

Modèle de bilan énergétique d'une serre agricole sans couvert végétal

K. Mesmoudi^{1*}, A. Soudani² et L. Serir³

¹ Faculté des Sciences, Département d'Agronomie,
Université Hadj Lakhdar, Rue Chahid M. El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

² Faculté des Sciences, Département de Physique,
Université Hadj Lakhdar, Rue Chahid M. El Hadi Boukhrouf, Batna, Algérie

³ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables 'URAER'
B.P. 88, ZI Gart Taam, Ghardaïa, Algérie

(reçu le 23 Décembre 2007 – accepté le 30 Mars 2008)

Résumé - Dans cet article, nous présentons un modèle de bilan énergétique d'une serre agricole à simple paroi et sans couvert végétal. Ce travail a pour rôle de compléter les diverses approches théoriques sur le bilan thermique des serres par un modèle basé sur l'ensemble des équations théoriques qui intègrent les processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur et le sol, à savoir: conduction, convection, évaporation, condensation, rayonnements solaires et de grande longueur d'onde. Le modèle diffère des autres approches par les particularités suivantes: (i) il effectue une analyse globale des bilans thermiques échangés entre les composants de la serre avec une analyse des échanges infrarouges, (ii) le calcul des différents flux du bilan de la serre repose sur des données réelles (mesures de température et d'humidité), (iii) le modèle tient compte des conditions météorologiques instantanées du lieu de la serre. Ce modèle peut aisément déterminer et quantifier l'équilibre énergétique quotidien de la serre en mettant en évidence les apports et les pertes. Sous les conditions de trois journées types d'expérimentation, le modèle a pu représenter les phénomènes suivants: (i) l'augmentation de la durée d'ensoleillement corrélée à une baisse de nébulosité du ciel, influence largement le bilan global de la serre par une grande captation solaire durant la journée et fait augmenter nettement les pertes notamment infrarouge, (ii) la décroissance de la température extérieure influe sur les besoins thermiques de la serre et le stockage thermique dans le sol, (iii) l'augmentation de la vitesse du vent modifie le bilan global journalier, en provoquant une augmentation des pertes par fuites d'air.

Abstract - In this article, we present a model of energy balance of a greenhouse at simple wall and without vegetable cover. This work has as a role to supplement the various theoretical approaches on the heat balance of the greenhouses by a model based on the whole of the theoretical equations which integrate the processes of heat exchange between the cover, the interior air and the ground, has to know: solar conduction, convection, evaporation, condensation, radiations and big wavelength. The model differs from the other approaches by the following characteristics: (i) it makes an analysis total of the heat balances exchanged between the components of the greenhouse with an analysis of the infra-red exchanges, (ii) the calculation of various flows of the assessment of the greenhouse rests on real data (moisture and temperature measurements), (iii) the model takes account of the instantaneous weather conditions of the place of the greenhouse. This model can easily determine and quantify the daily energy balance of the greenhouse by highlighting the contributions and the losses. Under the three days standard conditions of experimentation, the model could represent the following phenomena: (i) the increase in the duration of sunning correlated with a fall of nebulosity of the sky largely influences the total assessment of the greenhouse by a great solar collecting during the day and makes clearly increase the losses (in particular infra-red), (ii) the decrease of the outside temperature influences the thermal needs for the greenhouse, and thermal storage in the ground, (iii) the increase the speed of the wind modifies the daily total assessment, by causing an increase in the losses by escapes of air.

Mots clés: Serre - Microclimat - Modèle de bilan énergétique.

* mesmoudi.kamel@caramail.com

1. INTRODUCTION

Les augmentations successives du coût de l'énergie, ont amené les scientifiques de tous les pays où se pratiquent des cultures abritées à se pencher sur les problèmes énergétiques posés par les serres. Même si le climat de l'Algérie lui permet de se présenter sur les marchés avec une certaine précocité, par rapport à bon nombre de ses voisins méditerranéens, il a paru intéressant de présenter un modèle de bilan énergétique semi empirique facilement manipulable par les techniciens et les conseillers agricoles. La surveillance sur place du microclimat peut fournir des données les plus utiles, mais en raison du coût élevés et la sophistication de l'appareillage de mesure, la plupart des cultivateurs sont peu disposés à surveiller les éléments eux-mêmes. Comme alternative, les évaluations du microclimat doivent être réalisées par un modèle de bilan énergétique simple utilisant des données facilement mesurables.

Récemment la recherche spécialisée fait état d'un grand nombre de travaux de modélisation destinés à appréhender les phénomènes énergétiques qui régissent le climat intérieur des serres agricoles. L'évolution de ces modèles a été rapide, poussés à la fois par le développement des nouveaux moyens informatiques et par une conjoncture de la maîtrise des phénomènes énergétiques de la serre dans chaque région du monde, devenant fondamentale pour un développement optimum des cultures abritées. On peut citer un certain nombre de travaux dans lesquels le bilan énergétique de la serre a été particulièrement étudié [1-4]. La majorité des auteurs ont réalisé des modèles dynamiques des bilans échangés afin de simuler le bilan énergétique des abris serres. Quoique la plupart de ces modèles aient produit des évaluations raisonnables, très peu d'entre eux ont été employés dans la pratique pour les prévisions du microclimat de la serre sur une longue période continue.

L'objectif scientifique de notre travail est l'introduction de l'analyse du bilan énergétique des serres en Algérie et de compléter les diverses approches théoriques dans le domaine par un modèle simple inspiré des modèles classiques proposés dans la littérature [1, 2, 6, 9].

