

Caractérisation d'un Distillateur à Effet de Serre

Cherif Khelifi et Bliidi Touati

Station d'Expérimentation des Equipements Solaires en Milieu Saharien, Route de Reggane, BP 478 Adrar, Algérie
(Accepté le 15.11.98)

Résumé – *L'analyse en régime permanent des différentes modélisations effectuées sur les capteurs solaires plans fonctionnant en basse et moyenne température a permis de développer un modèle linéaire simple susceptible d'approximer par voie expérimentale vélocité les performances thermiques et optiques d'un distillateur solaire à effet de serre. Ce modèle a servi également pour l'identification du régime permanent et la vérification du temps de réponse du système dans les mêmes conditions de fonctionnement et d'environnement.*

Abstract – *The analysis, in the steady state, of the different theoretical models of the plate solar collector operating at low and medium temperature allowed us to develop a simple linear model capable of predicting the optical and thermal performances of a green house effect solar still. This model is equally used for the steady state identification and the system response time checking in identical operation and environment conditions.*

Mots clés: Distillateur solaire à effet de serre - Capteur solaire plan - Basse et moyenne température - Performances thermiques - Performances optiques - Temps de réponse.

1. INTRODUCTION

Les molécules d'un milieu hétérogène se déplacent grâce à un gradient de température ou de vitesse par brassage, par convection ou par diffusion moléculaire. Ce transfert est isotherme lorsqu'il s'agit d'un milieu de température constante et de concentration variable.

Dans le cas du phénomène d'évaporation de l'eau dans l'air, le transfert de matière est assujéti au gradient de température ou de concentration en matière de vapeur d'eau, avec ou sans ébullition. Cette évaporation est d'autant plus importante que le gradient de température ou la concentration de matière est important.

A cet effet, pour élever le niveau d'énergie d'une masse d'air, agent moteur d'évaporation, il suffit de l'enfermer en présence d'une charge d'eau dans une enceinte close à parois adiabatiques. Afin de réduire les pertes par convection et rayonnement, l'enceinte doit être enveloppée d'une couverture transparente opaque au rayonnement infrarouge émis par la saumure et le bac absorbeur au fond de l'enceinte.

En laboratoire ou sur site réel, la quasi totalité des études effectuées sur les distillateurs thermosolaires, visent principalement l'optimisation de ces systèmes à travers des modèles de simulation numérique, basés sur des systèmes d'équations différentielles. Toutefois, l'intégration de ces équations nécessite la connaissance des coefficients d'échange et des propriétés thermophysiques qui interviennent dans le fonctionnement du système avec son environnement.

Afin d'accomplir cette tâche, on a recours généralement à de nombreuses hypothèses simplificatrices en vue de déterminer ces coefficients, soit par voie expérimentale, soit par analogie à la similitude de transfert de chaleur et de masse, en régime laminaire. Le caractère de fonctionnement turbulent ou de transition des distillateurs rend toute approche de simulation restreinte et spécifique à chaque cas particulier.

L'objectif recherché à travers la formulation mathématique et les tests expérimentaux exposés dans cet article, est une approche de caractérisation du distillateur solaire à cascade à travers un modèle linéaire similaire à celui des capteurs solaires plans.

2. PRINCIPE DU MODELE

Le capteur est étudié en régime permanent. On considère que :

- les températures de fonctionnement sont uniformes,
- les propriétés physiques et optiques du capteur sont constantes,
- les facteurs des pertes sont linéaires et indépendants de la température.

2.1 Efficacité instantanée du distillateur

Globalement, le distillateur est assimilé à une boîte noire contenant une charge d'eau saumâtre et fonctionnant entre deux sources de chaleur : la saumure (source chaude) à une

