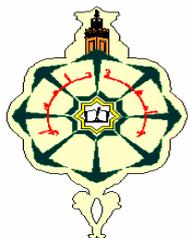


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID -TLEMCEM
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



MEMOIRE
PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MASTER EN
HYDRAULIQUE
OPTION : TECHNOLOGIE DE TRAITEMENT DES EAUX

THEME

ETUDE DE LA DISTILLATION DES
EAUX SAUMATRES PAR ENERGIE
SOLAIRE

Elaboré Par :

Mouâd BENBEKHTI

Devant le jury :

Président
Encadreur
Co-Encadreur
Examinateur
Examinateur

Mr. A. BOUANANI
Mr. A. CHIBOUB
Mr. N. BABA AHMED
Mme. H. DJEDID
Mr. T.E.A. TERKI HASSAINE

Professeur
Professeur
Maitre assistant classe A
Maitre assistant classe A
Maitre assistant classe A

ANNEE UNIVERSITAIRE 2012/2013

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents et mes grands-mères

A mes frères et ma sœur

A tous mes amis et collègues

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciement

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui m'a donné la volonté et le courage pour avoir accompli ce travail.

J'exprime mes remerciements les plus chaleureux à Mr A. CHIBOUB, professeur à l'université Abou Bekr Belkaid TLEMCEM, pour le sujet de recherche qu'il m'a proposé, et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour tout son aide scientifique, sa disponibilité, ses conseils, sa gentillesse et surtout l'intérêt qu'il a porté à mon travail et l'attention toute particulière accordée à la lecture et à la correction de ce mémoire.

Mes remerciements vont à Mr N. BABA AHMED, maître assistant classe A à l'université Abou Bekr Belkaid TLEMCEM, pour sa gentillesse, son aide et ses conseils précieux tout le long du travail.

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à Mr A. BOUANANI, professeur à l'université Abou Bekr Belkaid TLEMCEEN, qui a bien voulu accepter de présider le jury de soutenance.

Mes vifs remerciements s'adressent également à :

Mme H. DJEDID, maître assistant classe A à l'université Abou Bekr Belkaid TLEMCEEN.

Mr T.E.A. TERKI HASSAINE, maître assistant classe A à l'université Abou Bekr Belkaid TLEMCEEN.

D'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer à mon jury de mémoire.

Tous mes remerciements et mon estime à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Abstract

Supply drinking water became the most alarming problem of our time, since the demand for water grows while the natural resources decrease or tend to disappear. One of the solutions which can contribute to the increase in the water potentialities is the desalination of sea water or brackish water. The most adequate process to carry out this desalination is solar distillation, considering its simplicity, its lower cost and especially the availability of the source of energy.

The aim of our work has been to study the effect of externals and internals parameters on the working characteristics of a solar still in order to optimize those parameters and improve the out put and the production.

The system of equations of the working of the solar still in transition regime has been established. A mathematical simulation has been carried to get results that show the effect of externals and internals, the incident solar radiation which is the most influent factor on the behavior of solar still, wherever the velocity of wind and ambient temperature. It's appear that thermo physical proprieties and construction have a important role on the improve of the still efficiency, a good optimization of those parameters make rising the efficiency and out put of the solar still.

Key words: solar still, transition regime, production, performance, out put

ملخص

إمدادات مياه الشرب قد أصبحت المشكل الأكبر في عصرنا , حيث يتزايد الطلب على المياه في حين أن الموارد الطبيعية تنقص أو تميل إلى الزوال . أحد الحلول التي يمكن أن تساعد على زيادة وفرة المياه الصالحة للشرب، تحلية مياه البحر أو المياه قليلة الملوحة. أنسب طريقة لذلك هو تقطير وتحلية المياه بالطاقة الشمسية، وذلك نظرا لبساطتها وانخفاض التكلفة وخاصة توفر مصدر الطاقة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير العوامل الداخلية والخارجية على عمل المقطر وكيفية إيجاد الاستعمال الأمثل لهذه العوامل، وبالتالي تحسين الإنتاج والمردود والأداء. نظام المعادلات التي تحكم تشغيل المقطر نظام انتقالي انشأ من أجله المحاكاة الرياضية وقد أعطت النتائج التي تظهر بوضوح أثر العوامل الداخلية والخارجية. الإشعاع الشمسي الذي لا يزال العامل الأكبر تأثيرا على سلوك المقطر الشمسي. يبدو أيضا أن العوامل الترموفيزيائية والعناصر المكونة له تلعب دورا هاما جدا في تحسين أداء المقطر، التحكم الأمثل في هذه العناصر يمكن أن يزيد من كفاءة وفعالية المقطر. الكلمات المفتاح : التقطير الشمسي - نظام انتقالي - الإنتاج - الأداء - المردود.

Résumé

L'approvisionnement en eau potable est devenu le problème le plus préoccupant de notre époque, puisque la demande en eau croît tandis que les ressources naturelles diminuent ou tendent à disparaître. Une des solutions qui peut contribuer à l'augmentation des potentialités en eau est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Le procédé le plus adéquat pour effectuer ce dessalement est la distillation solaire, vu sa simplicité, son moindre coût et surtout la disponibilité de la source d'énergie.

Notre travail a pour but l'étude de l'influence des paramètres internes et externes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire afin d'optimiser ces paramètres et améliorer ainsi sa production et ses performances.

Le système d'équations gouvernant le fonctionnement du distillateur en régime transitoire a été établi. Une simulation mathématique a permis d'obtenir des résultats qui montrent clairement l'effet des paramètres externes et internes notamment, l'irradiation solaire incidente qui reste le facteur le plus influant sur le comportement du distillateur, ainsi que la vitesse du vent et la température ambiante, sur la production et la performance du distillateur solaire. Il apparaît en outre que les paramètres thermophysiques et de construction jouent également un rôle très important dans l'amélioration du rendement du distillateur, une bonne optimisation de ces derniers permet d'augmenter le rendement et l'efficacité du distillateur de façon considérable.

Mots clés : *Distillation solaire - Régime transitoire - Production - Performance- Rendement.*

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| LISTES DES FIGURES | i |
| LISTE DES TABLEAUX | v |
| NOMENCLATURE | vii |
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| PARTIE THEORIQUE | |
| Chapitre I : Généralité sur les techniques de dessalement | 3 |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Historique | 3 |
| I.3. Les eaux à dessaler | 3 |
| I.3.1. Les besoins et les ressources d'eau | 4 |
| I.3.2. Classification des eaux | 5 |
| I.4. Qualité de l'eau potable | 6 |
| I.5. Schéma général d'une installation de dessalement | 7 |
| I.6. Techniques de dessalement d'eau | 7 |
| I.6.1. Les procédés à membrane | 8 |
| I.6.1.1. L'électrodialyse | 8 |
| I.6.1.2. L'osmose inverse | 10 |
| I.6.2. Les procédés de distillation | 10 |
| I.6.2.1. Principe de la distillation | 11 |
| I.6.2.2. Distillation simple effet | 11 |
| I.6.2.2.1. Bilan énergétique | 12 |
| I.6.2.3. Distillation à multiples effets | 13 |
| I.6.2.3.1. Bilan énergétique | 14 |
| I.6.2.4. La distillation à détente successives ou Multi stage flash (MSF) | 15 |
| I.6.2.5. Distillation par compression de la vapeur | 16 |
| I.7. Distillation solaire | 18 |
| I.7.1. Historique | 18 |
| I.7.2. Principe | 20 |
| I.7.3. Le distillateur solaire | 21 |
| I.7.3.1. L'effet de serre | 21 |
| I.7.3.2. Principe de fonctionnement | 22 |
| I.7.4. Différents types de distillateurs solaires | 23 |
| I.7.4.1. Distillateurs statiques | 23 |
| I.7.4.2. Distillateurs à ruissellement | 25 |

| | |
|--|----|
| Chapitre II : Estimation de l'irradiation solaire | 27 |
| II.1. Le soleil | 27 |
| II.2. Aspects géométriques du rayonnement solaire | 28 |
| II.2.1. Mouvement de la terre | 29 |
| II.2.2. Les coordonnées célestes | 30 |
| II.2.2.1. Les coordonnées géographiques | 30 |
| II.2.2.2. Les coordonnées horaires | 31 |
| II.2.2.3. Les coordonnées horizontales | 33 |
| II.2.3. les temps solaires | 33 |
| II.2.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V) | 33 |
| II.2.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M) | 33 |
| II.2.3.3. Le temps universel (T.U) | 33 |
| II.2.3.4. Le temps légal (T.L) | 34 |
| II.3. Aspects énergétiques du rayonnement solaire | 35 |
| II.3.1. L'atmosphère terrestre | 35 |
| II.3.2. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère | 36 |
| II.3.3. Rayonnement solaire au sol | 37 |
| II.3.3.1. Rayonnement direct | 37 |
| II.3.3.2. Rayonnement diffus | 38 |
| II.3.3.3. Rayonnement global | 39 |
| | |
| Chapitre III : Étude théorique du distillateur solaire | 40 |
| III.1. Les paramètre influant sur le fonctionnement du distillateur | 40 |
| III.1.1. Paramètres Internes | 40 |
| III.1.1.1. Paramètres de construction | 40 |
| III.1.1.2. Paramètres thermophysiques | 41 |
| III.1.1.3. Paramètres optiques | 42 |
| III.1.1.4. Paramètre de fonctionnement | 42 |
| III.1.2. Paramètres Externes | 42 |
| III.1.2.1. Paramètres météorologiques | 42 |
| III.1.2.2. Paramètres Géographiques | 43 |
| III.2. Conception objective pour un distillateur solaire efficace | 43 |
| III.3. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur | 44 |
| III.3.1. Le rendement | 44 |
| III.3.2. L'efficacité | 44 |
| III.3.2.1. L'efficacité globale | 44 |
| III.3.2.2. L'efficacité interne | 45 |
| III.3.3. La performance | 46 |

| | |
|---|----|
| III.4. Bilans énergétiques dans un distillateur simple | 47 |
| III.4.1. Échanges de chaleur à l'intérieur du distillateur | 47 |
| III.4.2. Échanges de chaleur à l'extérieur du distillateur | 47 |
| III.4.3. Modélisation mathématique | 47 |
| III.4.4. Expression des différents coefficients de transfert de chaleur | 52 |
| III.4.5. Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur | 57 |

PARTIE EXPERIMENTALE

| | |
|--|-----|
| Chapitre IV : Matériels et méthodes | 61 |
| IV.1. Introduction | 61 |
| IV.2. Matériels utilisés | 62 |
| IV.2.1. Absorbeur | 63 |
| IV.2.2. Couverture transparente | 64 |
| IV.2.3. Boîtier et matériau isolant | 64 |
| IV.3. Principe de fonctionnement du distillateur simple effet | 65 |
| IV.4. Procédure d'essais | 66 |
| IV.4.1. Dimensionnement du distillateur | 66 |
| IV.4.1.1. Schémas du dispositif expérimental | 67 |
| IV.4.1.2. Boîtier | 68 |
| IV.4.1.3. Absorbeur | 68 |
| IV.4.1.4. Couverture transparente | 68 |
| IV.4.1.5. Matériau isolant | 69 |
| IV.4.1.6. Système d'étanchéité | 69 |
| IV.4.1.7. Système de collecte | 69 |
| IV.4.1.8. Terrain d'expérimentation | 70 |
| IV.4.1.9. Coordonnées géographiques | 70 |
| IV.5. Résultats | 73 |
| IV.6. Courbes d'évolution et interprétations | 95 |
| IV.6.1. 1^{ere} partie | 95 |
| IV.6.1.1. Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013 | 95 |
| IV.6.1.2. Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013 | 99 |
| IV.6.1.3. Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013 | 102 |
| IV.6.1.4. Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013 | 106 |
| IV.6.2. 2^{eme} partie | 110 |
| IV.6.2.1. Journées du 02, 03 et 04 aout 2013 | 110 |
| IV.6.2.2. Journées du 05, 06 et 07 aout 2013 | 114 |
| IV.6.2.3. Journées du 10, 11 et 13 aout 2013 | 118 |
| CONCLUSION | 122 |
| BIBLIOGRAPHIE | 124 |

LISTES DES FIGURES.....Numéros de pages

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Schéma général d'une installation de dessalement | 7 |
| Figure I.2 : Unité électrodialyse | 9 |
| Figure I.3 : principe de l'osmose inverse | 10 |
| Figure I.4 : Principe de distillation à simple effet | 12 |
| Figure I.5 : Procédé de dessalement par distillation à multiples effets MED... 14 | |
| Figure I.6 : distillateur à Multi stage flash | 16 |
| Figure I.7 : distillateur à compression de la vapeur | 17 |
| Figure I.8 : Principe de la distillation solaire..... | 21 |
| Figure I-9 : Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple..... | 22 |
| Figure I.10 : Distillateurs dits 'hôt box' | 23 |
| Figure I.11 : Distillateurs à cascades (ou à marche)..... | 24 |
| Figure I.12 : Distillateur équi – courant | 25 |
| Figure I.13 : Distillateur à contre-courant | 25 |
| Figure II.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère... 28 | |
| Figure II.2 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil | 29 |
| Figure II.3 : Les coordonnées géographiques | 30 |
| Figure II.4 : Les coordonnées horaires | 31 |
| Figure II.5 : Les coordonnées horizontales | 32 |
| Figure II.6 : Fuseau horaire..... | 34 |
| Figure II.7 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol... 36 | |
| Figure II.8 : Spectre du rayonnement atmosphérique..... | 37 |
| Figure III.1 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire | 48 |
| Figure IV.1 : Schéma descriptif du distillateur simple effet à couvercle en verre incliné..... | 63 |
| Figure IV.2 : Principe de fonctionnement du distillateur simple effet | 66 |
| Figure IV.3 : distillateur simple effet avec une isolation en bois bien sec peint en blanc..... | 67 |
| Figure IV.4 : distillateur simple effet avec une isolation en bois bien sec peint en blanc et couvert d'une feuille d'aluminium déposée sur du plastique transparent..... | 67 |
| Figure IV.5 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)..... | 95 |
| Figure IV.6 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)..... | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV.7 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)..... | 96 |
| Figure IV.8 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)..... | 97 |
| Figure IV.9 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)..... | 97 |
| Figure IV.10 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)..... | 98 |
| Figure IV.11 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)..... | 99 |
| Figure IV.12 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)..... | 99 |
| Figure IV.13 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)..... | 100 |
| Figure IV.14 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)..... | 100 |
| Figure IV.15 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)..... | 101 |
| Figure IV.16 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)..... | 101 |
| Figure IV.17 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)..... | 102 |
| Figure IV.18 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)..... | 103 |
| Figure IV.19 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)..... | 103 |
| Figure IV.20 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)..... | 104 |
| Figure IV.21 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)..... | 104 |
| Figure IV.22 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)..... | 105 |
| Figure IV.23 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)..... | 106 |
| Figure IV.24 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV.25 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)..... | 107 |
| Figure IV.26 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)..... | 107 |
| Figure IV.27 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)..... | 108 |
| Figure IV.28 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)..... | 108 |
| Figure IV.29 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)..... | 110 |
| Figure IV.30 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)..... | 110 |
| Figure IV.31 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)..... | 111 |
| Figure IV.32 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)..... | 111 |
| Figure IV.33 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)..... | 112 |
| Figure IV.34 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)..... | 112 |
| Figure IV.35 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)..... | 114 |
| Figure IV.36 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)..... | 114 |
| Figure IV.37 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)..... | 115 |
| Figure IV.38 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)..... | 115 |
| Figure IV.39 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)..... | 116 |
| Figure IV.40 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)..... | 116 |
| Figure IV.41 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)..... | 118 |
| Figure IV.42 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)..... | 118 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV.43 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)..... | 119 |
| Figure IV.44 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)..... | 119 |
| Figure IV.45 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)..... | 120 |
| Figure IV.46 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)..... | 120 |

| LISTE DES TABLEAUX | Numéros de pages |
|---|-------------------------|
| Tableau I.1 : Distribution des ressources en eau dans le monde entier | 5 |
| Tableau I.2 : Classification des eaux selon la salinité | 6 |
| Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique | 38 |
| Tableau II.2 : Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude | 38 |
| Tableau II.3 : Valeurs de l'albédo du sol " ρ " | 39 |
| Tableau III.1 : Analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques | 49 |
| Tableau IV.1 : Dimensions du boitier | 68 |
| Tableau IV.2 : Dimensions du vitre | 68 |
| Tableau IV.3 : Journée du 14 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 15 juillet h =6,75 mm; C =5 g/l; V=1 l | 74 |
| Tableau IV.4 :Tableau des moyennes (14/07/213) | 74 |
| Tableau IV.5 : Journée du 15 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 16 juillet h =6,75 mm; C =5 g/l; V=1 l | 75 |
| Tableau IV.6 : Tableau des moyennes (15/07/2013) | 75 |
| Tableau IV.7 : Journée du 16 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 17 juillet h =6,75 mm; C =5 g/l; V=1 l | 76 |
| Tableau IV.8 : Tableau des moyennes (16/07/2013) | 76 |
| Tableau IV.9 : Journée du 17 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 18 juillet h =17,75 mm; C =5 g/l; V=3 l | 77 |
| Tableau IV.10 : Tableau des moyennes (17/07/2013) | 77 |
| Tableau IV.11 : Journée du 18 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 19 juillet h =17,75 mm; C =5 g/l; V=3 l | 78 |
| Tableau IV.12 : Tableau des moyennes (18/07/2013) | 78 |
| Tableau IV.13 : Journée du 19 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 20 juillet h =17,75 mm; C =5 g/l; V=3 l | 79 |
| Tableau IV.14 : Tableau des moyennes (19/07/2013) | 79 |
| Tableau IV.15 : Journée du 22 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 23 juillet h =19,5 mm; C =5 g/l; V=5 l | 80 |
| Tableau IV.16 : Tableau des moyennes (22/07/2013) | 80 |
| Tableau IV.17 : Journée du 23 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 24 juillet h =19,5 mm; C =5 g/l; V=5 l | 81 |
| Tableau IV.18 : Tableau des moyennes (23/07/2013) | 81 |
| Tableau IV.19 : Journée du 24 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 25 juillet h =19,5 mm; C =5 g/l; V=5 l | 82 |

| | |
|---|----|
| Tableau IV.20 : Tableau des moyennes (24/07/2013) | 82 |
| Tableau IV.21 : Journée du 25 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 26 juillet h =39,75 mm; C =5 g/l; V=7 l | 83 |
| Tableau IV.22 : Tableau des moyennes (25/07/2013) | 83 |
| Tableau IV.23 : Journée du 26 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 27 juillet h =39,75 mm; C =5 g/l; V=7 l | 84 |
| Tableau IV.24 : Tableau des moyennes (26/07/2013) | 84 |
| Tableau IV.25 : Journée du 27 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 28 juillet h =39,75 mm; C =5 g/l; V=7 l | 85 |
| Tableau IV.26 : Tableau des moyennes (27/07/2013) | 85 |
| Tableau IV.27 : Journée du 02 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 03 aout h =17,75 mm; C =2 g/l; V=3 l | 86 |
| Tableau IV.28 : Tableau des moyennes (02/08/2013) | 86 |
| Tableau IV.29 : Journée du 03 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 04 aout h =17,75 mm; C =2 g/l; V=3 l | 87 |
| Tableau IV.30 : Tableau des moyennes (03/08/2013) | 87 |
| Tableau IV.31 : Journée du 04 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 05 aout h =17,75 mm; C =2 g/l; V=3 l | 88 |
| Tableau IV.32 : Tableau des moyennes (04/08/2013) | 88 |
| Tableau IV.33 : Journée du 05 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 06 aout h =17,75 mm; C =4 g/l; V=3 l | 89 |
| Tableau IV.34 : Tableau des moyennes (05/08/2013) | 89 |
| Tableau IV.35 : Journée du 06 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 07 aout h =17,75 mm; C =4 g/l; V=3 l | 90 |
| Tableau IV.36 : Tableau des moyennes (06/08/2013) | 90 |
| Tableau IV.37 : Journée du 07 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 08 aout h =17,75 mm; C =4 g/l; V=3 l | 91 |
| Tableau IV.38 : Tableau des moyennes (07/08/2013) | 91 |
| Tableau IV.39 : Journée du 10 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 11 aout h =17,75 mm; C =8 g/l; V=3 l | 92 |
| Tableau IV.40 : Tableau des moyennes (10/08/2013) | 92 |
| Tableau IV.41 : Journée du 11 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 12 aout h =17,75 mm; C =8 g/l; V=3 l | 93 |
| Tableau IV.42 : Tableau des moyennes (11/08/2013) | 93 |
| Tableau IV.43 : Journée du 13 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 14 aout h =17,75 mm; C =8 g/l; V=3 l | 94 |
| Tableau IV.44 : Tableau des moyennes (13/08/2013) | 94 |

NOMENCLATURE

A/ Notation latine :

| SYMBOLE | DESIGNATION | UNITE |
|---------|---|--------------------------|
| a | azimuts du soleil, Diffusivité thermique du corps | °, m ² /s |
| Et | Equation de temps | min |
| K | coefficient de transmission globale coefficient d'extinction | W/m ² °C m |
| • m | Débit de masse | kg/s |
| T | Température, coefficient de transmission | K / |
| TU | Temps universel | Heure |
| TSV | le temps solaire vrai | Heure |
| P | Pression de vaporisation Périmètre du boîtier | Pa m |
| A | Surface coefficients de trouble du ciel | m ² / |
| I | Intensité de rayonnement solaire | W / m ² C ° |
| V | vitesse | m/s |
| P | Puissance | W |
| L | la longitude, la chaleur latente, la longueur caractéristique La longueur du conduit | ° kJ/kg m m |
| Z | altitude | m |
| M | Masse | kg |
| B | coefficient de trouble du ciel | / |
| Cp | Chaleur massique à pression constante | J/kg.°C |
| d | Le diamètre du tube | m |
| dt | Taux de calcul | heure |
| FP | le facteur de performance | Kg/J |
| g | accélération | m ² /s |

| | | |
|---|--|------------------|
| G | Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface | W/m ² |
| h | Hauteur du soleil, enthalpie | ° J/kg |
| i | Angle d'incidence | ° |
| m | Le numéro de moi | / |
| n | Nombre du jour de calcul indice de réfraction absolue | / |
| W | La distance entre les tubes | m |

B/ Notation Grecque :

| SYMBOLE | DESIGNATION | UNITE |
|---------------|--|---------------------------------|
| α | Coefficients d'absorption de chaleur | / |
| η | Rendement, efficacité | / |
| λ | Conductivité thermique | W/m°C |
| γ | L'angle horaire | ° |
| τ | Heure de calcul, coefficient de transmission | H / |
| ε | Emissivité | |
| μ | La viscosité dynamique | kg/m.s |
| δ | la déclinaison, épaisseur | °, m |
| ω | l'angle horaire | ° |
| ρ | Masse volumique, albédo | Kg/m ³ |
| Φ | latitude du lieu | ° |
| Σ | Somme | / |
| Δ | décalage | / |
| β | Inclinaison | ° |
| Q | Densité de flux thermique | W/m ² |
| ν | viscosité cinématique | m ² /s |
| σ | Constante de steaffan-boltzman | W/m ² K ⁴ |
| θ | Angle de réfraction | ° |

C / indice

| SYMBOLE | DESIGNATION |
|----------------|---|
| a | Ambiant. absorption |
| b | bac |
| D | Direct |
| d | diffus, distillât |
| c | Convection, capteur |
| ciel | ciel |
| e | Extérieur, eau |
| ef | Entré du fluide |
| eff | effectif |
| évp | évaporation |
| g | Global |
| i | Interne, |
| iso | isolation |
| j | jour |
| c:e_v.i | Par convection entre l'eau et la surface intérieur de la vitre |
| c:ve_a | Par convection entre la surface extérieure et l'ambiance |
| r:e_v.i | Par rayonnement entre l'eau et la surface intérieur de la vitre |
| r:v.e_ciel | Par rayonnement entre la surface extérieure et le ciel |
| r | Réflexion |
| v | Vitre, vaporisation |
| vi | vitre intérieure |
| ve | vitre extérieure |
| c:isoe_a | Par convection entre la surface extérieure de l'isolant et l'ambiance |
| cd:b_iso | Par conduction entre l'absorbeur et l'isolant |
| lat | Latéral |
| av | Avant |
| e appoint | Eau appoint |
| s | Soudure |

D/ Les nombres adimensionnels :

| SYMBOLE | DESIGNATION |
|----------------|--------------------|
| Nu | Nombre de NUSSELT |
| Gr | Nombre de GRASHOFF |
| Pr | Nombre de Prandtl |
| Re | Nombre de Reynolds |
| Pe | Nombre de PECLET |
| Ra | Nombre de Rayleigh |

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale :

La multiplication et l'aggravation des états de carence en eau sont en train de prendre mondialement une dimension de premier ordre. Le niveau des nappes phréatiques est en baisse et menace 1.5 milliards d'habitants sur la planète. Il n'est donc pas exclu que l'eau est amenée à devenir un enjeu stratégique international, pouvant engendrer de graves conflits régionaux [1]. En Algérie, à la fin du siècle passé le déficit de cet or bleu été inquiétant confirmé par les diverses expertises, partant d'hypothèse et usant de méthodologie différentes qui ont toutes conclu que notre pays se trouvera entre 2010 et 2025 confronté à cette pénurie quasi-endémique [1].

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir en matière de dégagement et de mobilisation des ressources en eau. L'Algérie a suivi une planification des ressources en eau conventionnelles et même l'utilisation des ressources en eau non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [2].

Néanmoins, le dessalement nécessite une grande quantité d'énergie dont le coût devient de plus en plus cher. Il paraît a priori intéressant d'envisager l'utilisation de l'énergie solaire(distillation solaire) dans le processus de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres, non plus comme un vecteur écologique, mais aussi comme une réelle alternative aux ressources énergétiques [2].

Dans ce sens, plusieurs études ont été consacrées à la distillation solaire et ayant surtout eu pour but l'amélioration de la performance du distillateur. Cette dernière est exprimée par la quantité d'eau produite par unité de surface et par jour. Cette quantité varie avec la géométrie du distillateur, de l'ensoleillement et des conditions extérieures. Une fois le distillateur est construit et installé, sa géométrie est fixe, la performance du distillateur doit donc être seulement en fonction de l'ensoleillement et des conditions ambiantes [2].

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet des paramètres internes et externes sur le fonctionnement d'un distillateur solaire.

A cet effet, un système d'équation régissant le fonctionnement du distillateur et les différents coefficients d'échange thermique a été établi. Une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, en plus d'une conclusion générale et des recommandations [3].

Le présent travail comporte deux parties théorique et pratique, dont trois premiers chapitres pour la théorie et un chapitre pour la pratique.

- *Le premier chapitre* présente une étude bibliographique concernant les différentes méthodes de dessalement, suivi par un bref historique sur la distillation solaire ainsi que sur les différents types de distillateurs utilisés.

- *Le deuxième chapitre* est consacré à la présentation de quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans toute domaine relatif au solaire.

- *Le troisième chapitre* nous présente les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système, ainsi que les coefficients intervenant dans ce système.

-*Le quatrième chapitre* nous présente le système utilisé et le travail expérimental ainsi que les résultats sous forme des graphes avec leurs interprétations.

Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire.

Chapitre I

Généralité sur les techniques de dessalement

Ce chapitre est consacré à une présentation des connaissances générales sur les techniques de dessalement et surtout la distillation solaire.

Chapitre I : Généralité sur les techniques de dessalement

I.1. Introduction

Les problèmes en relation avec l'eau sont nombreux et très divers. Il n'y a donc aucune solution simple permettant de répondre à sa demande dans n'importe quel pays.

Le dessalement de l'eau marine ou saumâtre est un processus qui permet d'extraire le sel pour la rendre potable ou l'utiliser pour l'irrigation.

I.2. Historique

Dès le IV^{ème} siècle avant JC, Aristote observe le principe de la distillation. Au XII^{ème} siècle, Abélard de Bath décrit deux expériences dans les questions naturelles « au soleil, après l'évaporation sur une roche, l'eau de mer se transforme en sel ; lorsque le soleil fait défaut, on chauffe l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformé en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales ».

Depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente. Dans les années 60, les procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer. Par ailleurs, des recherches sont développées sur les procédés de dessalement.

I.3. Les eaux à dessaler

La terre est recouverte d'eau à 71%. Cependant 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée pour être potable ou même ne serait-ce que pour être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie.

Le problème est que des pays pauvres vont manquer d'eau potable dans les années à venir et cela risque d'engendrer des guerres [4].

I.3.1. Les besoins et les ressources d'eau

Sur le plan mondial, la demande en eau potable de bonne qualité est plus en plus forte. En effet, la population augmente rapidement et les besoins en eau de l'industrie de l'agriculture sont de plus en plus élevés.

Selon le Laboratoire de Contrôle des Eaux (LCE), Assistance Publique Hôpitaux de Marseille, les besoins en eau sont principalement répartis entre 4 types de consommation [5] :

- 55% de l'eau consommée sert à fournir de l'énergie (barrage hydroélectrique, refroidissement des centrales nucléaires, énergie géométrique, etc....).
- 18% est consommée par les particuliers.
- 15% est utilisée par l'agriculture.
- 12% est consacrée par un usage industriel.

Les principales ressources en eau distribuées dans le monde entier représentent dans le tableau suivant [4] :

Tableau I.1: Distribution des ressources en eau dans le monde entier

| Ressources | Volume (m3) | Total pour cent De l'eau | Pou cent de l'eau douce |
|-------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Eau atmosphérique | 12900 | 0.001 | 0.01 |
| Glaciers | 24064000 | 1.72 | 68.7 |
| La glace de sol | 300000 | 0.021 | 0.86 |
| Rivières | 2120 | 0.0002 | 0.006 |
| Lacs | 176400 | 0.013 | 0.026 |
| Marais | 11470 | 0.0008 | 0.03 |
| l'humidité du sol | 16500 | 0.0012 | 0.05 |
| Aquifères | 10530000 | 0.75 | 30.1 |
| Lithosphère | 23400000 | 1.68 | |
| Océans | 1338000000 | 95.81 | |
| Totale | 1396513390 | | |

I.3.2. Classification des eaux

Lorsqu' on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données présentées au **tableau I.2**.

Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes souterraines, contiennent le plus souvent de 2000 à 10000 mg/L de matières dissoutes. Signalons au passage que l'effluent d'une usine d'épuration (traitement biologique) contient environ 750 mg/L de matières dissoutes [6].

Tableau I.2 : Classification des eaux selon la salinité

| Type d'eau | Salinité (mg/L) |
|-------------------------|-----------------|
| Eau douce | <500 |
| Eau légèrement saumâtre | 1000-5000 |
| Eau modérément saumâtre | 5000-15000 |
| Eau très saumâtre | 15000-35000 |
| Eau de mer | 35000-42000 |

I.4. Qualité de l'eau potable

Dans la majorité des cas, l'eau est exclusivement destinée à la consommation humaine et doit dans ce cas être conforme à la réglementation des eaux potable.

Il arrive, cependant qu'une partie de la production soit destinée à une usine à proximité. L'exemple le plus fréquent est celui de la centrale thermique qui exige une eau complètement déminéralisée. L'avantage des procédés se déterminera souvent par la qualité de l'eau douce qu'on veut produire, ainsi le procédé de distillation aura l'avantage par rapport au procédé membranaire lorsqu'il s'agit de produire une eau déminéralisée.

Comme valeur guide, l'OMS fixe par exemple [7]:

- Salinité inférieure ou égale à 1000 mg/l ;
- Les chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/l.

Outre les critères de potabilité, il faut vérifier que l'eau potable n'est ni agressive, ni entartrante vis-à-vis du réseau de distribution aux usagers. Or quelque soit le type de procédé de dessalement retenu, l'eau produite est pratiquement dépourvue de bicarbonate de calcium et montre donc un caractère agressif marqué. Cette

agressivité doit être neutralisée par un post-traitement à déterminé en fonction de la nature des matériaux du réseau et de sa longueur. Il peut prendre des formes allant d'une simple correction de pH jusqu'à une reminéralisation partielle par introduction simultanée de chaux et de dioxyde de carbone [7].

I.5. Schéma général d'une installation de dessalement

Une installation dessalement quelque soit le type de procédé peut être schématiquement subdivisée en quatre postes (figure I.1) [8].

- Une prise d'eau de mer,
- Un poste de traitement éventuellement,
- L'installation de dessalement proprement dite,
- Un post-traitement.

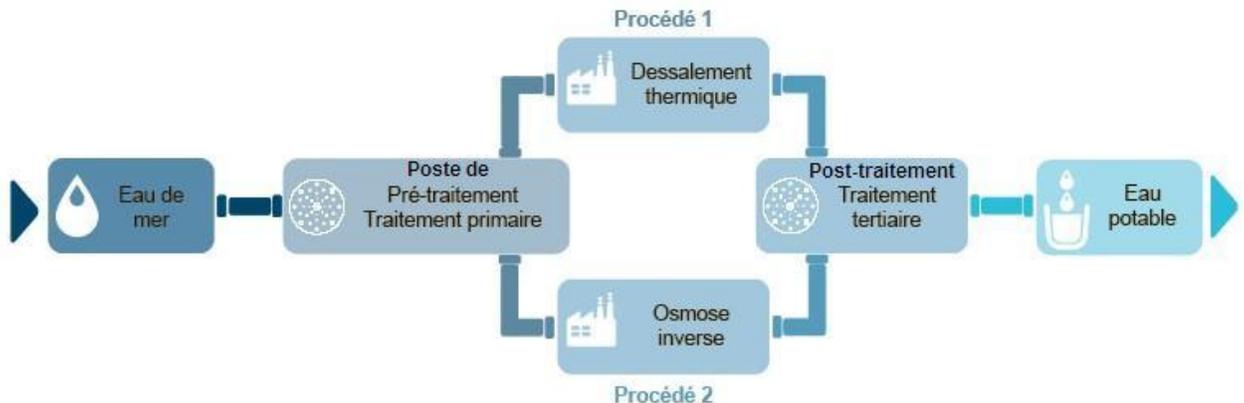


Figure I.1. Schéma général d'une installation de dessalement

I.6. Techniques de dessalement

Il existe essentiellement deux familles de technologies de dessalements utilisés dans le monde d'aujourd'hui. Il s'agit notamment de technologies thermiques et de technologies à membrane.

- Les technologies thermiques sont celles que le chauffage de l'eau fait le recueil de la vapeur condensée (distillation) pour produire de l'eau pure.

Elles sont rarement utilisées pour dessaler l'eau saumâtre (eau de moins de 10000 mg/L de matières en suspension), comme il n'est pas rentable pour cette application. Les technologies thermiques contiennent les éléments de processus de types :

- Distillation à multi stage flash (**MSF**).
- Distillation à effets multiples (**MED**).
- Distillation par compression de la vapeur (**VC**).
- Les technologies à membranes minces, qui utilisent une membrane semi-perméable les alimentant en deux flux de divergents de concentration, un produit courant et de se concentrer. Dans les applications de dessalement, l'alimentation est soit l'eau de mer ou saumâtre.

Les technologies de membrane comportent des spécifiques processus suivants [9]:

- Osmose inverse (**RO**).
- Electrodialyse (**ED**).

I.6.1. Les procédés à membranes

Les principaux procédés à membrane utilisés dans le domaine de dessalements sont: L'électrodialyse et l'osmose inverse.

I.6.1.1. L'électrodialyse

L'électrodialyse repose sur la mise au point et l'utilisation de membranes semi-perméables à l'eau sélectives pour les ions. Ainsi. Seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique. Et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique.

Pour construire un électro dialyseur; on place dans un bac des membranes anioniques en alternance avec des membranes cationiques.

Lorsque le bac est rempli d'une solution; on crée une différence de potentiel continue entre le premier et le dernier compartiment. Le fonctionnement d'un tel électro dialyseur est illustré dans la **figure I.2**. On remarque que les ions du sodium, Na^+ de la cellule n°2, attirés vers l'électrode négative, traversent la membrane cationique C_1 . Tandis que les ions de chlorures, Cl^- , attirés vers l'électrode positive, traversant la membrane anionique A_1 , les ions Na^+ et Cl^- sont ainsi concentrés dans la cellule n°3. En effet dans cette dernière, les ions Na^+ sont attirés vers l'électrode négative, mais ils ne peuvent pas traverser la membrane anionique A_1 et les ions Cl^- , attirés vers l'électrode positive, ne peuvent pas traverser la membrane cationique C_2 . Après un certain temps, on retrouve donc une solution plus concentrée dans les cellules n° 2 et 4. En pratique, on multiplie le nombre de cellules. L'alimentation de ces cellules en eau salée peut avoir lieu en parallèle (figure I. 1.b) ou en série (figure I. 1.a) [10].

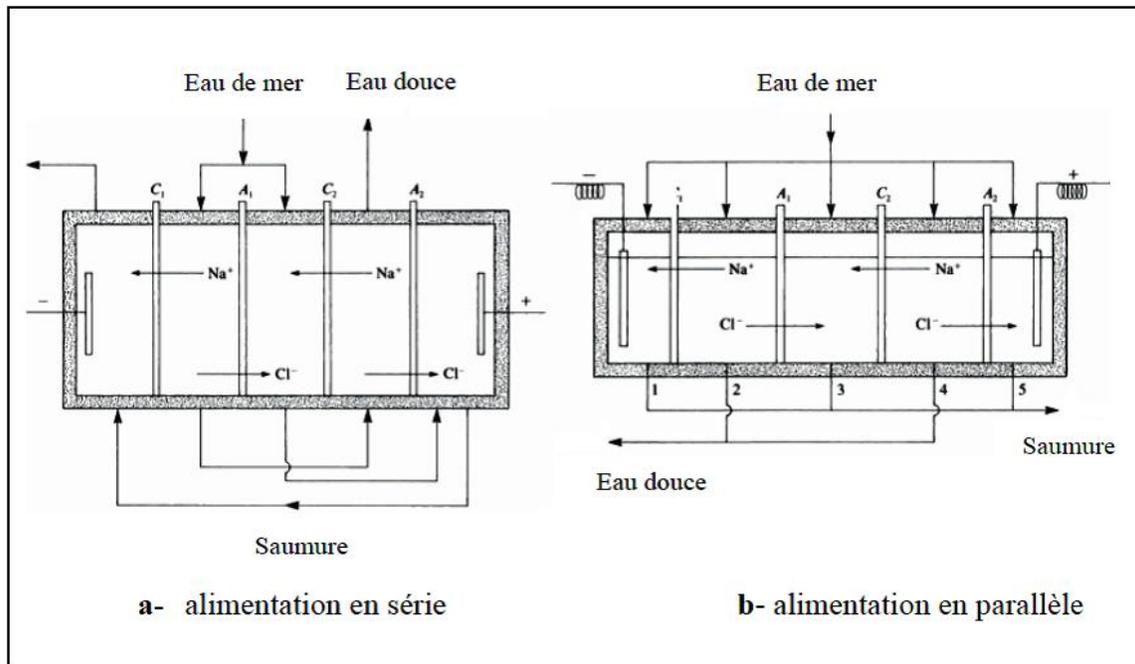


Figure I.2 : Unité électrodialyse

I.6.1.2. L'osmose inverse

L'eau salée est filtrée sous pression à travers une membrane semi-perméable (un matériau qui laisse passer le solvant—l'eau dans notre cas, les sels et les microorganismes sont retenus par ce dernier).

Elle consiste à appliquer à cette eau salée une pression importante, qui nécessite une consommation énergétique élevée, pour la faire passer à travers la membrane, seules les molécules d'eau traversent la membrane.

Ce procédé nécessite toutefois un traitement de l'eau en amont.

