques modifications (isolation, préchauffeur, réflecteur et absorbeur) pour augmenter la production d'eau distillée. Il a été constaté que le préchauffeur a le meilleur rendement par rapport aux autres éléments.

**H.Tanaka et Nakatake [23]** ont prévu théoriquement la productivité de distillat d'un distillateur solaire incliné à mèche avec un réflecteur externe plan incliné durant la journée du solstice d'hiver à latitude  $30^\circ$  nord. D'après les résultats théoriques de cette analyse ils ont estimé que :

- Le réflecteur incliné peut augmenter la productivité à condition que l'inclinaison du réflecteur  $\theta_m$  soit réglée vers  $15^\circ$  par rapport au plan vertical.
- Lorsque la longueur du réflecteur vaut la moitié ou la même longueur du distillateur, la quantité journalière produite pour un distillateur à réflecteur incliné est de 15% ou de 27% plus importante que celle d'un distillateur à réflecteur vertical.

**H.Tanaka [24]** a effectué une étude expérimentale pour examiner l'efficacité d'un distillateur solaire à bassin, modifié par des réflecteurs internes et un réflecteur externe pendant la saison d'hiver à Kurume (Japon). Le réflecteur extérieur a été légèrement incliné vers l'avant pour que les rayons solaires réfléchissent d'une manière efficace. Les résultats expérimentaux montrent que l'intégration de deux réflecteurs intérieurs et un réflecteur extérieur peut augmenter la productivité journalière de 70% à 100%.

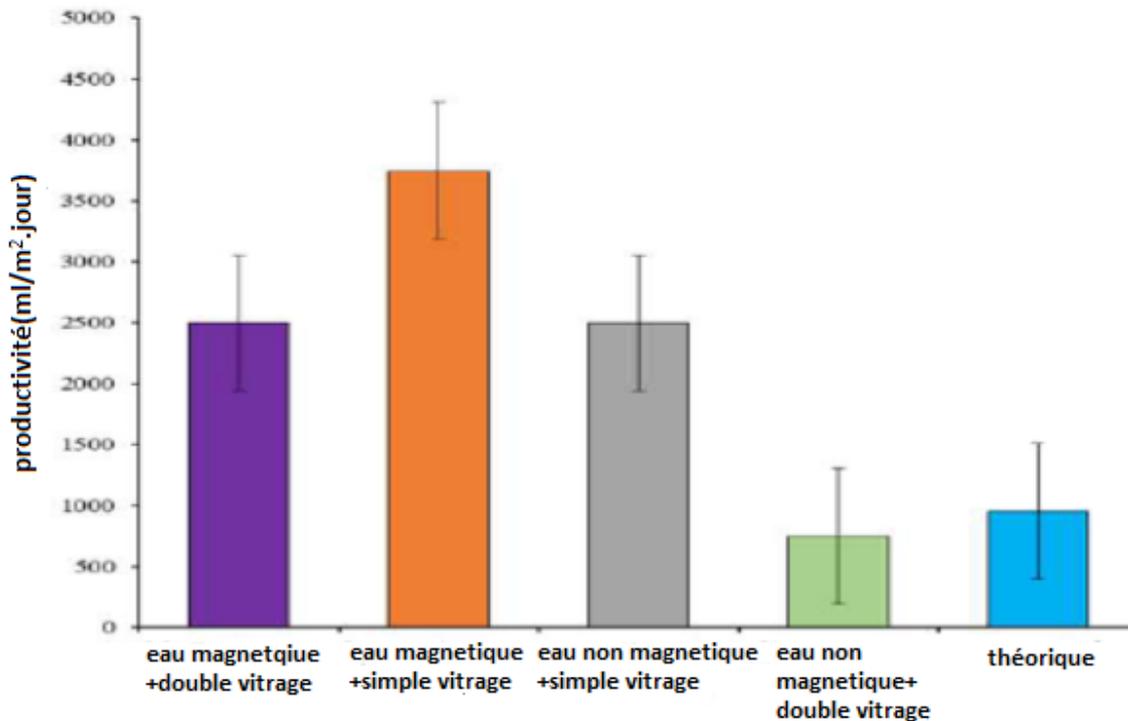
**Kalidasa Murugavel et al. [25]** ont fabriqué et testé un distillateur solaire à double pente en utilisant une couche d'eau minimale de profondeur de 0,5 cm et de différents matériaux sensibles qui ont tendance de stocker la chaleur comme la roche de quartzite, les

morceaux de brique rouge, les morceaux de ciment concrets (béton), les cailloux et le fer. Il a été constaté que le distillateur à roche de quartzite donne une meilleure production par jour. Un modèle thermique a été développé pour valider les résultats de ce distillateur avec précision. Le taux de production estimé par le modèle théorique est en bon accord avec les valeurs expérimentales.

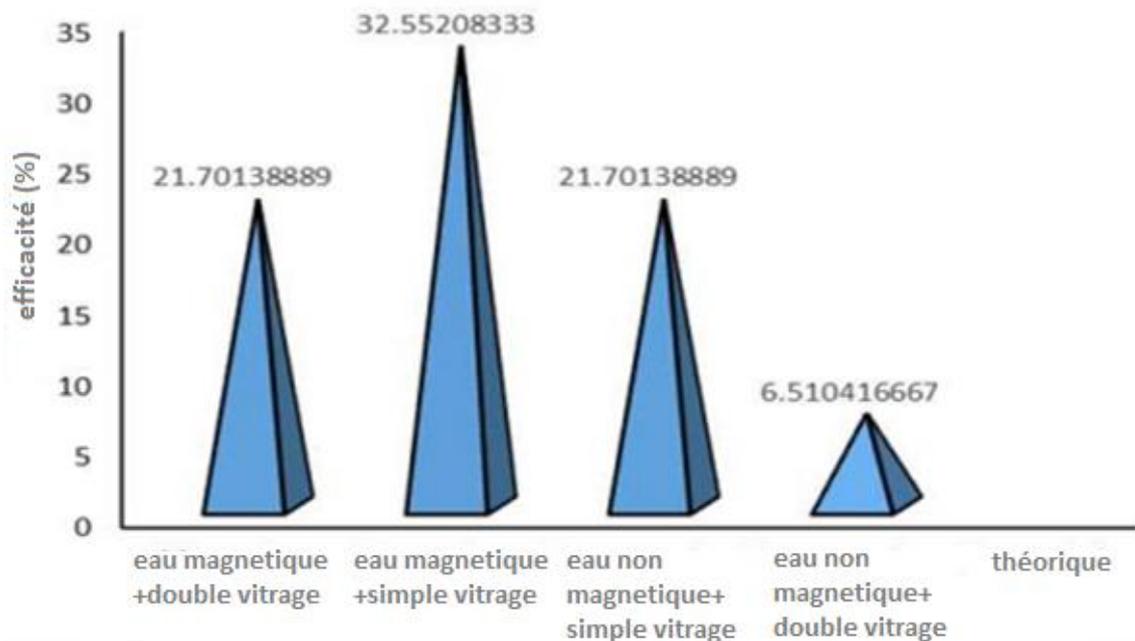
Même si l'utilisation de l'énergie solaire dans la distillation de l'eau salée pour produire de l'eau potable en raison de l'augmentation du coût des combustibles fossiles et la considération de l'environnement est devenue très répandue, leurs usages sont interdits par leurs coût. Cela a nécessité la modélisation du distillateur solaire pour une conception efficace. **Narjes Setoodeh et al. [26]** ont simulé les processus d'évaporation et de condensation survenant dans les distillateurs solaires par un modèle en trois dimensions en utilisant la méthode de calcul de dynamique des fluides (CFD) sur un logiciel CFX 11.

**Sampathkumar [27]** a prouvé que le couplage d'un capteur à tubes en verre sous vide avec l'énergie solaire augmente l'efficacité du système jusqu'à 49,7%. **Sharif Abad et al. [28]** ont intégré un PHP (Heat Pipe Pulsé) dans un distillateur solaire. Ils ont constaté une augmentation remarquable de la vitesse de production d'eau dessalée dont la production maximale est de 875 ml/m<sup>2</sup>h.

**Asaad Rehman Saeed Al-Hilphy [29]** a développé et optimisé le bassin d'un distillateur solaire en ajoutant une unité de traitement magnétique d'énergie 0.12 Tesla et deux couches de verre intercalées avec de l'eau. Différents essais ont été menés pour tester le dispositif en utilisant l'eau magnétique avec couvercle à double vitrage en verre, de l'eau non magnétique avec couvercle à double vitrage en verre, l'eau magnétique avec couvercle en verre unique, l'eau non magnétique avec couvercle en verre. Il a été constaté d'après ce travail que la productivité du distillateur est augmentée par l'ajout d'eau magnétique avec couvercle en verre unique est de 50% par rapport au traitement conventionnel. En outre, il a été constaté que la qualité de l'eau distillée en utilisant l'eau magnétique avec couvercle en verre unique est meilleure que les autres traitements. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures 1.7 et 1.8.



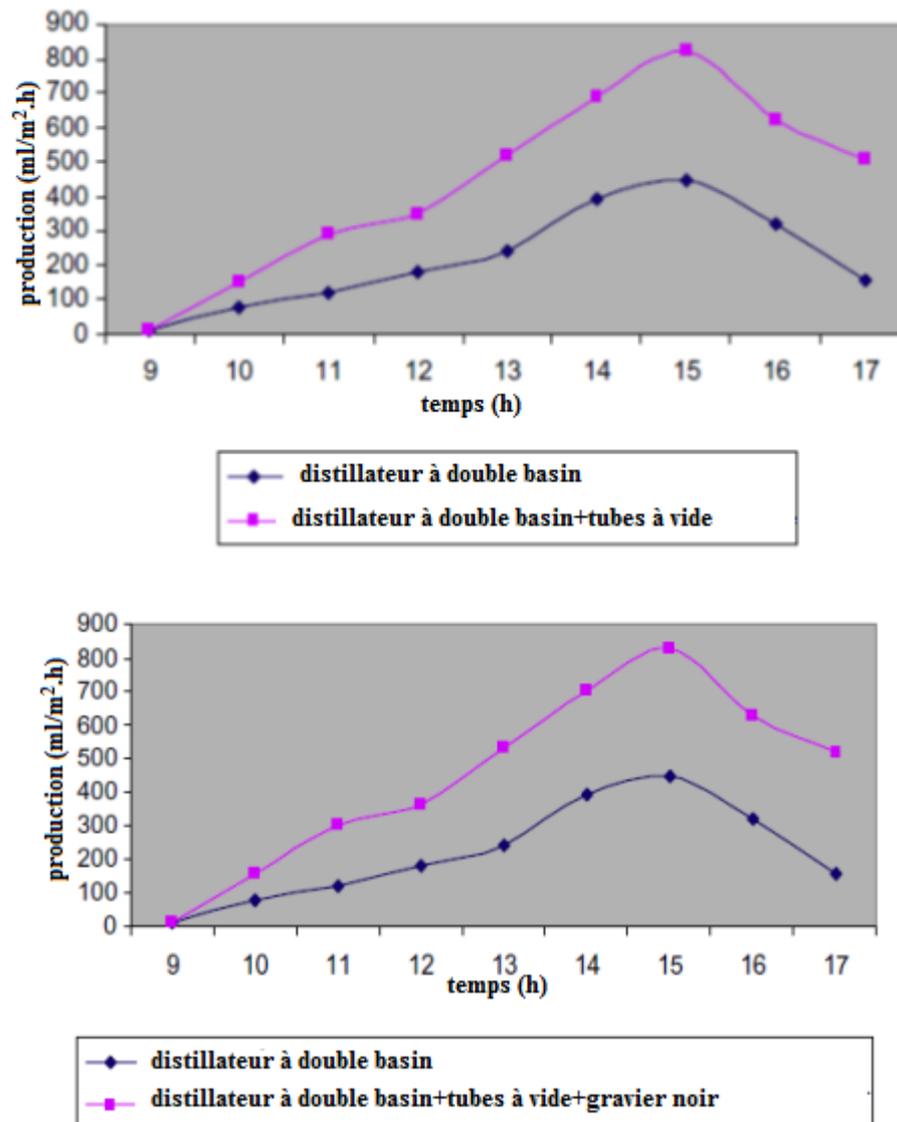
**Figure 1.7 :** Production journalière du système pour les différents essais [29].



**Figure 1.8:** Comparaison de l'efficacité entre le distillateur modifié et le système conventionnel [29]

De nombreuses expériences ont été menées sur un distillateur solaire à double bassin couplé à un capteur solaire à tubes sous vide avec et sans gravier noir pour étudier son effet sur le rendement du système. Cet équipement a été fabriqué et testé dans des

conditions climatiques de Mehsana, Gujarat par **HiteshN. Panchal [30]** pour améliorer la production de distillat du système et sa performance. Ils ont trouvé que la production de distillat est augmentée de 56% en utilisant uniquement le capteur à tubes sous vide et de 65% en ajoutant les tubes à vide et du gravier noir dans le distillateur solaire à double bassin (figure 1.9). A partir des résultats obtenus, les auteurs ont constaté que les capteurs solaires thermiques à tubes sous vide sont plus performants et fiables par rapport aux capteurs paraboliques.

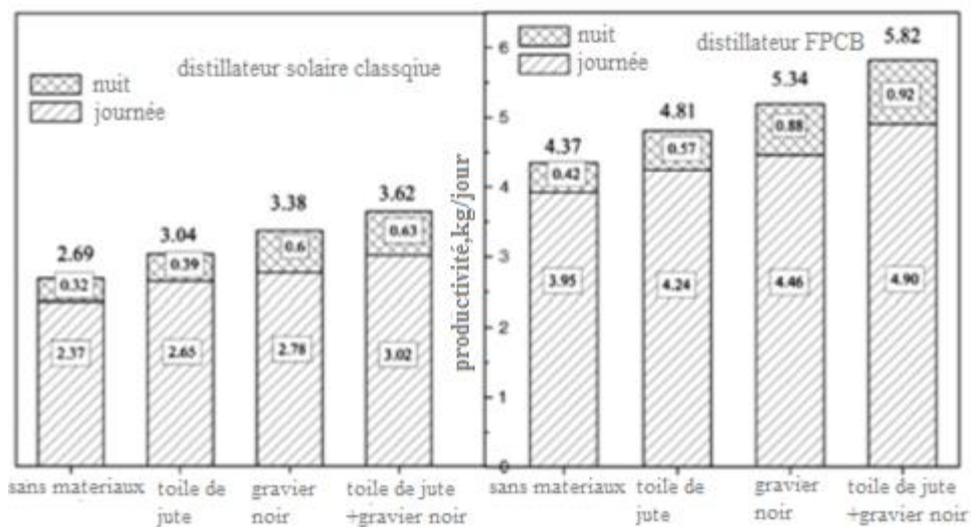


**Figure 1.9:** Effet de couplage de tubes à vide et gravier noir sur la production de distillat du distillateur solaire à double bassin [30].

**Rajaseenivasan, et al [31]** ont effectué une étude expérimentale sur les performances d'un distillateur solaire fabriqué de la même manière qu'un distillateur

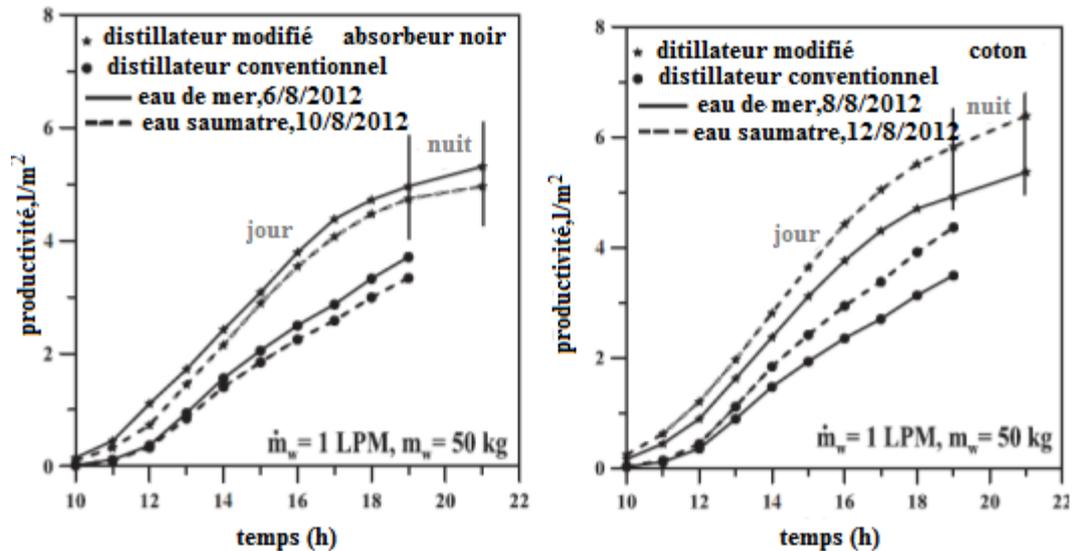
conventionnel en intégrant un capteur plan horizontal arrangé de façon à former six compartiments séparés dans le bassin d'une superficie de  $1\text{m}^2$ . Toile de jute et graviers noirs sont utilisés dans le bassin afin d'améliorer le taux d'évaporation et la capacité thermique du distillateur sous les conditions climatiques locales.

Les résultats expérimentaux (figure 1.10) ont montré que le distillateur solaire intégré par un capteur plan a un taux d'évaporation plus élevé en comparaison avec celui le distillateur solaire classique. L'effet de la surface étendue et le préchauffé de l'eau d'alimentation augmente le distillat environ 60% ( $5,82\text{ kg/m}^2$ ). Ils ont constaté que la toile de jute utilisée dans le bac du système améliore la productivité durant les heures d'ensoleillement et le gravier noir a un effet significatif durant l'après-midi. Cette étude a permis de conclure que le taux de production varie en fonction de la capacité thermique du matériau utilisé.



**Figure 1.10:** Variation du taux de distillat pour différentes modifications du bassin [31]

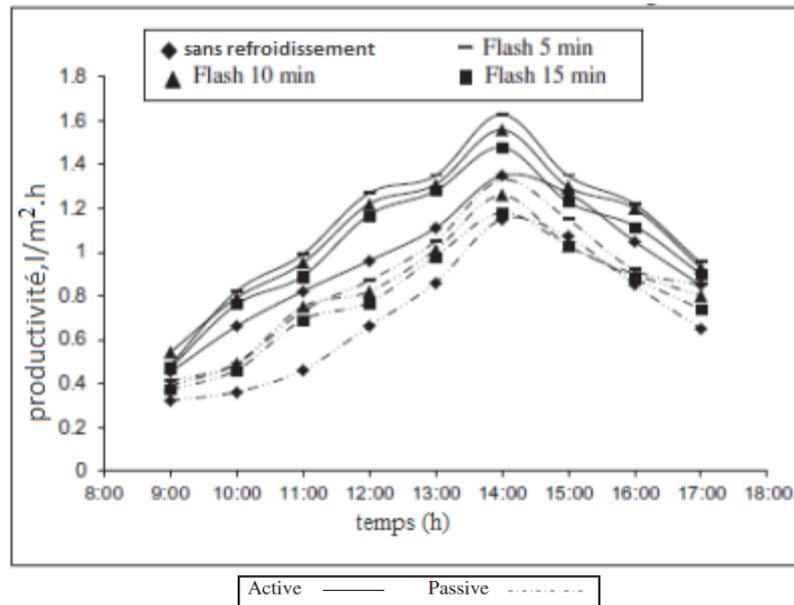
**S.A. El-Agouz [32]** a étudié l'effet de l'installation d'un réservoir de stockage et de coton noir (absorbant) dans un système de distillation solaire à cascades modifié sur le taux de productivité de distillat. Une étude comparative entre un distillateur solaire à cascades modifié et conventionnel a été réalisée pour évaluer la performance de l'équipement de dessalement développé dans les mêmes conditions climatiques. Les résultats obtenus indiquent que la productivité du distillateur à cascades est supérieure à celui de conventionnel d'environ 43% et 48% respectivement pour l'eau de mer et l'eau saumâtre avec absorbant noir et d'environ 53% et 47% respectivement pour l'eau de mer et de l'eau saumâtre en utilisant l'absorbant coton noir (voir figure 1.11).



**Figure 1.11** : Evolution de la productivité de l'eau fraîche d'un distillateur solaire à cascades modifié et conventionnel [32]

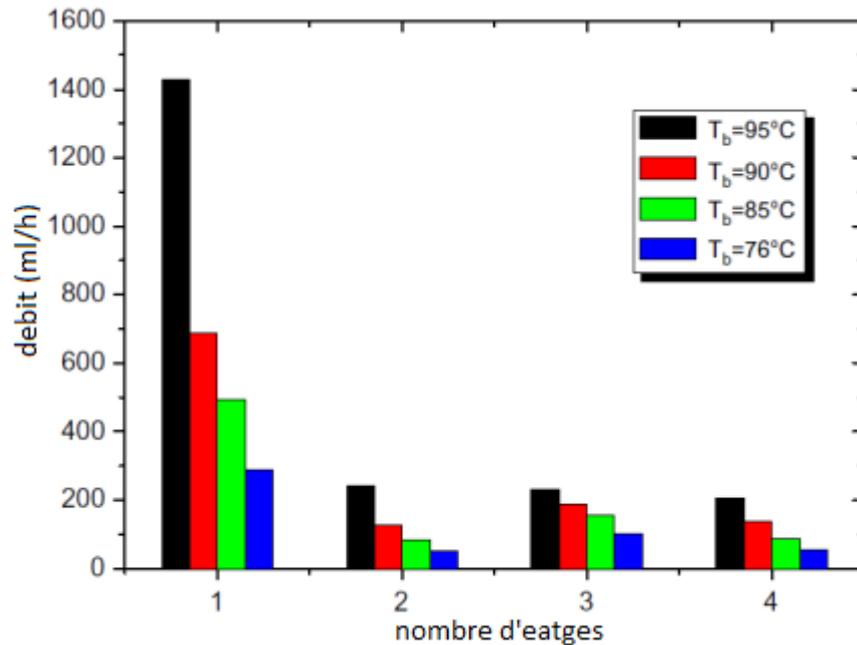
Une simulation numérique en 2D a été réalisée par **Ali Kianifar et al.** [33] pour prédire la production d'eau d'un distillateur solaire avec et sans ailette. La méthode numérique est basée sur l'algorithme SIMPLEC qui est utilisée pour la discrétisation et la résolution des équations de continuité, de mouvement et d'énergie. Ils ont démontré que le transfert de chaleur par convection naturelle crée des vortex dans les distillateurs solaires, ces derniers ont un effet destructeur sur le taux de production. Ils ont pu optimiser la position verticale de l'ailette ( $X' = 0,23$  avec  $Y' = 0,38$ ) dans le bassin en améliorant le taux de transfert de chaleur et de la productivité ainsi que la performance du système considéré.

**M.M. Morad et al.** [34] ont réalisé deux distillateurs solaires l'un passif et l'autre actif dans le but d'optimiser le rendement de ces systèmes. Certains paramètres opérationnels qui influent directement sur la performance des équipements ont été optimisés. D'après l'expérience, ils ont trouvé que le distillateur solaire actif caractérisé par une profondeur de 1 cm d'eau salée et 3 mm d'épaisseur de couvercle en verre est le meilleur en terme de productivité d'eau douce  $10,06 \text{ l/m}^2/\text{j}$  et du rendement thermique interne de 80,6% tant dis que le distillateur solaire passif produit  $7,8 \text{ l/m}^2/\text{j}$  avec un rendement interne de 57%(figure 1.12).



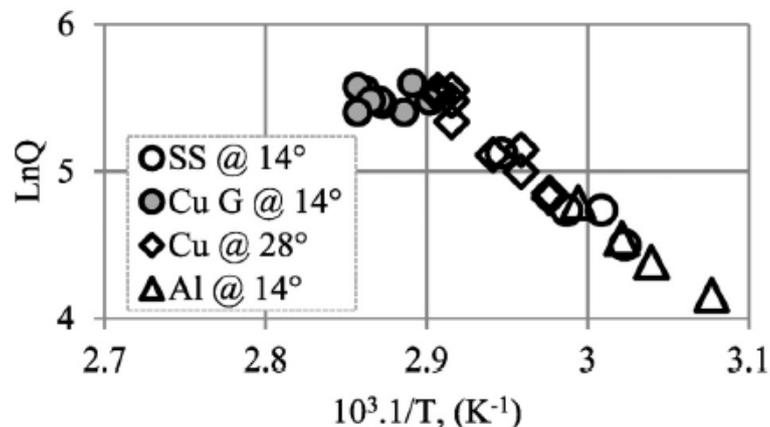
**Figure 1.12 :** Effet de refroidissement du verre sur la productivité du distillateur passif et actif sous les mêmes conditions [34].

Dans la même année **Z. Tirgine et al.** [35] ont proposé un nouveau système de distillation à multi-étages incliné conçu et réalisé à l'UDES. Leur objectif est de générer des données expérimentales sur plusieurs variables d'ingénierie et de conception pour évaluer leur influence sur le rendement du procédé de distillation à étages multiples. Un fort gradient de température a été créé en utilisant une eau de refroidissement qui circule sur les plateaux pour améliorer le processus évaporation-condensation. Ils ont pu révéler l'effet de la température de l'eau dans l'évaporateur et celle de la surface de l'étage refroidie par une eau en mouvement qui affectent considérablement les performances du système. Les résultats expérimentaux (figure 1.13) montrent que la productivité augmente lorsque la température de l'eau de l'évaporateur augmente en raison du taux d'évaporation élevé et elle diffère d'un plateau à un autre.



**Figure1.13** : Variation du taux de production en fonction du nombre d'étages pour différentes valeurs de température de l'évaporateur [35].

A. Diaf et al. [36] ont couplé un distillateur à étages multiples (UDES) avec un capteur solaire plan pour chauffer l'eau dans l'évaporateur. Ce système a été testé sous les conditions climatiques de la ville de Bou-Ismaïl et celle de la région aride de Ghardaïa en utilisant des plateaux à différents matériaux à savoir le cuivre, l'aluminium et l'acier inoxydable (figure 1.14). Ils ont trouvé que la température de l'évaporateur la plus élevée avec un système de chauffage solaire atteint  $77^\circ\text{C}$  (Ghardaïa). Une étude technico-économique a été réalisée en prenant en considération plusieurs hypothèses. Le coût de l'eau distillée produite par l'équipement solaire a été estimé à 16 DA par litre comparativement à 45 DA par litre pour un produit commercial de qualité similaire.



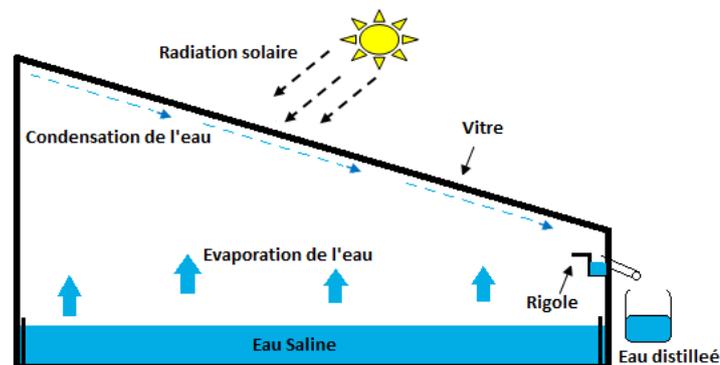
**Figure1.14** : Performance du système dans différents climats [36].

### 1.3.2. Les différents types des distillateurs solaires

Dans ce qui suit nous présentons quelques prototypes de distillateurs solaires étudiés par divers chercheurs.

#### 1.3.2.1. distillateur solaire a effet de serre

Le distillateur solaire à effet de serre est un dispositif couramment utilisé. Il est constitué d'un bassin étanche à l'air, habituellement fait de feuille d'Aluminium en forme rectangulaire. Il est recouvert d'un matériel transparent et l'intérieur de sa base est noirci pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire .Le principe de fonctionnement (figure1.15) consiste à chauffer l'eau directement par rayonnement solaire dans une enceinte fermée recouverte par un vitre généralement inclinée. L'augmentation de la température stimule les molécules d'eau à s'évaporer, laissant en dépôt les sels dissous et tous les autres résidus contenus dans l'eau à dessaler , lorsque l'air saturé avec de la vapeur entre en contact avec la face fraîche (intérieure) de la vitre une condensation se produit, le distillat ruisselle sur la face intérieure de la vitre inclinée mis en pente dans des rigoles, qui le conduise dans un réservoir de stockage.

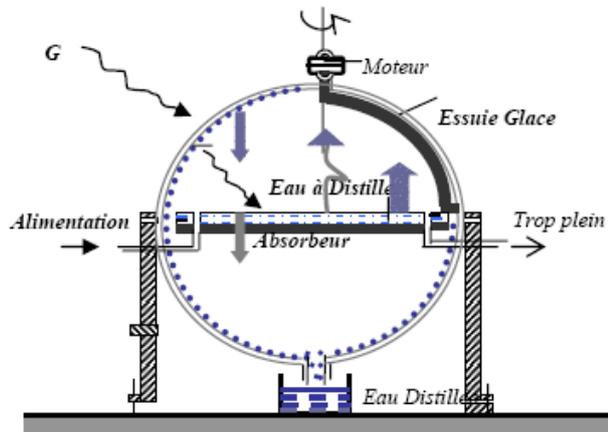


**Figure 1.15** : Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire plan à effet de serre

#### a) **Distillateur solaire sphérique à balayage**

C'est un distillateur en plexiglas transparent, à bac horizontal, et à surface de condensation demi-sphérique (Figure1.16). Le rayonnement incident transmis par la demi - sphère supérieure entre dans le bac et sert à chauffer la masse d'eau contenue dans celui-ci. Une partie de l'eau s'évapore, et la vapeur dégagée vient se condenser sur la face intérieure de la vitre. Le distillat passe dans le demi - sphère inférieure à travers l'espace annulaire entre le bac et la sphère. Le balayage de la surface de condensation est réalisé au moyen

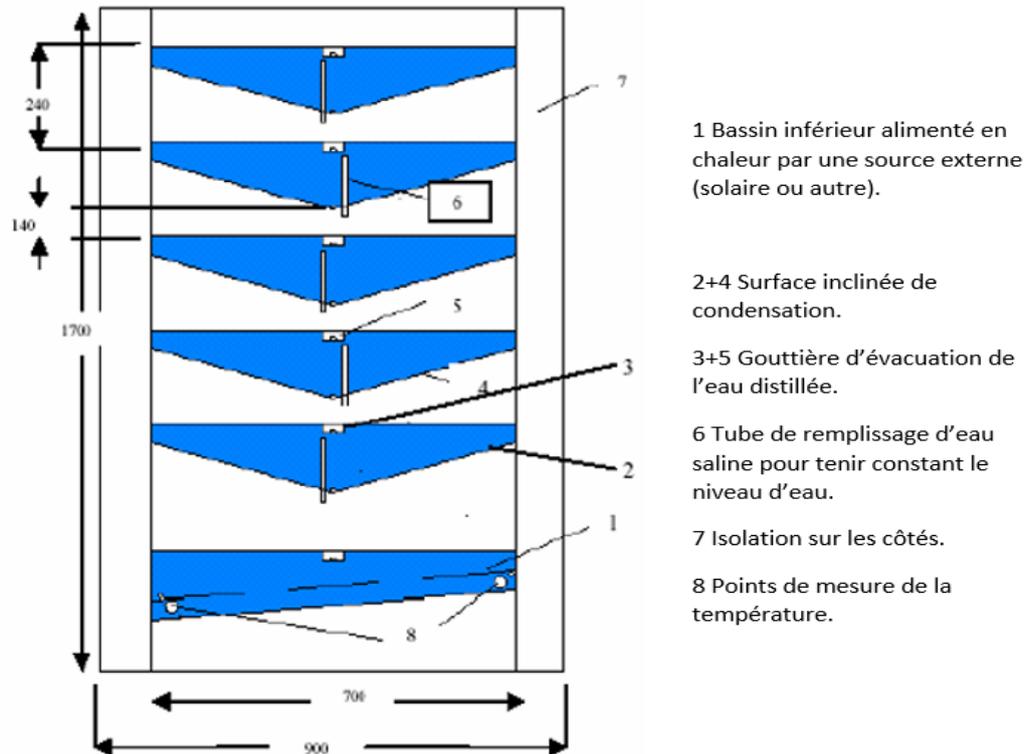
d'un essuie - glace entraîné par un moteur. L'avantage de ce système de balayage est de maintenir la surface de condensation, constamment transparente au rayonnement, et d'assurer un drainage rapide des gouttelettes [37].



