

UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS UNE SERRE AGRICOLE

*Tahri Toufik^a, Bettahar Ahmed^a, Douani Mustapha^a, Sabah. Al sulaiman Abdul-Wahab^b,
Hilal. al-Hinai^b, Y. al mulla^c

^aFaculty of Sciences and Engineering Sciences, Hassiba Ben Bouali University, P.O. Box
151, Chlef 02000, Algeria, Tel. (+) 213 551591304; Email: ntahritoufik@yahoo.fr

^bCollege of Engineering, P.O. Box 33, Sultan Qaboos University, Al-khod 123, Sultanate of
Oman

^cCollege of Agricultural and Marine Sciences, P.O. Box 34, Sultan Qaboos University, Al-
Khod 123, Muscat, Sultanate of Oman

Abstract:

The limited resources of fresh water in arid areas like the Middle East and North Africa MENA have led to the use of poor quality water in irrigation agriculture. These can reduce crop yield and environmental damage. Agriculture accounts for 70% of overall consumption

in freshwater. Given the evaporation phenomena that occur in arid regions, this figure rises to 90%.

This study focuses on the concept of combining the greenhouse with the desalination of seawater. This concept is intended for small scale applications in remote areas where only saline water and solar energy are available.

The main objective of this research work is to analyze the production of fresh water using solar energy in the desalination of sea water in the greenhouse. This operating system is in need of thorough study of evaporators, condensers and design of the greenhouse.

Desalination, combining the greenhouse to the use of sea water while exploiting the phenomenon of condensation of water vapor in the air, seems to respond positively to the needs of agricultural irrigation.

Résumé:

Le manque accru de ressource en eau douce dans des zones arides comme les pays du Moyen Orient et du Nord d'Afrique (MENA), a conduit à l'utilisation des eaux de mauvaise qualité dans l'irrigation de l'agriculture. Ces dernières affectent notablement le rendement de la récolte et endommagent l'environnement. L'agriculture consomme 70% de la réserve globale en matière d'eau douce. Compte tenu des phénomènes d'évaporation qui sévissent dans les régions arides, ce taux s'élève jusqu'à 90%.

Cette étude est concentrée sur le concept combinant la serre avec le dessalement de l'eau de mer. Ce concept est destiné pour des applications à échelle réduite dans des endroits isolés où seulement l'eau de mer et l'énergie solaire sont disponibles.

L'objectif principal de ce travail de recherches est d'analyser la production d'eau douce en utilisant l'énergie solaire dans le dessalement de l'eau de mer dans la serre. Ce système d'exploitation exige une étude approfondie des évaporateurs, des condenseurs ainsi qu'une bonne conception de la serre.

Le dessalement, combinant l'effet de serre à l'utilisation de l'eau de mer tout en exploitant le phénomène de condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air, semble répondre favorablement aux besoins d'irrigation agricole.

Mots-clés: Energie solaire, Dessalement, Serre, Eau de mer, Condenseur, Evaporateur.

1. Introduction

L'eau est une nécessité de base pour toutes les espèces vivantes. Son importance s'est considérablement accrue avec l'augmentation des besoins de l'humanité. Depuis les temps les plus reculés, l'homme s'est concentré autour des rivières, des lacs et des réservoirs d'eau souterraine pour couvrir ses besoins hydriques à des fins domestique, agricole et industrielle [1]. Ainsi, le secteur de l'agriculture compte pour environ 70% de l'ensemble d'eau douce consommée dans le monde entier. Au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, cela va au-dessus de 85%, alors qu'il est de 94% dans le Sultanat d'Oman. Inévitablement, des conséquences économiques et sociales sont apparues dans de nombreuses régions côtières des pays arides. En outre, la surexploitation des eaux souterraines a conduit à la réduction de la capacité productive des terres arables par suite de leur salinisation progressive [2]. Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en trois catégories, selon le principe appliqué [3] :

- Procédés membranaires : osmose inverse et électrodialyse.
- Procédés thermiques: la congélation et la distillation
- Procédés agissant sur les liaisons : échanges d'ions et extraction par solvant sélectif.

Les pays arides bénéficient généralement d'un grand potentiel d'énergie solaire dont l'exploitation peut fournir une solution durable à l'approvisionnement en eau douce [4]. En effet, les projets de distillation solaire ont fait leur preuve dans plusieurs endroits du monde [5, 6].

La serre de dessalement est un nouveau développement d'un procédé qui produit de l'eau douce à partir de l'humidification et le refroidissement progressive du milieu ambiant (air atmosphérique). Le recours à des serres dans les régions arides, diminue les besoins en eau des cultures par la réduction de l'évapotranspiration tout en créant les conditions optimales pour le développement des cultures tempérées [7]. Ainsi, l'évapotranspiration est réduite de 60 à 85% par rapport à l'extérieur de la serre [8]. C'est l'utilisation de matériaux bon marché, dans la modification du bilan radiatif local de la serre, qui contribue à la régression du prix de revient du mètre cube d'eau condensée. Le coût élevé de l'énergie utilisée dans les procédés concurrents (Distillateur multi-flash et osmose inverse) ne rend pas ces techniques profitables à l'agriculture des terres arides.

La méthode d'humidification-déshumidification est exploitée dans la réalisation du projet pilote de la serre de dessalement, à Al-Hail, Muscat, au Sultanat d'Oman. Dans une étude similaire d'Al-Hallaj [9], le processus d'humidification-déshumidification, où le gaz circule en circuit fermé, est utilisé pour le dessalement de l'eau. La serre de dessalement et le

terrain destiné à la plantation des cultures, constituent une unité à part entière qui s'adapte bien aux régions côtières arides. La serre joue le rôle du capteur solaire tout en fournissant l'environnement contrôlé à l'intérieur de l'enceinte. Si les travaux de Merkel [10] ont jeté les fondements de la théorie de refroidissement par évaporation, Poppe et Rögener [11] ont développé des algorithmes pour le calcul et la conception des systèmes de refroidissement. Dans la présente étude, la modélisation et la simulation du fonctionnement du condenseur de la serre de dessalement d'Oman sont abordées par l'analyse des bilans de matière et de chaleur en régime permanent. La détermination des variables de conception est énumérée par l'utilisation du concept de degrés de liberté.

2. Intérêt énergétique du couplage du procédé d'humidification-déshumidification (HD) à la serre solaire.

Compte tenu du caractère corrosif de l'eau saline vis-à-vis des installations de distillation solaire, le procédé de dessalement par humidification-déshumidification (HD) gagne de plus en plus du terrain car il exploite l'air afin de réduire conséquemment le problème de corrosion. On note que les systèmes HD se composent d'une unité compacte, contenant deux échangeurs de chaleur destinés respectivement à l'évaporation et à la condensation partielle de l'eau de mer. Ils se distinguent par leur légèreté et leur fonctionnement à pression atmosphérique [10]. En raison de la capacité de dessalement relativement basse, les performances du système doivent cependant être améliorées avant qu'elles puissent être économiquement concurrentielles.