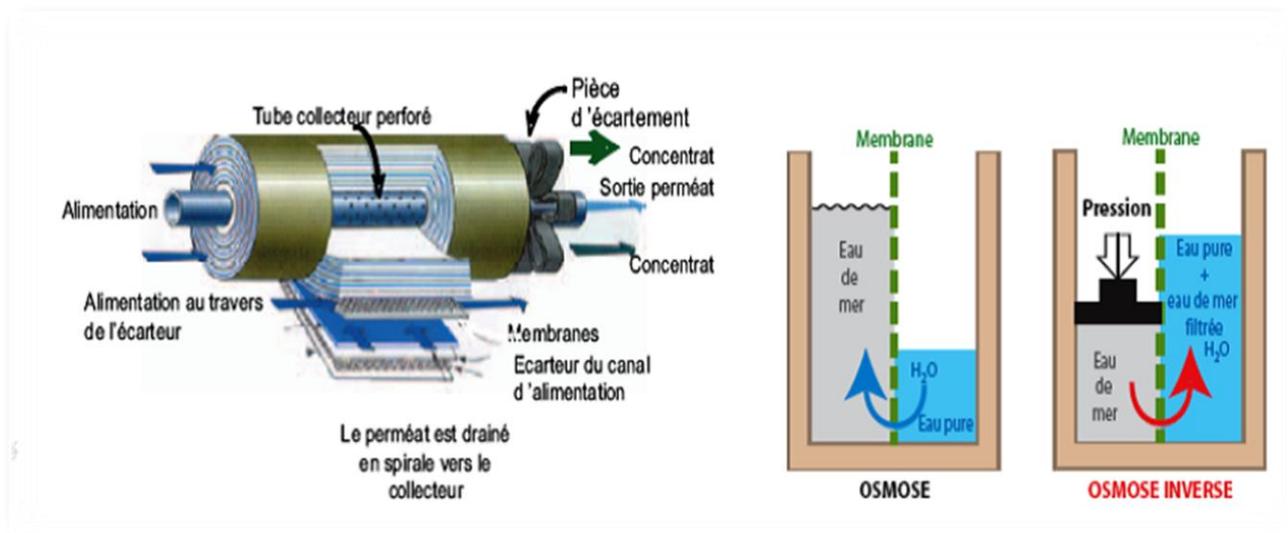


Figure I.3: principe de l'osmose inverse

I.6.2. Les Procédés de distillation

Pour leur fonctionnement, les procédés à distillation nécessitent en grande partie de l'énergie thermique pour assurer le chauffage de l'eau salée. Pour l'eau de mer, De plus cette énergie thermique doit être fournie à un niveau de température relativement faible, entre 60 et 120 °C suivant la technologie adoptée. La source de chaleur peut être fournie, dans le cas d'un couplage solaire, par des capteurs plans ou à concentration.

Les procédés les plus utilisés et qui sont susceptibles d'être couplés à une source d'énergie solaire sont [11] :

- Les procédés à distillation classique tel le procédé à Multi-stage flash, à compression de vapeur.
- La distillation solaire directe à effet de serre qui consiste en un procédé proprement solaire.

I.6.2.1. Principe de la distillation

La distillation est un procédé de séparation de substances, mélangées sous forme liquide. Elle consiste à porter le mélange à ébullition et à recueillir une fraction légère appelée distillat, et une fraction lourde appelée résidu. C'est d'ailleurs ce procédé qui fait en sorte que le sel des mers ne s'évapore pas avec l'eau.

L'eau de mer chauffée émet une vapeur d'eau pure qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est depuis des temps fort anciens[12].

I.6.2.2. Distillation simple effet

Le distillateur simple effet reste un dispositif très présent dans la littérature, malgré son très mauvais rendement énergétique, donc sa quasi-disparition dans le domaine industriel, cela parce que, c'est un dispositif, dont le principe est très facile à comprendre. C'est un puissant moyen pédagogique. Les premières unités industrielles de distillation d'eau de mer sont apparues à bord des navires. C'étaient dans la plupart des cas des bouilleurs simple effet à faisceau noyé.

L'eau de mer est chauffée dans un récipient étanche par de la vapeur circulant dans un faisceau tubulaire plongé dans un récipient étanche par de la vapeur circulant dans un faisceau tubulaire plongé dans l'eau de mer qu'il porte à ébullition.

La vapeur montante produite se condense sur un autre faisceau tubulaire placé dans la partie haute de l'enceinte, parcouru cette fois-ci par de l'eau de mer froide. La vapeur qui se condense est alors recueillie dans un réceptacle (figure I.), La température d'ébullition de l'eau peut être abaissée dans la mesure où l'on réduit la pression dans la chambre d'évaporation [13].

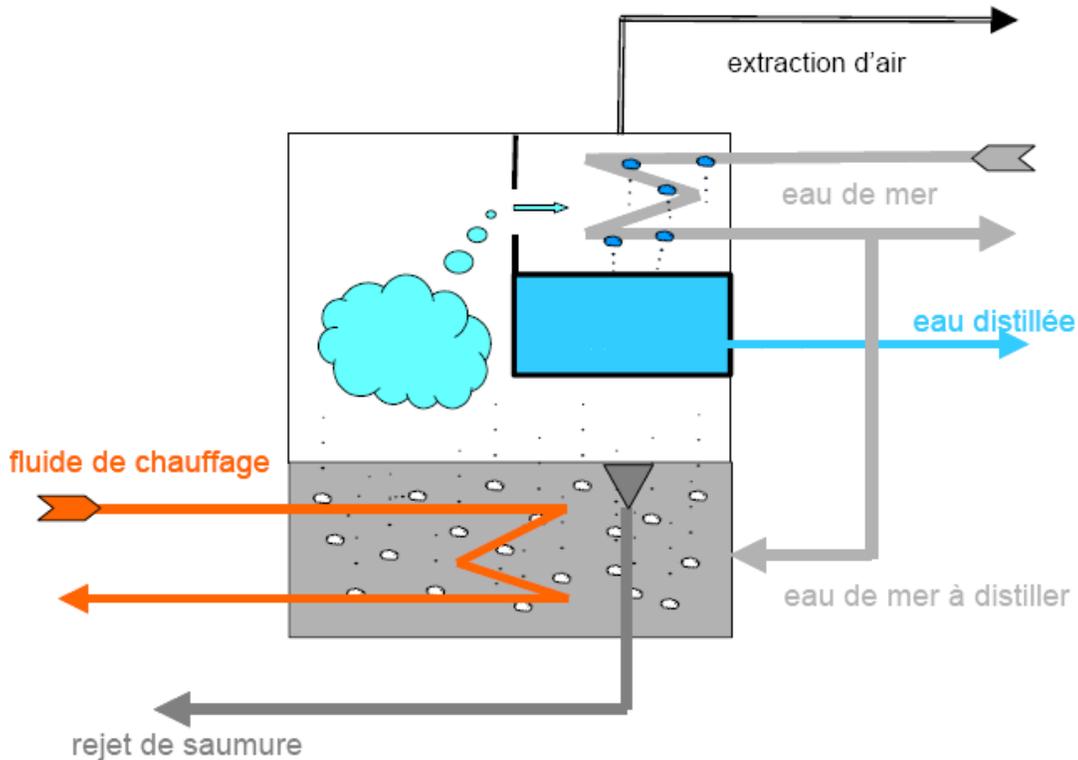


Figure I.4 : Principe de distillation à simple effet

I.6.2.2.1. Bilan énergétique

Compte tenu du fait qu'une partie de la chaleur de condensation de la vapeur est utilisée pour préchauffer l'eau de mer, la consommation spécifique d'énergie est égale à [10]:

$$Q = L + k \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (I.1)$$

avec :

Q : consommation spécifique d'énergie calorifique (kJ/kg) ;

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ/kg) ;

K : rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite ;

Δt : différence de température entre l'eau de mer en ébullition et l'eau de mer à sortie du condensateur (°C) ;

C_p : chaleur spécifique à pression constante de l'eau de mer ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)

I.6.2.3. Distillation à multiples effets

Ce procédé permet d'améliorer la consommation spécifique de l'évaporateur à simple effet afin d'en augmenter le rendement en récupérant la chaleur d'appoint pour une nouvelle distillation et le processus s'effectue comme suit :

- Dans la première cellule de distillation, l'eau de mer ruisselle sur un serpentin de tubes chauffés ou sur des plaques, grâce à la chaudière. Elle se transforme ainsi en vapeur à seulement 70°C, grâce à une pression inférieure à la pression atmosphérique. Cela évite l'entartrage des tuyaux
- L'eau de mer non transformée en vapeur s'accumule au fond de la cellule. Elle se concentre davantage de sels car celui-ci n'est pas vaporisable
- L'eau est pompée, puis envoyée dans la cellule 2
- La vapeur entre dans la deuxième cellule, puis se condense dans le serpentin. Ce passage à l'état liquide dégage assez d'énergie pour en céder à l'eau de mer. Celle-ci ruisselle sur les tubes ainsi chauffés et se vaporise

- Le même processus se répète dans la troisième cellule. En pratique, on peut placer en série jusqu'à 6 ou 7 cellules de distillation
- Le dernier serpentin est refroidi par l'eau de mer

La vapeur condensée dans les serpentins donne de l'eau douce. Il faut 2 à 4 litres d'eau salée pour obtenir 1 litre d'eau douce [14].

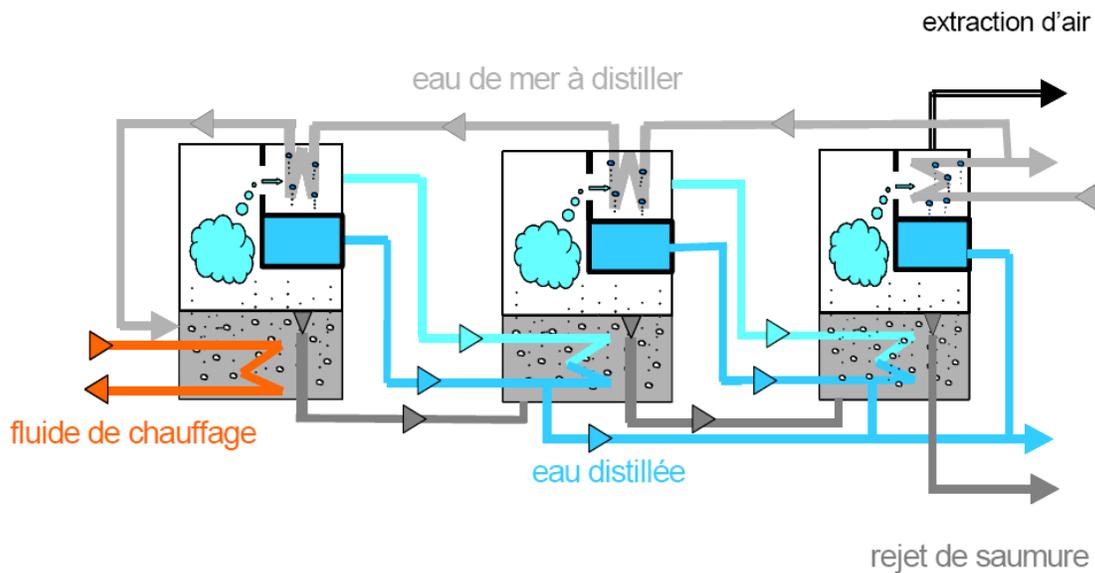


Figure I.5 : Procédé de dessalement par distillation à multiples effetsMED

I.6.2.3.1. Bilan énergétique

La chaleur à fournir à une unité de distillation à multiples effets est uniquement celle qui est nécessaire pour réchauffer l'appoint d'eau de mer dans le premier effet et pour vaporiser la production de ce seul effet.

Si les productions des n effet sont identiques, la consommation spécifique de chaleur est, en négligeant les pertes et certains effets secondaires [13]:

$$Q = L/n + k \cdot C_p \cdot \Delta t \text{ (I.2)}$$

avec :

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

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau en kJ/kg ;

n : nombre d'effets de l'installation ;

K : rapport entre le débit d'appoint d'eau de mer et le débit d'eau douce produite ;

Δt : écart de température existant dans un effet entre l'eau de mer à la sortie du condensateur spécifique de l'eau de mer en °C ;

C_p : chaleur spécifique de l'eau de mer en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$.

I.6.2.4. La distillation à détente successives ou Multi stage flash (MSF)

La distillation Multi-Stage Flash est une autre méthode généralement utilisée pour le dessalement de l'eau. La pratique des performances maximales pour un ratio de MSF est de 5.17 Kg/MJ. Chaque étape d'une usine de MSF fonctionne progressivement à basse pression, que l'eau bouillie à plus faibles températures

(**figure I.6**). Pour cette technique, l'alimentation en eau est chauffée en vertu de suffisamment pression élevée pour empêcher l'ébullition, jusqu'à ce qu'il atteigne le premier "flash chambre." Dans la première chambre de flash. La pression est soudainement remise en liberté et l'évaporation ou «clignotant» a lieu. Ce clignotant d'une petite portion de l'aliment pour animaux continue à chaque étape, parce que la pression dans chacun d'eux est plus faible. Contrairement à l'effet de processus multiples, ce processus régénère et sa vapeur se condense dans le même effet (la scène). Ainsi, ce modèle offre l'avantage de la récupération de la chaleur. C'est l'alimentation en eau en passant par l'échangeur de chaleur dans la section supérieure de la chambre de flash. La vapeur est condensée au niveau de cette échangeur où elle rétrocede sa chaleur latente de vaporisation.

Deux sections distinctes de chaque étape sont les clignotants chambre (où les vapeurs sont produites) et la section de condensation (où les vapeurs sont condensées). La quantité d'eau que les éclairs doit être proportionnel à la différence de température entre les étapes. Ainsi, plus la différence température, plus la quantité de vapeur flashée. Une fois que la vapeur est flashée, le concentré de la température diminue jusqu'à ce qu'elle soit en équilibre thermodynamique avec la pression.

Comme la vapeur est produite, le concentré d'eau devient de plus en plus concentré. La section de condensation contient le tube échangeur de chaleur où les vapeurs sont condensés par refroidisseur d'eau de mer ou l'eau d'alimentation [9].

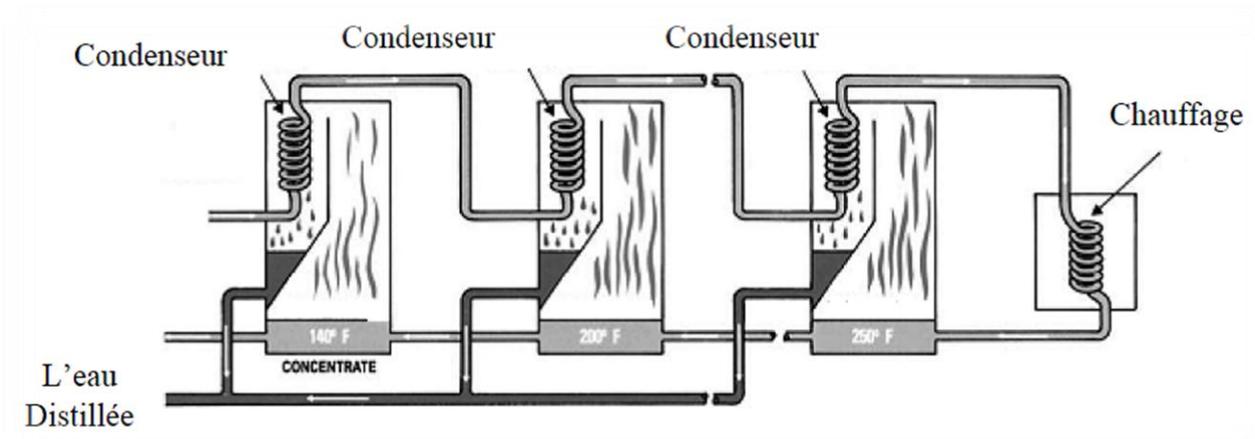


Figure I.6: distillateur à Multi stage flash

I.6.2.5. Distillation par compression de la vapeur

L'eau de mer est portée à ébullition dans une enceinte isolée, la vapeur est aspirée par un compresseur qui élève sa température et sa pression. Cette vapeur est envoyée dans un faisceau tubulaire en bas de l'enceinte, elle se condense en cédant sa chaleur à l'eau de mer qui est portée à ébullition [15]. Ce procédé fonctionne exactement sur le principe d'une pompe à chaleur, où c'est un compresseur qui

fournit l'énergie. La vapeur produite est comprimée adiabatiquement, ce qui accroît sa température de saturation. Lors de sa condensation, elle peut donc transmettre sa chaleur de vaporisation à l'eau salée avec un bon gradient thermique, ce qui permet un bon rendement. Le compresseur assure une faible pression dans la cellule, permettant de fonctionner à une température réduite, d'environ 60°C et d'éviter ainsi l'entartrage. L'avantage du procédé est une faible consommation énergétique sous forme mécanique ou électrique (7 à 8 kWh/m³, pour des grandes installations). Toutefois la capacité des installations à compression de vapeur est limitée par la taille des compresseurs, elles s'étendent aujourd'hui, de 15 à plus de 3800 m³/j [16].

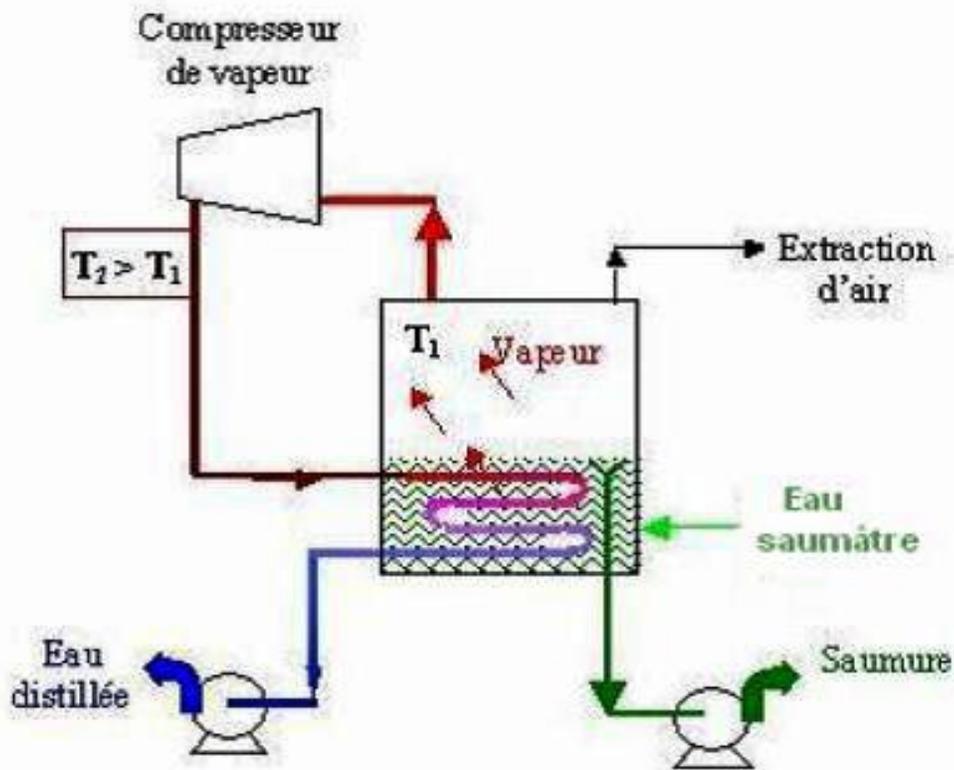


Figure I.7: distillateur à compression de la vapeur

I.7. Distillation solaire

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est désormais envisageable pour répondre à la demande en eau potable. Parmi les différents procédés, la distillation solaire est une solution intéressante pour les régions isolées et/ ou éloignées.

I.7.1. Historique

La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles; mais la plus grande réalisation est apparue en 1872 près de Las- Salinas dans le nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, un ingénieur suédois avec une surface vitrée de 5000m^2 , produisant jusqu'à 20 m^3 d'eau douce par jour à partir d'une eau saline contenant 140g/l .

Ce système fonctionna jusqu'en 1910 à cause d'un problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur. La distillation solaire connut une période creuse entre 1880 et la première guerre mondiale. En 1920, Kaush utilisa des réflecteurs en métal pour concentrer les rayons solaires; il en résulte l'apparition de nouveaux appareils (types toit, couverture en V, plateau incliné...etc.).

Une installation due à Ginistous groupant 30 appareils de 1 m^2 fut réalisée et exploitée à Bengardane en Tunisie en 1929. Au début des années 30, Trifinov proposa un distillateur inclinée; en 1938 Abbot utilisa des réflecteurs cylindriques paraboliques pour concentrer les rayons solaires, le tout est acheminé dans des tubes contenant de l'eau.

Maria Telks inventa en 1945 un nouveau type de distillateur solaire appelé distillateur sphérique, qui fut utilisé par la marine américaine; un grand nombre de ce modèle, environ 2000 a été utilisé pendant la 2ème guerre mondiale. En 1969, Cooper proposa une simulation pour analyser les performances d'un distillateur

solaire type serre. Depuis les années 70, plusieurs autres types de distillateurs ont été élaborés et étudiés, Parmi lesquels :

- le distillateur à effet multiple;
- le plateau incliné ou le distillateur solaire incliné;
- le distillateur solaire type mèche inclinée ou type multiple mèches;
- combinaison du distillateur solaire serre.

Plusieurs pays se sont intéressés à la distillation solaire parmi lesquels:

L'Algérie :

En 1953 Cyril Gomela a développé différents types de distillateurs solaires; plus de 20 distillateurs solaires d'une dizaine de types ont été testés et certains d'entre eux ont été commercialisés à travers l'Afrique du Nord, le Sénégal et l'Australie. Des essais ont été effectués au Sahara de Biskra, à Tamanrasset et Adrar.

L'Australie :

Le CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) a entrepris des recherches sur ce type de distillation, une unité similaire à celle de Gomela a été développée. Entre 1963 et 1967 le CSIRO a construit et testé plus de 8 distillateurs. Le but de ces tests était d'améliorer l'efficacité du distillateur. Une variété de matériaux a été utilisée pour la construction du distillateur [17].

Le Chili :

En plus de l'installation du premier distillateur construit en 1872, d'autres sites de distillateurs inclinés ont été installés entre 1969 et 1970 [17]. Le but de ce travail était de prédire les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur sous différentes conditions atmosphériques.

L'Inde :

En 1957, deux petits distillateurs solaires à effet de serre ont été construits pour étudier les effets de l'inclinaison de la vitre. Il a été constaté qu'un distillateur en verre avec une faible épaisseur de la solution donnait de bon rendement.

Les USA :

Des centres de recherche, dont l'université de Californie ont entrepris, juste après la deuxième guerre mondiale, des recherches sur la distillation solaire. Plusieurs configurations d'un distillateur solaire simple ont été construites et testées pour essayer de réduire d'une part le coût et d'augmenter le rendement d'autre part; les effets de nombreux paramètres, différents matériaux d'isolation ont été étudiés [18].

Plusieurs autres pays (Grèce, Tunisie, Maroc) se sont également consacrés à l'étude de la distillation solaire et ont ainsi réussi à améliorer la production [17].

I.7.2. Principe

La distillation solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. Il s'agit de réaliser artificiellement et à petite échelle ce que la nature fait journalièrement et à grande échelle et qui consiste en, l'absorption de la radiation solaire, par les océans, les lacs, les rivières, provoquant l'évaporation de l'eau. La vapeur produite est transportée, vers des régions plus froides par l'intermédiaire du vent. Quand la vapeur est refroidie, la condensation commence à provoquer des précipitations de pluies et éventuellement de la neige. L'homme a reproduit, en un modèle miniaturisé, ce cycle naturel (Figure I.8).

Il faut distinguer deux catégories de procédés : la distillation solaire par « effet de serre » et la distillation par application d'un des procédés industriels de distillation thermique, la vapeur étant produite non par une chaudière classique, mais par une chaudière solaire. Dans le cadre de ce travail, notre intérêt portera, sur la première catégorie [17].

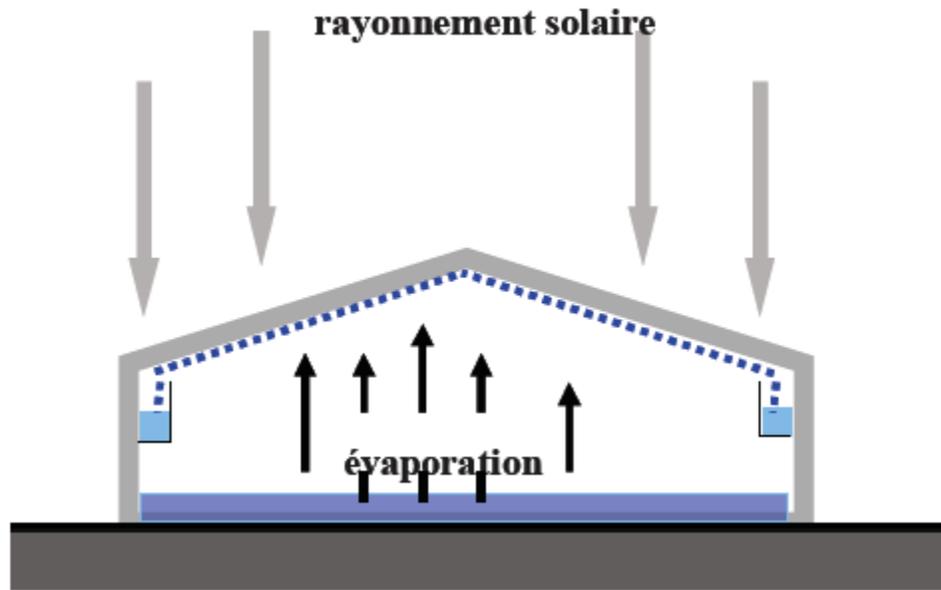


Figure I.8 : Principe de la distillation solaire

I.7.3. Le distillateur solaire

I.7.3.1. L'effet de serre

Le rayonnement solaire apporte de l'énergie sous forme de flux lumineux dans un domaine de longueur d'onde allant de 0.2 à 3.5 *mm* (le visible et le proche de l'infrarouge).

L'énergie incidente traverse une couverture (le plus souvent en verre) transparente aux rayons de faible longueur d'onde, puis elle est absorbée par une surface (noire mate) qui s'échauffe et remet dans le domaine de grandes longueurs d'onde comprises entre 4 à 30 *mm* (infrarouge éloigné) et qui ne peut traverser la vitre réalisant ainsi un piège à calories " l'effet de serre" [18].

II.7.3.2. principe de fonctionnement

Les distillateurs solaires utilisent tous le même principe de fonctionnement; néanmoins, ils peuvent différer les uns des autres en conception et en matériau. Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur l'effet de serre.

L'énergie solaire entrant par la couverture est absorbée par l'eau et le fond noirci; puis elle est transmise à l'air par conduction, convection et rayonnement. Comme les parois sont isolées et le verre opaque aux radiations infrarouges de grandes longueurs d'ondes l'énergie solaire se trouve ainsi emprisonnée (effet serre) et l'air chauffé. (Figure I.6)

La température de la couverture en contact avec l'air atmosphérique étant inférieure à celle du mélange air vapeur d'eau, il se produit une condensation de la vapeur d'eau sur la surface intérieure de la vitre [17].

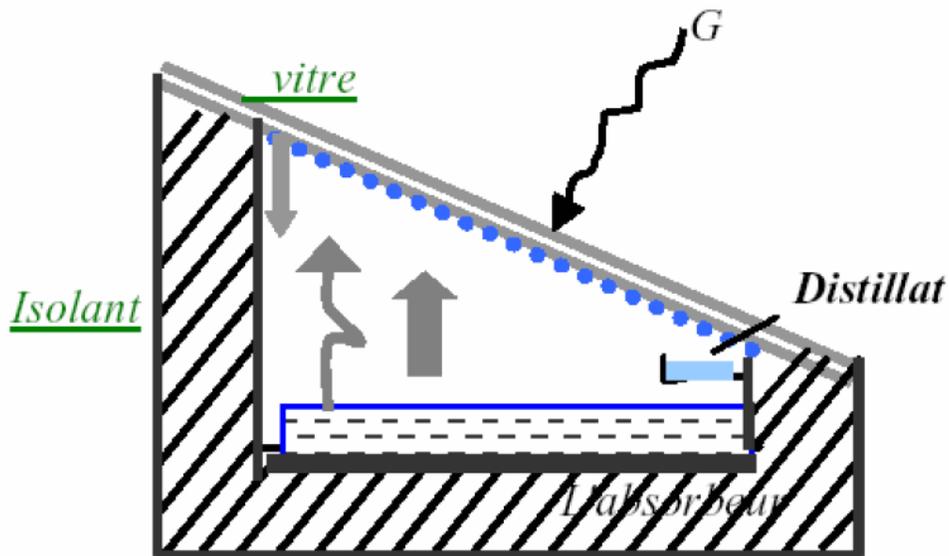


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire simple

I.7.4. Différent types de distillateurs solaires

On distingue deux types de distillateurs solaires à effet de serre, dont la condensation n'est pas séparée de l'évaporation : distillateurs statique et distillateurs à ruissellement.

I.7.4.1. Distillateurs statiques

Ce sont des distillateurs dont la nappe d'eau à distiller est immobile. Les principales géométries rencontrées sont représentées ci-dessous, ils peuvent être soit à simple soit à double vitrage :

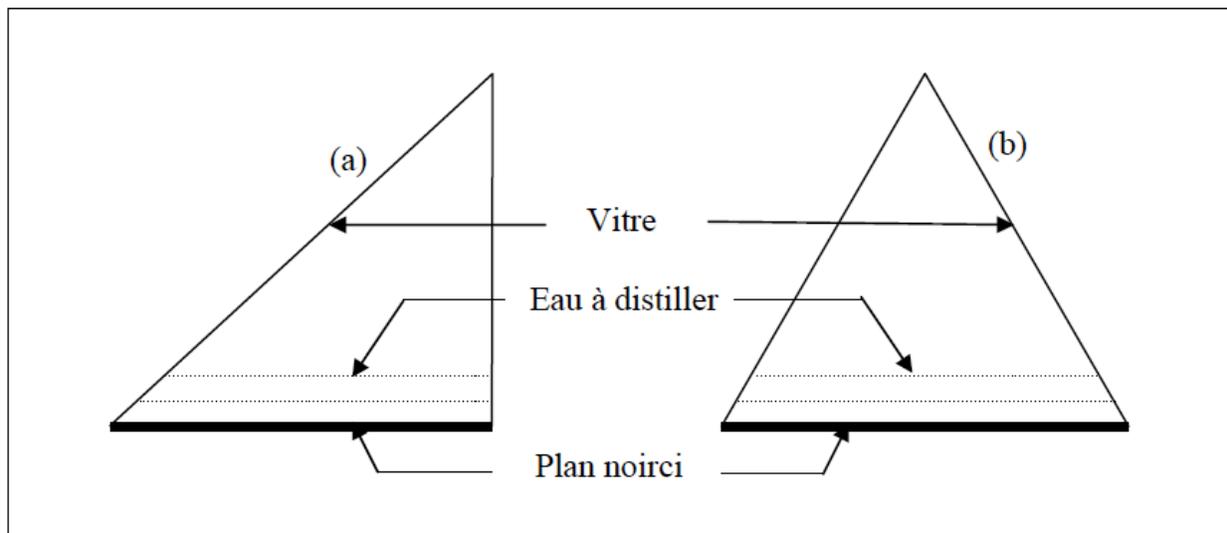


Figure I.10 : Distillateurs dits ‘hôt box’

Les distillateurs (a) et (b) ont la même surface d'évaporation et des surfaces de condensation différentes. L'avantage du distillateur (b), est d'exposer un capteur au soleil et un autre à l'ombre pour accélérer la condensation.

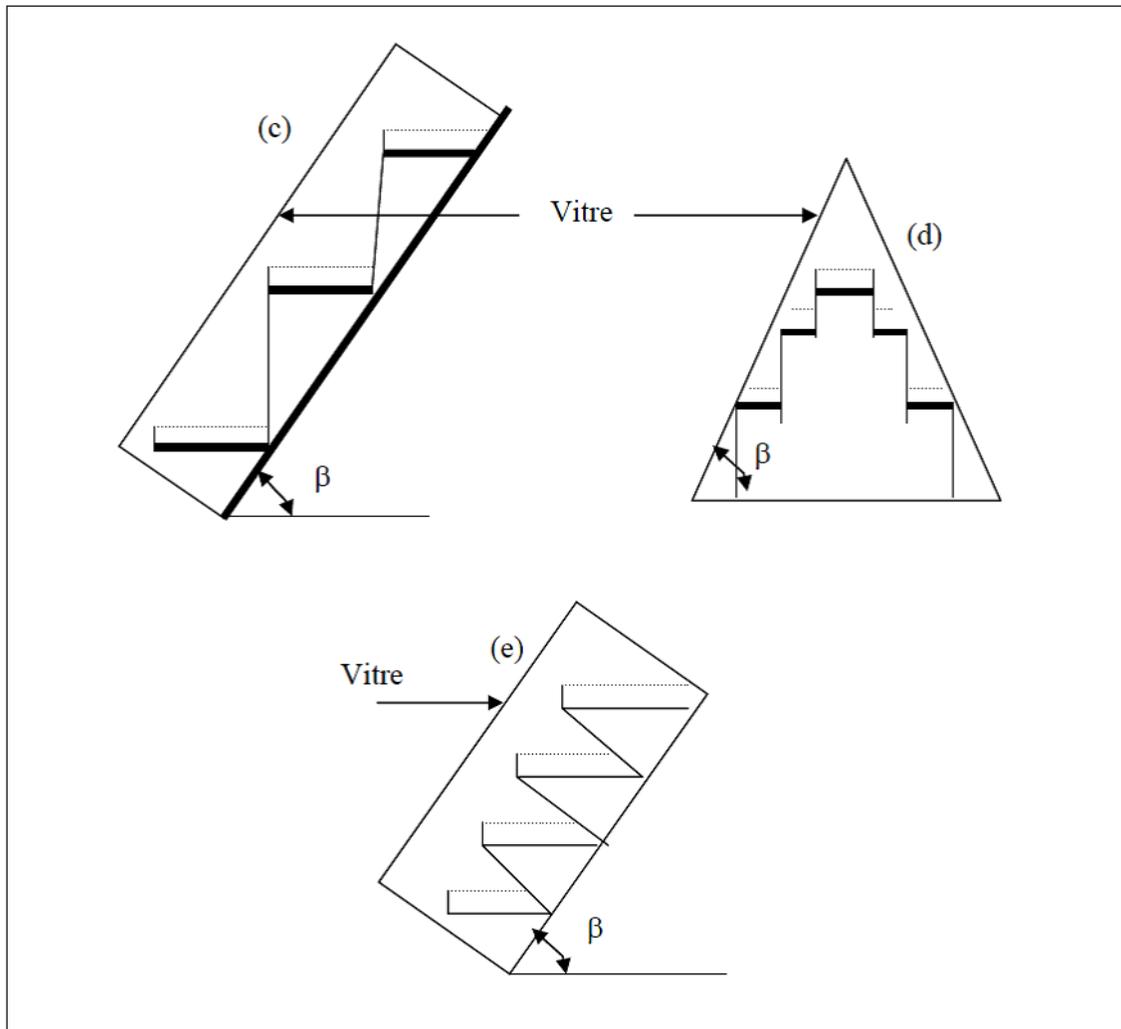


Figure I.11 : Distillateurs à cascades (ou à marche)

Les distillateurs (c) et (d) ont les mêmes surfaces d'évaporation et de condensation que celles des distillateurs (a) et (b), la seule différence est la distance entre les surfaces de condensation et d'évaporation. Quant au distillateur (e), il diffère de (c), par sa surface d'évaporation qui est importante.

I.7.4.2. Distillateurs à ruissellement

Ce sont des distillateurs dont l'eau à distiller est en mouvement. Les différentes géométries rencontrées sont représentées ci-dessous :

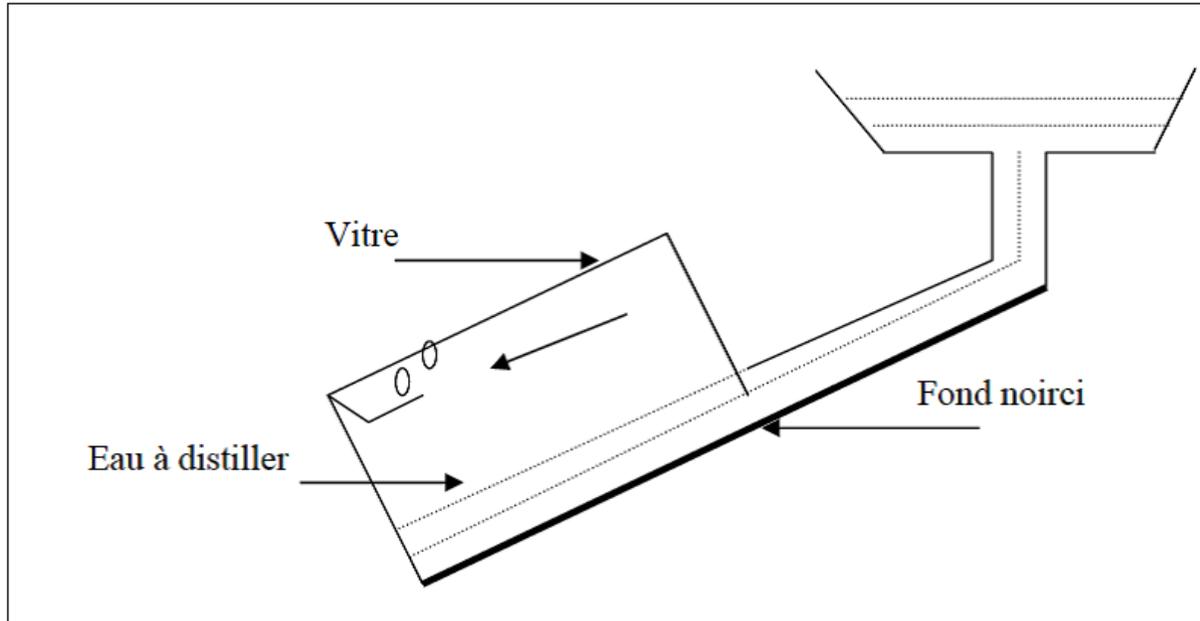


Figure I.12 : Distillateur équi – courant

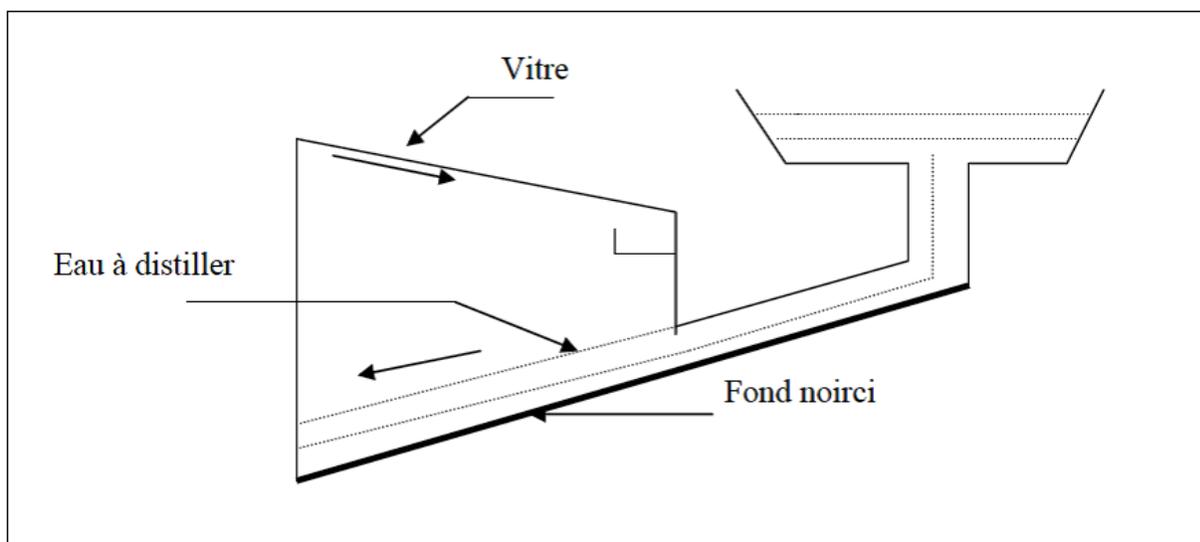


Figure I.13: Distillateur à contre-courant

Les distillateurs à ruissellement présentent, d'une manière générale, une faible inertie thermique et beaucoup d'inconvénients tels que :

- Un réglage difficile du débit
- Une perte de chaleur sensible emportée par l'excédent d'eau non évaporée
- Une utilisation importante d'eau à distiller.