**Figure 1.16 :** Distillateur solaire sphérique [37].

#### b) Distillateur solaire à multi étages

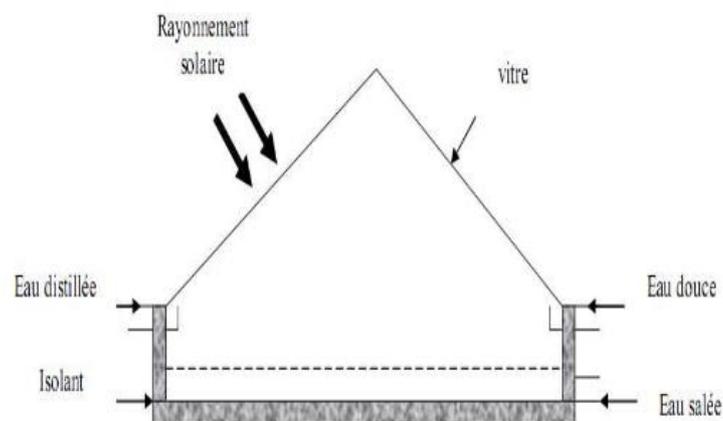
Ce distillateur est constitué de plusieurs bassins contenant de l'eau saline, superposés les uns sur les autres et qu'on qualifie d'étages, seul le bassin est alimenté en énergie thermique. Lorsque l'eau de ce bassin est réchauffée, elle s'évapore et se condense à la surface inférieure du bassin conique situé au-dessus. Il y a une formation de gouttes d'eau qui s'écoulent vers une gouttière qui les conduit au stockage. À la condensation de la vapeur d'eau, l'énergie de conversion de phase, appelée aussi l'enthalpie d'évaporation, est libérée. Cette énergie réchauffe l'eau contenue dans l'étage supérieur qui s'évapore à son tour et se condense à la surface inférieure de l'étage suivant et ainsi de suite [38].



**Figure 1.17 :** Distillateur solaire a multi étages [38].

### c) Distillateur solaire à bassin simple et à double vitrage

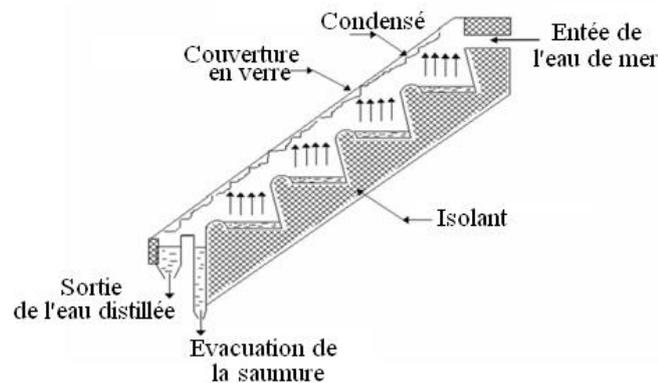
C'est un distillateur à double vitrage où chacun d'eux est incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale, dont l'un est exposé au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation.



**Figure 1.18 :** Distillateur solaire a double vitrage.

#### d) Distillateur solaire à cascade

Ce type de distillateur n'a été exécuté qu'en petite taille. Ces appareils fonctionnent bien mais leur construction et leur entretien sont coûteux. Il présente l'avantage que la lame d'eau se rapproche d'avantage par rapport au rayonnement incident



**Figure 1.19 :** Distillateur solaire incliné à cascade.

Il existe d'autres types de distillateur solaire, à savoir :

- ❖ Distillateur solaire à mèche inclinée
- ❖ Distillateur solaire à film capillaire
- ❖ Distillateur solaire tubulaire

### **1.3.3. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire à effet de serre**

#### **1.3.3.1. Paramètres de fonctionnement**

On peut classer les paramètres qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit :

- ❖ Les paramètres de construction,
- ❖ Les paramètres météorologiques,
- ❖ L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller,

##### **a) Paramètres de construction**

- Vitrage

Le vitrage intervient essentiellement par sa nature, tel que transmette le maximum de rayonnement solaire et qu'il soit opaque à l'infrarouge. Il faut qu'il soit non hydrophobe, il doit aussi résister aux attaques du vent et des particules solides.

➤ Inclinaison

L'inclinaison par rapport à l'horizontale, pour déterminer la quantité d'énergie solaire introduite dans le distillateur et pour minimiser la distance entre saumure et vitre l'angle d'inclinaison doit faire l'objet d'un choix judicieux. L'inclinaison influe d'autre part sur les équations des bilans énergétiques des différents constituants du distillateur.

➤ Absorbeur

Les études faites dans ce domaine montrent que la surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique ou en verre ordinaire). Le choix de la matière de la surface absorbante ou bac noir dépend de son inertie thermique et de sa résistance à l'oxydation par l'eau.

### b) Paramètres météorologiques

Les études faites par plusieurs chercheurs ont montré que les paramètres les plus fréquemment retenus sont :

- ❖ L'intermittence des nuages,
- ❖ La variation du rayonnement global incident et le rayonnement diffus,
- ❖ Le vent et la température ambiante.

### c) Epaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller

L'épaisseur de l'eau ou de la saumure à distiller joue un grand rôle dans la production, cette dernière est d'autant plus importante que l'épaisseur est faible, cependant plus l'épaisseur est grande plus la distillation dure.

## 1.3.3 2. Caractéristiques de fonctionnement

Le choix d'un distillateur solaire dépend essentiellement de grandeurs, appelée caractéristiques de fonctionnement. On distingue [39] :

- ❖ Le débit de distillat ou production du distillateur :

$$\dot{m} = \frac{Q_{ev}}{L_v} \quad (1.1)$$

❖ L'efficacité globale  $\eta_g$  donnée par la relation :

$$\eta_g = \frac{Q_{ev}}{I_G \times A_G} \quad [\%] \quad (1.2)$$

❖ L'efficacité interne  $\eta_i$  définie par l'expression :

$$\eta_i = \frac{Q_{ev}}{Q_w} \quad [\%] \quad (1.3)$$

Avec :

$Q_{ev}$  : Flux de chaleur d'évaporation de l'eau (w)

$Q_w$  : Flux de chaleur reçu par la masse d'eau (w)

$\mathcal{L}_v$  : Chaleur latente de vaporisation (J/kg)

$$Q_w = \left( \tau_g \cdot \alpha_w + \tau_g \cdot \tau_w \cdot \alpha_b \right) \times I_G \times A_g = \alpha_t \times I_G \times A_g \quad (1.4)$$

D'où :

$$\alpha_t = \tau_g \cdot \alpha_w + \tau_g \cdot \tau_w \cdot \alpha_b \quad (1.5)$$

Avec :

$\alpha_t$  : Etant le coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau.

$\alpha_w, \alpha_b$  : Les facteurs d'absorption de l'eau et du fond du distillateur.

$\tau_w, \tau_g$  : Les facteurs de transmission de l'eau et de la vitre.

$A_g$  : surface de l'évaporateur (m<sup>2</sup>)

$I_G$  : La puissance du rayonnement solaire incident par unité de surface (w/m<sup>2</sup>)

❖ La performance

**Satcunathan et Hansen [40]** ont défini le facteur de performance brute (F.P.B) et le facteur de performance horaire (F.P.H).

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout 24h}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 h}} \quad (1.6)$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}} \quad (1.7)$$

A un instant donné de la journée le facteur de performance (F.P) est donné par la relation :

$$FP = \frac{m}{\alpha t.G.A} \quad (1.8)$$

#### 1.3.4. Transfert thermique

Le transfert de chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie les plus connus. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, le flux de chaleur entre deux corps est dirigé spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

##### a) 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.

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

$$\Phi = -\lambda S \text{ grad } (T) \quad (1.9)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.10)$$

##### b) Convection

C'est le transfert de chaleur entre un fluide en mouvement et une paroi, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h S (T_p - T_f) \quad (1.11)$$

Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

- ❖ La convection naturelle ou libre : l'échange de chaleur est dû au contact du fluide avec la paroi plus chaude ou plus froide crée des différences de masse volumique, génératrices de mouvement au sein du fluide
- ❖ La convection forcée : le déplacement du fluide est forcé est imposé de l'extérieur par une machine (pompe, ventilateur, compresseur)

### c) Rayonnement

C'est la transmission d'énergie à distance entre deux corps séparés ou non. Le rayonnement thermique est un phénomène se caractérisant par un échange d'énergie électromagnétique, C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. L'interprétation physique est la suivante : tout corps émet des particules désignées par "photons. Celles-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur longueur d'onde.

D'après la loi de Stéphan, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut s'écrire :

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon \cdot S (T_S^4 - T_\infty^4) \quad (1.12)$$

L'échange thermique dans le système de distillation solaire se réalise par l'intermédiaire de quatre modes de transferts thermiques, par convection, par rayonnement, par évaporation et par conduction. Les transferts thermiques échangés entre la saumure et la vitre se font par convection, par rayonnement et par évaporation. Le distillateur est un système qui échange de la chaleur avec l'extérieur à travers la vitre par convection et les parois inférieures et latérales isolantes se font, par conduction et par rayonnement.

### Conclusion

L'analyse des travaux consacrés à l'étude de la performance des distillateurs solaires avec différentes configurations montre l'importance majeure de la distillation solaire. Les besoins d'eau douce sont de plus en plus croissants et le dessalement des eaux saumâtres et de l'eau de mer apparaît comme solution très intéressante en particulier dans les zones arides et isolées. L'un des problèmes majeurs dans un projet de dessalement est le coût de production de l'eau douce. Il y a donc un besoin constant de minimisation du coût de conception des équipements tout en recherchant des performances élevées.

A la lumière de cette succincte analyse bibliographique et dans le but de corriger les faiblesses des distillateurs solaires, on se propose d'examiner par voie expérimentale le rendement d'un distillateur solaire à deux configurations différentes couplé à des capteurs thermiques et d'étudier l'influence des différents paramètres sur l'efficacité du système afin de déterminer les conditions optimales du procédé de distillation solaire.

Nous tenterons une modélisation et simulation du système de distillation en 3D par un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis.

## CHAPITRE 2

### DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET METHODES DE MESURES

L'objectif de ce chapitre est de présenter le matériel et les méthodes utilisées au cours de notre étude.

Ainsi, dans un premier temps nous présentons les dispositifs expérimentaux. Les méthodes de caractérisation analytiques seront ensuite détaillées : il s'agira de décrire les appareils utilisés pour la détermination des paramètres caractéristiques de l'eau distillée, et pour finir nous présentons les caractéristiques physicochimiques des eaux utilisées pour le dessalement.

#### **2.1. Dispositifs expérimentaux**

Notre étude expérimentale a été réalisée à l'aide de deux distillateurs solaires à effet de serre d'une configuration rectangulaire et carrée (figure 2.1). Une nouvelle technologie de distillation par effet de serre avec un système de stockage d'énergie et de préchauffage de l'eau est développée pour dessaler les eaux de mer, l'eau saumâtre, et pour la déminéralisation des eaux usées. L'innovation réside dans l'incorporation de deux échangeurs de chaleur placés dans le bac à eau et dans la partie inférieure du distillateur permettant ainsi d'améliorer le rendement et de prolonger le fonctionnement du distillateur après le coucher du soleil et durant la nuit.

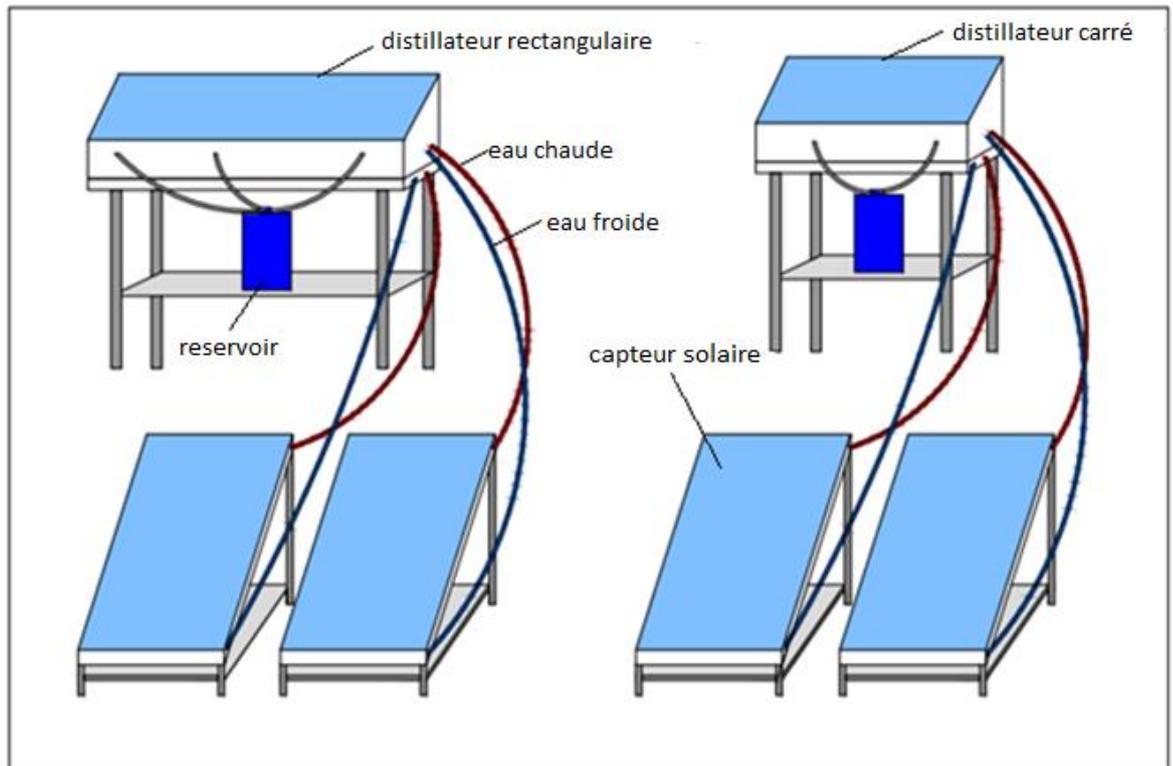
Le système de distillation réalisé se compose de deux parties : la première représente la chambre de distillation et la seconde la partie béton. Ces deux dernières sont reliées à deux sources de chaleur thermique produites par des capteurs solaires.

Le distillateur est fondé sur une dalle de béton armé de 7cm d'épaisseur construite pour des fins de stockage d'énergie, un échangeur de chaleur à serpentin en cuivre de 1,4 cm de diamètre a été incorporé dans cette dalle (figure 2.2), l'énergie thermique cédée par l'échangeur sera emmagasinée dans cette masse puis transférée par conduction et convection au bassin du distillateur. La partie supérieure réalisée en tôle galvanisée de 0,2 cm d'épaisseur comprend le bassin du distillateur. Ce dernier est un bac contenant deux orifices pour le remplissage et la vidange des eaux, peint avec une peinture noire afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire transmis à travers

le vitrage. Un échangeur de chaleur identique à celui incorporé dans la dalle a été intégré dans le bac pour accélérer le chauffage de l'eau.

Le distillateur est recouvert par un verre incliné de  $13^\circ$  traité thermiquement de 5mm d'épaisseur, orienté vers le sud.

Afin de réduire les pertes de chaleur vers l'extérieur, les parois latérales et la dalle sont isolées thermiquement par un isolant polystyrène de 2 cm d'épaisseur.



**Figure 2.1.** Schéma des dispositifs expérimentaux.

## 2.2. Conception du distillateur solaire

Le distillateur solaire utilisé dans notre expérience présente l'avantage d'être facile à construire et surtout à entretenir. Nos expériences ont été effectuées sur deux distillateurs de géométries différentes mais pour une même surface d'absorbeur  $1\text{m}^2$ .

### a) Distillateur carrée:

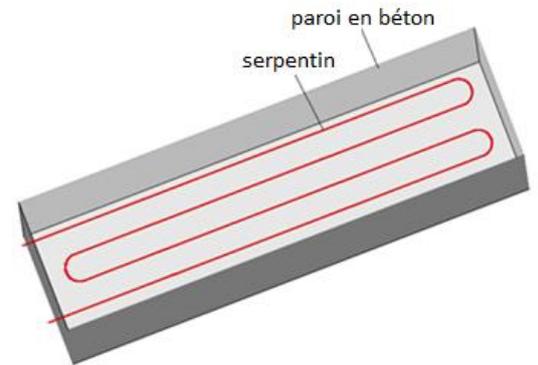
Les dimensions de ce distillateur sont 120 cm de longueur, 90 cm de largeur 41 cm de hauteur arrière et 20 cm de hauteur avant.

### b) Distillateur rectangulaire:

Les dimensions de ce distillateur sont 195 cm de longueur, 60 cm de largeur ,41 cm de hauteur arrière et 20 cm de hauteur avant.

### 2.3. Etapes de construction

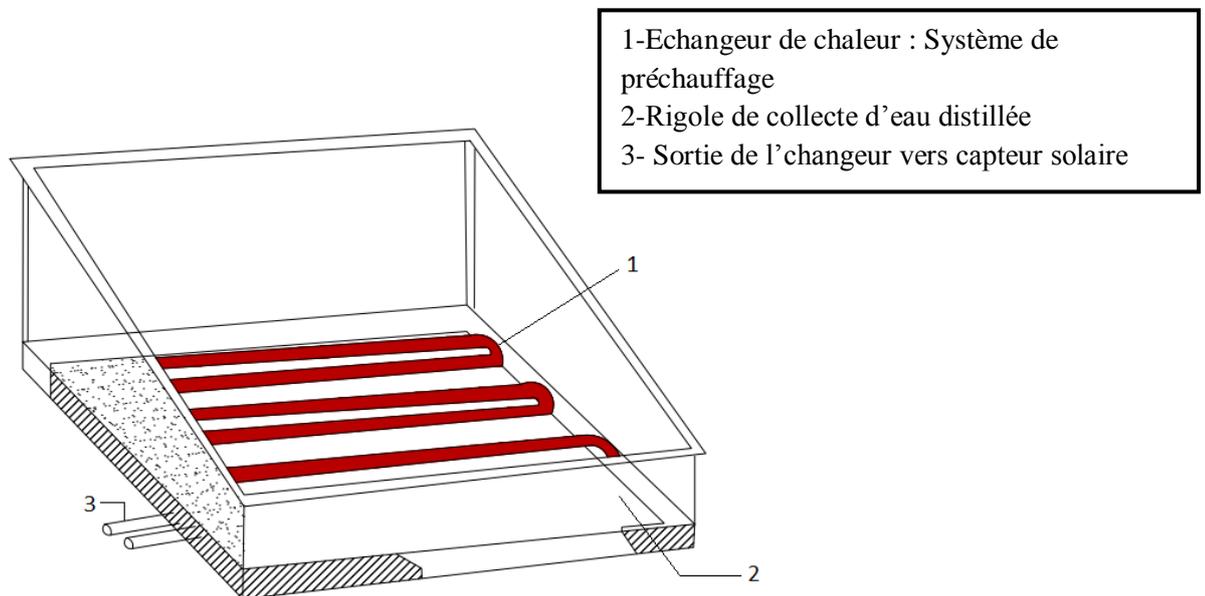
- Partie inférieure (dalle en béton)



**Figure 2.2.**Schéma de dalle en béton.

- Partie supérieure (chambre de distillation)

L'ensemble des parois latérales et le bassin du distillateur représentent ce qu'on appelle l'évaporateur ou la chambre de distillation.



**Figure 2.3.**Schéma de l'évaporateur.

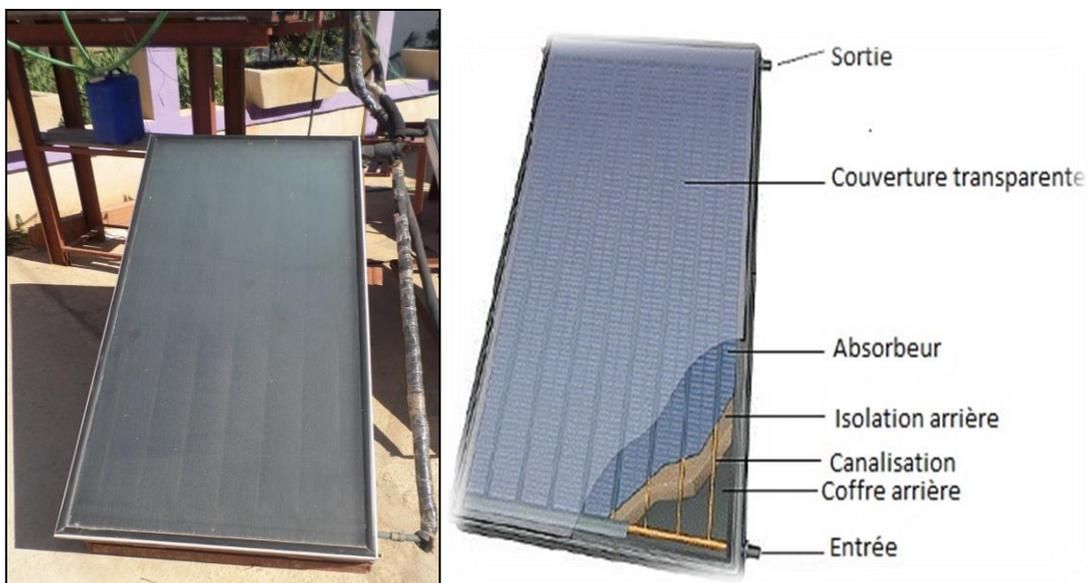
## 2.4. Source d'irradiation

### 2.4.1. Capteur solaire

Le capteur solaire est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur. Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire, ce dernier arrive au niveau de la couverture et la traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelée absorbeur. L'absorbeur absorbe ainsi une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé.

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré, la nature du fluide caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre.

Dans notre expérience nous avons utilisé un capteur solaire plan vitré à eau (figure 2.4) de 2 m de longueur et 1 m de largeur incliné de  $13^\circ$  par rapport au sol, ce dernier est constitué d'un ensemble de tubes assurant la circulation du fluide caloporteur (l'eau). Les deux distillateurs sont raccordés aux capteurs solaires par des tubes à circulation naturelle (thermosiphon).



**Figure 2.4:** vue en coup d'un capteur solaire plan à eau.

Le tableau 2.1 présente les caractéristiques du capteur solaire plan utilisé durant notre expérimentation :

**Tableau 2.1** : caractéristiques du capteur solaire plan a eau.

<b>Matériau de la grille d'absorbeur</b>	Cuivre
<b>Diamètre des tubes</b>	12 mm
<b>Nombre de tubes</b>	7
<b>Contenance en fluide caloporteur</b>	6,2 litres
<b>Nature de la couverture</b>	Vitre solaire trempé
<b>Epaisseur de la couverture</b>	4 mm



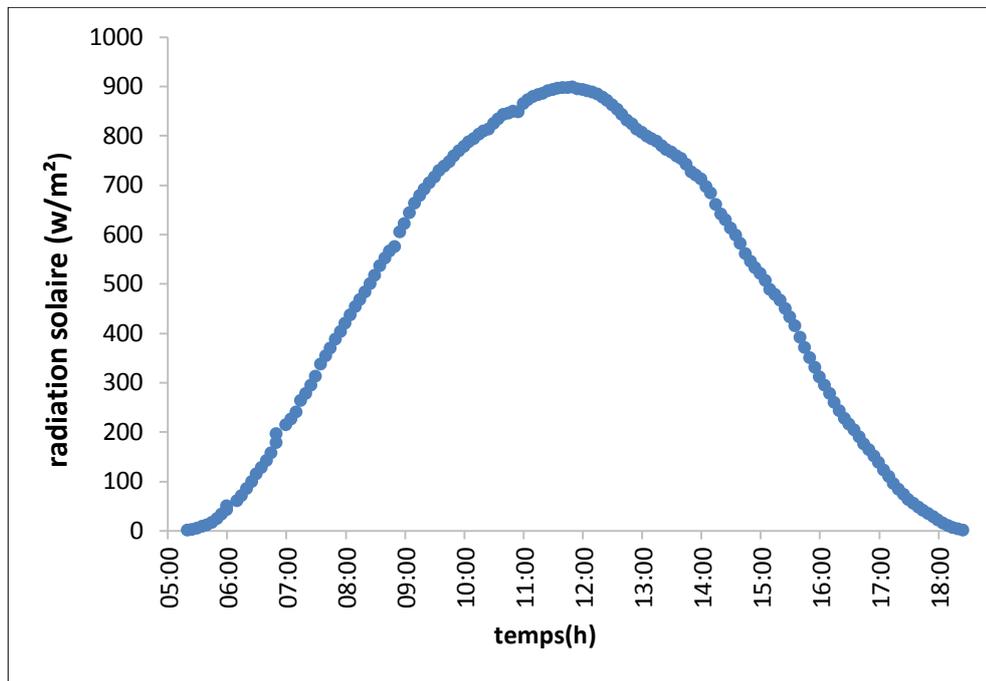
**Figure. 2.5** : Dispositifs expérimentaux couplé à des capteurs solaires plans.

#### **2.4.2. Rayonnement solaire**

Le flux solaire est mesuré à des intervalles de temps de 5 minutes, entre 9 heures et 16 heures (période d'expérimentation), en utilisant un pyranomètre (KIPP & ZONZN, CMP11) couplé à un logiciel d'acquisition de données. Il mesure le rayonnement solaire dans le spectre de la lumière visible de 400 à 1100 nanomètres (rayonnement global). Il permet de quantifier le rayonnement solaire en Watts / m<sup>2</sup> dans une plage allant de 0 à 1800 W/m<sup>2</sup>.

Les données de rayonnement ont été enregistrées dans la station météorologique existante au sein de l'unité de recherche UDES située à Bou-Ismaïl, plus précisément sur la façade nord-Algérien à 36°39' de latitude, 2°42' de Longitude et à environ 5 m d'altitude.

Un exemple d'un spectre solaire d'une journée typique bien ensoleillée est représenté sur la figure 2.6 .



**Figure 2.6:** Evolution temporelle du flux lumineux durant une journée ensoleillée à l'UDES

## **2.5. Méthode de mesures et d'analyses**

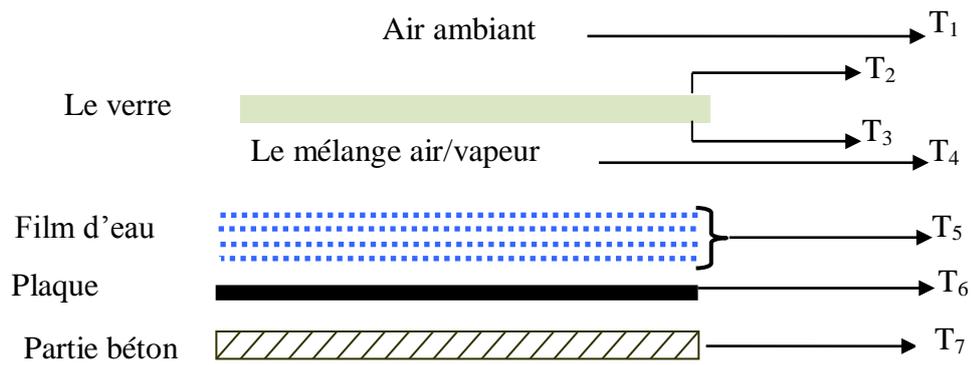
### **2.5.1. Mesure des caractérisations du distillat**

Les mesures de caractérisation de l'eau distillée (salinité, conductivité électrique, pH et TDS) ont été faites à l'aide d'un multi-paramètre de type Consort C5020.

### **2.5.2. Mesure de la température**

Les différentes températures sont mesurées durant un intervalle de temps de 5 minutes par des thermocouples de type K, connectés à un data Logger de type Fluke couplé à un logiciel d'acquisition de données (Hydra) qui sont enregistrées sur un ordinateur.

Les thermocouples sont fixés à des endroits spécifiques du distillateur comme suit :



**Figure 2.7:** L'emplacement des thermocouples.

a) Distillateur rectangulaire

Thermocouple	Emplacement	Symbole
1	Air ambiant	$T_{\text{air}}$
2	Face externe de la vitre	$T_{g_{\text{ext}}}$
3	Face interne de la vitre	$T_{g_{\text{int}}}$
4	Vapeur d'eau	$T_{V_{\text{eau}}}$
5	Film d'eau	$T_{\text{eau}}$
6	plaque inferieur du bac	$T_{\text{Bac}}$
7	Partie béton	$T_{\text{béton}}$

b) Distillateur carré

Thermocouple	Emplacement	Symbole
2	Face externe de la vitre	$T_{g_{\text{ext}}}$
6	plaque inferieur du bac	$T_{\text{Bac}}$
5	Film d'eau	$T_{\text{eau}}$

## 2.6. Caractéristiques physicochimiques des eaux utilisées pour le dessalement

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux utilisées pour la distillation sont données respectivement dans les tableaux 2.2 et 2.3 suivants. Ces mesures nous ont été fournies par les responsables de l'UDES :

**Tableau 2.2 :** Résultats des analyses physicochimiques de l'eau de Mer de Bou-Ismaïl et l'eau de puits de l'UDES.

<b>Paramètres</b>	<b>Eau de Mer Bou-Ismaïl</b>	<b>Eau de puits de l'UDES</b>
<b>pH</b>	7,91	7,40
<b>Salinité (g/l)</b>	35,0	1,00
<b>Turbidité (NTU)</b>	0,43	0,57
<b>MES (mg/l)</b>	6,40	1,20
<b>TDS (g/l)</b>	39,24	2,67
<b>Conductivité à 25°C (mS/cm)</b>	54,40	2,38
<b>Température (°C)</b>		in situ
<b>Aluminium (mg/l)</b>	0,00	0,00
<b>Ammonium (mg/l)</b>	0,00	0,01
<b>Dureté total (mg/1CaCO<sub>3</sub>)</b>	1000,00	1100,00
<b>Calcium (mg/l)</b>	400,80	240,48
<b>Magnesium (mg/l)</b>	96,91	121,21
<b>Bore (mg/l)</b>	4,20	/
<b>Chlorure (mg/l)</b>	23893,90	3118,44
<b>Fer (mg/l)</b>	0,00	0,03
<b>Manganèse (mg/l)</b>	0,236	0,072
<b>Sulfates (mg/l)</b>	4600,00	510,00

**Tableau 2.3 :** Résultats des analyses physicochimiques des eaux salines préparées

<b>Paramètres</b>			
<b>Salinité (g/l)</b>	5	15	25
<b>Température (°C)</b>	21	21	21
<b>Conductivité (ms/cm)</b>	11,90	25,60	40,80
<b>TDS (g/l)</b>	5,24	14,20	23,50
<b>pH</b>	7,30	7,53	7,74

## CHAPITRE 3

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

Après avoir décrit les dispositifs expérimentaux et les techniques de mesure, nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de cette étude. L'expérimentation est sous les conditions climatiques du site de l'UDES (Bou Ismail) durant la période mars, avril, mai 2016. Les journées des tests ont été relativement ensoleillées avec un ciel clair et de faibles nuages et parfois avec un vent moyen. Ces conditions climatiques ont conduit à une température moyenne de 23°C. Ces paramètres métrologiques ont une grande influence sur la production journalière d'eau distillée.

Afin d'optimiser le rendement du distillateur considéré (configuration carrée et configuration rectangulaire), nous nous sommes intéressés à l'effet de nombreux paramètres influençant le système de distillation à savoir :

- ❖ Effet de l'isolation des parois du distillateur ;
- ❖ Le volume d'eau à distiller ;
- ❖ La salinité ainsi que la température de la saumure ;
- ❖ L'irradiation solaire ;
- ❖ Le système de stockage et de préchauffage ;

### **3.1. Production**

#### **3.1.1. Effet de l'isolation des parois du distillateur**

L'isolation thermique des parois latérales de la chambre de distillation joue un rôle significatif et important. Elle permet de conserver et d'emmagasiner la chaleur thermique acquise et empêcher éventuellement les transferts de chaleur vers le milieu extérieur dans le but d'augmenter la température de l'eau dans le bac en évitant toutes pertes de chaleur. Afin de déterminer l'influence de cette dernière sur le rendement d'eau distillée, une série d'expérience a été effectuée pour différents volumes d'eau de puits (eau souterraine saumâtre) à dessaler sur une plage allant de 20 à 35 litres.