Ce modèle est basé sur des équations théoriques qui intègrent l'ensemble des processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur et le sol. Les particularités de ce modèle sont les suivantes: (i) il effectue une analyse globale des différents bilans thermiques échangés avec une analyse des échanges infrarouges de grande longueur d'onde, (ii) il se base essentiellement sur des données réelles facilement mesurables dans la serre et son environnement, (iii) il est capable de représenter le phénomène d'inertie thermique du sol.

L'expérimentation réalisée dans ce travail avait pour but de tester le modèle avec l'élaboration du bilan énergétique d'une serre mono chapelle en verre de type Venlo sans couvert végétal dans la région des hauts plateaux Est d'Algérie, une zone caractérisée par un climat semi aride.

2. PROCEDURE

2.1 Description du modèle

Le modèle est constitué de trois composantes essentielles: la couverture en verre (C) à simples parois, l'air intérieur (A_i) et le sol abrité (S). Chacun de ces éléments est caractérisé par sa variable d'état: la température $T(x)$ supposée uniforme le long de sa surface, pour la couverture et le sol abrité. L'air intérieur (A_i) est caractérisé en plus par son humidité absolue (EA_i), supposée uniforme à son tour pour tout le volume de la serre. A cet effet, deux bilans sont formulés, pour l'air intérieur: l'équation (2) tient compte du terme d'inertie (qA_i) lié à la capacité calorifique de l'air et l'équation (3) faisant intervenir le terme (qE) qui représente le terme d'inertie lié à la variation de la masse de vapeur d'eau.

Seul composant à grande capacité thermique, le sol de la serre, il joue un important rôle dans le bilan énergétique global de la serre non chauffée. Pour mieux appréhender ce rôle dans le calcul du bilan énergétique, nous avons opté à l'introduction du paramètre inertiel (qS) dans

l'équation (4). Ce dernier représente l'énergie stockée par le sol de la serre, qui est équivalent en valeur absolue à l'énergie restituée pendant la nuit.

La figure 1 schématise l'ensemble des flux thermiques échangés entre la serre et son environnement. A partir de cette dernière, on peut écrire les bilans des flux thermiques pour chacune des composantes.

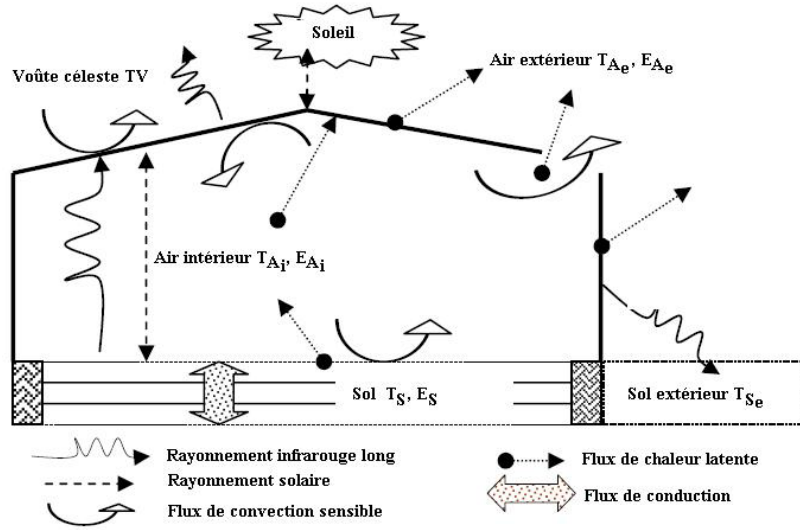


Fig. 1: Schéma des flux échangés

- Bilan sur la couverture

$$-Q_{CA_e}^C + Q_{A_iC}^C + Q_{A_eC}^L + Q_C^S + Q_C^I = 0 \quad (1)$$

avec $-Q_{CA_e}^C$ la puissance du flux de chaleur convectif échangée entre la face extérieure de la couverture et l'air extérieur, $Q_{A_iC}^C$ la puissance du flux de chaleur convective entre l'air intérieur et la face intérieure de la couverture, $Q_{A_eC}^L$ la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau sur la paroi intérieure de la couverture, Q_C^S le bilan solaire net de la couverture et Q_C^I le bilan infrarouge net de la couverture.

- Bilan sur l'air intérieur

$$Q_{SA_i}^C - Q_{A_iC}^C - Q_{A_iA_e}^C = qA_i \quad (2)$$

$$Q_{SA_i}^L - Q_{A_iC}^L - Q_{A_iA_e}^L = qE \quad (3)$$

où $Q_{SA_i}^C$ est la chaleur sensible échangée entre la surface du sol abrité et l'air intérieur de la serre, $Q_{A_iA_e}^C$ la chaleur sensible échangée entre l'air intérieur et l'air extérieur de la serre par ventilation ou par fuite d'air à travers la structure de la serre. La chaleur latente de vaporisation de la surface du sol est donnée par $Q_{SA_i}^L$, la chaleur latente de la vapeur échangée entre l'intérieur et l'extérieur est donnée par $Q_{A_iA_e}^L$.

- Bilan sur le sol

$$Q_S^S + Q_S^L - Q_{SA_i}^C - Q_{SA_i}^L - Q_S^D = qS \quad (4)$$

où Q_S^S est la puissance du flux solaire net absorbé par la surface du sol, Q_S^L étant la puissance du bilan infrarouge net de la surface du sol de la serre. La puissance du flux de chaleur de conduction à travers la couche du sol d'épaisseur $E = 40$ cm, est représentée par Q_S^D . Les expressions des différentes puissances de flux de chaleurs citées précédemment dans les relations (1) à (4) sont présentées en Annexe.