Il existe aussi des distillateurs courants croisés, des distillateurs à mèche (simple ou à double vitrage), des distillateurs auto alimentés.

Pour ces distillateurs, en plus des inconvénients cités, le matériau poreux utilisé se détériore progressivement [19].

Chapitre II

Estimation de l'irradiation solaire

Ce chapitre est consacré à la présentation de quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans toute demain relatif au solaire.

Chapitre II : Estimation de l'irradiation solaire

II.1. Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes [20].

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.10^{14} kw. La terre étant à une distance de 150.10^6 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de $1,8.10^{14}$ kw [20].

La valeur du rayonnement solaire I_C reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne I_0 appelée constante solaire est de l'ordre de $1,356 \text{ kw.m}^{-2}$. En première approximation, on peut calculer la valeur de I_C en fonction du numéro du jour de l'année n_j par la relation [20, 21, 22]:

$$I_C = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times n_j)] \quad (\text{II.1})$$

La répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère est illustrée par la figure II.1.

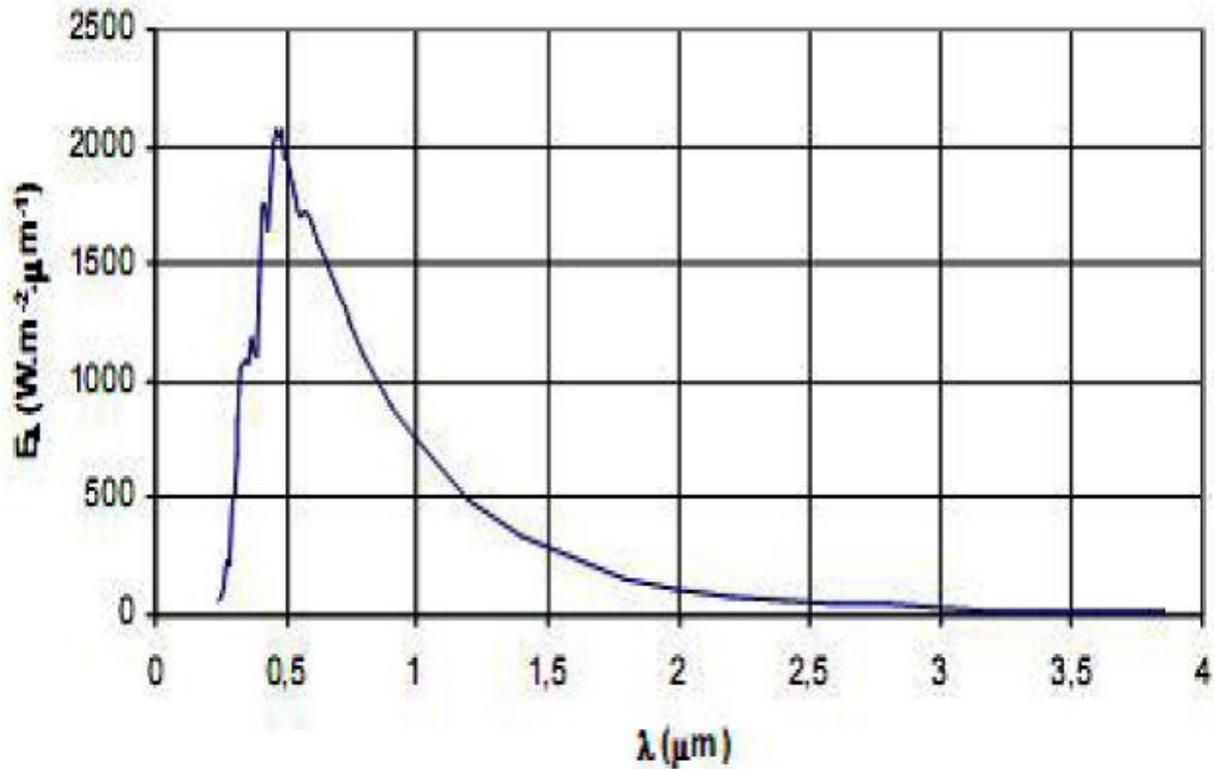


Figure II.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère [18]

On notera que 98 % du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'ondes inférieures à 4 μm . En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de 5777K [23].

II.2. Aspects géométriques du rayonnement solaire

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [21,22].

II.2.1. Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [22].

L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675\,10^6$ km [22].

La terre tourne également sur elle – même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison, de l'ordre de $23^{\circ}27'$ [22].

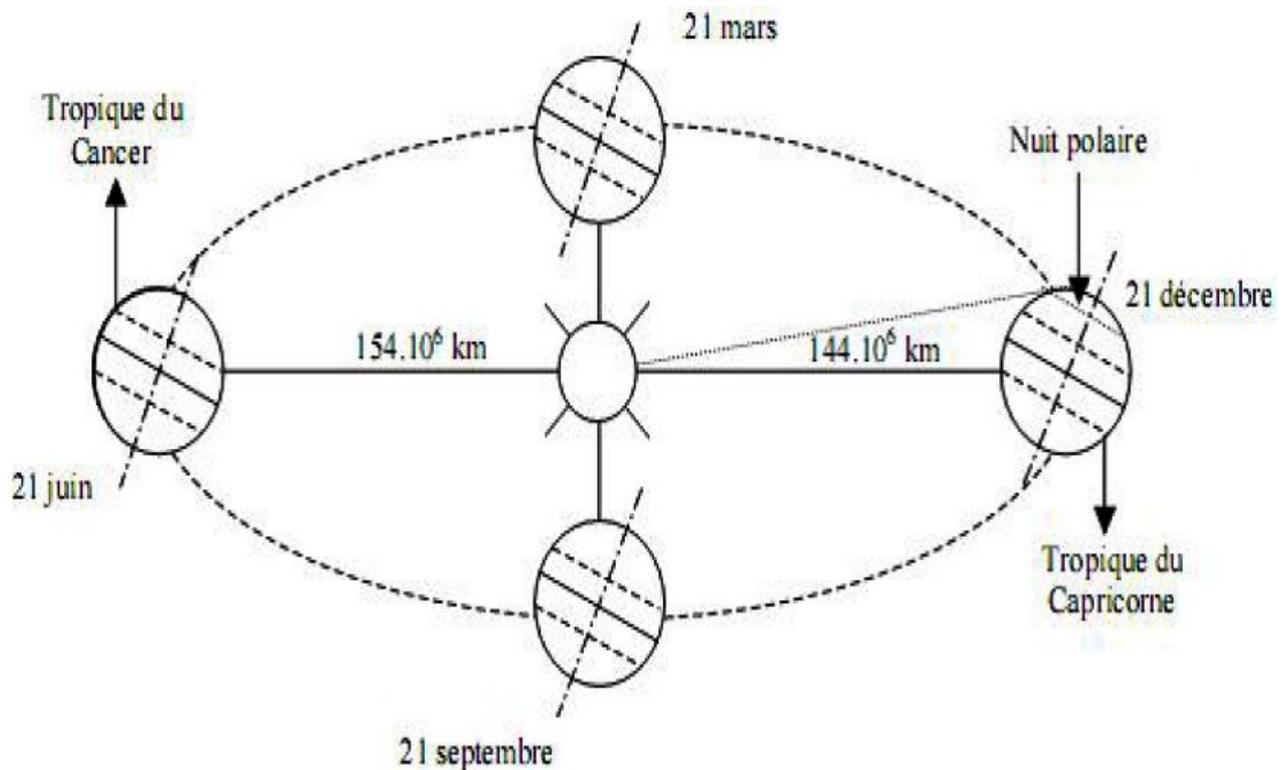


Figure II.2. Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil [19]

II.2.2. Les coordonnées célestes

II.2.2.1. Les coordonnées géographiques

Ce sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre, on distingue notamment :

- **la longitude L** , elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien de **Greenwich**.

- **la latitude Φ** , permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud [21, 22].

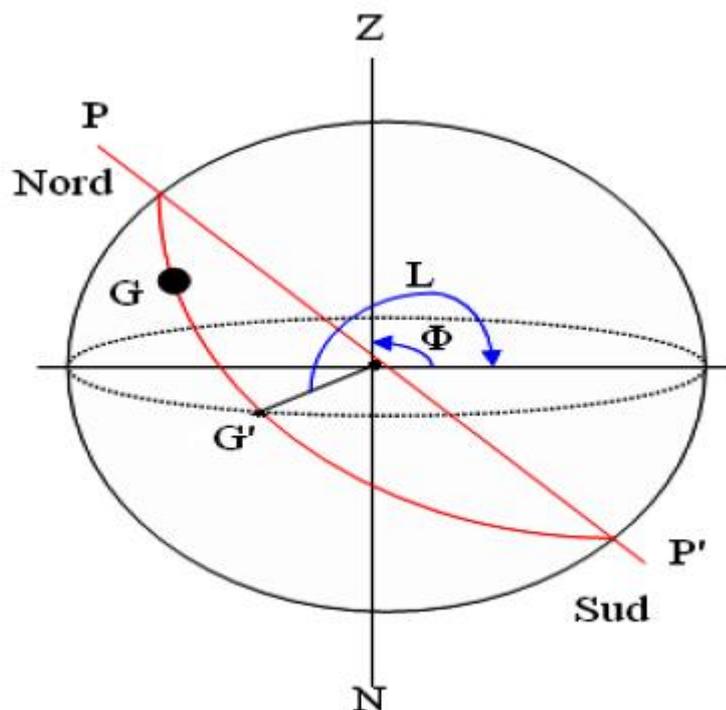


Figure II.3. Les coordonnées géographiques

II.2.2.2. Les coordonnées horaires

Nous citerons :

- **La déclinaison δ** , qui est l'angle que fait le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+ 23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [18, 19, 20] :

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[\frac{284 + n_j}{365} \times 360 \right] \quad (\text{II. 2})$$

δ : la déclinaison mesurée en degrés.

n_j : le numéro du jour dans l'année.

n_j étant le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1^{er} janvier.

- **L'angle horaire ω** , déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

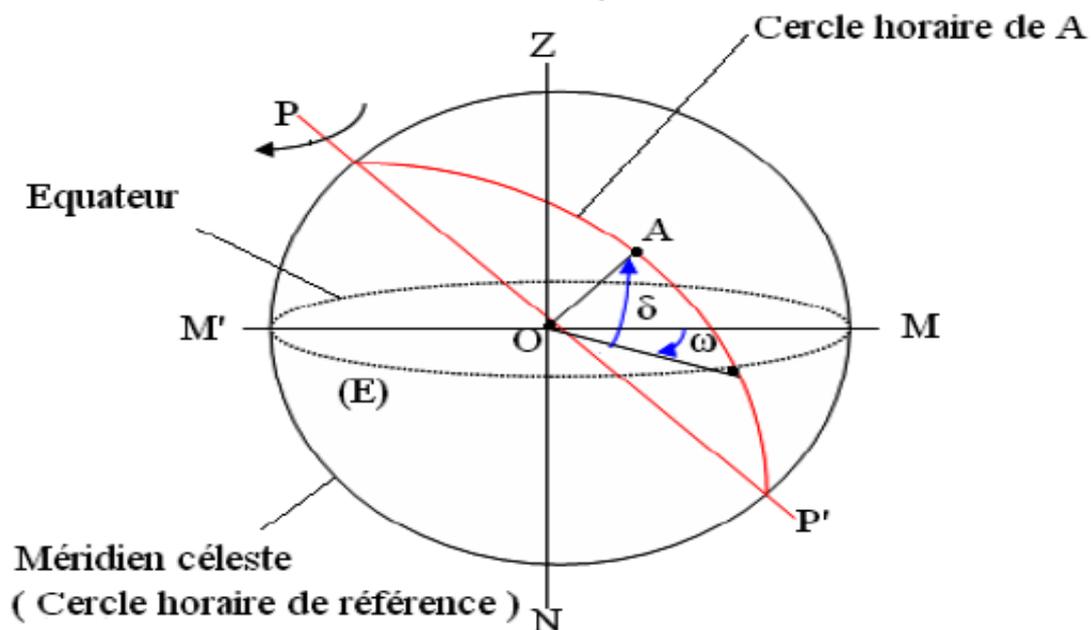


Figure II.4. Les coordonnées horaires

II.2.2.3. Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [21, 22] :

- **L'azimut a** , l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction sud.

- **la hauteur du soleil h** , l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection.

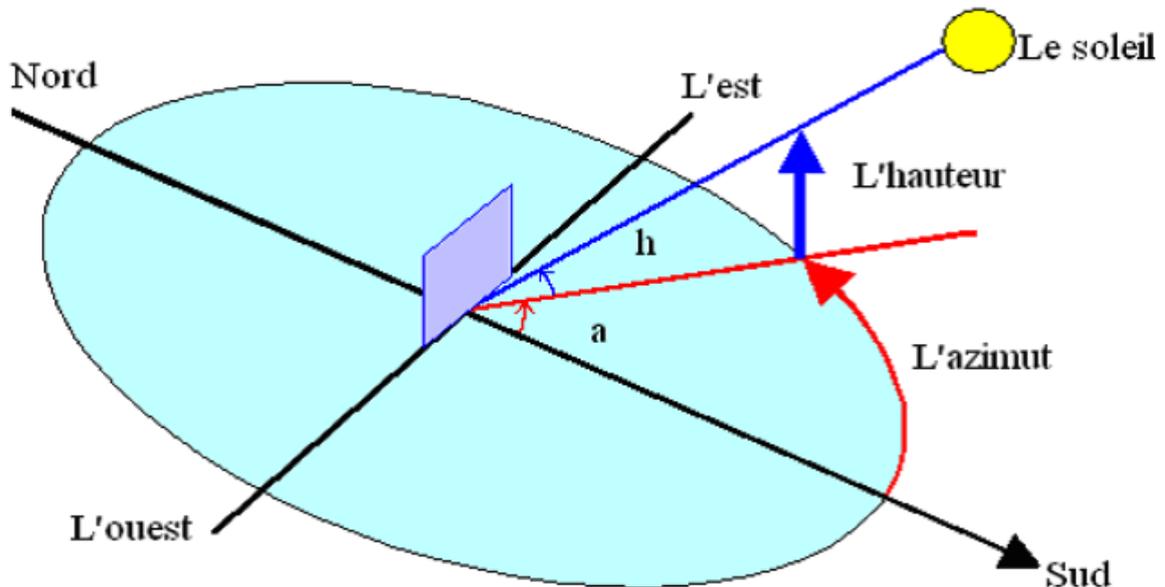


Figure II.5. Les coordonnées horizontales

L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est:

$$\sin(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \sin(\omega)$$

$$\cos(a) \times \cos(h) = \cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\Phi) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)$$

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\Phi) \times \sin(\delta) \quad (\text{II.3})$$

II.2.3. les temps solaires

On distingue :

II.2.3.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)

En un instant et à un lieu donné, le temps solaire vrai est l'angle horaire du soleil ω . Il est donné par l'expression [18, 19] :

$$\text{TSV} = 12 + \omega / 15 \quad (\text{II.4})$$

ω est exprimé en degré.

Si $\omega = 0$, $\text{TSV} = 12^h . 00$

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

II.2.3.2. Le temps solaire moyen (T.S.M)

Il est donné par la relation [18, 19] :

$$\text{TSV} - \text{TSM} = \text{Et} \quad (\text{II.5})$$

Et, est l'équation du temps, qui corrige le **T.S.V** par rapport au **T.S.M**, exprimée par la relation [18, 19] :

$$\text{Et} = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]} \quad (\text{II.6})$$

$$N' = (n_j - 81) \times 360 / 365$$

Où n_j est le numéro du jour dans l'année.

II.2.3.3. Le temps universel (T.U)

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) [21, 22] :

$$\text{TU} = \text{TSM} - L / 15 \quad (\text{II.7})$$

Où L est la longitude.

$L > 0$ pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$ pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$ pour le méridien de Greenwich.

II.2.3.4. Le temps légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [19, 20] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (II.8)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

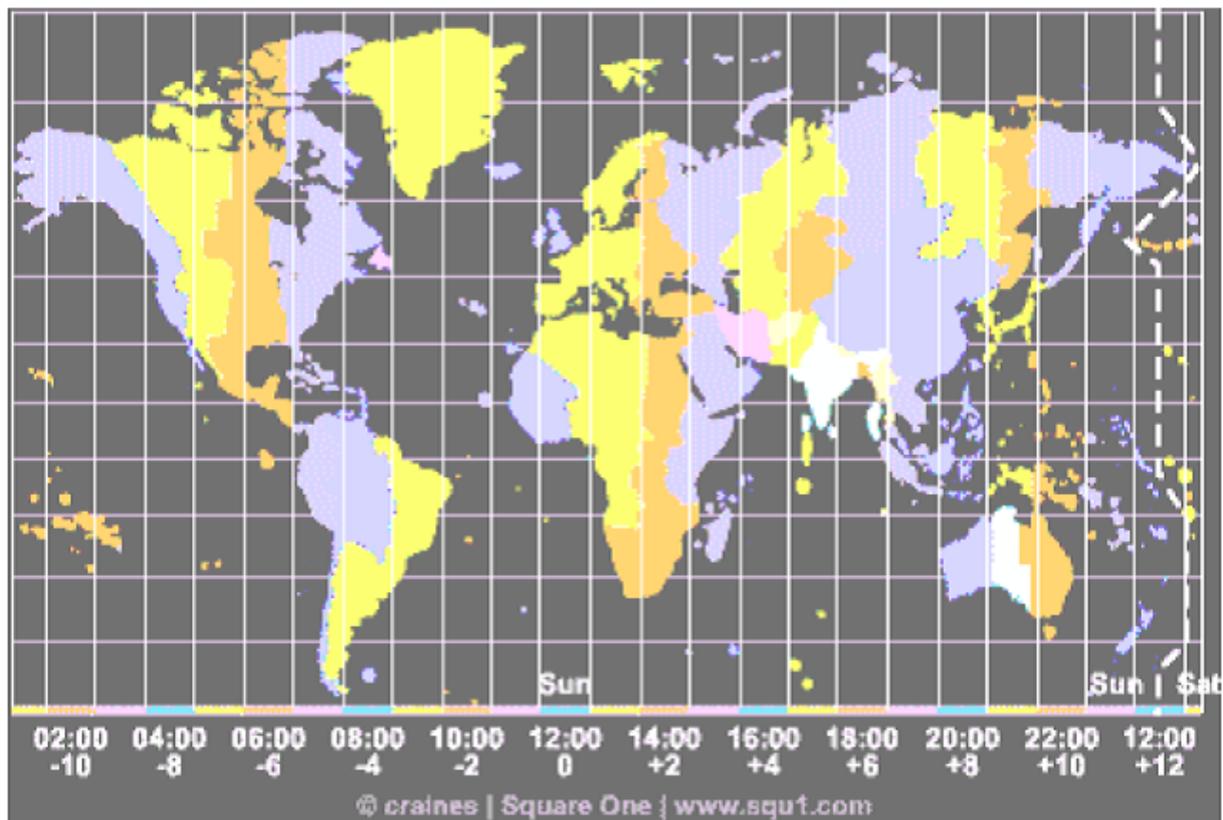


Figure II.6. Fuseau horaire

II.3. Aspects énergétiques du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (poussière, gouttelettes...)

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie, dite directe est anisotrope.

II.3.1. L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, qui sont :

- La troposphère, entre le sol et 15 Km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 Km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 Km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- CO₂ (0.03 %)
- Vapeur d'eau en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- Ozone O₃ située entre 10 et 30 Km d'altitude.
- Aérosols, constitués de grains de sable, poussières, fumées....

La figure II.8 donne la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent selon ce rayonnement selon la longueur d'onde.

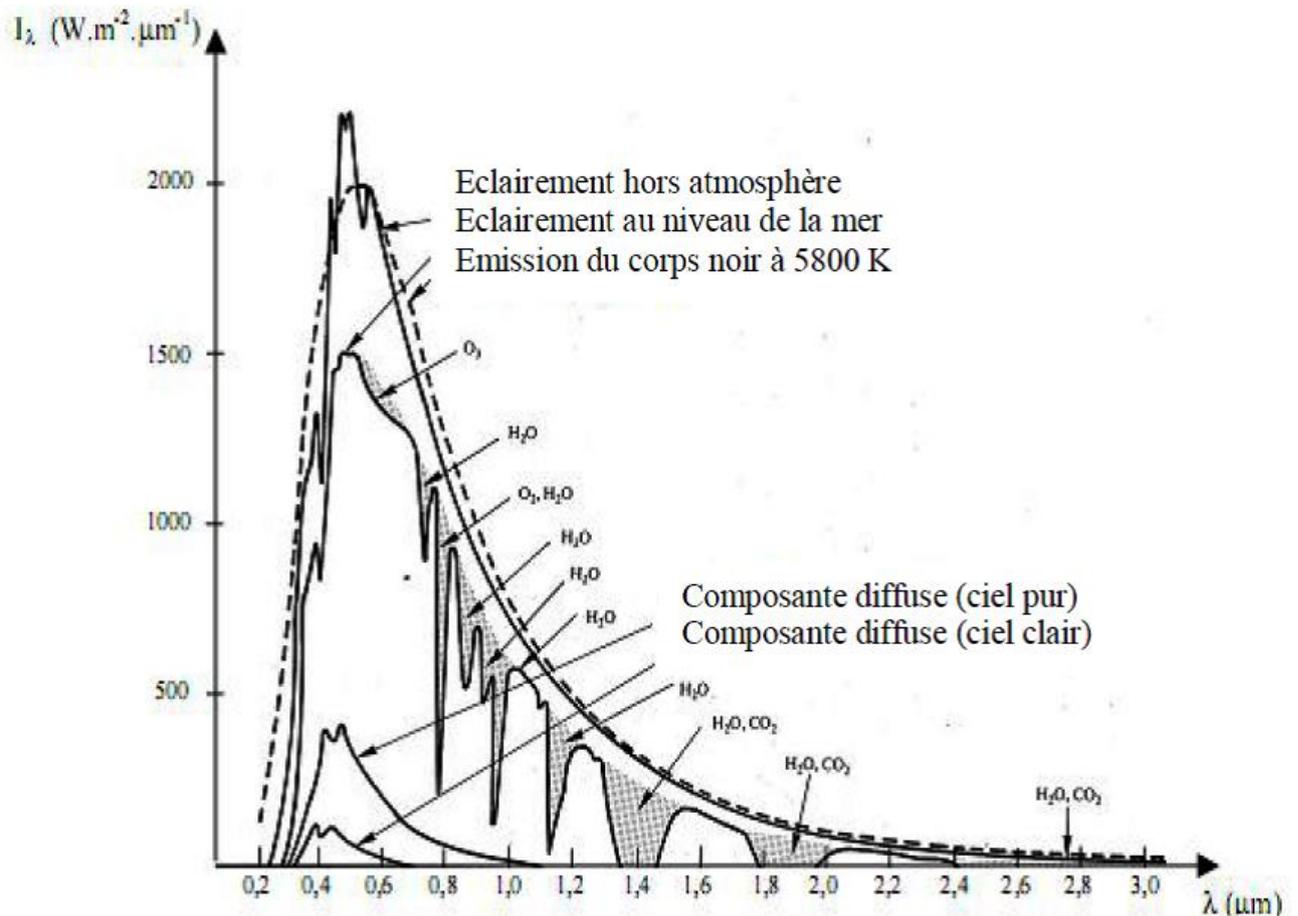


Figure II.8. Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

II.3.2. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers $14.7 \mu\text{m}$ pour le CO_2 .
- Entre 5 et $7 \mu\text{m}$ et entre 14 et $20 \mu\text{m}$ pour la vapeur d'eau.
- Vers $9.6 \mu\text{m}$ pour O_3 .

Ainsi et comme le montre la figure II.9, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'ondes ($> 3 \mu\text{m}$) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à $3 \mu\text{m}$.

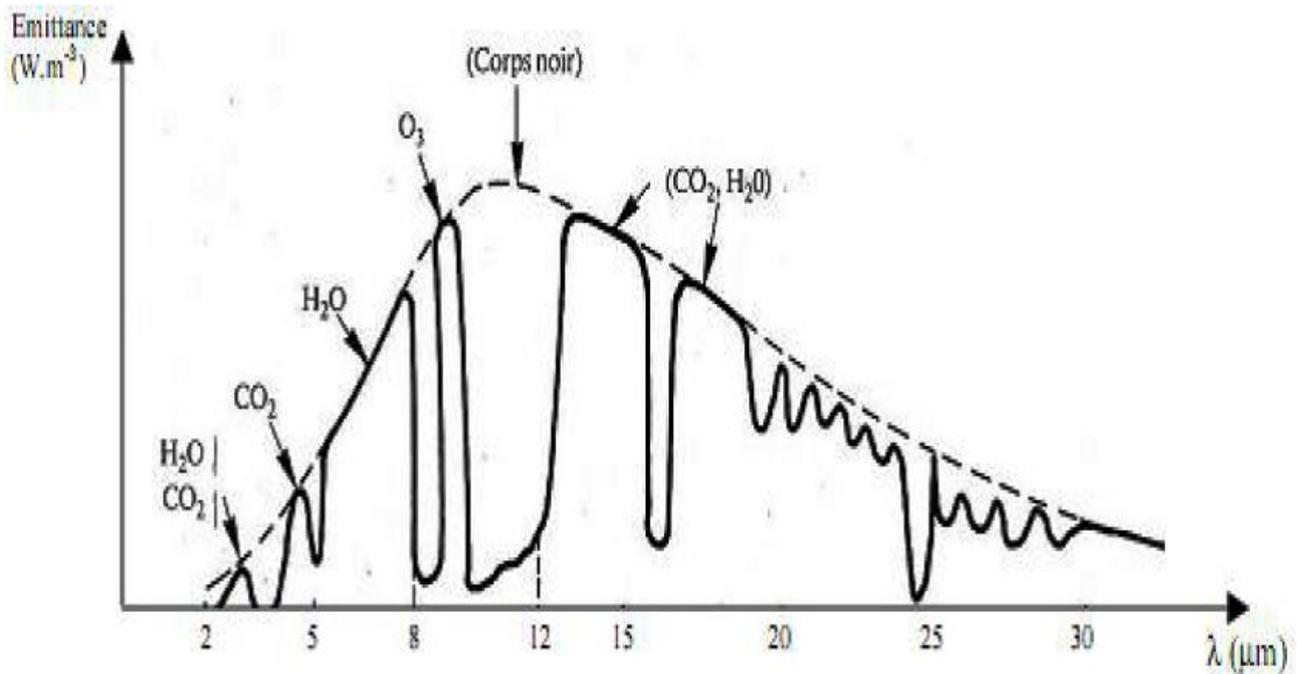


Figure II.9. Spectre du rayonnement atmosphérique

II.3.3. Rayonnement solaire au sol

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.
- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus.

Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

II.3.3.1. Rayonnement direct

L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est

[23, 24, 25, 26]:

$$I_D = I_C \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(\theta)} \times \frac{P}{1000}\right) \times \cos(i) \quad (\text{II. 9})$$

i : l'angle d'incidence (n, N)

a et b , coefficients traduisant les troubles atmosphérique (tableau II.1).

p , la pression atmosphérique en fonction de l'altitude (tableau II.2).

Tableau II.1. Valeurs des coefficients de trouble atmosphérique

| | Ciel pur | Conditions normales | Zone industrielles |
|---|----------|---------------------|--------------------|
| a | 0.87 | 0.88 | 0.91 |
| b | 0.17 | 0.26 | 0.43 |

Tableau II.2. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

| Altitude (m) | 0 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 5000 |
|--------------|------|-----|------|------|------|------|
| P (mbar) | 1000 | 950 | 900 | 850 | 800 | 500 |

II.3.3.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux diffus émit par la voûte céleste (φ_1), donnée par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1 + \cos(b)}{2} \quad (\text{II. 10})$$

- Le flux émis par le sol (φ_2), donné par la relation :

$$\varphi_2 = \rho \times \frac{1 - \cos(b)}{2} \times (I_C \times \tau_{dtr} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (\text{II. 11})$$

Avec :

$$\varphi_0 = I_C \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{dtr}) \quad (\text{II. 12})$$

τ_{dtr} , étant la transmissivité totale de la couche atmosphérique dont l'expression est :

$$\tau_{dtr} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (\text{II. 13})$$

ρ : L'albédo du sol, les valeurs de ce coefficient sont données par le tableau I.3

Tableau II.3. Valeurs de l'albédo du sol" ρ "

| Nature du sol | Neige fraîche | Neige ancienne | Sol rocheux | Sol cultivé | Forêt | Etendue d'eau |
|------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| Valeur de ρ | 0.8-0.9 | 0.5-0.7 | 0.15-0.25 | 0.07-0.14 | 0.06-0.20 | 0.05 |

Le flux diffus s'écrit par conséquent de la manière suivante :

$$I_d = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (\text{II. 14})$$

II.3.3.3. Rayonnement global

Le rayonnement global sur une surface est la somme du rayonnement direct (I_D) et du rayonnement diffus (I_d), soit [18]:

$$I_G = I_D + I_d \quad (\text{II.15})$$

Chapitre III

Etude théorique du distillateur solaire

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique d'un distillateur solaire, Nous présenterons les principaux paramètres de fonctionnement, nous établirons le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur solaire.

Chapitre III : Étude théorique du distillateur solaire

III.1. Les paramètres influant sur le fonctionnement du distillateur

On peut classer les paramètres qui influent sur le fonctionnement du distillateur comme suit [27, 28, et 29] :

- Les paramètres externes.
- Les paramètres internes.

III.1.1. Paramètres internes :

III.1.1.1. Paramètres de construction :

- Couverture :

La couverture verrière intervient essentiellement par sa nature qui peut être en verre ou en plastique. Elle a deux rôles à jouer : d'une part c'est un filtre sélectif de rayonnement solaire (le rayonnement émis ou réémis par l'intérieur du bassin à température basse qui ne la traverse pas) et d'autre part, c'est une surface de condensation de la vapeur d'eau : une bonne mouillabilité est nécessaire pour éviter la condensation en gouttelettes qui ont tendance à retomber dans le bassin et qui réfléchissent une partie importante du rayonnement incident. Pour assurer le ruissellement de l'eau condensée vers la gouttière (collecteur).

- L'inclinaison :

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

- Fonctionnement estival : $\beta = \Phi - 10^\circ$.
- Fonctionnement hivernal : $\beta = \Phi + 20^\circ$.
- Fonctionnement annuel : $\beta = \Phi + 10^\circ$.

- L'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 du bac noir dépend de son inertie thermique, de la résistance à l'oxydation par l'eau et des dépôts minéraux.

- La distance entre la surface d'évaporation et la surface de condensation :

STCUNANTHAN et **HANSEN [30]** ont montré que la performance du distillateur augmente quand la distance entre la saumure et la vitre diminue.

- La hauteur du niveau de la masse d'eau à distiller :

L'épaisseur de l'eau saumâtre joue un rôle très important. La production est plus importante pour un distillateur à faible épaisseur de saumure, mais pour un distillateur de grande épaisseur de la saumure, le maximum de la production n'est observé que peu après le coucher de soleil.

- L'isolation des faces latérales du distillateur :

L'isolation des faces latérales est pour but d'éliminer les pertes (transfert de chaleur avec le milieu extérieur).

III.1.1.2. Paramètres thermophysiques :

Les paramètres thermophysiques sont représentés par :

- ❖ La couverture et la surface absorbante : la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique.
- ❖ La saumure : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, la chaleur latente de vaporisation, le coefficient de dilatation thermique et la diffusivité thermique.

- ❖ Le mélange air-vapeur : la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique, la viscosité cinématique, le coefficient de dilatation thermique.

III.1.1.3. Paramètres optiques :

Ce sont les paramètres optiques (l'émissivité, l'absorptivité, la réflectivité et la transmittivité) de la surface de la couverture et de la surface absorbante.

III.1.1.4. Paramètre de fonctionnement :

Ces paramètres sont les différentes températures du système et du fluide, en particulier la température de l'eau à distiller.

III.1.2. Paramètres Externes :

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

III.1.2.1. Paramètres météorologiques :

a) Intensité du Rayonnement Solaire :

b) La température ambiante de l'air et la vitesse du vent :

Aux températures de saumure élevées, augmenter la différence de température entre la saumure et la vitre en augmentant la vitesse de vent, en baissant la température ambiante. Par contre, aux températures faibles de la saumure, et en augmentant la vitesse du vent revient à faire chuter le taux d'évaporation.

c) L'intermittence des nuages :

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface dépend des paramètres A, et B qui dépendent de la nature de ciel.

Cela revient à dire que le passage des nuages diminue l'absorptance effective moyenne.

III.1.2.2. Paramètres Géographiques :

Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur de soleil, sont à prendre en considération dans cette étude.

III.2. Conception objective pour un distillateur solaire efficace :

Pour un rendement élevé, le distillateur solaire devrait maintenir :

- une température d'eau d'alimentation élevée.
- Une grande différence de température entre l'eau d'alimentation et la surface

de condensation.

- Une faible fuite de la vapeur.

Une grande différence de la température peut être effectuée si :

- ✓ La surface de la condensation absorbe peu ou rien le rayonnement entrant.
- ✓ L'eau de condensation absorbe la chaleur qui doit être enlevée rapidement de la surface de condensation.

En plus on doit surveiller les éléments suivants :

- Emplacement

Les distillateurs solaires fonctionnent à l'aide de l'énergie solaire directe sans une énergie additionnelle.

- La consommation et l'espace additionnel

L'eau distillée provenant du distillateur peut être de chaude à tiède. Il vaut mieux réfrigérer l'eau dans un pichet (petit broc) en verre pour la refroidir et la stocker.

- Le goût

L'eau distillée est insipide à cause de l'absence de minéraux selon les préférences personnelles, le refroidissement de l'eau pourrait en améliorer le goût.

- La facilité de nettoyage

On choisit un modèle doté d'un absorbeur facile à nettoyer.

- La composition des distillateurs

On recommande que les distillateurs soient en fer galvanisé, en aluminium ou en plastique.

III.3. Caractéristiques de fonctionnement du distillateur:

Plusieurs grandeurs sont définies afin de caractériser la production d'eau de tels distillateurs. On distingue constamment [31]: le rendement, l'efficacité interne et globale et la performance.

III.3.1. Le rendement :

C'est la quantité d'eau produite par unité de surface de plan noir et par jour.

L'inconvénient majeur de ce critère est qu'il ne fait pas mention de l'énergie solaire qui arrive sur le distillateur.

Le rendement d'un distillateur simple est [31] :

$$\eta = \frac{m_d \cdot h_{evap}}{G} \quad (\text{III. 1})$$

h_{evap} : Enthalpie d'évaporation.

m_d : Débit de masse distillat.

G : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de surface.

III.3.2. L'efficacité :

III.3.2.1. L'efficacité globale :

L'efficacité globale est définie le rapport :

$$\eta_g = \frac{Q_{evap}}{G \cdot A} = \frac{m_d \cdot L_v}{G \cdot A} \quad (\text{III. 2})$$

η_g : L'efficacité globale (rendement globale)

Q_{evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

G : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de sur face.

A : Surface du vitre

•

m_d : Débit de masse distillat.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

III.3.2.2. L'efficacité interne :

Si l'efficacité globale rapporte la quantité d'eau produite à l'énergie solaire tombant sur une surface horizontale, elle ne fait pas mention de la quantité d'énergie entrant réellement dans le distillateur, d'autant plus qu'un distillateur est construit en général pour un lieu donné et avec une pente de couverture fixe. Un changement de pente et de la localité fait varier la quantité d'énergie qui entre dans le distillateur. On définit donc une efficacité dite interne qui tient compte de tous ces paramètres et qui est définie par:

$$\eta_i = \frac{Q_{evap}}{Q_{eau}} \quad (\text{III. 3})$$

Q_{evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

Q_{eau} est la quantité de chaleur effectivement reçue par la masse d'eau par unité de temps.

Pour une intensité globale G , l'expression de Q_{eau} est:

$$Q_{eau} = (\tau_v \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_b) \cdot G \cdot A \quad (\text{III. 4})$$

$$Q_{eau} = \alpha_t \cdot G \cdot A \quad (\text{III. 5})$$

α_t étant le coefficient d'absorption fictif de la masse d'eau. ($\alpha_t = 0,85$).

Avec :

$$\alpha_t = \tau_v \alpha_e + \tau_v \cdot \tau_e \cdot \alpha_b \quad (\text{III. 6})$$

α_e, α_b sont respectivement le facteur total d'absorption de l'eau et du fond du distillateur.

τ_e, τ_v sont respectivement le facteur de transmission de l'eau et de la vitre.

III.3.3. La performance :

Le souci de caractériser un distillateur d'une manière plus absolue a amené ainsi **SATCUNATHAN** et **HANSEN** [30] à définir le facteur de performance brut (*FPB*) et le facteur de performance horaire (*FPH*) :

$$FPB = \frac{\text{Quantité d'énergie entrée au bout de 24 h}}{\text{Quantité d'eau produite au bout de 24 h}} \quad (\text{III. 7})$$

$$FPH = \frac{\text{Quantité d'énergie entrée au bout d'une heure}}{\text{Quantité d'eau produite au bout d'une heure}} \quad (\text{III. 8})$$

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

$$FP = \frac{m}{\alpha_t \cdot G \cdot A} \quad (\text{III. 9})$$

FP : le facteur de performance [Kg/j]

m : Le numéro de moi

α_t : Le coefficient d'absorption thermique

A : La superficie du capteur (aire de la vitre)

G : Puissance de rayonnement solaire incident par unité de sur face.

III.4. Bilans énergétiques dans un distillateur simple :

III.4.1. Échanges de chaleur à l'intérieur du distillateur :

III.4.1.1. Exchange de chaleur de l'eau entre l'absorbeur et la surface de condensation :

L'eau reçoit de l'absorbeur un flux solaire ou de chaleur par convection naturelle et par conduction. L'eau cède un flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle aux surfaces de la condensation. Puisque il existe une évaporation, l'eau perd certain un flux de chaleur.

III.4.1.2. Échange de chaleur entre la vitre et la surface d'eau :

Les flux solaires incidents cédés par la nappe d'eau ne sont pas reçus intégralement par la surface de condensation. A cet égard et au cours du transfert, une partie est absorbée par l'atmosphère interne et les parois latérales.

Les vitres reçoivent les flux incidents par convection naturelle, par rayonnement et par condensation de la vapeur d'eau.

III.4.2. Échanges de chaleur à l'extérieur du distillateur :

III.4.2.1. Échange de chaleur entre la vitre et l'ambiance :

Le milieu extérieur cède le flux de chaleur par rayonnement solaire à la vitre, dont une partie est réfléchi. La vitre cède au milieu extérieur le flux de chaleur par rayonnement et par convection naturelle.

