Un modèle d'estimation des déperditions énergétiques diurnes des serres

Constantin KITTAS

Centre de Recherches agronomiques du Péloponnèse et d'Épire, B.P. 2463, 26110 Patras, Grèce

RÉSUMÉ

Une analyse du bilan d'énergie de la serre permet de proposer un modèle d'estimation des déperditions énergétiques diurnes du système à partir des paramètres climatiques disponibles de façon courante auprès de Services Météorologiques.

L'application du modèle à la Grèce sur une base mensuelle montre que les frais annuels de chauffage diurne des serres représentent entre 10 et 25 p. 100 des frais annuels totaux selon l'implantation géographique et la température que l'on désire maintenir à l'intérieur de la serre.

Mots clés additionnels : *Comportement thermique, bilan d'énergie, cultures protégées.*

SUMMARY

A model for estimating diurnal greenhouse energy losses.

A greenhouse energy balance analysis has led us to propose a model for evaluating greenhouse energy losses during day-time, from easily measured weather data. Application of the model on a monthly basis in Greece showed that the annual diurnal greenhouse heating cost represents 10 to 25 % of the corresponding total annual heating cost according to the location of the greenhouse and the internal air temperature maintained.

Additional key words : *Thermal behaviour, energy balance, protected cultivations.*

I. INTRODUCTION

À la suite des augmentations successives du coût de l'énergie, plusieurs chercheurs ont essayé d'évaluer les déperditions énergétiques des serres. Certains d'entre eux ont utilisé pour leurs estimations la méthode du bilan d'énergie qui leur permettait en même temps de séparer les différents postes de déperdition et d'évaluer leur importance relative (DE VILLÈLE, 1975 ; CHIAPALE *et al.*, 1981 ; KITTAS, 1986). Mais, ils se sont contentés d'une tentative d'estimation des besoins nocturnes et ils ont signalé la nécessité de détermination des besoins diurnes de chauffage des serres.

À partir d'une analyse du bilan énergétique de la serre, nous nous sommes donnés comme objectif de modéliser les déperditions énergétiques diurnes, en ne prenant en compte que les caractéristiques du climat local facilement accessibles. L'application du modèle à la Grèce sur une base mensuelle devrait permettre de mettre en évidence la variabilité des besoins de chauffage diurne selon l'implantation géographique des serres et la température que l'on désire maintenir à l'intérieur de l'enceinte et de juger de l'importance de ces besoins par rapport aux besoins totaux.

II. LE MODÈLE D'ESTIMATION DES DÉPERDITIONS ÉNERGÉTIQUES DE LA SERRE

A. Le bilan d'énergie de la serre

La serre est un système qui réagit continuellement aux variations des conditions d'environnement qui lui sont imposées de l'extérieur. La connaissance de ces conditions et des propriétés du système, tant géométriques que physiques, devrait permettre à chaque instant de déterminer la réponse du système, c'est-à-dire le microclimat de la serre. La méthode dite du bilan d'énergie constitue un outil qui permet, en modélisant les échanges qui interviennent à différentes interfaces du système (sol, air, paroi), de quantifier l'efficacité des techniques de climatisation susceptibles d'être mises en œuvre (chauffage, ventilation).

En négligeant le terme correspondant aux échanges de chaleur latente lors de la condensation au niveau de la paroi, car de jour, en général, la température de paroi est supérieure à la température du point de rosée de l'air intérieur, l'équation du bilan énergétique s'écrit en régime permanent :

TABLEAU 1
Liste des Symboles.
List of Symbols.

