

Simulation numérique des besoins énergétiques d'une serre agricole sous le climat de Marrakech - Maroc

F. Berroug¹, E.K. Lakhal^{1*}, M. El Omari¹ et H. El Qarnia²

¹ Laboratoire d'Automatique de l'Environnement et Procédés de Transfert,

² Laboratoire de Mécanique des Fluides et Energétiques,
Département de Physique, Faculté des Sciences Semlalia,
Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

(reçu le 20 Janvier 2010 – accepté le 26 Mars 2010)

Résumé - Dans ce travail, on présente un modèle du bilan énergétique d'une serre agricole basé sur un ensemble d'équations théoriques intégrant les processus d'échanges thermiques entre les différentes composantes de la serre en tenant compte du couvert végétal. Le modèle ainsi développé prend en considération les conditions météorologiques instantanées du lieu de plantation de la serre (température, humidité, radiations solaires, vitesse du vent). Le système d'équations non linéaires obtenu est résolu par la méthode itérative de Newton-Raphson. Elle permet de prédire les paramètres climatiques suivants: la température de la plante, l'humidité et la température de l'air intérieur de la serre et les flux de chaleur sensible et latente des plantes. Pour une température de consigne exigée par la plante et dans le but d'estimer instantanément les besoins énergétiques de la serre (chauffage/refroidissement), le modèle a été inversé numériquement. Afin d'obtenir une évaluation des besoins en chauffage des serres à l'échelle régionale de Marrakech, pour une base de temps adéquate (période hivernale), une simulation dynamique a été conduite pour mieux gérer les apports énergétiques et les calendriers culturels de la zone. Dans le cadre de ce travail, une quantification des différentes composantes des pertes thermiques à travers la structure d'une serre en plastique pour un débit d'énergie de chauffage donné a été réalisée. Pour minimiser les dépenses énergétiques, des mesures doivent être prises comme l'utilisation d'une double couverture en plastique, l'amélioration de l'étanchéité de la serre et l'installation d'un système de stockage d'énergie diurne pour une éventuelle restitution nocturne.

Abstract - In this work, we introduce a model of the energy balance sheet of an agrarian conservatory based on a group of theoretical equations inserting the processes of thermal exchanges between the different elements of the conservatory by taking into account plant place setting. Such a developed model takes into consideration, the instantaneous meteorological conditions of the conservatory place (temperature, humidity, solar expulsions, and speed of the wind). A system of no linear equations is obtained and solved by the iterative method of Newton-Raphson. This model can predict says following climatic parameters as the temperature of the plant, the temperature and the humidity of the internal air of the conservatory and the fluxes of sensitive and latent heat of plants. For a desired temperature of baggage room demanded by the plant and with the intention of estimating instantly the energy needs of the conservatory (heating / cooling), the model was numerically reversed. With the intention of acquiring a valuation of needs in heating of conservatories on a regional scale from Marrakech for an appropriate foundation of time (winter period), a dynamic simulation was accomplished to manage better energy provisions and cultural calendars of the zone. As part of this work, a quantification of the different elements of thermal losses across the structure of a plastic conservatory for a debit side of energy of given heating has been driven. To minimize energy expenses, measures must be taken as the use of a double plastic coverage, the improvement of the

* lakhal@ucam.ac.ma

waterproof quality of the conservatory and the installation of a system for the stocking of daytime energy for a possible nocturnal restitution.

Mots clés: Serre agricole - Equilibre énergétique - Besoins énergétiques - Pertes thermiques - Energie de chauffage.

1. INTRODUCTION

La fonction essentielle d'une serre agricole est de créer un microclimat plus favorable aux exigences de la plante que le climat locale ou régionale. La température représente l'un des paramètres les plus importants pour la gestion du climat malgré la difficulté de la contrôler.

En fait, sa valeur optimale diffère d'une culture à l'autre et selon le stade cultural. Son importance réside dans le fait qu'elle influence la photosynthèse, la respiration et intervient dans la vitesse de croissance, le bourgeonnement, le calibre et la fermeté du produit. A noter que La différence de température entre le jour et la nuit constitue également un facteur essentiel.

Ainsi pour maintenir une stratégie de contrôle du climat, le chauffage est nécessaire durant les périodes hivernales ou la température est inférieure à la température de consigne exigée par la plante et la ventilation est nécessaire durant les périodes chaudes.

L'estimation prévisionnelle des besoins énergétiques de la serre conditionne le choix des équipements et des stratégies de chauffage- refroidissement et en conséquence faire des analyses de type économique de manière à déterminer les solutions et les techniques les plus rationnelles pour le serriste au niveau de la rentabilité et l'exploitation, Baille *et al.* [1].

A nos connaissances, peu de travaux ont été faits sur la quantification des besoins énergétiques et l'analyse des différentes composantes du bilan énergétique des serres en polyéthylène sous des conditions climatiques similaires à celle de Marrakech.

Au cours des dernières décennies, un très grand nombre de travaux de modélisation des phénomènes énergétiques traitant le climat intérieur des serres ont été conduits par Jolliet [2], Monteil *et al.* [3], Boulard *et al.* [4].

Les modèles ainsi développés utilisent le concept de transpiration introduit par Stanghellini [5] pour calculer le couple température - humidité. Ainsi, les auteurs ont procédé à une linéarisation des équations des bilans énergétiques basée sur l'utilisation de la pente de la courbe exponentielle de la pression de vapeur saturante moyennant une connaissance préalable de la température extérieure, Boulard *et al.* [6].

L'erreur due à la linéarisation a un effet très réduit sur la transpiration, cependant cet effet semble important sur la température de l'air et de la feuille, Fuchs *et al.* [7].