III.4.3. Modélisation mathématique :

La théorie d'un distillateur solaire simple en forme de serre, **Figure III.1**, illustre les différents échanges de chaleur qui se produisent dans un distillateur solaire. Elle est fondée sur quatre bilans. En régime transitoire, les équations régissant le bilan thermique au niveau de chaque partie du distillateur, s'écrivent comme suit [32]:

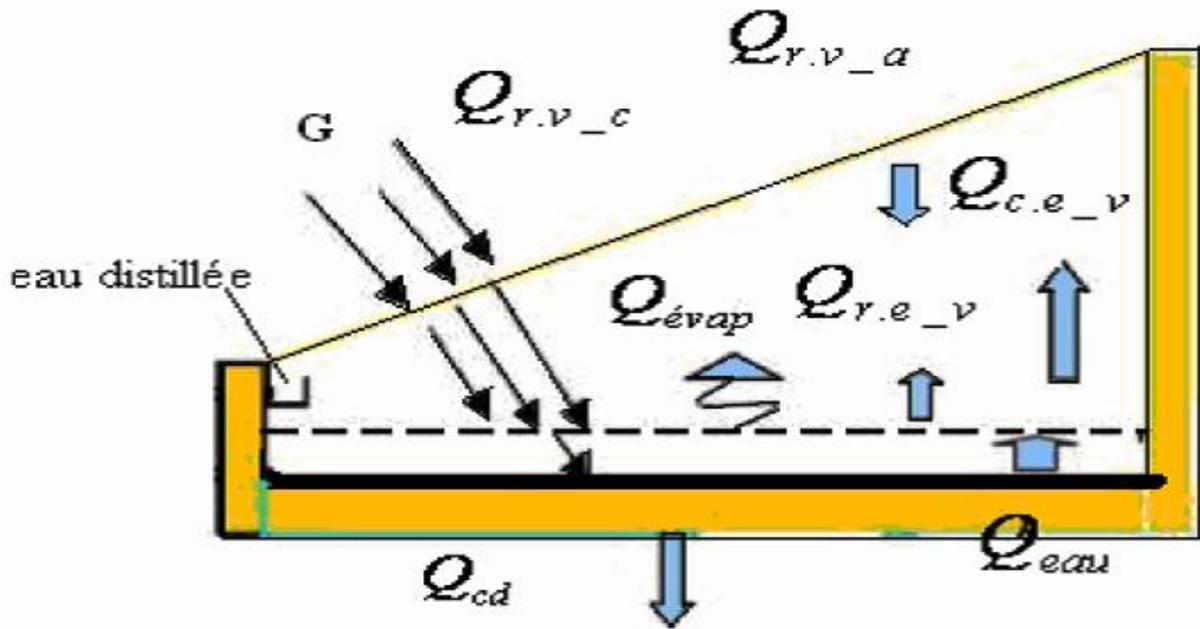


Figure III.1 : Bilan énergétique d'un distillateur solaire

Avant d'écrire le bilan thermique, on doit tenir des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La température de chaque composant est uniforme.
- Transfert de chaleur est unidimensionnel.
- Le soleil est assimilé à un corps noir.
- La couverture est propre.
- La condensation se fait uniquement sur la couverture (il n'y a pas de condensation sur les parois latérales).
- La saumure est statique sur le bassin.
- Le bassin est étanche.
- La condensation de l'eau sur la couverture est homogène et continue (le verre possède une bonne mouillabilité).
- La concentration de la saumure n'intervient pas dans les transferts de chaleur et de masse à partir de et vers la saumure.
- Les propriétés physiques des matériaux sont considérées constantes.
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques.

- La chaleur perdue par addition d'eau d'appoint et celle emportée par le distillat sont supposées négligeables.

Par analogie entre les grandeurs thermique et les grandeurs électriques (**Tableau III.1**), on peut appliquer les lois d'**OHM**.

Nous approchons le fonctionnement réel du distillateur par l'utilisation de la méthode dite des nœuds. Cette méthode nous permet de découper notre système de distillateur en plusieurs sous-systèmes. Nous écrivons donc, pour chaque nœud du distillateur, l'équation du bilan de puissance lui correspondant, puis nous simulons le fonctionnement selon la méthode dite « pas à pas », ceci nécessite l'écriture des équations en régime transitoire.

considérons une section quelconque du système à l'instant t , soit i l'un des milieux représentés dans cette section, M_i sa masse en [Kg], Cp_i sa chaleur spécifique en [J/Kg.°C], et sa température en [°C].

Le bilan au nœud i donné par :

$$M_i \times Cp_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_{ij} + P_i \quad (\text{III. 10})$$

P_i : Terme de puits.

Tableau III.1 : analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques

| Grandeur thermique | Grandeur électrique |
|---------------------------|----------------------------|
| Température | Potentiel électrique |
| Flux thermique | Courant électrique |
| Résistance thermique | Résistance électrique |
| Capacité thermique | Capacité électrique |

1) Bilan du vitrage :

La quantité de chaleur reçue par la vitre est évacuée par conductivité à travers celle-ci, soit :

- A la face extérieure :

$$\frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - Q_{r:v.e_ciel} - Q_{c:v_a} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III. 11})$$

M_v : La masse du vitre

$C p_v$: Chaleur massique à pression constante

A_v : la surface du vitre

T_{ve} : la température du vitre extérieur

T_{vi} : la température du vitre intérieur

λ_v : Conductivité thermique de la vitre.

δ_v : Épaisseur de la vitre.

- A la face intérieure :

$$\frac{M_v C p_v}{2 \times A_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = \left(\frac{\lambda_v}{\delta_v} \right) (T_{vi} - T_{ve}) - Q_{r:e_v.i} - Q_{c:e_v.i} + Q_{evap} + \frac{P_v}{2} \quad (\text{III. 12})$$

$Q_{r:e_v.i}$: Flux thermique par rayonnement entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{c:e_v.i}$: Flux thermique par convection entre le film d'eau et le vitrage.

Q_{evap} : Flux thermique par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage.

$Q_{r:v.e_ciel}$: Flux thermique perdu par la vitre par rayonnement vers l'extérieur.

$Q_{c:v_a}$: Flux thermique perdu par convection par la vitre vers l'extérieur.

λ_v : Conductivité thermique de la vitre.

δ_v : Épaisseur de la vitre.

2) Bilan de l'eau (saumure) :

$$\frac{M_e C p_e}{A_e} \frac{dT_e}{dt} = Q_{c:b_e} - Q_{c:e_v} - Q_{evap} - Q_{r:e_v.i} + P_e \quad (\text{III. 13})$$

$Q_{c:b_e}$: Flux thermique par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$C p_e$: Chaleur massique de l'eau

3) Bilan du bassin inférieur :

$$\frac{M_b C p_b}{A_b} \frac{dT_b}{dt} = P_b - Q_{c:b_e} - Q_{cd:b_{iso.i}} \quad (\text{III. 14})$$

Q_{cd} : Flux thermique perdu par conduction du bac.

4) Bilan de l'isolant :

Pour réduire les pertes de chaleur à travers la base, nous utilisons un isolant thermique. Le côté intérieur du distillateur reçoit la chaleur perdue de l'absorbeur et le côté extérieur cède de la chaleur vers l'extérieur par rayonnement et par convection, d'où l'équation:

- **Au niveau de la face intérieure :**

$$\frac{M_i C p_i}{2 \times A_i} \frac{dT_{iso.i}}{dt} = Q_{cd:b_{iso.i}} - \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso.i} - T_{iso.e}) \quad (\text{III. 15})$$

$Q_{cond .b_i}$: Flux thermique par conduction entre le bac et l'isolant thermique.

- **Au niveau de la face extérieure :**

$$\frac{M_i C p_i}{2 \times A_i} \frac{dT_{iso.i}}{dt} = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_{iso.i} - T_{iso.e}) - Q_{r:iso-soll} - Q_{c:iso-a} \quad (\text{III. 16})$$

5) Le débit du condensât

$$\frac{dM_c}{dt} = h_{evap} \frac{T_e - T_v}{L_v} \quad (\text{III. 17})$$

M_c : Masse du condensât.

L_v : Chaleur latente de vaporisation.

T_e : Température de l'eau.

T_v : Température de la vitre.

III.4.4. Expression des différents coefficients de transfert de chaleur :

Les expressions pour les divers termes des équations données ci-dessus sont:

➤ **Par rayonnement eau-vitre**

$$Q_{r.e_v} = h_{r.e_v}(T_e - T_{v.i}) \quad (\text{III. 18})$$

$h_{r.e_v}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre le film d'eau et la vitre.

$$h_{r.e_v} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times (T_e^2 - T_{v.i}^2) \times (T_e - T_{v.i}) \quad (\text{III. 19})$$

ε_{eff} : Émissivité effectif.

σ : Constante de **STEFFAN-BOLTZMAN**.

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right]^{-1} \quad (\text{III. 20})$$

ε_e : Émissivité de l'eau.

ε_v : Émissivité de la vitre.

➤ **Par convection eau-vitre** $h_{c.e_v}$

$$Q_{c.e_v} = h_{c.e_v}(T_e - T_{v.i}) \quad (\text{III. 21})$$

$h_{c.e_v}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le film d'eau et le vitrage [33] :

$$h_{c.e_v} = 0.884 \left[T_e - T_{v.i} + \frac{(p_e - p_v)(T_{v.i} + 273.15)}{268.9 \cdot 10^3 - p_e} \right]^{1/3} \quad (\text{III. 22})$$

p_e : Pression de vaporisation à T_e

p_v : Pression de vaporisation à $T_{v,i}$

➤ **Par évaporation**

$$Q_{evap} = h_{evap} (p_e - p_{v,i}) \quad (\text{III. 23})$$

h_{evap} : Coefficient de transfert de chaleur par évaporation-condensation entre le film d'eau et le vitrage [21] :

$$h_{evap} = 16.273 \cdot 10^3 h_{c.e-v} \frac{(p_e - p_{v,i})}{(T_e - T_{v,i})} \quad (\text{III. 24})$$

La pression de la vapeur d'eau est estimée par la relation suivante [32] :

$$P = 133.32 \exp\left(18.6686 - \frac{4030.1824}{T + 273.15}\right) \quad (\text{III. 25})$$

D'autre part **KAMAL** [36] propose un polynôme du troisième degré en fonction de la température :

$$P = 0.148 \times T - 0.3652 \times 10^{-2} \times T^2 + 0.11242 \times 10^{-3} \times T^3 \quad (\text{III. 26})$$

➤ **Par rayonnement vitre-ambiance :**

$$Q_{r.v_ciel} = h_{r.v_ciel} (T_{v,e} - T_{ciel}) \quad (\text{III. 27})$$

$h_{r.v_ciel}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement par la vitre vers l'extérieur.

$$h_{r.v_ciel} = \varepsilon_v \times \sigma \times (T_{v,e}^2 - T_{ciel}^2) \times (T_{v,e} - T_{ciel}) \quad (\text{III. 28})$$

T_{ciel} : Température du ciel.

$$T_{ciel} = T_a - (6ou12) \quad (III.29)$$

La température du ciel est donnée par la relation approximative [37] :

En général, on utilise l'expression :

$$T_{ciel} = 0.0552(T_a)^{1.5} \quad (III.30)$$

➤ **Par convection vitre-ambiance :**

$$Q_{c.v_a} = h_{c.v_a}(T_{v.e} - T_a) \quad (III.31)$$

$h_{c.v_a}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre la vitre et l'extérieur.

Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de la vitre et l'air est donné par la relation suivante [37] :

$$h_{c.v_a} = 5.7 + 3.8 \cdot V \quad (III.32)$$

➤ **Par convection bassin-eau :**

$$Q_{c.b-e} = h_{c.b-e}(T_b - T_e) \quad (III.33)$$

$h_{c.b-e}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre le fond du bac et le film d'eau.

$$h_{c.b-e} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} \quad (III.34)$$

Dans ce type de problème, les corrélations expérimentales aboutissent à des relations de la forme :

$$Nu = c(Gr Pr)^n \quad (III.35)$$

Ou c et n sont des constantes dépendant de la géométrie du système et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent):

❖ Plaque plane horizontale

Gradient de T vers le haut :

- L'écoulement est toujours laminaire et on a :

Si $Gr < 10^5 \Rightarrow Nu = 1$

L'échange thermique entre la saumure et le bac absorbant se fait uniquement par conduction.

$$\text{Si } 10^5 < Gr < 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = \frac{\lambda_e}{L} 0.54 \times (Gr Pr)^{0.25}$$

$$\text{Si } Gr > 2 \times 10^7 \Rightarrow Nu = 0.14 \times (Gr Pr)^{0.33}$$

$$Gr \text{ Nombre de GRASHOF} \Rightarrow Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{III. 36})$$

β : Coefficient d'expansion volumétrique de l'eau en (K^{-1}).

L : Longueur du bac absorbant en (m).

ρ : La masse volumique de l'eau en (Kg/m^3).

g : L'accélération en (m^2/s).

μ : La viscosité dynamique en ($Kg/m.s$).

$$Pr \text{ Nombre de PRANDLT} \Rightarrow Pr = \frac{\mu_e \cdot Cp_e}{\lambda_e} \quad (\text{III. 37})$$

Les pertes thermiques du bassin par conduction thermique à travers l'isolation est données comme suit :

$$Q_{cd:b_{iso.i}} = K_b \times (T_b - T_{iso.i}) \quad (III. 38)$$

T_b : Température du bac.

$T_{iso.i}$: Température de l'isolant.

Avec :

$$K_b = \frac{\lambda_b}{\delta_b} \quad (III. 39)$$

λ_b : Conductivité thermique du bac.

δ_b : Épaisseur du bac.

- Par conduction Isolant-bassin :

$$Q_{cd.iso.i_b} = \frac{\lambda_b}{\delta_b} (T_b - T_i) \quad (III. 40)$$

- Par conduction à travers l'isolant

$$K_i = \left(\frac{\delta_{soi}}{\lambda_{iso}} \right) \times (T_{iso.i} - T_{iso.e}) \quad (III. 41)$$

λ_{iso} : Conductivité de l'isolant.

δ_{soi} : Épaisseur de l'isolant.

- Par convection entre l'isolant et l'air extérieur :

$$Q_{c.iso.i_a} = h_{c.iso.i_a} (T_{iso.e} - T_a) \quad (III. 42)$$

$T_{iso.e}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'isolant et l'air extérieur.

- Par rayonnement entre l'isolant et le sol :

$$h_{r.e.v} = \varepsilon_{iso} \times \sigma \times (T_{sol}^2 - T_{iso.e}^2) \times (T_{iso.e} - T_{soli}) \quad (III.43)$$

III.4.5. Calcul des puissances absorbées par les différents composants du distillateur :

- Puissance absorbée par la vitre

Pour un distillateur simple à effet de serre la puissance absorbée est donnée par la relation suivante [39]:

$$P_v = I_D \cdot \alpha_{vD} + I_d \cdot \alpha_{vd} \quad (III.44)$$

Où:

α_{vD} et α_{vd} sont les coefficients d'absorption pour respectivement le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

α_{vD} est calculé comme suit [40] :

$$\alpha_{vD} = 1 - R_D - \tau_D \quad (III.45)$$

Où:

τ_D : Coefficient de transmission global du rayonnement direct, il est calculé par

$$\tau_D = \rho_r \cdot \alpha_a \quad (III.46)$$

ρ_r : Coefficient de transmission dû à la réflexion

$$\rho_r = \frac{(1 - R_D)}{(1 + R_D)} \quad (III.47)$$

α_a : Coefficient de transmission dû à l'absorption

$$\alpha_a = \exp\left(\frac{-K_v \cdot \delta_v}{\cos(\theta)}\right) \quad (\text{III. 48})$$

Où :

K_v : Coefficient d'extinction du verre [m⁻¹]

δ_v : Épaisseur de la vitre [m].

R_D : Caractéristique de la réflectivité de la vitre, il est donné par :

$$R_D = \left(\frac{R_N + R_P}{2}\right) \quad (\text{III. 49})$$

Avec :

$$R_N = \left(\frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)}\right) \quad (\text{III. 50}) \quad \text{et} \quad R_P = \left(\frac{\text{tg}^2(\theta - i)}{\text{tg}^2(\theta + i)}\right) \quad (\text{III. 51})$$

Où:

θ : Angle de réfraction du rayon au niveau de la vitre.

i et θ sont reliés par la relation de **SNELL-DESCARTES** suivante :

$$n_1 \times \sin(i) = n_2 \times \sin(\theta) \quad (\text{III. 52})$$

Où :

n_1 : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon incident ;

n_2 : indice de réfraction absolue du milieu traversé par le rayon réfracté.

Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus se calcule comme étant celui du rayonnement direct avec un angle d'incidence [41], $i = 60^\circ$.

$$\alpha_{vd} = 1 - R_d - \tau_d \quad (\text{III. 53})$$

- Puissance absorbée par la nappe d'eau

$$P_e = I_D \cdot \alpha_{eD} + I_d \cdot \alpha_{ed} \quad (\text{III. 54})$$

α_{eD} et α_{ed} : sont respectivement les coefficients d'absorption de la saumure pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$$\alpha_{eD} = I_D [\alpha_e + \tau_e \cdot \alpha_b] \quad (\text{III. 55})$$

Avec:

α_e : Coefficient d'absorption de la saumure (constant);

τ_e : Coefficient de transmission de la saumure;

$$\tau_e = \alpha_e - R_e \quad (\text{III. 56})$$

R_e : Coefficient de réflexion de la saumure, il se calcule par la relation:

$$R_e = \left(\left(\frac{\sin^2(\theta - i)}{\sin^2(\theta + i)} \right) + \left(\frac{\text{tg}^2(\theta - i)}{\text{tg}^2(\theta + i)} \right) \right) \quad (\text{III. 57})$$

Où :

θ : Angle de réfraction, calculé selon la relation:

$$\theta = \arcsin \left[\left(\frac{n_1}{n_3} \right) \sin(i) \right] \quad (\text{III. 58})$$

Où :

n_1 : Indice de réfraction de l'air;

n_3 : Indice de réfraction de la saumure.

α_b : Coefficient d'absorption du bac absorbant.

Le coefficient d'absorption pour le rayonnement diffus α_{ed} varie par rapport à

α_{eD} .

- Puissance absorbée par le bac absorbant :

Si α_b est le coefficient d'absorption du bac absorbant, on déduit la puissance P_b :

$$P_b = \alpha_b \frac{(I_D \times \tau_D) + (I_d \times \tau_d)}{1 - (1 - \alpha_b) \times R_d} \quad (\text{III. 59})$$

Chapitre IV

Matériels et méthodes

Ce chapitre présente le système utilisé et le travail expérimental ainsi que les résultats sous forme des graphes avec leurs interprétations.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1. Introduction

Le terme thermosolaire se compose de deux termes :

- thermo : chaleur, énergie thermique,
- soleil : énergie de rayonnement.

La distillation thermosolaire utilise la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique pour produire de l'eau potable à partir d'eau saline. Cette conversion de l'énergie de rayonnement en énergie thermique trouve son principe dans les théories de l'électro-magnétisme.

Le distillateur simple effet est le premier dispositif qui attira l'attention des scientifiques dans leur souci de trouver un dispositif permettant l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau potable à partir d'eau non propre à la consommation, particulièrement l'eau salée.

L'effort de recherche s'est toujours tourner vers la recherche de matériaux ayant des propriétés permettant de concilier économie et performance.

Nous avons pour objectif, dans cette partie le dimensionnement d'un prototype de laboratoire du distillateur à simple effet de serre. Il s'agit ensuite d'apprécier l'influence de certains paramètres sur les performances du distillateur, notre choix s'est porté sur les paramètres suivants :

- l'eau saumâtre avec différents degrés de salinité,
- la variation de la hauteur d'eau saumâtre admise dans le bassin,
- l'utilisation de systèmes d'isolation différents.

Pour ces différents paramètres, nous ferons des relevés sur l'évolution de la température de l'eau saumâtre, la température de la face externe du vitrage, la température de la face externe de l'isolant et le débit de l'eau distillée, il est aussi fait des relevés sur la température ambiante.

IV.2. Matériels utilisés

Le distillateur simple effet est un boîtier formé d'un assemblage de matériaux différents ayant la propriété de produire le phénomène d'effet de serre, cela grâce aux différentes propriétés que possèdent ses matériaux constitutifs. L'étude de conception est basée sur le choix des matériaux constitutifs et la variante du distillateur. Les matériaux utilisés ont les mêmes fonctions quelque soit la variante du distillateur. Nous avons principalement :

- un absorbeur,
- une vitre transparente,
- un matériau isolant,
- un collecteur d'eau distillée,
- un système d'évacuation de l'eau distillée,
- un matériau pour assurer l'étanchéité du système,
- et éventuellement un boîtier.

La figure IV.1 montre le schéma avec la définition des principaux éléments constitutifs du distillateur simple effet à couvercle en verre incliné qui est la variante retenue pour notre étude.

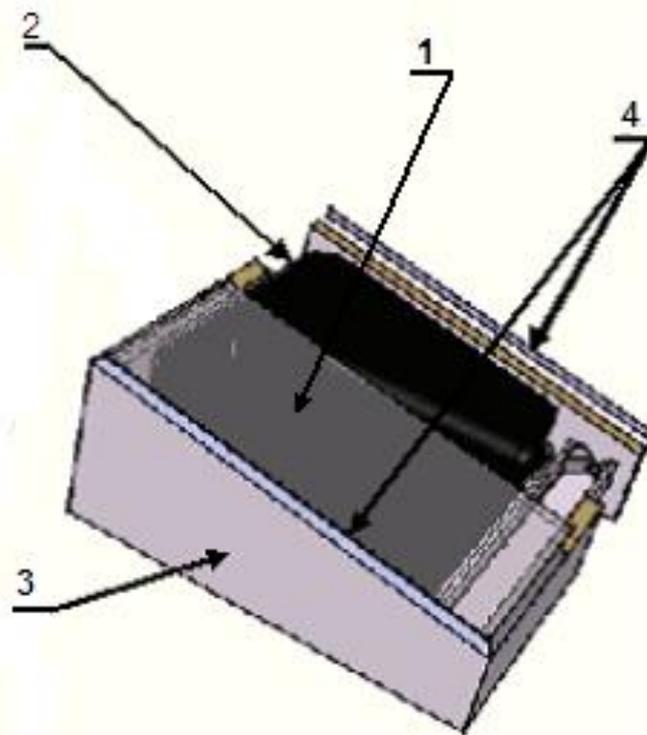


Figure IV.1 : Schéma descriptif du distillateur simple effet à couvercle en verre incliné.

- 1 : couvercle transparent en verre,
- 2 : matériau absorbant (film polymère noir),
- 3 : boîtier en bois avec matériau isolant intégré,
- 4 : joint d'étanchéité du système.

IV.2.1. Absorbant

L'absorbant a pour rôle de transformer en chaleur le rayonnement solaire qu'il reçoit et transmettre cette chaleur à l'eau ; déposé à la base du bassin contenant l'eau salée, il joue aussi généralement le rôle de matériau étanche aux fuites d'eau salée. Les principales qualités qu'il doit avoir sont :

- un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité,
- un pouvoir émissif dans l'infra-rouge aussi faible que possible,
- une bonne conductibilité et diffusivité thermique,
- une faible inertie thermique,
- une bonne résistance chimique vis-à-vis de l'eau salée qui le baigne.

Les matériaux utilisés principalement sont :

- parmi les matériaux : le cuivre, l'acier, l'aluminium recouvert extérieurement d'une mince couche de peinture noire.

- parmi les matériaux plastiques : le polypropylène, le polyphénoloxyde, le polyamide etc.

Notons que l'utilisation des matériaux plastiques fait perdre l'avantage de la conductibilité et de la diffusivité et en plus ils ont une tenue médiocre à la température ; par ailleurs ils présentent généralement l'avantage d'une résistance aux agents chimiques.

IV.2.2. Couverture transparente

Comme son nom l'indique, la couverture est un matériau transparent servant à capter le rayonnement solaire. Ces propriétés doivent être les suivantes :

- Laisser passer le maximum de rayonnement solaire tombant sur sa surface, ainsi elle doit avoir des coefficients de réflexion et d'absorption aussi faibles que possible et un coefficient de transmission très élevé,

- arrêter les radiations infra-rouges émises par l'absorbeur.

Le verre, le polycarbonate et le polyméthacrylate de méthyle (plexiglas) sont les plus utilisés avec le verre qui présente un coefficient de transmission plus élevé (84 à 92 % sous incidence normale du rayonnement) selon son degré de pureté et une inertie chimique et photochimique parfaite [27].

IV.2.3. Boîtier et matériau isolant

Dans la plupart des cas le boîtier est une case en bois dans laquelle on place le distillateur mais il peut constituer aussi en lui-même le distillateur, dont on place à sa base généralement du plastique noir servant office d'absorbeur et de matériau étanche aux infiltrations d'eau ; ses côtés latéraux constituant les murs du distillateur servant de support à la couverture en verre.

Dans ce système, on fixe un matériau isolant sur les faces intérieures des murs et de la masse du bois différentes couches superposées d'isolant.

Les isolants sont généralement classés en trois catégories : les isolants minéraux, végétaux et plastiques. Dans tous les cas, il s'agit de substances de faible densité qui emprisonnent un gaz dans leur structure fibreuse ou poreuse. La laine de verre, le bois bien sec, le polystyrène expansé, la mousse de chlorure de polyvinyle en constituent quelques exemples.

Notons en particulier, que le vide est le meilleur isolant, mais sa réalisation technique est délicate.

L'étanchéité de l'ensemble du système est réalisée généralement en utilisant une substance collante qui adhère aux éléments à coller. Elle doit par ailleurs résister à la chaleur et ne pas avoir d'interaction avec la vapeur et l'eau. Le collecteur disposé tout au long de la largeur du verre et peut être légèrement incliné pour faciliter l'évacuation de l'eau distillée.

IV.3. Principe de fonctionnement du distillateur simple effet

Le rayonnement solaire incident sur le verre traverse ce dernier et est absorbé par l'absorbeur. L'absorbeur réémet à une température dont le spectre se trouve décalé vers les fortes longueurs d'onde pour lesquelles le facteur de transmission de la vitre est faible (figure IV.2). La majeure partie de l'énergie incidente se trouve donc emprisonnée à l'intérieure du système, ce phénomène constitue « l'effet de serre ». Si l'on verse une nappe d'eau d'épaisseur faible sur l'absorbeur, l'énergie émise par ce dernier l'échauffe en provoquant ainsi son évaporation. L'eau évaporée vient en contact de la vitre qui ayant un coefficient d'absorption très faible se trouve donc à une température plus basse par rapport à la vapeur d'eau, d'où la condensation de la vapeur, recueillie ensuite sous forme d'eau distillée.

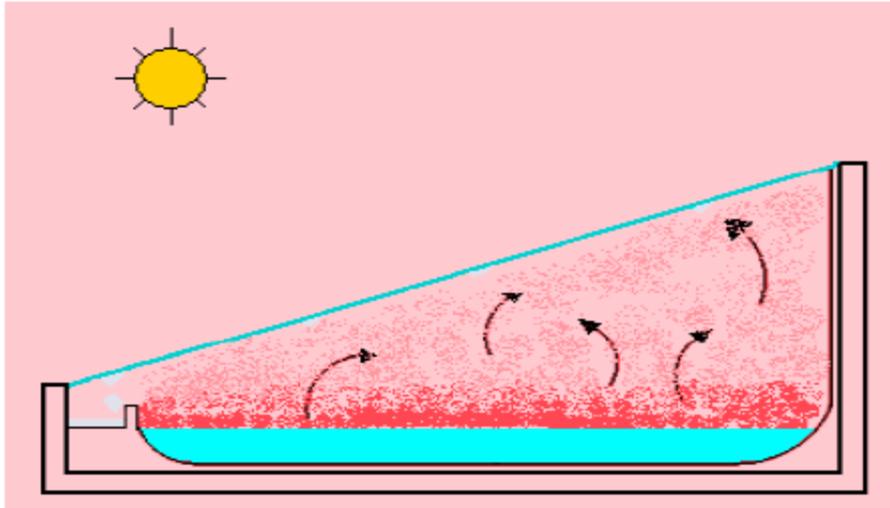


Figure IV.2 Principe de fonctionnement du distillateur simple effet

IV.4. Procédure d'essais

IV.4.1. Dimensionnement du distillateur

Nous avons conçu, compte tenu de nos capacités financière et du matériel à nôtre disposition, un distillateur simple effet à couverture en vitre inclinée et à surface d'évaporation horizontale.

IV.4.1.1. Schémas du dispositif expérimental

Sur ces deux figures nous exposons les schémas du dispositif relatifs aux deux systèmes d'isolation utilisés.



Figure IV.3 : distillateur simple effet avec une isolation en bois bien sec peint en blanc



Figure IV.4 : distillateur simple effet avec une isolation en bois bien sec peint en blanc et couvert d'une feuille d'aluminium déposée sur du plastique transparent.

IV.4.1.2. Boîtier :

Bois sec ordinaire de dimensions (Tableau IV.1)

| Distillateur | Observation |
|------------------------------|---------------------------|
| Nature | Bois |
| Epaisseur du bois | 0.008 m |
| Surface intérieure du bassin | 0.69 m ² |
| Hauteur arrière du boîtier | 0.345 m |
| Hauteur avant du boîtier | 0.12 m |
| Surface de base | 0.31x 0.69 m ² |

IV.4.1.3. Absorbeur :

Nous avons utilisé une peinture noire en vente chez les quincailleries que nous avons appliqué sur le bac absorbant en acier réalisé par le forgeur d'une surface de la base de 0,288 x 0,655 m²; ainsi qu'un plastique noir ordinaire de quincaillerie. Ce dernier jouant le rôle de membrane étanche aux fuites d'eau. Il est déposé tout autour des cotés du boîtier.

IV.4.1.4. Couverture transparente :

vitre ordinaire de dimensions (Tableau IV.2)

| Vitrage | Observation |
|---|-----------------------------|
| Nature | Vitre ordinaire |
| Nombre | 1 |
| Epaisseur de la vitre | 0,005 m |
| Inclinaison de la vitre sur le boîtier | 18° |
| Dimension de la surface extérieure= surface intérieure | 0.32 x 0.762 m ² |

IV.4.1.5. Matériau isolant :

L'isolation est l'un des paramètres dont nous voulons étudier l'influence sur la performance du système. Pour cela, nous avons utilisé deux types d'isolations successivement pour renforcer l'action du bois qui est la première couche, mais qui présente un coefficient de conductibilité un peu élevé ($\lambda = 0.13$ à 0.40 W/m.K); et par conséquent une perte de chaleur relativement élevée :

- une peinture blanche de quincaillerie appliquée surtout la surface extérieure du bois,
- un film de feuille d'aluminium fin en vente dans les quincailleries, superposé sur un film de plastique transparent de quincaillerie. Ce dernier servant de support résistant pour l'aluminium très fragile et contribuant en même tant par ses propriétés de mauvais conducteur thermique. Ce système est superposé au précédent système boîtier plus peinture blanche en prenant des précautions à laisser un espace entre les deux systèmes.

Dans ce système, il s'agit de profiter de l'excellent pouvoir réflecteur de l'aluminium ($\rho = 0.95$) qui, enrobant une surface chaude, sans la toucher, lui renvoie les rayons infra-rouges qu'elle émet, limitant ainsi ses pertes thermiques par rayonnement et de la propriété de mauvais conducteur du plastique transparent limitant les pertes par convection thermique de la surface chaude.

IV.4.1.6. Système d'étanchéité :

L'étanchéité de l'ensemble a été réalisée par l'utilisation d'un scotch transparent ordinaire qui adhère au bois et à la vitre.

IV.4.1.7. Système de collecte :

Nous avons utilisé une plaque en caoutchouc creux ayant la forme d'un demi-cylindre de surface lisse disposée convenablement le long de la vitre de sorte à

recueillir toutes les gouttelettes s'écoulant sur la surface de la vitre. Il est utilisé ensuite une seringue pour le pompage du condensât.

IV.4.1.8. Terrain d'expérimentation :

Le distillateur a été réalisé dans le laboratoire de thermodynamique et de sciences des matériaux du bloc de laboratoires d'hydraulique, génie civile et génie mécanique et les tests effectués s'étalant de 10 heure à 20 heure puis pendant toute la nuit jusqu'à 09h30 du jour suivant.

IV.4.1.9. Coordonnées géographiques :

Nous considérons les coordonnées de Tlemcen :

- Altitude : 750 m
- Latitude : +35°28' N
- Longitude : - 1°17'

Le distillateur déposé sur une terrasse de hauteur avait une orientation sud-nord.

• Campagne de tests : La campagne de tests a été axée sur les mesures de la température ambiante du milieu environnant, de la température de la surface extérieure de la vitre, de la température de l'eau salée, de la température de la surface extérieure de l'isolant et du débit de l'eau distillée en fonction du temps. En même temps nous avons procédé à la variation de certains paramètres pour constater leurs effets sur l'évolution de ceux mesurés.

Les paramètres qui varient sont les suivants :

– La concentration en sel de l'eau saumâtre :

L'eau saumâtre utilisée est synthétique. Elle est préparée en dissolvant une quantité connue de sel de cuisine ordinaire dans une quantité connue d'eau distillée.

Elle est préparée en utilisant la relation simple :

$$m = C.V \quad (\text{IV.1})$$

Où m est la quantité de sel (g), C est la concentration de sel désirée (g/l), V est le volume d'eau distillée nécessaire (l).

Les concentrations utilisées sont les suivantes :

1^{ere} partie : 5 g/l

2^{eme} partie : 2 g/l ; 4 g/l ; 8 g/l ;

– la hauteur en eau saumâtre dans le bassin : La hauteur désirée en eau saumâtre est donnée par la relation :

$$V = S.h \Rightarrow h = V/S \quad (\text{IV.2})$$

Où h est la hauteur désirée (cm), S est la surface d'évaporation du bassin (cm²) et V est le volume nécessaire (ml).

Les hauteurs utilisées avec les volumes sont :

1^{ere} partie : $h = 6,75$ mm (1L) ; $h = 17,75$ mm (3L) ; $h = 19,5$ mm (5L) ; $h = 39,75$ mm (7 L)

2^{eme} partie : $h = 17,75$ mm (3L)

– **l'isolation** : deux types d'isolations ont été utilisé ; premièrement l'application d'une couche de peinture blanche sur la surface extérieure toute entière y comprise la base du boîtier et deuxièmement l'intégration d'un système en feuille d'aluminium.

- **Dispositifs de mesure des températures** : Il a été utilisé pour les mesures de températures le thermocouple de type K pour mesurer la température de la face externe de la vitre, la température de la nappe d'eau, la température du bac absorbant, la température de la zone tampon, et la température de l'atmosphère.

Le thermocouple est une association de deux fils métalliques de natures différentes, soudés à l'une de leurs extrémités appelée « soudure de mesure » et comportant à l'autre extrémité deux « bornes » de raccordement qui sont à la température θ_a de l'appareil de mesure ou de l'ambiance. Lorsque la soudure de mesure se trouve à une température θ différente de θ_a , il apparaît entre les bornes de raccordement une f.é.m. qui dépend du couple métallique et des températures θ et θ_a . Le thermocouple de type K est une jonction de Chromel et d'Alumel.

Alumel : alliage composé de 95% de nickel, 2% d'aluminium 2% de manganèse et 1% de silicium ; le Chromel est l'alliage composé de 80% de nickel et 20% de chrome.

IV.5. Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux (Tableau IV.3 au Tableau IV.44) pour chaque journée avec l'explication des paramètres prise en compte.