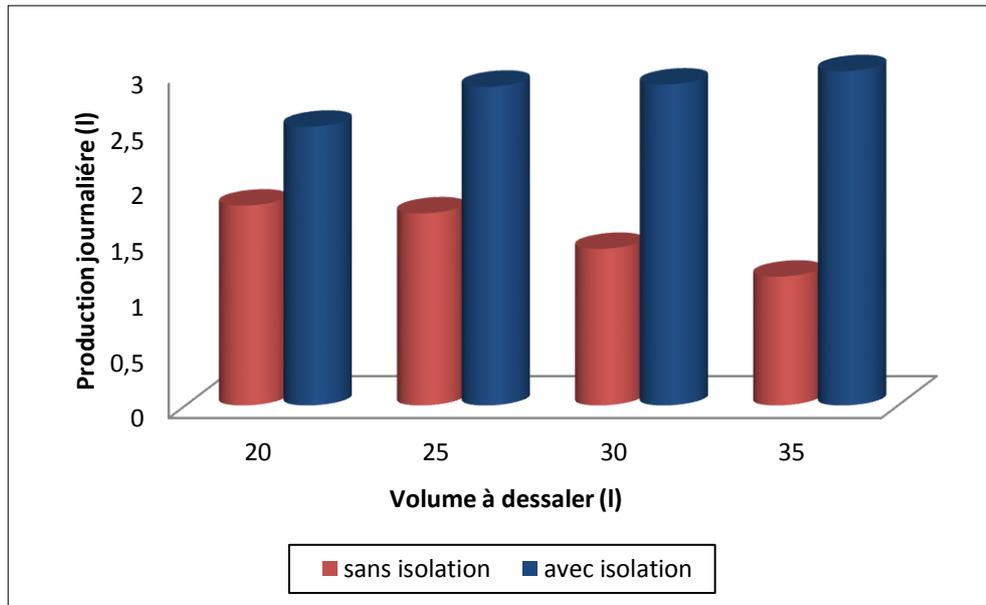
Le tableau 3.1 regroupe les résultats obtenus lors de cette étude.

**Tableau 3.1 :** Valeurs des rendements d'eau distillée obtenus par les deux configurations avec et sans isolat pour différents volume d'eau à dessaler

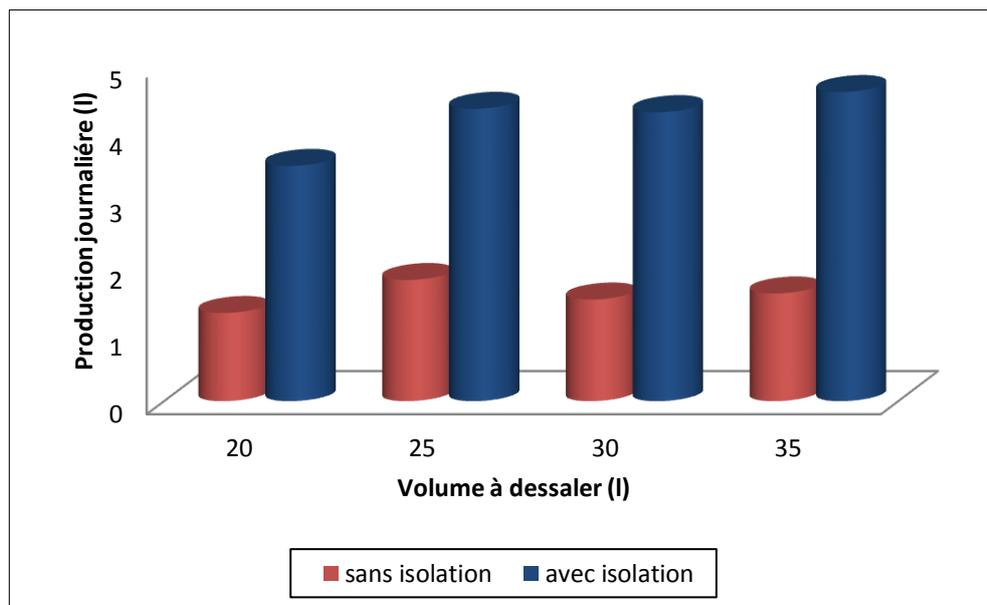
Volume (litre)	-	Rendement (litre)			
		Configuration sans isolation		Configuration avec isolation	
		Carrée	Rectangulaire	Carrée	Rectangulaire
20	Diurne	0,66	0,79	1,50	1,00
	Nocturne	0,65	1,00	2,00	1,40
25	Diurne	0,80	0,72	2,35	1,20
	Nocturne	1,00	1,00	2,00	1,66
30	Diurne	0,59	0,59	2,20	1,38
	Nocturne	0,88	0,81	2,10	1,50
35	Diurne	0,40	0,35	1,80	1,20
	Nocturne	1,20	0,80	2,80	1,80

D'après les résultats du tableau 3.1, il apparaît que le rendement des deux configurations sans isolation est très faible et quasi stable pour différents volumes d'eau à traiter. D'autre part, une augmentation relativement importante du rendement avec parois isolés a été enregistrée. Ce qui signifie qu'une quantité de chaleur assez importante a été perdue vers l'extérieur. Le tracé des courbes de rendement en fonction du volume à dessaler nous permettra de bien voir cette évolution.

Les courbes de la figure 3.1 et 3.2 montrent respectivement l'évolution de la production journalière totale (journalière et nocturne) pour différents volumes à dessaler dans la configuration rectangulaire et carrée avec et sans isolation. On remarque que la production journalière sans isolation obtenue par le distillateur rectangulaire diminue rapidement lorsque le volume d'eau augmente. Par contre, celle obtenue avec isolation augmente progressivement lorsque le volume accroît. Ces résultats montrent que l'isolation des parois affecte considérablement le rendement de distillation la production journalière augmente de plus de 50% et 60% respectivement pour la configuration rectangulaire et carrée. En effet, l'isolation des parois joue un rôle très important afin de minimiser les pertes thermique vers l'extérieur et d'accumuler la chaleur à l'intérieur du distillateur, d'augmentant ainsi la température de l'eau à dessaler et par conséquent la production.



**Figure 3.1:** Evolution de la production journalière en fonction du volume à dessaler, configuration rectangulaire avec et sans isolation.



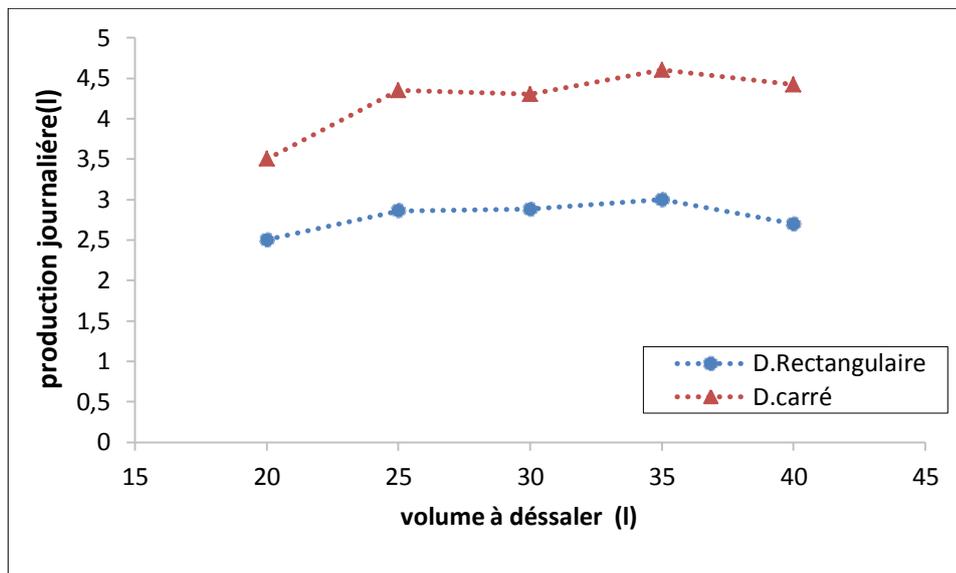
**Figure 3.2:** Evolution de la production journalière en fonction du volume à dessaler, configuration carrée avec et sans isolat.

### 3.1.2. Effet du volume d'eau à dessaler

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet du volume d'eau de puits à dessaler sur le rendement d'eau distillée pour les deux configurations avec isolation. Cette étude est illustrée par la figure 3.3. Nous observons que pour différents volumes, la production

journalière d'eau distillée est pratiquement constante. Une tendance à la baisse est observée pour un volume de 40 l et qui peut s'expliquer probablement par l'épaisseur de la masse d'eau à chauffer dans le bac qui ralentit le transfert de chaleur par conduction vers la surface de l'eau limitant ainsi l'évaporation et la condensation sur la surface intérieure de la vitre. Dans la suite de nos expérimentaux, nous nous limiterons donc à un volume à distiller de 35 litres.

De plus, Nous remarquons que la configuration carrée isolée est nettement plus favorable que la rectangulaire et ce pour la même surface de l'absorbteur.

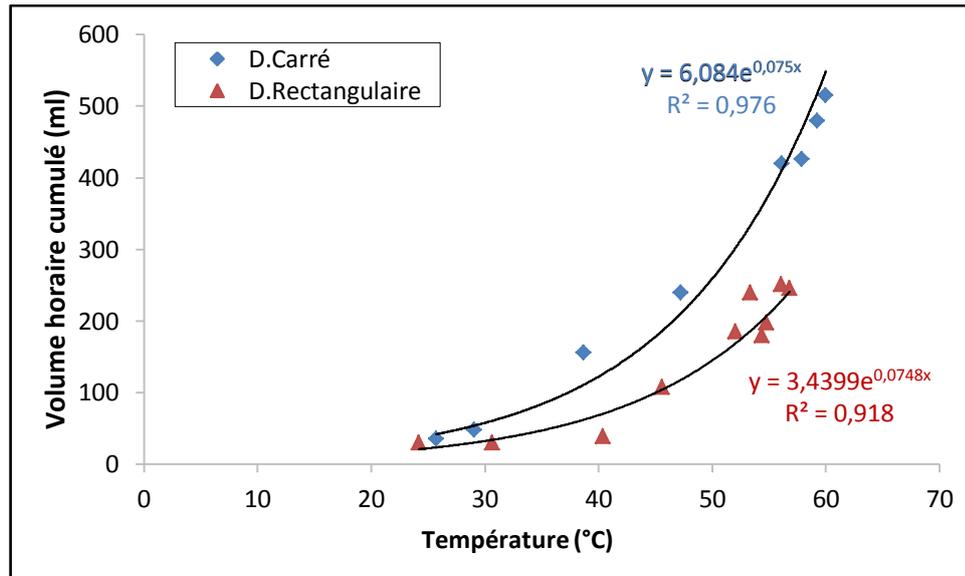


**Figure 3.3** : Evolution de la production journalière en fonction du volume à dessaler dans les deux géométries avec isolat.

### **3.1.3. Effet de température de la masse d'eau à dessaler**

Le but de cette étude est d'évaluer l'influence de la température de la masse d'eau à dessaler sur le rendement d'eau distillée. Afin de mieux comprendre l'anomalie de production entre les deux configurations des essais ont été effectués pour un volume fixe  $V=35$  l lors d'une journée bien ensoleillée.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau B.1 (appendice B) et illustrés dans la figure 3.4. Nous remarquons que le volume horaire d'eau cumulée distillée augmente avec la température de la masse d'eau à dessaler selon une loi exponentielle.



**Figure 3.4 :** Evolution du volume horaire cumulé d'eau distillée en fonction de la température de l'eau pour les deux géométries.

### 3.1.4. Effet de la salinité de l'eau à dessaler

L'étude de l'influence de la salinité de l'eau sur le rendement de distillation est réalisée en faisant varier la concentration initiale du sel dans un domaine allant de 5 à 35 g/l toute en maintenant un volume d'eau fixe de 35 litres.

Le tableau 3.2 regroupe les résultats obtenus lors de cette étude. Nous remarquons que pour les deux géométries, la production journalière augmente avec la salinité, ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par M.Bettahar et al [41] qui a démontré que le rendement augmente avec la salinité, en effet la capacité calorifique diminue avec l'augmentation de la salinité, l'eau salée se chauffe plus rapidement.

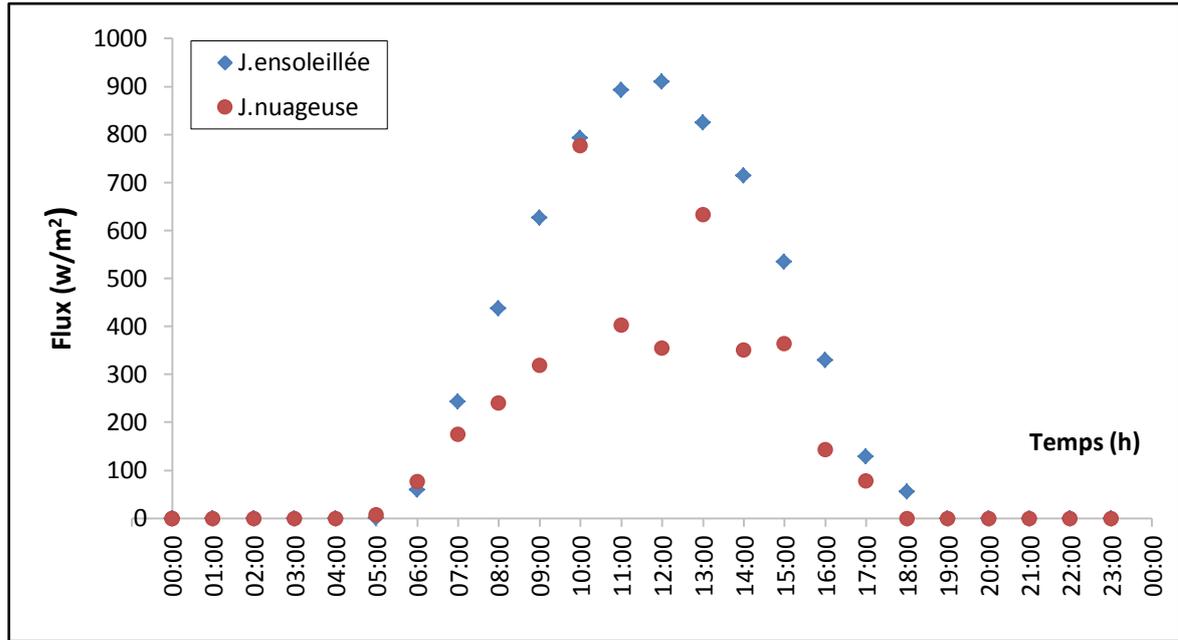
**Tableau 3.2 :** Valeurs des rendements d'eau distillée obtenus dans les deux configurations pour différentes salinités de l'eau à distillée

Production journalière (l)		
Salinité (g/l)	Configuration carrée	Configuration rectangulaire
5	3,725	3,000
15	4,000	3,700
25	4,900	4,000
35	5,500	4,500

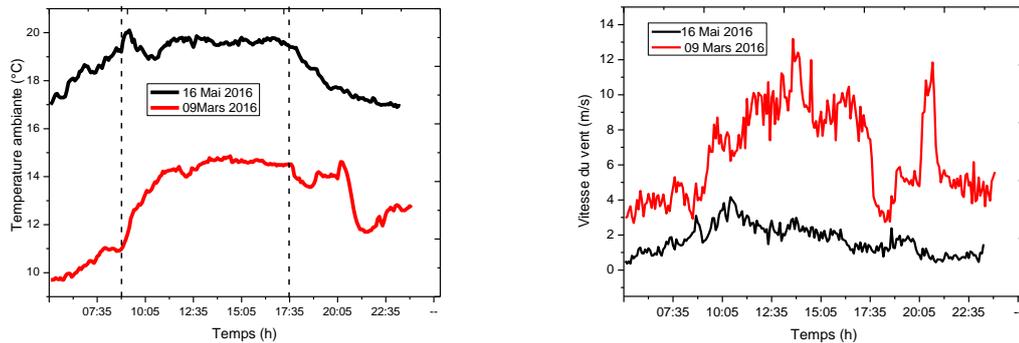
### **3.1.5. Effet de l'irradiation solaire**

L'irradiation solaire étant le paramètre le plus influant dans le procédé de distillation par énergie solaire. La figure 3.5 représente l'évolution temporelle de l'irradiation solaire pour deux journées différentes. Nous remarquons que les deux courbes ont une forme gaussienne et la valeur maximale de l'intensité de l'éclairement solaire est au voisinage de  $940 \text{ W/m}^2$ . Il est à noter qu'il y a une perturbation entre 9h et 15h concernant le rayonnement reçu pendant la journée nuageuse ce qui explique la diminution de l'éclairement solaire par le passage des nuages. Les observations montrent que le rayonnement solaire devient prépondérant et plus intense entre 10h et 14h. Par contre, on remarque que la température ambiante varie dans la gamme de  $T=09 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $T= 14 \text{ }^\circ\text{C}$  et de  $T=17 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $T= 20 \text{ }^\circ\text{C}$  respectivement (figure 3.6) Pour les deux cas, nous observons que la température ambiante augmente rapidement avec l'augmentation du rayonnement solaire (07h-13h) ensuite elle diminue sensiblement. Une différence de  $6^\circ\text{C}$  a été enregistré ce qui explique la différence obtenue en terme de production.

La variation horaire de la vitesse du vent des deux journées est présentée sur la figure 3.6 La vitesse du vent est un paramètre externe qui pourrait influencer considérablement le phénomène de condensation de la vapeur d'eau qui se refroidisse sur la surface extérieure du vitrage. Nous constatons que la journée ensoleillée était plus ventée (8-13m/s) De là on peut conclure que la production d'eau distillée dépend fortement de l'énergie solaire incidente et de la vitesse du vent.

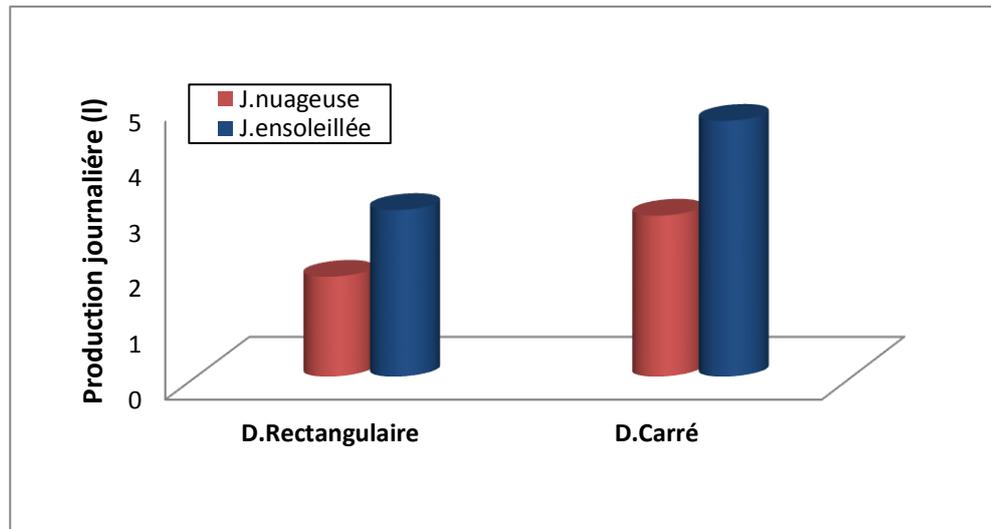


**Figure 3.5 :** Evolution temporelle du flux solaire.



**Figure.3.6 :** Variation de la température ambiante et la vitesse du vent en fonction du temps.

Des tests ont été réalisés afin de vérifier l'influence de l'intensité de l'irradiation solaire sur la production journalière d'eau distillée pour un volume fixe  $V=35l$  en utilisant l'eau de puits. Les résultats du test sont représentés dans la figure (3.7). Il apparaît d'après la figure que pendant les jours d'ensoleillement la production augmente de 40% et 37 % respectivement dans la configuration rectangulaire et carrée. On constate que le rayonnement solaire influe sur le fonctionnement du distillateur, l'augmentation de la puissance du rayonnement solaire augmente la température de l'absorbeur ce qui provoque l'évaporation et augmente la quantité d'eau distillée.



**Figure 3.7 :** Evolution de la production quotidienne d'eau distillée pour différents flux solaire.

### **3.1.6. Effet du système de préchauffage et de stockage**

Afin de mieux comprendre l'effet du système de préchauffage de l'eau à dessaler et de stockage d'énergie sur la production, une étude comparative a été réalisée, toujours sur un volume fixe de 35 litres pendant une semaine du mois de mai. Elle a consisté en l'étude des cas suivants :

#### **Etude de cas 1 : Performances des systèmes sans stockage d'énergie et sans préchauffage (effet de serre)**

Lors de ce 1<sup>er</sup> essai, le distillateur est monté seul sans capteurs solaires autrement dit, le système fonctionne par effet de serre sur le vitrage. Nous avons pu produire une quantité de 2,14 et 3,1 litres respectivement avec la configuration rectangulaire et carrée lors d'une journée du mois de mai. Cette quantité reste satisfaisante en comparant ces résultats avec ceux obtenus par **Velmuruga et al. [19]**. L'essai a été effectué avec de l'eau de puits.

#### **Etude de cas 2 : Performances des systèmes avec préchauffage solaire de l'eau**

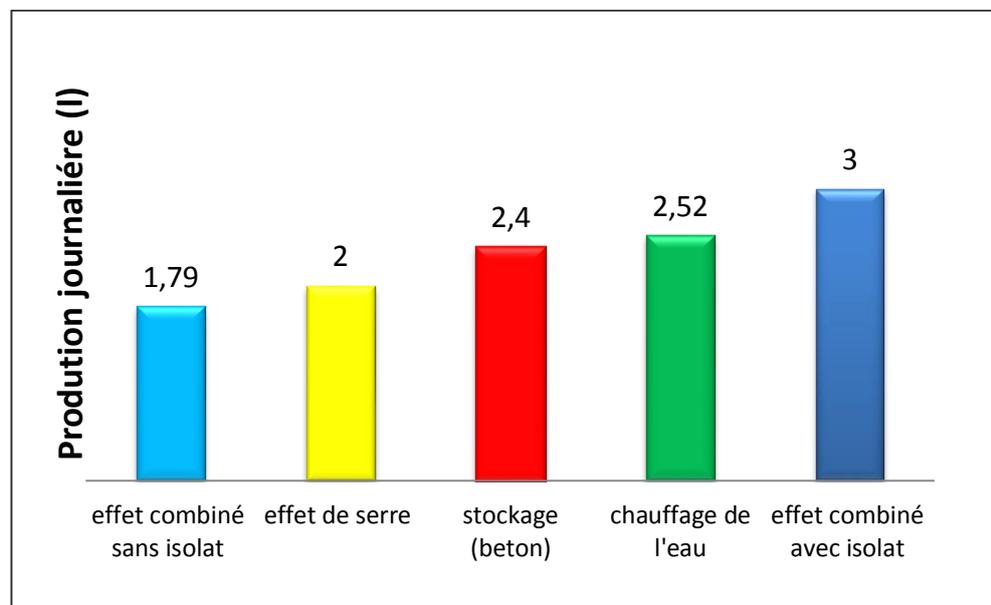
Dans cette partie nous avons gardé les mêmes conditions du premier essai et nous avons ajouté un seul capteur solaire plan connecté directement avec l'échangeur de chaleur placé dans le bac du système pour le chauffage de l'eau dans l'évaporateur. On remarque que le rendement d'eau distillée augmente de 20% et 15% respectivement pour la configuration rectangulaire et carrée. Nous constatons qu'une grande quantité du distillat

produite à l'aide de la chaleur thermique emmagasiné dans l'eau et l'évaporateur peut être récupérée pendant l'absence de l'éclairement solaire.

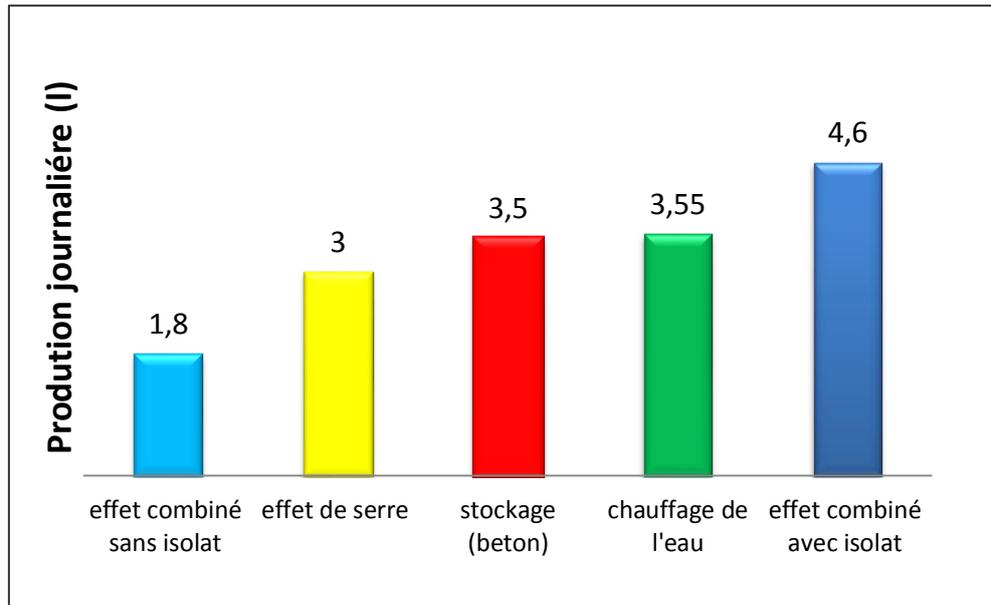
### Etude de cas 3 : Performances des systèmes avec stockage d'énergie dans le socle

Pour adopter une solution adéquate à l'amélioration de la production nocturne, nous avons intégré un capteur solaire plan dans la partie béton de l'équipement afin qu'on puisse stocker une bonne quantité d'énergie reçue pendant l'ensoleillement qui sera transmise par l'échangeur de chaleur vers le béton. Cette quantité de chaleur est utilisée comme source d'énergie thermique.

Dans ce qui suit, nous présentons des histogrammes comparatives pour les deux types de distillateur, carré et rectangulaire (figure 3.8 et 3.9) en présence de différentes sources d'énergie utilisées, à savoir, effet de serre, chauffage, stockage et effet combiné du chauffage de l'eau et de stockage d'énergie avec et sans isolation. A partir des histogrammes présentés ci-dessus, on remarque que la production journalière est plus considérable en utilisant un distillateur avec système de chauffage et de stockage d'énergie, cette dernière est relativement faible pour un distillateur sans isolation. Le rendement obtenu avec d'autres sources d'énergie utilisées indépendamment est moyennement acceptable.



**Figure 3.8:** Histogramme représentant la production journalière d'eau distillée en présence de différentes sources d'énergie, géométrie rectangulaire.



**Figure 3.9:** Histogramme représentant la production journalière d'eau distillée en présence de différentes sources d'énergie, géométrie carrée.

A titre comparatif, le tableau 3.3 illustre les taux de production obtenus par nos équipements avec isolation en présence de différentes sources d'énergie thermique. A partir de ces résultats et par comparaison avec ceux obtenus par **Velmuruga et al [19]** avec un distillateur solaire simple pour une même surface d'absorbance et pour des radiations solaire moyennes de l'ordre de  $545 \text{ W/m}^2$ , nous constatons que les modifications apportées ont permis d'augmenter le rendement de nos équipements, le rendement s'est amélioré de 30% et 50% respectivement dans la configuration rectangulaire et carrée.

**Tableau 3.3:** Effet des modifications sur le rendement du distillateur solaire.

Configuration	Distillateurs	Radiation solaire moyenne ( $\text{W/m}^2$ )	Taux de production ( $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{jour}$ )
<b>Carrée</b>	Avec stockage	560	3,50
	Avec chauffage	492	3,55
	Effet combiné	513	4,60
<b>Rectangulaire</b>	Avec stockage	560	2,40
	Avec chauffage	492	2,52
	Effet combiné	513	3,00

### 3.1.7. Effet du vitrage

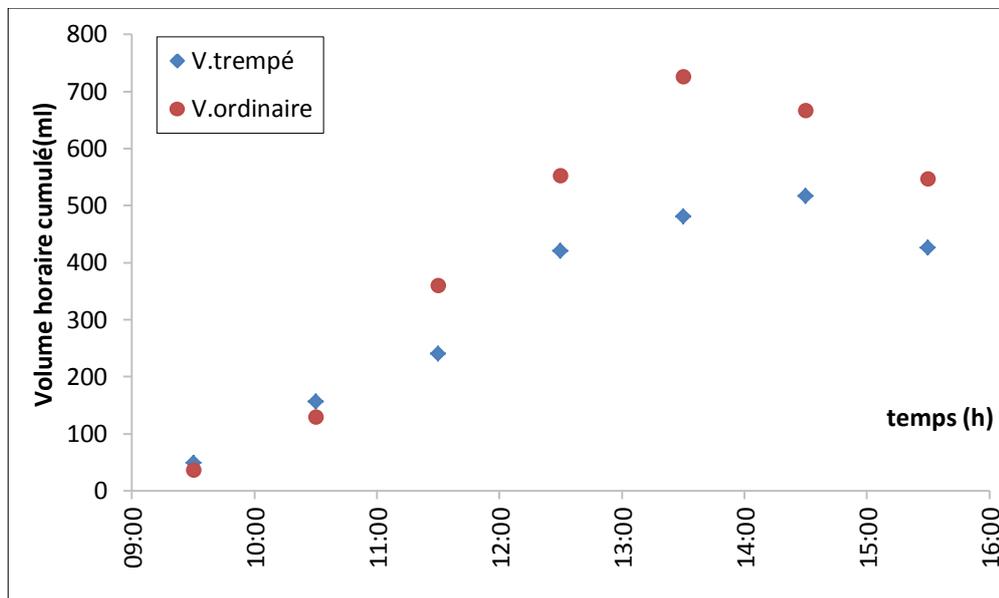
Dans le but d'améliorer le rendement du distillateur carré, nous avons étudié expérimentalement l'effet de la couverture en verre sur l'évolution du volume horaire cumulé.

La couverture intervient essentiellement par sa nature, sa mouillabilité par l'eau, son épaisseur et sa transparence au rayonnement solaire.

Les essais ont été effectués pour un volume fixe d'eau de puits de 35 litres, avec deux types de verre différents à savoir :

- ❖ Verre trempé, épaisseur 5mm
- ❖ Verre ordinaire, épaisseur 3mm

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 3.10. Les courbes montrent une augmentation considérable du volume horaire cumulé en utilisant un vitrage en verre ordinaire, la production s'élève d'environ 24% par rapport au verre trempé. De ces résultats nous pouvons conclure que la nature ainsi que l'épaisseur du verre affecte le passage de l'irradiation solaire.



**Figure 3.10:** Evolution du volume horaire cumulé, verre trempé et verre ordinaire.

### 3.1.8. Effet de matériau de stockage d'énergie (Eponge)

L'éponge est une matière organique très poreuse, qui résiste à la chaleur, et a une grande capacité thermique. L'utilisation de cubes en éponge dans un bac noirci permet d'augmenter sa capacité d'absorption aux rayons solaires d'une part, et créer un réservoir de stockage de l'énergie excédentaire d'autre part [17]. Afin de simuler cette réalité des tests ont été menés sur distillateur rectangulaire en plaçant des cubes en éponge dans le bassin, pour 02 volumes d'eau à dessaler (20 litres et 35 litres).

L'éponge utilisée dans notre expérience est une éponge commerciale, fabriquée à base de polystyrène, avec les dimensions suivantes :

- ❖ Longueur : 20 cm
- ❖ Largeur : 10 cm
- ❖ Epaisseur : 2,5 cm

Les courbes de la figure 3.11 représentent l'évolution du volume horaire cumulé pour la configuration rectangulaire avec et sans éponge. D'après ces courbes, il est clair qu'en présence d'éponge le rendement est meilleur. En effet, nous remarquons qu'avec un volume de 35 l la production journalière augmente de 45% par comparaison avec un volume de 20 l sans éponge.