L'objectif essentiel du présent travail est de compléter les diverses approches théoriques dans le domaine par une résolution numérique des équations non linéaires du bilan énergétique.

Pour cela, on fait appel à la méthode itérative de Newton. Par la suite, le modèle a été inversé numériquement pour une éventuelle estimation des besoins énergétiques de la serre dans le but de régionaliser l'estimation prévisionnelle des besoins en énergie de chauffage à partir des données énergétiques du couvert végétal et climatologiques de la région.

Pour analyser l'efficacité du chauffage, une estimation des différentes voies de pertes thermiques à travers la structure de la serre pour un débit d'énergie de chauffage donné a été conduite.

Dans ce travail, l'analyse dynamique adoptée repose sur le concept des journées - types. Il s'agit de journées moyennes, représentatives et reproductibles sur une période de référence plus longue.

Dans la pratique, le mois semble l'entité qui répond à ces exigences. Signalons que la prédiction du climat intérieur de la serre nécessite la connaissance des données météorologiques: ensoleillement, vitesse du vent, humidité et température ambiante pour des pas de temps relativement petits soit donc de l'ordre d'une heure.

Ainsi, la détermination précise des besoins énergétiques de la serre (chauffage/refroidissement) nécessite l'introduction des paramètres météorologiques réels bien représentatifs du lieu d'implantation et de la période de l'année.

Dans le cadre de ce travail on a utilisé des décades types du climat de Marrakech sélectionnées statiquement par Ouardi [8].

2. ANALYSE THERMIQUE

Du point de vue physique, la serre peut être assimilée à un collecteur solaire avec une simple différence dans les équations d'équilibres liés à la présence de la transpiration qui favorise considérablement les processus de transfert par la chaleur latente.

Les radiations solaires transmises à travers la couverture de la serre et reçues par le couvert végétal sont converties en chaleurs sensible et latente.

Les déperditions thermiques à travers la couverture et les ouvrants d'aérations sont prises dans le bilan.

Ainsi, le modèle proposé est constitué de deux composantes essentielles: le couvert végétal et l'air intérieur caractérisés chacun par leur propre température. De plus, l'air intérieur régnant dans la serre est caractérisé par une humidité relative donnée. Pour le modèle d'équations, les hypothèses suivantes ont été adoptées:

- Régime permanent;
- Humidité et température intérieure de la serre sont supposées uniformes;
- Absence d'absorption des radiations par le sol et des échanges de chaleur et d'humidité du sol avec l'air intérieur du fait que le sol de la serre est supposé couvert entièrement de végétation;
- Absence de stress hydrique dans le couvert végétal;
- Absence de condensation à l'intérieur de la serre.

Equations d'équilibre énergétique

2.1 Bilan global de la serre

En se basant sur le modèle de la serre décrit par la figure 1, les hypothèses citées auparavant, et en s'inspirant du modèle de Boulard *et al.* [4], l'équation du bilan énergétique de la serre peut être exprimée par:

$$\tau \cdot St - Q_{vs} - Q_{vl} - Q_c + Q = 0 \quad (1)$$

Le rayonnement solaire total St incident sur la serre a été calculé théoriquement sur chaque face et toit de la serre en utilisant la formulation de Liu *et al.* [9] pour les surfaces inclinées selon les expressions suivantes:

$$I_i = I_b R_b + I_d R_d + \rho R_r (I_b + I_d) \quad (2)$$

Et

$$St = \sum A_i \cdot I_i \quad (3)$$

'i' désigne respectivement E, W, N, S, SR et NR.

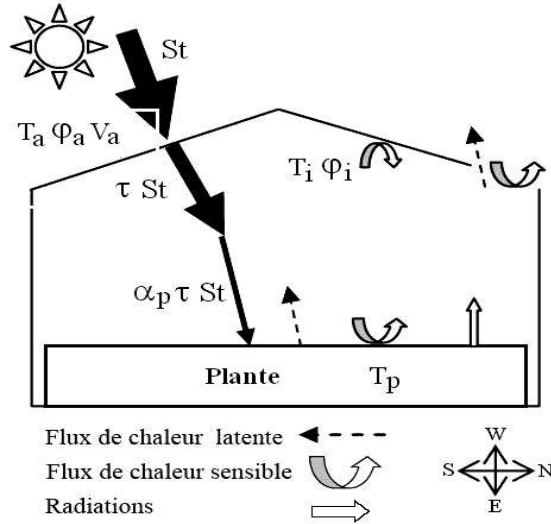


Fig. 1: Mécanismes de transfert énergétique dans la serre

Les flux de chaleur sensible et latente échangés entre l'air intérieur et extérieur de la serre par ventilation ou par fuite à travers la structure de la serre sont donnés respectivement par les expressions:

$$Q_{vs} = K_v \cdot (T_i - T_a) \quad (4)$$

$$Q_{vl} = \frac{K_v}{\gamma} \cdot (e_i - e_a) \quad , \quad [7] \quad (5)$$

$$\text{Avec } K_v = \frac{\rho \cdot C_a \cdot N \cdot V / A_s}{3600} \quad (6)$$

Et

$$N = 0.29 \cdot V_a + 0.76 \quad , \quad [1] \quad (7)$$

Le flux de chaleur global échangé entre l'intérieur et l'extérieur de la serre à travers la couverture de la serre peut être exprimé par:

$$Q_c = K_c \cdot (T_i - T_a) \quad (8)$$

Le coefficient de transfert K_c peut être considéré comme une fonction de la vitesse extérieure donnée par Fatnassi *et al.* [10]:

$$K_c = (A + B \cdot V_a) \cdot \frac{A_c}{A_s} \quad (9)$$

Les coefficients A et B dépendent de la géométrie de la serre et de la nature de la couverture. Des valeurs respectives de 6 et 0.5 sont utilisées pour une simple paroi et 4 et 0.2 pour une double paroi, Fatnassi *et al.* [10].