Dans plusieurs travaux, le coefficient d'échange convectif extérieur h_e entre la couverture de la serre et l'air extérieur est une fonction linéaire de la vitesse du vent U_e , avec des constantes qui varient d'un auteur à un autre. Dans ce travail, nous avons pris l'expression évoquée par [5].

$$h_e = 7.5 + 3.88 U_e \quad \text{si } U_e \leq 7.72 \text{ m/s} \approx 30 \text{ km/h} \quad (5)$$

Le coefficient d'échange convectif h_i à l'intérieur de la serre est liée à la vitesse moyenne de déplacement de l'air intérieur U_i , à la température de la surface sol abrité T_S et à la température de l'air intérieur T_{A_i} . Il est déterminé à partir de la relation (6) proposée dans [4].

$$h_i = 1.52 \left(T_S - T_{A_i} \right)^{1/3} + 3 \cdot U_i^{1/2} \quad (6)$$

Le cas de l'évaporation du sol est traité comme celui des plantes, c'est-à-dire le coefficient de résistance à la diffusion r_s est pris constant, d'après [1]. Il est égal à 120 s/m. Le coefficient de transfert hydrique k se déduit du coefficient d'échange convective intérieur h_i par les deux relations de Lewis proposées par [5], soit dans le cas d'une condensation par la relation (8), soit dans le cas d'une évaporation par la relation (9).

$$k = h_i / C_m \quad (7)$$

$$k = \left(h_i / C_m \right) \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{r_s \cdot h_i}{\rho C_m} \right]} \quad (8)$$

Les bilans infrarouges nets de la couverture et du sol Q_C^I et Q_S^I sont exprimés par les relations (9) d'après [9] et (10) d'après [8].

$$Q_C^I = -\varepsilon_C S_C \sigma T_C^4 + \varepsilon_{sky} S_C \sigma T_{sky}^4 \alpha_{Ct} + \varepsilon_S S_S \sigma T_S^4 \alpha_{Ct} - \varepsilon_C S_C \sigma T_C^4 (1 - f_{CC} \alpha_{Ct}) \quad (9)$$

$$Q_S^I = -\varepsilon_S S_S \sigma T_S^4 + \varepsilon_C S_C \sigma T_C^4 f_{CS} \alpha_{St} \quad (10)$$

où ε_C , ε_{sky} et ε_S sont les émissivités respectives de la couverture de la serre, du ciel, et du sol abrité; et T_C , T_{sky} et T_S sont leurs températures respectives. S_C et S_S sont les surfaces de la couverture et du sol de la serre.

La plupart des modèles rencontrés dans la littérature supposent que les deux faces de la couverture sont à la même température, du fait de la faible épaisseur de la couverture. Il a été vérifié expérimentalement cette hypothèse, la variation dans tous les cas ne dépasse pas 0,6 °C dans la région des Aurès (Hauts Plateaux Est d'Algérie). Pour ce cas, il a été considéré une valeur moyenne entre la température extérieure et la température intérieure du vitrage.

La constante de Stefan-Boltzmann, symbolisée par σ , est égale à $5,57 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-4}$. La température du ciel T_{sky} est calculée à partir, de la relation (11), (Formule de Swinbank), proposée dans [3].

$$T_{\text{sky}} = \left(T_{A_e} - 6 \right) \frac{N}{8} + 0.055 T_{A_e}^{1.5} \left(1 - \frac{N}{8} \right) \quad (11)$$

avec T_{A_e} la température de l'air extérieur à la serre et N la nébulosité du ciel. Les paramètres f_{CC} et f_{CS} symbolisent respectivement les facteurs de formes entre 'couverture-couverture' et 'couverture-sol'.

Le bilan thermique global de la serre, durant chaque pas de temps, se formule algébriquement à partir des équations (1), (2), (3) et (4) comme suit:

$$Q_{\text{tot}}^S + Q_{\text{tot}}^I = Q_{CA_e} - Q_{\text{fuite}} = Q_{\text{bilan}} \quad (12)$$

La quantité Q_{bilan} représente le bilan global instantané de la serre, que l'on peut considéré comme étant une approximation des besoins thermiques de la serre. Cette quantité permet d'assurer une plage de température que l'on fixe, en fonction des contraintes agronomiques de la culture, et elle peut être considéré également comme une approximation des besoins thermiques de la serre. Q_{tot}^S représente le flux de rayonnement solaire global capté par les éléments de la serre, et Q_{tot}^I correspond au bilan net des rayonnements infrarouges de grandes longueurs d'ondes absorbés par la serre. En pratique, il est toujours négatif et représente en valeur absolue, les pertes radiatives de la serre. Q_{CA_e} représente le bilan des pertes convectives de la serre, et Q_{fuite} le bilan des pertes sensibles dû à la ventilation ou aux fuites à travers la structure de la serre.

2.2 Installation expérimentale et mesures

Les mesures ont été effectuées dans une serre de production de 32 m^2 de surface, située sur un terrain d'expérimentation du département d'agronomie de l'Université de Batna. La région est située, sur les hauts plateaux du Nord-Est algérien, à 6.11° de longitude Est, et 35.33° de latitude Nord à une altitude de 1040 m.