Afin d'améliorer l'efficacité thermique du procédé, le couplage à une serre solaire peut constituer une alternative facile à mettre en œuvre pour offrir une solution peu onéreuse pour la production de l'eau douce d'une part et faire réunir les conditions climatiques favorables au développement des cultures à haute valeur ajoutée d'autre part. C'est la serre solaire de dessalement (*Seawater Greenhouse SWGH*). Outre cet aspect énergétique, ce couplage peut contribuer à la limitation du phénomène de l'exode rural et à la valorisation des terres arables. Toutefois, le contrôle et l'adaptation des équipements au bon fonctionnement constituent les domaines vierges qu'il y a lieu d'explorer.

C'est dans cette optique que la société Light Works Ltd, propriétaire du brevet d'invention, commença à développer l'idée de réalisation de la serre de dessalement remontant aux années quatre-vingt dix. En 1994, le prototype de la serre était réalisé au Royaume Uni et monté sur le site de Tenerife (Figure 1). En 2004, une autre serre pilote (Figure 2) a été

implantée à Mascate, au Sultanat d'Oman, d'une superficie de 1000 m², l'un des pays les plus chauds et les plus secs au monde.



Figure 1. La serre solaire de dessalement
Tenerife, 1994 [12]



Figure 2. La serre solaire de dessalement à
Al-Hail, Muscat, Oman. [12]

Le projet entre dans le cadre d'une collaboration scientifique entre l'entreprise Light Works Ltd, l'université du Sultan Qaboos à Mascate et le MEDRC (Middle East Desalination Research Center). L'objectif principal du projet était de reprendre le projet de développement des cultures des régions agricoles antérieurement abandonnées pour raison de salinité des sols et aussi des eaux qui ont atteint des niveaux pour lesquels la production végétale n'est guère possible.

A travers ces installations pilotes, il a été constaté que la production agricole des serres de dessalement, en termes de qualité et de quantité, était très remarquable.

3. Description du fonctionnement de la serre de dessalement de l'eau de mer de Mascate

Pour la serre de dessalement par humidification déshumidification (Figures 3), le principe retenu consiste à ne laisser parvenir jusqu'aux cultures que la partie su spectre du rayonnement solaire utile à la photosynthèse, le reste (infrarouge), soit environ 55% de l'énergie totale du spectre, étant absorbé par un faisceau de tubes installés tout au long de la toiture de la serre.

La serre de dessalement dont les paramètres de fonctionnement sont illustrés dans le tableau (1) [13], utilise la lumière solaire, l'eau de mer et l'atmosphère pour produire l'eau douce et l'air frais, tout en créant des conditions climatiques favorables à la culture des récoltes. Le procédé recrée le cycle hydrologique naturel dans un environnement contrôlé. L'eau de mer est pompée d'un puits proche de la mer; la filtration naturelle du sable empêche l'entraînement des particules solides, des poissons et d'autres impuretés. L'eau ainsi filtrée est canalisée vers un réservoir d'eau de mer froide qui alimente successivement le condenseur (1) et le premier évaporateur(2). La saumure issue du premier évaporateur, retourne vers le réservoir d'eau de

mer froide. L'évaporateur constituant le premier mur de la serre de dessalement, est fabriqué en carton en forme de grille de nid d'abeilles.

Le premier évaporateur est dirigé vers la direction du vent dominant. L'eau de mer s'écoule goutte à goutte de haut en bas, l'air sec traversant le premier évaporateur se voit humidifié, il traverse ensuite le secteur de plantation (I) à l'intérieur de la serre. Les sels, le pollen et les insectes sont emprisonnés ensuite filtrés en dehors de l'évaporateur.

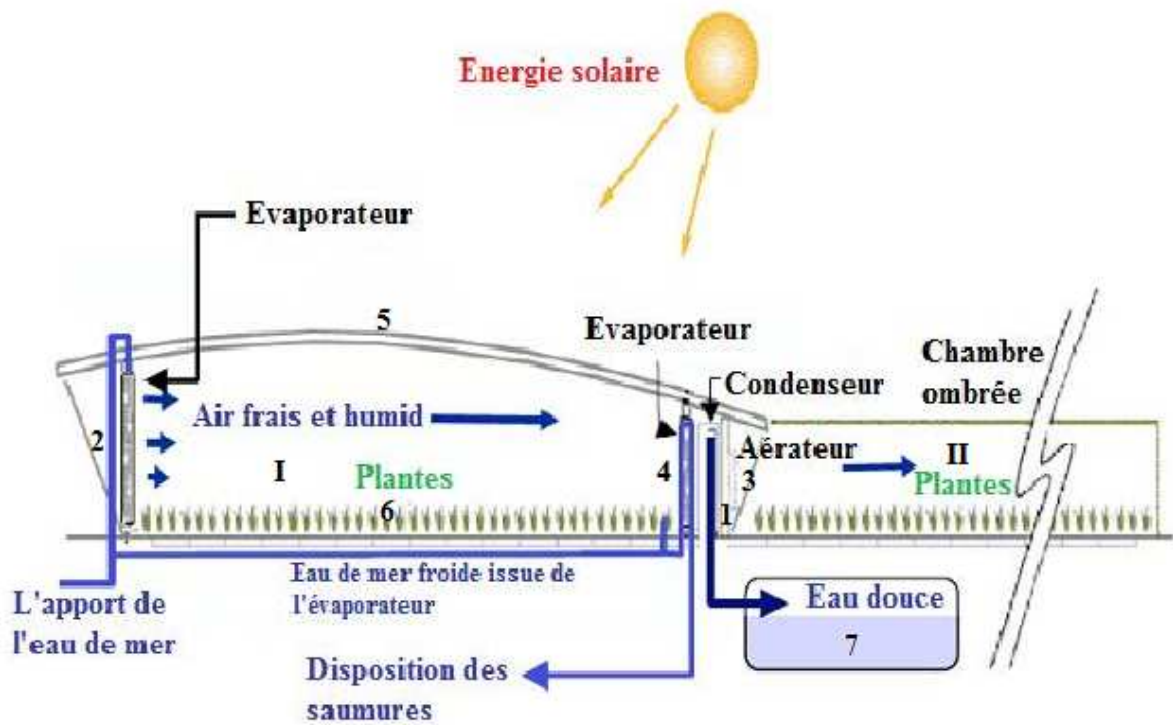


Figure 3. Schéma descriptif de la serre solaire à Mascate.