Le besoin énergétique de la serre Q peut être pris égal à zéro pour simuler l'état climatique de la serre et peut être simulé numériquement à partir de la résolution des équations d'équilibre énergétique, pour une température de consigne T_i imposée dans la serre.

2.2 Bilan de chaleur latente de la serre

En supposant que la seule source de vapeur d'eau dans la serre est le couvert végétal, l'équation du bilan de chaleur latente peut être exprimée par:

$$\lambda E = Q_{vl} \quad (10)$$

La transpiration du couvert végétal λE peut être exprimé par la formulation suivante, Fuchs *et al.* [7]:

$$\lambda E = \frac{\rho C_a}{\gamma} \frac{e(T_p) - e_i}{(r_a + r_s) / Lai} \quad (11)$$

La pression de vapeur saturante à la température de la plante peut être calculée par la formule suivante, Tetens [11]:

$$e(T_p) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_p}{T_p + 273.3} \right] \quad (12)$$

La résistance aérodynamique r_a peut être déterminée en fonction du nombre de Nusselt Nu (calculé en fonction du mode de convection: libre ou forcée à l'intérieur de la serre), la longueur caractéristique des feuilles et la conductivité thermique de l'air K_a (W/m°C) comme suit, Boulard *et al.* [12]:

$$r_a = \frac{l_f \rho C_a}{Nu K_a} \quad (13)$$

La vitesse moyenne intérieure peut être approximée moyennant le flux de ventilation et le volume de la serre, [10]:

$$V_i = \frac{\Phi_v}{V^{2/3}} \quad (14)$$

La résistance stomatique r_s peut être exprimée en faisant appel à l'expression donnée dans la référence Boulard *et al.* [13]:

$$r_s = 200 \left[1 + \frac{1}{\exp[0.05 \times (\tau \cdot St - 50)]} \right] \quad (15)$$

2.3 Bilan énergétique des plantes de la serre

L'énergie absorbée par la plante est dissipée sous forme de chaleur sensible échangée avec l'air intérieur de la serre et sous forme de chaleur latente due à la transpiration de la plante:

$$R_n = H_s + \lambda E \quad (16)$$

L'énergie reçue par le couvert végétal R_n peut être exprimée par

$$R_n = \alpha_p \cdot \tau \cdot St + \frac{\sigma [(T_a + 273.16)^2 - (T_p + 273.16)^4]}{\left(\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p A_p} + \frac{1}{A_p F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c A_c} \right)} \cdot A_s \quad (17)$$

Le premier terme du membre de droite désigne le rayonnement solaire reçu par le couvert végétal, le second terme désigne le rayonnement de courte longueur d'onde reçu par la plante. L'écriture de cette équation stipule que la température de la paroi est assimilée à la température ambiante et la température du sol est prise égale à la température du couvert végétal, Fuchs *et al.* [7].

Le flux de chaleur sensible de la plante vers l'air intérieur de la serre H_s peut être exprimé comme suit:

$$H_s = \rho C_a \frac{T_p - T_i}{r_a / Lai} \quad (18)$$

2.4 Méthode de résolution

L'ensemble des équations d'équilibre aboutit donc à un système d'équations non linéaires. La résolution de ces équations est faite par la méthode de Newton en tenant compte des paramètres caractéristiques de la structure de la serre (surface du sol, géométrie de la serre et coefficient de transmission de la couverture) et des paramètres caractéristiques du couvert végétal (indice foliaire, longueur caractéristique des feuilles et coefficient d'absorption). Pour le présent modèle, les paramètres suivants ont été adoptés.

$$\begin{aligned} A_s &= 24 \text{ m}^2, A_c = 60.4 \text{ m}^2, A_E = A_W = 9.6 \text{ m}^2, A_N = A_S = 10.8 \text{ m}^2, \\ A_{NR} &= A_{SR} = 13.33 \text{ m}^2, V = 57.6 \text{ m}^3, \tau = 0.7, \varepsilon_c = 0.3, \varepsilon_p = 0.3, \alpha_p = 0.4, \\ Lai &= 3, l_f = 0.03 \text{ m}, N = 0.765, F_{12} = 1 \end{aligned}$$

Les équations précédentes sont valables dans un intervalle de temps $[0, t]$ où les coefficients de transfert thermique sont relativement constants.

Pour le présent modèle, l'intervalle de temps est de 3600 s. La résolution des équations a été faite en adoptant les hypothèses supplémentaires suivantes:

• Dans l'intervalle de temps $\Delta t = 3600$ s, la température ambiante, le rayonnement solaire et la vitesse du vent extérieur sont assimilés à des valeurs moyennes horaires $\overline{T_a}$, \overline{St} et $\overline{V_a}$.

• La condition initiale relative à la température du couvert végétal est: $T_{p0} = T_a$.

Un programme de calcul a été développé pour simuler la température de l'air intérieur, la température des plantes et l'humidité intérieure pour un cycle complet de 24 heures.