La serre a une forme de serre d'horticulture d'une hauteur 3.10 m sous faîtage et 2.70 m sous chéneau, de longueur $L_0 = 8 \text{ m}$ et de largeur $l = 4 \text{ m}$. Ce qui conduit à un volume de $V = 103.04 \text{ m}^3$.

La couverture de la serre est constituée de verre ordinaire de 5 mm d'épaisseur. Les propriétés spectrales moyennes de ce type de couverture sont retenues à partir des abaques du fabricant (ENAVA Algérie) et sont rapportées sur le **tableau 1**. Les propriétés des sols extérieur et intérieur, considérés à humidité moyenne sont aussi rapportées sur le même tableau. Les mesures ont été effectuées, à chaque 60 minutes, pendant 24 heures, pour chaque journée type.

La figure 2 présente en détail le positionnement des points de mesures. La température et l'humidité pour chaque point de mesure sont mesurées par un système de mesure à distance (OACTON Logger Plus; Wireless transmistting system). Ce dernier est composé de dix capteurs (hygro-thermomètres), de dix émetteurs sans fil et d'un collecteur de signaux, le tout connecté directement au PC à l'aide d'un câble USB. La lecture, le stockage et le traitement des données sont réalisés sur PC à l'aide du logiciel de traitement (OACTON Log).

Les grandeurs climatiques extérieures (température, humidité, vitesse du vent et rayonnement solaire global) sont mesurées à une distance de 200 m au Nord de la serre, par la station météorologique 'Aurès-Solar' du laboratoire d'études des systèmes énergétiques industriels (LESEI) de l'Université de Batna. Le **tableau 2** résume les valeurs moyennes de ces grandeurs durant l'expérimentation pour les trois journées types de mesures choisies.

Tableau 1: Caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composantes de la serre

	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	C_m (J/kgK)	Eclairage Visible	Eclairage Infrarouge long
Sol	1620	13.21	1480	$r_s=0.25$ $\alpha_s=0.75$ $\tau_s=0$	$\varepsilon_{St}=0.9$ $r_{St}=0.2$ $\alpha_{St}=0.8$ $\tau_{St}=0$
Air	1.161	223.02	1007.26	-	-
Verre	840	0.85	2700	$r_C=0.1$ $\alpha_C=0.15$ $\tau_C=0.75$	$r_{Ct}=0.1$ $\alpha_{Ct}=0.9$ $\varepsilon_{Ct}=0.93$ $\tau_{Ct}=0$

Tableau 2: Conditions climatique extérieur moyennes pour chaque journée-type

Journées types	T_{A_e} (°C) T_{A_i} (°C)	Humidité E_{A_e} (%)	Eclairage Solaire global E_g (W/m ²)	Durée d'insolation (h)	$U_{e\text{ moy}}$ (m/s)
1^{er} jour 16/11/06	6 – 24.33 4 – 40	52.08	610.77	7 h 11 mn	1.3
2^{eme} jour 21/01/07	4.6 – 13.5 7.5 - 26	63.5	466.33	2 h 14 mn	3.2
3^{eme} jour 25/02/07	4 – 15.67 4 – 20.33	67.83	150.74	20 mn	1.8

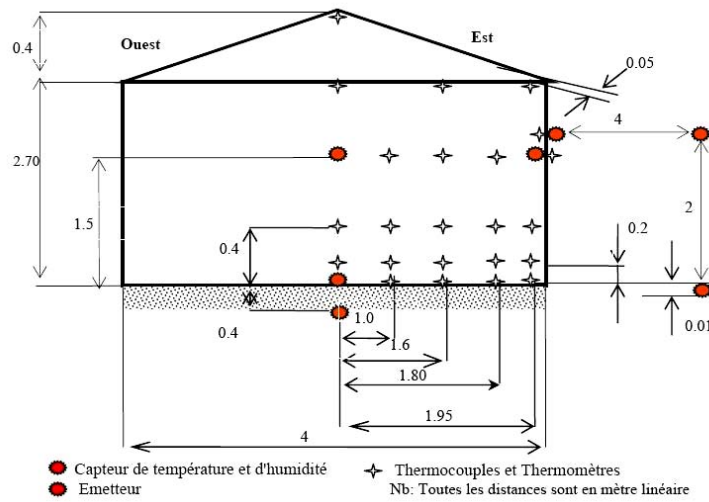


Fig. 2: Schéma de la serre et positionnement des points de mesures

3. ANALYSES

Après mesures, les graphes des figures 3, 4 et 5 montrent les variations de l'éclairement solaire global sur un plan horizontal E_{gh} , des températures de l'air intérieur T_{A_i} et du sol T_S et celles du bilan global de la serre Q_{bilan} pour les trois journées types choisies. On remarque une nette proportionnalité des variations des deux températures par rapport à l'éclairement solaire E_{gh} et par rapport au bilan global Q_{bilan} . Sur les mêmes figures, on remarque une faible variation de la température T_S à cause de l'inertie thermique du sol. Quant à l'intensité des températures et de l'éclairement E_{gh} sont proportionnelles aux conditions climatiques moyennes enregistrées.