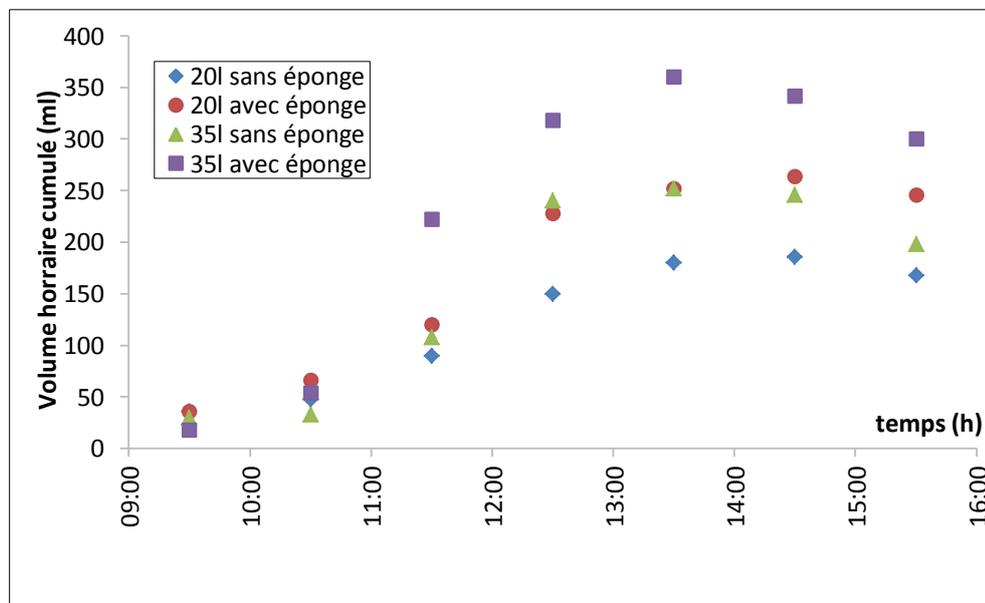
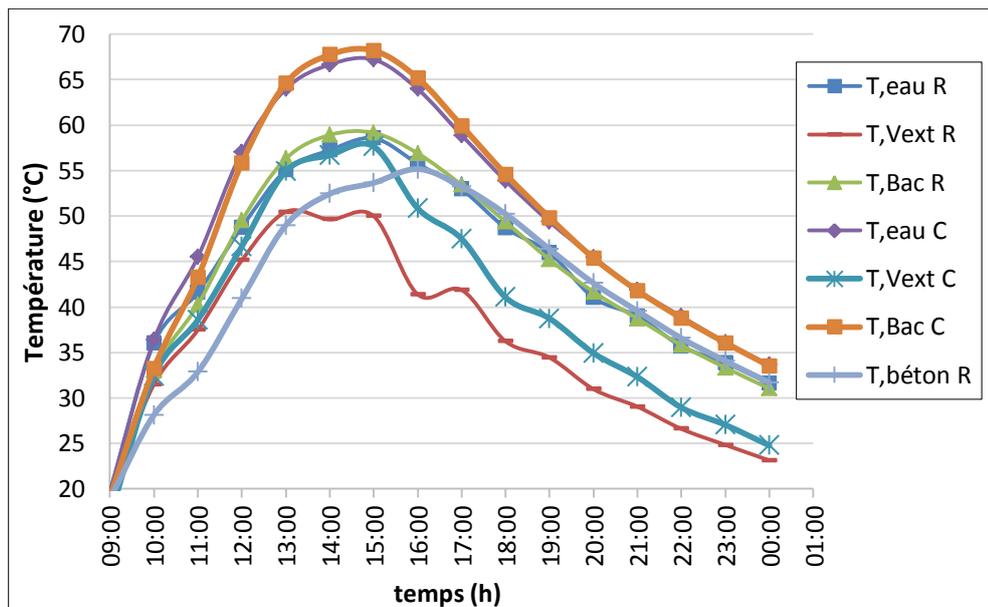


Figure 3.11 : Evolution du volume horaire cumulé, avec et sans éponge.

### 3.2. Evolution des températures en fonction du temps

La figure 3.12 décrit l'évolution des différentes températures en fonction du temps à savoir la température de l'eau  $T_{\text{eau}}$ , la température de la vitre extérieure  $T_{\text{vext}}$ , et la température de la plaque inférieure  $T_{\text{Bac}}$  obtenues lors de nos expériences en utilisant les deux systèmes sous les mêmes conditions climatiques. Nous remarquons que les températures augmentent proportionnellement avec le temps et atteignent une valeur maximale pour chaque élément considéré du distillateur, ensuite elles diminuent à partir de 15h. Les résultats des températures obtenus avec le distillateur carré sont plus favorables que celles enregistrées dans l'autre configuration. Nous avons enregistré un fort gradient de température entre la nappe d'eau et la vitre extérieure, ce qui favorise l'évaporation et la condensation. Ce gradient de température est très important pour une bonne production d'eau distillée.

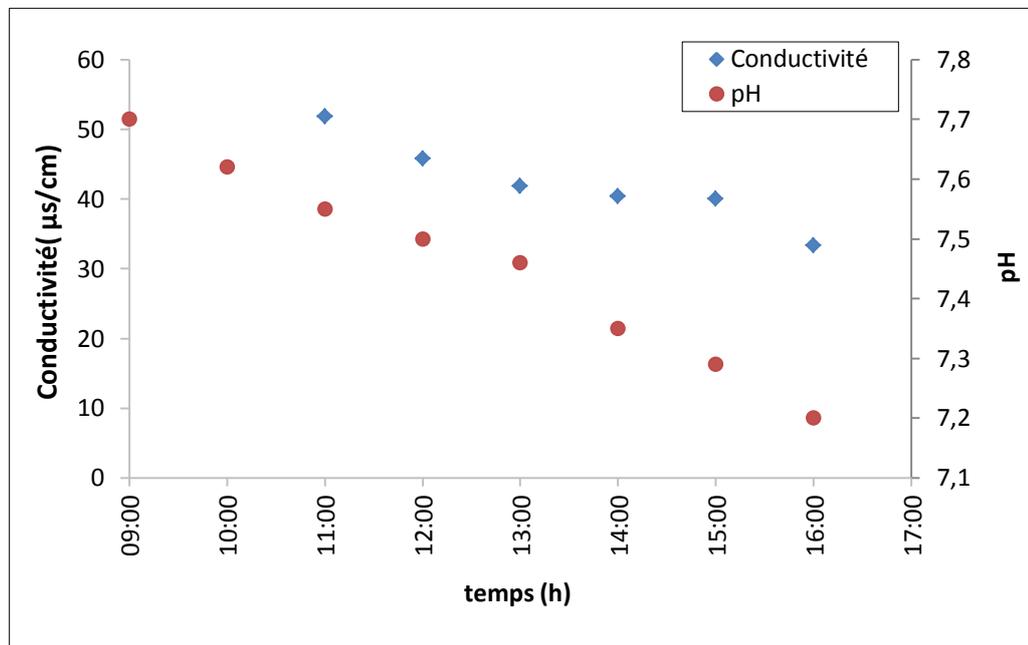


**Figure 3.12:** Variation de différentes températures en fonction du temps (14 Avril V=351).

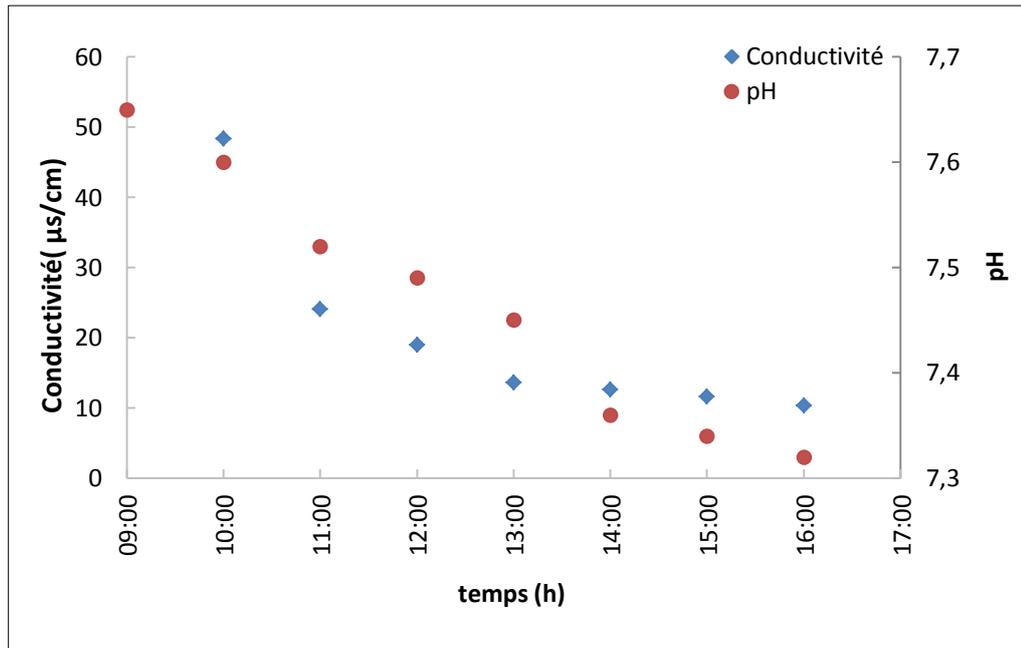
### 3.3. Variation des paramètres physico-chimiques

Les courbes de la figure 3.13 et 3.14 ci-dessous, représentent l'évolution temporelle des propriétés physico-chimiques de l'eau traitée après distillation à savoir le pH et la conductivité électrique de chaque distillateur.

Le pH, décrit la concentration des ions hydrogénés dans un liquide. Ceci détermine dans les termes chimiques si le liquide est un acide, neutre ou basique. L'eau pure a un pH neutre d'une valeur égale à 7,0. Les tests de ces paramètres physico-chimiques après la distillation montrent qu'il y a une diminution considérable de la conductivité électrique passant de 2.38 mS/cm à 10  $\mu$ S/cm (la norme < à 80  $\mu$ S/cm [42]), On remarque que la conductivité électrique diminue avec le temps, et que le pH reste quasi constant. L'analyse de ces résultats nous permet de constater que qualité de l'eau produite par distillation solaire conforme aux normes internationales de l'eau distillée, ces résultats sont bien satisfaisant en les comparants avec ceux obtenus avec un distillateur de laboratoire et osmose inverse (voir appendice C).



**Figure 3.13** : Variation temporelle de la conductivité et du pH de l'eau distillée géométrique rectangulaire.



**Figure 3.14 :** Variation temporelle de la conductivité et du pH de l'eau distillée géométrie carrée.

## CHAPITRE 4

### ETUDE NUMERIQUE

Tenant compte du développement des algorithmes avancés et des progrès récents en informatique, la simulation numérique est devenue un outil puissant pour analyser les problèmes difficiles liés au processus de distillation (évaporation-condensation). En modélisant correctement tous les processus et les mécanismes d'échange de chaleur et changement de phase qui interviennent dans la distillation, il est possible de prédire préalablement à toute expérimentation difficile et coûteuse, les conditions optimales de ce procédé.

Expérimentalement, le contrôle des paramètres permet de mener plusieurs études et essais sur le distillateur. En effet, certains de paramètres doivent être réguliers dans chaque étape du processus de distillation. Ces paramètres étant couplés, ce qui rend nécessaire l'établissement d'une méthode pour manœuvrer la distillation exigeant des mois d'essais. Tout changement dans la géométrie du distillateur ou dans les conditions opératoires rend la détermination d'une nouvelle procédure obligatoire. Faces à ces problèmes, la simulation numérique ouvre de nouvelles perspectives, que l'on peut citer comme suit :

- Une meilleure compréhension des échanges thermiques se produisant dans un distillateur et leur incidence sur le rendement du système.
- Une détermination qualitative et quantitative de la sensibilité des paramètres de changement de phase, offrant des bases solides pour une bonne production.
- Une aide à la conception de nouveaux distillateurs plus performants.

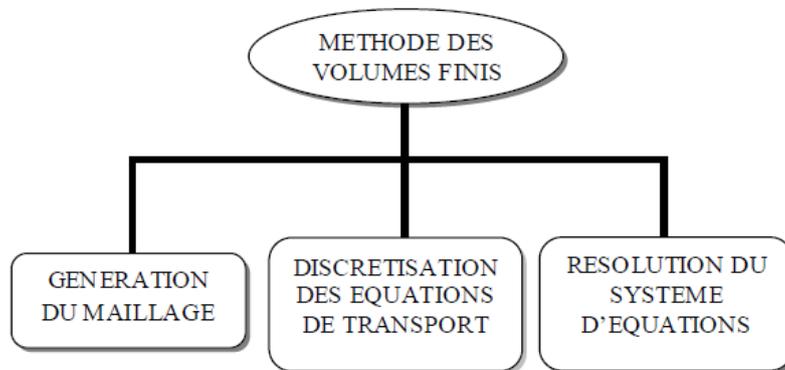
En fait, si un modèle numérique suffisamment précis et efficace pouvait être établi, il permettrait de piloter en temps réel une installation. La simulation numérique est un outil de développement et de perfectionnement de la conception des distillateurs. Confrontée aux expérimentations, elle permet une bonne maîtrise du processus de distillation par la prédiction de son déroulement optimal. Nos calculs numériques ont été effectués en utilisant le code de calcul Fluent qui est basé sur la méthode des volumes finis. Les résultats présentés dans ce chapitre sont obtenus pour un écoulement diphasique (Eau-Air) dans un distillateur à simple pente. Pour bien présenter notre travail, on a divisé ce chapitre en deux parties : La première partie présente la description du code de calcul Fluent et le

choix du solveur, la présentation de la méthode VOF et de la méthode de suivi d'interface Level-Set suivie des conditions aux limites et la deuxième partie illustre les résultats numériques obtenus.

#### **4 .1. Description du code de calcul**

Fluent est un code de simulation numérique conçu pour résoudre des problèmes complexes liés au transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement dans des géométries bidimensionnelles et tridimensionnelles complexes, valables pour les écoulements stationnaires ou instationnaires, laminaires, ou turbulents. Il est largement utilisé pour des applications industrielles dans divers domaines notamment l'aérodynamique, la combustion, la circulation sanguine, la fabrication des semi-conducteurs et les stations d'épuration. Il traite aussi les problèmes de convection naturelle, forcée, mixte et thermo-capillaires, avec ou sans changement de phase.

Le logiciel Fluent est basé sur la méthode des volumes finis qui s'articule autour de trois étapes principales schématisées sur la figure 4.1: la génération du maillage, la discrétisation des équations de transport basées sur le principe d'intégration des équations sur un volume de contrôle et enfin la résolution du système d'équations par différentes méthodes de résolution numériques directes et itératives.

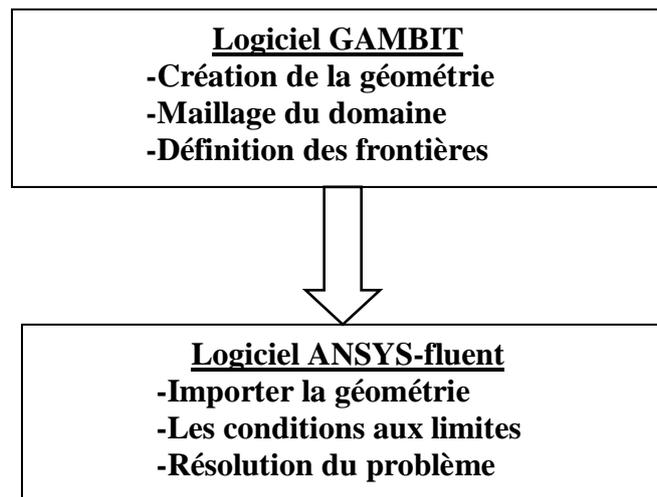


**Figure 4.1 :** Etapes utilisées dans la méthode des volumes finis.

La simulation numérique est réalisée sur les deux logiciels Gambit et ANSYS-fluent qui permettent de réaliser des simulations bidimensionnelles ou tridimensionnelles en mécanique des fluides allant de la construction du maillage sur Gambit à la résolution des équations de conservation de masse, de chaleur et de quantité de mouvement sur ANSYS-fluent et au traitement des résultats obtenus avec CFD post .

Ces logiciels ont déjà conquis l'industrie automobile, aéronautique et spatiale en raison des interfaces graphiques puissantes et des options disponibles, permettant de

réaliser des simulations quasiment sur tous types de géométries même les plus complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs et avec des modèles physiques variés (multiphasiques, turbulents, combustion, solidification ou fusion, etc). Pour résoudre les problèmes thermiques ou dynamiques en mécanique des fluides, par les logiciels ANSYS-fluent et Gambit, on doit d'une manière générale suivre les étapes montrées dans la figure 4.2.



**Figure 4.2** : Schéma des étapes utilisées dans la simulation par ANSYS-fluent.

#### **4 .1.1. GAMBIT (le Mailleur)**

GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des géométries et des maillages pouvant être exportés vers ANSYS-fluent. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré bi ou tri dimensionnel sur lequel seront résolues les équations de transport de quantité de mouvement de chaleur et de matière. GAMBIT regroupe deux fonctions : construction d'un maillage, définition des frontières (conditions aux limites).

##### a) Construction d'un maillage :

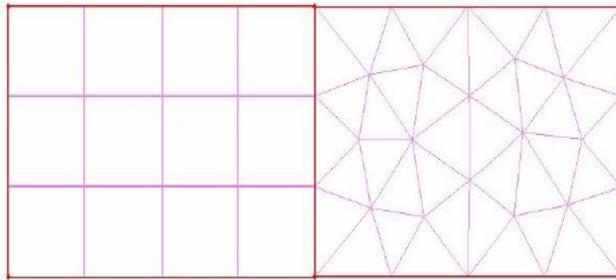
La réalisation d'un maillage se fait en deux étapes : la création de la géométrie (CAO) puis son maillage surfacique (2D) ou volumique (3D).

Les étapes à suivre pour la construction de la géométrie sont relativement simples :

- Mise en place des points nécessaires à la construction ; ceci concerne tous les points nécessaires aux segments, aux cercles, aux arcs, etc,
- Mise en place des segments du domaine à partir des points définis précédemment,

- Mise en place des faces à partir des segments,
- Mise en place des volumes à partir des faces.

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul, un maillage non structuré est souvent produit par une triangulation du domaine de calcul où les triangles produits sont de taille similaire.



**Figure 4.3:** Maillages structurés et non structurés.

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne **Qualité** des éléments ;
- Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient ;
- Assurer un bon **Lissage** dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier ;
- Minimiser le nombre **Total** des éléments (temps de calcul raisonnable) ;

b) Conditions aux limites :

Avant d'exporter un maillage vers ANSYS-fluent, il est possible de définir au préalable les conditions aux limites. Pour chacun des phénomènes de transport analysés, des conditions aux limites s'imposent. Les suivantes sont retenues :

Transport de quantité de mouvement :

- Vitesse imposée à l'entrée.
- Vitesse nulle au bord (condition de non glissement).

Transfert de chaleur :

- Température imposée à l'entrée.
- Une condition d'échange par convection pour les plaques.

Transfert de matière :

- Fraction massique de chaque espèce chimique imposée à l'entrée.
- Condition flux définie par la cinétique chimique dans le cas de réaction au bord.

#### **4.1.2. L'outil ANSYS-fluent**

ANSYS-fluent est un code de calcul qui permet de modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une facilité relative. Les types de mailles supportées sont :

- des mailles en 2D triangulaire/quadrilatérale,
- ou en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales,
- ou encore les mailles (hybrides) mélangées.

"Fluent" est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés, pour une exécution plus efficace. Ainsi, à titre non exhaustif, il a les capacités de modélisation suivantes [45]:

- Ecoulements 2D ou 3D,
- Etats permanents ou transitoires,
- Ecoulements incompressibles ou compressibles,
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents,
- Ecoulements Newtonien ou non,
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou radiatif,
- Les écoulements avec changements de phases,
- Ecoulements en milieu poreux.

Ce code de calcul CFD basé sur la méthode des volumes finis (VOF) permet la résolution simultanée des équations de transport de quantité de mouvement, de chaleur et de matière avec cinétique chimique.

Parmi les avantages majeurs de l'utilisation de code de CFD, la possibilité de tester plusieurs géométries et conceptions différentes. Pour un procédé donné, différentes conditions aux limites ainsi que les paramètres physiques de calcul peuvent être modifiés à des fins d'optimisation de conception. L'utilisation d'ANSYS-fluent s'effectue selon les étapes suivantes :

- Chargement du maillage exporté par GAMBIT,
- Création des espèces chimiques constituant le fluide,
- Introduction des conditions aux limites,
- Choix des paramètres de calcul,
- Initialisation des variables,
- Lancement du calcul.

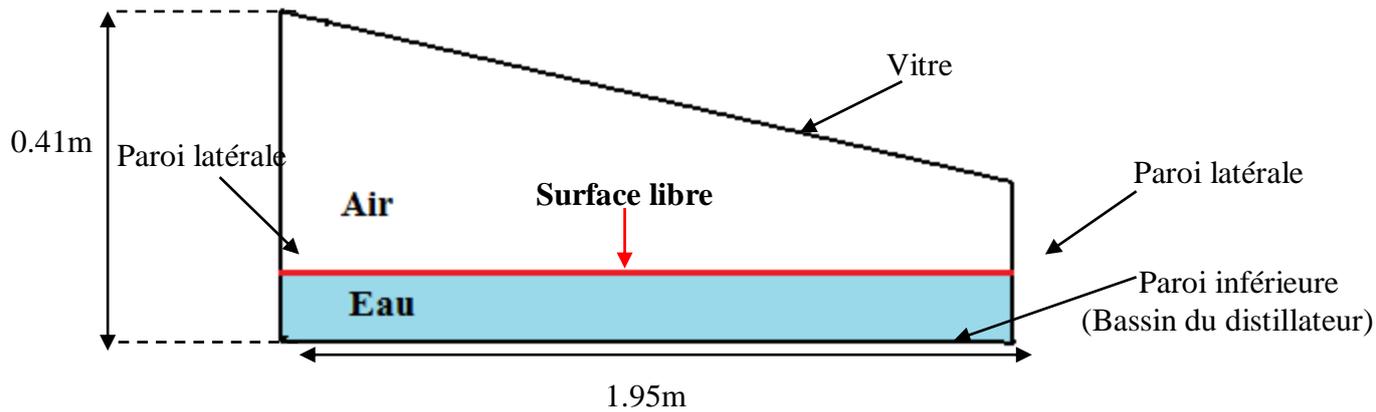
La convergence des résultats sont sauvegardés dans un fichier approprié.

#### **4.2. Formulation du problème et simulation sous fluent**

La performance du distillateur solaire dépend de plusieurs facteurs à savoir la profondeur de l'eau, le matériau de fabrication, la température de l'eau, le type de vitrage, l'angle d'inclinaison et l'isolation thermique. La simulation est adoptée pour analyser certains de ces facteurs et leurs influence sur le procédé de distillation qui se base sur le changement de phase afin d'améliorer le taux d'évaporation pour obtenir un rendement optimal. Les résultats présentés dans cette partie sont obtenus pour un écoulement diphasique (Eau-Air) dans une enceinte fermée appelée distillateur.

##### **4.2.1. Présentation du système**

Le système étudié dans notre travail (voir figure 4.4) est composé de deux fluides eau et mélange (air-vapeur d'eau) dans un distillateur de longueur de  $L=1,95$  m et de largeur  $l=0,6$ m et de hauteur  $h=0.41$ m, le bac est rempli de 35 litres de l'eau liquide, tandis que l'air occupe le reste du volume. Ces deux fluides sont séparés par une interface. Ainsi l'écoulement est modelé comme laminaire. Les deux fluides régissent le comportement des écoulements diphasiques. Le système d'équations qui mettent en évidence le comportement des fluides est fondé selon les lois physiques : de conservation de masse (continuité), de quantité de mouvement (Navier-Stokes), et d'énergie.



**Figure 4.4 :** Description de la géométrie du système.

#### 4.2.2. Hypothèses simplificatrices

Afin de faciliter la résolution de notre problème, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- ✓ L'eau liquide est incompressible et Newtonien
- ✓ Les propriétés physiques du liquide : conductivité thermique, coefficient de diffusion thermique et la viscosité cinématique sont supposées constantes.
- ✓ L'écoulement du fluide dans le distillateur est laminaire
- ✓ Le fluide satisfaisant l'hypothèse de Boussinesq ;
- ✓ Toutes les parois latérales sont adiabatiques.
- ✓ L'échangeur thermique est à une température constante.
- ✓ Pas de radiations solaires.

L'approximation de Boussinesq est utilisée dans le domaine des écoulements due à la gravité, autrement dit, la convection naturelle. Elle indique que les différences de la densité sont suffisamment petites pour être négligées sauf là où elles apparaissent en terme multipliés par  $g$  (accélérations de la pesanteur). Lorsqu'aucune force extérieure n'est présente, cette variation de la masse volumique est la seule cause du mouvement ; elle ne peut donc être négligée vis-à-vis des autres termes de l'équation.

Ce modèle traite la densité comme une valeur constante dans tous les termes des équations à résoudre, sauf le terme de la gravité dans l'équation de quantité de mouvement où elle suit une loi linéaire qui dépend uniquement de la température :

$$(\rho - \rho_0) \mathbf{g} \approx -\rho_0 \beta (T - T_f) \mathbf{g} \quad (1)$$

$\rho_0$  est la densité d'écoulement (constante),  $T_f$  la température de fusion,  $\beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  est le coefficient de dilatation thermique à pression constante.

Cette équation (1) est obtenue pour éliminer  $\rho$  du terme de la convection naturelle par l'utilisation de l'approximation de Boussinesq :

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) \quad (2)$$

La différence de température entre la paroi inférieure (bac) du distillateur ( $T_1$ ) et la vitre ( $T_2$ ) engendre une variation de la masse volumique de l'eau liquide et celui de l'air en même temps dans le bassin. Cet écart peut créer des forces de poussée qui guident le mouvement des fluides transportant ainsi leur changement de phase (évaporation-condensation). Il s'avère nécessaire de comprendre ce mécanisme afin d'évaluer son influence sur les champs thermique et dynamique. Pour ce faire, on fait varier le nombre de Grashoff (Gr) dont les variations sont effectuées à travers le coefficient de dilatation thermique  $\beta$ .

#### **4.2.3. Equations gouvernantes**

Les équations régissant la dynamique de l'écoulement et le transfert thermique dans le processus de la distillation sont issues des principes de conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie dans le bassin.

Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

Quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4.4)$$

Transfert de chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho * C_p} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (4.5)$$

Transfert de matière pour espèce i :

$$u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = D_i \left[ \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right] + R_i \quad (4.6)$$

Où  $R_i$ : production nette de l'espèce

L'estimation précise des coefficients de transfert de chaleur est une étape critique permettant de prédire les performances du distillateur solaire [26].

D'après R.V.Dunkle [26] le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la masse d'eau et la vitre  $h_{cw}$  est donné par la relation suivante :

$$h_{cw} = 0,884 \left[ T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273)}{268 \times 10^3 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.7)$$

Avec :

$$P_w = \exp \left( 25,317 - \frac{5144}{T_w + 273} \right) \quad (4.8)$$

$$P_g = \exp \left( 25,317 - \frac{5144}{T_g + 273} \right) \quad (4.9)$$

De plus, le coefficient de transfert de chaleur d'évaporation d'eau est calculé à partir de l'équation (4.10) :

$$h_{ew} = 16,273 \times 10^{-3} \cdot h_{cw} \cdot \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (4.10)$$

Afin de calculer le taux de production d'eau distillé, nous avons supposé que le taux d'évaporation de l'eau est égal au taux de production d'eau distillé :

$$\dot{m}_{ew} = \dot{m}_{pro} = \frac{\dot{q}_{ew} \cdot A_w \cdot t}{Lv} \quad (4.11)$$

Avec :

$$\dot{q}_{ew} = h_{ew} (T_w - T_g) \quad (4.12)$$

Et :

$$Lv = 2,493 \times 10^6 [1 - 9,4779 \times 10^{-4} T + 1,3132 \times 10^{-7} T^2 - 4,797410^{-9} T^3] \quad (4.13)$$

$$T = \frac{T_w + T_g}{2} \quad (4.14)$$

Le coefficient convectif  $h_{cw}$  peut également être calculé à partir du nombre adimensionnel Nusselt :

$$Nu = \frac{h_{cw} \cdot d}{k} = C'(Gr \cdot Pr)^n \quad (4.15)$$

D'où :

$$h_{cw} = \frac{k}{d} \cdot C'(Gr \cdot Pr)^n \quad (4.16)$$

Gr et Pr sont respectivement, le nombre de Grashoff et le nombre de Prandtl donnés par les expressions ci-dessous :

$$Gr = \frac{\beta g d^3 \rho^2 \Delta T}{\mu^2} \quad (4.17)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4.18)$$

En remplaçant  $h_{cw}$  de l'équation (4.16) dans l'équation (4.10) on obtient :

$$h_{ew} = 0,01623 \frac{k}{d} \cdot C'(Gr \cdot Pr)^n \cdot \left[ \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right] \quad (4.19)$$

Par la suite, par substitution de l'équation (4.19) dans l'équation (4.12), l'équation (4.11) deviendra :

$$\dot{m}_{ew} = \frac{0,01623}{Lv} \cdot \frac{k}{d} \cdot A_w \cdot t \cdot (P_w - P_g) \cdot C'(Gr \cdot Pr)^n \quad (4.20)$$

Et donc :

$$\frac{\dot{m}_{ew}}{R} = C'(Gr \cdot Pr)^n \quad (4.21)$$

Avec :

$$R = \frac{0,01623}{Lv} \cdot \frac{k}{d} \cdot A_w \cdot t \cdot (P_w - P_g) \quad (4.22)$$

En effet, la linéarisation de l'équation (3.21) permet d'évaluer la valeur des constantes  $C'$  et  $n$ , en prenant le logarithme des deux côtés de l'équation et en utilisant l'analyse de progression linéaire.

### **4.3 .Simulation numérique**

Pour la simulation du processus « Evaporation et Condensation » dans l'unité de distillation, le logiciel Fluent ANSYS 15.0 CFD est utilisé, ce dernier inclut le prétraitement, la résolution, post-traitement. Le prétraitement comprend la modélisation, l'application des conditions aux limites. Le solveur est basé sur la méthode des volumes finis incluant l'application des algorithmes de résolution.

#### **4.3.1. Simulation de l'évaporation et condensation dans la chambre de distillation**

Comme la chaleur est fournie au bassin du distillateur, l'eau dans le bac commence à s'évaporer en laissant derrière des contaminants, la vapeur produite augmente et se condense sur la vitre. Le Taux d'évaporation dépend du coefficient de transfert de chaleur par convection et par évaporation, si les coefficients sont grands la production finale est élevée. A cet effet, différentes températures de chauffage ont été imposées pour un angle d'inclinaison du vitrage ou la condensation se fait est fixe 13° est. Fluent est utilisé pour simuler les phénomènes d'évaporation et de condensation dans un distillateur solaire en utilisant la méthode VOF (Volume of fluid) qui a des bonnes capacités pour simuler la distribution de température dans le système.

##### **4.3.1.1. Méthode VOF (Volume Of Fluid):**

La méthode VOF est une méthode qui a été introduite par Hirt & Coll en 1981 C'est la première méthode de suivi d'interface utilisant le concept de transport d'un champ scalaire qui ait été développée. VOF est spécialement conçue pour la simulation d'écoulements diphasique. Elle est basé sur le principe de conservation de masse et pouvant modéliser deux ou plusieurs fluides non miscibles résolvant un seul ensemble d'équations de mouvement et de suivi la fraction volumique de chacun des fluides dans le domaine.

L'idée fondatrice de la méthode VOF est d'utiliser une fonction discrète qui représente dans chaque cellule la fraction volumique de l'eau liquide par rapport au volume total de la cellule. Les cellules liquides et gazeuses sont définies respectivement par  $X_i = 1$  et  $X_i = 0$ , et l'interface liquide-gaz est représentée dans une cellule mixte par une valeur de  $C_i$  comprise strictement entre 0 et 1 (voir Figure 4.5).