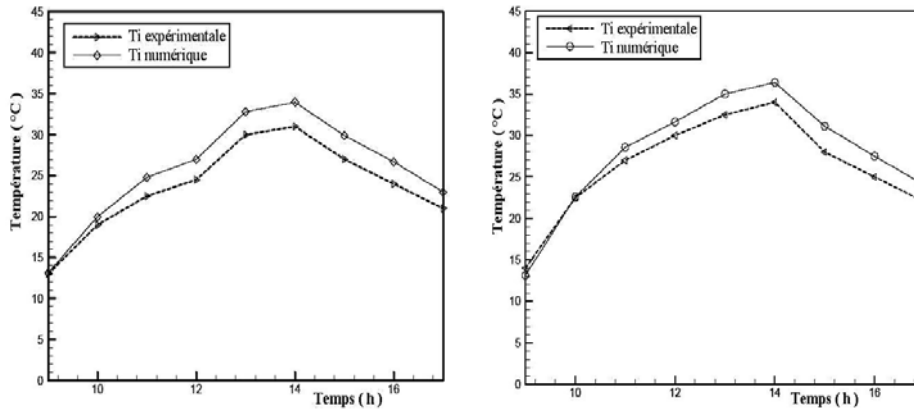


Fig. 2: Variation horaire prédite et mesurée de la température de l'air intérieur (a-) et du couvert végétal (b-)

2.5 Validation du modèle numérique

Le code de calcul ainsi élaboré est validé par les résultats expérimentaux effectués par Sethi *et al.* [14], relatifs à l'estimation des paramètres climatiques à l'intérieur de la serre moyennant une prise en considération des données climatiques extérieures.

En fait, l'expérience de Sethi *et al.* [14] avait porté sur la mesure de la température horaire de l'air intérieur et du couvert végétal dans une serre mono chapelle en plastique. Cette serre présente la même orientation et dimension que celle adoptée dans notre modèle.

Par la suite, des paramètres d'entrée du modèle similaires à celles de l'expérience de Sethi *et al.* [14] ont été utilisés.

La figure 2 montre la variation horaire journalière de la température mesurée et calculée de l'air intérieur (2.a-) et du couvert végétal (2.b-) pour le cas d'une journée typique d'hiver.

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les deux modèles utilisés moyennant des différences ne dépassant pas le cas le plus défavorable 9%. Ainsi, on peut conclure que notre modèle permet de simuler correctement les paramètres climatiques à l'intérieur de la serre.

3. RESULTATS

Sur la figure 3, on présente les décades typiques du mois de janvier à Marrakech (latitude 31.62° , longitude 8.03°) de la radiation solaire globale, diffuse et de la température ambiante. Toutes les simulations qui seront présentées dans le cadre de ce travail ont été conduites en utilisant la deuxième journée typique de la décade d'un mois de janvier.

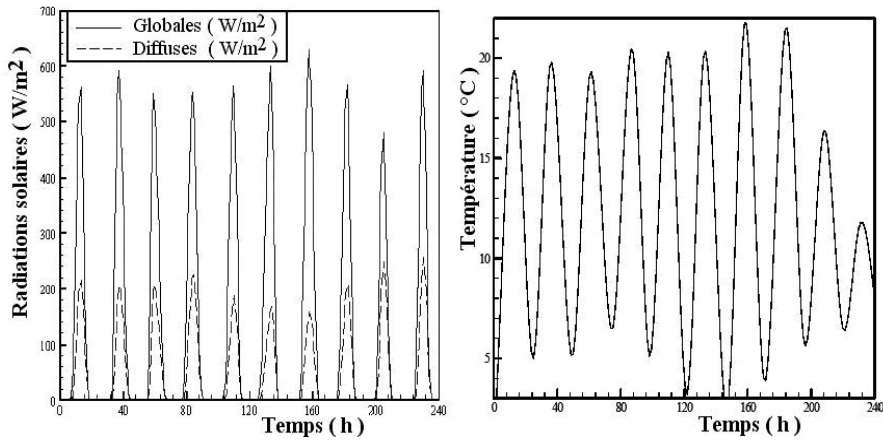


Fig. 3: Présentation de la décade typique (radiations solaires, température ambiante) du mois de Janvier (site de Marrakech) [8]

En utilisant l'équation (2), l'intensité horaire des radiations solaires sur chaque face et toit de la serre a été calculée et présentée sur la figure 4.

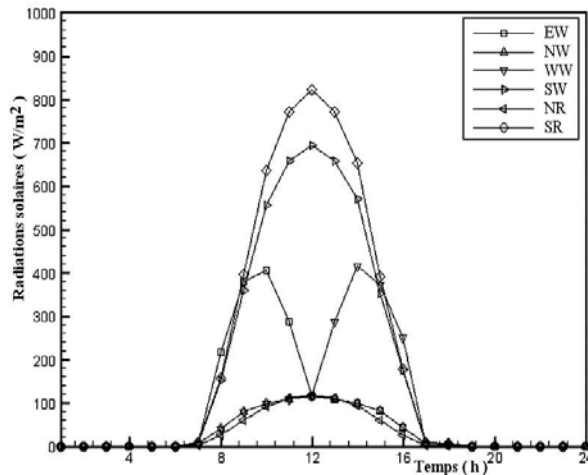


Fig. 4: Variation horaire de l'intensité des radiations solaires sur chaque face et toit de la serre pour une journée typique d'hiver à Marrakech

L'utilisation de l'équation (3) servira à déterminer l'intensité totale incidente sur toutes les faces et toits de la serre. Les résultats montrent que, pour une orientation E/W

de la serre, le maximum de ces intensités est obtenu à travers la face SR suivie de la face SW.

Cependant, le minimum d'intensité des radiations est obtenu par les faces NR et NW à cause de l'absence des radiations solaires directes dans ces faces. A noter que la face EW reçoit les radiations solaires directes jusqu'au midi, avec un maximum d'intensité vers 10 heures.