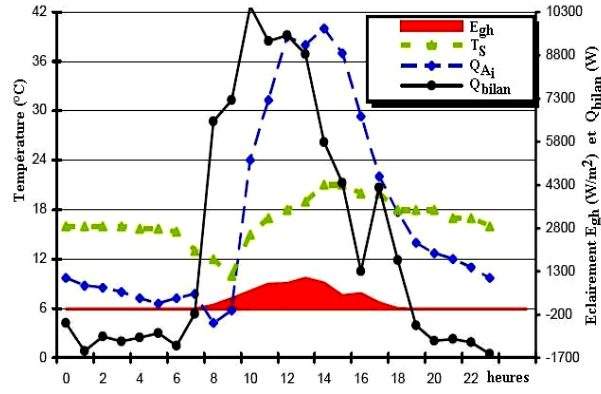


Fig. 3: Variation des températures T_{A_i} , T_S , de l'éclairement solaire E_{gh} et du bilan total de la serre Q_{bilan} (1^{er} jour type)

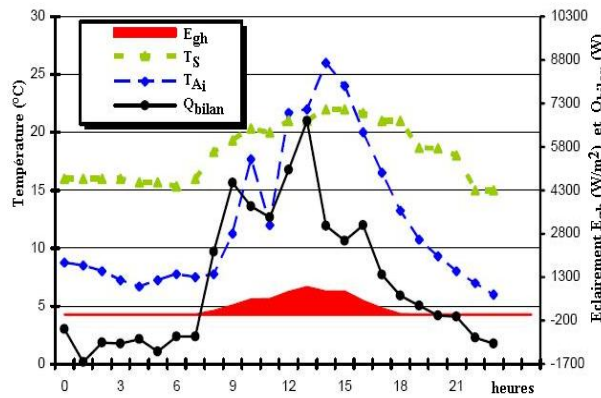


Fig. 4: Variation des températures T_{A_i} , T_S , de l'éclairement solaire E_{gh} et du bilan total de la serre Q_{bilan} (2^{ème} jour type)

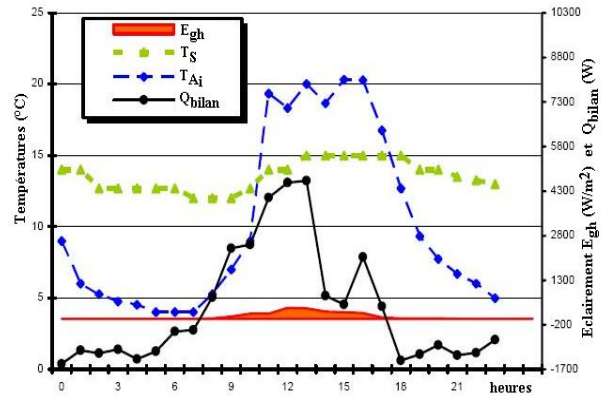


Fig. 5: Variation des températures T_{A_i} , T_S , de l'éclairement solaire E_{gh} et du bilan total de la serre Q_{bilan} (3^{ème} jour type)

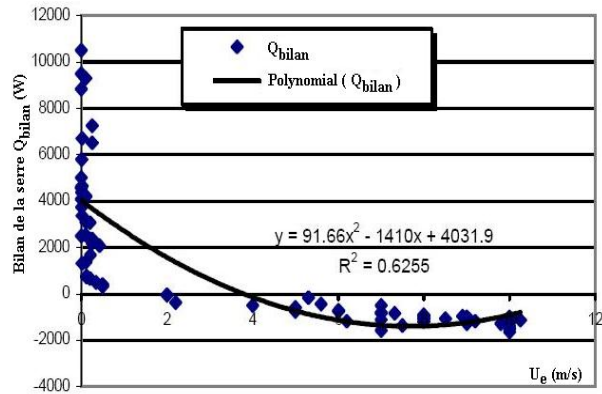


Fig. 6: Variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la vitesse du vent U_e pendant les trois jours types

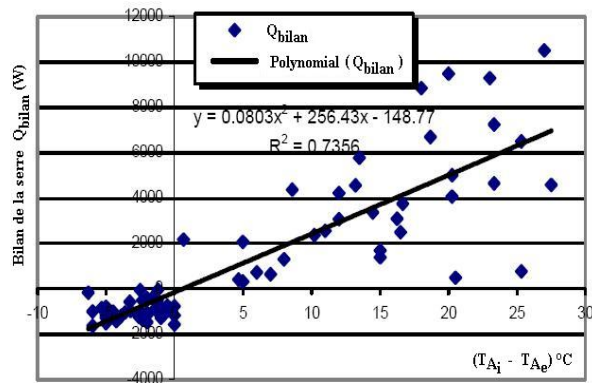


Fig. 7: Variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la différence de température $(T_{A_i} - T_{A_e})$ pendant les trois jours types

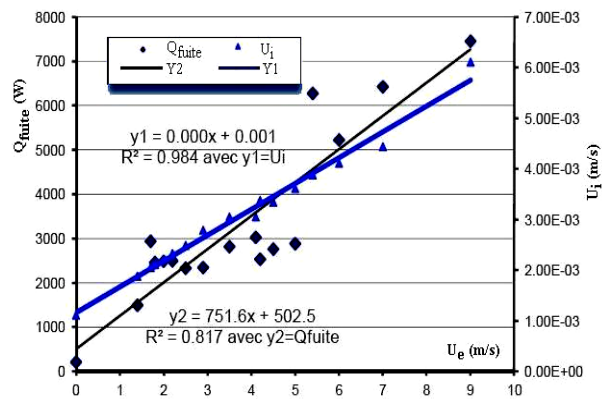


Fig. 8: Variation du bilan des fuites Q_{fuite} et de la vitesse intérieure U_i en fonction de la vitesse U_e (2^{ème} jour type)