Définition des symboles utilisés :

T₁ : température de la face externe de la vitre

T₂ : température de la nappe d'eau (°C)

T₃ : température du bac absorbant (°C)

T₄ : température de la zone tampon (°C)

T₅ : température de l'atmosphère (°C)

Q : le volume d'eau distillée (ml)

h : la hauteur de l'eau saumâtre dans le bassin (mm)

C : concentration de l'eau saumâtre (g/l)

V : volume de l'eau utilisé (solvant) (l)

1^{ere} partie**Tableau IV.3 : Journée du 14 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 15 juillet****h =6,75 mm; C =5 g/l; V=1 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | vent |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|----------------------|-------|
| 10h00 | 33,9 | 47,2 | 44,3 | 49,2 | 29,2 | / | / | nuages intermittents | calme |
| 11h00 | 42,8 | 63 | 61,6 | 63,9 | 29,2 | 10 | 10 | clair | // |
| 12h00 | 46,1 | 68,4 | 67,6 | 69,3 | 30,4 | 60 | 70 | // | // |
| 13h00 | 47,7 | 69,1 | 70 | 69,8 | 31,7 | 92 | 162 | // | // |
| 14h00 | 45,2 | 67,4 | 70 | 69,1 | 31,9 | 93 | 255 | // | // |
| 15h00 | 44,2 | 66,8 | 67,1 | 69,2 | 30,8 | 100 | 355 | // | Moyen |
| 16h00 | 44,4 | 65 | 64,8 | 68,7 | 31,4 | 83 | 438 | // | // |
| 17h00 | 41,2 | 61 | 60,5 | 65,5 | 30,8 | 62 | 500 | // | // |
| 18h00 | 37,1 | 54,3 | 53,3 | 58,3 | 29,9 | 45 | 545 | // | // |
| 19h00 | 31,3 | 43 | 42,5 | 46,4 | 26,5 | 20 | 565 | // | // |
| 20h00 | 24,2 | 30,5 | 31,1 | 30,6 | 24,9 | 10 | 575 | // | // |
| 23h30 | 19,2 | 21,5 | 21,9 | 21,2 | 23,4 | 7 | 582 | // | // |
| 04h30 | 18,1 | 19,8 | 19,9 | 19,5 | 20,5 | 7 | 589 | nuages | Calme |
| 09h30 | 35,2 | 52,5 | 50,2 | 54,3 | 25 | 30 | 619 | // | // |

Q_{total} = 619 ml**pH eau distillée = 6,87****Tableau IV.4 : Calcul des moyennes :**

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 39,82 | 57,79 | 57,56 | 60 | 29,7 | 51,81 |
| à 09h30 | 36,47 | 52,1 | 51,8 | 53,92 | 28,25 | 43,85 |

Tableau IV.5 : Journée du 15 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 16 juillet**h =6,75 mm; C =5 g/l; V=1 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------|
| 10h00 | 29,9 | 35,4 | 36 | 39,9 | 27,3 | / | / | nuages intermittents | Moyen |
| 11h00 | 41,3 | 58,5 | 56 | 51 | 28,9 | 30 | 30 | clair | // |
| 12h00 | 46,3 | 66,5 | 65,2 | 67,6 | 29,5 | 78 | 108 | // | // |
| 13h00 | 45,2 | 66,1 | 67,1 | 67,5 | 31,1 | 85 | 193 | nuages intermittents | // |
| 14h00 | 46,5 | 67,5 | 69,1 | 69,3 | 32,7 | 89 | 282 | clair | // |
| 15h00 | 45,8 | 66,3 | 65,3 | 68,9 | 33,1 | 91 | 373 | // | // |
| 16h00 | 44 | 64,2 | 63,5 | 68,1 | 32 | 74 | 447 | // | // |
| 17h00 | 41,6 | 60,5 | 59,9 | 65,6 | 31,2 | 63 | 510 | // | // |
| 18h00 | 38 | 53,9 | 52,7 | 58,2 | 30 | 40 | 550 | // | // |
| 19h00 | 30,2 | 40,2 | 40,5 | 41,1 | 26,8 | 20 | 570 | nuages intermittents | // |
| 20h00 | 24,8 | 30,1 | 30,5 | 29,9 | 25,8 | 10 | 580 | clair | // |
| 23h30 | 21,3 | 23,2 | 23,4 | 22,9 | 24,2 | 3 | 583 | // | // |
| 04h30 | 17,2 | 19,8 | 20,5 | 19,5 | 19,8 | 10 | 593 | nuages | // |
| 09h30 | 24,8 | 33,1 | 31,7 | 33,5 | 22,2 | 8 | 601 | nuages | // |

 $Q_{total} = 601 \text{ ml}$

pH eau distillée = 7,5

Tableau IV.6 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 39,41 | 55,38 | 55,07 | 57 | 29,85 | 52,72 |
| à 09h30 | 35,49 | 48,95 | 48,67 | 50,21 | 28,18 | 42,92 |

Tableau IV.7 : Journée du 16 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 17 juillet**h =6,75 mm; C =5 g/l; V=1 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|-------------------------|----------------|
| 10h00 | 26,3 | 30,9 | 31,3 | 33,9 | 23,4 | / | / | nuages | Moyen |
| 11h00 | 38,8 | 53,3 | 52,8 | 57,3 | 26,9 | 13 | 13 | nuages intermittents | // |
| 12h00 | 41,3 | 62 | 62,1 | 64,1 | 27,8 | 69 | 82 | clair | // |
| 13h00 | 44,5 | 66,9 | 67,2 | 67,8 | 28,4 | 83 | 165 | // | // |
| 14h00 | 40,8 | 64,7 | 66,3 | 66,3 | 27,2 | 80 | 245 | nuages | un peu fort |
| 15h00 | 35,3 | 50,1 | 51,6 | 51,9 | 26,3 | 40 | 285 | nuages intermittents | Moyen |
| 16h00 | 38,2 | 52,4 | 53,5 | 55,1 | 27,2 | 43 | 328 | // | // |
| 17h00 | 42,1 | 60,3 | 59,5 | 56 | 30,6 | 52 | 380 | clair | // |
| 18h00 | 35,4 | 53,1 | 52,3 | 56,5 | 27,5 | 42 | 422 | // | // |
| 19h00 | 30,3 | 41,8 | 41,4 | 43,5 | 25,3 | 23 | 445 | // | // |
| 20h00 | 23,9 | 30,5 | 31,2 | 30,5 | 23,5 | 10 | 455 | // | // |
| 23h30 | 18,2 | 20,9 | 21 | 20,5 | 21,6 | 11 | 466 | // | // |
| 04h30 | 18,9 | 20,5 | 20,6 | 20,3 | 19,5 | 13 | 479 | couvert | // |
| 09h30 | 36,3 | 54,1 | 51,3 | 56,2 | 24 | 40 | 519 | clair | // |

Q_{total} = 519 ml**pH eau distillée = 7,55****Tableau IV.8 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 36,08 | 51,29 | 51,74 | 53,86 | 26,73 | 41,36 |
| à 09h30 | 33,59 | 47,12 | 47,67 | 49,25 | 25,65 | 37,07 |

Tableau IV.9 : Journée du 17 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 18 juillet**h =17,75 mm; C =5 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|-----------|-------------|
| 10h00 | 30,4 | 32,5 | 34 | 39,3 | 25,8 | / | / | clair | Moyen |
| 11h00 | 37 | 52 | 54 | 55,4 | 26,3 | / | / | // | // |
| 12h00 | 42,6 | 62,9 | 62,8 | 63,1 | 27,2 | 53 | 53 | // | Calme |
| 13h00 | 44 | 67,2 | 67,8 | 66,6 | 30,1 | 95 | 148 | // | // |
| 14h00 | 44,9 | 68,3 | 70,6 | 68,2 | 29,8 | 105 | 253 | // | un peu fort |
| 15h00 | 46,3 | 67,9 | 69,5 | 67,8 | 31,4 | 95 | 348 | // | // |
| 16h00 | 43,3 | 66,1 | 66,9 | 69,5 | 30,3 | 94 | 442 | // | Moyen |
| 17h00 | 41,3 | 63 | 63,3 | 67,2 | 30,5 | 88 | 530 | // | // |
| 18h00 | 40,2 | 57,1 | 57,2 | 61,1 | 30,5 | 60 | 590 | // | // |
| 19h00 | 33,5 | 48,2 | 47,2 | 50,8 | 27,9 | 39 | 629 | // | // |
| 20h00 | 26,4 | 37,6 | 35,6 | 35 | 24,4 | 24 | 653 | // | // |
| 23h30 | 18,1 | 22,5 | 21,3 | 21,1 | 21,7 | 27 | 680 | // | // |
| 04h30 | 14,4 | 17,8 | 17 | 16,7 | 18,5 | 30 | 710 | // | Calme |
| 09h30 | 35,8 | 45 | 47,1 | 50,4 | 23,7 | 41 | 751 | // | // |

Q_{total} = 751 ml**pH eau distillée = 7,8****Tableau IV.10 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 39,08 | 56,61 | 57,17 | 58,54 | 28,56 | 59,36 |
| à 09h30 | 35,58 | 50,57 | 51,02 | 52,3 | 27 | 53,64 |

Tableau IV.11 : Journée du 18 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 19 juillet**h =17,75 mm; C =5 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|-----------|-------------|
| 10h00 | 30,9 | 31,3 | 33 | 40,3 | 25,3 | / | / | clair | Calme |
| 11h00 | 39,2 | 53 | 52,9 | 56,6 | 28,1 | / | / | // | Moyen |
| 12h00 | 44,1 | 64,6 | 62,8 | 64,9 | 29,4 | 55 | 55 | // | // |
| 13h00 | 46,5 | 68,3 | 68,5 | 67,8 | 31,7 | 80 | 135 | // | un peu fort |
| 14h00 | 47,1 | 69,3 | 71,7 | 69,7 | 32,4 | 106 | 241 | // | Moyen |
| 15h00 | 46,1 | 68,9 | 68,7 | 70,7 | 33,7 | 99 | 340 | // | // |
| 16h00 | 45,8 | 66,6 | 66,9 | 70,2 | 33,9 | 90 | 430 | // | un peu fort |
| 17h00 | 43,3 | 62,9 | 63,3 | 67,3 | 33,1 | 72 | 502 | // | // |
| 18h00 | 40 | 57 | 57,5 | 61,1 | 31,1 | 65 | 567 | // | // |
| 19h00 | 36,5 | 49,2 | 48,4 | 52,4 | 29,5 | 38 | 605 | // | Moyen |
| 20h00 | 28,5 | 39,8 | 38 | 37,2 | 26,3 | 22 | 627 | // | Calme |
| 23h30 | 24,1 | 25,9 | 25,3 | 24,9 | 26,8 | 20 | 647 | // | Moyen |
| 04h30 | 16,5 | 20,8 | 19,9 | 19,5 | 20,9 | 7 | 654 | // | Calme |
| 09h30 | 31,8 | 43,2 | 45,1 | 48,2 | 24,5 | 20 | 674 | // | // |

 $Q_{\text{total}} = 674 \text{ ml}$ $\text{pH eau distillée} = 7,65$ **Tableau IV.12 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 40,72 | 57,35 | 57,42 | 59,83 | 49,90 | 57 |
| à 09h30 | 37,17 | 51,48 | 51,57 | 53,62 | 44,37 | 48,14 |

Tableau IV.13 : Journée du 19 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 20 juillet**h =17,75 mm; C =5 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|----------------------|-------|
| 10h00 | 27,8 | 31,7 | 32,7 | 36,8 | 24,5 | / | / | nuages intermittents | Calme |
| 11h00 | 37 | 50,5 | 50,7 | 54,4 | 27,2 | / | / | clair | Moyen |
| 12h00 | 41,3 | 61,1 | 61,3 | 62,3 | 28,8 | 48 | 48 | // | // |
| 13h00 | 44,2 | 65,5 | 66,3 | 65,4 | 30,5 | 82 | 130 | // | // |
| 14h00 | 46,3 | 67 | 69,1 | 67,3 | 31,8 | 108 | 238 | // | // |
| 15h00 | 45,9 | 67,9 | 68,9 | 70 | 31,3 | 85 | 323 | // | // |
| 16h00 | 47,8 | 67,1 | 67,9 | 70,9 | 31,9 | 81 | 404 | // | // |
| 17h00 | 42,3 | 63,1 | 63,3 | 67,1 | 29,5 | 77 | 481 | // | // |
| 18h00 | 38 | 55,8 | 55,5 | 58,7 | 28,8 | 57 | 538 | // | // |
| 19h00 | 31,9 | 46,2 | 44,8 | 46,3 | 23,9 | 47 | 585 | // | // |
| 20h00 | 25,3 | 36,9 | 35,2 | 34,1 | 21,8 | 26 | 611 | nuages intermittents | // |
| 23h30 | 21,5 | 24,8 | 24,8 | 23,7 | 21 | 25 | 636 | couvert | Calme |
| 04h30 | 20,6 | 22,5 | 22,7 | 21,9 | 20,8 | 10 | 646 | // | Moyen |
| 09h30 | 25,9 | 30,7 | 31,5 | 31,8 | 23,6 | 10 | 656 | // | // |

Q_{total} = 656 ml**pH eau distillée = 7,33****Tableau IV.14 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 38,89 | 55,70 | 55,97 | 57,57 | 28,18 | 55,54 |
| à 09h30 | 35,41 | 49,34 | 49,62 | 50,76 | 26,81 | 46,85 |

Tableau IV.15 : Journée du 22 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 23 juillet**h =19,5 mm; C =5 g/l; V=5 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 27,9 | 26,8 | 30,8 | 36,4 | 26,1 | / | / | clair | Moyen |
| 11h00 | 35,4 | 42,6 | 44,9 | 49,5 | 27,8 | / | / | // | // |
| 12h00 | 40,8 | 54,1 | 54,3 | 58,2 | 30,5 | / | / | // | // |
| 13h00 | 43,5 | 62,1 | 62,8 | 63 | 31,3 | 65 | 65 | // | // |
| 14h00 | 44,8 | 65,5 | 66,9 | 64,1 | 30,1 | 79 | 144 | // | // |
| 15h00 | 45,8 | 66,8 | 68,8 | 68,8 | 32,1 | 91 | 235 | // | // |
| 16h00 | 44,6 | 65,5 | 66,9 | 69,2 | 32,4 | 84 | 319 | // | // |
| 17h00 | 44,6 | 63,2 | 62,9 | 66,7 | 30,5 | 78 | 397 | // | un peu fort |
| 18h00 | 40,8 | 58,6 | 57,9 | 61,5 | 29,8 | 66 | 463 | // | Moyen |
| 19h00 | 35,5 | 51,5 | 50,1 | 52,4 | 27,4 | 55 | 518 | // | // |
| 20h00 | 29,2 | 42,7 | 40,7 | 38,9 | 24,8 | 34 | 552 | // | // |
| 23h30 | 22,2 | 27,7 | 27,1 | 25,8 | 23 | 50 | 602 | // | Calme |
| 04h30 | 18,1 | 21,6 | 21,6 | 20,3 | 21,1 | 28 | 630 | // | // |
| 09h30 | 27,9 | 31,5 | 31,8 | 38,1 | 25,9 | 10 | 640 | nuages intermittents | Moyen |

Q_{total} = 640 ml**pH eau distillée = 7,69****Tableau IV.16 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 39,35 | 54,49 | 55,18 | 57,15 | 29,34 | 50,18 |
| à 09h30 | 35,79 | 48,58 | 49,10 | 50,92 | 28,05 | 45,71 |

Tableau IV.17 : Journée du 23 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 24 juillet**h =19,5 mm; C =5 g/l; V=5 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 28,3 | 32 | 33,7 | 38,6 | 25,7 | / | / | nuages intermittents | Moyen |
| 11h00 | 32,2 | 37,5 | 39,4 | 43,9 | 26,5 | / | / | // | // |
| 12h00 | 34,9 | 46,8 | 46,9 | 47,2 | 27,2 | / | / | nuages | // |
| 13h00 | 39 | 53,3 | 54,4 | 55,5 | 30,2 | 43 | 43 | nuages intermittents | // |
| 14h00 | 37,1 | 56,1 | 57,9 | 54 | 26,8 | 65 | 108 | nuages | // |
| 15h00 | 44,5 | 60,6 | 62,8 | 63,5 | 31,3 | 45 | 153 | clair | // |
| 16h00 | 43,5 | 64 | 63,6 | 67,3 | 31,8 | 73 | 226 | // | // |
| 17h00 | 43,5 | 62,2 | 61,5 | 65,6 | 31,1 | 75 | 301 | // | un peu fort |
| 18h00 | 39,7 | 57,8 | 57,2 | 60,5 | 30,4 | 61 | 362 | // | Moyen |
| 19h00 | 35,4 | 50,7 | 49,4 | 50,9 | 27,9 | 54 | 416 | // | // |
| 20h00 | 28,8 | 42,6 | 40 | 38,4 | 24,8 | 32 | 448 | // | // |
| 23h30 | 24,1 | 28,5 | 27,9 | 26,9 | 23,8 | 47 | 495 | nuages intermittents | un peu fort |
| 04h30 | 19,2 | 23,6 | 23,1 | 22 | 22,1 | 25 | 520 | clair | Calme |
| 09h30 | 34,2 | 39,6 | 42,5 | 48,2 | 27,9 | 20 | 540 | clair | // |

Q_{total} = 540 ml**pH eau distillée = 7,82****Tableau IV.18 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 37 | 51,23 | 51,52 | 53,21 | 28,51 | 40,72 |
| à 09h30 | 34,60 | 46,80 | 47,16 | 48,75 | 27,67 | 38,57 |

Tableau IV.19 : Journée du 24 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 25 juillet**h =19,5 mm; C =5 g/l; V=5 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|-----------|-------|
| 10h00 | 30,9 | 32,1 | 33,5 | 38,3 | 28,9 | / | / | clair | Moyen |
| 11h00 | 38,6 | 46,3 | 47,6 | 54 | 30,1 | / | / | // | // |
| 12h00 | 43 | 58,2 | 58,1 | 61,1 | 31,7 | / | / | // | // |
| 13h00 | 47,5 | 65,9 | 56,9 | 66,6 | 33,8 | 26 | 26 | // | // |
| 14h00 | 48,1 | 69 | 70,1 | 70,1 | 33,3 | 90 | 116 | // | // |
| 15h00 | 49,2 | 69,1 | 70,5 | 71,5 | 33,8 | 98 | 214 | // | // |
| 16h00 | 49,9 | 68,3 | 68,1 | 72,2 | 34,8 | 90 | 304 | // | // |
| 17h00 | 46,7 | 65,2 | 65,1 | 68,9 | 33,7 | 87 | 391 | // | // |
| 18h00 | 41,9 | 60 | 59,8 | 62,8 | 32,2 | 70 | 461 | // | // |
| 19h00 | 39,2 | 53,2 | 52 | 53,7 | 31,2 | 52 | 513 | // | // |
| 20h00 | 31,6 | 44,9 | 42,7 | 40,8 | 27,4 | 35 | 548 | // | Calme |
| 23h30 | 25,1 | 30,2 | 29,5 | 28,2 | 26,8 | 50 | 598 | // | // |
| 04h30 | 22 | 25,9 | 25,4 | 24,6 | 24,8 | 25 | 623 | // | // |
| 09h30 | 37,3 | 43,1 | 46,5 | 51,4 | 30,8 | 20 | 643 | // | Moyen |

Q_{total}= 643 ml**pH eau distillée= 7,57****Tableau IV.20 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 42,41 | 57,47 | 56,76 | 60 | 31,90 | 49,81 |
| à 09h30 | 39,35 | 52,24 | 51,84 | 54,58 | 30,95 | 45,92 |

Tableau IV.21 : Journée du 25 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 26 juillet**h =39,75 mm; C =5 g/l; V=7 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-----------|
| 10h00 | 33,9 | 31,4 | 33,2 | 43,1 | 32,2 | / | / | clair | Moyen |
| 11h00 | 38,4 | 42,8 | 44,9 | 51,8 | 32,5 | / | / | // | // |
| 12h00 | 44,2 | 54,8 | 55,5 | 58,6 | 35,1 | / | / | // | // |
| 13h00 | 47,3 | 63 | 63,9 | 64,2 | 36,1 | 45 | 45 | // | // |
| 14h00 | 48,9 | 67,9 | 69,1 | 69,2 | 35,9 | 69 | 114 | // | // |
| 15h00 | 50,3 | 69,1 | 70,5 | 71,2 | 34,8 | 86 | 200 | // | // |
| 16h00 | 48,8 | 68,9 | 68,2 | 71,8 | 35,2 | 90 | 290 | // | // |
| 17h00 | 48,3 | 66,5 | 65,9 | 69,9 | 35,3 | 84 | 374 | // | // |
| 18h00 | 45,2 | 62,8 | 61,8 | 64,3 | 32,8 | 71 | 445 | nuages intermittents | // |
| 19h00 | 42,3 | 57,2 | 56 | 55,9 | 32,2 | 63 | 508 | // | // |
| 20h00 | 33 | 48,6 | 46,3 | 44,1 | 26,9 | 44 | 552 | // | // |
| 23h30 | 23,1 | 31,1 | 29,5 | 27,8 | 27,2 | 30 | 582 | nuages+pluie | Très fort |
| 04h30 | 23,4 | 27,3 | 26,9 | 25,9 | 24,9 | 25 | 607 | nuages intermittents | Calme |
| 09h30 | 32,7 | 36,2 | 37 | 44,6 | 29,5 | 25 | 632 | clair | Moyen |

Q_{total}= 632 ml**pH eau distillée= 7,8****Tableau IV.22 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 43,69 | 57,54 | 57,75 | 60,37 | 33,54 | 50,18 |
| à 09h30 | 39,98 | 51,97 | 52,05 | 54,45 | 32,18 | 45,14 |

Tableau IV.23 : Journée du 26 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 27 juillet**h =39,75 mm; C =5 g/l; V=7 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|-------------------------|----------------|
| 10h00 | 31,8 | 30,6 | 32,3 | 38,9 | 35 | / | / | clair | Moyen |
| 11h00 | 37,8 | 41,5 | 43,1 | 50,4 | 32,1 | / | / | // | Moyen |
| 12h00 | 41,2 | 52,6 | 53,2 | 57,2 | 33,3 | / | / | // | // |
| 13h00 | 45,6 | 60,3 | 61,1 | 62,8 | 35,5 | 49 | 49 | // | // |
| 14h00 | 50 | 67,1 | 68,3 | 69,1 | 36,2 | 76 | 125 | // | // |
| 15h00 | 47,1 | 68,1 | 69,5 | 70,4 | 33,7 | 72 | 197 | nuages intermittents | // |
| 16h00 | 48,2 | 67,7 | 68,2 | 71,3 | 34,8 | 78 | 275 | clair | // |
| 17h00 | 45,2 | 64,3 | 63,4 | 66,5 | 32,8 | 87 | 362 | nuages intermittents | // |
| 18h00 | 41,1 | 59,1 | 58,1 | 60,5 | 31,2 | 68 | 430 | // | // |
| 19h00 | 36,3 | 53 | 51,3 | 51,5 | 28,3 | 58 | 488 | // | // |
| 20h00 | 30,3 | 45,5 | 43,2 | 40,9 | 25,5 | 44 | 532 | // | Calme |
| 23h30 | 27,3 | 31 | 30,2 | 29,2 | 28,9 | 60 | 592 | // | un peu fort |
| 04h30 | 19,8 | 24,1 | 23,6 | 22,2 | 21,8 | 30 | 622 | // | Calme |
| 09h30 | 31,5 | 35,1 | 38,8 | 44,9 | 26,2 | 23 | 645 | // | // |

Q_{total} = 645 ml**pH eau distillée = 7,63****Tableau IV.24 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 41,32 | 55,43 | 55,60 | 58,13 | 32,58 | 48,36 |
| à 09h30 | 38,08 | 49,17 | 50,30 | 52,55 | 31,09 | 46,07 |

Tableau IV.25 : Journée du 27 juillet 2013 jusqu'à 09h30 du 28 juillet**h =39,75 mm; C =5 g/l; V=7 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 28,9 | 29,4 | 30,8 | 36,2 | 26,3 | / | / | clair | Calme |
| 11h00 | 35,8 | 41,1 | 43,8 | 49,8 | 28,5 | / | / | // | // |
| 12h00 | 40,3 | 52,5 | 53,5 | 56,8 | 30,8 | / | / | // | // |
| 13h00 | 42,9 | 60,2 | 60,6 | 61,9 | 32,2 | 50 | 50 | // | // |
| 14h00 | 44,3 | 65,1 | 66,2 | 66,1 | 30,2 | 75 | 125 | // | Moyen |
| 15h00 | 46 | 67,1 | 68,3 | 69,2 | 31,1 | 91 | 216 | // | un peu fort |
| 16h00 | 45,1 | 66,4 | 66,4 | 69,5 | 30,7 | 96 | 312 | // | Moyen |
| 17h00 | 44,8 | 64,3 | 63,8 | 67,5 | 30,8 | 88 | 400 | // | // |
| 18h00 | 40,6 | 59,6 | 58,9 | 61,3 | 29,1 | 70 | 470 | // | // |
| 19h00 | 34,1 | 52,1 | 50,5 | 50,9 | 26,3 | 60 | 530 | nuages intermittents | // |
| 20h00 | 29,1 | 44,7 | 42,1 | 39,8 | 22,9 | 50 | 580 | // | Calme |
| 23h30 | 21,7 | 28,9 | 28,1 | 26,1 | 21,3 | 60 | 640 | nuages | // |
| 04h30 | 18,9 | 22,9 | 22,3 | 21,3 | 20,8 | 30 | 670 | nuages intermittents | // |
| 09h30 | 30,2 | 31,4 | 34,4 | 42,6 | 24 | 20 | 690 | clair | // |

 $Q_{\text{total}} = 690 \text{ ml}$

pH eau distillée= 7,54

Tableau IV.26 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 39,26 | 54,77 | 55 | 57,18 | 29 | 52,72 |
| à 09h30 | 35,90 | 48,97 | 49,26 | 51,35 | 27,5 | 49,28 |

2^{eme} partie**Tableau IV.27 : Journée du 02 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 03 aout****h =17,75 mm; C =2 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|----------------------|-------|
| 10h00 | 30,9 | 31,9 | 32,9 | 35,5 | 32,2 | / | / | nuages intermittents | Calme |
| 11h00 | 46,3 | 54,2 | 55,1 | 62,7 | 37,1 | / | / | // | // |
| 12h00 | 48,5 | 60,6 | 60,6 | 64,8 | 38,1 | 45 | 45 | clair | // |
| 13h00 | 52,2 | 70,3 | 70,8 | 72,8 | 38,3 | 65 | 110 | // | // |
| 14h00 | 54,8 | 74,4 | 76,9 | 77,4 | 39,3 | 100 | 210 | // | // |
| 15h00 | 52,1 | 70,5 | 72 | 72,7 | 39 | 83 | 293 | nuages intermittents | // |
| 16h00 | 54 | 70,2 | 73,9 | 75,8 | 42,9 | 72 | 365 | // | Moyen |
| 17h00 | 50,8 | 64 | 66 | 69,2 | 41,9 | 65 | 430 | // | // |
| 18h00 | 47,2 | 59,2 | 59,2 | 63,5 | 39,2 | 51 | 481 | // | // |
| 19h00 | 42,1 | 53,5 | 52,6 | 54,9 | 35,8 | 39 | 520 | // | Calme |
| 20h00 | 34,7 | 43,5 | 41,8 | 41,1 | 33,3 | 25 | 545 | // | // |
| 23h30 | 25,5 | 30,2 | 29,8 | 28,5 | 25,5 | 35 | 580 | // | // |
| 04h30 | 19,8 | 23,3 | 23,1 | 22,1 | 23,8 | 36 | 616 | clair | // |
| 09h30 | 38,4 | 48,3 | 50,9 | 55 | 30,5 | 15 | 631 | // | // |

$$Q_{\text{total}} = 631 \text{ ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,55$$

Tableau IV.28 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 46,69 | 59,3 | 57,17 | 62,76 | 37,91 | 49,54 |
| à 09h30 | 42,66 | 53,86 | 52,33 | 56,85 | 35,49 | 45,07 |

Tableau IV.29 : Journée du 03 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 04 aout**h =17,75 mm; C =2 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|-----------|-------|
| 10h00 | 32,7 | 33,3 | 34,5 | 41 | 30,9 | / | / | clair | Calme |
| 11h00 | 41,3 | 53,6 | 53,7 | 59,1 | 31,6 | / | / | // | Moyen |
| 12h00 | 48,6 | 65,3 | 64,5 | 68,2 | 33,5 | 40 | 40 | // | // |
| 13h00 | 51,5 | 70,7 | 71,1 | 72,7 | 34,8 | 60 | 100 | // | // |
| 14h00 | 53,5 | 72,9 | 75,1 | 75,2 | 35,9 | 95 | 195 | // | // |
| 15h00 | 53,5 | 73,2 | 75,1 | 76,8 | 35,9 | 102 | 297 | // | // |
| 16h00 | 51,8 | 70,4 | 71,9 | 75,2 | 37,3 | 88 | 385 | // | // |
| 17h00 | 48,6 | 66,2 | 66,8 | 70,8 | 35,7 | 75 | 460 | // | // |
| 18h00 | 44,6 | 60,2 | 59,1 | 64,2 | 34,1 | 60 | 520 | // | // |
| 19h00 | 36,4 | 49,9 | 48,7 | 49,5 | 29,4 | 47 | 567 | // | // |
| 20h00 | 28,9 | 38,9 | 37,2 | 36,3 | 27,1 | 23 | 590 | // | // |
| 23h30 | 22,3 | 26,1 | 25,7 | 24,7 | 26,2 | 28 | 618 | // | Calme |
| 04h30 | 20,1 | 22,9 | 22,6 | 22 | 24,1 | 20 | 638 | // | // |
| 09h30 | 38,1 | 22,7 | 35,4 | 40,9 | 31,5 | 5 | 643 | // | Moyen |

Q_{total} = 643 ml**pH eau distillée = 7,74****Tableau IV.30 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 44,67 | 59,50 | 59,79 | 62,63 | 33,29 | 53,63 |
| à 09h30 | 40,85 | 51,87 | 52,95 | 55,47 | 32 | 45,92 |

Tableau IV.31 : Journée du 04 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 05 aout**h =17,75 mm; C =2 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|-----------|-------------|
| 10h00 | 33,1 | 32,7 | 35,4 | 40,9 | 31,5 | / | / | clair | Moyen |
| 11h00 | 42,3 | 53,8 | 54,3 | 59,2 | 33,1 | / | / | // | // |
| 12h00 | 49,1 | 65,9 | 68,4 | 68,6 | 34,5 | 38 | 38 | // | // |
| 13h00 | 51,3 | 72,8 | 71,3 | 71,3 | 35,6 | 57 | 95 | // | // |
| 14h00 | 51,7 | 72,7 | 74,7 | 74,4 | 35,5 | 103 | 198 | // | // |
| 15h00 | 51,3 | 71,1 | 73,2 | 74,4 | 35,3 | 100 | 298 | // | un peu fort |
| 16h00 | 50,1 | 68,2 | 69,5 | 72,9 | 37,4 | 90 | 388 | // | // |
| 17h00 | 47,5 | 64,3 | 64,2 | 69,2 | 36,4 | 75 | 463 | // | // |
| 18h00 | 44,1 | 58,8 | 57,9 | 63 | 34,7 | 55 | 518 | // | Moyen |
| 19h00 | 36,5 | 45,4 | 47,3 | 48,9 | 31,2 | 35 | 553 | // | // |
| 20h00 | 30,9 | 39,7 | 37,6 | 37,3 | 29,9 | 20 | 573 | // | // |
| 23h30 | 23,9 | 27,6 | 26,8 | 26,3 | 27,3 | 25 | 598 | // | Calme |
| 04h30 | 23,5 | 24 | 23,9 | 23,7 | 26,8 | 17 | 615 | nuages | Calme |
| 09h30 | 40,8 | 48,7 | 51,9 | 56 | 34,2 | 12 | 627 | clair | un peu fort |

$$Q_{\text{total}} = 627 \text{ ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,66$$

Tableau IV.32 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 44,35 | 58,67 | 59,43 | 61,82 | 34,1 | 52,09 |
| à 09h30 | 41,15 | 53,26 | 54,02 | 56,15 | 33,1 | 44,78 |

Tableau IV.33 : Journée du 05 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 06 aout**h =17,75 mm; C =4 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | Vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 35,8 | 34,5 | 36,5 | 43,8 | 34,2 | / | / | clair | un peu fort |
| 11h00 | 44 | 56,3 | 55,8 | 61,3 | 33,8 | / | / | // | // |
| 12h00 | 49,8 | 65,9 | 65,6 | 68,8 | 36,3 | 42 | 42 | // | // |
| 13h00 | 50,4 | 69,1 | 69,8 | 71 | 35,1 | 68 | 110 | // | moyen |
| 14h00 | 50 | 69,9 | 71,5 | 72,2 | 34,6 | 93 | 203 | // | // |
| 15h00 | 51,9 | 69,8 | 74,5 | 73,5 | 34,2 | 90 | 293 | // | // |
| 16h00 | 51,9 | 69,1 | 70,2 | 74,1 | 35,9 | 84 | 377 | // | // |
| 17h00 | 48,9 | 65 | 68,9 | 69,9 | 35,5 | 38 | 415 | // | fort |
| 18h00 | 44,5 | 60,3 | 66,3 | 65 | 34,8 | 95 | 510 | nuages intermittents | un peu fort |
| 19h00 | 37,3 | 49,7 | 48,8 | 49,2 | 31,9 | 38 | 548 | // | // |
| 20h00 | 32,1 | 40,6 | 39,3 | 38,4 | 30,2 | 22 | 570 | // | moyen |
| 23h30 | 26,9 | 29 | 29,2 | 28,1 | 30,3 | 27 | 597 | clair | calme |
| 04h30 | 22,4 | 25,1 | 25,2 | 24,1 | 25,6 | 10 | 607 | // | // |
| 09h30 | 41,3 | 50,5 | 52,1 | 56,2 | 34,9 | 8 | 615 | // | moyen |

$$Q_{\text{total}} = 615 \text{ ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,72$$

Tableau IV.34 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 45,47 | 59,10 | 60,65 | 62,47 | 34,22 | 51,81 |
| à 09h30 | 42,20 | 53,91 | 55,26 | 56,82 | 33,37 | 43,92 |

Tableau IV.35 : Journée du 06 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 07 aout**h =17,75 mm; C =4 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 35,5 | 35,3 | 37,1 | 42,2 | 34,9 | / | / | clair | moyen |
| 11h00 | 47 | 57,3 | 57,7 | 62,8 | 38 | / | / | // | // |
| 12h00 | 52,4 | 68,1 | 69 | 71,6 | 39,1 | 35 | 35 | // | calme |
| 13h00 | 55,5 | 73,2 | 75,1 | 75,9 | 39,7 | 80 | 115 | // | moyen |
| 14h00 | 53,6 | 72,5 | 76,3 | 75,1 | 39,2 | 95 | 210 | // | un peu fort |
| 15h00 | 54,9 | 72,7 | 74,6 | 77 | 37,4 | 95 | 305 | // | // |
| 16h00 | 54,1 | 70,2 | 71,2 | 75,5 | 39,7 | 90 | 395 | // | moyen |
| 17h00 | 50,5 | 67,2 | 68,1 | 72,4 | 38,2 | 77 | 472 | // | // |
| 18h00 | 40,5 | 53,3 | 52,5 | 52,9 | 33,5 | 58 | 530 | nuages | // |
| 19h00 | 35,8 | 44,5 | 43,9 | 43,7 | 32,1 | 33 | 563 | // | // |
| 20h00 | 30,7 | 37,9 | 37 | 36,1 | 30,1 | 17 | 580 | nuages intermittents | calme |
| 23h30 | 29,6 | 30,2 | 30,5 | 29,8 | 32,2 | 10 | 590 | clair | fort |
| 04h30 | 26,5 | 26,5 | 26,3 | 26,2 | 30,3 | 5 | 595 | // | // |
| 09h30 | 39 | 49,4 | 55,1 | 55,1 | 31,2 | 10 | 605 | // | moyen |

$$Q_{\text{total}} = 605 \text{ ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,85$$

Tableau IV.36 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 46,40 | 59,29 | 60,22 | 62,29 | 36,53 | 52,72 |
| à 09h30 | 42,67 | 54,16 | 55,31 | 56,87 | 35,4 | 43,21 |

Tableau IV.37 : Journée du 07 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 08 aout**h =17,75 mm; C =4 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 33,4 | 34,2 | 38,1 | 40,5 | 32,5 | / | / | clair | moyen |
| 11h00 | 44,4 | 55,1 | 58 | 60,9 | 34,1 | / | / | // | // |
| 12h00 | 49,2 | 66,3 | 61,1 | 69,3 | 35,1 | 40 | 40 | // | un peu fort |
| 13h00 | 52,3 | 70,2 | 70,2 | 72,5 | 36,2 | 84 | 124 | // | // |
| 14h00 | 51,8 | 70,9 | 72,2 | 73,1 | 35,3 | 93 | 217 | // | // |
| 15h00 | 50,7 | 69,1 | 79,5 | 73 | 35,4 | 93 | 310 | // | // |
| 16h00 | 49,4 | 68,1 | 75,8 | 72,9 | 35,3 | 86 | 396 | // | // |
| 17h00 | 47,4 | 63,9 | 69,7 | 68,9 | 35,3 | 73 | 469 | nuages intermittents | // |
| 18h00 | 42,2 | 57,8 | 62,3 | 61,7 | 33,2 | 60 | 529 | clair | // |
| 19h00 | 33,1 | 46,2 | 46,3 | 44,5 | 29 | 33 | 562 | // | moyen |
| 20h00 | 27,8 | 35,9 | 34,5 | 33,8 | 27,5 | 23 | 585 | // | // |
| 23h30 | 22,7 | 25,8 | 25,6 | 24,8 | 26,3 | 20 | 605 | // | calme |
| 04h30 | 19,9 | 22,5 | 22,1 | 21,9 | 23,8 | 15 | 620 | // | // |
| 09h30 | 34,7 | 44,5 | 44,2 | 50,7 | 26,1 | 12 | 632 | // | // |

$$Q_{\text{total}} = 632 \text{ ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,85$$

Tableau IV.38 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 43,79 | 57,97 | 60,70 | 61 | 33,53 | 53,18 |
| à 09h30 | 39,92 | 52,17 | 54,25 | 54,89 | 31,79 | 45,14 |

Tableau IV.39 : Journée du 10 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 11 aout**h =17,75 mm; C =8 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|------------|-------------|
| 10h00 | 29,6 | 33,1 | 33,2 | 38,8 | 26,2 | / | / | très clair | moyen |
| 11h00 | 40,9 | 53,3 | 54,1 | 58,9 | 28,5 | / | / | // | // |
| 12h00 | 47,1 | 64,8 | 64,1 | 67,3 | 30,2 | 52 | 52 | // | // |
| 13h00 | 50 | 70,8 | 71,3 | 72,4 | 32 | 96 | 148 | // | // |
| 14h00 | 51,2 | 71,8 | 74,2 | 74,1 | 33,5 | 87 | 235 | // | un peu fort |
| 15h00 | 50,2 | 70,8 | 74,4 | 74,4 | 31,5 | 100 | 335 | // | // |
| 16h00 | 48,3 | 68,3 | 70,5 | 72,9 | 33,1 | 95 | 430 | // | // |
| 17h00 | 44,9 | 63,3 | 64,2 | 67,9 | 33,1 | 88 | 518 | // | // |
| 18h00 | 42,4 | 57,6 | 45,8 | 62,5 | 31,2 | 54 | 572 | // | // |
| 19h00 | 32,1 | 45,8 | 37,9 | 43,2 | 27,2 | 45 | 617 | // | calme |
| 20h00 | 26,1 | 35,1 | 33,4 | 32,5 | 25,3 | 19 | 636 | // | // |
| 23h30 | 19,5 | 23,8 | 23,8 | 22,1 | 23,5 | 27 | 663 | // | // |
| 04h30 | 18,1 | 20,5 | 20,2 | 19,5 | 22,2 | 15 | 678 | // | // |
| 09h30 | 34,6 | 44,4 | 43,3 | 51,2 | 25,9 | 15 | 693 | // | // |

$$Q_{\text{total}} = 693\text{ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,82$$

Tableau IV.40 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 42,07 | 57,70 | 56,64 | 60,35 | 30,16 | 57,81 |
| à 09h30 | 38,21 | 51,67 | 50,74 | 54,05 | 28,81 | 49,5 |

Tableau IV.41 : Journée du 11 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 12 aout**h =17,75 mm; C =8 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | vent |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|---------------------|----------------------|-------------|
| 10h00 | 30,6 | 32 | 32,3 | 38,7 | 28,2 | / | / | très clair | moyen |
| 11h00 | 40 | 51,8 | 51,3 | 57,2 | 29,2 | / | / | // | // |
| 12h00 | 48 | 63,8 | 63,4 | 66,8 | 31,5 | 35 | 35 | // | // |
| 13h00 | 50,8 | 70,1 | 71 | 72,1 | 33,8 | 88 | 123 | // | // |
| 14h00 | 51,1 | 71,9 | 73,4 | 74,1 | 34,5 | 99 | 222 | // | un peu fort |
| 15h00 | 49,2 | 69 | 70,7 | 72,4 | 33 | 103 | 325 | // | // |
| 16h00 | 49,8 | 67,5 | 68,2 | 72 | 35,8 | 90 | 415 | // | // |
| 17h00 | 46,3 | 63,1 | 63,3 | 68,3 | 34,3 | 77 | 492 | // | // |
| 18h00 | 43,5 | 57,2 | 56,3 | 62 | 32,8 | 68 | 560 | nuages intermittents | moyen |
| 19h00 | 34,2 | 46,3 | 44,5 | 44,3 | 29 | 33 | 593 | // | // |
| 20h00 | 29,5 | 37,2 | 35,8 | 34,9 | 28,7 | 20 | 613 | // | // |
| 23 h30 | 22,3 | 26,3 | 26,1 | 24,8 | 26,3 | 22 | 635 | clair | calme |
| 04h30 | 18,1 | 21,3 | 20,8 | 20,3 | 21,8 | 17 | 652 | // | // |
| 09h30 | 30,8 | 35,2 | 37 | 38,5 | 26,7 | 10 | 662 | nuages | moyen |

$$Q_{\text{total}} = 662\text{ml}$$

$$\text{pH eau distillée} = 7,84$$

Tableau IV.42 : Tableau des moyennes :

| heure | T _{1moy} | T _{2moy} | T _{3moy} | T _{4moy} | T _{5moy} | Q _{moy} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 43,90 | 57,26 | 57,29 | 60,25 | 31,89 | 55,72 |
| à 09h30 | 39,58 | 50,90 | 51 | 53,31 | 30,4 | 47,28 |

Tableau IV.43 : Journée du 13 aout 2013 jusqu'à 09h30 du 14 aout**h =17,75 mm; C =8 g/l; V=3 l**

| heure | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | Q | Q _{cumulé} | état ciel | vent |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|---------------------|-----------|-------|
| 10h00 | 32 | 31,5 | 34,5 | 39,1 | 31,9 | / | / | clair | moyen |
| 11h00 | 43,2 | 52,8 | 55,1 | 59,4 | 33,4 | / | / | // | // |
| 12h00 | 49,5 | 64,9 | 66,2 | 68,1 | 34,5 | 57 | 57 | // | // |
| 13h00 | 53,3 | 71,4 | 73,9 | 72,8 | 36,4 | 78 | 135 | // | // |
| 14h00 | 53 | 72,8 | 75,9 | 75,2 | 36,3 | 95 | 230 | // | // |
| 15h00 | 53 | 71,3 | 74,5 | 75,1 | 35,3 | 95 | 325 | // | // |
| 16h00 | 50,7 | 68,5 | 69,5 | 72,5 | 35,8 | 87 | 412 | // | // |
| 17h00 | 48,9 | 65,2 | 65,7 | 69,6 | 35,8 | 70 | 482 | // | // |
| 18h00 | 43,9 | 58,7 | 57,8 | 62,1 | 33,9 | 52 | 534 | // | // |
| 19h00 | 34,5 | 46,9 | 45,2 | 44,8 | 29,5 | 30 | 564 | // | calme |
| 20h00 | 27,3 | 36,9 | 34,9 | 34,1 | 26,1 | 18 | 582 | // | moyen |
| 23h30 | 20,9 | 25,1 | 25 | 23,4 | 23,5 | 20 | 602 | // | calme |
| 04h30 | 19,5 | 20,9 | 20,6 | 20,3 | 20,1 | 19 | 621 | couvert | moyen |
| 09h30 | 30,9 | 39,5 | 40,9 | 45,2 | 24,1 | 15 | 636 | clair | // |