Au delà de midi, cette face reçoit uniquement les radiations solaires diffuses et réfléchies. A l'opposé, la face WW ne commence à recevoir les radiations solaires directes qu'à partir de midi.

3.1 Prédiction des paramètres climatiques intérieurs

Sur la figure 5, on présente les différentes températures (T_p , T_i , T_a) et pressions de vapeurs (e_i , e_a) calculées par le modèle proposé. Les résultats montrent que la température du couvert végétal est plus élevée que celle de l'air extérieur et ce pendant la période diurne grâce à la présence des radiations solaires.

On note ainsi un dépassement de 15 °C par rapport à la température extérieure. Cependant, ce phénomène est inversé pendant la période nocturne. En effet, ceci est dû aux pertes thermiques vers l'extérieur de la serre à travers la couverture et les joints d'étanchéité, vu que la température ambiante est relativement basse pendant la nuit. La température de l'air intérieur est souvent basculante entre ces deux températures, Dayan *et al.* [15].

En effet les mécanismes évaporatoires liés à la transpiration des plantes permettent de maintenir la température des feuilles à une température sensiblement proche de celle de l'air intérieur, Papadakis *et al.* [16]. Les modèles thermiques utilisés pour des fins de contrôle emploient ce résultat et regroupent ces deux éléments (plante et air) en un seul élément, caractérisé par sa température résultante T_i et sa pression de vapeur d'eau e_i , Draoui *et al.* [17].

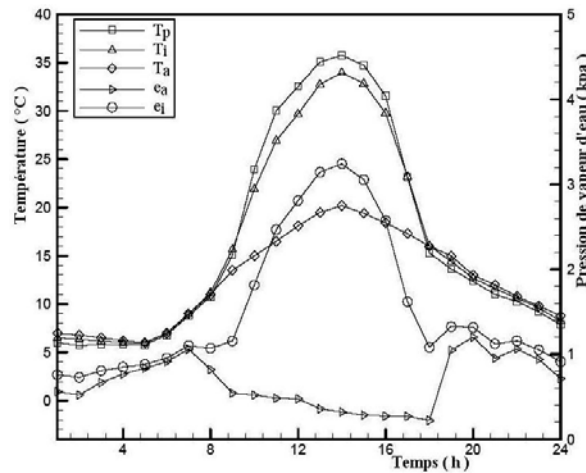


Fig. 5: Variation horaire des paramètres climatiques à l'intérieur de la serre

Sous le climat de Marrakech, l'apport solaire est suffisant, voir même, surabondant durant le jour au cours de la plus grande partie de l'année [1]. A noter que la température journalière de l'air intérieur atteint un maximum de 34 °C, ce qui est largement suffisant pour la bonne croissance de la culture.

Ainsi dans un climat similaire à celui de Marrakech (latitude 31,62°, longitude 8,03°), le besoin en chauffage est essentiellement nocturne. On remarque aussi une augmentation de l'humidité intérieure par rapport à celle de l'extérieur. Cette augmentation est plus importante pendant la journée. En effet, la présence des radiations solaires favorise l'augmentation de la transpiration du couvert végétal, ce qui augmente l'humidité intérieure.

Cette augmentation peut être limitée par l'accroissement du taux de renouvellement d'air à travers les ouvertures des différents dispositifs d'aération ou par des systèmes de ventilation.

3.2 Estimation des besoins thermiques de la serre

Le chauffage étant jugé nécessaire généralement pendant la nuit où la température moyenne de l'air intérieur demeure inférieure à la température de consigne.

Cependant, au cours de la journée, une quantité considérable d'énergie doit être évacuée de la serre. En effet, l'analyse de la figure 6 illustre que pour une journée typique d'hiver à Marrakech et pour une température désirée de 20 °C, on a besoin d'évacuer pendant la journée 1780 W/m² alors que pendant la nuit, on a besoin d'une énergie de chauffage de 2828 W/m². Ainsi, l'énergie excédentaire pendant la journée peut couvrir plus que 50 % des besoins énergétiques nocturnes pour une température de consigne de 20 °C et 100 % pour une température de consigne de 16 °C.

A la lumière de ce résultat, les concepteurs de serres sont amenés à s'investir dans des systèmes de stockage à court terme (jour/nuit) et à long terme (été/hiver).

Actuellement, le problème du chauffage des serres n'est pas d'ordre technique du fait qu'il est très bien maîtrisé, mais les difficultés rencontrées sont d'ordre économique vu le coût considérable à immobiliser dans cette énergie de chauffage.

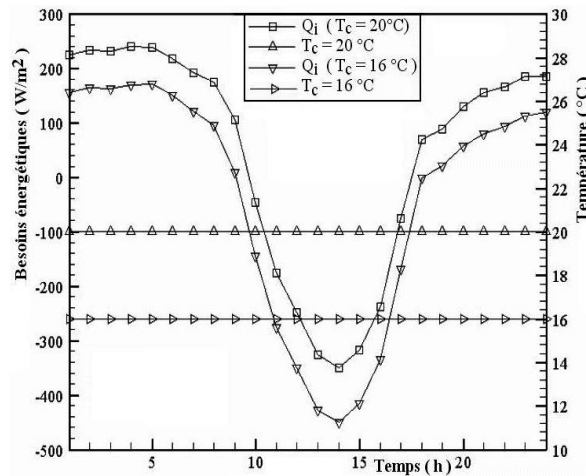


Fig. 6: Estimation horaire des besoins énergétiques de la serre pour une journée typique d'hiver (Tc = 16 °C, 20 °C)

Dans cette perspective, plusieurs solutions ont été adoptées par plusieurs auteurs portant sur la conception de systèmes de stockage passifs.