0,95	0,8	0,3	0	0
1	1	1	0,6	0
1	1	1	1	0,3
1	1	1	1	0,8
1	1	1	1	0,95

**Figure 4.5 :** Taux de présence en fluide bleu dans les volumes de contrôle.

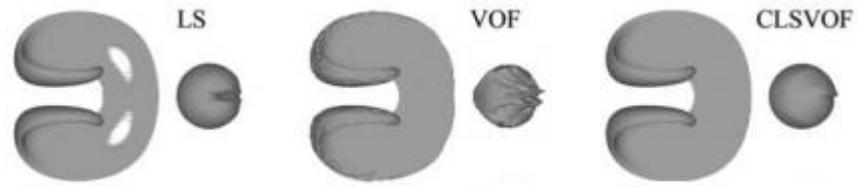
Les caractéristiques physiques du fluide, la masse volumique et la viscosité dynamique, se déduisent alors de ces variables par les relations 4.23. Une simplification dans le cas de simulation bi-fluide est possible en reliant les deux fractions de volume  $X_1$  et  $X_2$  par la relation 4.24.

$$\begin{cases} \rho = \sum X_i \rho_i \\ \mu = \sum X_i \mu_i \end{cases} \dots\dots\dots(4.23)$$

$$X_2 = (1 - X_1) \dots\dots\dots(4.24)$$

#### **4.3.1.2. Méthode couplée ‘ Level-Set et VOF’**

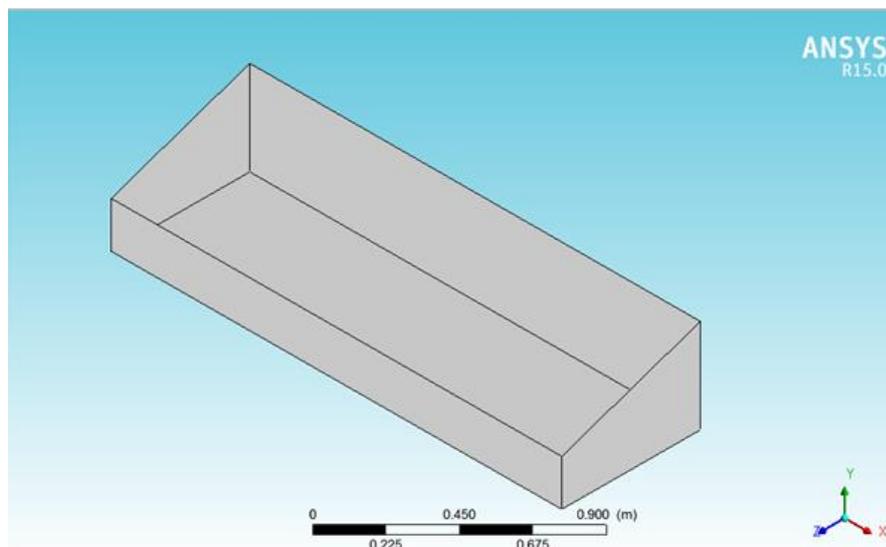
Le principe de la méthode Level Set est de définir une fonction interface dans le domaine de calcul dont la courbe de niveau zéro est l'interface que l'on cherche à décrire. La résolution d'une équation de convection permet alors de prédire les mouvements de l'interface dans un champ de vitesse donné. Ceci est similaire à la méthode de suivi d'interface VOF. La fonction level-set est lisse et continue, ses gradients spatiaux peuvent être calculés avec précision. Ceci à son tour produit des estimations précises de la courbure de l'interface et de la force de tension superficielle provoquée par la courbure. Cependant, la méthode des lignes de niveaux se révèle avoir une déficience en préservant la conservation du volume. D'autre part, la méthode VOF est naturellement le volume conservé, car elle calcule et surveille la fraction volumique d'une phase particulière dans chaque cellule, au lieu de l'interface elle-même. La faiblesse de la méthode VOF réside dans le calcul des dérivées spatiales, étant donné que la fonction VOF (la fraction volumique d'une phase particulière) est discontinue à travers l'interface. . La figure 4.6 qui suit schématise les 03 méthodes de suivi de l'interface.



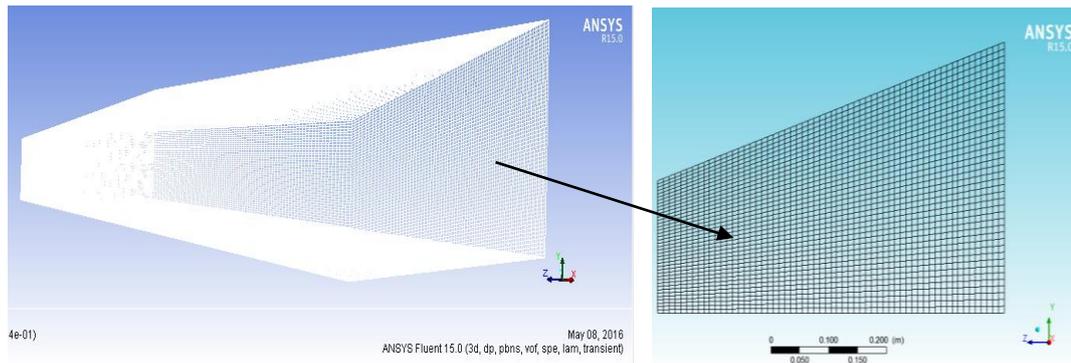
**Figure 4.6 :** Comparaison de trois méthodes de suivi de l'interface.

#### **4.3.2. La méthodologie**

La géométrie et le maillage du distillateur est créé par Gambit en 3D, les mailles utilisés sont structurées de type quadratique, les conditions aux limites sont faites. Un test indépendant du maillage a été effectué pour assurer que les résultats obtenus sont exacts et fiables, le fichier de maillage de distillateur 3D est enregistré sur le répertoire de travail et importé directement sur le logiciel de Fluent. La géométrie et le maillage sont représentés sur les figures 4.7 et 4.8.



**Figure 4.7 :** Géométrie de distillateur en 3D.



**Figure 4.8 :** Maillage structuré de distillateur 3D.

Le tableau 4.1 donne les statistiques du maillage du distillateur.

**Tableau 4.1 :** statistique des mailles.

Domaine	Nœuds	Cellules
Distillateur à simple pente 13°	477691	456000

#### **4.3.3. Les étapes de simulation**

La géométrie du distillateur est importée sur ANSYS-fluent, pour définir les conditions aux limites afin de résoudre l'équation de continuité, de mouvement et d'énergie. La méthode VOF couplée avec LEVEL SET est choisi dans notre cas de calcul à deux phases (eau et mélange air-vapeur d'eau) avec l'approximation de boussinesq, l'équation d'énergie est activée, le phénomène de distillation sous une pression atmosphérique est modélisé comme laminaire à quasi stable. Toutes les autres parois sont supposés adiabatiques, aucune condition aux limites n'est spécifiée pour les deux phases. Le tableau 4.2 résume les conditions aux limites.

**Tableau 4.2 :** Conditions aux limites.

Emplacement	Type de frontière	Conditions aux limites
Vitre	paroi	Température 18°C
Plaque inferieure	paroi	Température 60°C
Parois latérales	paroi	Adiabatique

#### 4.3.4. Paramètres physico-chimiques des fluides

Avant d'effectuer la simulation, il est nécessaire d'introduire les caractéristiques physico-chimiques des fluides utilisés.

Les propriétés physiques et thermiques de l'eau, de la vapeur d'eau et de l'air retenues dans nos calculs sont : la masse volumique ( $\rho$ ), la conductivité thermique ( $\lambda$ ), la chaleur spécifique ( $Cp$ ), viscosité dynamique ( $\mu$ ) et le coefficient d'expansion ( $\beta$ ) ont été tirées de la base de donnée de Fluent. Ces grandeurs sont regroupées dans les tableaux (4.3 , 4.4 et 4.5) suivants :

**Tableau 4.3 :** Paramètres physico-chimiques de l'eau.

Paramètres	Valeurs
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	998,2
La masse moléculaire (k/kmol)	18,0152
Chaleur spécifique (J/kg.K)	4182
Viscosité dynamique (kg/m.s)	0,001003
Conductivité thermique (w/m.K)	0,6
Coefficient d'expansion (K <sup>-1</sup> )	0,000151

**Tableau 4.4 :** Paramètres physico-chimiques de l'air.

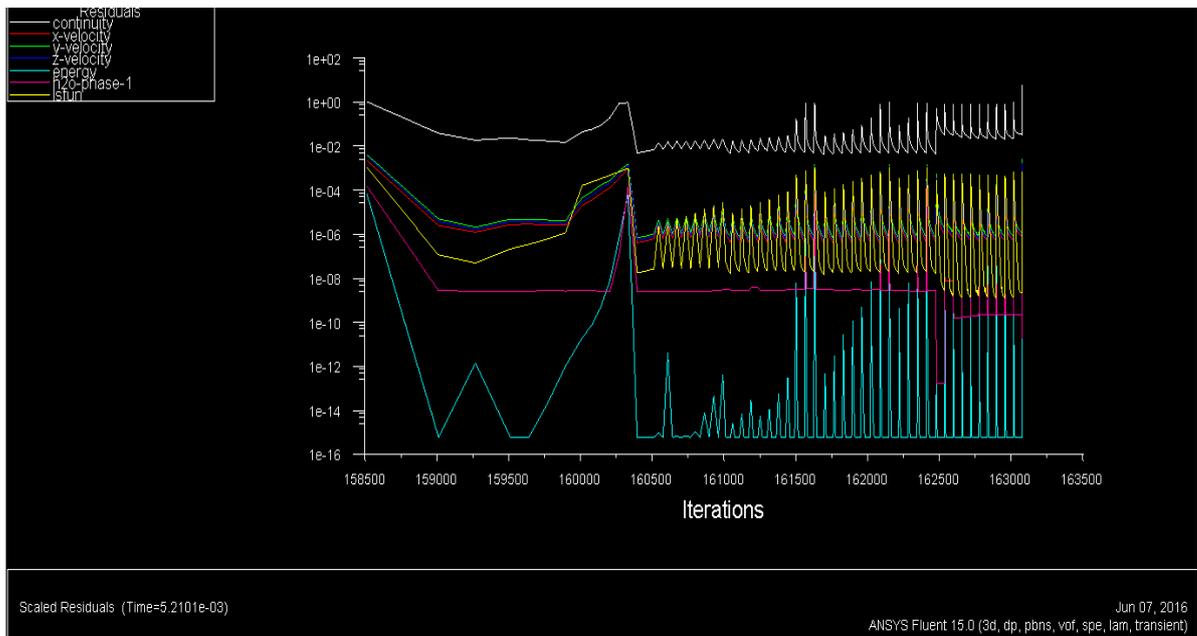
Paramètres	Valeurs
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1,225
La masse moléculaire (kg/Kmol)	28,966
Chaleur spécifique (J/kg.k)	1006,43
Viscosité dynamique (k/m.s)	0,00001789
Conductivité thermique (w/m.k)	0,0242
Coefficient d'expansion (K <sup>-1</sup> )	0,00343

**Tableau 4.5 :** Paramètres physico-chimiques de la vapeur d'eau en fonction de la température (en Celsius) [26].

Paramètres	Valeurs
Chaleur spécifique (J/kg.k)	$C_p=999,2+0,1434.T_v+1,101\times 10^{-4}.T_v^2-6,7581\times 10^{-8}$
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho =353,44/(T_v+273,15)$
Conductivité thermique (W/m.k)	$\lambda +0,0244+0,7673\times 10^{-4}.T_v$
Viscosité dynamique (k/m.s)	$\mu =1,718\times 10^{-5}+4,620\times 10^{-8}.T_v$
Coefficient d'expansion (K <sup>-1</sup> )	$\beta =1/ (T_v+273,15)$

#### 4.4. CFD POST

L'algorithme PISO est utilisé pour le couplage pression-vitesse et le schéma PRESTO (PREssure STaggering Option) est employé pour faire l'interpolation de la pression. La convergence est obtenue en contrôlant les résidus des équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie. L'étude de la dépendance des résultats en fonction des résidus montre que les valeurs optimales sont estimées à l'ordre de  $10^{-3}$ . La figure 4.9 montre l'évolution des résidus de calcul. Nous avons utilisé CFD Post-processeur pour fournir les résultats des contours et les diagrammes de distribution de température, fraction massique, pression et d'autres grandeurs du fluide.



**Figure 4.9:** Evolution des résidus de calcul (encours).

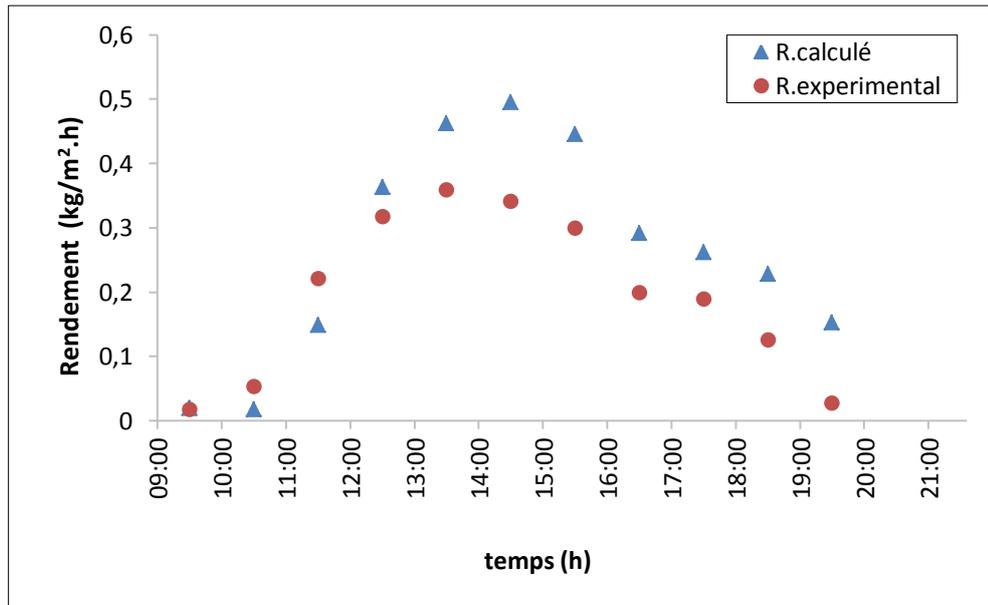
## **4.5. Résultats numériques et discussions**

### **4.5.1. Production**

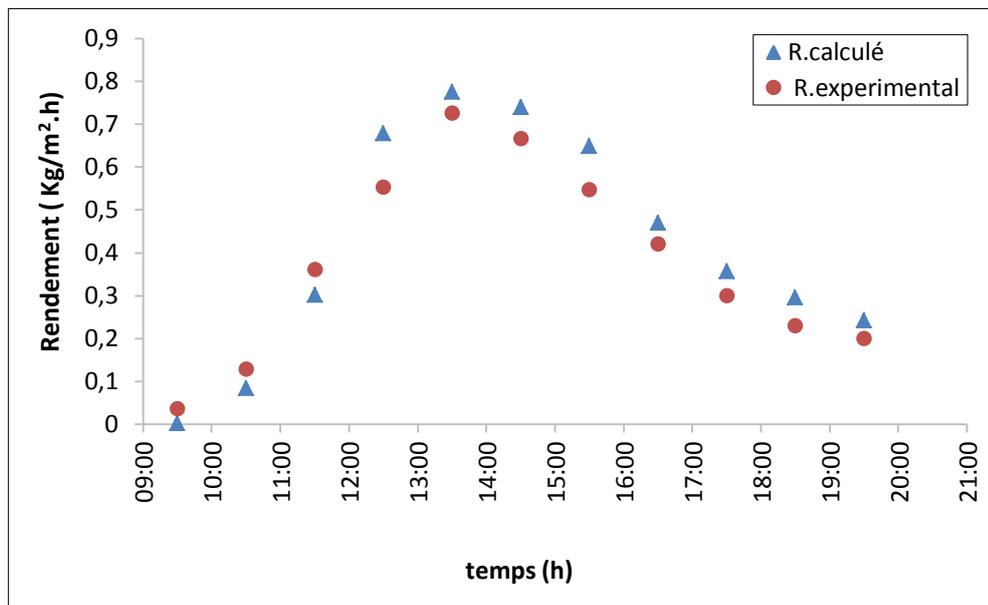
Dans le but d'évaluer l'efficacité de nos systèmes, une analyse comparative des résultats expérimentaux et théoriques a été élaborée. Dans cette partie le rendement temporel des deux distillateurs a été calculé à partir de l'équation (4.11) et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau D.1 et D.2 (voir appendice D). Les figures 4.10 et 4.11 représentent la variation temporelle du rendement expérimental et calculé des deux distillateurs dans les meilleures conditions déterminées dans le chapitre 3 :

- ❖ Volume à dessaler  $V=35$  l
- ❖ Distillateur rectangulaire avec éponge
- ❖ Distillateur carré, verre ordinaire
- ❖ Effet combiné du stockage d'énergie et chauffage de l'eau

D'après les résultats obtenus, on remarque que le rendement dans les deux cas augmente au cours du temps lorsque la température de l'évaporateur est augmentée dont la température de la surface de condensation est beaucoup plus basse que celle de l'eau, cet écart de température ( $\Delta T$ ) favorise la condensation et par conséquent améliore le rendement du système. A titre comparatif, l'évolution du rendement calculé suit la même allure que celui trouvé expérimentalement mais une différence importante est enregistrée sur le rendement dans le cas de la configuration rectangulaire, estimée à 26%. Par ailleurs, pour la configuration carrée le rendement est estimé à 8%. De manière générale, les résultats du rendement calculés sont en bon accord avec ceux obtenus par voie expérimentale.



**Figure 4.10** : Evolution temporelle du rendement d'eau distillée, configuration rectangulaire.



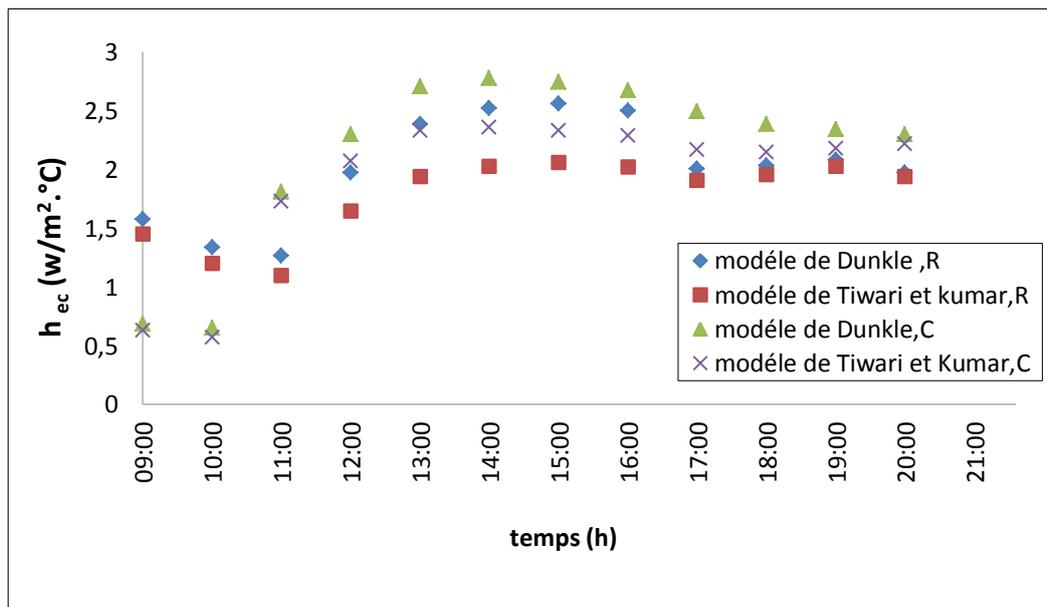
**Figure 4.11** : Evolution temporelle du rendement d'eau distillée, configuration carrée.

#### 4.5.2. Coefficient de transfert de chaleur

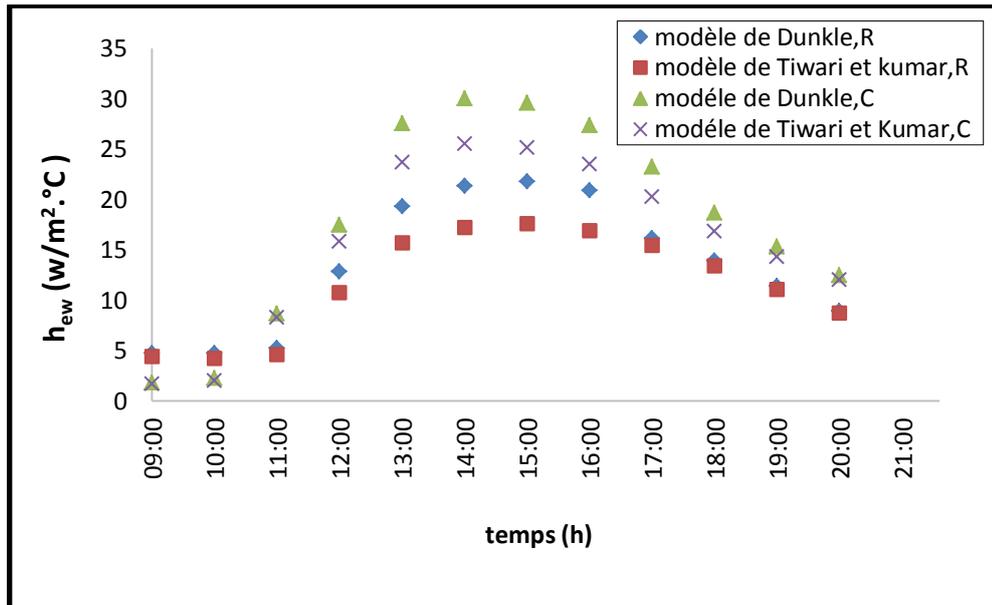
Nous avons calculé les coefficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation en utilisant les équations citées ci-dessus et la résolution de ces équations permet d'obtenir les valeurs des constantes  $C'$  et  $n$ . A partir des données expérimentales et

pour un angle d'inclinaison  $13^\circ$ , les valeurs de C et n sont respectivement 0,35 et 0,03 pour le distillateur rectangulaire, 0,37 et 0,037 pour le distillateur carré.

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux D.1 et D.2 (voir appendice D) et les différentes courbes sont tracées sur les figures 4.12 et 4.13. Elles montrent l'évolution horaire des coefficients de transfert thermique par convection et par évaporation calculés respectivement à partir des corrélations de **Dunkle et Kumar-Tiwari** [26] dans les deux systèmes. Une différence relativement importante est observée entre le modèle de **Dunkle et Kumar-Tiwari** pour une géométrie différente. La tendance des variations de ces coefficients de transfert de chaleur est similaire à la variation du rendement car les deux coefficients  $h_{cw}$  et  $h_{ew}$  dépendent de la température de l'eau et du verre. On constate que le modèle de **Dunkle** est plus approprié pour le calcul de coefficient de transfert thermique par convection et par évaporation pour les distillateurs quel que soit la géométrie.



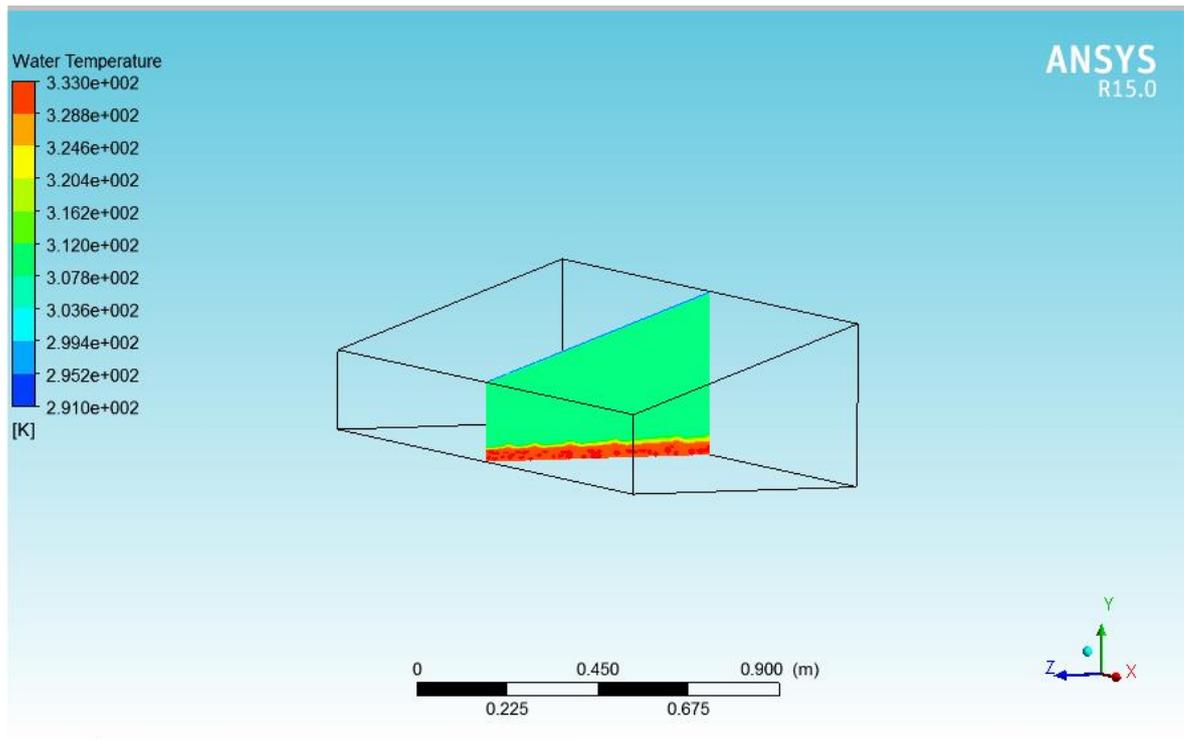
**Figure 4.12 :** Evolution horaire des coefficients de transfert thermique par convection : géométrie rectangulaire (R) et carrée (C).



**Figure 4.13 :** Evolution horaire des coefficients de transfert thermique par évaporation : géométrie rectangulaire (R) et carrée (C).

#### 4.5.3 Distribution de la température

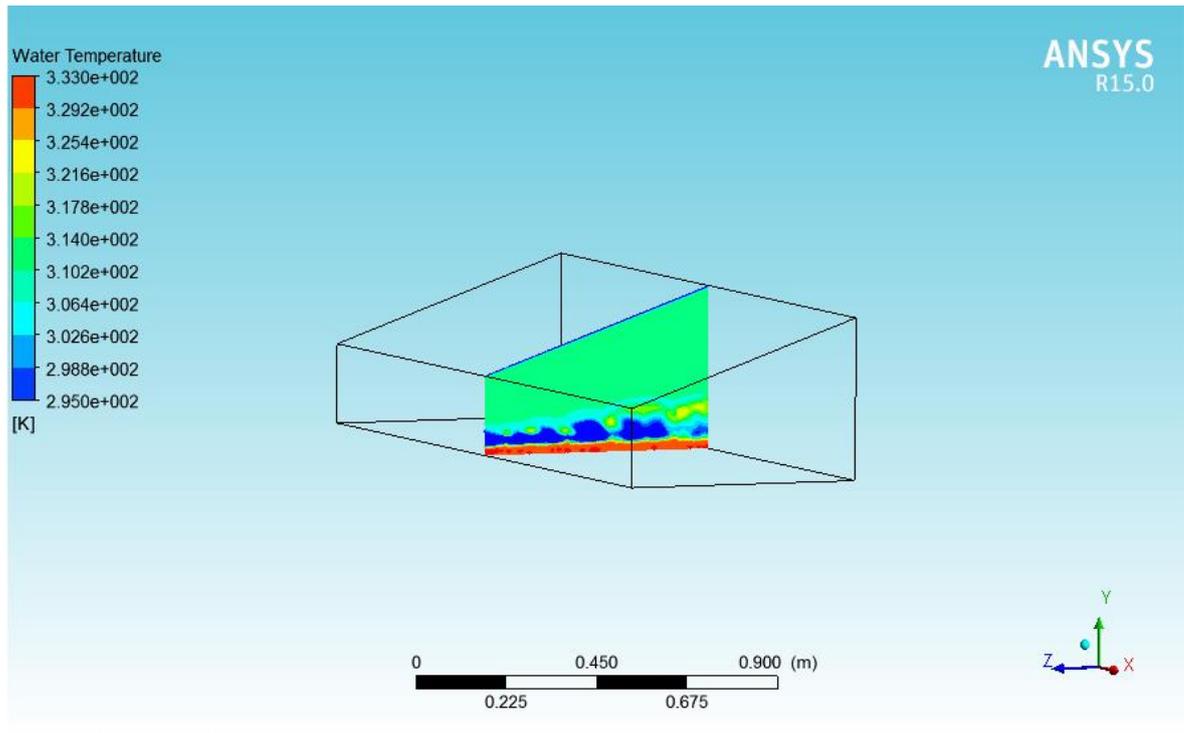
Pour des raisons de temps et de limitation de la puissance de calcul et de la mémoire, nous avons pu lancer un seul calcul afin de réaliser et mener à bien une simulation tridimensionnelle en utilisant deux fluides séparés par une interface liquide-gaz. La figure 4.14.a illustre la variation de température à l'état initial pour le bac du distillateur chauffé à flux constant à une température fixe de 333K. La température de la vitre est maintenue à 291K soit un écart de 42K.



**Figure 4.14.a :** Distribution de la température à  $t = 0s$ .

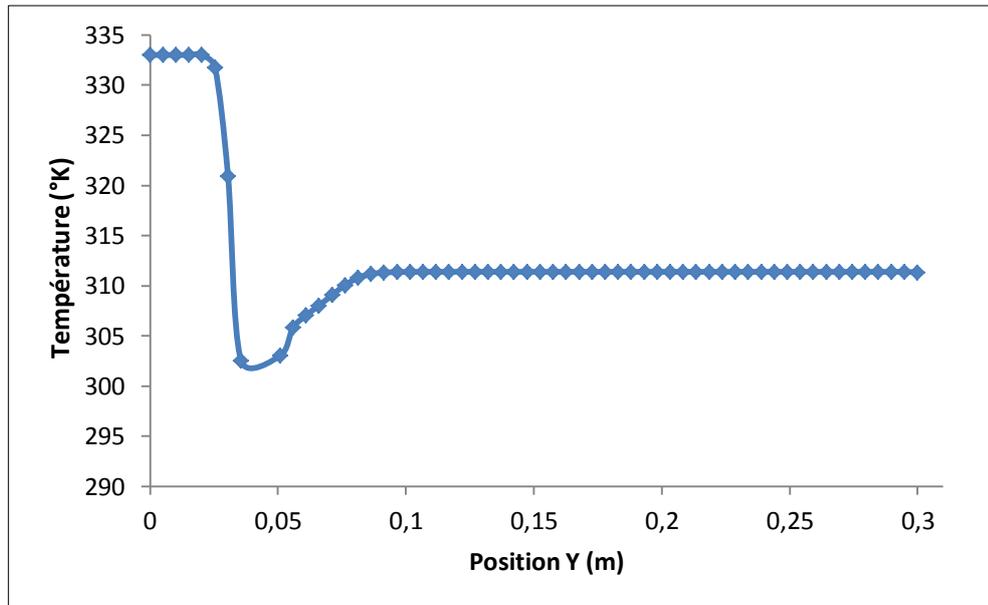
Afin d'examiner l'influence de la température sur l'écoulement des deux fluides, on présente à partir de la figure 4.14.b l'évolution de la température statique de l'eau obtenue à  $t=t_f$ . L'instant  $t=0s$  désigne le temps initial et  $t=t_f$  correspond au temps final de calcul. La variation de la température selon la direction  $y$  est plus importante. Un fort gradient thermique s'est développé entre les deux phases (eau-air) dans le plan  $(y, z)$ . La couche limite thermique se produit sur la paroi inférieure. On remarque que les contours de températures illustrent une variation de température et le transfert de chaleur se fait du bassin (le bas) vers la vitre (le haut). Par comparaison avec la figure 4.14.a, la température de la vapeur augmente dans le bac. Donc, la variation des densités par effet de convection naturelle provoque le déplacement des particules fluides en donnant lieu à un changement de phase.

Il est connu qu'une augmentation de  $Gr$  traduit une augmentation de l'intensité de la convection naturelle, ce qui nous permet de constater qu'il existe des phénomènes liés aux changements de la forme de la surface libre qui sont visibles dans le plan  $(y,z)$ .