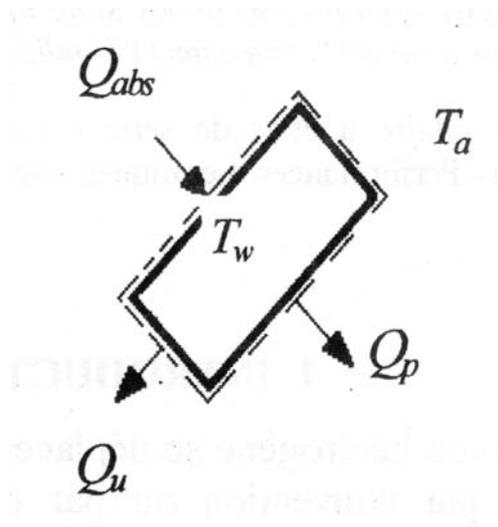


Fig. 1: Bilan thermique du capteur

température moyenne T_w et l'ambiance (source froide) à une température moyenne T_a . La fraction de la puissance solaire incidente (Q_{inc}) et absorbée par la charge d'eau (Q_{abs}) est utilisée comme chaleur utile (Q_u) pour l'évaporation d'une quantité d'eau et la fraction restante (Q_p) est perdue vers l'ambiance. L'application de la première loi de la thermodynamique à un volume de contrôle (Fig. 1) délimitant la surface effective pertinente du système permet d'écrire le bilan d'équilibre thermique du système :

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_{abs} - Q_p = A_c [\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)] \\ Q_p &= U_L A_c (T_w - T_a) \\ Q_{abs} &= \alpha_t Q_{inc} = \alpha_t (A_c I_g) \end{aligned} \quad (1)$$

α_t , l'absorptivité effective totale de la saumure (rendement optique du distillateur), est donnée par l'expression suivante [3]:

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

τ_g et τ_w sont respectivement la transmittivité du vitrage et de la saumure; α_b et α_w , l'absorptivité du bac et celle de la saumure. Pour un angle d'incidence inférieur à 30° , α_t est estimée à environ 0.85.

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

$$U_L = U_t + U_b + U_e$$

Dans ce cas, U_L est estimé à environ $5.12 \text{ W/m}^2\text{C}$.

D'autre part, l'efficacité globale η_g et l'efficacité interne η_{in} du distillateur sont exprimées par les relations :

$$\eta_g = \frac{Q_u}{Q_{inc}} = \frac{\sum \dot{m} L_v}{\sum I_g A_c} = \alpha_t \eta_{in} \quad (2)$$

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

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

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

$$\eta_g = \alpha_t - U_L \left(\frac{T_w - T_a}{I_g} \right) \equiv A - B.X \quad (3)$$

Les constantes A et B de l'équation (3) sont respectivement l'absorptivité effective de la saumure et le facteur des pertes globales du distillateur. Elles peuvent être déduites par un simple lissage sur le nuage de points de mesure, du rendement η_g en fonction de la variable réduite X par la technique des moindres carrés.

2.2 Constante de temps du distillateur

La constante de temps du système mesure, en terme de temps, la capacité calorifique du système. Elle dépend, en général, de la construction du collecteur, des matériaux utilisés, de la chaleur du fluide caloporteur, du facteur d'extraction de chaleur, du débit du distillat et évidemment de la température de fonctionnement. Un temps de réponse faible n'a qu'un effet secondaire sur les performances moyennes du collecteur à long terme.

En régime permanent, nous pouvons négliger les inerties dues au vitrage, à la plaque absorbante et à l'isolation thermique devant l'inertie de la charge d'eau à distiller. Ce qui nous permet d'affecter toute l'inertie du système à la charge d'eau dans le bac M_w de capacité calorifique C_p . Dans ces conditions, l'équilibre thermique de l'ensemble est régi par l'équation différentielle suivante :

$$M_w C_p \frac{d(T_w - T_a)}{dt} = A_c [\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)] \quad (4)$$

L'intégration de l'équation différentielle (4) peut être exprimée sous la forme simplifiée suivante:

$$\frac{\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)}{\alpha_t I_g - U_L (T_w - T_a)_{int}} = \exp\left(-\frac{U_L \cdot A_c}{M_w \cdot C_p} t\right) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5)$$

On constate, qu'en absence de la radiation solaire sur le plan du capteur, le premier terme de l'équation (5) mesure le taux de décroissance du niveau d'énergie entre les sources chaude et froide du distillateur. Ce taux vaut $\frac{1}{e} = 0.368$ au moment où $t = \tau$, avec τ désignant la constante de temps du système. Cette constante peut être déterminée expérimentalement par la simple connaissance de l'écart de température entre la saumure et l'ambiance au cours du temps.