Les aérateurs (3) aspirent l'air à l'intérieur de la serre et dans la chambre ombrée (II). Après le premier évaporateur, l'air traverse un deuxième évaporateur (4) où il est humidifié jusqu'au point de saturation. Seulement une petite fraction de lumière du soleil est utile pour la photosynthèse. La lumière du soleil est sélectivement filtrée par la toiture de la serre (5) afin d'enlever le rayonnement qui ne contribue pas à la photosynthèse. Ceci aide à maintenir la serre de dessalement suffisamment fraîche tout en permettant aux récoltes (6) de s'accroître en assurant une luminosité suffisante. Ce qui explique pourquoi les serres de cultures classiques sont en général de grandes consommatrices d'eau douce. La serre de dessalement est dotée d'un système de récupération d'énergie, qui se compose de longs tubes placés le long de la toiture de la serre. L'eau de mer qui passe à travers les tubes, est directement chauffée par le rayonnement solaire. L'eau ainsi chauffée alimente le deuxième évaporateur et retourne ensuite vers le réservoir d'eau de mer chaude. L'air humide quittant le deuxième évaporateur est presque saturé, il passe aux travers des tubes verticaux du condenseur, alimentés en eau de

mer fraîche provenant du réservoir d'eau de mer fraîche. L'eau douce produite à partir de l'air humide dans le condenseur, est stockée dans le réservoir d'eau douce (7) en vue d'être utilisée pour l'irrigation.

Tableau 1. Paramètres de fonctionnement de la serre

Largeur	16 m
Longueur	45 m
Hauteur maximum	4.8 m
Vitesse maximale de l'air	7.1 m/s
Dimensions du premier évaporateur	15.6 m×2 m×0.2 m
Dimensions du second évaporateur	15.6 m×2 m×0.2 m
Dimensions du condenseur	15 m×1.9 m×0.8 m

4. Besoins énergétiques

La serre de dessalement est alimentée essentiellement par de l'énergie solaire dans le cas de la présente étude. La lumière visible passe à travers la toiture de la serre pour contribuer à la photosynthèse tandis que la lumière infrarouge est piégée entre la toiture et le faisceau de tubes afin de préchauffer l'eau de mer lors de l'alimentation du second évaporateur. Le vent qui règne pendant la journée pourrait entraîner l'air à l'intérieur de la serre. Des ventilateurs sont parfois prévus pour assurer une circulation de l'air dans la serre de dessalement. Les besoins en énergie électrique de la serre de dessalement sont modestes.

Il y a donc une synergie entre la serre, l'énergie solaire et l'énergie éolienne. De ce fait, le procédé est extrêmement efficace sur le plan énergétique. L'eau peut être produite à bas coût d'énergie. A titre d'exemple, le mètre cube d'eau douce est produit contre consommation de 3 kWh [12].

Toutefois, l'énergie électrique est particulièrement utilisée pour faire fonctionner :

- La pompe d'alimentation en eau de mer;
- La pompe d'alimentation du réservoir d'eau froide ;
- La pompe d'alimentation du réservoir d'eau chaude ;
- Les deux ventilateurs ;
- Les deux aérateurs.

5. Résultats et Discussions

La serre de dessalement est équipée d'un enregistreur de données modèle Delta-T (modèle DL2E). L'appareil enregistre les variations des températures de l'air, les températures de l'eau et

de l'humidité relative dans 20 différents points de la serre. La température de l'eau est mesurée en utilisant un thermocouple. La température de l'air et l'humidité sont mesurées à l'aide d'une sonde hygrométrique (température/humidité) conçue spécialement pour les environnements chauds et humides. Une seconde sonde est également installée pour mesurer en temps réel le débit du condensât. En outre, le rayonnement solaire à l'intérieur et à l'extérieur de la serre de dessalement est enregistré avec deux pyranomètres en cellules de silicium [13]. La vitesse de l'air est déterminée à l'aide d'un anémomètre numérique au niveau de sections transversales de la serre. La température ambiante et l'humidité ainsi que la vitesse de l'air à l'extérieur de la serre sont enregistrées toutes les demi-heures [12].

Les résultats obtenus par l'expérience pendant la journée du 01 mai 2005, à Mascate, Oman, sont illustrés dans les figures suivantes :

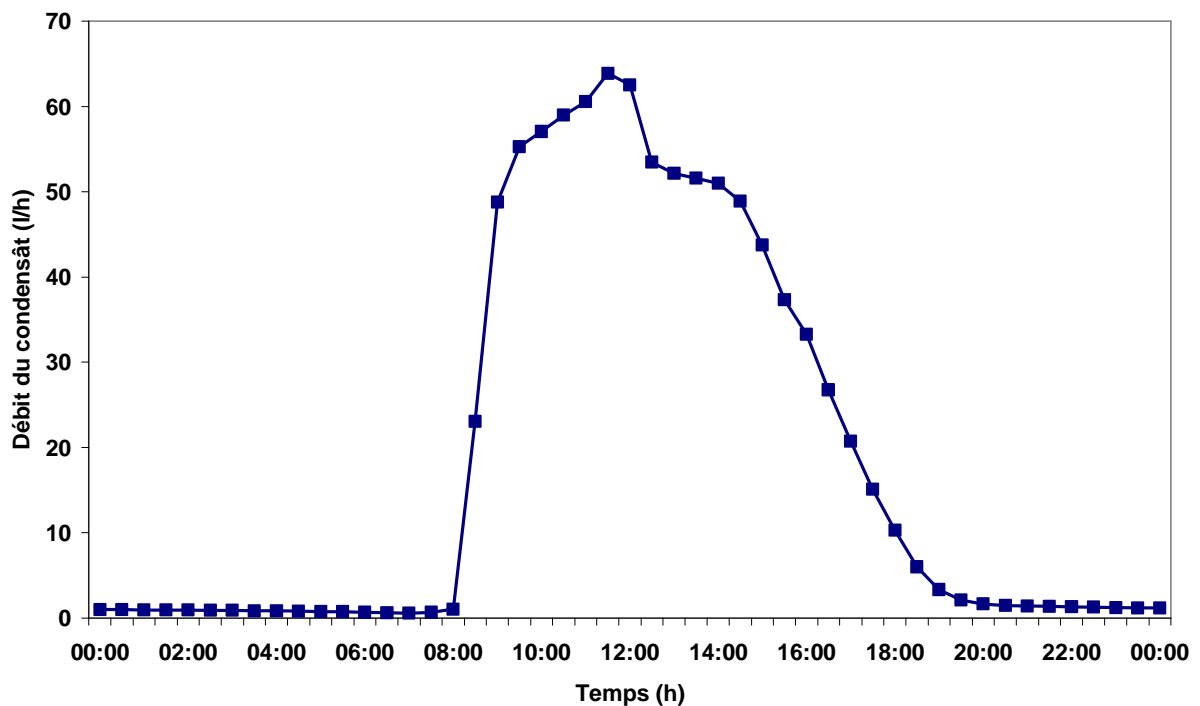


Figure 4. Variation du débit volumique du condensât produit par le condenseur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