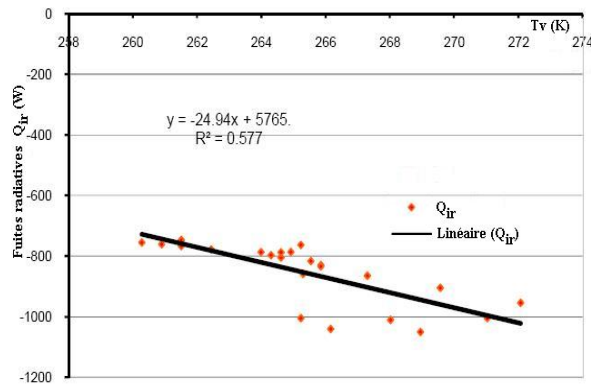


Fig. 9: Variation des pertes radiatives Q_{ir} en fonction de la température de la voûte céleste T_V (2^{ème} jour type)

Sur la figure 3, le bilan global Q_{bilan} atteint la valeur maximale de 10300 W qui équivaut à 321.87 W/m^2 à la surface du sol de la serre aux environs de midi, pour une température de l'air intérieur $T_{A_i}=40 \text{ °C}$ et une température extérieure $T_{A_e}=25 \text{ °C}$. Ce phénomène est dû essentiellement à la durée d'insolation de cette journée (7 h 14 mn) et à la faible vitesse du vent enregistrée ($U_{emoy}=1.3 \text{ m/s}$).

Sur la figure 4, sont représentées les variations des mêmes paramètres précédemment mentionnés, on remarque que le bilan Q_{bilan} , pour une journée ventée en présence d'averses identique à la 2^{ème} journée type ($U_{emoy}=3.2 \text{ m/s}$ et $EA_e = 63,23 \%$), ce dernier est relativement faible par rapport au bilan de la première journée type, avec un $Q_{bilan \text{ max}} = 7000 \text{ W}$ équivariant à 218.75 W/m^2 sur la surface du sol abrité, et une température de l'air intérieur T_{A_i} ne dépassant pas les 26 °C . La durée d'insolation relativement faible (2 h 14 mn), la vitesse du vent $U_{e \text{ max}}=9 \text{ m/s}$ et la présence d'averses pendant cette journée ont contribué directement à cette baisse relative du bilan global Q_{bilan} de la serre.

La figure 5 représente elle aussi les variations des températures T_{A_i} , T_S , de l'éclairement E_{gh} et du bilan global Q_{bilan} de la serre pour une journée couverte (3^{ème} jour type). La durée d'insolation n'était que de 20 minutes seulement. On peut remarquer aisément que le bilan énergétique Q_{bilan} calculé par notre modèle reflète bien l'état de la serre. Ce bilan énergétique est le plus faible par rapport aux bilans globaux des deux autres jours type, soit $Q_{bilan \text{ max}} = 4644 \text{ W}$ équivariant à 145.12 W/m^2 sur la surface du sol de la serre. Les températures T_{A_i} et T_S sont également basses pendant cette journée, ne dépassant pas 22 °C et 16 °C respectivement.

Les déperditions énergétiques globales sont aussi représentées sur les figures 3, 4 et 5. On remarque, que pour les deux premiers jours, les pertes de chaleur atteignent une valeur de 1700 W correspondant à 53.12 W/m^2 sur la surface du sol abrité. Ce phénomène est dû essentiellement aux pertes radiatives élevées durant les nuits des deux premières journées (1^{er} et 2^{ème} jour) à cause des faibles nébulosités enregistrées (ciel clair durant la nuit). Les déperditions pour la troisième journée type sont relativement faibles, elles sont de l'ordre de 46.87 W/m^2 à cause du ciel couvert durant la période de cette journée.

La figure 6 montre la variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la vitesse du vent U_e pour les trois jours types. Le modèle permet de suggérer les estimations du bilan énergétique de la serre en fonction de la vitesse du vent. La corrélation déduite sur plus de 75 essais est une équation polynomiale avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.6255$.

La figure 7 présente la variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la différence de température de l'air ($T_{A_i} - T_{A_e}$) pour les trois jours types. D'après la courbe obtenue, le modèle peut contribuer à l'estimation du bilan énergétique de la serre en fonction de la différence des températures intérieure et extérieure. La corrélation proposée sur environ 75 essais effectués est une équation polynomiale du second degré avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.7356$.

La variation de la vitesse moyenne de l'air intérieur U_i et des pertes de chaleur par fuites Q_{fuite} (renouvellement d'air par fuites) en fonction de la vitesse du vent U_e pour la journée la plus ventée (2^{ème} jour type) est montrée sur la figure 8. On constate une variation proportionnelle et significative entre U_i , Q_{fuite} et U_e avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.96$ pour U_i et un coefficient de détermination $R^2 = 0.81$ pour Q_{fuite} .

Quant à la figure 9, elle représente la variation des pertes radiatives Q_{ir} en fonction de la température du ciel pour le 2^{ème} jour type. On remarque que la décroissance de la température de la voûte céleste T_V provoque la croissance linéaire des pertes radiatives globales des composantes de la serre avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.57$.

4. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons réalisé un modèle de bilan énergétique simple, capable de représenter le comportement thermique de la serre. La mise en oeuvre de ce modèle a permis de formuler le bilan énergétique global journalier de la serre en mettant en évidence les apports thermiques naturels d'une part, et de préciser leurs évolutions d'autre part.