L'équation (5) montre que la variation de la température de la saumure en fonction du temps peut se présenter sous la forme exponentielle suivante :

$$T_w = C_0 \exp(-C_1 t) + C_2 \quad (6)$$

C_0 , C_1 , C_2 sont des constantes obtenues à partir des températures de la saumure T_0 , T_1 , T_2 mesurées aux instants t_0 , t_1 , t_2 . Le calcul conduit aux expressions suivantes :

$$C_0 = \frac{(T_2 - T_1)^2}{T_0 + T_2 - 2T_1}$$

$$C_1 = \text{Ln}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 - T_0}\right)$$

$$C_2 = \frac{T_0 T_2 - T_1^2}{T_0 + T_2 - 2T_1}$$

3. MODE OPERATOIRE

3.1 Description du système

Le dispositif expérimental (Fig. 2), est un distillateur solaire à cascades fonctionnant selon le principe de l'effet - serre. Il est formé par une pièce maîtresse bac (absorbeur) en acier galvanisé de 8 mm d'épaisseur, formée de 9 marches identiques (3), peintes en noir mat, de dimensions 92x10x2.5 cm environ. L'absorbeur contient une charge de 24 kg d'eau saumâtre (2), et coiffé d'une couverture transparente (1) en verre ordinaire de dimension 94x100.2x0.3 cm d'épaisseur.

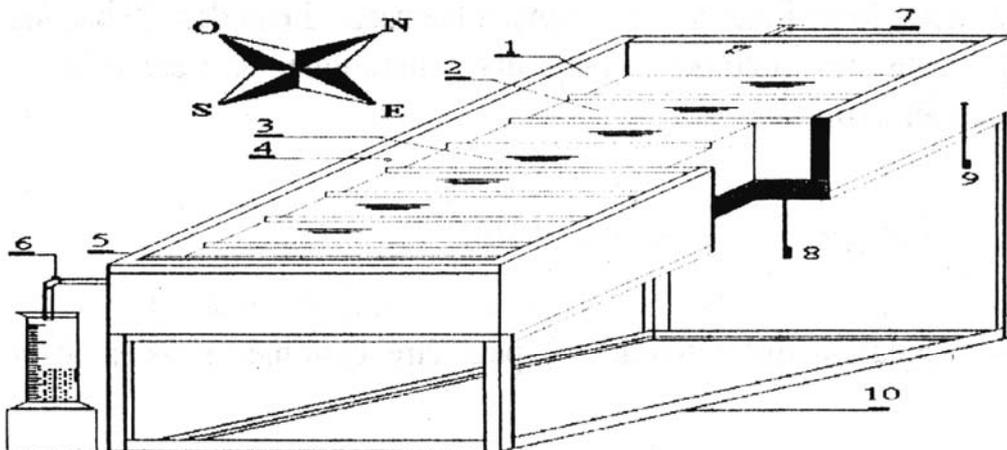


Fig. 2: Dispositif expérimental

Le système est isolé thermiquement par une couche de polystyrène de 4 cm d'épaisseur renforcé vers l'arrière par une deuxième couche de 5 cm en laine de verre (8). Sur les surfaces latérales, on a pratiqué 4 orifices connectés à des cannelures. La première est destinée pour l'alimentation du distillateur en eau saumâtre (7), la seconde pour la récupération du distillat (6), la troisième pour le rinçage et le trop plein (5) et la dernière pour la conduite des thermocouples pendant les tests (4). La fixation du bac au boîtier (9) de 25 cm de hauteur en acier galvanisé est assurée par rivetage et l'étanchéité par mastic silicone. L'ensemble repose sur une structure métallique (10) inclinée à la latitude du site (27.88° Nord), élevé à 264 m par rapport à la mer.

3.2 Instrumentation et mesure

Les performances optiques et thermophysiques du distillateur sont déterminées, en opérant le capteur dans les conditions les plus proches du standard ASHRAE 93-77.

L'efficacité globale instantanée du capteur est déterminée, en exposant le capteur à la radiation solaire sous ciel clair et en enregistrant la température moyenne de la charge d'eau saumâtre dans le bac et en prélevant en même temps, le débit du distillat produite.

En rassemblant les données de la radiation solaire globale incidents sur l'ouverture du distillateur, la température ambiante et la vitesse du vent, on obtient les grandeurs intensives et extensives capables de fournir les informations nécessaires qui permettent la caractérisation du distillateur sous ensoleillement naturel à travers les paramètres qui indiquent la fraction d'énergie absorbée par la charge d'eau, et celle qui est restituée à l'ambiance.