Les travaux de Ghosal *et al.* [18] ont pu améliorer le stockage thermique dans le sol au moyen d'un échangeur air/sol enterré dans le sol de la serre. Dans la même optique, Kumari *et al.* [19] ont introduit des matériaux à changement de phase dans les murs de la serre pour améliorer le stockage thermique pour une utilisation au besoin.

3.3 Estimation des pertes à travers la couverture

La figure 7 présente l'évolution nocturne de la température intérieure et les pertes globales à travers la couverture en utilisant une simple et double paroi. Le système de chauffage utilisé délivre 200 W/m^2 à la serre et maintient la température intérieure pour une serre à simple paroi entre 18°C et 23°C lorsque la température extérieure varie de 6°C à 12°C , alors que pour une double paroi la température intérieure varie entre 23°C et 29°C pour la même température extérieure.

En effet, cette augmentation de température est justifiée par la diminution des pertes globales à travers la couverture qui passent d'une moyenne de 184 W/m^2 pour une simple paroi à 174 W/m^2 pour une double paroi, ce qui démontre clairement une meilleure efficacité du chauffage avec une double paroi.

De ce qui précède, on conclut que plus de 85 % de la quantité d'énergie délivrée à la serre est perdue à travers la couverture, A cet effet, la couverture est considérée la principale voie de dissipation énergétique pour l'air intérieur de la serre.

Ce résultat est similaire à celui rapporté dans l'étude expérimentale effectuée par Baille *et al.* [1].

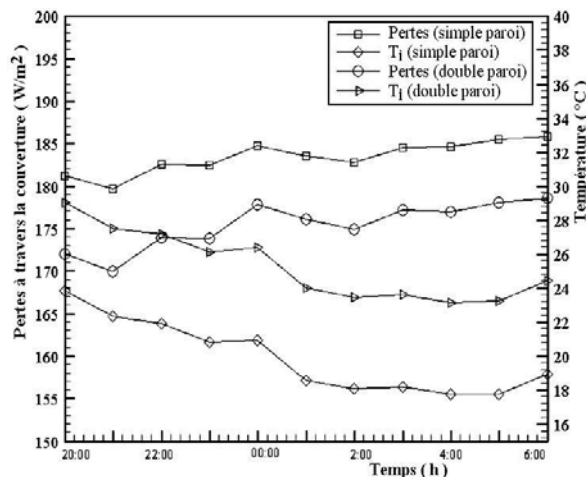


Fig. 7: Evolution nocturne des pertes globales à travers la couverture de la serre pour une consigne de chauffage de 200 W/m^2

L'échange thermique à travers la couverture est fonction de la nature du matériau de la couverture, de la vitesse du vent extérieur et de la forme de la serre. Ces différents paramètres agissent en fonction de la nature du système de chauffage utilisé surtout pour les systèmes de chauffage convectif comme les aérothermes où l'échange est généralement élevé, Garzoli *et al.* [20].

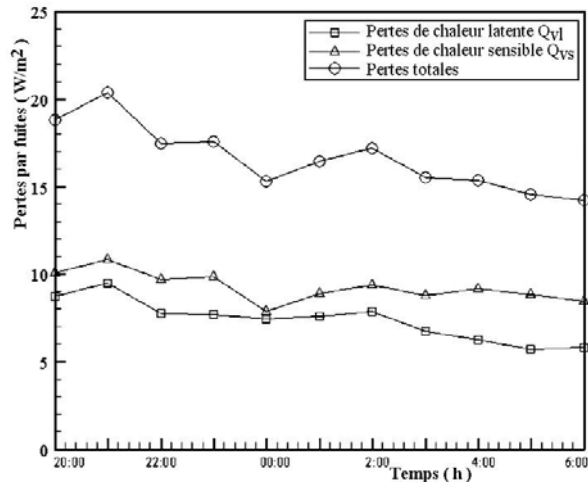


Fig. 8: Evolution nocturne des pertes par fuites pour une consigne de chauffage de $200W/m^2$

3.4 Estimation des pertes par fuite

Pour une nuit de la décade typique de janvier, qualifié de calme ($V < 2$ m/s), les pertes totales par fuite varient entre $14 W/m^2$ et $20 W/m^2$ (Fig. 8) avec des proportions de 43 % pour les fuites de chaleur latentes et 57 % pour les fuites de chaleur sensibles.

En effet, des résultats similaires ont été trouvés expérimentalement (60 % et 40 %) par Baille *et al.* [1] pour une serre en plastique sous le climat méditerranéen. Les pertes par fuites d'air sont bien sur fonction de l'état de l'étanchéité de la serre et de la vitesse du vent extérieur et représentent pour une nuit calme de janvier à Marrakech environ 9 % de l'ensemble des pertes totales de la serre.

Baille *et al.* [1], dans leur étude expérimentale, ont trouvé que ce rapport peut atteindre 35 % pour des vitesses de vent extérieur élevées ($V > 4$ m/s).

3.5 Histogramme des besoins en chauffage des serres sous le climat de Marrakech

En se basant sur les décades typiques du climat de Marrakech [8], une simulation dynamique des besoins en énergie de chauffage mensuelle à dépenser par mètre carré de sol de serre, sur une période hivernale (Novembre - Avril) a été effectuée.

Le but est de garantir une température de consigne à l'intérieur de la serre de $20^\circ C$ et $16^\circ C$ dans le cas d'une serre à paroi simple (barres grises) et une autre serre à paroi double (barres noirs).