Ce modèle peut aisément déterminer et quantifier l'équilibre énergétique quotidien de la serre en tenant compte des apports et des pertes. D'après l'expérimentation réalisée sur une serre de production de 32 m² de surface située dans la région des hauts plateaux du Nord Est algérien, sur trois journées types choisies (**Tableau 2**), ce modèle a permis la connaissance des phénomènes suivants:

- L'augmentation de la durée d'ensoleillement corrélée à une baisse de nébulosité du ciel influence largement le bilan global de la serre par une grande captation solaire durant la journée et fait augmenter nettement les pertes (notamment infrarouges) du fait, du ciel dégagé, d'un état énergétique plus élevé de la serre et de la baisse de la température de voûte céleste.

- La décroissance de la température extérieure influe notablement sur les besoins thermiques de la serre.

- L'augmentation de la vitesse du vent modifie le bilan global journalier de la serre en provoquant une augmentation des pertes par fuites d'air consécutive à l'augmentation de la vitesse de l'air intérieur.

Cette analyse peut améliorer notamment la représentation du bilan thermique des serres dans les différentes régions d'Algérie et permettra de contribuer dans le dimensionnement de leurs systèmes de chauffage et d'en apprécier leurs emplacements.

Ce modèle peut suggérer également des modifications des calendriers cultureux dans les différentes régions d'Algérie, visant à limiter les dépenses énergétiques. Dans tous les cas, le modèle est susceptible de fournir une estimation des besoins de la culture abrités en matière (chauffage, ventilation), à partir du moment où ils sont correctement évalués les échanges de la serre avec son environnement.

NOMENCLATURE

C_m : Chaleur massique de l'air intérieur (J/kg.K)	Q : Puissance de chaleur (W)
E_g : Eclairement solaire global (W/m ²)	qA_i : Paramètre inertiel de l'air intérieur (W)
E_{gh} : Eclairement solaire global sur un plan horizontal (W/m ²)	qE : Paramètre inertiel de l'humidité de l'air intérieur (W)
e : Epaisseur de la couche du sol (m)	qS : Paramètre inertiel du sol intérieur (W)
EA_e : Humidité absolue de l'air extérieur (kg eau/kg air sec)	r_s : Coefficient de réflexion du sol au rayonnement solaire
EA_{es} : Humidité saturante de l'air extérieur (kg eau/kg air sec)	r_{st} : Coefficient de réflexion du sol aux rayonnements thermiques
E_S : Humidité de la surface du sol de la serre (kg eau/kg deterre)	r_c : Coefficient de réflexion de la couverture au rayonnement solaire
EA_i : Humidité absolue de l'air intérieur (kg eau/kg air sec)	r_{ct} : Coefficient de réflexion du sol aux rayonnements thermiques
EA_{is} : Humidité saturante de l'air intérieur (kg eau/kg air sec)	r : Coefficient de réflexion
f_{CS} : Facteur de forme couverture – sol	r_s : Coefficient de résistance à la diffusion du sol (s/m)
f_{SC} : Facteur de forme sol – couverture	S_C : Surface de couverture (m ²)
f_{CC} : Facteur de forme couverture – couverture	S_S : Surface du sol de la serre (m ²)
g : Accélération de la pesanteur (m/s ²)	T_C : Température extérieure de la couverture (K)
h_e : Coefficient d'échange convectif à l'extérieur de la serre (W/m ²)	T_{A_e} : Température de l'air extérieur (K)
h_i : Coefficient d'échange convectif à l'intérieur de la serre (W/m ²)	T_{A_i} : Température de l'air intérieur mesurée au milieu de la serre à 1.5 m de hauteur du sol
k : Coefficient de transfert hydrique du sol (kg/m ² s)	T_{sky} : Température du ciel (K)
L : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg)	U : Vitesse (m/s)
L_o : Longueur de la serre (m)	U_e : Vitesse du vent à l'extérieur (m/s)
l : Largeur de la serre (m)	V : volume de la serre (m ³)
N : Nébulosité du ciel (actas)	U_i : Vitesse moyenne de l'air intérieur (m/s)
\mathfrak{R} : Taux de renouvellement d'air (volume de serre/heure)	

Indices**Sous script**

0 : sous sol de la serre; 1 : surface du sol de la serre; A_i : air intérieur; A_e : air extérieur; Bilan : bilan total; C : couverture de la serre; i : intérieur; e : extérieur; fuite : fuite d'air à travers la structure de la serre; ir : pertes radiatives; total : total; S : sol de la serre; sky : ciel

Symboles grecs

ρ : Masse volumique (kg/m³)
 λ : Conductivité thermique du sol (W/m.°C)
 α_S : Coefficient d'absorption du sol au Rayonnement (Albédo)

Sur script

C : Flux de convection
D : Flux de conduction
L : Flux de chaleur latente
I : Flux de rayonnement thermique
S : Flux du rayonnement solaire
 ε_C : Emissivité de la couverture
 ε_S : Emissivité du sol
 τ_S : Coefficient de transmission du sol au rayonnement solaire

α_{St} : Coefficient d'absorption du sol aux Rayonnements thermiques	τ_C : Coefficient de transmission de la couverture au rayonnement solaire
α_C : Coefficient d'absorption de la couverture au rayonnement solaire	τ_{St} : Coefficient de transmission du sol aux rayonnements thermiques
α_{Ct} : Coefficient d'absorption du sol aux Rayonnements thermiques	τ_{Ct} : Coefficient de transmission de la couverture aux rayonnements thermiques
σ : Constante de Stefan Boltzmann = $5,57.10^{-8}$ (W/m ² K ⁻⁴)	