Le second indicateur de performance est la constante de temps. Elle est déterminée expérimentalement, en opérant le capteur dans les conditions identiques aux précédentes. Le rayonnement solaire est obturé brusquement et soigneusement de la surface du capteur par un cache réfléchissant et, en même temps, on enregistre le gradient de température saumure ambiance en fonction du temps. Cet indicateur est obtenu au moment où la chute de température atteint 36.8 % de la valeur initiale au moment de l'obturation du collecteur.

Pour le déroulement des tests, trois thermocouples type K (Chromel-Alumel) ont été maintenus en suspension dans la saumure (Fig. 3), recouverts par des capuchons en papier réfléchissant au milieu de chacune des marches 2, 5 et 8, afin d'obtenir une température moyenne de la charge d'eau saumâtre. Un quatrième thermocouple sert à mesurer la température extérieure. Tous les thermocouples sont raccordés à une acquisition de données type Fluke 2625 A, réglée avec un pas de scrutation de 60 secondes, et sur laquelle on a également connecté, un pyranomètre type Kipp & Zonen, classe 2, dans le plan du vitrage, destiné à la mesure de l'éclairement global incident.

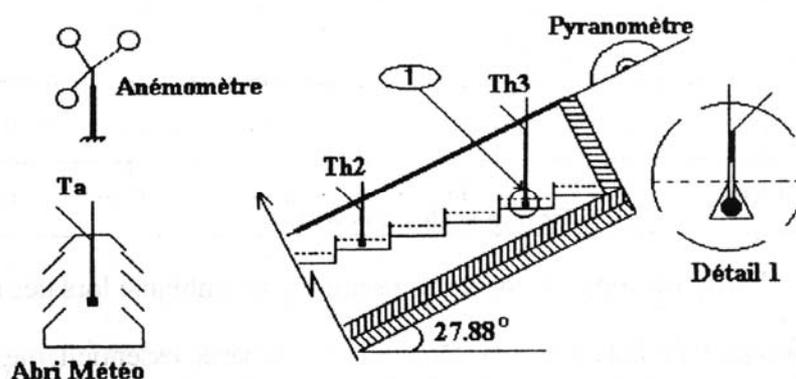


Fig. 3: Emplacement des instruments de mesure

La vitesse du vent est mesurée par un anémomètre et le débit du distillat avec un vase gradué à 1%.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

L'action de la radiation solaire (Fig. 4), dans la gamme ($1056.93 < I_g < 1067.19$), impose un régime de fonctionnement stationnaire comme traduit par une évolution du gradient de

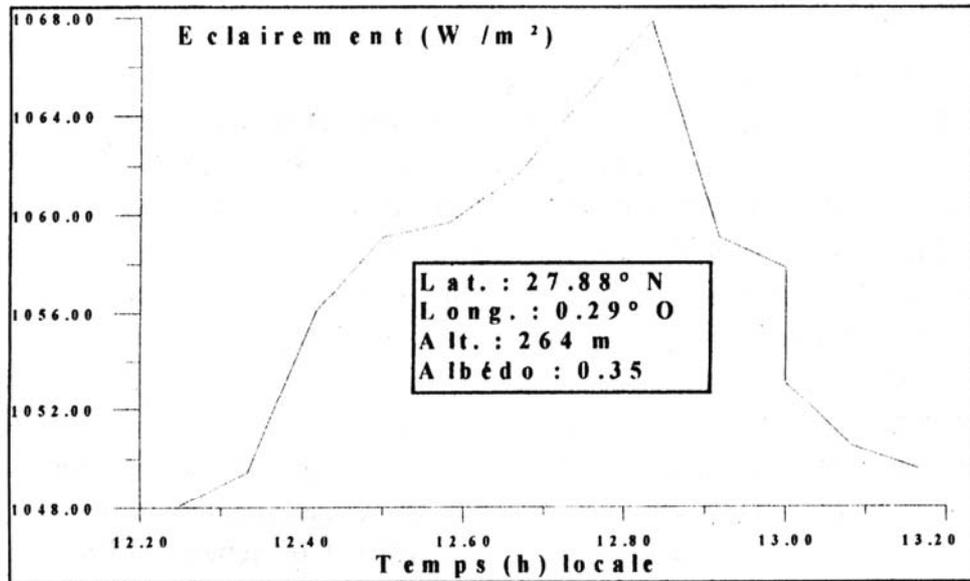


Fig. 4: Evolution de l'éclairement solaire sur le plan du capteur lors des tests

température entre la saumure et l'ambiance (Fig. 5), dans le même sens et du même ordre de grandeur pendant toute la durée des tests d'environ (39 °C) en moyenne.