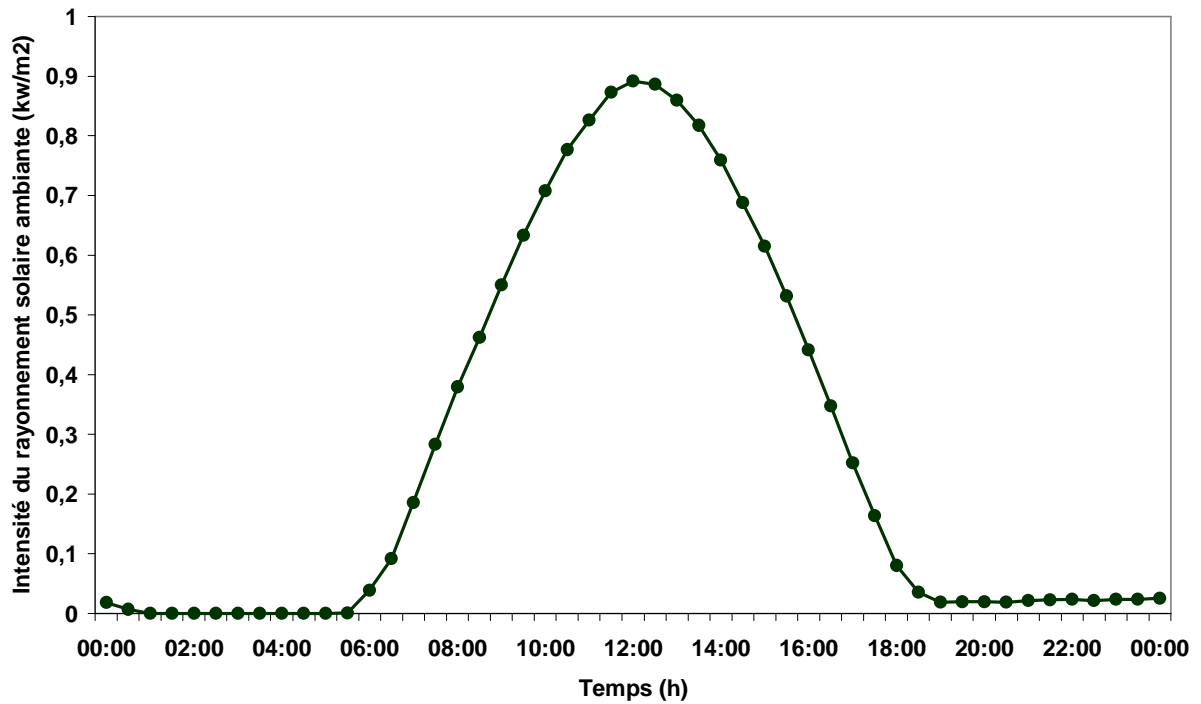


Figure 5. Variation de l'intensité du rayonnement solaire à l'extérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

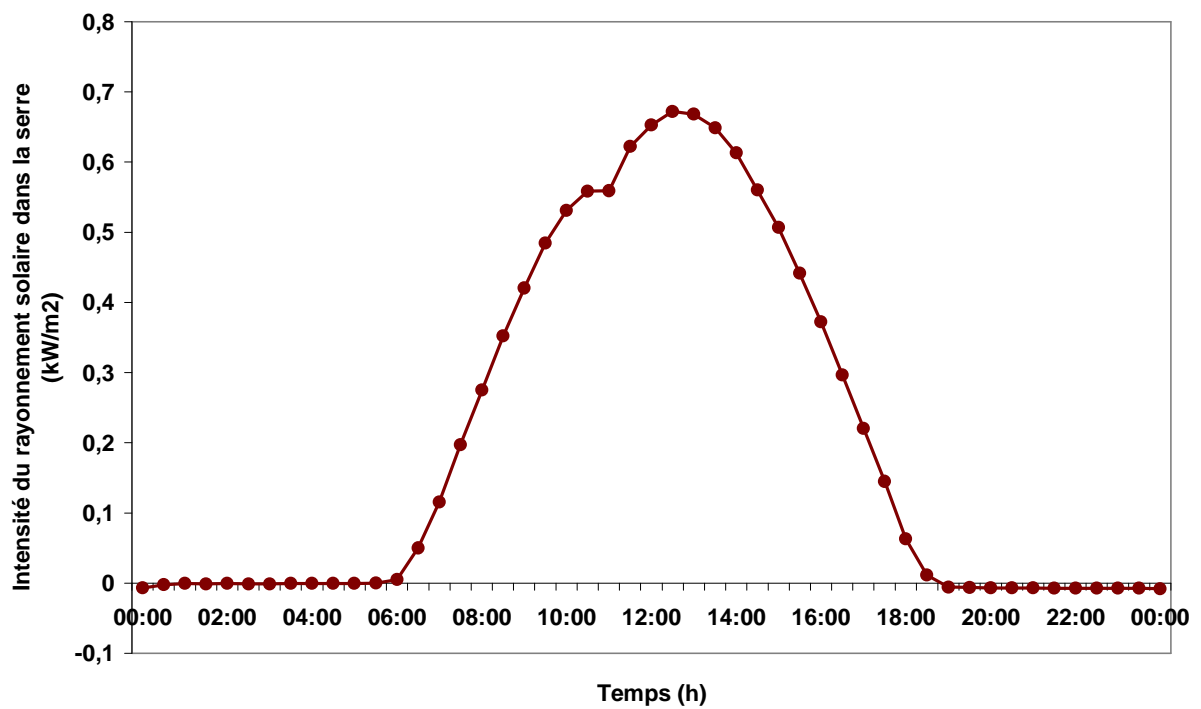


Figure 6. Variation de l'intensité du rayonnement solaire à l'intérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