REFERENCES

- [1] B.A. Kimbal, 'Simulation of the Energy Balance of a Greenhouse', Journal of Agricultural Meteorology, Vol. 11, pp. 243 – 260, 1973.
- [2] C. Monteil, 'Contribution à l'Analyse Energétique des Serres Agricoles', Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Toulouse, 168 p., 1985.
- [3] O. Joliet, 'Modélisation du Comportement Thermique d'une Serre Horticole', Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 247 p., 1988.
- [4] G. Issanchou, 'Modèle Energétique de la Serre', Journal de physique III 1, pp 429 -454, 1991.
- [5] F. Meknassi, 'Identification et Commande d'une Serre Agricole', Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle, Perpignan, 1983.
- [6] A. Baille, 'Night Balance in a Heated Low-Cost Plastic Greenhouse', Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 137, pp. 107 – 118, 2006.
- [7] K. Mesmoudi, 'Etude de la Distribution de la Température de l'Air à l'Intérieur d'une Serre en Plastique Sans Couvert Végétal dans la Région des Aurès', CDRoom Proceedings ICRES07, Congrès International sur les Energies Renouvelables et le Développement Durable, Tlemcen, 21-24 Mai 2007.
- [8] C. Kittas, 'Détermination du Coefficient Global de Transmission de Chaleur à Travers les Parois d'une Serre', Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 69, pp. 205 – 221, 1994.
- [9] G. Singh, 'Formulation and Validation of Mathematical Model of Microclimate in a Greenhouse', Renewable Energy, Vol. 31, pp. 1541 – 1560, 2006.
- [10] C. Wacquant, 'La Construction des Serres et Abris', Edition Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Septembre 2000.
- [11] C. Kittas, 'Regional Monthly Estimation of Greenhouse Energy Consumption-Application to Greece', Journal of Solar & Wind Technology, Vol. 6, N°3, pp. 225 – 233, 1989.
- [12] K. Mesmoudi, 'Bilan Energétique d'une Serre en Verre sans Couvert Végétal dans la Région des Hauts Plateaux Est d'Algérie- Etude Expérimentale', CDRoom Proceedings de ICRE'07, Bejaia, 23-26 Novembre 2007.

ANNEXE

Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre la couverture et l'air extérieur

$$Q_{CA_e}^C = h_e \cdot S_C \cdot (T_C - T_{A_e}) \quad (A1)$$

Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre l'air intérieur et la couverture

$$Q_{CA_i}^C = h_i \cdot S_C \cdot (T_{A_i} - T_C) \quad (A2)$$

Chaleur du flux représentant le transfert d'enthalpie résultant de la condensation de la vapeur d'eau de l'air intérieur sur la face interne de la couverture

$$Q_{A_i C}^L = L.k.S_C.(EA_i - EA_{is}) \quad (A3)$$

Puissance du flux de chaleur convectif échangé entre le sol abrité et l'air intérieur

$$Q_{S A_i}^C = h_i.S_S.(T_S - T_{A_i}) \quad (A4)$$

Flux de chaleur convectif dû aux fuites d'air

$$Q_{A_i A_e}^C = \frac{(T_{A_i} - T_{A_e}).C_m \cdot \rho \cdot \mathfrak{R} \cdot V}{3600} \quad (A5)$$

Etanchéité d'une serre mono chapelle fermée, souvent prise comme moyenne, avec un taux de renouvellement d'air par fuite fixée à (0.5 + 0.25 U_e) d'après [5].

Chaleur latente de l'évaporation du sol captée par l'air intérieur

$$Q_{S A_i}^L = L.k.S_C.(ES - EA_i) \quad (A6)$$

$$L = 752.5 - 0.568 \cdot \left[\frac{273(T_S - T_{A_i})}{2} \right] \quad (A7)$$

Flux de chaleur correspondant aux transferts d'enthalpies de l'air intérieur vers l'air extérieur par le phénomène des fuites d'air à travers les assemblages de la serre

$$Q_{A_i A_e}^L = \frac{(EA_i - EA_e).L \cdot \rho \cdot \mathfrak{R} \cdot V}{3600} \quad (A8)$$

Puissance du flux de conduction entre deux couches successives du sol

$$Q_S^D = \frac{\lambda}{e}.S_S.(T_{S_0} - T_{S_1}) \quad (A9)$$

Puissance du flux de rayonnement solaire absorbé par la couverture

$$Q_C^S = (\alpha_C - \tau_C - \rho_C).E_g.S_C \quad (A10)$$

Puissance du flux de rayonnement solaire absorbé par le sol de la serre

$$Q_S^S = (\alpha_S - \tau_S - \rho_S) \cdot \tau_C \cdot E_{gh} \cdot S_S \quad (A11)$$

Pertes de chaleur entre la couverture et l'air extérieur

$$Q_{CA_e} = Q_{CA_e}^L + Q_{CA_e}^C \quad (A12)$$

Pertes de chaleur entre l'air intérieur et l'air extérieur

$$Q_{fuite} = Q_{A_i A_e}^C + Q_{A_i A_e}^L \quad (A13)$$

Chaleur du flux de rayonnement solaire global capté par les éléments de la serre

$$Q_{tot}^S = Q_S^S + Q_C^S \quad (A14)$$

Bilan global de la puissance du flux radiatif infrarouge des éléments de la serre

$$Q_{tot}^I = Q_C^I + Q_S^I \quad (A15)$$