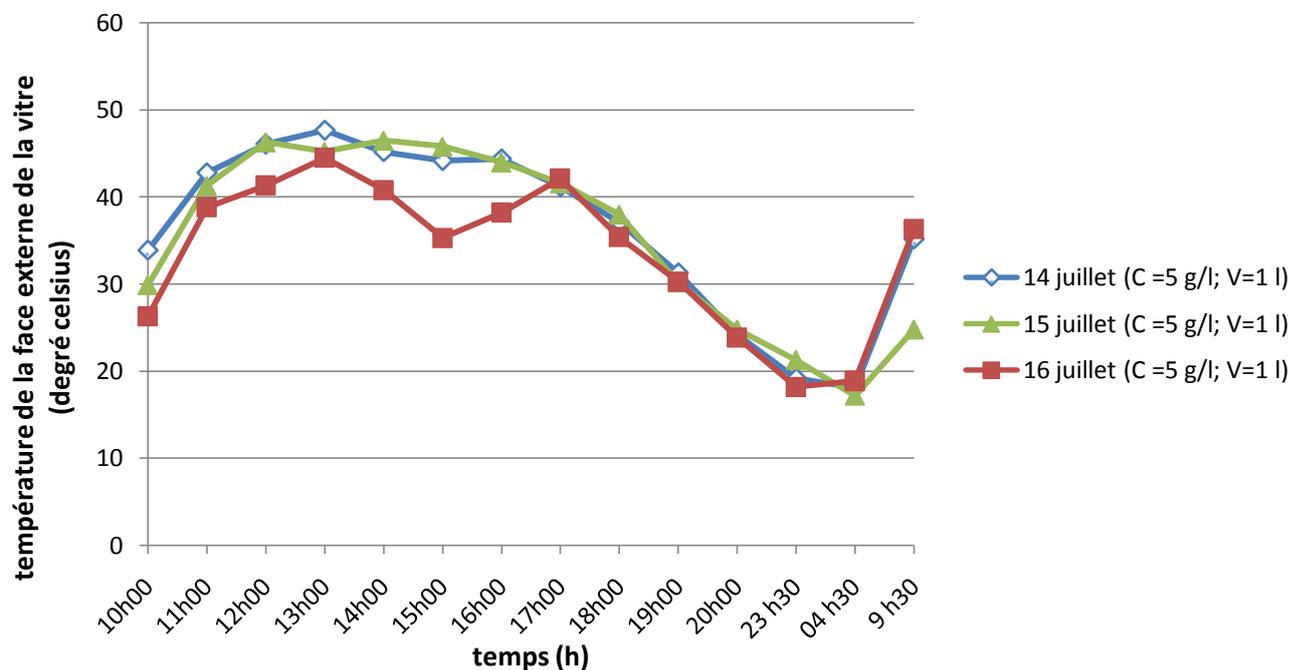
Q_{total}= 635ml**pH eau distillée= 7,79****Tableau IV.44 : Tableau des moyennes :**

| heure | T _{1mov} | T _{2mov} | T _{3mov} | T _{4mov} | T _{5mov} | Q _{mov} |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| à 20h | 44,56 | 58,38 | 59,38 | 61,16 | 33,53 | 52,90 |
| à 09h30 | 53,54 | 51,97 | 52,83 | 54,40 | 31,18 | 45,35 |

IV.6. Courbes d'évolution et interprétations

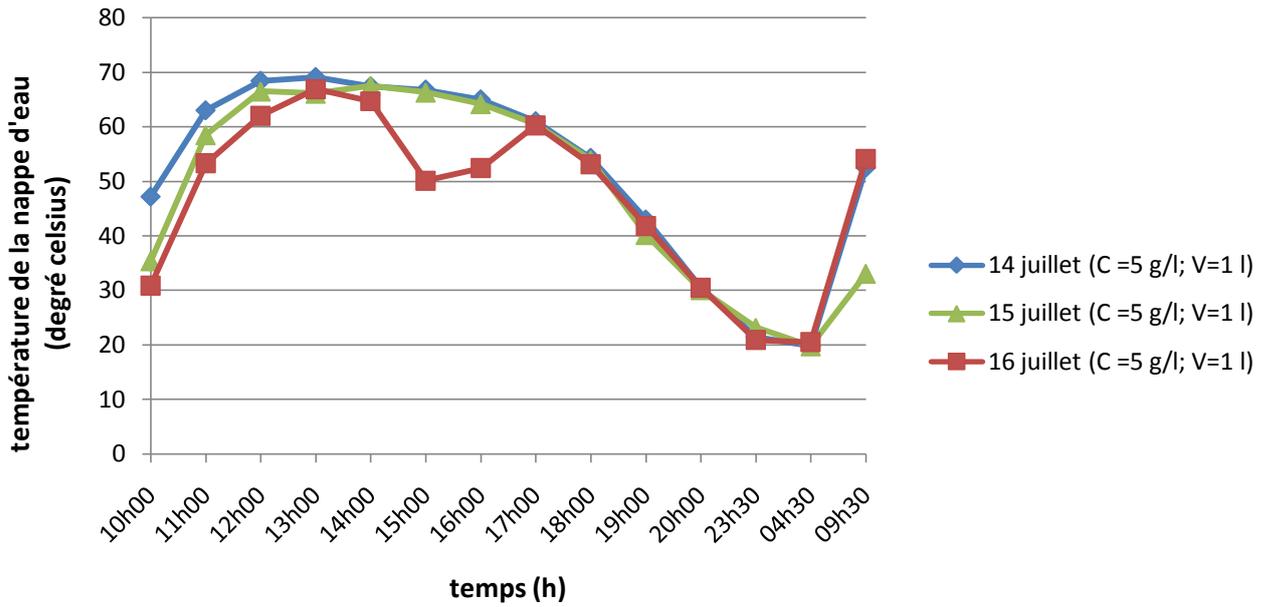
IV.6.1. 1^{ère} partie

IV.6.1.1. Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013



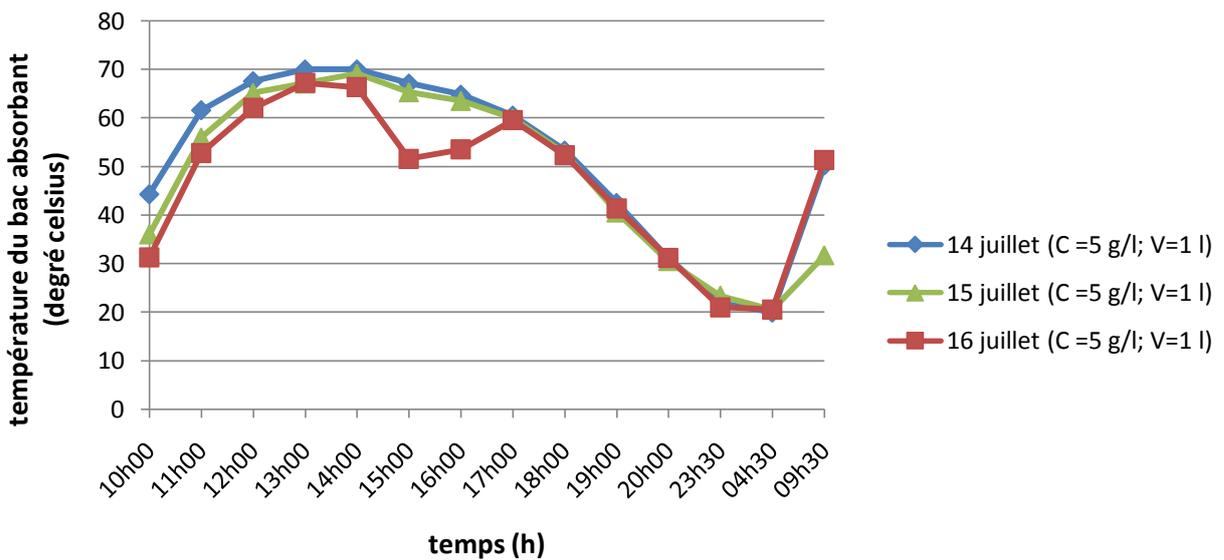
C =5 g/l ; V=1 l

Figure IV.5 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)



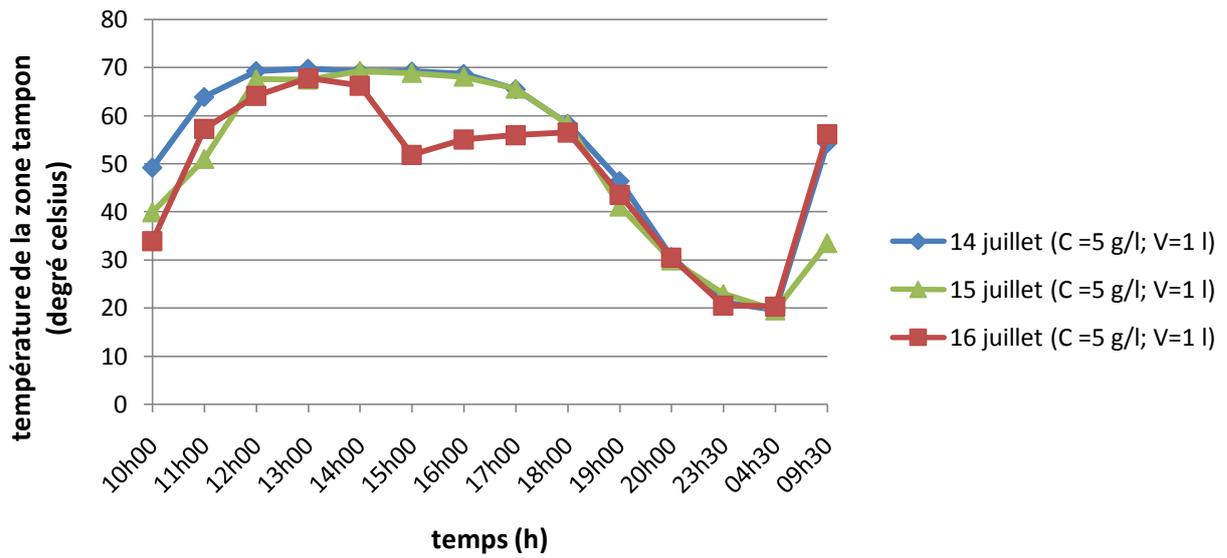
C =5 g/l ; V=1 l

Figure IV.6 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)



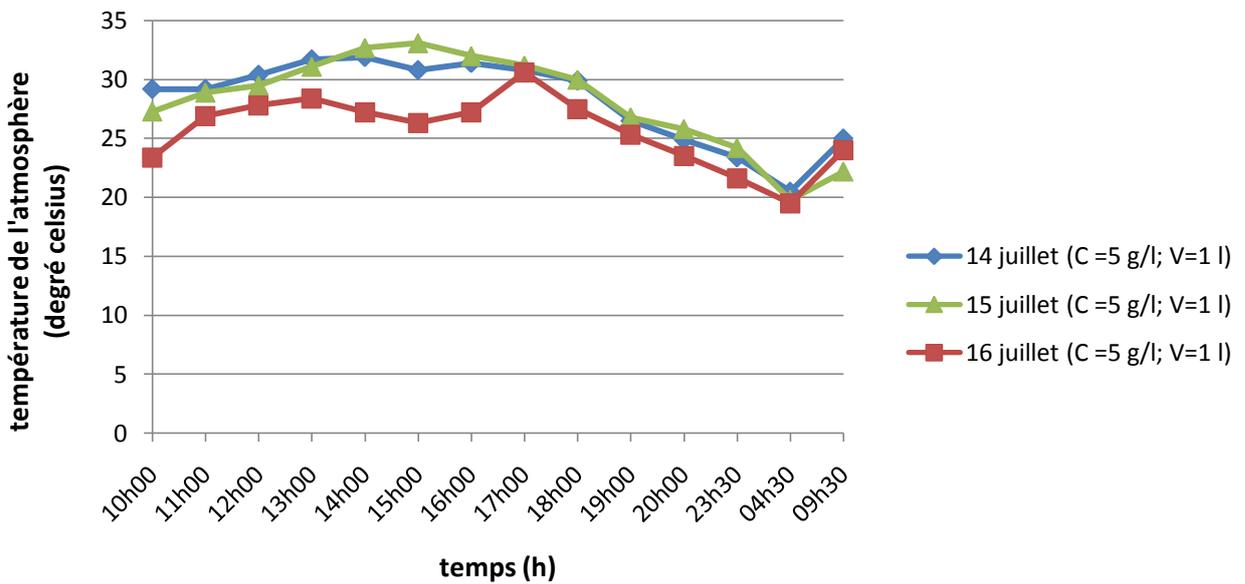
C =5 g/l ; V=1 l

Figure IV.7 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)



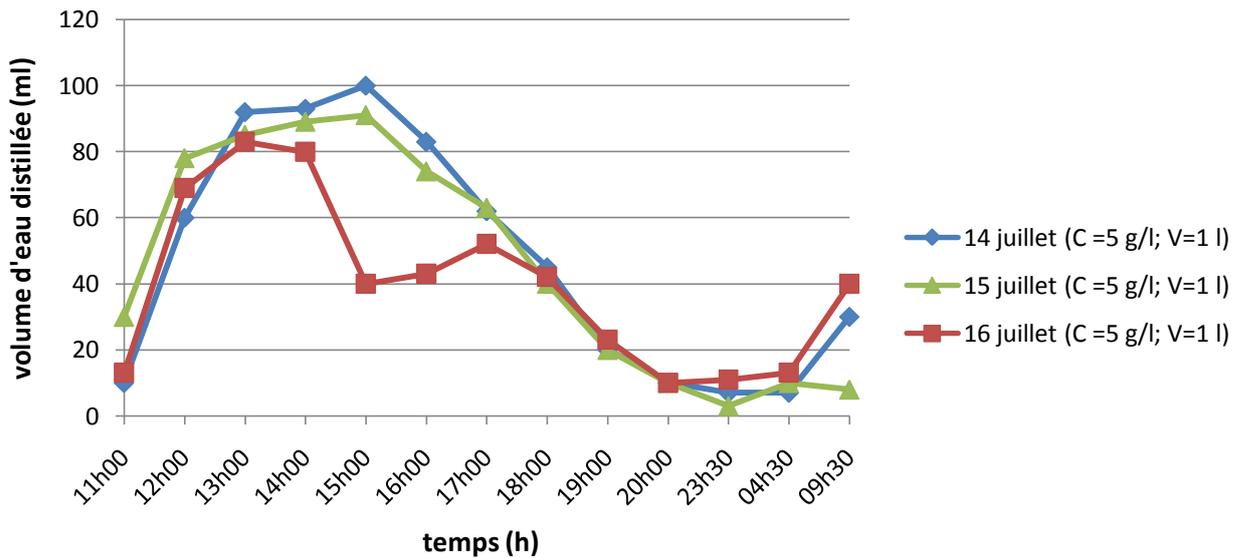
C = 5 g/l ; V=1 l

Figure IV.8 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)



C = 5 g/l ; V=1 l

Figure IV.9 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)



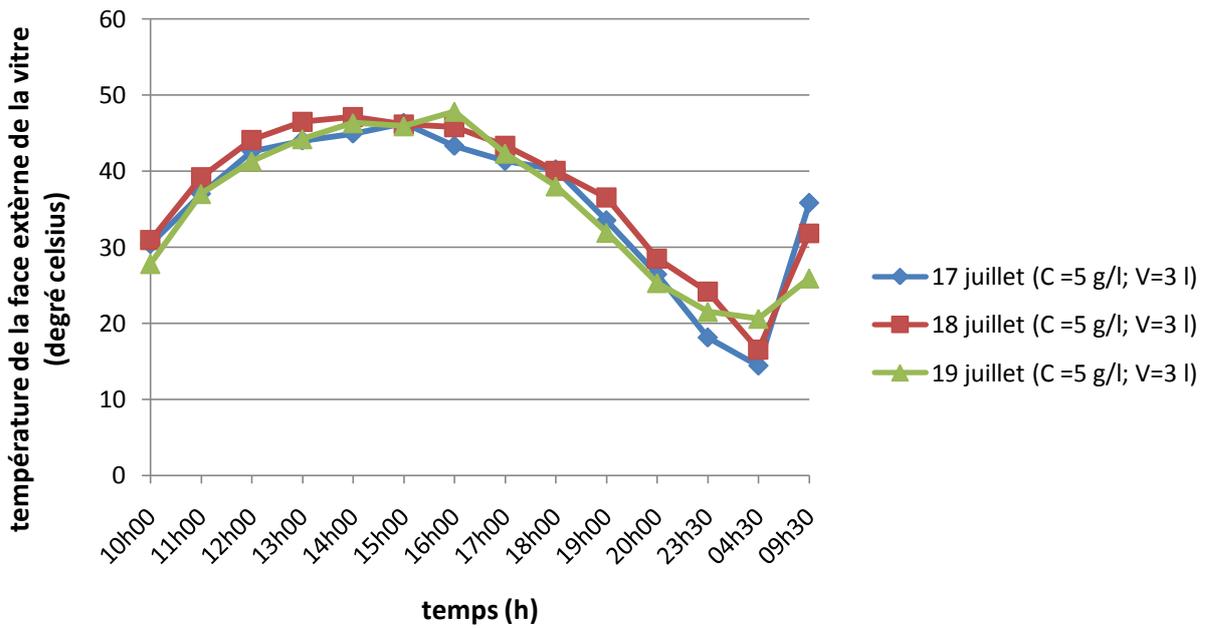
$C = 5 \text{ g/l} ; V = 1 \text{ l}$

Figure IV.10 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 14, 15 et 16 juillet 2013)

Les figures montrent les résultats obtenus sur l'évolution horaire des différentes températures et de l'eau distillée produit du 14, 15 et 16 juillet.

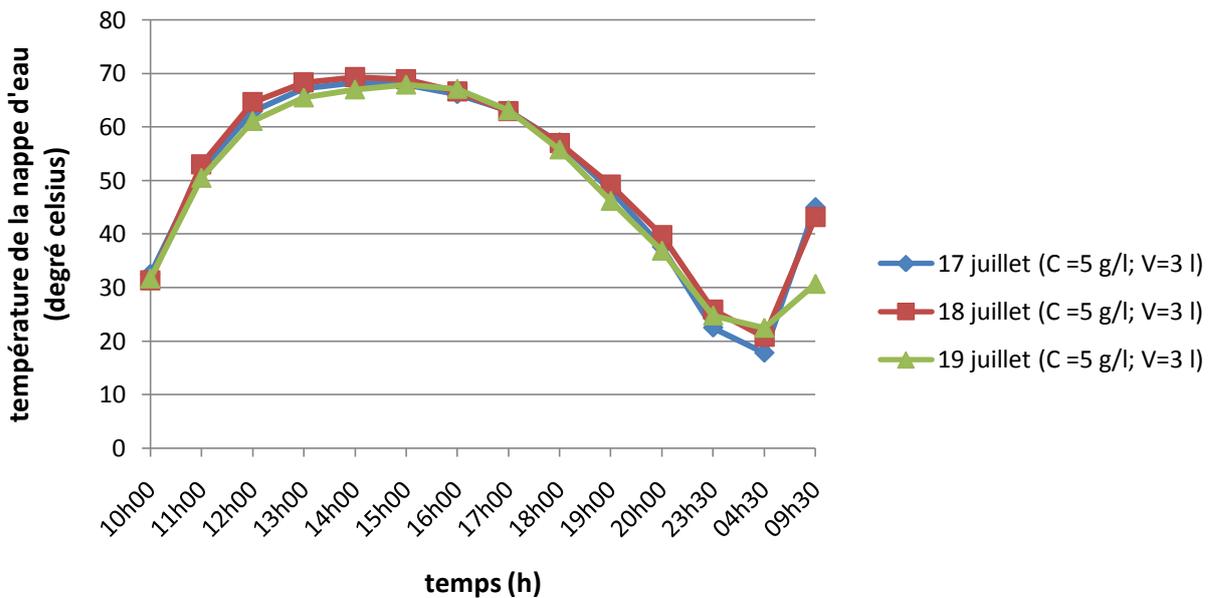
Sur la figure IV.5, on lit l'évolution de la température de la face externe de la vitre, qui est d'une faible différence entre les deux jours (14 et 15 juillet), même au début de la journée du 16 juillet avant que le temps devienne nuageux à 14h00, ce qui empêche l'accès des rayonnements solaires sur la vitre. Cette dernière influence sur la température du bac absorbant (figure IV.7) qui lui-même va influencer sur la température de la nappe d'eau (figure IV.6) et même aux autres paramètres qui mènent à la production de l'eau distillée (figure IV.10).

IV.6.1.2. Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013



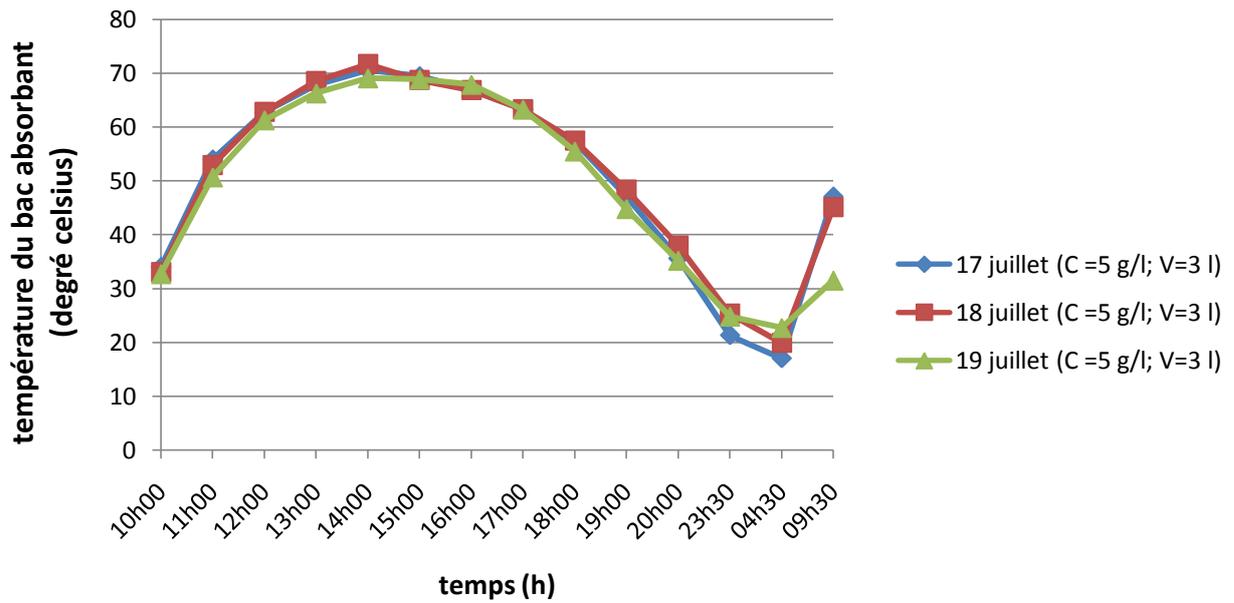
C =5 g/l ; V=3 l

Figure IV.11 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)



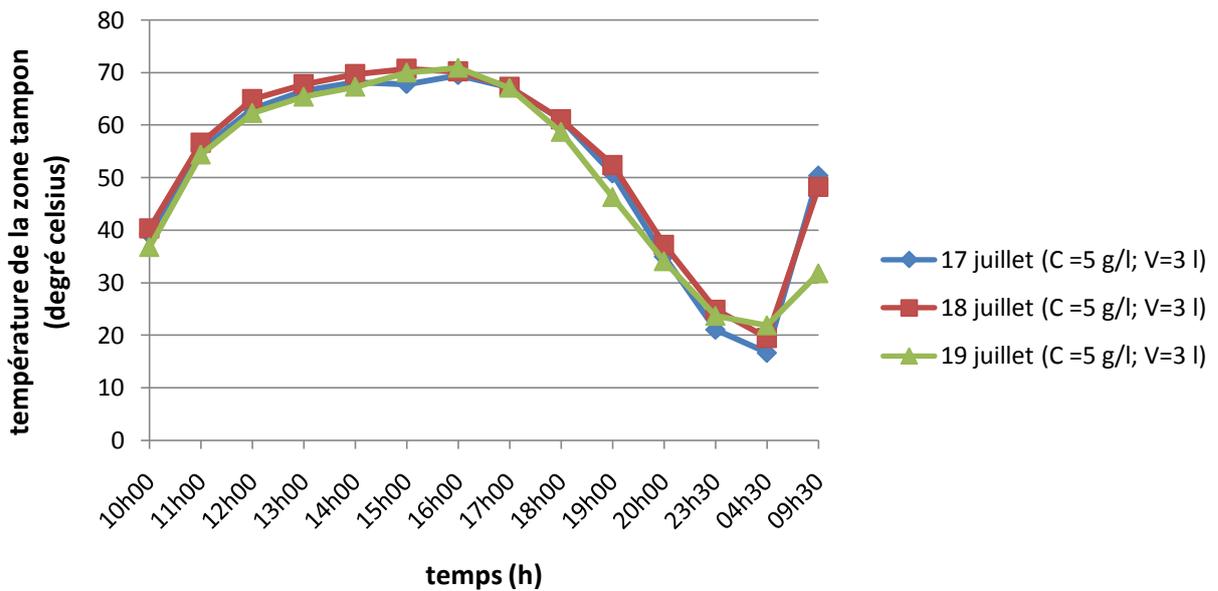
C =5 g/l ; V=3 l

Figure IV.12 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)



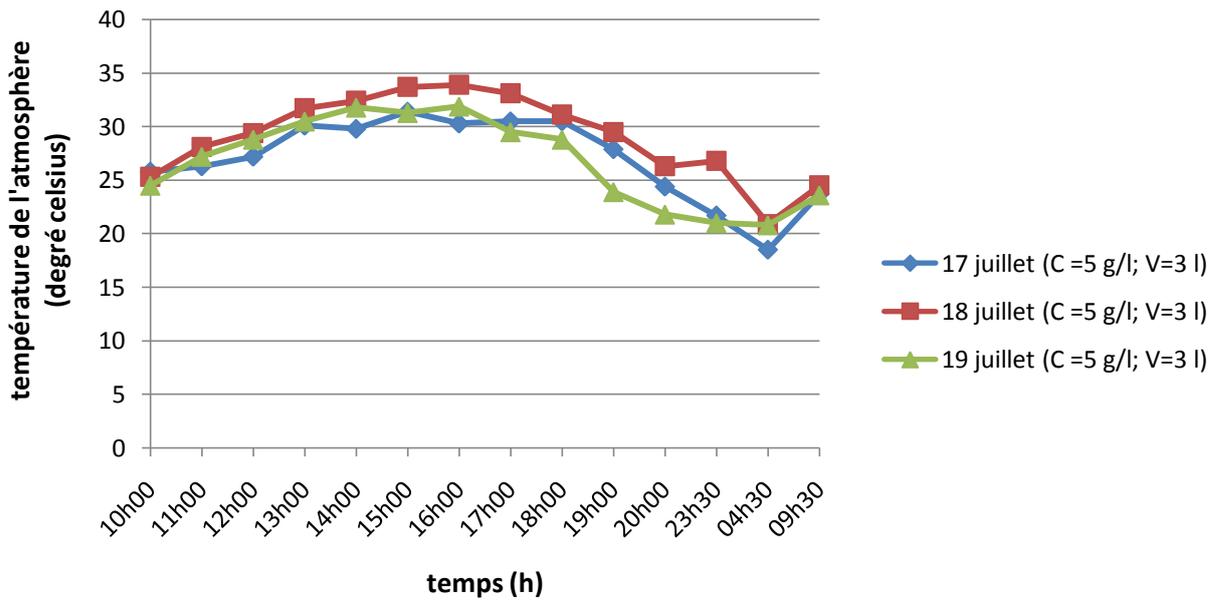
C =5 g/l ; V=3 l

Figure IV.13 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)



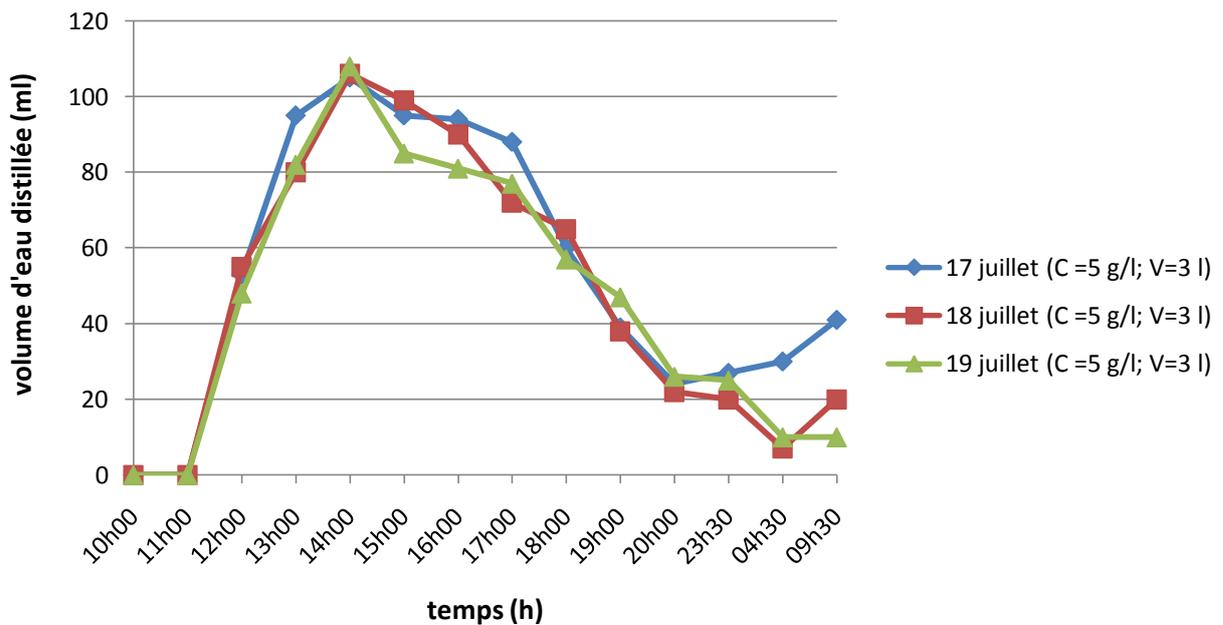
C =5 g/l ; V=3 l

Figure IV.14 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)



C =5 g/l ; V=3 l

Figure IV.15 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)

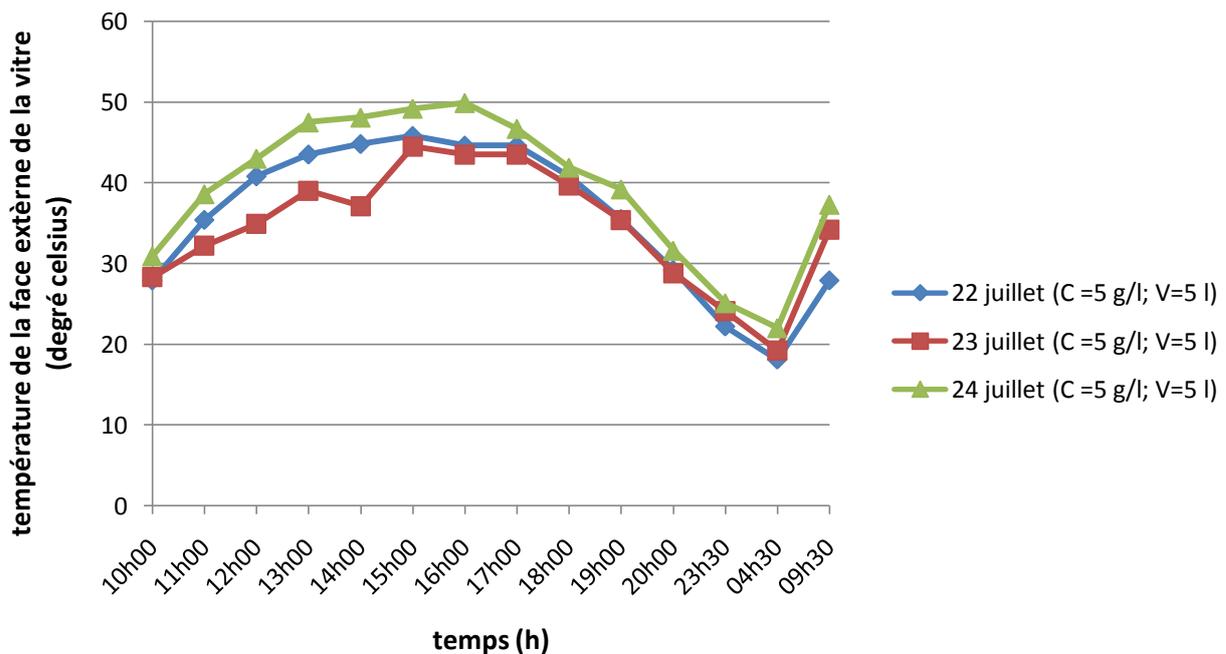


C =5 g/l ; V=3 l

Figure IV.16 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 17, 18 et 19 juillet 2013)

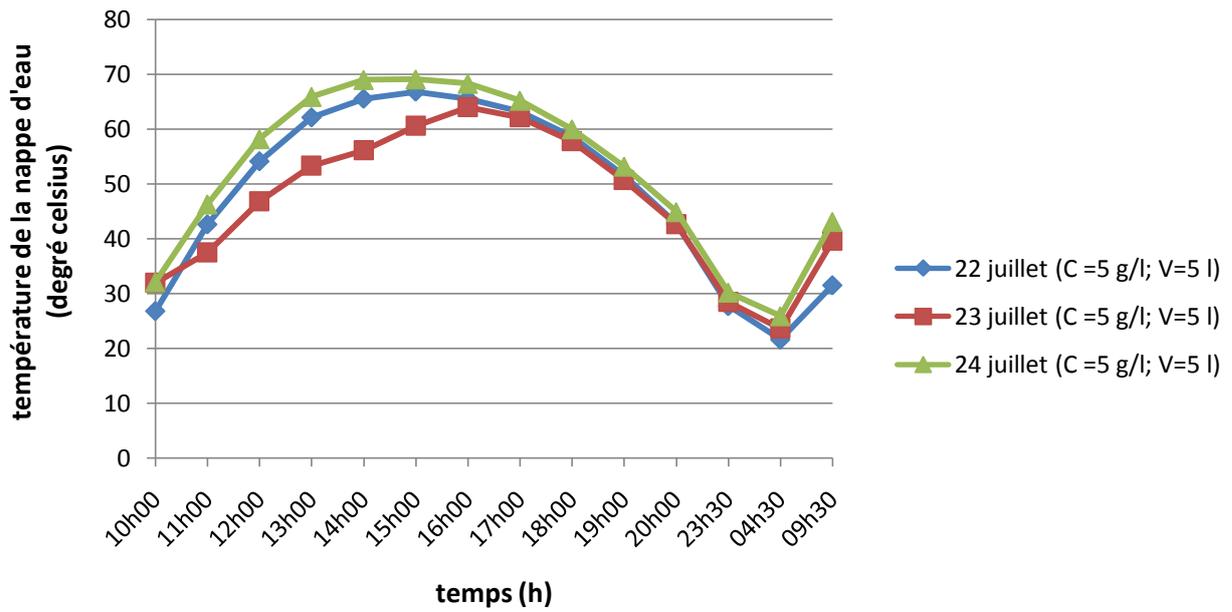
Les figures montrent des résultats obtenus sur les variations horaires de l'eau distillée produit par jour et les différentes températures du 17,18 et 19 juillet. En comparant les courbes des figures, on voit qu'il n'y a pas une grande différence entre eux. La température de la nappe d'eau atteint une valeur maximale entre 14h00 et 15h00 (figure IV.12).