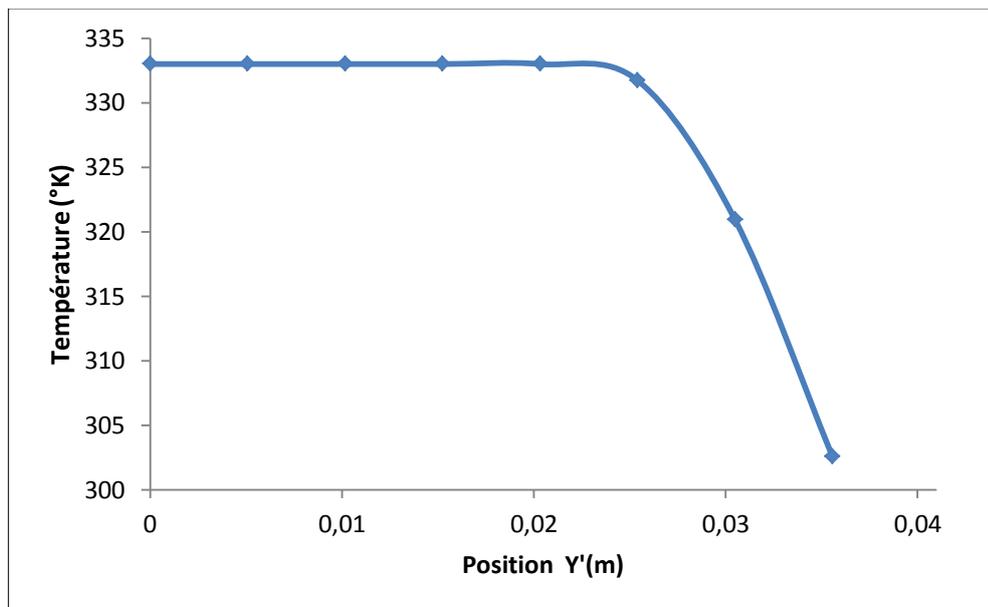


**Figure 4.14.b :** Distribution de la température à  $t = t_f$ .

Pour mieux distinguer la distribution de la température dans les deux phases, nous avons tracé la distribution de la température statique en fonction de la position  $y$  pour  $x = 0.975$  m comme présenté sur les figures 4.14.c et 4.14.d. Lorsque  $y$  varie dans la gamme  $0 \leq y \leq 0.035$  m, la température loin de la surface libre (près de la paroi) est constante, ce que indique que l'eau dans le bac reçoit un flux de chaleur qui conduit à l'évaporation de l'eau en produisant une vapeur d'eau chaude transportant avec elle une quantité d'énergie responsable de son mouvement. Par contre, la température au voisinage de l'interface diminue rapidement de  $T = 333\text{K}$  jusqu'à  $T = 300\text{K}$ . D'autre part, on constate que la température de l'air près de l'interface augmente sensiblement en fonction de  $y$  puis elle se stabilise autour de  $310\text{K}$ .

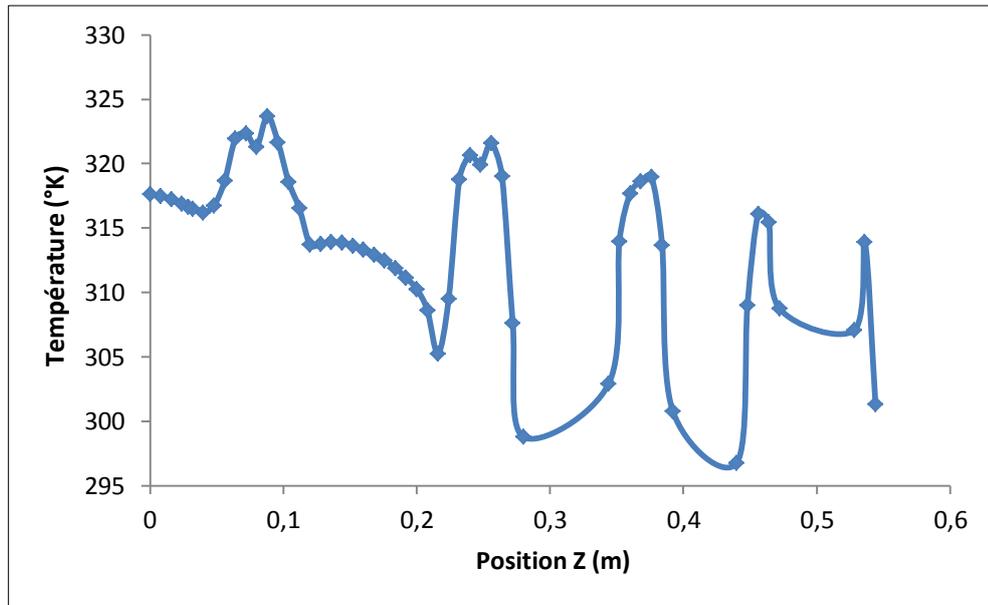


**Figure 4.14.c :** Distribution de la température en fonction de la position Y.



**Figure 4.14.d:** Distribution de la température en fonction de la position dans le volume d'eau Y' (0m-0.035m).

L'interface entre les deux fluides présente une singularité physique très complexe vue l'interaction des particules fluides entre elles et leur changement de phase. Pour contrôler la température à cet endroit, nous avons tracé la courbe de la variation de température statique dans le plan (x,z) pour  $y=0.035\text{m}$  (figure 4.14.e). Il est important de noter que la température de l'interface est parfaitement variable et instable (perturbée). Elle fluctue entre 324 K et 298K désignant qu'une certaine quantité d'eau s'évapore facilement.



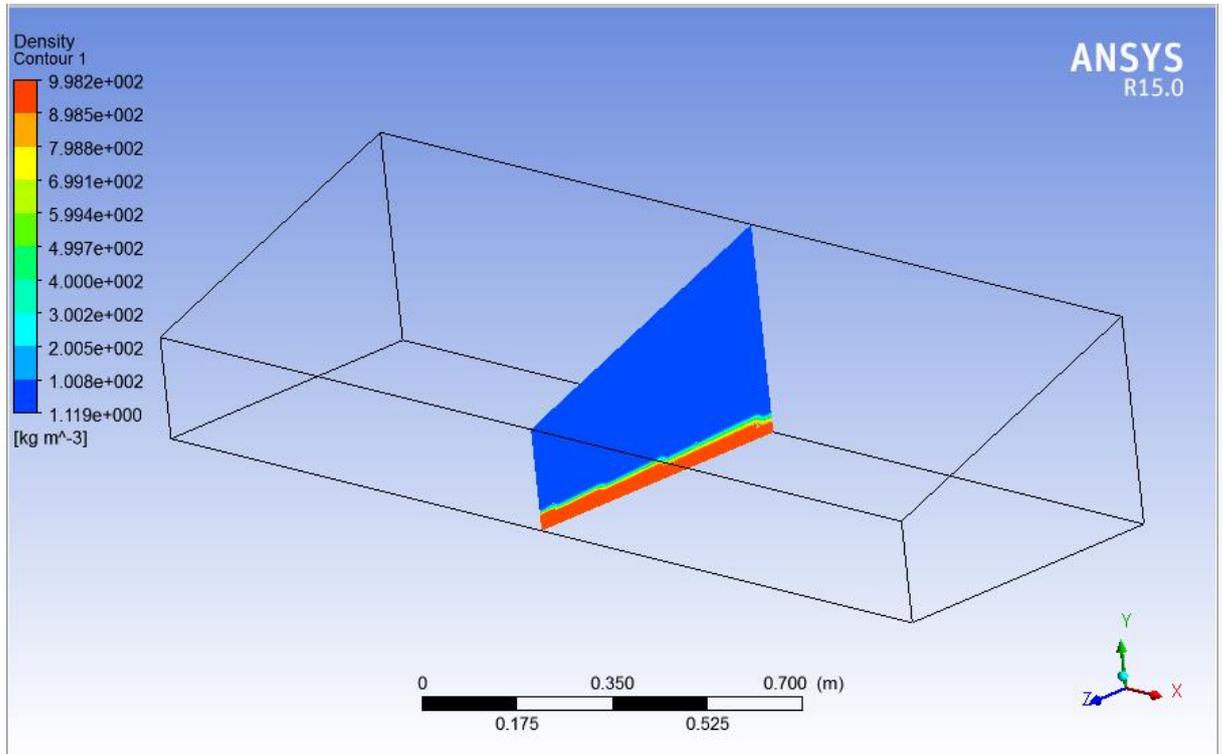
**Figure 4.14.e:** Distribution de la température de l'eau en fonction de la position à l'interface (eau-air).

#### 4.5.4. Distribution de la densité

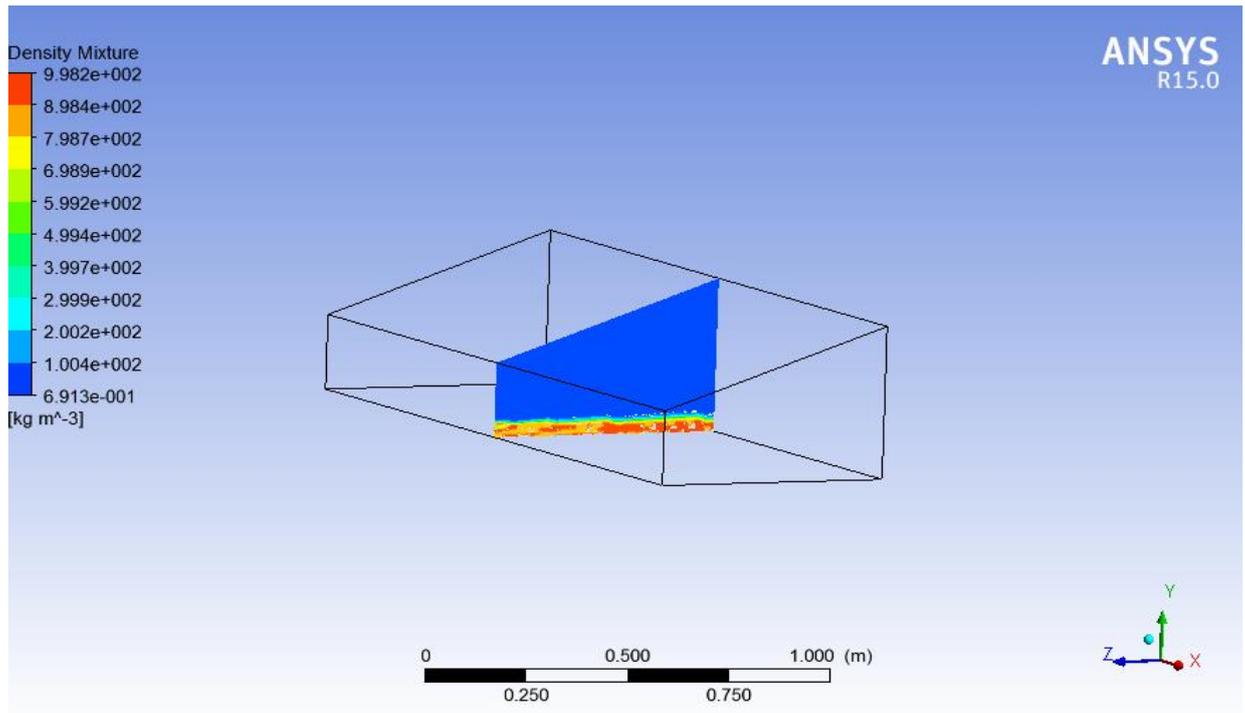
Pour démontrer la variation de l'écoulement et le mécanisme qui le régit, nous avons fait appel aux plusieurs fichiers qui ont été enregistrés pour chaque 10 itérations de pas du temps. Les figures 4.15 (a,b,c,d,e,f ,g ,h ,i ,j) qui représentent l'évolution de la densité volumique du mélange (eau-air) en fonction du temps sur le plan (y,z) ,montrent les changements dans le mode d'écoulement diphasique entre  $t=0s$  et  $t=t_f$ . Nous pouvons voir que la forme de l'interface devient instable à partir de  $t=2/8t_f$  en raison de l'effet de la température fourni par la plaque inferieure (source d'énergie). L'eau liquide commence à se chauffer progressivement et le transfert de chaleur par convection se fait instantanément vue que la masse d'eau à distiller est très faible devant le flux de chaleur imposé. Dans cette étude de cas numérique, la température de l'eau dans le bassin est homogène ce qui favorise l'évaporation de l'eau entraînant des transports de chaleur et des transferts des mouvements de particules en suspension dans la partie air (vapeur d'eau).

Nous remarquons que le changement de phase de l'eau (liquide-vapeur) est déclenché à  $t=3/8 t_f$  dont le transfert de masse se produit par l'évaporation des molécules d'eau (figure 4.15.d). En effet, l'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux selon la source de chaleur appliquée. La figure 4.15.f illustre le développement de la vapeur à  $t = 5/8 t_f$  près de la paroi des rigoles qui présente la pente de distillateur. Résultant d'un gradient de température, cette vapeur d'eau est en mouvement

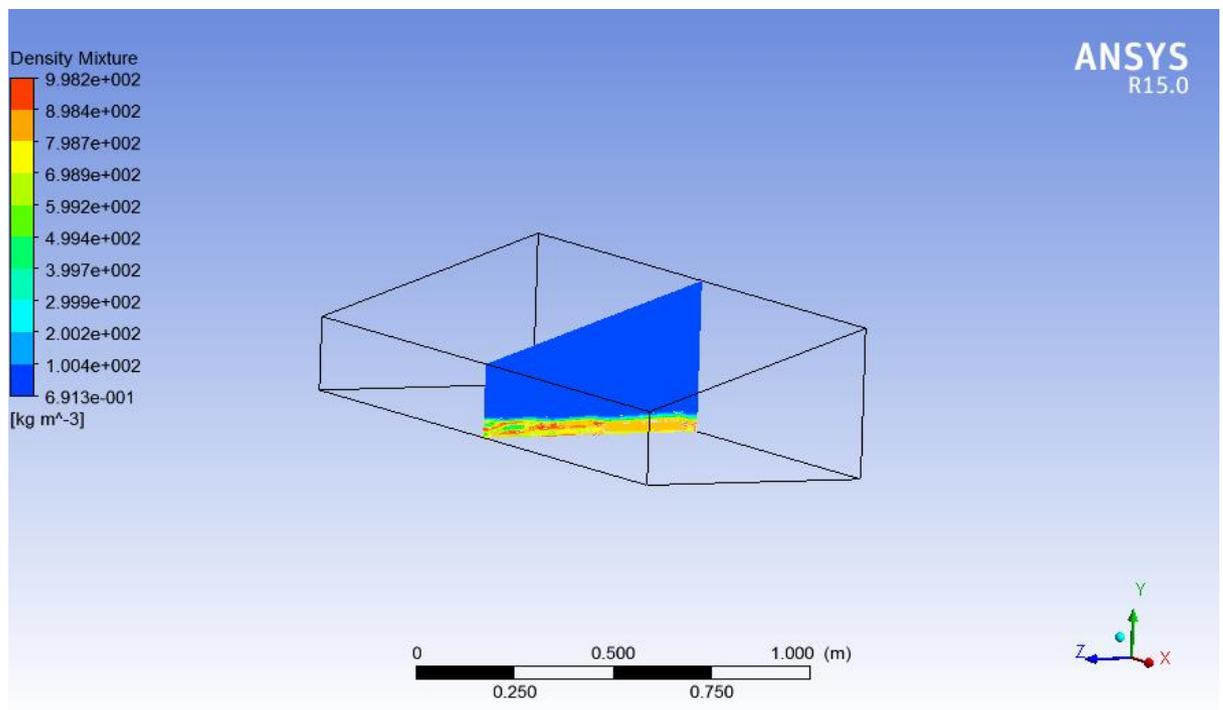
et se déplace vers le haut (vitrage) et dans la direction  $z$  pour la condensation. La figure 4.15.j montre le groupement des gouttelettes d'eau sur le vitrage après un changement progressif de l'état gazeux (vapeur) à l'état liquide (eau distillée) et leurs glissements vers le bas ou elles s'accumulent. Numériquement, nous constatons que l'évaporation de l'eau se manifeste au début du procédé de distillation près de la pente du système.



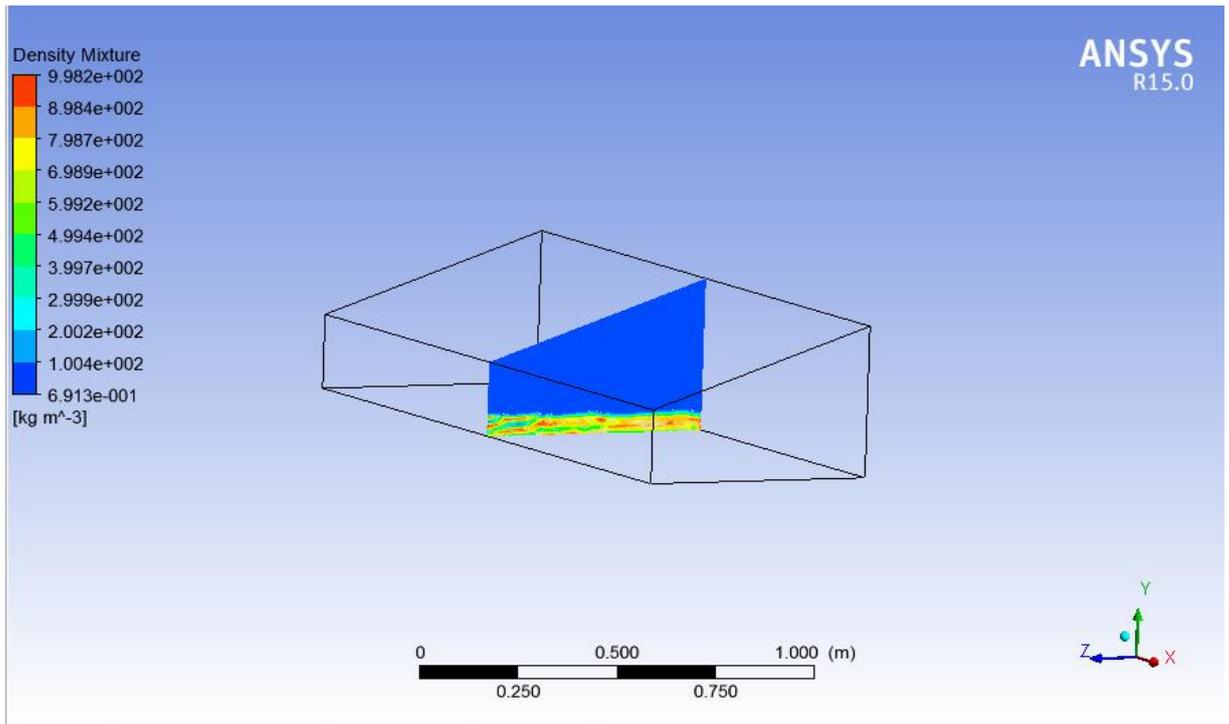
**Figure 4.15.a :** Evolution de la densité dans le plan  $(y,z)$  à  $t = 0$ s.



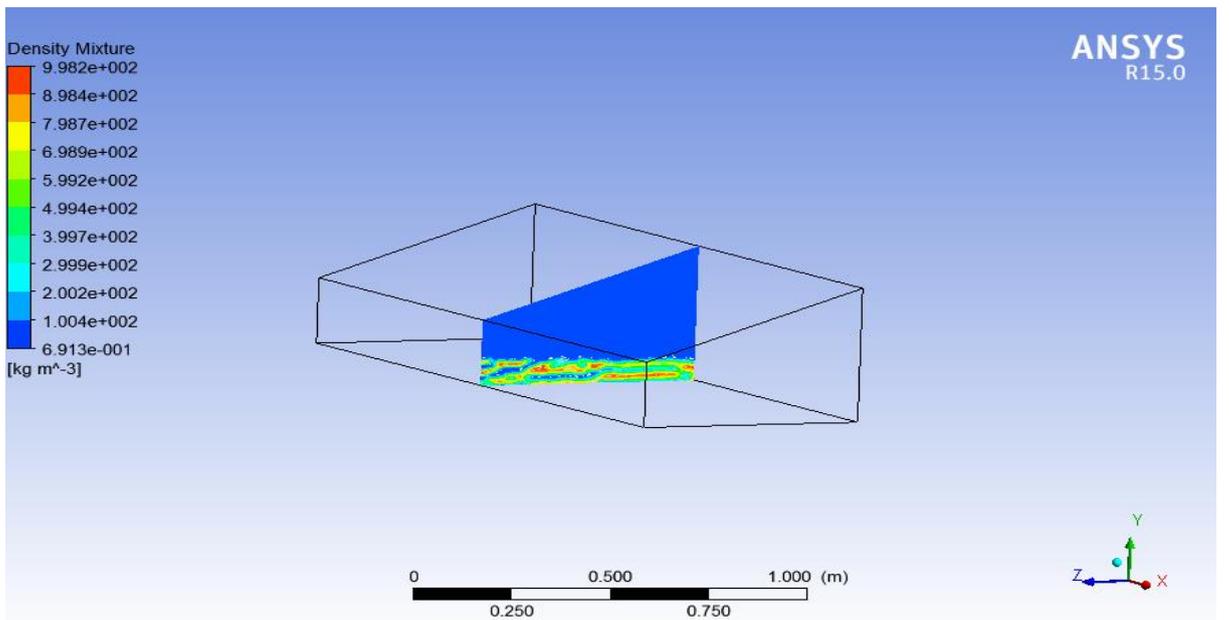
**Figure 4.15.b:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 1/8 t_f$ .



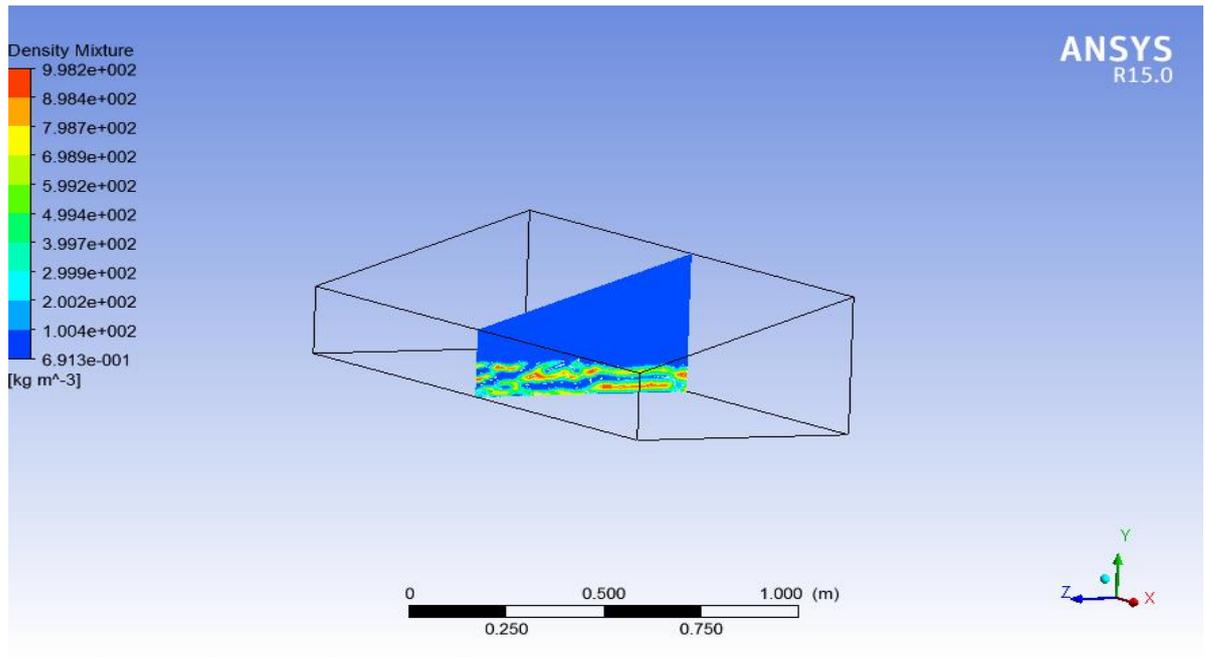
**Figure 4.15.c:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 2/8 t_f$ .



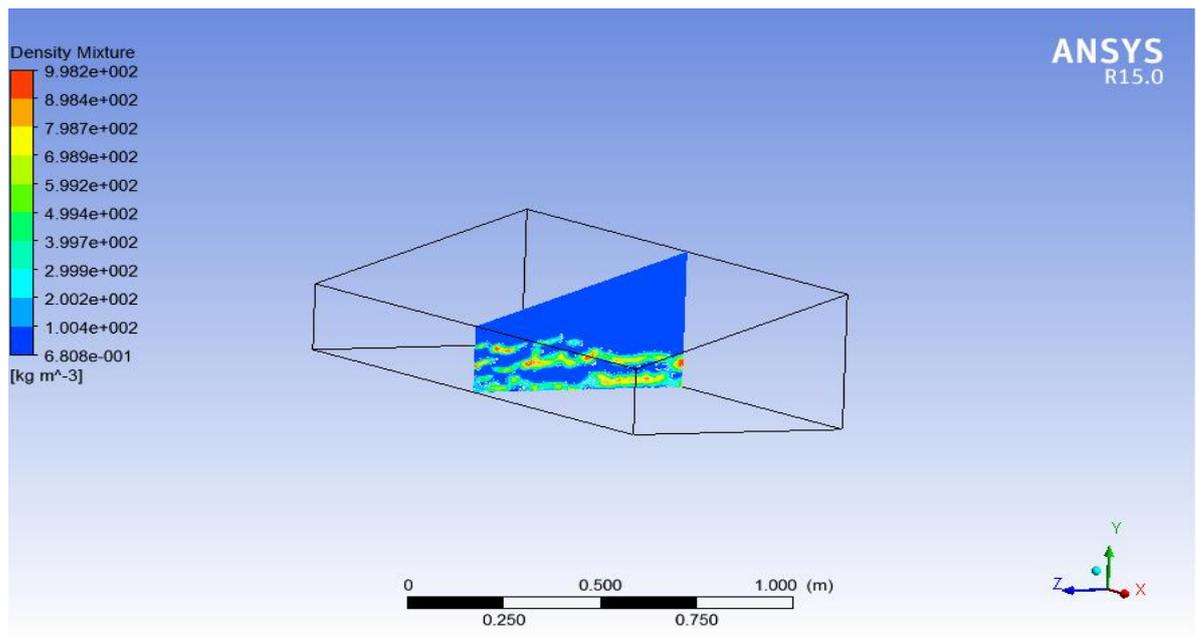
**Figure 4.15.d :** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 3/8 t_f$ .



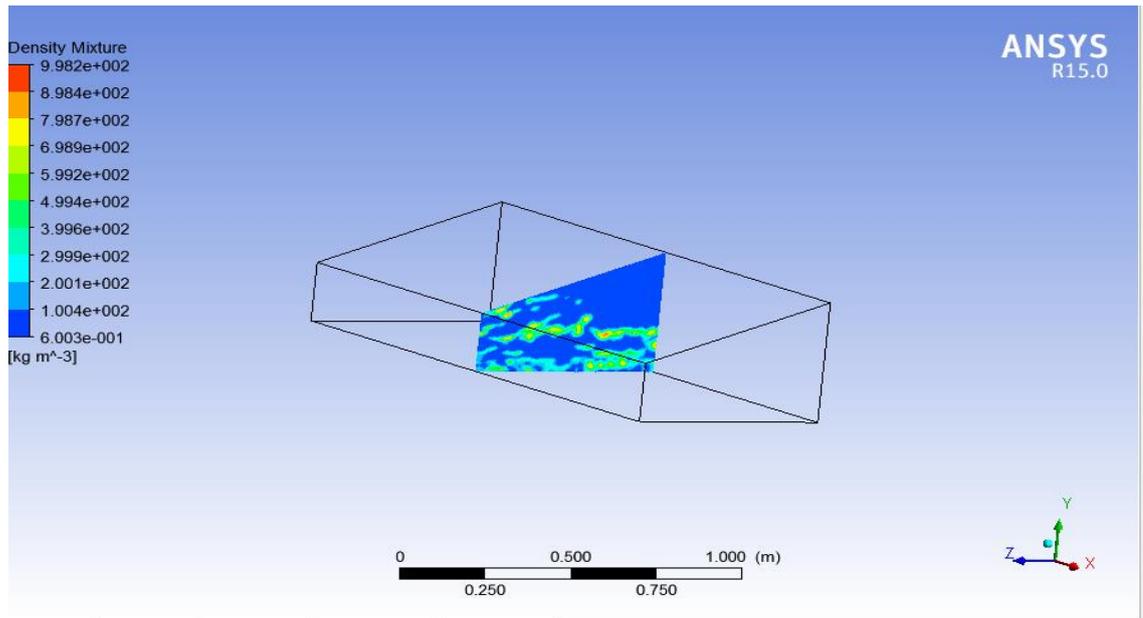
**Figure 4.17.e:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 4/8 t_f$ .



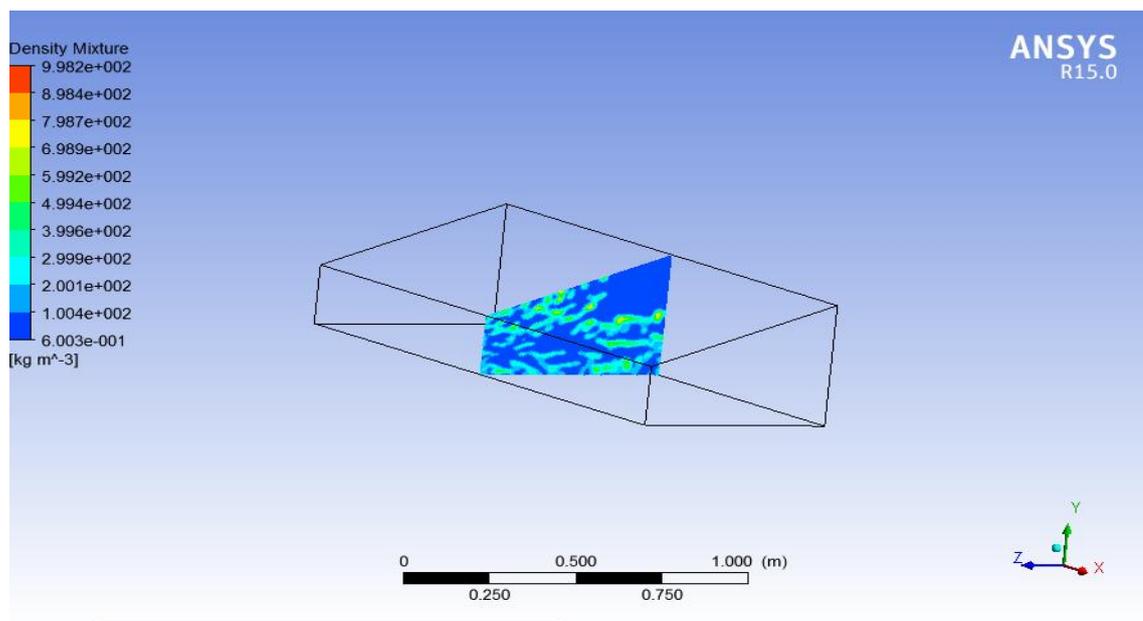
**Figure 4.15.f:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 5/8 t_f$ .



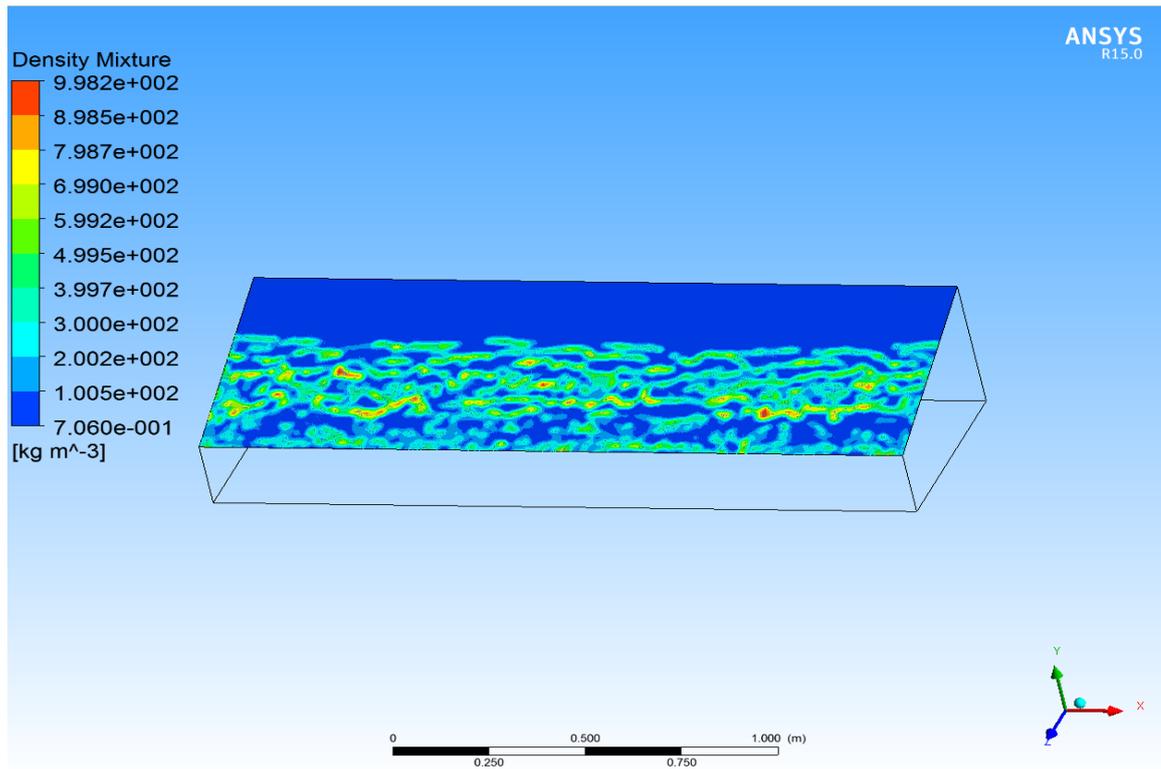
**Figure 4.15.g:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 6/8 t_f$ .