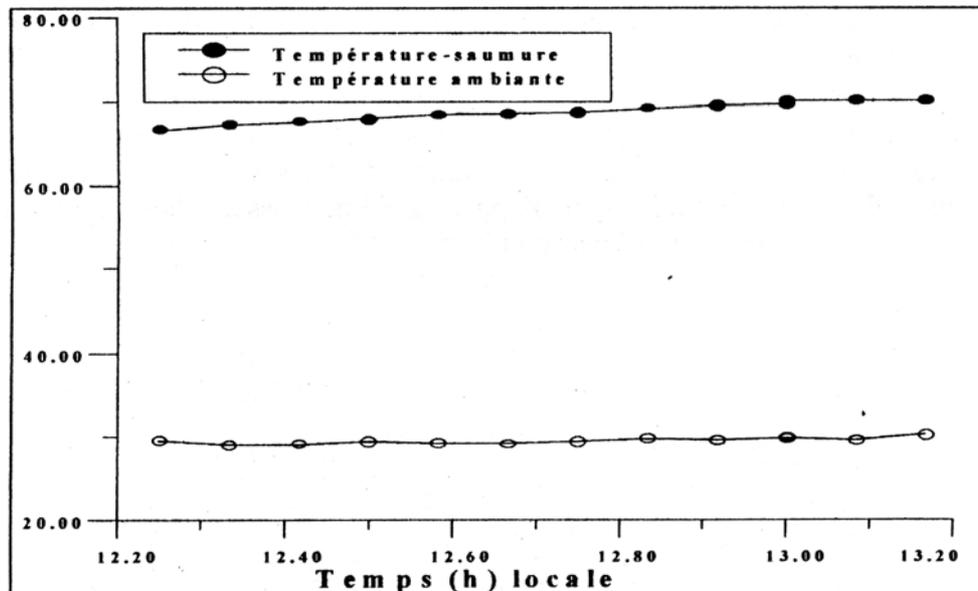


Fig. 5: Evolution de la température saumure et ambiante lors des tests

La considération globale faite sur le système étudié est basée essentiellement sur le fait que le rendement instantané du distillateur (Fig. 6) chute avec l'augmentation de la température de la saumure.

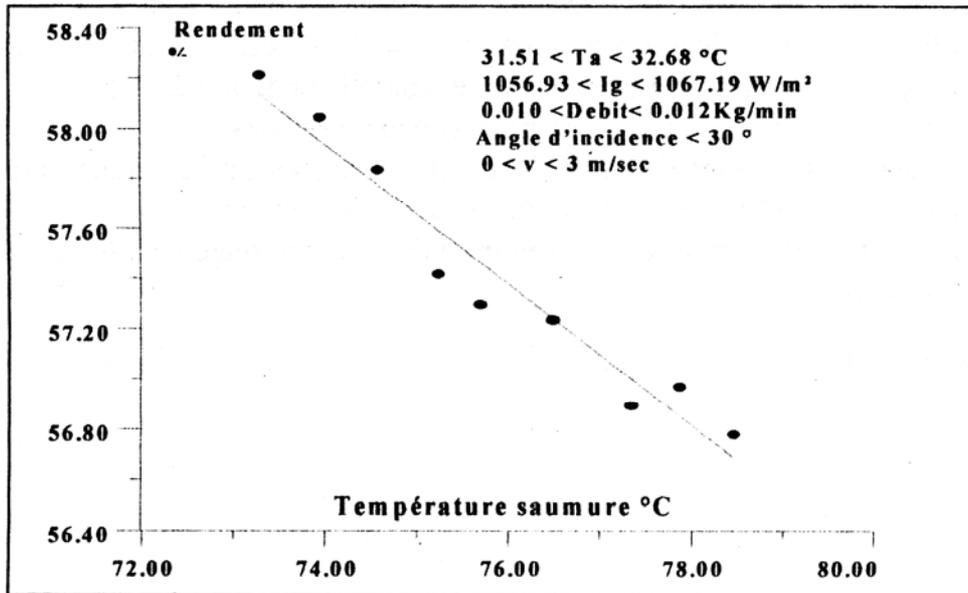


Fig. 6: Evolution du rendement en fonction de la température saumure

En effet, les pertes globales du distillateur sont étroitement liées à la température de la source chaude. L'accroissement du niveau d'énergie de cette source engendre une diminution de la chaleur latente d'évaporation et une augmentation des pertes thermiques, ce qui entraîne une chute du rendement en conséquence.