IV.6.1.3. Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013



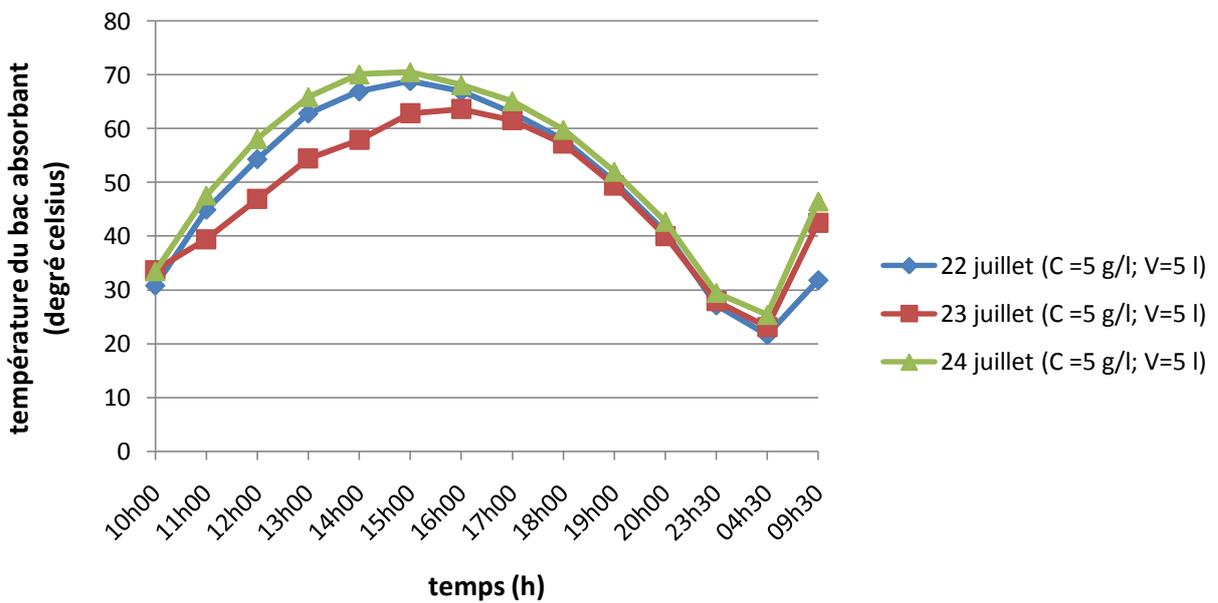
C =5 g/l ; V=5 l

Figure IV.17 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)



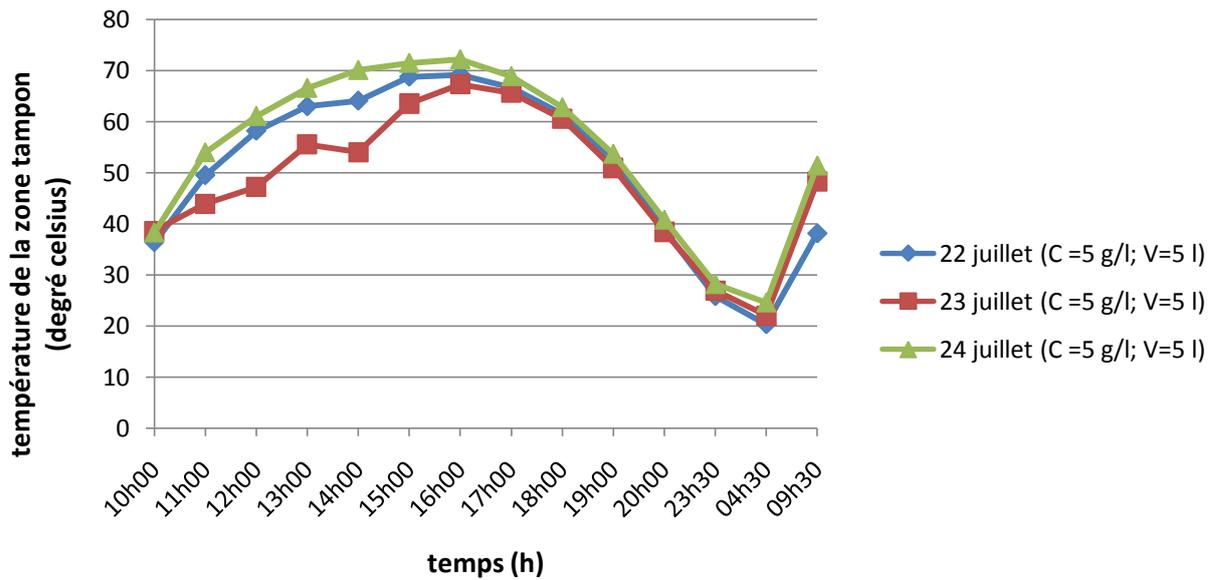
C =5 g/l ; V=5 l

Figure IV.18 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)



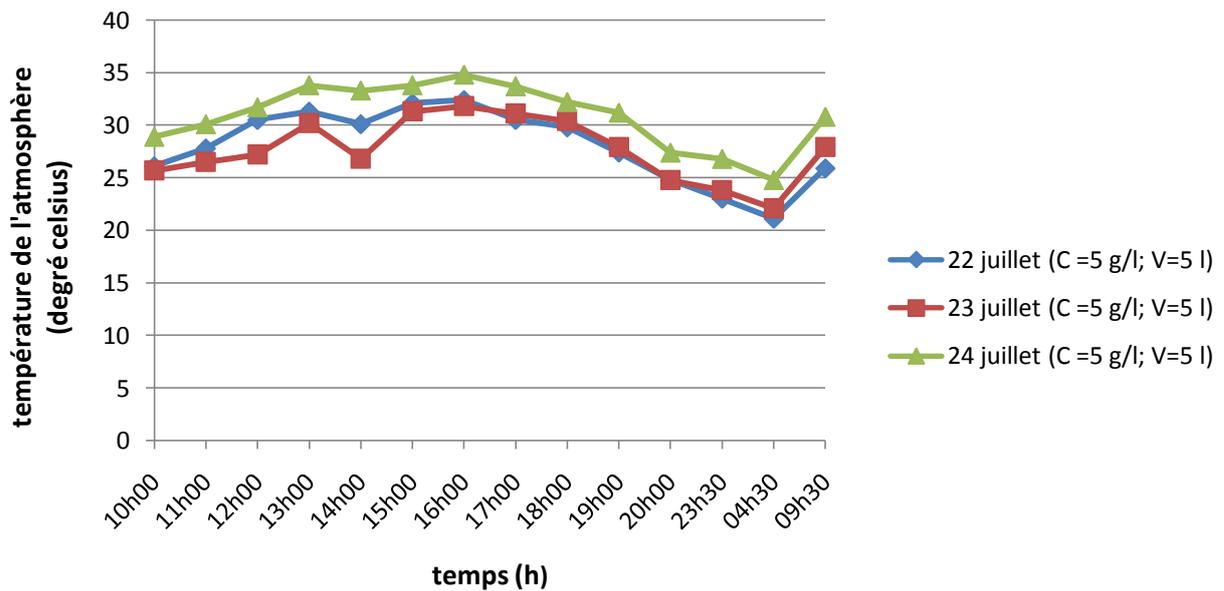
C =5 g/l ; V=5 l

Figure IV.19 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)



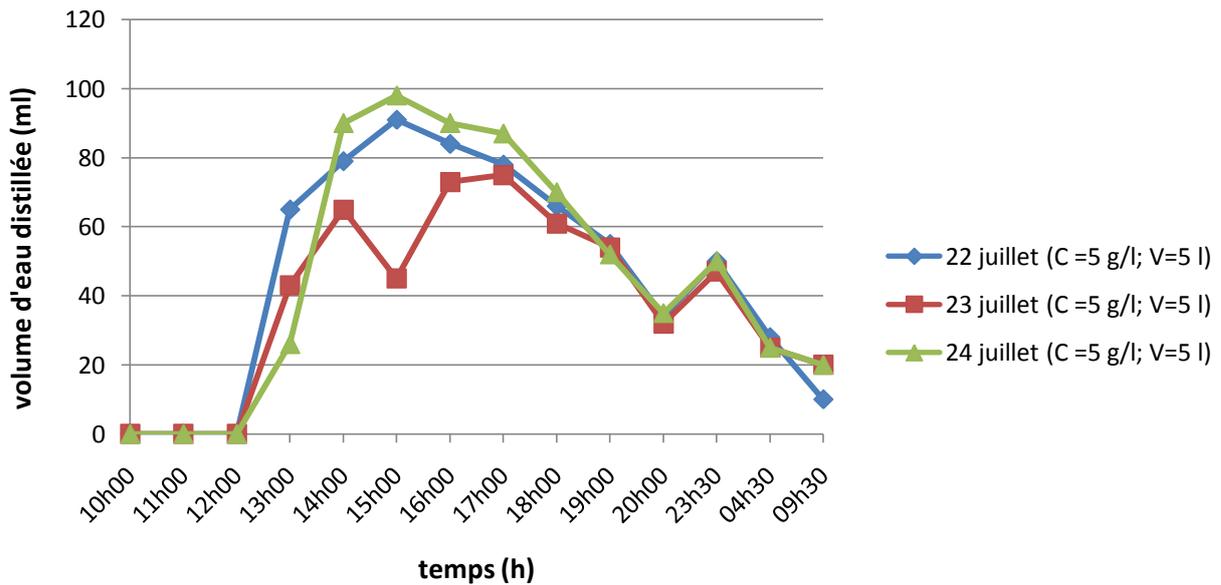
C =5 g/l ; V=5 l

Figure IV.20 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)



C =5 g/l ; V=5 l

Figure IV.21 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)



$$C = 5 \text{ g/l} ; V = 5 \text{ l}$$

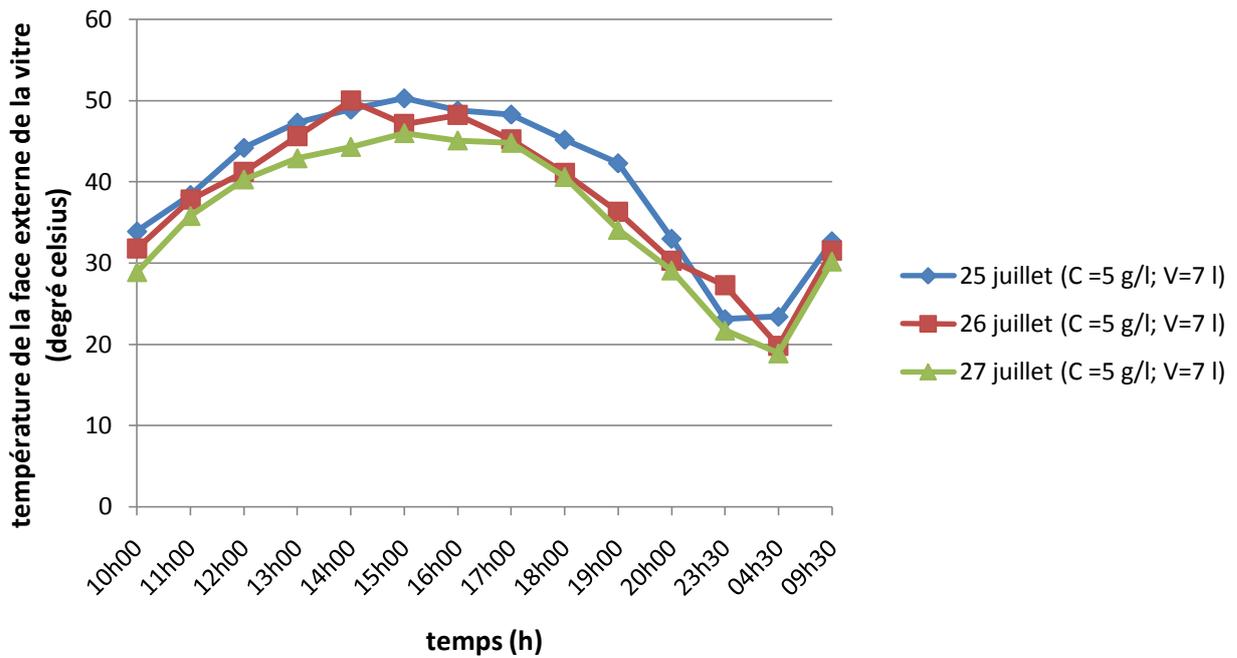
Figure IV.22 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 22, 23 et 24 juillet 2013)

Les figures résultats de simulation illustrent l'évolution des différentes températures (vitrage, nappe d'eau, absorbeur, zone tampon et atmosphère le) et de l'eau distillée produit durant les journées 22, 23 et 24 juillet.

On observe à travers la figure IV.17, une différence de quelques degrés Celsius dans la température de la nappe d'eau entre les 3 journées.

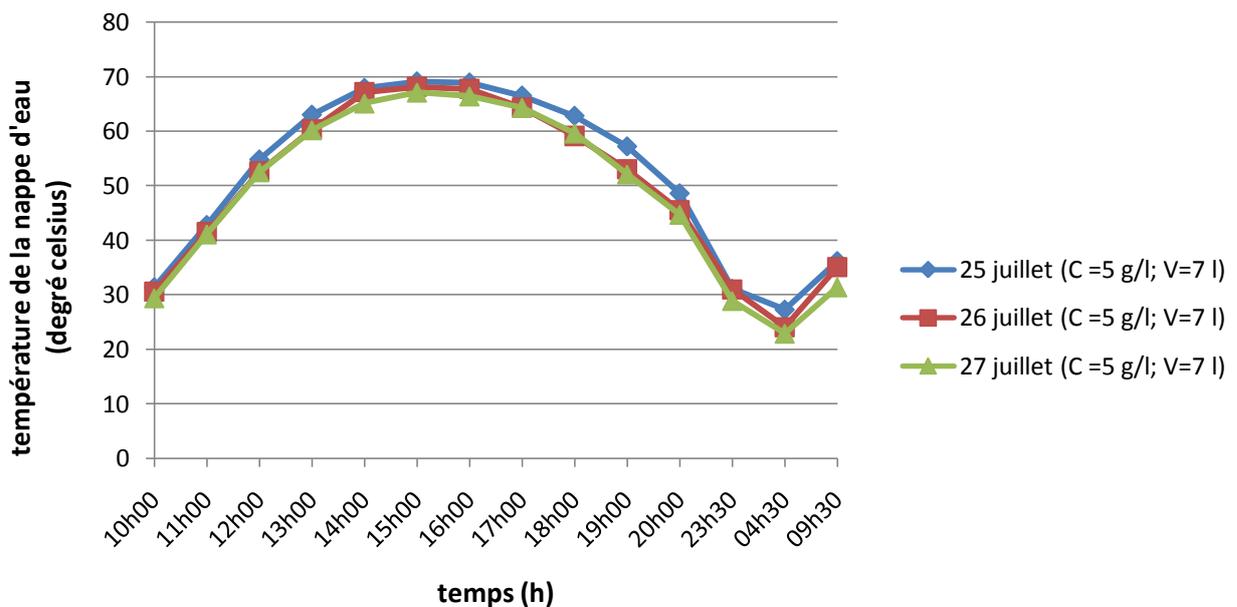
La température de la zone tampon atteint une valeur maximale de 72,2 °C le 24 juillet. La différence entre les températures est due à l'état du ciel et la température atmosphérique (figure IV.21) de chaque jour, les nuages ont une grande influence sur l'intensité du flux solaire qui lui-même influe sur le rendement en eau distillée (figure IV.22). On remarque une production de l'eau distillé durant la nuit mais en très faible quantité, ça nous montre que la production augmente avec l'irradiation solaire.

IV.6.1.4. Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013



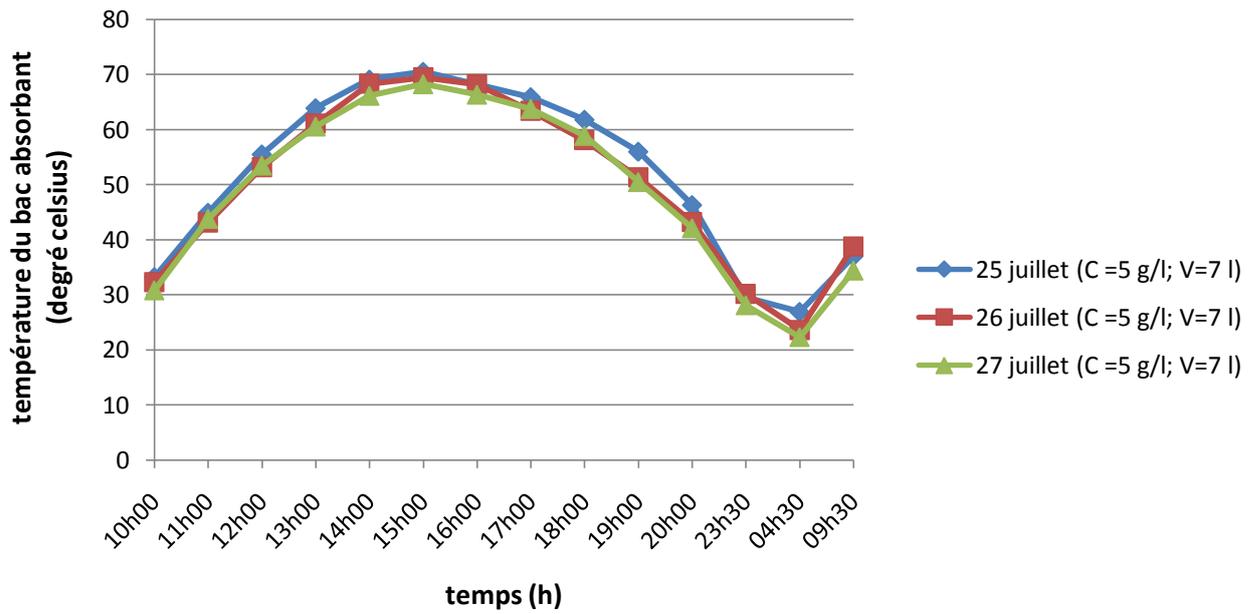
C =5 g/l ; V=7 l

Figure IV.23 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)



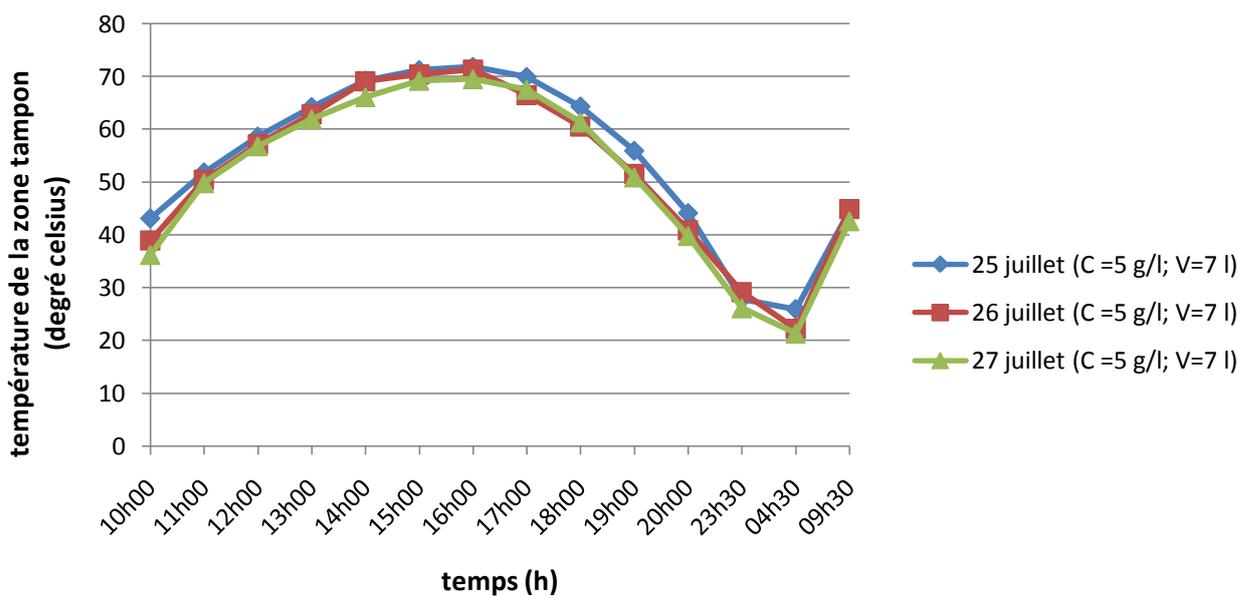
C =5 g/l ; V=7 l

Figure IV.24 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)



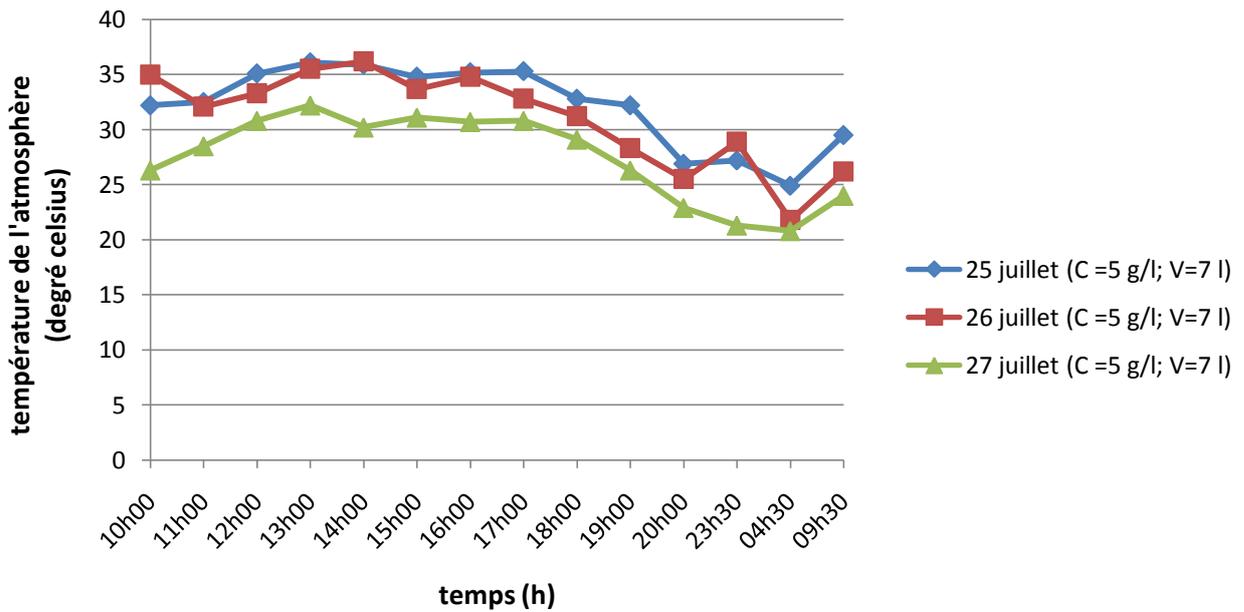
$C = 5 \text{ g/l} ; V = 7 \text{ l}$

Figure IV.25 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)



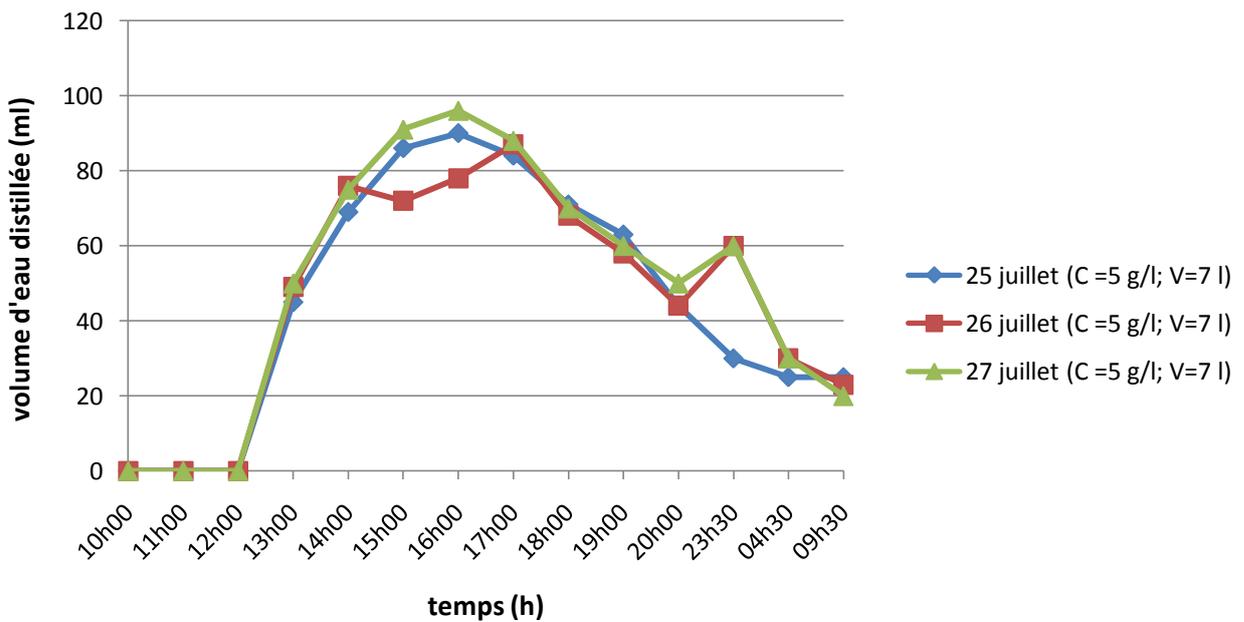
$C = 5 \text{ g/l} ; V = 7 \text{ l}$

Figure IV.26 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)



C =5 g/l ; V=7 l

Figure IV.27 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)



C =5 g/l ; V=7 l

Figure IV.28 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 25, 26 et 27 juillet 2013)

Les figures montrent l'évolution de différentes températures du redistillateur et quantité de distillat produite en fonction du temps, durant les jours 25, 26 et 27 juillet. La température de la face externe de la vitre varie avec le temps et atteint la valeur maximale entre 14h00 et 15h00 (figure IV.23). Les valeurs de la température de la nappe d'eau, de l'absorbeur, et de la zone tampon sont convergentes. La production de distillats de la journée du 26 juillet diminue légèrement à 15h00 à cause de passage d'un nuage, on peut remarquer aussi la production de l'eau distillée importante de 60 ml la nuit (23h30).

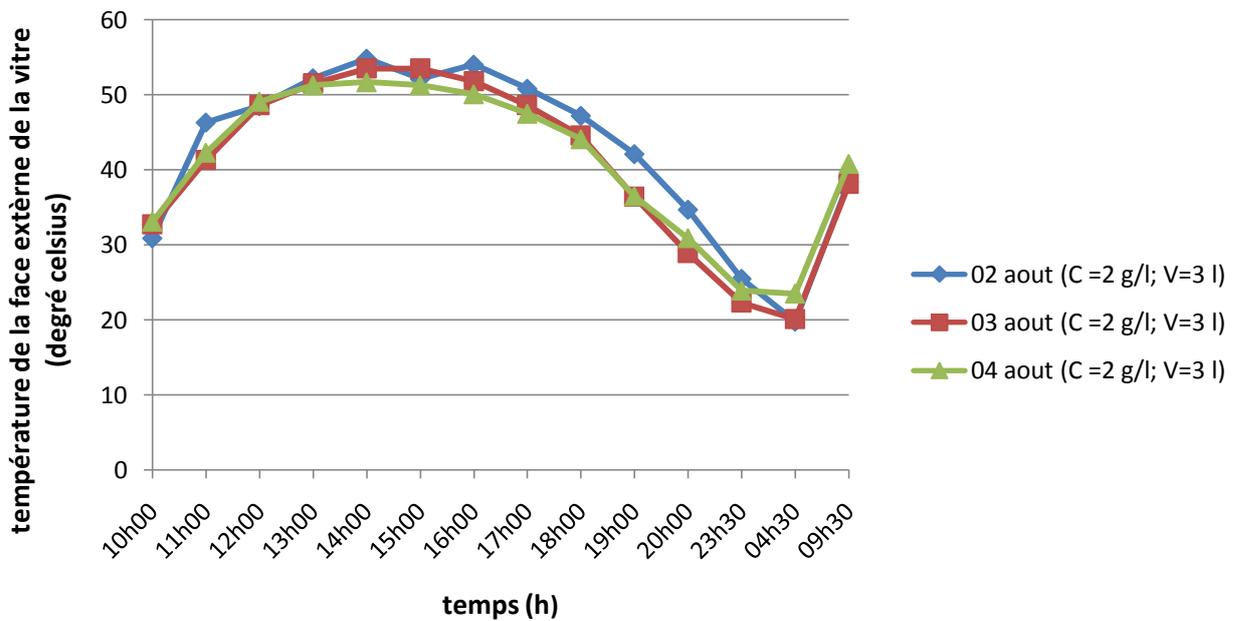
A partir des résultats de la première partie obtenus, on conclut que le volume d'eau saumâtre idéale parmi les autres volumes, c'est celui de 3 l. Ce volume a donné une quantité moyenne assez importante d'eau distillée et ceci durant trois jours par rapport aux autres volumes.

On remarque que la production de distillat augmente lorsque le volume de l'eau du saumâtre diminue.

Ce phénomène est expliqué par le fait que l'inertie du système devient plus faible, quand l'épaisseur de la couche d'eau saumâtre (volume) diminue.

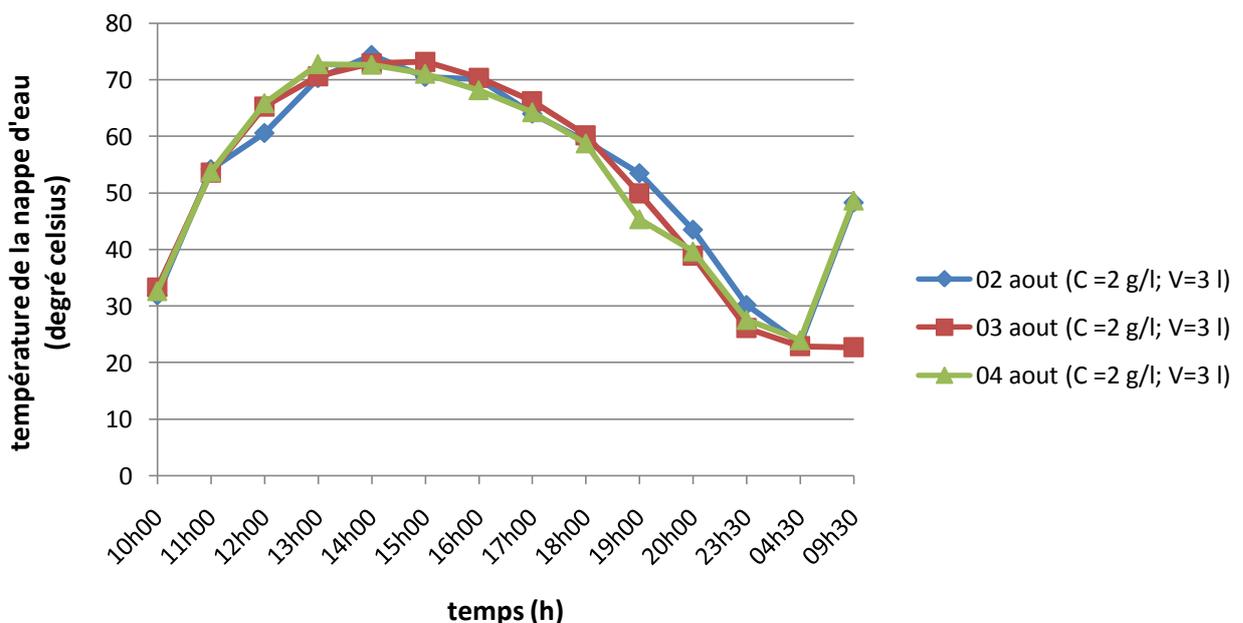
IV.6.2. 2^{eme} partie

IV.6.2.1. Journées du 02, 03 et 04 aout 2013



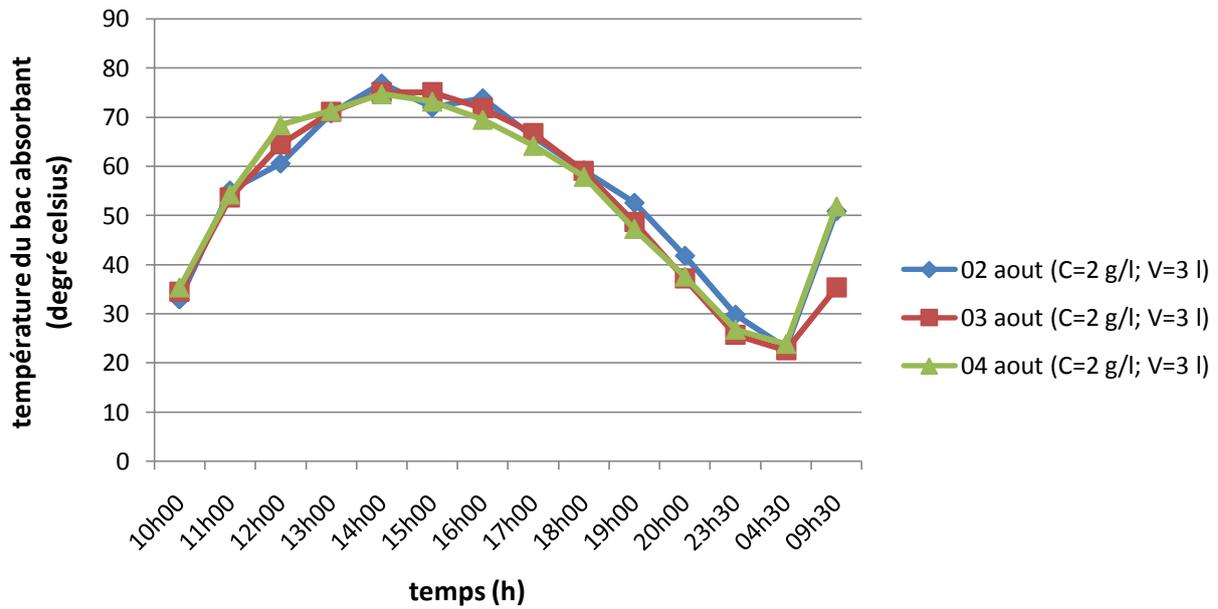
C = 2 g/l ; V = 3 l

Figure IV.29 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)



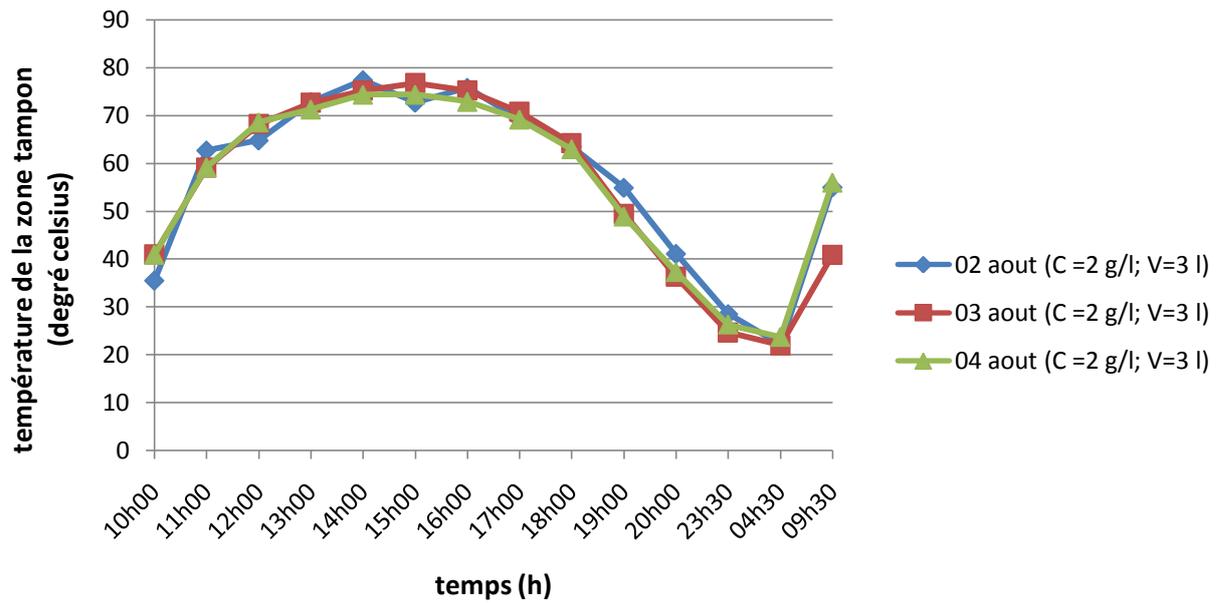
C = 2 g/l ; V = 3 l

Figure IV.30 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)



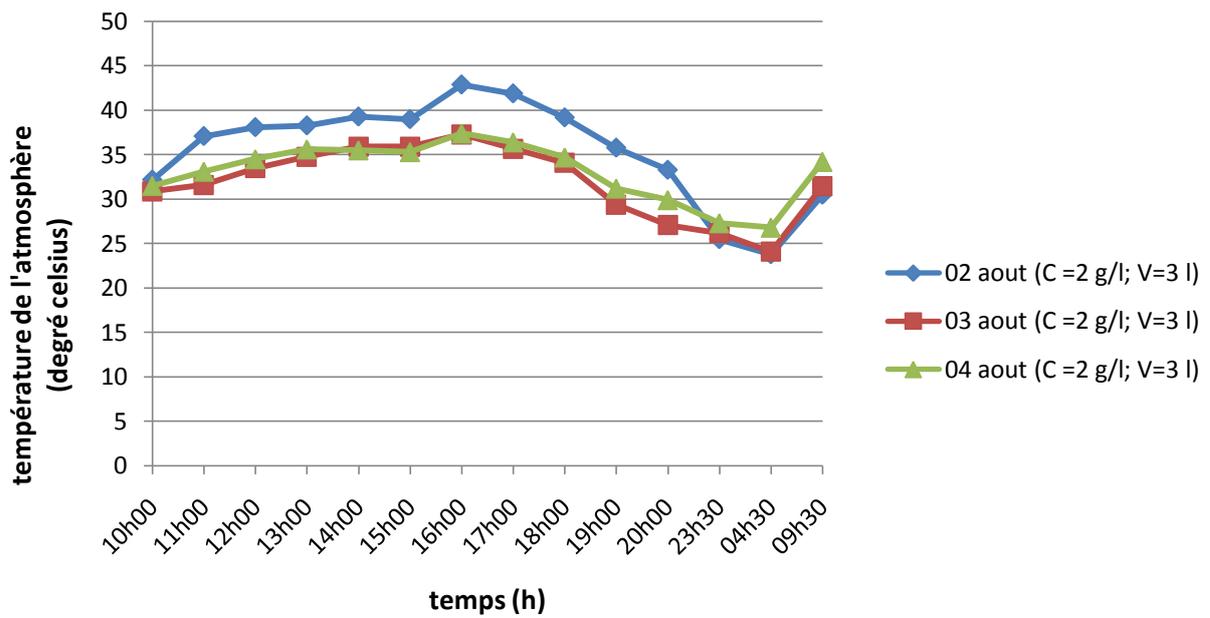
C = 2 g/l ; V = 3 l

Figure IV.31 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)



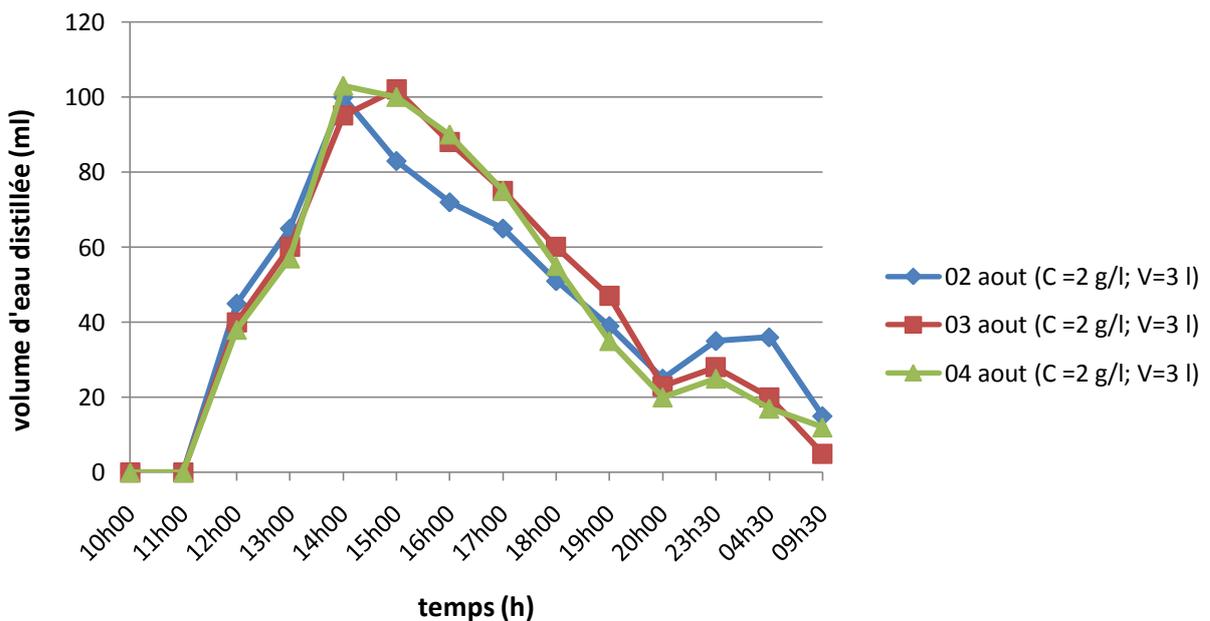
C = 2 g/l ; V = 3 l

Figure IV.32 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)



C =2 g/l ; V=3 l

Figure IV.33 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)

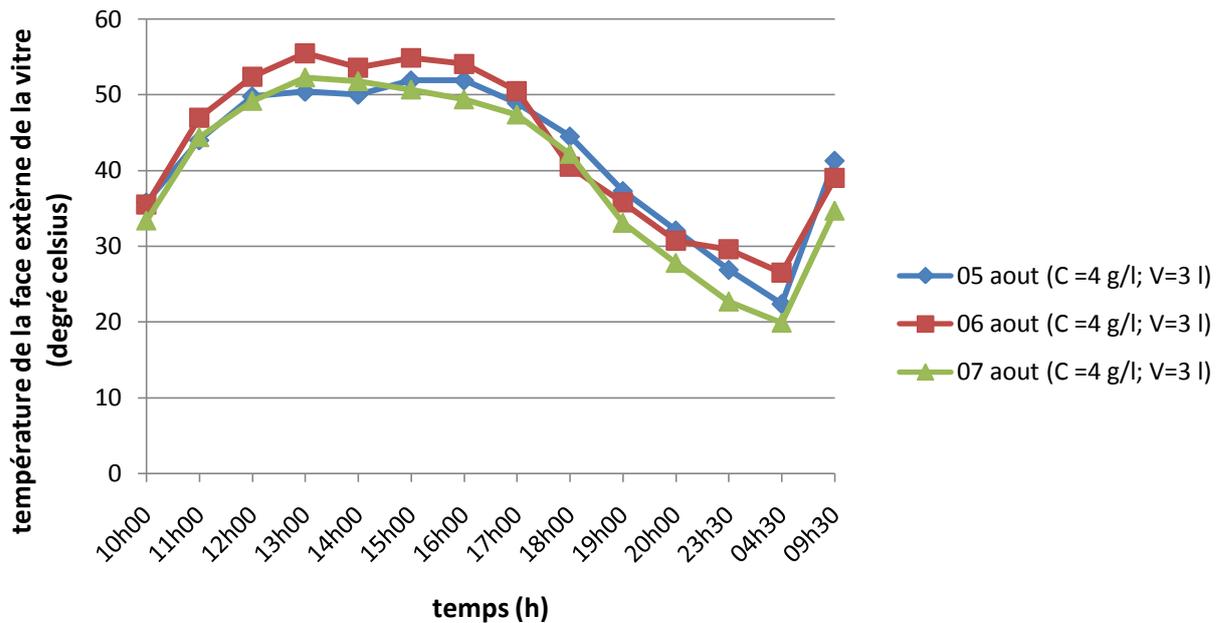


C =2 g/l ; V=3 l

Figure IV.34 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 02, 03 et 04 aout 2013)

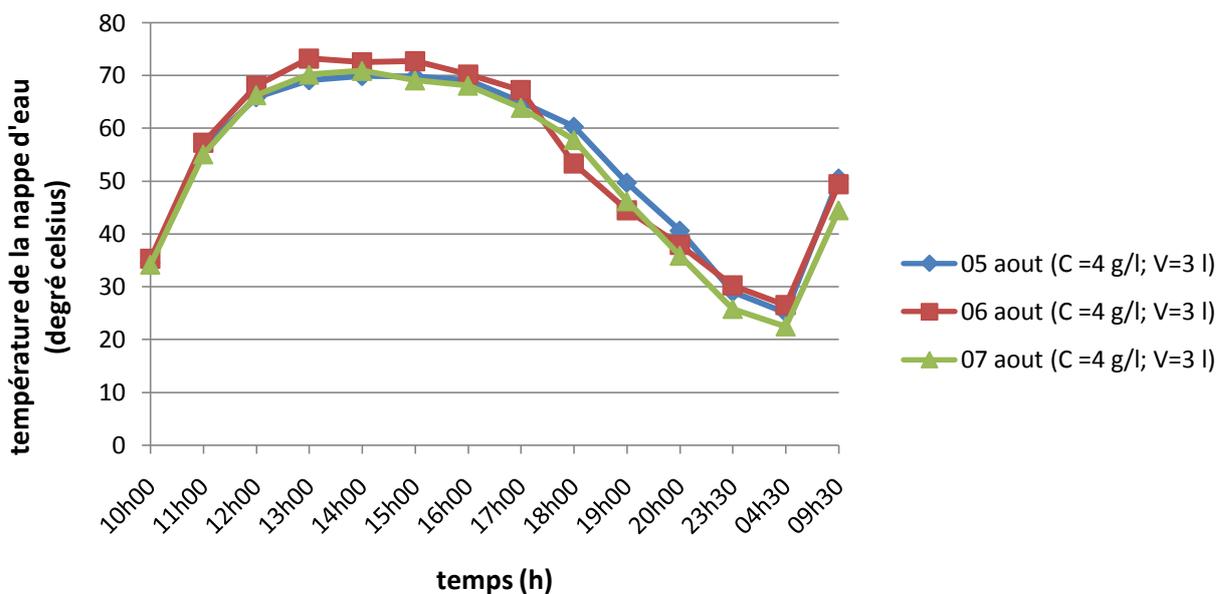
Les figures montrent l'évolution de différentes températures de notre distillateur et quantité de distillat produite en fonction du temps, durant les jours 02, 03 et 04 aout. La figure 25 présente les variations de la température de la face extérieure de la vitre durant les journées citées, on remarque une différence légère dans les valeurs de la journée du 02 aout dont la température de la vitre est grande malgré l'état du ciel qui n'est pas favorable par rapport des deux autres journées. La figure 30 présente bien la grande différence entre la température atmosphérique du 02 aout par rapport aux deux autres journées puisqu'il atteint 42,9 °C. Malgré cela, la variation de la production en eau distillée est faible, par contre le rendement dépasse les 100 ml le 03 et le 04 aout à une température moindre, tout cela montre bien que la température atmosphérique n'est pas le seul facteur influençant sur la quantité d'eau distillée puisque nous constatons dans la journée du 02 aout; malgré que la température atmosphérique atteint une grande valeur de 42,9 la quantité du distillat n'est pas aussi important. On peut remarquer aussi que la production importante durant la nuit du 02 aout dont elle atteint 35 ml à 23h30 et 37 ml à 04h30 du matin. Cette production n'est qu'une continuité de l'activité interne de distillateur.