**Figure 4.15.h:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t = 7/8 t_f$ .



**Figure 4.15.i:** Evolution de la densité dans le plan (y,z) à  $t=t_f$ .

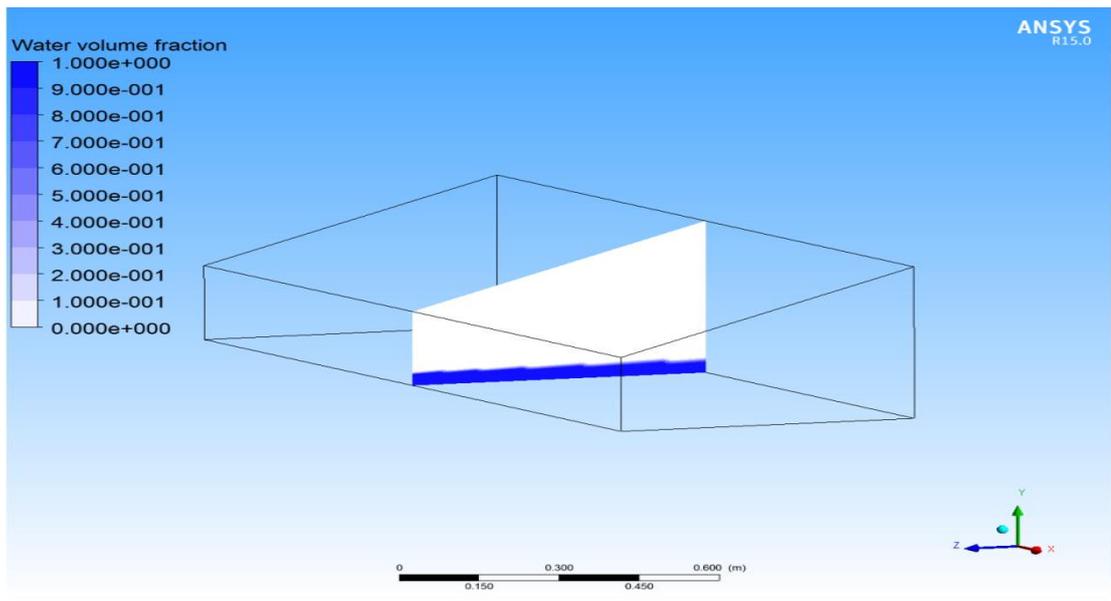


**Figure 4.15.j :** Evolution de la densité sur la vitre à  $t=t_f$ .

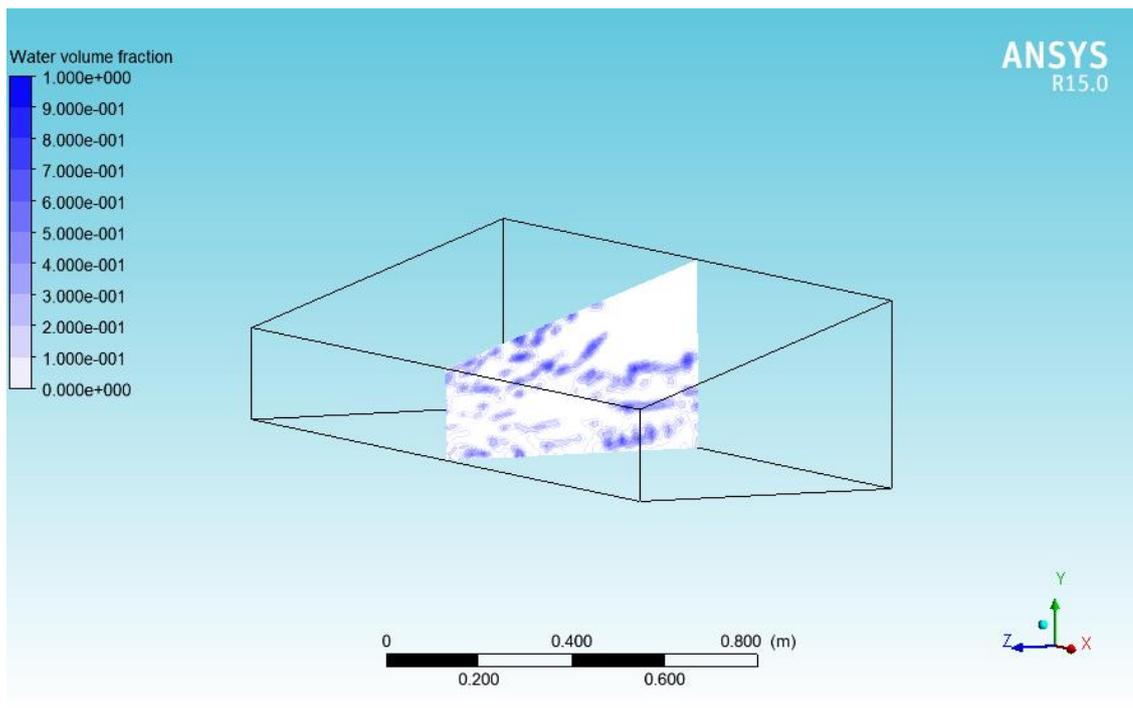
#### **4.5.5. Distribution de la fraction volumique et massique de l'eau**

Les Figures 4.16 (a,b,c) représentent l'évolution de la fraction volumique au cours du temps dans le plan (y,z) . Nous remarquons qu'à  $t=0s$  les deux phases (air-eau) sont complètement séparées et leur interface est distincte, le liquide considéré est représenté par la couleur bleu (le bas du plan). Le transfert de chaleur est dû à la force de flottabilité, la vapeur d'eau chaude se déplace vers le haut et une partie de cette masse se condense sur la vitre et se refroidit tout en libérant de la chaleur par convection. Les gouttelettes d'eau condensée sur la vitre sont représentées sur la Figure. 4.16.c.

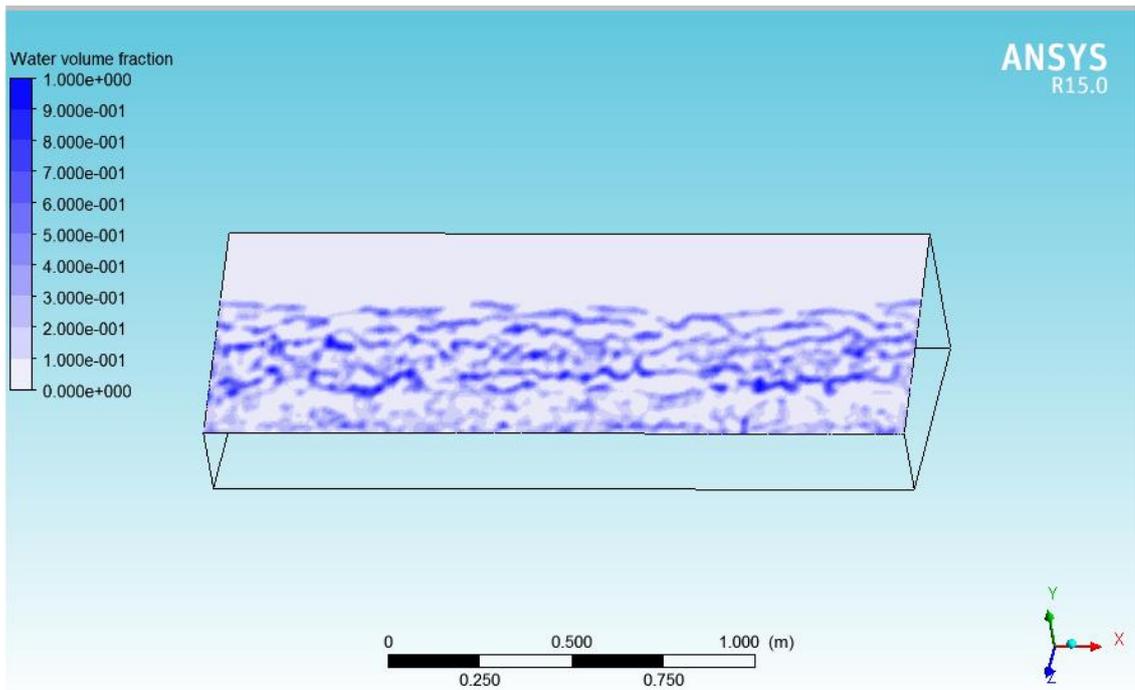
La figure 4.17 représente l'évolution la fraction massique de l'eau sur la vitre sur laquelle la condensation de l'eau distillée se produit. La fraction massique est comprise entre 0 et 1, et la somme des fractions massiques vaut 1. Il est constaté qu'une grande quantité d'eau s'accumule sur la partie basse du vitrage occupant la moitié de la surface. le distillat ruisselle sur la face intérieure de la vitre inclinée mis en pente dans des rigoles, qui le conduise dans un réservoir de stockage.



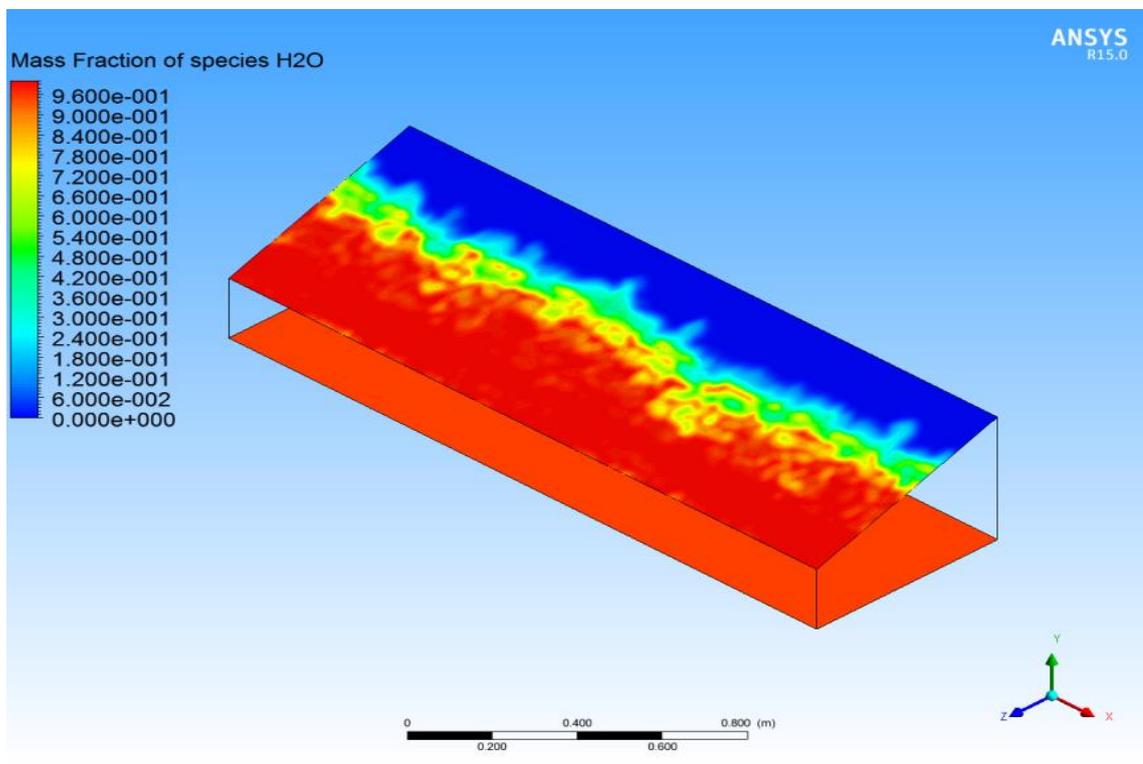
**Figure 4.16.a** : Evolution de la fraction volumique de l'eau dans le plan (y,z) à  $t=0s$ .



**Figure 4.16.b** : Evolution de la fraction volumique de l'eau dans le plan (y,z) à  $t=t_f$ .

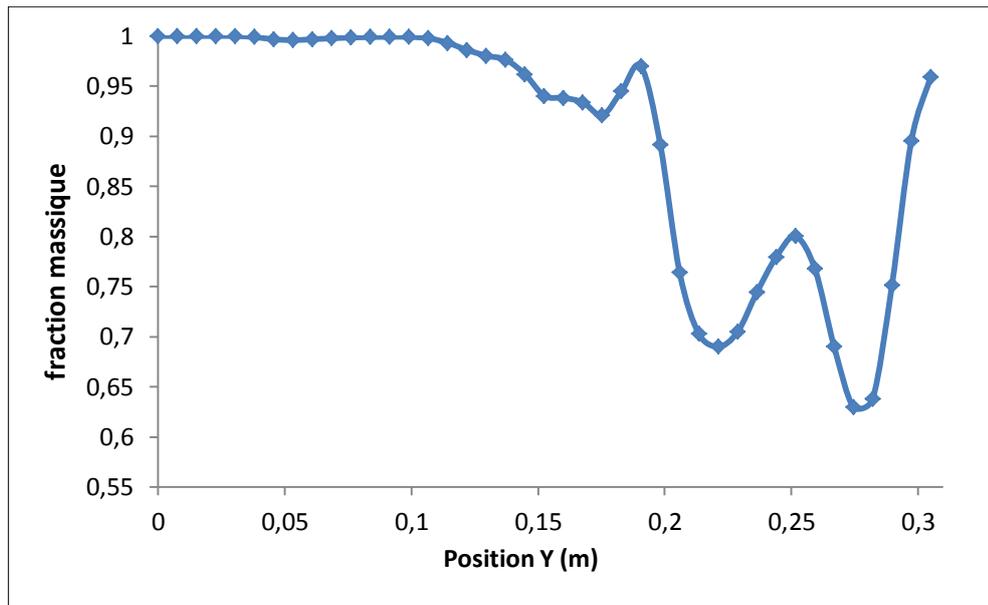


**Figure 4.16.c** : Evolution de la fraction volumique de l'eau sur la vitre.



**Figure 4.17** : Distribution de la fraction massique de l'eau.

La courbe de la figure 4.18 illustre l'évolution de la fraction massique de l'eau en fonction de la position verticale  $y$  pour  $x = 0.975$  m. Nous remarquons que la fraction massique de  $H_2O$  est constante dans l'intervalle  $0 \leq y \leq 0.1$  m, mais à partir de  $y = 0.125$  m elle varie de façon linéaire décroissante jusqu'à 0.9 puis elle a augmenté en dessus 0.95. Néanmoins, cette valeur diminue rapidement et elle oscille entre 0.62 et 0.8 au voisinage du vitrage. De ces résultats, on peut conclure que l'eau mettant dans l'évaporateur s'est évaporée et puis condensée sur la partie inférieure de la vitre.

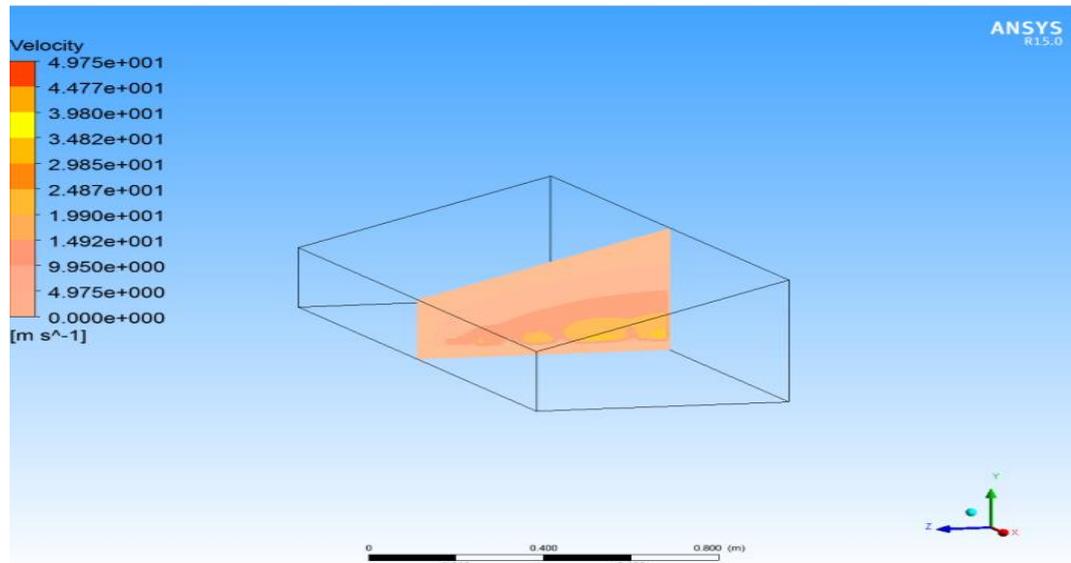


**Figure 4.18 :** Evolution de la fraction massique d'eau en fonction de position.

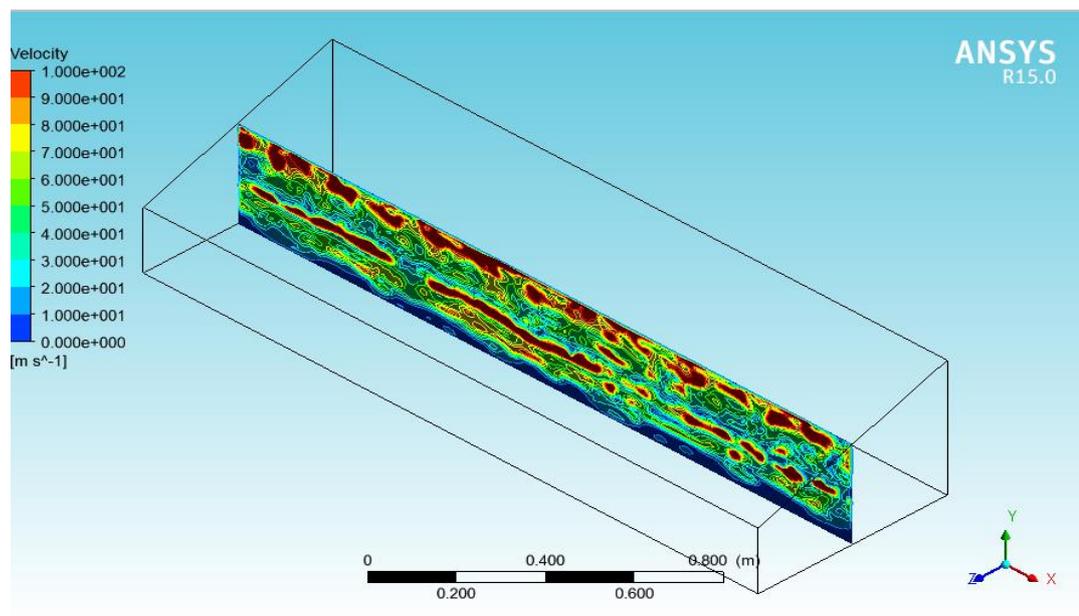
#### **4.5.6. Effet de la température sur le champ de vitesse**

Les figures 4.19 et 4.20 représentent la distribution de la vitesse du mélange dans le plan  $(y, z)$  et le plan  $(x, y)$  respectivement. On constate que l'effet de la convection naturelle causé par un gradient de température dirigé a créé un mouvement de l'écoulement constitué de deux fluides de phase différente. La variation de densité des deux fluides en fonction de température est la seule cause du mouvement de cet écoulement. Le phénomène d'évaporation conduit à un changement de phase qui provoque une agitation des particules de la vapeur d'eau et celle de la masse d'air dans le volume total de l'évaporateur. Il apparaît que les particules gazeuses les plus chaudes libérées de la phase liquide près de l'interface se déplacent vers le haut et l'interaction interfaciale développe des vortex générés par convection. La valeur de la vitesse dans ce plan varie entre 4.97m/s et 2 m/s. Aussi, il est à noter que la vitesse normale à la paroi est nulle et ceci traduit la

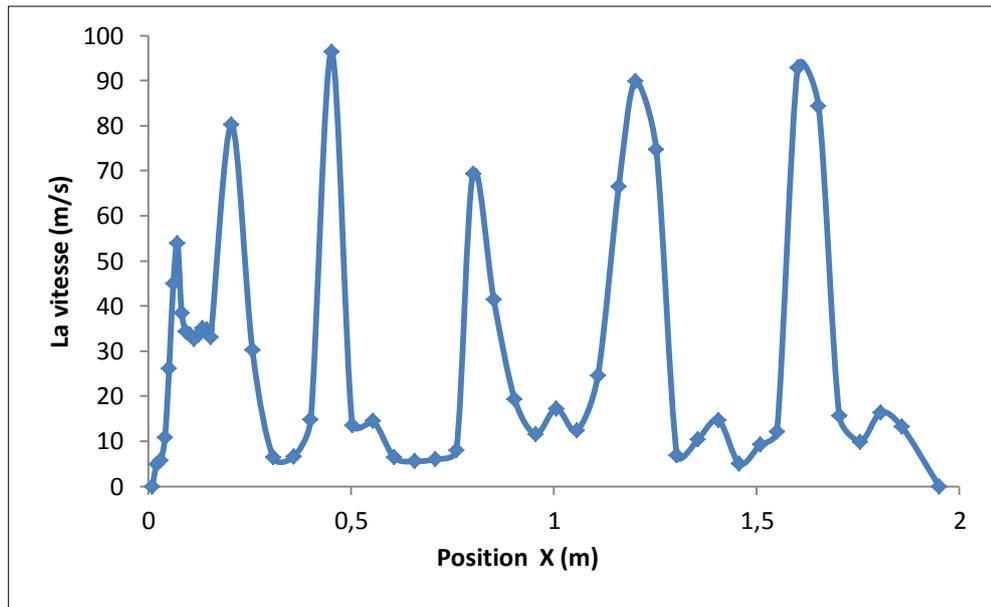
condition d'adhérence du liquide à la paroi solide. La figure 4.21 représente la variation de la vitesse en fonction de la position (x) à l'interface  $y=0.035$  m. Elle varie de façon quasiment périodique dont les pics maximums des valeurs allant de 55m/s jusqu'à 100m/s. Cette variation de vitesse interfaciale signifie que l'interface se meut dans la direction x offrant un phénomène d'instabilité convective de type stationnaire. De ce fait, on conclure que le profil de vitesse est perturbé à l'interface et l'écoulement devient instable.



**Figure 4.19 :** Evolution de la vitesse du mélange dans le plan (y,z).



**Figure 4.20 :** Evolution de la vitesse du mélange dans le plan (x, y).



**Figure 4.21 :** Variation de la vitesse en fonction de la position (x).

## CONCLUSION GENERALE

L'analyse bibliographique a montré que l'enjeu stratégique actuel en matière de production de l'eau fraîche par dessalement solaire et sa disponibilité apparaît comme une solution alternative certaine à moyen et long termes. Cependant le développement de la technologie de distillation solaire en Algérie commence à prendre une importance considérable dans divers domaines, notamment l'industrie privée, les polycliniques, les individus, les bases militaires et les stations de traitement des eaux usées épurées dans les régions arides et semi arides.

C'est dans ce contexte que nous avons proposé la réalisation et la mise en marche d'un distillateur à simple pente de géométrie différente couplé à des capteurs solaire plans permettant de préchauffer l'eau et d'emmagasiner la chaleur de façon continue.

Notre étude expérimentale et numérique nous a permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres internes et externes sur les caractéristiques de fonctionnement du système et leurs évolutions au cours du temps. D'après cette analyse, le procédé de distillation solaire semble être sensible aux différents paramètres qui affectent le rendement du système considéré à savoir l'intensité du rayonnement solaire et la vitesse de vent, la température et l'épaisseur de la masse d'eau, la qualité du verre, le matériau de stockage et les différentes sources d'énergie appliquées.

Ce travail consacré à la distillation solaire alimentée par différentes sources d'énergie nous a permis de conclure que l'isolation thermique du système joue un rôle important sur le débit de production d'eau distillée. Les résultats expérimentaux prouvent qu'elle est obligatoire, présentant un moyen efficace pour réduire les pertes thermique vers l'extérieur, d'accumuler la chaleur à l'intérieur du distillateur en augmentant la température de l'eau à dessaler et par conséquent la production. En effet, l'isolation des parois affecte considérablement le rendement de distillation et la production augmente de plus de 50% et 60% respectivement pour la configuration rectangulaire et carrée.

Pour optimiser le volume d'eau à dessaler, nous avons étudié l'effet du volume d'eau sur la performance du système pour les différents cas considérés. Nous remarquons que pour différents volumes, la production journalière d'eau distillée est pratiquement constante. Une tendance à la baisse est observée pour un volume de 40 l. Nous avons trouvé que le volume d'eau optimum est de  $V=35$  litres pour les deux configurations qui

donne un meilleur rendement par rapport aux autres volumes examinés en utilisant deux capteurs solaires pour chaque système, l'un pour le préchauffage de l'eau et l'autre pour le stockage d'énergie.

Dans ces conditions, l'analyse de différentes températures enregistrées nous a permis de présenter l'évolution de ce paramètre en fonction du temps dans plusieurs endroits du distillateur et contrôler aussi son influence sur le débit de production. Il est noté que le volume horaire d'eau distillée cumulée augmente avec l'augmentation de la température de la masse d'eau selon une loi exponentielle. De plus, l'effet de la salinité de l'eau sur le rendement de distillation a été étudié. Pour un volume d'eau fixe  $v=35$  litres, la concentration en sel se fait progressivement en utilisant une eau synthétique (eau de puits +NaCl) sur une gamme de salinité variant de 5 à 35 g/l. Expérimentalement, il est prouvé que la production journalière accroit lorsque le taux de la salinité augmente.

L'étude comparative des performances de nos distillateurs équipés par deux capteurs solaires nous a permis de conclure que l'effet combiné du chauffage de l'eau et stockage d'énergie donne un rendement important et supérieur à celui du cas de référence pour les deux configurations. Nous avons enregistré une augmentation de 30% et 50% respectivement pour le distillateur rectangulaire et le carrée. Par ailleurs, nous remarquons que le taux de production avec isolation obtenu par la configuration carrée est clairement plus favorable que celui du rectangulaire, pour une même surface d'absorbeur et pour un même volume ( $V_{opt}=35$  litres) dont la production journalière s'élève plus de 34%.

Ces expériences réalisées ont permis aussi de remarquer que l'effet des paramètres climatiques a pour conséquence d'augmenter ou diminuer relativement la production d'eau distillée. On peut constater que le rendement du système dépend fortement de l'énergie solaire incidente et de la vitesse du vent.

Pour améliorer le rendement, nous avons réalisé deux autres expériences, la première est l'étude de l'effet de la qualité du verre et ses propriétés physiques sur le rendement et la deuxième est l'intégration d'un matériau moins coûteux de stockage (éponge). L'utilisation d'un vitrage ordinaire peut augmenter la production du distillateur carré de plus de 24% en comparaison avec le verre trempé. Il intervient essentiellement par sa nature, sa mouillabilité par l'eau, son épaisseur et sa transparence au rayonnement solaire. L'utilisation des cubes en éponge dans le bassin du distillateur rectangulaire permet d'augmenter la surface d'échange de chaleur, la capacité d'absorption et le stockage

d'énergie. De ce fait, nous remarquons que l'intégration des cubes en éponge prolonge et augmente le chauffage de l'eau et par conséquent la production journalière s'est augmenté de 45%. Au vu de nos résultats, nous constatons que la distillation des eaux par énergie renouvelables est efficace pour le dessalement et le traitement des eaux dont le taux des sels est totalement éliminé. On confirme que la distillation solaire de l'eau constitue une bonne option pour le traitement des eaux en assurant par l'analyse des paramètres physico-chimiques (salinité, conductivité, TDS et pH).

En parallèle, une simulation numérique sur FLUENT ANSYS 15.0 s'est faite méthodologiquement sur un distillateur en 3D en commençant par examiner l'effet de la convection naturelle sur le procédé de distillation avec paroi inférieure chauffante. Cette étape est nécessaire en vue de réaliser numériquement le phénomène d'évaporation et de condensation pour valider nos résultats ( $V_{opt}=35l$ ) en considérant l'effet de la surface libre et de l'interaction des deux fluides (eau-air) sur le transfert de chaleur et de matière.

Cette étude numérique nous a permis de dégager les problèmes liés à l'écoulement diphasique dans une enceinte fermée en utilisant un modèle combiné VOF et Level Set basé sur la méthode de volume finis. Nous avons pu examiner l'influence de la température sur l'écoulement et prédire les différents phénomènes générés par convection. Plusieurs paramètres intervenant au cours du phénomène « évaporation-condensation » ont été évalués notamment l'évolution de température, la distribution de la densité, la fraction volumique et massique et le champ de vitesse.

A ce stade de notre approche, on a pu établir une étude comparative entre nos résultats expérimentaux et numériques. Les résultats du rendement calculés sont en bon accord avec ceux obtenus par voie expérimentale. En outre, les coefficients de transfert de chaleur par convection et par évaporation utilisant le modèle de Dunkle et celui de Tiwari ont été calculés et tracés en fonction du temps.

Il semblait que l'on dispose de résultats nouveaux et intéressants puisque l'effet de l'évaporation et changement de phase dans un distillateur pratiquement n'a pas été exploré à notre connaissance, par voie numérique.

**Perspectives :**

Cette étude qui ne fait que commencer mérite d'être approfondie par voie de simulation numérique. Dans cette perspective, on cherche à examiner toutes les possibilités éventuelles pour améliorer les performances de nos équipements à savoir :

- Améliorer l'efficacité énergétique des capteurs solaires en utilisant une pompe pour accélérer le débit de l'eau chaude provenant du capteur.
- Changer la masse béton par une masse d'eau vu sa capacité calorifique élevée.
- Proposer un système de refroidissement sur la vitre pour avoir une condensation rapide (ventilateur (air froid), vitrage doublé (film d'eau froide)).
- Tester les équipements dans les régions arides.
- Etude numérique approfondie pour différents nombres de Grashof en changeant les propriétés du matériau.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jean Dunglas, Le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau, février 2014.
- [2] Jean-François Thivierge."Etude du potentiel des systèmes hybrides de pompage solaire". Thèse de M.Sc.A. en Génie Civil, présentée à l'Université d'Ottawa, Canada, 1995
- [3] Raymond Desjardins, traitement des eaux. Edition Garden, 2007
- [4] Ganairis Neophytos (1972). Desalination process. United States Patent ,N°3675436.
- [5] Tamas, A.P., Etude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface, Mémoire de l'Université Laval du Québec, (Octobre 2004).
- [6] <http://www.perso.orange.fr/melaniepierra/TIPE.htm>
- [7] Salim Mebrouk Oussedik, Déminéralisation de l'eau saumâtre du forage Albien "Ah Sahara" pour l'alimentation en eau potable de la ville de Touggourt, Desalination 137 (2000) 103-111
- [8] Viviane Renaudin, Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Université Henri Poincaré
- [9] Yonggang Zhang, Yuelian Peng, Shulan Ji, Zhehao Li, Ping Chen, Review of thermal efficiency and heat recycling in membrane distillation processes, Desalination 367 (2015) 223-239
- [10] J. Harding: apparatus for solar distillation. pp. 284-288, London, (1883).
- [11] M. Al Shammiri, M. Safar, Multi-effect distillation plants: state of the art; Desalination 126. p 45-59. (1999)
- [12] Hikm et Ş. Aybar, Mathematical modeling of an inclined solar water distillation system, Desalination 190, p 63-70. (2006)
- [13] M. Boudidiba et al : Etude d'un distillateur solaire à effet de serre de type cascades" Jith, vol.2, pp.801-810 (1987).
- [14] J. Pages, C. Chaboub, F. Laloë, P. Sagna, I. Sow : Un Point d'Eau Douce dans les Iles du Saloum, Examen des Possibilités des Distillateurs Solaires. Revue Sénégalaise des Recherches Agricoles et Halieutiques - Vol. 2 - n°34 - 1989.
- [15] L. Cherrared : Amélioration du Rendement d'un Distillateur Solaire à Effet de Serre. Energ. Ren. Valorisation (1999) 121-124.
- [16] Bilal A. Aka, Mousa S. Mohsen, Waleed Nayfeh : Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. Energy Conversion & Management 41 (2000) 883-890.
- [17] Bassam A/K Abu-Hijleh, Hamzeh M. Rababa'h: Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin. Energy Conversion and Management 44 (2003) 1411-1418.