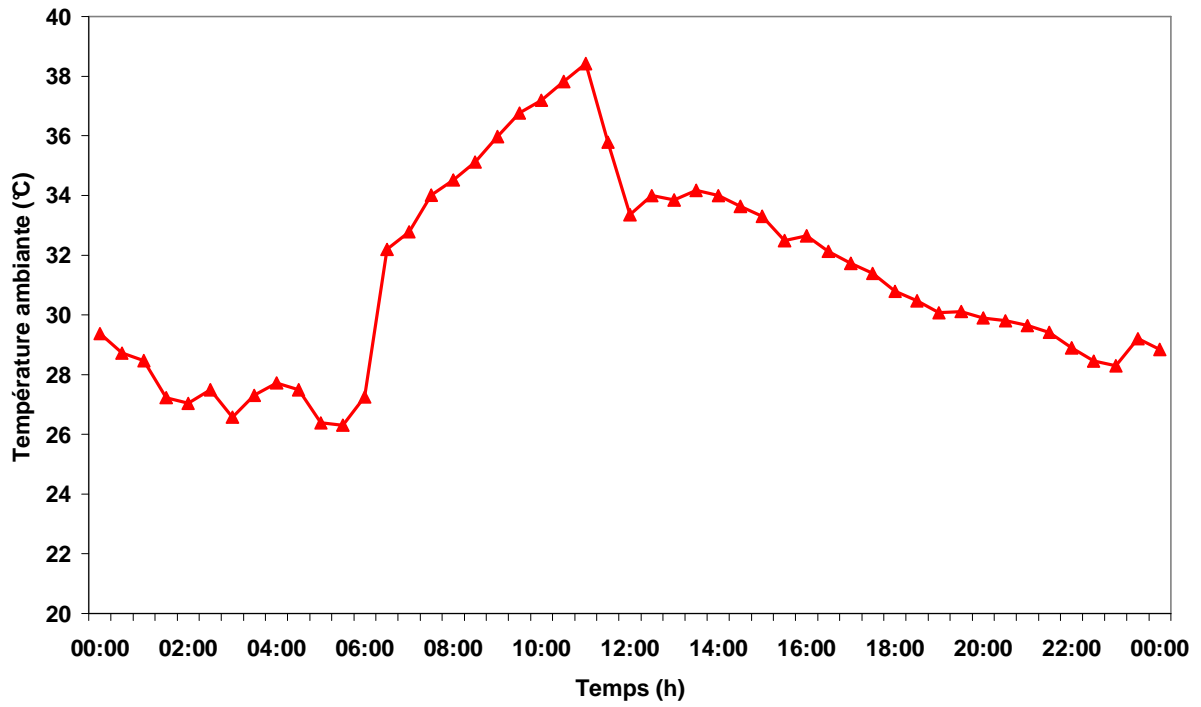


Figure 7. Variation de la température ambiante avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

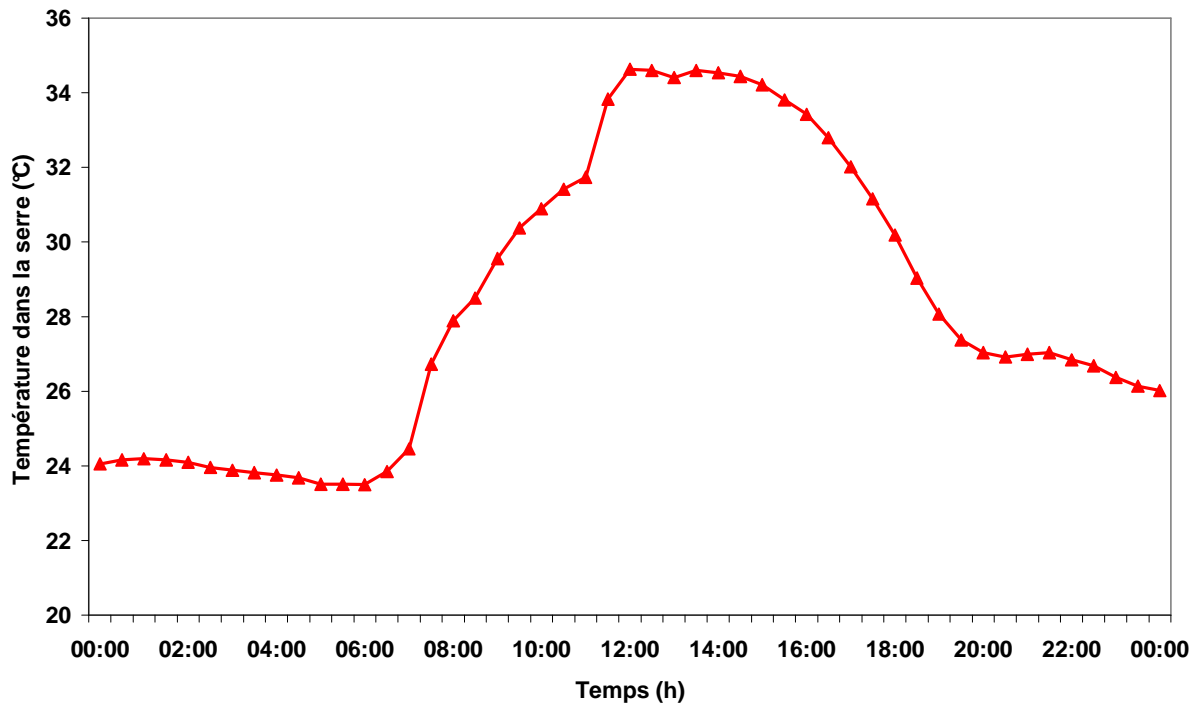


Figure 8. Variation de la température à l'intérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

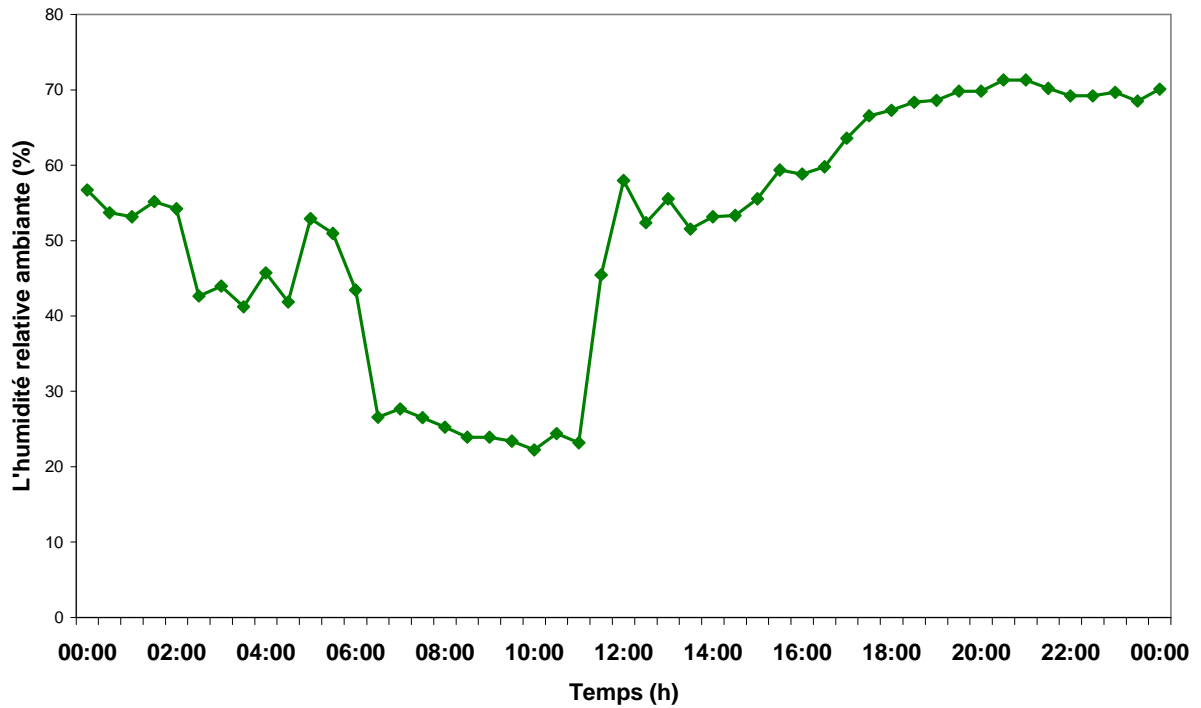


Figure 9. Variation de l'humidité relative ambiante avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