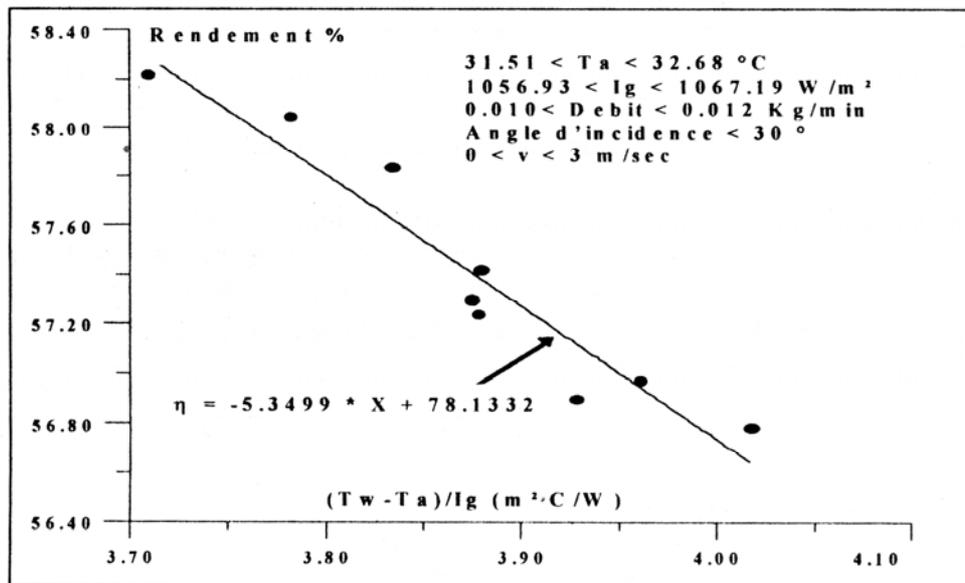


Fig. 7: Caractéristique du distillateur

Les mesures sont reportées en figure 7. On peut voir que la variation du rendement en fonction de $\frac{T_w - T_a}{I_g}$ est dans une première approximation linéaire. La pente de la droite est de l'ordre de $U_L \cong 5.35 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ceci est en bon accord avec la valeur estimée théoriquement ($U_L = 5.12 \text{ W/m}^2\text{°C}$). En moyenne, ce facteur des pertes est relativement élevé en comparaison avec les valeurs obtenues pour des distillateurs de même type, et qui sont de l'ordre de 3 à 4 $\text{W/m}^2\text{°C}$ environ.

L'intersection de la droite avec l'axe des ordonnées donne $\alpha_t \cong 0.78$. Ce qui est légèrement inférieure à la valeur estimée par le calcul qui est de 0.85. L'écart de 7 % enregistré par rapport à la valeur calculée est dû essentiellement au dépôt des sels dans le bac et à un degré moindre à l'effet de l'angle d'incidence lors des tests.

Notons que les tests se sont déroulés durant des journées où la composante diffuse ne dépasse pas les 15 % de la fraction globale incidente sur le capteur.

La stabilisation de la température de la saumure (Fig. 8) est longue à atteindre. Elle est de l'ordre de 3 à 4 heures.