- [18] Abba.Chaker ; Nassima. Boukerzaza : Caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire. 12<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique. Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005.
- [19] V. Velmuruga, M. Gopalakrishnan , R. Raghu, K. Srithar: Single basin solar still with fin for enhancing productivity.Department of Mechanical Engineering, Infant Jesus College of Engineering, Thoothukudi 628 851, Tamilnadu, India. *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2602–2608.
- [20] V. Velmurugan , C.K. Deenadayalan H. Vinod , K. Srithar: Desalination of effluent using fin type solar still. *Energy* 33 (2008) 1719–1727.
- [21] K. Kalidasa Murugavel, Kn.K.S.K. Chockalingam, K. Srithar: An experimental study on single basin double slope simulation solar still with thin layer of water in the basin. *Desalination* 220 (2008) 687–693.
- [22] N. Retiel, F. Abdessemed ,M. Bettahar : Etude expérimentale d'un distillateur solaire plan amélioré. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°4 (2008) 635 – 642.
- [23] Hiroshi Tanaka , Yasuhito Nakatake: Increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter .Mechanical Engineering Department, Kurume National College of Technology, Komorino, Kurume, Fukuoka Japan. *Solar Energy* 83 (2009) 785–789.
- [24] Hiroshi Tanaka: Experimental study of a basin type solar still with internal and external reflectors in winter. *Desalination* 249 (2009) 130–134.
- [25] K. Kalidasa Murugavel , S. Sivakumar , J. Riaz Ahamed , Kn.K.S.K. Chockalingam, K. Srithar; Single basin double slope solar still with minimum basin depth and energy storing materials. *Applied Energy* 87 (2010) 514–523.
- [26] Narjes Setoodeh, Rahbar Rahimi, Abolhasan Ameri, Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD,*Desalination* 268(2011) 103-110
- [27] Karuppusamy, Sampathkumar, 2012. An experimental study on single basin solar still augmented with evacuated tubes. *Thermal Science* 16, 573–581.
- [28] Kargar Sharif Abad, H., Ghiasi, M., Jajangiri Mamouri, S., Shafil,M.B : A novel integrated solar desalination system with pulsating heat pipe. *Desalination* 311, 206–210,2013
- [29] Asaad Rehman Saeed Al-Hilphy, development of basin solar still by adding magnetic treatment unite and double glass cover provided whith water , *American journal of engineering and applied sciences* 6 (3): 286-296, 2013
- [30] Hitesh N. Panchal, P. K. Shah : Enhancement of distillate output of double basin solar still with vacuum tubes. *Journal of Frontiers in Energy* ,Volume 8, Issue 1 , pp 101-109,2014.
- [31] T. Rajaseenivasan, P. Nelson Raja, K. Srithar, An experimental investigation on a solar still with an integrated flat plate collector, *Desalination*, 347 (2014) 131-137
- [32] S.A. El-Agouz ,Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation, *Energy Conversion and Management* 86 (2014) 186-193

- [33] Mojtaba Edalatpour, Ali Kianifar ,Shamsoddin Ghiami,Effect of blade installation on heat transfer and fluid flow within a single slope solar still, International Communications in Heat and Mass Transfer 66 (2015) 63–70
- [34] M.M. Morad, Hend A.M. El-Maghawry, Kamal I.Wasfy, Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover, Desalination 373 (2015) 1–9
- [35] Z. Tigrine,H. Aburideh, M. Abbas, D. Zioui, R. Bellatreche,N. Kasbadji Merzouk, S. Hout, D. Belhout,Experimental investigations on a multi-stage water desalination prototype, Desalination and Water Treatment,2014
- [36] Abderrahmane Diaf , Assia Cherfa , Lamia Karadaniz , Zahia Tigrine :A technical–economical study of solar desalination. Desalination 377 (2016) 123–127
- [37] A. Chaker et G. Menguy, Efficacité Interne d’un Distillateur Solaire Sphérique Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique (2001) 53-58
- [38] A. Khedim, Mesure et Caractérisation Thermodynamique d’un Nouveau Système Solaire de Dessalement de l’Eau de Mer avec Récupération Chaleur,Rev.Energ.Rev :11<sup>èmes</sup> journées internationales de thermique ,(2003) 1-12
- [39] Abl.CHAKER ; Nassima. BOUKERZAZA, caractéristiques de fonctionnement d’un distillateur solaire, 12èmes Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15 au 17 Novembre 2005
- [40] S. Satcunanathan and H.P. Hansen, ‘An Investigation of Some of Parameters Involved in Solar Distillation’, Solar Energy, Vol. 14, p. 353 - 363, 1973
- [41] Retiel,F. Abdessemed et M. Bettahar , Etude expérimentale d’un distillateur solaire plan amélioré , Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 635 – 642
- [42] A. Deliou,N. Bessas, Z. Belgroun,H. Aburideh, A. Lounis et A. Chikouche, Etude expérimentale des caractéristiques d’un distillateur solaire à effet de serre, Revue des Energies Renouvelables CICME’08 Sousse (2008) 109 - 118
- [43] AK Tiwari, GN Tiwari (2005) Effect of the condensing cover's slope on internal heat and mass transfer in distillation: an indoor simulation. Desalination 180 (73-88)
- [44] J. Brau ,(2006), INSA de Lyon
- [45] H. NOURI ET F. RAVELET cours «Introduction à la simulation numérique des écoulements.» DynFluid - Arts et Metiers Paris Tech, 2012

**Tableau D.1** : Valeurs des pressions, températures, coefficients de transfert, flux de chaleur et taux de production

distillateur rectangulaire										
Temps (h)	T <sub>w</sub> (°C)	T <sub>g</sub> (°C)	P <sub>w</sub> (N/m <sup>2</sup> )	P <sub>g</sub> (N/m <sup>2</sup> )	h <sub>ew</sub> (w/m <sup>2</sup> .°C)	h <sub>ew</sub> (w/m <sup>2</sup> .°C)	q <sub>ew</sub> (w/m <sup>2</sup> )	h <sub>fg</sub> (Kj/kg)	m <sub>ev</sub> (kg/m <sup>2</sup> .hr)	m <sub>ev</sub> exp (kg/m <sup>2</sup> .hr)
09:00	27,76	22,97	3691,03	2798,55	1,57	4,78	22,93	2433,56	0,033	0,006
10:00	30,02	27,22	4193,21	3579,21	1,33	4,77	13,35	2425,84	0,019	0,018
11:00	32,98	30,7	4941,59	4355,66	1,26	5,28	12,05	2418,19	0,017	0,054
12:00	45,04	37,37	9348,15	6268,12	1,97	12,91	99,03	2395,83	0,148	0,222
13:00	52,05	39,59	13249,86	7051,10	2,38	19,34	240,98	2384,74	0,363	0,318
14:00	53,99	39,68	14554,15	7084,58	2,52	21,40	306,31	2382,30	0,462	0,36
15:00	54,38	39,37	14829,48	6969,85	2,56	21,82	327,66	2382,20	0,495	0,342
16:00	53,58	39,49	14269,53	7014,06	2,50	20,96	295,39	2383,02	0,446	0,3
17:00	51,74	39,76	13051,20	7114,45	2,00	16,17	193,72	2384,91	0,292	0,2
18:00	48,42	35,94	11081,33	5805,24	2,03	13,98	174,50	2393,50	0,262	0,19
19:00	43,88	30,47	8810,72	4300,10	2,08	11,39	152,76	2405,48	0,228	0,126
20:00	38,98	27,53	6827,83	3643,03	1,97	8,94	102,38	2414,83	0,152	0,028

**Tableau D.2** : Valeurs des pressions, températures, coefficients de transfert, flux de chaleur et taux de production

distillateur carré										
Temps (h)	$T_w$ (°C)	$T_g$ (°C)	$P_w$ (N/m <sup>2</sup> )	$P_g$ (N/m <sup>2</sup> )	$h_{cw}$ (w/m <sup>2</sup> °C)	$h_{ew}$ (w/m <sup>2</sup> °C)	$q_{ew}$ (w/m <sup>2</sup> )	$h_{fg}$ (Kj/kg)	$\dot{m}_{ev}$ (kg/m <sup>2</sup> .hr)	$\dot{m}_{ev\ exp}$ (kg/m <sup>2</sup> .hr)
09:00	23,56	23,17	2897,01	2831,59	0,68	1,87	0,72	2438,30	0,001	0,024
10:00	28,71	28,39	3895,25	3825,38	0,65	2,32	0,74	2426,01	0,001	0,036
11:00	37,86	31,38	6434,04	4523,64	1,80	8,67	56,20	2411,57	0,08	0,129
12:00	50,2	38,83	12102,39	6773,89	2,29	17,52	199,23	2387,89	0,30	0,36
13:00	59,06	42,85	18505,50	8356,44	2,70	27,56	446,89	2372,34	0,67	0,552
14:00	60,82	43,86	20080,36	8801,70	2,77	30,05	509,66	2368,98	0,77	0,726
15:00	60,5	44,08	19785,64	8901,40	2,74	29,61	486,21	2369,10	0,73	0,666
16:00	58,9	43,31	18367,82	8556,72	2,67	27,37	426,75	2371,98	0,64	0,546
17:00	55,71	42,43	15802,88	8177,18	2,49	23,30	309,53	2376,90	0,46	0,42
18:00	51,4	38,81	12836,31	6766,73	2,38	18,72	235,72	2386,47	0,35	0,3
19:00	47,49	34,72	10578,48	5434,40	2,34	15,35	196,04	2396,07	0,29	0,23
20:00	43,51	30,58	8645,10	4326,59	2,30	12,51	161,78	2405,79	0,24	0,2

**Tableau D.3** : propriétés physique de la vapeur d'eau

Distillateur rectangulaire											
Temps (h)	$T_V$ (°C)	$C_p$ (J/kg °C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$K$ (w/m°C)	$\mu$ (kg/ms)10 <sup>5</sup>	$h_{fg}$ (kj/kg)	$\beta$ (1/°C)	$Gr*10^{-9}$	Pr	$h_{ew}$ (w/m <sup>2</sup> °C)	$h_{cw}$ (w/m <sup>2</sup> °C)
09:00	25,36	1002,9	1,18	0,0263	1,83	2433,56	0,0033	4,858	0,698	4,42	1,45
10:00	28,62	1003,3	1,17	0,0265	1,85	2425,84	0,0033	2,704	0,698	4,28	1,2
11:00	31,84	1003,8	1,15	0,0268	1,86	2418,19	0,0032	2,099	0,697	4,63	1,1
12:00	41,20	1005,2	1,12	0,027	1,90	2395,83	0,0031	6,160	0,696	10,82	1,65
13:00	45,82	1006	1,10	0,0279	1,92	2384,74	0,0031	9,369	0,695	15,73	1,94
14:00	46,83	1006,1	1,104	0,0279	1,93	2382,30	0,0031	10,607	0,695	17,28	2,03
15:00	46,87	1006,16	1,104	0,0279	1,934	2382,20	0,0031	11,119	0,695	17,63	2,06
16:00	46,53	1006,11	1,105	0,0279	1,932	2383,02	0,0031	10,488	0,695	16,97	2,02
17:00	45,75	1005,9	1,108	0,0279	1,92	2384,91	0,0031	9,017	0,695	15,45	1,91
18:00	42,18	1005,4	1,12	0,0276	1,91	2393,5	0,0031	9,884	0,695	13,48	1,96
19:00	37,17	1004,68	1,13	0,0272	1,88	2405,48	0,0032	11,418	0,696	11,13	2,03
20:00	33,25	1004,09	1,15	0,026	1,87	2414,83	0,0032	10,325	0,697	8,79	1,94

**Tableau D.4** : propriétés physique de la vapeur d'eau

Distillateur carré											
Temps (h)	TV (°C)	CP (J/kg °C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	K (w/m°C)	$\mu$ (kg/ms)10 <sup>5</sup>	hfg (kj/kg)	$\beta$ (1/°C)	Gr*10-9	Pr	hew (w/m <sup>2</sup> °C)	hcw (w/m <sup>2</sup> °C)
09 :00	23,36	1002,61	1,19	0,0261	1,82	2438,3	0,00337	0,95	0,698	1,72	0,63
10 :00	28,55	1003,38	1,17	0,0265	1,84	2426,01	0,00331	0,721	0,698	2,05	0,57
11 :00	34,62	1004,29	1,14	0,027	1,87	2411,57	0,0032	1,334	0,697	8,3	1,73
12 :00	44,51	1005,80	1,11	0,0278	1,92	2387,89	0,0031	2,029	0,695	15,84	2,07
13 :00	50,95	1006,79	1,09	0,0283	1,95	2372,34	0,003	2,642	0,694	25,74	2,33
14 :00	52,34	1007	1,085	0,0284	1,96	2368,98	0,003	2,711	0,694	25,55	2,36
15 :00	52,29	1006,99	1,086	0,0284	1,96	2369,10	0,003	2,627	0,694	25,17	2,33
16 :00	51,10	1006,81	1,09	0,0283	1,95	2371,98	0,003	2,535	0,694	23,51	2,29
17 :00	49,07	1006,50	1,096	0,0281	1,94	2376,90	0,0031	2,222	0,694	20,32	2,17
18 :00	45,10	1005,89	1,11	0,0278	1,92	2386,47	0,0031	2,228	0,965	16,9	2,15
19 :00	41,10	1005,28	1,12	0,0275	1,90	2396,07	0,0031	2,393	0,696	14,34	2,18
20 :00	37,04	1004,66	1,13	0,0272	1,88	2405,79	0,0032	2,570	0,696	12,07	2,22

## APPENDICE A

### Rendement et paramètres physico-chimiques

- Configuration rectangulaire sans isolation

**Tableau A.1** : Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS.

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
201	28/03/16	9h-16h	0,79	45,80	6,89	24,70	0
		16h-9h	1,00	39,00	6,89	21,00	0
251	29/03/16	9h-16h	0,72	36,00	5,95	19,10	0
		16h-9h	1,00	34,20	5,82	18,80	0
301	03/04/16	9h-16h	0,59	46,00	7,50	27,00	0
		16h-9h	0,81	28,00	7,37	14,90	0
351	04/04/16	9h-16h	0,35	60,00	7,70	31,00	0
		16h-9h	0,80	57,00	7,69	20,00	0

C : conductivité électrique

TDS : totale de sels dissous

- Configuration carrée sans isolation

**Tableau A.2**: Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS.

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
201	28/03/16	9h-16h	0,66	32,80	6,99	17,60	0
		16h-9h	0,65	32,20	6,99	17,30	0
251	29/03/16	9h-16h	0,80	21,00	5,95	11,20	0
		16h-9h	1,00	42,00	6,00	22,90	0
301	03/04/16	9h-16h	0,63	56,00	7,44	30,00	0
		16h-9h	0,88	19,50	7,40	10,30	0
351	04/04/16	9h-16h	0,40	32,40	7,66	17,50	0
		16h-9h	1,20	25,00	7,52	7,60	0

- Configuration rectangulaire avec isolation

**Tableau A.3:** Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS.

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
201	11/04/16	9h-16h	1,10	35,00	7,20	17,00	0
		16h-9h	1,40	29,00	7,30	15,00	0
251	12/04/16	9h-16h	1,20	52,00	7,13	27,00	0
		16h-9h	1,66	43,00	7,01	23,20	0
301	13/04/16	9h-16h	1,38	35,30	7,35	13,40	0
		16h-9h	1,50	13,70	7,14	7,30	0
351	14/04/16	9h-16h	1,20	58,40	7,25	28,00	0
		16h-9h	1,80	5,10	7,39	2,10	0
401	17/14/16	9h-16h	1,00	49,60	6,84	26,40	0
		16h-9h	1,70	26,70	7,00	14,20	0

- Configuration carrée avec isolation

**Tableau A.4:** Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS.

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
201	11/04/16	9h-16h	1,50	42,00	7,10	23,00	0
		16h-9h	2,00	15,00	6,98	8,00	0
251	12/04/16	9h-16h	2,30	40,00	7,25	21,00	0
		16h-9h	2,00	38,40	6,92	18,00	0
301	13/04/16	9h-16h	2,20	17,40	6,80	9,20	0
		16h-9h	2,10	28,50	7,31	14,40	0
351	14/04/16	9h-16h	1,80	60,00	7,13	30,00	0
		16h-9h	2,80	5,30	7,52	2,70	0
401	17/04/16	9h-16h	1,62	50,00	7,65	26,00	0
		19h-9h	2,80	14,30	6,97	7,50	0

- Configuration rectangulaire, différentes salinité
- Volume à dessaler  $V=35$  l

**Tableau A.5:** Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
5g/l	18/04/16	9h-16h	1,40	17,40	7,35	9,20	0
		16h-9h	1,60	18,70	6,97	9,10	0
15g/l	19/04/16	9h-16h	1,70	22,50	7,58	11,00	0
		16h-9h	2,00	14,30	7,37	8,20	0
25g/l	25/04/16	9h-16h	1,80	24,00	7,33	12,00	0
		16h-9h	2,20	22,40	7,32	12,00	0
35g/l	26/04/16	9h-16h	2,50	22,80	7,27	11,80	0
		16h-9h	2,00	16,40	7,65	8,80	0

- Configuration carrée, différentes salinité
- Volume à dessaler V=35 l

**Tableau A.6:** Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
5g/l	18/04/16	9h-16h	1,40	13,70	7,30	7,40	0
		16h-9h	2,325	20,00	7,20	10,00	0
15g/l	19/04/16	9h-16h	1,60	40,00	7,19	20,00	0
		16h-9h	2,325	16,30	7,00	8,60	0
25g/l	25/04/16	9h-16h	2,30	30,00	7,10	15,20	0
		16h-9h	2,60	13,90	7,10	7,20	0
25g/l	26/04/16	9h-16h	2,65	18,00	7,20	8,50	0
		16h-9h	2,85	12,50	7,70	6,60	0

- configuration rectangulaire, différentes source d'énergie
- Volume à dessaler V=35l

**Tableau A.7:** Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS.

	date	période	Rendement(l)	C ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	TDS (mg/l)	Salinité (g/l)
Effet combine	14/04/16	9h-16h	1,20	58,40	7,25	31,00	0
		16h-9h	1,80	5,10	7,13	2,10	0
chauffage	27/04/16	9h-16h	1,22	50,00	7,77	27,00	0
		16h-9h	1,30	44,60	7,67	23,50	0
Effet de serre	02/05/16	9h-16h	0,74	60,00	7,75	44,00	0
		16h-9h	1,42	21,60	7,75	11,70	0
Stockage	04/05/16	9h-16h	0,90	16,40	7,56	7,60	0
		16h-9h	1,50	21,00	7,50	11,00	0

- Configuration carrée, différentes source d'énergie
- Volume à dessaler V=35l

**Tableau A.8:** Valeurs des rendements, conductivité électrique, pH, salinité et TDS.

	<b>date</b>	<b>période</b>	<b>Rendement(l)</b>	<b>C (<math>\mu</math>S/cm)</b>	<b>pH</b>	<b>TDS (mg/l)</b>	<b>Salinité (g/l)</b>
Effet combine	14/04/16	9h-16h	1,80	60,00	7,39	30,00	0
		16h-9h	2,80	5,30	7,52	2,70	0
chauffage	27/04/16	9h-16h	1,55	65,00	7,34	32,00	0
		16h-9h	2,00	42,00	6,94	22,50	0
Effet de serre	02/05/16	9h-16h	1,07	70,00	7,56	35,00	0
		16h-9h	2,00	24,10	7,70	9,60	0
Stockage	04/05/16	9h-16h	1,34	13,00	7,39	6,90	0
		16h-9h	2,16	16,50	7,34	8,20	0

## APPENDICE B

### Volume horaire cumulé

- Volume à dessaler  $V=35$  l

**Tableau B.1** : Volume horaire cumulé pour différentes températures d'eau à dessaler

Temps (h)	Distillateur rectangulaire		Distillateur carré	
	$T_{\text{eau}}$ (°C)	Volume horaire cumulé (ml)	$T_{\text{eau}}$ (°C)	Volume horaire cumulé (ml)
<b>09 :00</b>	24,22	30	25,78	36
<b>10.00</b>	30,64	30	29,09	48
<b>11.00</b>	40,40	33	38,70	156
<b>12.00</b>	45,62	108	47,23	240
<b>13.00</b>	53,34	240	56,10	420
<b>14.00</b>	56,05	252	59,22	480
<b>15.00</b>	56,80	246	60,00	516
<b>16.00</b>	54,75	198	57,88	426

- Configuration carré
- Volume à dessaler  $V=35$  l
- Verre ordinaire, verre trempé

**Tableau B.2** : Volume horaire cumulé, verre trempé et verre ordinaire

Temps (h)	Volume horaire cumulé (ml)	
	Verre trempé	Verre ordinaire
<b>9h-10h</b>	48	36
<b>10h-11h</b>	156	129
<b>11h-12h</b>	240	360
<b>12h-13h</b>	420	552
<b>13h-14h</b>	480	726
<b>14h-15h</b>	516	666
<b>15h-16h</b>	426	546

- Configuration rectangulaire
- Volume à dessaler V=20l et V=35 l
- Configuration avec et sans éponge

**Tableau B.3** : Volume horaire cumulé, configuration avec et sans éponge

Temps (h)	Volume horaire cumulé (ml)			
	Sans éponge*	Avec éponge*	Sans éponge	Avec éponge
<b>9h-10h</b>	36	36	30	18
<b>10h-11h</b>	48	66	33	54
<b>11h-12h</b>	90	120	108	222
<b>12h-13h</b>	150	228	240	318
<b>13h-14h</b>	180	252	252	360
<b>14h-15h</b>	186	264	246	342
<b>15h-16h</b>	168	246	198	300

\* : Volume à dessaler V=20 l

## APPENDICE C

### Paramètres physico-chimiques

- Configuration carré, verre ordinaire
- Volume à dessaler V=35 l

**Tableau C.1** : Valeurs horaire de conductivité électrique et pH

Temps (h)	Conductivité électrique ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH
9h	-	7,65
10h	48,40	7,60
11h	24,10	7,52
12h	19,00	7,49
13h	13,60	7,45
14h	12,60	7,36
15h	11,60	7,34
16h	10,30	7,32

- Configuration rectangulaire avec éponge
- Volume à dessaler V=35l

**Tableau C.2** : Valeurs horaire de conductivité électrique et pH

Temps (h)	Conductivité électrique ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH
9h	-	7,70
10h	-	7,62
11h	51,80	7,55
12h	45,80	7,50
13h	40,40	7,46
14h	40,80	7,35
15h	40,00	7,29
16h	33,30	7,20

- Eau distillée de l'laboratoire
- Eau distillée par osmose inverse

	Conductivité électrique ( $\mu\text{s/cm}$ )	pH
Distillateur de laboratoire	3,50	7,48
Osmose inverse	20,0	7.50

## APPENDICE D

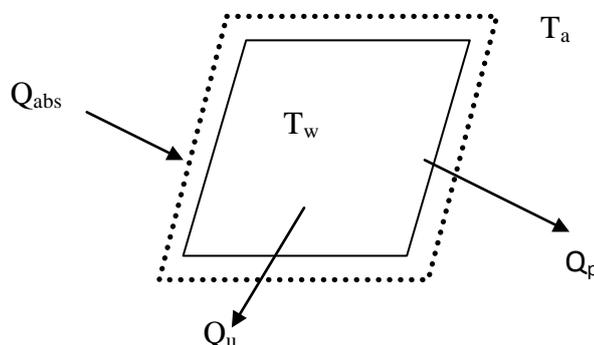
### Bilan énergétique

Deux approches ont été proposées pour le calcul du bilan énergétique :

- la méthode du bilan global.
- La méthode des nœuds.

- **La méthode du bilan global**

Globalement, le distillateur est assimilé à une boîte noire contenant une charge d'eau saumâtre et fonctionnant entre deux sources de chaleur : la saumure (source chaude) à une température moyenne  $T_w$  et l'ambiance (source froide) à une température moyenne  $T_a$ . La fraction de la puissance solaire incidente ( $Q_{inc}$ ) absorbée par la charge d'eau ( $Q_{abc}$ ), est utilisée comme chaleur utile ( $Q_u$ ) pour l'évaporation d'une quantité d'eau et la fraction restante ( $Q_p$ ) est perdue vers l'ambiance. L'application de la première loi de la thermodynamique à un volume de contrôle (fig.1) délimitant la surface effective pertinente du système permet d'écrire le bilan d'équilibre thermique du système.



**Figure D. 1:** Bilan thermique du système

$T_w$  : Température moyenne du distillateur.

$T_a$  : Température ambiante.

$Q_{abs}$  : la puissance absorbée par l'eau

$Q_{inc}$  : la puissance solaire incidente.

$Q_u$  : la chaleur utile.

$Q_p$  : la chaleur perdue vers l'ambiance.

$$\begin{aligned}
Q_u &= Q_{\text{abs}} - Q_p \\
Q_p &= U_L \cdot A (T_w - T_a) \\
Q_{\text{ads}} &= \alpha_t Q_{\text{in}} = \alpha_t (A I_g)
\end{aligned} \tag{1}$$

$\alpha_t$  : L'absorptivité effective totale de la saumure est donnée par l'expression suivante :

$$\alpha_t = \tau_g \cdot \alpha_w + \tau_g \cdot \tau_w \cdot \alpha_b$$

$\tau_g$  et  $\tau_w$  sont respectivement la transmittivité du vitrage et de la saumure ;  $\alpha_b$  et  $\alpha_w$

L'absorptivité du bac et de la saumure.

Le facteur des pertes globales  $U_L$  calculé par rapport à la surface d'évaporation en tenant compte des pertes thermiques avant, arrière et latérales est donné par la relation :

$$U_L = U_t + U_b + U_e \text{ [W/ m}^2 \cdot \text{°C]}$$

D'autre part, l'efficacité globale  $\eta_g$  et l'efficacité interne  $\eta_i$  du distillateur sont exprimées

Par la relation :

$$\eta_g = \frac{Q_u}{Q_{\text{inc}}} = \frac{\Sigma \dot{m} L_v}{\Sigma A_c \cdot I_g} = \alpha_t \cdot \eta_i \tag{2}$$

Où  $L_v$  est la chaleur latente d'évaporation à la température de l'eau et  $\dot{m}$  le débit du distillat.  $L_v$  est donnée par :

$$L_v = 4.18 \left[ 883 - 0.668 (T_w + 273.15) \right]$$

La combinaison des équations (1) et (2) permet de déduire le rendement global comme suit :

$$\eta_g = \alpha_t - U_l \left[ \frac{T_w - T_a}{I_g} \right] \equiv A + B \cdot X \tag{3}$$

Les constantes A et B de l'équation (3) sont respectivement l'absorptivité effective de la saumure et le facteur des pertes globales du distillateur.

- **Etude de la variation de l'efficacité globale du distillateur**

L'ensemble des mesures obtenus a permis de présenter par voie expérimentale l'évolution de l'efficacité globale en fonction de  $(T_w - T_a)/I_g$  ainsi qu'en fonction de la

température de l'eau relative à la journée du 24/05/2016. Comme déjà citer dans APPENDICE A le comportement de la variation du rendement suit une loi linéaire.

$$\eta_g = \alpha_t - U_L \left[ \frac{T_w - T_a}{I_g} \right] \quad (1)$$

$$\eta_g = B + Ax \quad (2)$$

$$\eta_g = \alpha_t \cdot \eta_i \quad (3)$$

Par analogie entre la relation théorique (1) et expérimentale (2) on obtient :  $U_L = A$ ,

$$\alpha_t = B$$

- **Grandeurs adimensionnelles**

- ❖ **Nombre de Grashoff**

Le nombre de Grashoff ( $Gr$ ) est un nombre adimensionnel caractérisant la convection libre. Il représente le rapport entre les forces de gravité aux forces visqueuses.

$$Gr = \frac{\beta g d^3 \rho^2 \Delta T}{\mu^2} \quad (1)$$

- ❖ **Nombre de Prandtl**

Le nombre de Prandtl est une dimension caractérisant le rapport entre le flux et la température à la couche limite en comparant la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide. Par définition il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement  $\mu$  (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2)$$

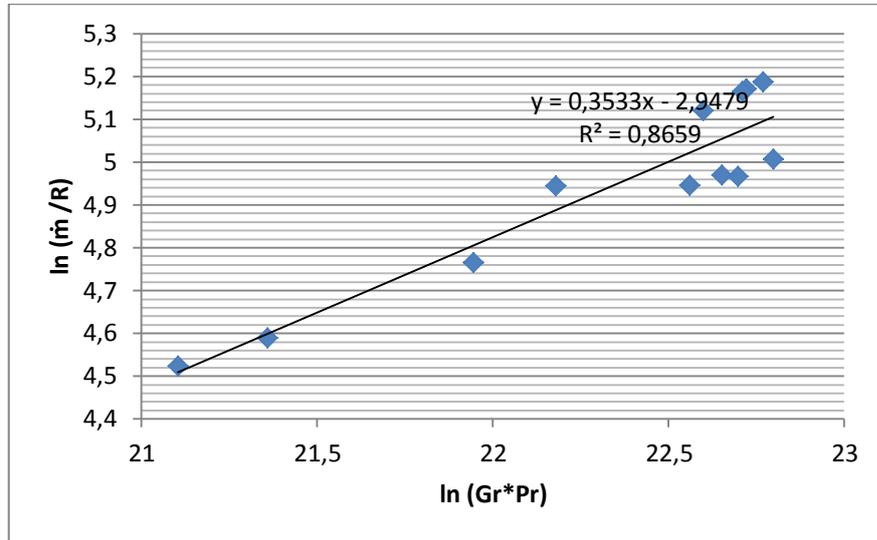
La relation entre le nombre de Grashoff et le nombre de Prandtl s'écrit :

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (3)$$

c	n	Intervalle de validité	Observation
$0,2 < C < 0,6$	1/4	$Gr < 10^9$	Convection laminaire
$0,05 < C < 0,15$	1/3	$Gr > 10^9$	Convection turbulente

**Tableau D.1:** Valeurs des constante "n et c" intervenant dans le nombre de Nusselt [44]

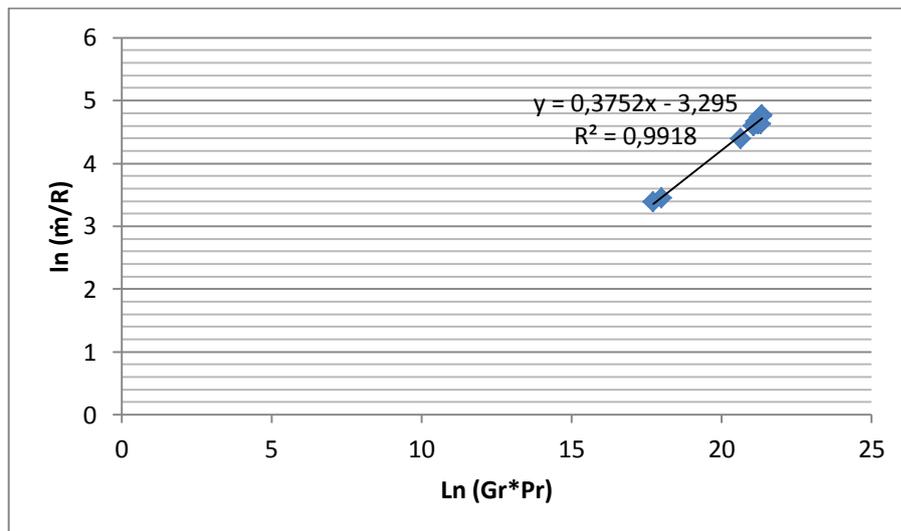
Le coefficient C dépend du régime de convection et de la géométrie.



**Figure D.2 :** Linéarisation, géométrie rectangulaire

$$n = 0,035$$

$$C' = 0,05$$



**Figure D.2 :** Linéarisation, géométrie carrée

$$n = 0,37$$

$$C' = 0,037$$