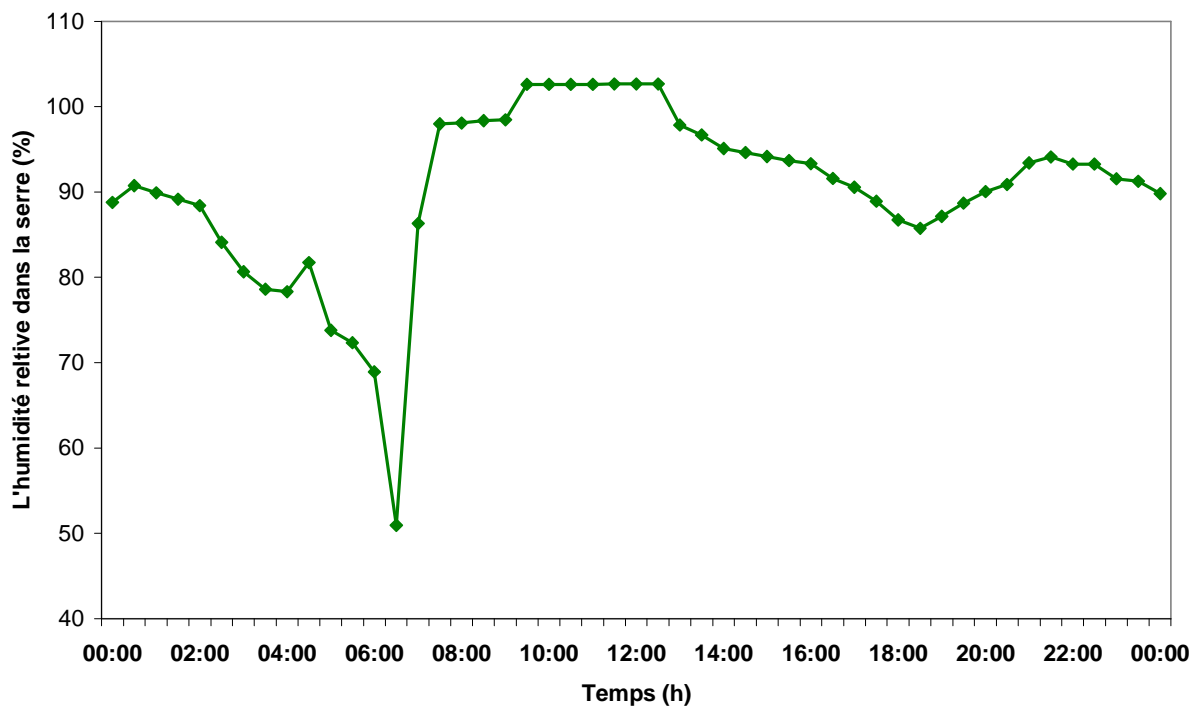


Figure 10. Variation de l'humidité relative à l'intérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

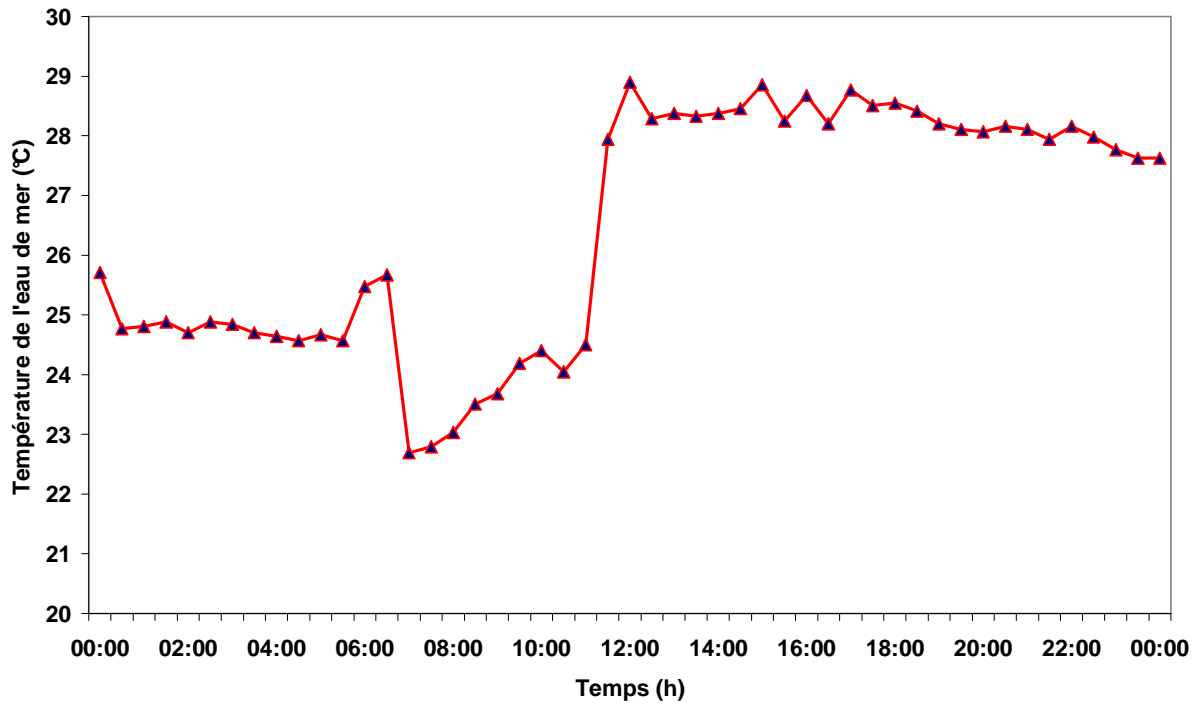


Figure 11. Variation de la température de l'eau de mer utilisée dans la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