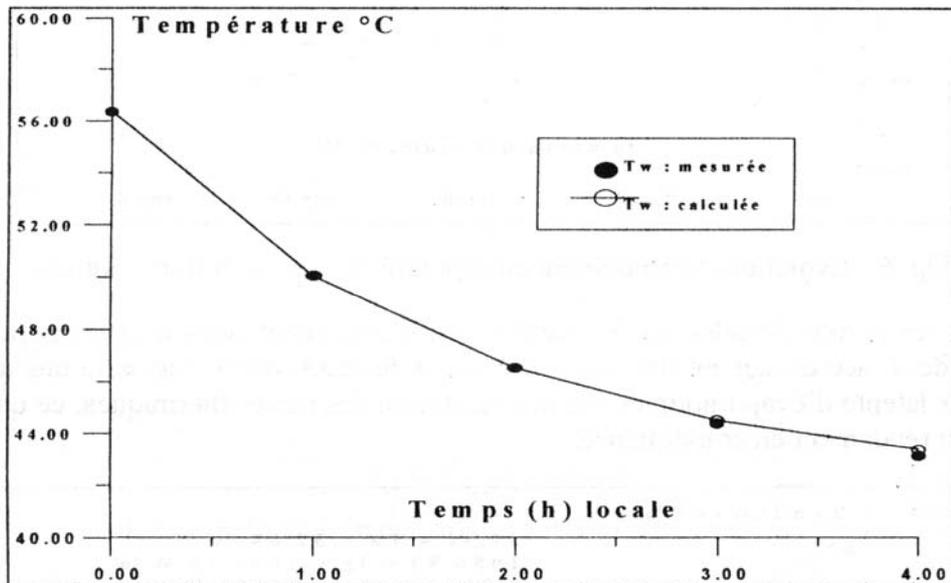


Fig. 8: Evolution de la température saumure en fonction du temps

Ce comportement du capteur est du essentiellement à l'inertie créée par la présence d'une charge d'eau de 24 kg à l'intérieur de l'isolation. L'analyse des enregistrements des températures de la saumure, obtenus sous l'effet d'un signal d'entrée de grandeur échelon d'éclairément, a permis d'identifier le comportement du système. Le système peut être considéré comme un système du premier ordre.

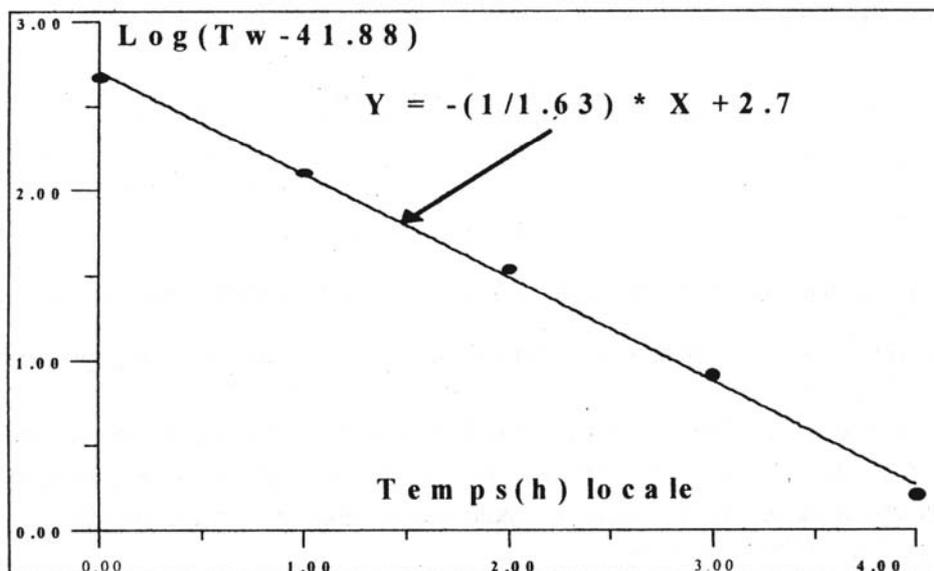


Fig. 9: Détermination de la constante de temps du distillateur

En échelle semi logarithmique (Fig. 9), on a représenté l'écart entre la température réelle saumure et la température stabilisée au bout d'un temps théoriquement infini, 41.88 °C en fonction du temps (équation 6). Les points obtenus sont lissés par une droite de pente ($-1/\tau$), avec τ temps de réponse du distillateur égale à 1.6 h.

Pour un essai donné, nous avons porté au Tableau 1 les températures mesurées et celles calculées par l'équation (6). Le très bon accord observé, nous a conduit à effectuer les essais entre 2 et 3 heures et de déterminer les températures du régime permanent pendant les deux premières heures, selon la procédure précitée.