Les résultats de la figure 9 montrent d'une part que le besoin en chauffage est une fonction croissante de la température de consigne. D'autre part, pour une température de consigne de $20^\circ C$ et en passant du mois de Novembre au mois de Janvier, le besoin énergétique augmente de $60.10 kW/m^2$ à $80.8 kW/m^2$ pour une simple paroi et de $40.86 kW/m^2$ à $54.95 kW/m^2$ pour une double paroi.

En passant du mois de Janvier au mois d'Avril, le besoin en chauffage décroît de $80.8 kW/m^2$ à $45.5 kW/m^2$ pour une simple paroi et de $54.95 kW/m^2$ à $30.94 kW/m^2$ pour une double paroi. Les mois de Décembre, Janvier et Février constituent la période où le besoin en chauffage est nettement le plus élevé, avec une valeur moyenne de 72.13

kW/m^2 pour une simple paroi et de 49.05 kW/m^2 pour une double paroi. L'énergie prévisionnelle à consommer dans ces trois mois constitue 57 % de l'énergie globale à consommer annuellement.

Ainsi sous le climat de Marrakech, le besoin en chauffage est jugé essentiel dans la période d'hiver (Décembre – Janvier – Février), il est aussi nécessaire durant la deuxième moitié de l'Automne et la première moitié du printemps.

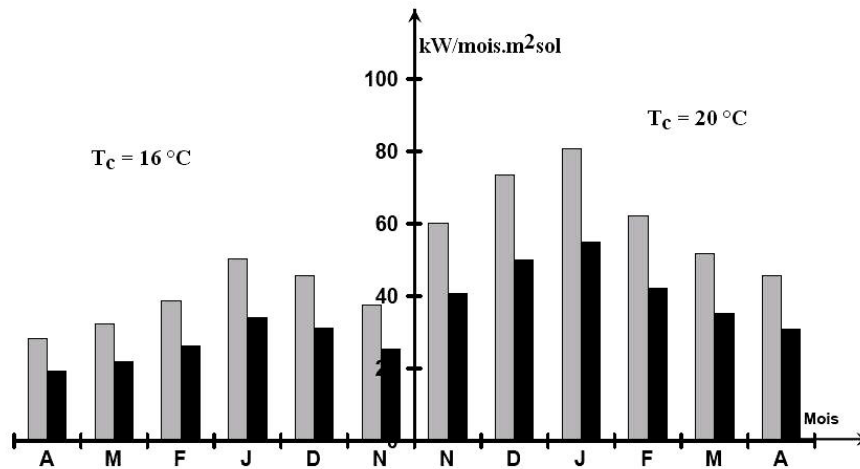


Fig. 9: Apport énergétique de chauffage des serres à Marrakech

L'analyse de la figure 9 montre aussi que la nature de la couverture (simple ou double) influe considérablement sur la consommation énergétique. En effet, pour une température de consigne de 20 °C , la consommation annuelle prévisionnelle est de 373.6 kW/m^2 et 254.03 kW/m^2 pour une serre à simple et double paroi respectivement.

Ainsi, l'utilisation d'une double paroi permet de garantir une économie d'énergie de chauffage de 32 %, ce qui permet une meilleure efficacité du chauffage avec une serre à double couverture.

Ces résultats sont recommandés par les serristes pour faire une bonne optimisation de la rentabilité annuelle de la serre grâce à la bonne gestion du calendrier cultural.

4. CONCLUSION

Lors de cette étude, nous avons présenté un modèle du bilan énergétique d'une serre agricole basé sur un ensemble d'équations théoriques intégrant les processus d'échanges thermiques entre les différentes composantes de la serre en tenant compte du couvert végétale. Les données climatiques utilisées sont celles de Marrakech ce qui permet d'améliorer l'analyse thermique des serres dans cette région.

Vu que le modèle estime les besoins énergétiques de la serre, il pourra donc contribuer dans le choix et le dimensionnement des systèmes de chauffage et de refroidissement. Ce modèle peut suggérer également des modifications des calendriers culturaux voire même limiter les dépenses énergétiques. Il permet également aux concepteurs de serre et conseillers agricoles de définir des stratégies de contrôle et de régulation du climat de la serre.

Dans le but d'obtenir une évaluation des besoins en chauffage des serres à l'échelle régionale de Marrakech sur une base de temps adéquate (période hivernale), une simulation dynamique a été réalisée pour mieux gérer les apports énergétiques et les calendriers cultureux de la zone.

Dans le même cadre, une quantification des différentes composantes des pertes thermiques à travers la structure d'une serre en plastique pour un débit d'énergie de chauffage donné a été conduite.

Il a été démontré que pour minimiser les dépenses énergétiques, des mesures doivent être prises comme l'utilisation d'une double couverture en plastique, l'amélioration de l'étanchéité de la serre et l'installation d'un système de stockage d'énergie diurne pour une éventuelle restitution nocturne, spécialement dans le contexte climatique de Marrakech, qui reçoit même durant les périodes d'hiver des radiations solaires considérables.

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été conduit avec le soutien financier du CNRST dans le cadre du Programme URAC, convention **URAC28**.