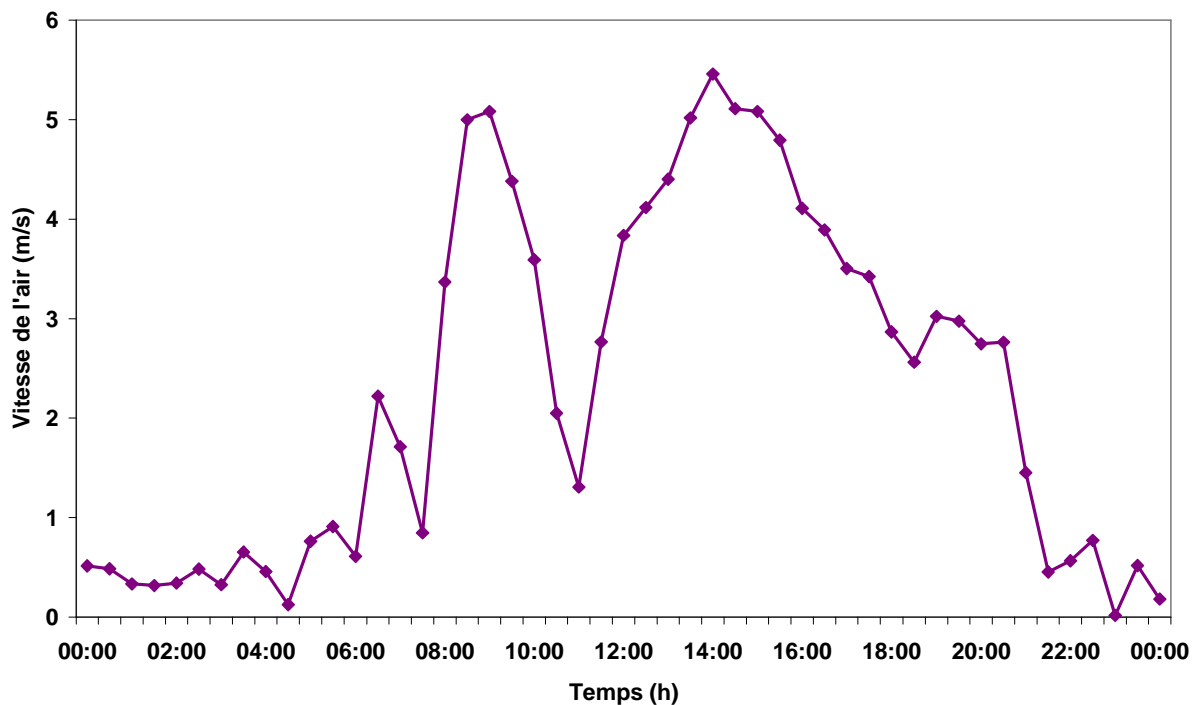


Figure 12. Variation de la vitesse du vent à l'extérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

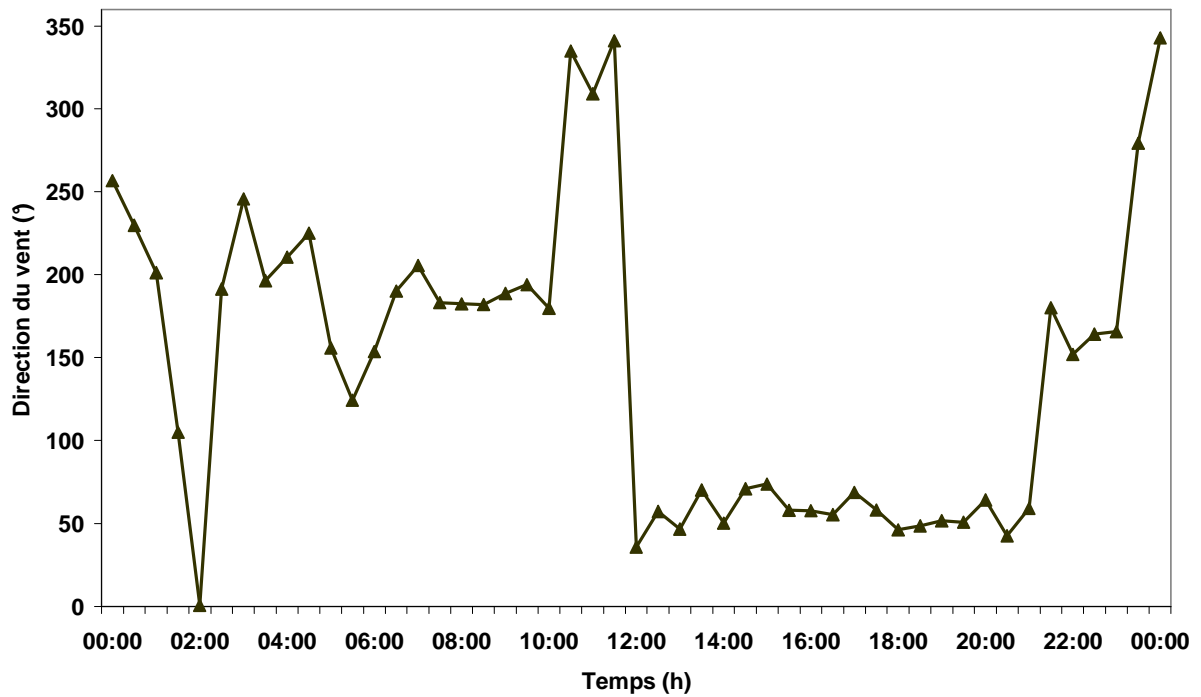


Figure 13. Variation de la direction du vent à l'extérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

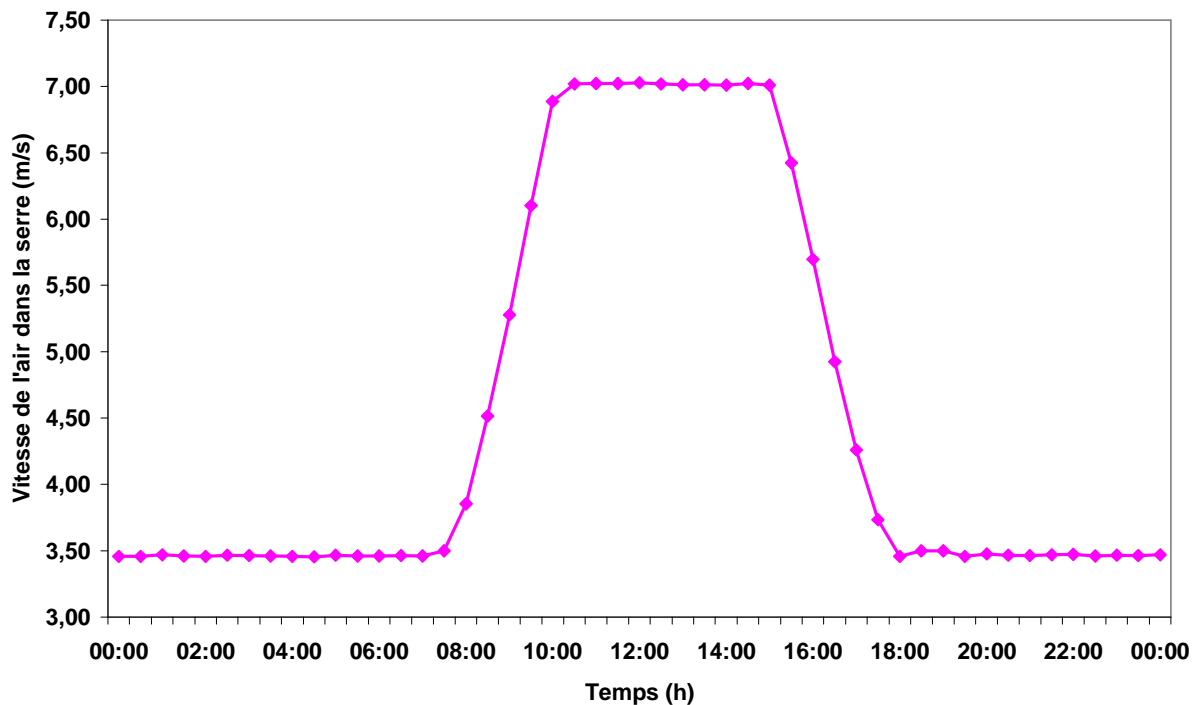


Figure 14. Variation de la vitesse de l'air à l'intérieur de la serre avec le temps à Mascate, Oman, pendant la journée du 01 mai 2005

Dans la conception du système solaire de dessalement, il est essentiel de connaître le flux du rayonnement solaire disponible à un endroit particulier et à un moment donné. Le paramètre qui caractérise le flux du rayonnement solaire est l'intensité du rayonnement solaire qui exprime la puissance reçue par unité de surface à l'endroit de notre étude.