Tableau 1: Comparaison des températures - saumure mesurées et calculées

Temps (heure)	0	1	2	3	4	∞
T_w mesurée (°C)	56.36	50.06	46.5	44.36	43.11	-
T_w calculée (°C)	56.36	50.06	46.5	44.48	43.35	41.88

5. CONCLUSION

L'approche de caractérisation du distillateur solaire à cascades que nous avons décrit dans cet article a permis de montrer que l'idée dominante qui se résume par le fait que le rendement du distillateur augmente en général avec l'augmentation de la radiation solaire et la température saumure n'est pas correcte. Par conséquent, l'aspect des phénomènes physiques de la distillation thermosolaire par effet de serre ne fait pas l'exception, mais obéit aux mêmes lois qui régissent le fonctionnement des insolateurs en général. Cependant, les performances du distillateur sont approchées via la détermination des trois principaux paramètres caractérisant le système :

1. L'efficacité optique : L'efficacité optique obtenue expérimentalement ($\alpha_t = 0.78$) et comparée à la valeur théorique ($\alpha_t = 0.85$) est en bon accord, si on prend en considération toutes les sources d'erreurs.
2. Le facteur global des pertes thermiques : Le facteur des pertes thermiques globales déterminé expérimentalement ($U_L = 5.35 \text{ W/m}^2\text{°C}$) est acceptable en comparaison avec les données de construction ($U_L = 5.12 \text{ W/m}^2\text{°C}$) du modèle expérimental. Toutefois, ce résultat ne répond pas aux critères d'isolation thermique recommandés pour les distillateurs de haute qualité et du même type, qui est de l'ordre de 3 à 4 $\text{W/m}^2\text{°C}$.
3. La constante de temps : La constante de temps du système trouvée expérimentalement ($\tau = 1.6 \text{ h}$) s'avère plus au moins élevée en raison de l'encombrement du système qui induit une inertie thermique importante.

Quoiqu'il en soit, cette approche simple a modestement contribué à initier la caractérisation des distillateurs à effet de serre afin de mieux comprendre l'interaction des paramètres thermophysiques et d'évaluer leurs performances sur site réel avec un minimum de temps et d'instrumentation de mesure.

Elle a, tout en restant simple, fourni un moyen intéressant qui permet par analyse technologique de suggérer un certain nombre de considérations sur la façon d'améliorer le rendement de ce modèle expérimental :

- ◆ Réduire les pertes thermiques et optiques vers l'ambiance,
- ◆ Favoriser la condensation par un refroidissement contrôlé du vitrage,
- ◆ Eviter les dépôts des sels dans le bac absorbent- par des vidanges continues et régulières,
- ◆ Réduire davantage l'inertie du système par l'introduction des matériaux plus légers.

NOMENCLATURE

L_v	Chaleur latente d'évaporation (kJ/kg)	T_a	Température ambiante (°C)
A_c	Surface d'ouverture du capteur (m ²)	T_w	Température de la saumure (°C)
Q_u	Puissance utile à l'évaporation à la surface de l'eau (W/m ²)	Q_{abs}	Puissance absorbée par la saumure (W/m ²)
Q_{inc}	Puissance solaire incidente sur la surface d'ouverture (W/m ²)	I_g	Eclairement global incident sur la surface d'ouverture (W/m ²)
\dot{m}	Débit du distillat (kg/s)	t	Temps (s)
U_L	Facteur des pertes globales (W/m ² °C)	τ	Constante du temps du capteur (s)
α_t	Absorptivité effective de la saumure (%)	η_{int}	Efficacité instantanée interne du distillateur (%)
η_g	Efficacité instantanée globale du distillateur (%)	τ_g	Transmittivité du vitrage
α_b	Absorptivité du bac	τ_w	Transmittivité de la saumure
α_w	Absorptivité de la saumure		

REFERENCES

- [1] J. Duffie and W.A. Beckman, '*Solar Engineering of Thermal Process*', 2nd. Ed.,. John Wiley & Sons, USA, 1991.
- [2] J.F. Kreider and F.Kreith, '*Solar Energy Handbook*', Mac Graw-Hill, USA, 198 .
- [3] R. Bemard, G. Menguy et M. Schartz, '*Le Rayonnement Solaire - Conversion Thermique et Applications*', Ed. Paris, 1979.
- [4] G. Morisson and D. Gilliaert, '*ISO Solar Thermal Standards*', Joint Research Center Eur. 13469, 1991.