IV.6.2.2. Journées du 05, 06 et 07 aout 2013



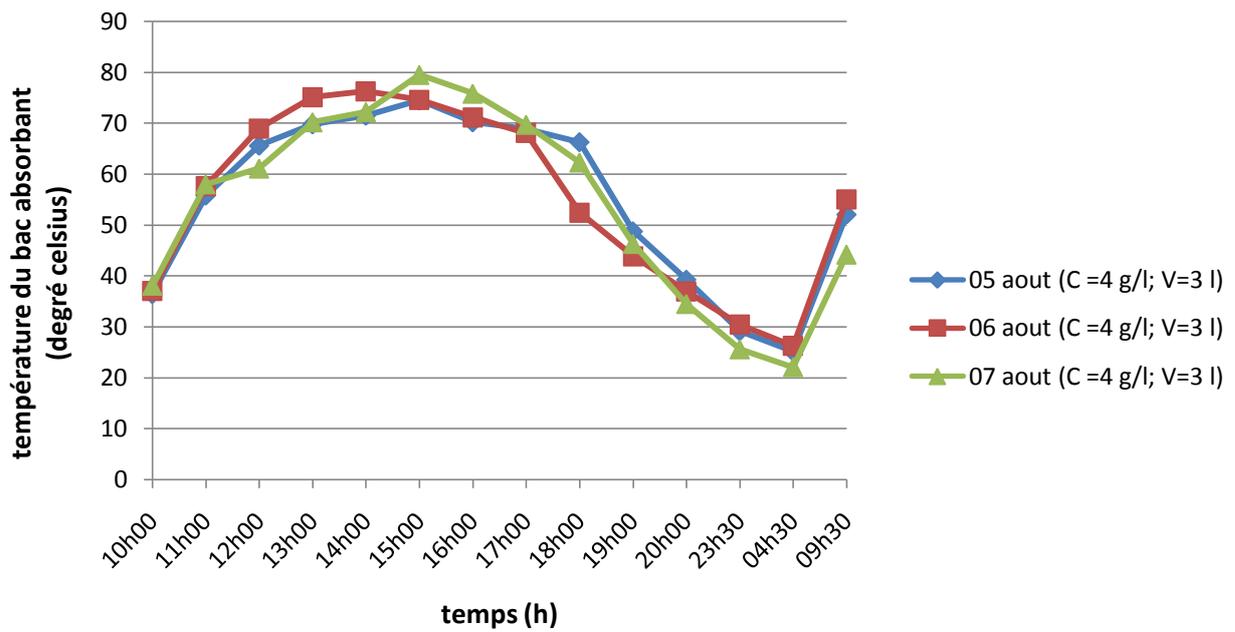
C =4 g/l ; V=3 l

Figure IV.35 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)



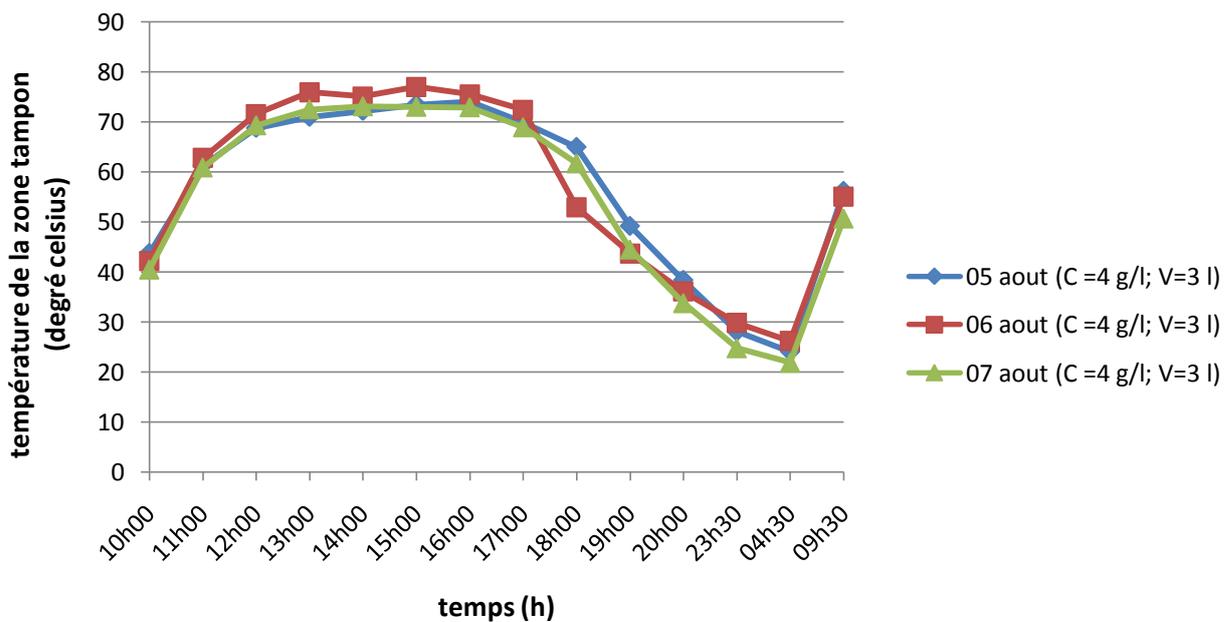
C =4 g/l ; V=3 l

Figure IV.36 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)



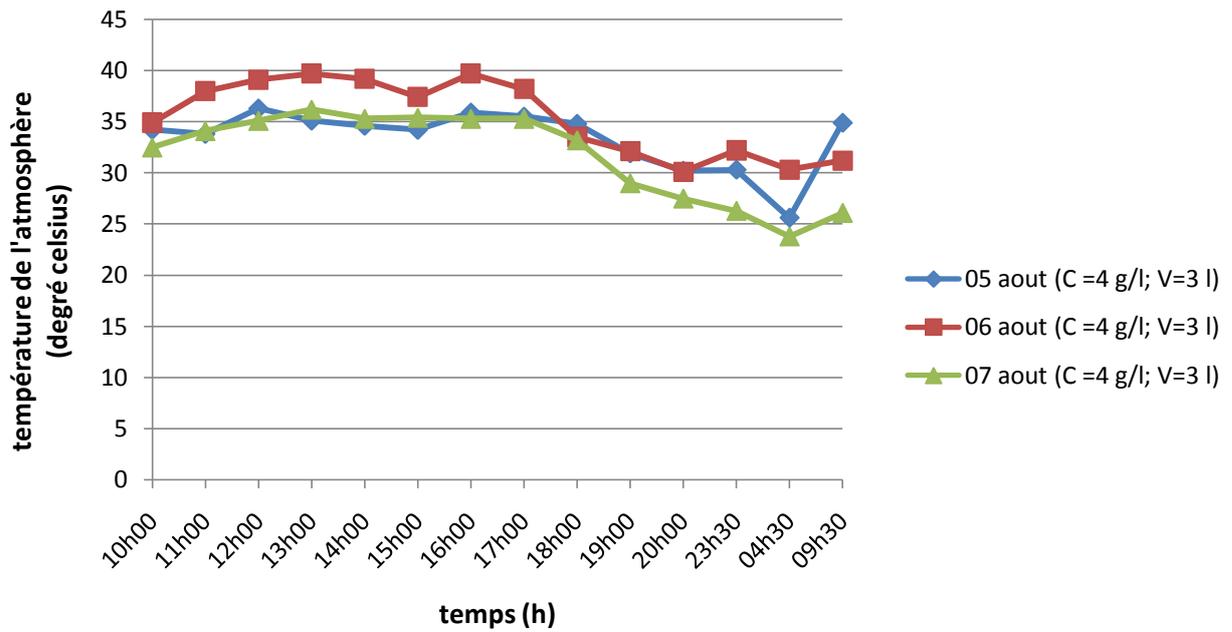
C = 4 g/l ; V = 3 l

Figure IV.37 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)



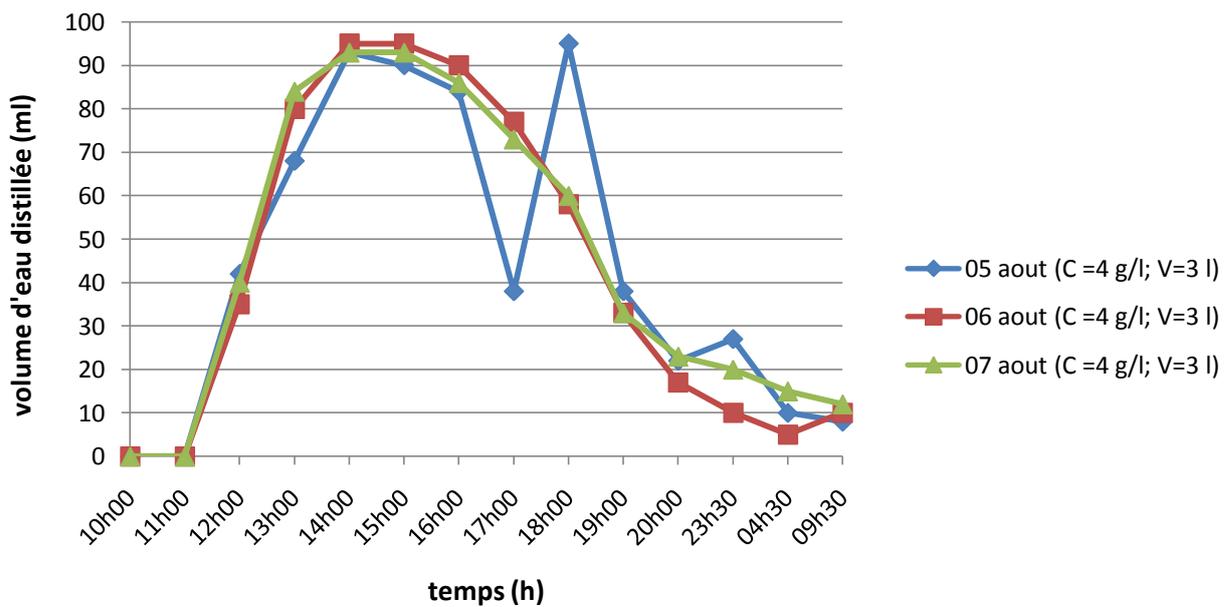
C = 4 g/l ; V = 3 l

Figure IV.38 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)



C = 4 g/l ; V = 3 l

Figure IV.39 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)

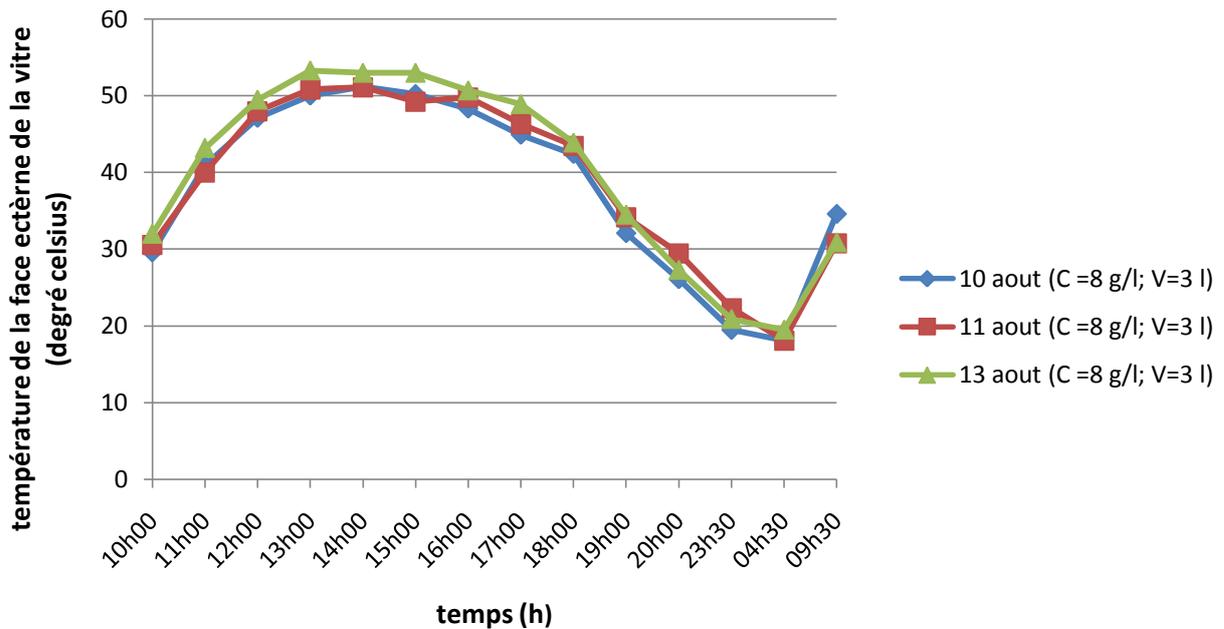


C = 4 g/l ; V = 3 l

Figure IV.40 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 05, 06 et 07 aout 2013)

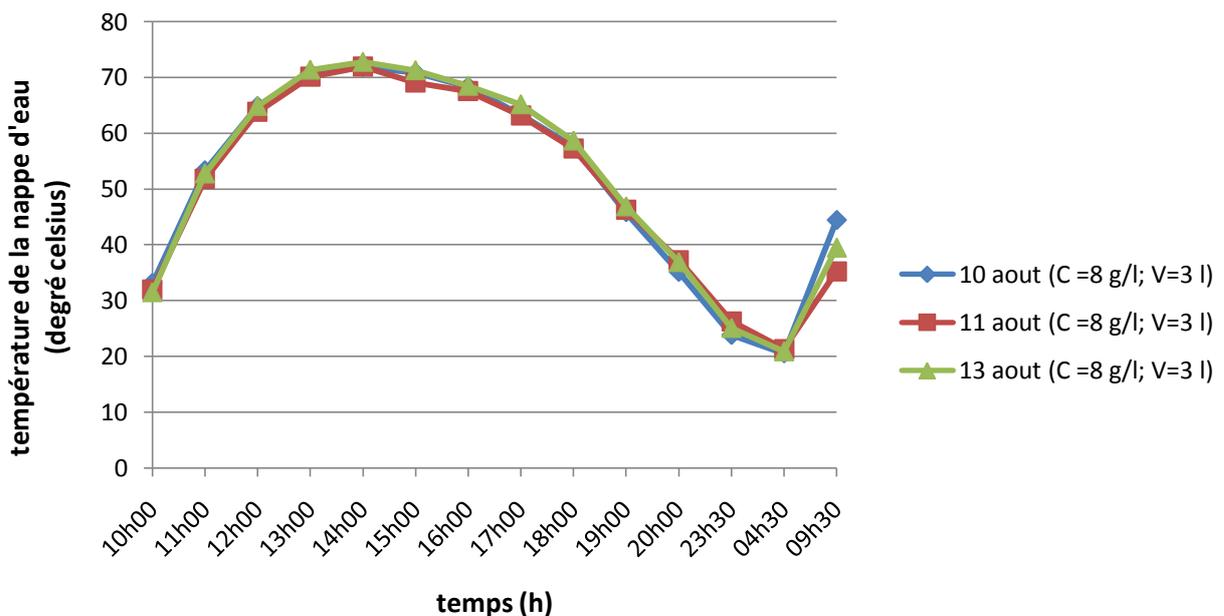
Les figures montrent les résultats obtenus sur l'évolution horaire des différentes températures et de l'eau distillée produit du 05, 06 et 07 aout. On lit sur les graphes des figures (35, 36, 38) des valeurs convergentes dans les trois jours d'essais avec une avance légère à la journée de 06 aout dont les valeurs de température maximale (vitre, nappe d'eau et zone tampon) enregistrées entre 13h00 et 14h00. Sur la figure la température du bac absorbant atteint les 79,5 degré Celsius à 15h00, c'est la valeur maximale mesuré. Sur les graphes de production en distillat (figure 40) on remarque bien une chute et une augmentation inattendue de la production entre 16h00 et 18h00, cette évolution est dû à l'effet du vent, ça nous montre que le vent à de petites vitesses accélère le processus d'évaporation ce qui entraîne une amélioration de la production, on remarque l'effet inverse dû au refroidissement de la face extérieure de la vitre, ce qui entraîne une diminution de la température de la saumure d'une part et l'accroissement des pertes par convection au niveau de la vitre face extérieure d'autre part.

IV.6.2.3. Journées du 10, 11 et 13 aout 2013



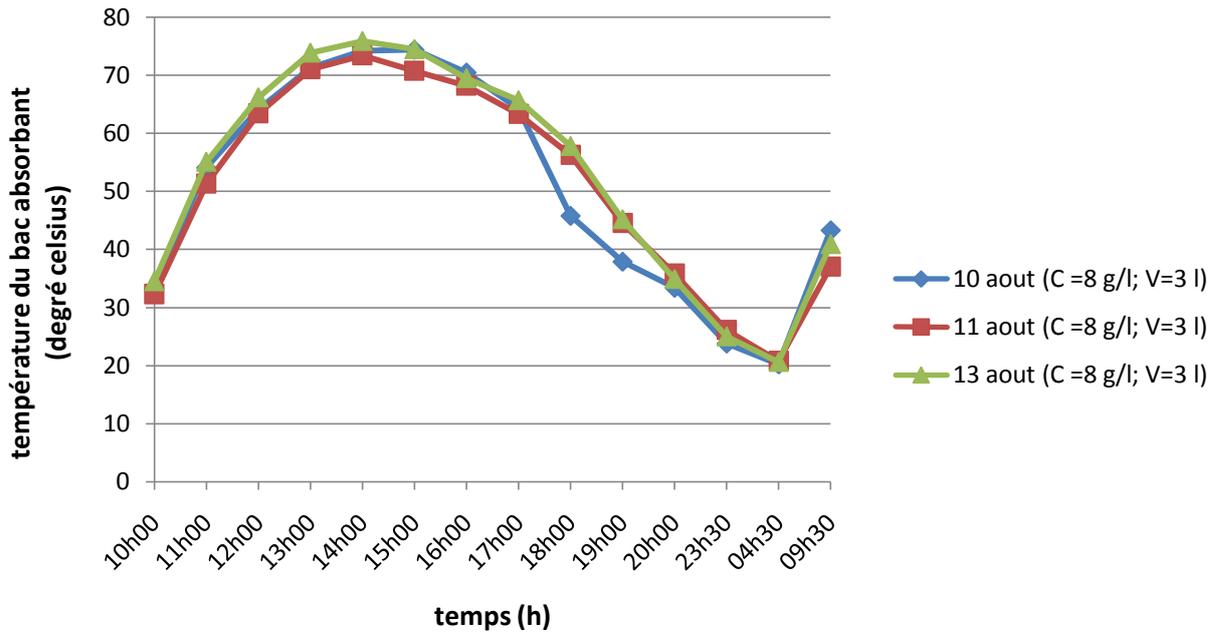
C =8 g/l ; V=3 l

Figure IV.41 : courbes d'évolution des températures de la face externe de la vitre en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)



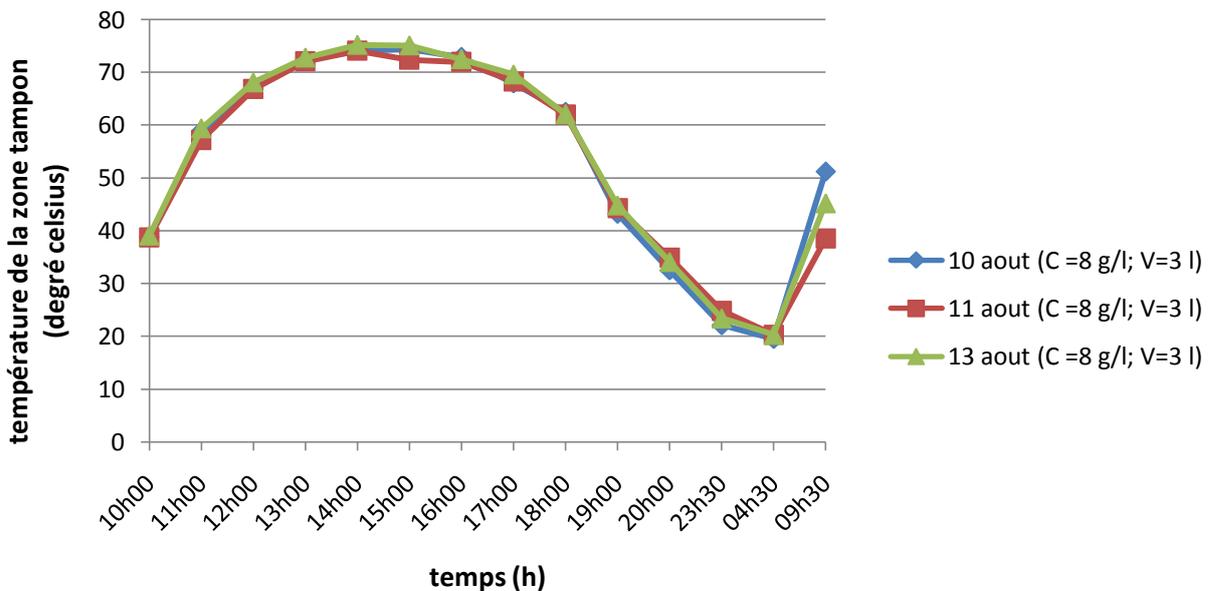
C =8 g/l ; V=3 l

Figure IV.42 : courbes d'évolution des températures de la nappe d'eau en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)



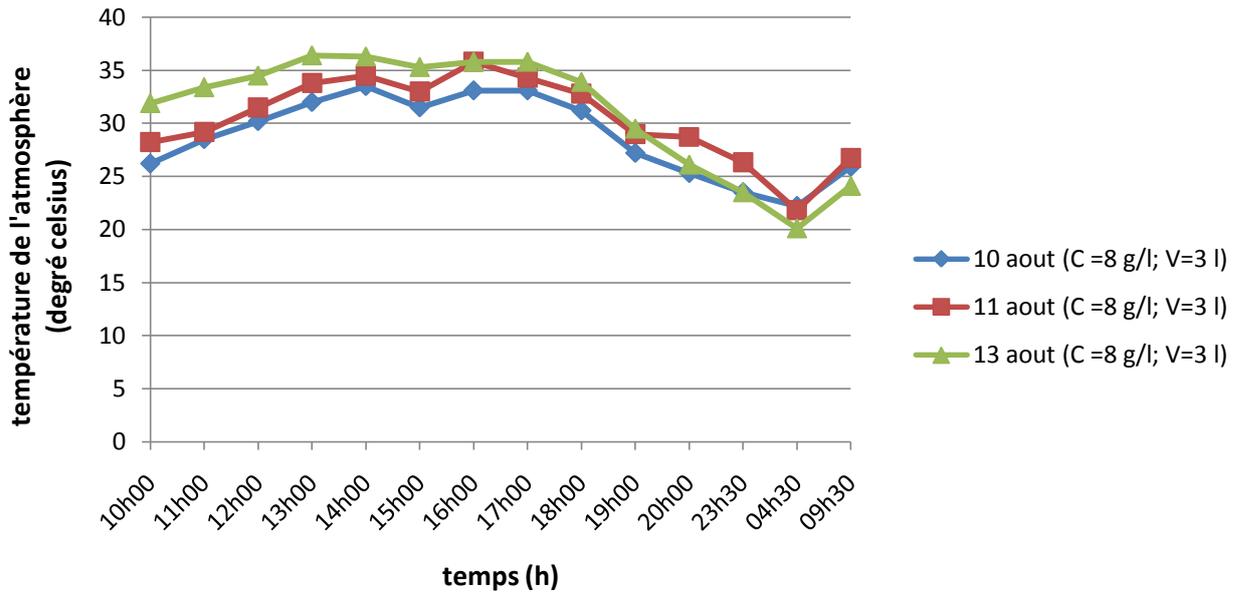
$C = 8 \text{ g/l} ; V = 3 \text{ l}$

Figure IV.43 : courbes d'évolution des températures du bac absorbant en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)



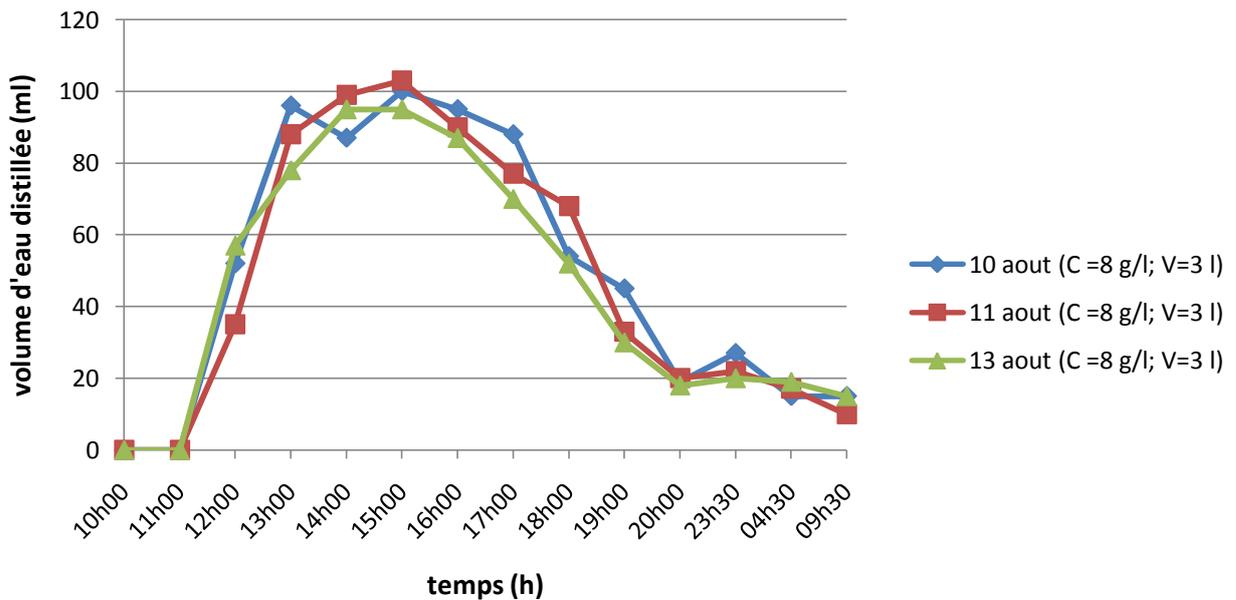
$C = 8 \text{ g/l} ; V = 3 \text{ l}$

Figure IV.44 : courbes d'évolution des températures de la zone tampon en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)



C =8 g/l ; V=3 l

Figure IV.45 : courbes d'évolution des températures de l'atmosphère en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)



C =8 g/l ; V=3 l

Figure IV.46 : courbes d'évolution de la quantité d'eau distillée en fonction du temps (Journées du 10, 11 et 13 aout 2013)

Les figures montrent des résultats obtenus sur les variations horaires de l'eau distillée produit par jour et les différentes températures du 10,11 et 13 aout. On observe une similarité dans les figures de l'évolution de la température de la nappe d'eau et du bac absorbant, cela est dû à la convergence de l'intensité du flux solaire. La production de l'eau distillée atteint la valeur maximale entre 14h00 et 15h00 qui correspondent au temps optimal dans lequel l'intensité de rayonnement solaire augmente. Dans des cas similaires nous constatons aussi que la production d'eau distillée continue dans la nuit comme le montre les graphes de la figure IV.46, ou cette valeur atteint le 10 aout les 27 ml.

A partir des résultats de la deuxième partie obtenus, on conclut que la concentration d'eau saumâtre idéale parmi les autres concentrations, c'est celui de 5 g/l. Avec cette concentration on a obtenu une quantité moyenne assez importante d'eau distillée et ceci durant trois jours par rapport aux autres volumes, même la journée la plus réussite c'était d'une concentration de 5 g/l dans un volume de 3 l, ou la quantité produite est de 751 ml.

CONCLUSION

Conclusion

La production d'eau douce par voie solaire est importante à deux points de vue : la nécessité d'économiser de l'énergie et le souci de procurer de nouvelles ressources en eau.

Le distillateur solaire à effet de serre est un dispositif très simple dans sa réalisation, il peut être réalisé avec des matériaux locaux, ce qui lui donne l'avantage d'être facilement exploitable en milieu rural par des gens peu qualifiés techniquement.

En utilisant des matériaux très ordinaires, donc de qualités moindres, on atteint des températures qui dépassent 60 °C. Avec une température de cet ordre, le système fonctionne jusqu'à une certaine heure après le couché du soleil, en particulier pour un volume de nappe d'eau de 3 litre; il en résulte donc une légère augmentation du rendement global du distillateur. Les paramètres qui influent sur la production du système de façon très marquée sont : le rayonnement solaire incident, l'épaisseur (volume) de la nappe d'eau, la salinité de l'eau saumâtre, la vitesse du vent. La salinité de l'eau saumâtre influence sur la production du système, la concentration expérimentée idéale est celle de 5 g/l. Avec cette concentration on a obtenu une quantité moyenne assez importante d'eau distillée.

Suite aux différentes expériences menées sur notre distillateur solaire à effet de serre, nous avons constaté que pour améliorer le rendement, nous avons examiné l'effet de l'épaisseur de la nappe d'eau sur la production journalière. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence du rayonnement solaire incident, l'épaisseur de la nappe d'eau et la concentration en sel de l'eau saumâtre sur les productions horaires et journalières. En effet la production du distillateur solaire s'accroît avec l'irradiation solaire et l'augmentation de l'écart de températures entre le vitrage et l'eau au fond du bac, lorsque le gradient de température avoisine 13°C.

De même l'épaisseur de la nappe d'eau illustre son influence en l'obtention de production nocturne lorsque l'épaisseur avoisine 18 mm. La diminution de l'épaisseur de la couche d'eau conduit à l'accroissement de la quantité de chaleur absorbée par cette dernière car on assiste à une baisse de son inertie thermique, par conséquent on a une augmentation rapide de la température de l'eau engendrant un accroissement de l'écart de température entre l'eau du bac et la face intérieure de la vitre.

A la fin on pense que les futures recherches sont très intéressantes à développées sur :

- Utilisation d'un système de préchauffage qui provoque le pré échauffement de l'eau à dessalé qui permet d'améliorer la production.
- Utilisation un système pour refroidir la surface de condensation (par exemple on peut utiliser une ventilation mécanique alimenté par un capteur photovoltaïque).
- La forme géométrique du distillateur solaire, la face transparente doit être grande pour capter le maximum de l'irradiation solaire (par exemple, distillateur solaire à double pente inversé...).
- Utilisation de stockage de l'énergie est profitée la production dans la période nocturne.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **N. BOUALLA, B. HADJ HASSAN, A. BENZIANE, Z. DERRICH**, L'expérience algérienne en matière d'épuration des eaux usées / ScienceLib Editions Mersenne : Volume 3 / N ° 111115 / 23-11-2011.
- [2] **Z. MEKKI**, « Contribution à l'optimisation des performances d'un distillateur SOLAIRE », Mémoire magister, Université Hadj Lakhdar – Batna, 2012.
- [3] **M. BOUHEDIBA**, « Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS) », Mémoire Master, Hassiba Benbouali de– Chlef, 2012.
- [4] **Michel DUTANG**, Le dessalement de l'eau de mer, Le magazine de la chronique scientifique / n °4 / Juillet-Août 2005.
- [5] **Ragon. A** « L'eau et la santé dans les Etablissements de Soins », Laboratoire de Contrôle des Eaux (LCE), Assistance Publique Hôpitaux de Marseille, Avril 2004.
- [6] **S. FEDALI**, "Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales", mémoire magister, Université de Batna, 2008.
- [7] **Danis. P**; s.d.-dessalement de l'eau de mer. J2700 (opération unitaires) In: Génies des procédés. CD-Room Technique de l'ingénieur. 18p.
- [8] **A.HUFLY**.2001-Introduction à la climatologie. Ed. De Boeck université. Bruxelles. 572p.
- [9] **Ian C. Watson; O.J. Morin, Jr; Lisa Henthorne**, « Desalting Handbook for Planners», 3^{ème} Edition / Juillet 2003, RosTek Associates, Inc., Tampa, Florida.
- [10] **Daymond Desjardins**, « le traitement des eaux » deuxième édition 1997, p249.
- [11] **A. SADI**, « Le dessalement Solaire – Considération technique » Rev.energ.Ren Chemss2000.
- [12] La Distillation, Techno-Science.net : site d'actualité des sciences et des technologies, consulté le 14/03/2013.

[13] **A. Maurel**, « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce » 2e édition, Technique et documentation.Paris. 232p.

[14] Production adduction d'eau potable, usine de dessalement. hmf.enseeiht.fr, BEI ERE 2009 - 2010, consulté le 02/03/2013

[15] **Association des retraités du groupe CEA**, groupe argumentaire sur le nucléaire, "Dessalement et réacteurs nucléaires", Fiche N°32, 1-4, Février 2008.

[16] **I. SAOUANE**, "Etude des transferts de chaleur et de masse a l'intérieur d'un système de dessalement par voie solaire", Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.

[17] **N. BOUKERZAZA** "Etude de l'effet des pertes thermiques sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire", Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2005.

[18] **N. BOUKERZAZA, A. CHAKER et Z. HADDAD**, « Influence de l'irradiation globale sur les caractéristiques de fonctionnement d'un distillateur solaire ».

[19] **R. RAHMANI**, « Rendement d'un distillateur solaire à film capillaire à plusieurs étages, effet de certains paramètres thermo physiques sur le rendement », Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.

[20] **Guillaume Deguy**, « Etude et conception d'un système de climatisation utilisant le rayonnement solaire », mémoire d'ingénieur, Université de Lubumbashi, 2004.

[21] **Michel Daguenet**. les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris (1985).

[22] **Yves Jannot** .Thermique solaire. Paris (2011).

[23] **Berger A.** Trou d'ozone et prix Nobel de chimie. La Meteorology 8e série, 13, p 63-73.(1995).

[24] **Kamal Skeiker**. Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province, Syria. Energy Conversion and Management 47p 331–345 (2006)

- [25] **Mehmet Yorukoglu et Ali NaciCelik.** « A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration ». *Energy Conversion and Management* 47 p 2441–2450. (2006)
- [26] **S, Kaplanis et E, Kaplani.** A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation $I(h;n_j)$ values. *Renewable Energy* 32. P1414–1425(2007)
- [27] **R.BERNAD, G.MERGUY, M. SCHWARTZ :** « le rayonnement solaire : convectionthermique et application». *Technique et documentation*, deuxième édition 1980.
- [28] **A. KAABI et H.ZAIDI :**«study and optimisation of thermo-physical parameters for asolarstill performance», *Proceedings of the 2 nd international conference on thermal engineering theory and applications, unite Arab emirates,2006.*
- [29] **A. KAABI et N.SMAKDJI** «Impact of temperature difference (water solar collector) on solar still global efficiency» *desalination*, 2007.
- [30] **SATCUNANATHAN AND HANSEN:** «An investigation of some parameters involved in solar distillation, *Solar Energy* », vol. 14, pp 353-363, 1973.
- [31] **E.ZAYOUTI; L.BOURDEN ;A.AHAROUNE, M.BANOUNI:** « DistillationSolaire : Amélioration de la condensation de la vapeur d'eau dans les distillateurssolaire » Tétouan-Maroc, FIER'2002.
- [32] **A.KHEDIM :** « Mesure et caractéristique Thermodynamique d'une nouveau Systèmesolaire de Dessalement de l'Eau de Mer avec Récupérateur de Chaleur »*Rev. Energ.Ren :11èmes journées Internationales de thermique* 2003.
- [33] **MOUSA ABU-ARABIE, YOUSEF ZURIGAT, HILAL AL-HINAI, SAIF ALHIDDABI:**«Modelling and PerformanceAnalysis of a Solar Unit With Double- GlassCoverCooling», *Desalination*, 143,173-182, 2002.
- [34] **R.V. DUNKLE, Solar water distillation:** «The Roof Type Still and a multiple diffusion Still»,*Common wealth scientific and industrial research organization, Victoria, Australia, p895-902 edition 1961*

- [35] **M. BENHAMMOU, B. OMARI, M. GAHGAH, L. AMER, A. BOUBGHAL:**«Réalisation et Expérimentation d'un Distillateur Solaire Couple à un Condenseur »,Station d'Expérimentation des Equipement Solaires en Milieu Saharien, B.P. 478,Route de Reggane-Adrar, 2003.
- [36] **W.A.KAMAL:** « A Theorical and Exprimantal study of the basin- type solarstillunderthe Arabian Golf Climatic Condition» Solar&windtechnology, vol.5 N°2,pp 147,Edition 1988.
- [37] **M.M. MAALEM:** « Modélisation mathématique d'un distillateur solaire statique, à effet de serre et de géométrie régulier».
- [38] **KREITH f :** « Transmission de la chaleur et thermodynamique » p 484-488, édition1967.
- [39] **SFEIR A, GURRACINO G** « Ingénierie des systèmes solaire. Application àl'habitant ». Technique et documentation. Paris-(1981).
- [40] **ROBERT SIEGAL:** « Thermal Radiation, heat transfert, hemisphere » publishing corporation 1981.
- [41] **TSILINGIRIS, P.T.,** «An accurate upper estimate for the transmission of solar radiation in salt gradient ponds ». Solar Energy 40 (1), 41–48. 1988.