La figure (4) montre la variation du débit volumique du condensât en fonction du temps. On peut noter que le débit volumique prend des valeurs importantes pendant le jour où il atteint sa valeur maximale vers midi, et il est quasiment nul pendant la nuit.

Les figures (5 ; 6) montrent la variation de l'intensité du rayonnement solaire à l'extérieur et à l'intérieur de la serre de dessalement de l'eau de mer de Mascate en fonction du temps. On remarque que les valeurs de l'intensité du rayonnement solaire sont très importantes dans l'intervalle de 08h 00 de la matinée à 18h 00 et ils sont quasiment nuls pendant la nuit. On peut noter que l'évolution du débit du condensât mesuré suit la même tendance que celle de l'intensité du rayonnement solaire [14]. On peut utiliser cette énergie pour produire de l'électricité par les panneaux solaires pour répondre aux besoins modeste en énergie du fonctionnement de la serre surtout dans les régions isolées.

Les figures (7 ; 8) montrent l'évolution de la température de bulbe sec à l'extérieur et à l'intérieure de la serre de dessalement de l'eau de mer avec le temps. Il faut noter que les valeurs de la température de bulbe sec à l'extérieur et à l'intérieur de la serre varient dans l'intervalle de 22 à 40°C et elles ont la même tendance. On remarque que l'air dans la serre est assez frais que l'air ambiant ce qui est favorable à la culture des plantes.

Les figures (9 ; 10) montre la variation de l'humidité relative de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la serre en fonction du temps durant la journée du 01 mai 2005. Les valeurs de l'humidité relative de l'air varient dans l'intervalle de 65 à 100%. Elles sont importantes dans la serre pendant le jour et faibles pendant la nuit contrairement à l'humidité relative ambiante.

La figure (11) montre la variation de la température de l'eau de mer dans la serre de dessalement en fonction du temps durant la journée du 01 mai 2005. On remarque que ces valeurs varient dans l'intervalle de 22 à 28°C. L'eau recueillie est utilisée comme un fluide froid dans le condenseur.

La figure (12) montre la variation de la vitesse de l'air ambiant durant la journée du 01 mai 2005. On remarque qu'elle varie entre 0 et 6 m/s. Elle prend des valeurs importantes pendant le jour et des valeurs faibles pendant la nuit. La figure (13) montre la direction du vent dans la même journée. L'énergie potentielle du vent peut être utilisée pour produire de

l'énergie électrique par des éoliennes et la direction de la serre est influencée par la direction du vent.

La figure (14) montre la variation de la vitesse de circulation de l'air à l'intérieur de la serre. Il faut noter que les valeurs de la vitesse de circulation de l'air varient dans l'intervalle de 3 à 7,5m/s et que leur maximum est atteint dans l'intervalle allant de 08h 00 de la matinée à 18h 00. Les profils du débit du condensât mesuré sont en parfait accord avec les profils de la vitesse de l'air à l'intérieur de la serre. On précise que cette vitesse est indépendante des conditions météorologiques ambiantes.

6. Conclusion

On a établi l'impact du problème de manque d'eau dans le monde et les possibilités qu'il faut mettre en œuvre pour assurer un approvisionnement correct. Compte tenu du coût élevé des différents procédés classiques de dessalement, l'analyse de la faisabilité technique et de la rentabilité du procédé du dessalement solaire semble être la solution future pour les régions arides et semi-arides.

L'approche combinant le dessalement de l'eau de mer à l'effet de serre, semble répondre favorablement aux besoins en eau, destinés à l'agriculture. Il est intéressant de noter qu'une solution au manque d'eau dans le monde n'est pas de produire plus d'eau, mais d'employer moins d'eau dans l'irrigation.

Les résultats ont montré que le débit du condensât croît avec l'intensité du rayonnement solaire, l'humidité relative de l'air, la température et la vitesse de l'air. Toutefois, l'augmentation de la température de l'eau de mer affecte négativement le débit du condensât.

Le potentiel en énergie solaire et énergie éolienne semble une solution favorable aux besoins électrique de la serre dans les régions arides et semi-arides.

8. Bibliographies

- [1] Malik M.A.S., Tiwari G.N., Kumar A. et Sodha M.S., "Solar distillation", Indian Institute of Technology, New Delhi, India, Pergamon Press, 1^{ère} Edit., (1982), 33-76.
- [2] Perret J.S., Al-Ismaili A.M., et Sablani S.S., Development of Humidification-dehumidification System in a Quonset Greenhouse for Sustainable Crop Production in Arid Regions, Biosystems Engineering 91(3) (2005) 349-359.
- [3] Çengel Y.A., Heat Transfer: A practical Approach, Second ed., McGraw-Hill, New York, (2003) 532-552.
- [4] Chaibi M.T., An Overview of Solar Desalination for Domestic and Agricultural Water Needs in Remote Arid Areas, Desalination, 127 (2000) 119-133

- [5] Delyannis E., et Belessiotis V., *Advances in Solar Energy*, 14 (2001) 287-330.
- [6] Delyannis E., *Solar Energy*, 75 (2003) 357-366
- [7] C. Paton, A. Davis, The seawater greenhouse for arid lands, in: *Proc. Mediterranean Conf. On Renewable Energy Sources for Water Production*, Santorini, 10-12 Juin 1996.
- [8] Fernandes C., Cora J.E., et Araujo J.A.C., Reference Evapotranspiration Estimation inside Greenhouses, *Scientia Agricola* 60(3) (2003) 591-594.
- [9] Al-Hallaj S., Farid M.M., et Tamimi A.R., Solar desalination with a Humidification-dehumidification cycle: performance of the unit, *Desalination*, 120(1998) 273-280.
- [10] Merkel F., *Verdunstungskühlung*, Habilitationsschrift, VDI Verlag GmbH, Berlin, Germany, 1925
- [11] Poppe M., et Rögener H., *Berechnung von Rückkühlwerken*, VDI-Wärmeatlas, 6. Auflage, VDI Verlag GmbH, Berlin, Germany, 1991
- [12] www.seawatergreenhouse.com
- [13] Tahri T., Abdul-Wahab S. A., Bettahar A., Douani M., Al-Hinai H., et Al-mulla Y., J. *Therm. Anal. Cal.*, 96 (2009).35-42.
- [14] Tahri T., Abdul-Wahab S. A., Bettahar A., Douani M., Al-Hinai H., et Al-mulla Y., J. *Therm. Anal. Cal.*, 96 (2009)43-47.