NOMENCLATURE

I_i : Radiation solaire totale incidente, face et couverture, serre, W/m^2	NR : Couverture nord, m^2
I_b : Radiation directe sur une surface horizontale, W/m^2	SR : Couverture sud, m^2
R_b : Facteur d'inclinaison pour le rayonnement direct	I_d : Radiation diffuse sur une surface horizontale, W/m^2
R_r : Facteur d'inclinaison pour le rayonnement réfléchi	R_d : Facteur d'inclinaison pour le rayonnement diffus
T_i : Température de l'air intérieur de la serre, $^{\circ}C$	K_v : Coefficient de transfert thermique par renouvellement d'air, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
T_p : Température des plantes, $^{\circ}C$	T_a : Température de l'air extérieur de la serre, $^{\circ}C$
e_i : Pression de vapeur d'eau intérieur de la serre, kPa	V : Volume de la serre, m^3
A_s : Surface - sol de la serre, m^2	a_e : Pression de vapeur d'eau extérieur de la serre, kPa
C_a : Chaleur spécifique de l'air, J/K	A_c : Surface - couverture de la serre, m^2
V_a : Vitesse du vent extérieur, m/s	L_{ai} : Indice foliaire des plantes
Symboles grecs	V_i : Vitesse du vent intérieur, m/s
γ : Constante psychrométrique, (≈ 0.0667 kPa/K)	ρ : Densité de l'air, kg/m^3
	σ : Constante de Boltzman, (5.67×10^{-8} $W/m^2 \cdot K^4$)

ε_p : Coefficient d'émission des radiations thermiques des plantes	σ_p : Coefficient d'absorption des radiations solaires des plantes
ε_c : Coefficient d'émission des radiations thermiques de la couverture	τ : Coefficient de transmission des radiations solaires de la couverture
r : Coefficient de réflexion - sol (≈ 0.2)	

REFERENCES

- [1] A. Baille, J.C. Lopez, S. Bonachela, M.M. Gonzalez-Real and J.I. Montero, 'Night Energy Balance in a Heated Low-Cost Plastic Greenhouse', Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 137, N°1-2, pp. 107 – 118, 2006.
- [2] O. Jolliet, 'Modélisation du Comportement Thermique d'une Serre Horticole', Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 247 p., 1988.
- [3] C. Monteil, G. Issanchou and M. Amouroux, 'Modèle Energétique de la Serre Agricole', Journal de Physique III, Vol. 1, N°3, pp. 429 - 454, 1991.
- [4] T. Boulard et A. Baille, 'A Simple Greenhouse Climate Model Incorporating Effects of Aeration and Evaporative Cooling', Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 65, N°3-4, pp. 145 – 157, 1993.
- [5] C. Stanghellini, 'Transpiration of Greenhouse Crops: An Aid to Climate Management', Wageningen Agricultural University, Netherlands. Theorology, Vol. 138, pp. 203-215, 1987.
- [6] T. Boulard and S. Wang, 'Greenhouse Crop Transpiration Simulation From External Climate Conditions', Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 100, N°1, pp. 25 – 34, 2000.
- [7] M. Fuchs, E. Dayan and E. Presnov, 'Evaporative Cooling of a Ventilated Greenhouse Rose Crop', Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 138, N°1-4, pp. 203 – 215, 2006.
- [8] C. Ouardi, 'Contribution à l'étude du Comportement Thermique d'un Habitat dans le Climat de Marrakech', Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia-Marrakech, 1997.
- [9] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, 'The interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation', Solar Energy, Vol. 4, N°3, pp. 1 – 9, 1960.
- [10] H. Fatnassi, T. Boulard and J. Largier, 'Simple Indirect Estimation of Ventilation and Crop Transpiration Rates in a Greenhouse', Biosystems Engineering, Vol. 88, N°4, pp. 467 - 478, 2004.
- [11] O. Tetens, 'Ueber Einige Meteorologische Begriffe', Z. Geophys, Vol. 6, pp. 297 - 309, 1930.
- [12] T. Boulard, M. Mermier, J. Fargues, N. Smits, M. Rougier and J.C. Roy, 'Tomato Leaf Boundary Layer Climate: Implication for Microbiological Whiteflies Control in Greenhouse', Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 110, N°3, pp. 159 - 176, 2002.
- [13] T. Boulard, A. Baille, M. Mermier et F. Villette, 'Mesure et Modélisation de la Résistance Stomatique Foliaire et de la Transpiration d'un Couvert de Tomates de Serre', Journal d'Agronomie, Vol. 11, pp. 259 - 274, 1991.
- [14] V.P. Sethi and S.K. Sharma, 'Thermal Modeling of a Greenhouse Integrated to an Aquifer Coupled Cavity Flow Heat Exchanger System', Solar Energy, Vol. 81, N°6, pp. 723 – 741, 2007.

- [15] J. Dayan, E. Dayan, Y. Strassberg and E. Presnov, '*Simulation and Control of Ventilation Rates in Greenhouses*', Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 65, N°1-2, pp. 3 – 17, 2004.
- [16] G. Papadakis, A. Frangoudadis and S. Kyritas, '*Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Transfer Between a Tomato Crop and Greenhouse Environment*', Journal of Agricultural Engineering Research, Vol 57, pp. 212 - 227, 1993.
- [17] B. Draoui, T. Boulard, F. Neirac et A. Baille, '*Modèle de Bilan Hydrique d'une Serre Horticole, Application à l'Identification*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3, pp. 173 – 185, 2006.
- [18] M.K. Ghosal, G.N. Tiwari and N. Srivastava, '*Thermal Modelling of a Greenhouse with an Integrated Earth to Air Heat Exchanger: An Experimental Validation*', Energy and Buildings, Vol. 36, N°3, pp. 219 - 227, 2004.
- [19] N. Kumari, G.N. Tiwari and M.S. Sodha, '*Effect of Phase Change Material on Passive Thermal Heating of a Greenhouse*', International Journal of Energy Research, Vol. 30, N°4, pp. 221 - 236, 2006.
- [20] K.V. Garzoli and J. Blackwell, '*An Analysis of the Nocturnal Heat Loss from a Single Skin Plastic Greenhouse*', Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 26, N°3, pp. 203 – 214, 1981.