Symboles	Unités	Signification
$a, a_G, a_1, a_2, b, c, d$		Paramètres d'ajustement statistique.
A_p, A_s	m^2	Surface développée de paroi, surface couverte au sol.
CH	$W.m^{-2}$	Apports énergétiques correspondant au chauffage.
c_p	$J.Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	Chaleur spécifique de l'air à pression constante.
ETP_S	$mm.h^{-1}$	Evapotranspiration potentielle sous serre.
f_{pA}, f_{ps}		Facteur de forme paroi-atmosphère, paroi-sol extérieur.
h_e	$W.^{\circ}C^{-1}.m^{-2}$	Coefficient d'échange convectif entre la paroi et le milieu extérieur.
H_L, H_C		Heure du lever, du coucher du soleil.
I		Numéro d'ordre du jour dans l'année.
L	$Wh.m^{-2}.mm^{-1}$	Chaleur latente de vaporisation.
n	heures	Nombre d'heures d'insolation.
N	heures	Durée astronomique du jour.
QC_{pe}, QC_{pi}	$W.m^{-2}$	Echanges par convection entre paroi-air extérieur, paroi-air intérieur.
QC_{si}, QL_{si}	$W.m^{-2}$	Echanges de chaleur sensible, de chaleur latente, entre le sol de la serre et l'air intérieur.
QF	$W.m^{-2}$	Echanges de chaleur sensible et de chaleur latente dus aux fuites contrôlées ou non.
QS	$W.m^{-2}$	Echanges par conduction entre la surface du sol et la profondeur.
R		Taux horaire de renouvellement d'air.
RG, RG_s	$W.m^{-2}$	Rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale à l'air libre, sous serre.
RG_T	$Wh.jour^{-1}.m^{-2}$	Rayonnement solaire global journalier reçu sur une surface horizontale à l'air libre.
RS_p, RS_s	$W.m^{-2}$	Rayonnement global solaire absorbé par la paroi, par le sol.
RT_{pe}, RT_{ps}	$W.m^{-2}$	Rayonnement net thermique au-dessus de la paroi, au-dessous de la paroi.
$T_A, T_{ae}, T_{as}, T_p, T_s$	$^{\circ}C$	Température de l'atmosphère, de l'air extérieur, de l'air intérieur, de la paroi, du sol extérieur.
T_{max}, T_{min}	$^{\circ}C$	Température maximale, minimale du jour considéré.
U	$m.s^{-1}$	Vitesse du vent.
V_s	m^3	Volume de la serre.
δ	degrés	Déclinaison du soleil.
ρ	$Kg.m^{-3}$	Masse volumique de l'air.
σ	$W.K^{-4}.m^{-2}$	Constante de Stefan-Boltzman.
τ_G		Facteur moyen de transmission de la paroi pour le rayonnement solaire global.
φ	degrés	Latitude du lieu.
ω	degrés	Angle horaire du soleil pour l'heure considérée.
ω_c	degrés	Angle horaire du soleil à son coucher.

— à la paroi de la serre,

$$- QC_{pe} + QC_{pi} + RT_{pe} + RT_{ps} + RS_p = 0 \quad (1)$$

— à l'air intérieur,

$$- QC_{pi} + QC_{si} + QL_{si} - QF + CH = 0 \quad (2)$$

— au sol — couvert végétal de la serre,

$$- QC_{si} - QL_{si} - QS - RT_{ps} + RS_s = 0. \quad (3)$$

En additionnant (1), (2), (3) on peut écrire le bilan énergétique global de la serre, sous la forme :

$$CH = QC_{pe} + QF + QS - RT_{pe} - RS_p - RS_s. \quad (4)$$

En négligeant le terme QS qui sous couvert végétal est faible (PERRIER, 1975), on a :

$$CH = QC_{pe} + QF - RT_{pe} - (RS_p + RS_s). \quad (5)$$

L'équation (5) peut être utilisée pour fournir une estimation des besoins de chauffage à condition que l'on puisse exprimer les différents termes du bilan en fonction de paramètres facilement accessibles.

B. Formulation des divers échanges de la serre avec son environnement

1. Expression du rayonnement solaire absorbé par le système

En désignant par RG le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale à l'extérieur de la serre, en Watt par mètre carré, on peut démontrer (voir annexe) que par mètre carré de surface couverte, on a :

$$RS_p + RS_s \simeq \tau_G RG. \quad (6)$$

2. Expression du rayonnement thermique au-dessus de la serre

Lorsque le matériau de couverture est opaque aux radiations infra-rouges thermiques (cas du verre), on peut écrire, par mètre carré de surface couverte :

$$RT_{pe} = \frac{A_p}{A_s} [f_{ps} \sigma(T_s + 273)^4 + f_{pA} \sigma(T_A + 273)^4 - \sigma(T_p + 273)^4] \quad (W.m^{-2}). \quad (7)$$

Il convient ici de remarquer que le coefficient $\frac{A_p}{A_s}$ sert à exprimer les pertes relatives à la surface de paroi, par mètre carré de surface couverte.

3. Expression des pertes par convection

Les déperditions convectives d'énergie entre la serre et son environnement peuvent s'estimer, par mètre carré de surface couverte, à partir de la relation :

$$QC_{pe} = \frac{A_p}{A_s} h_c (T_p - T_{ae}) \quad (W \cdot m^{-2}). \quad (8)$$

Pour h_c , on peut utiliser la relation (KITTA, 1980) :

$$h_c = [1,48(T_p - T_{ae})^{0,5} + 9,4 U^{1,6}]^{0,5} \quad (W^0 \cdot C^{-1} \cdot m^{-2}). \quad (9)$$

4. Expression des déperditions d'énergie au niveau des fuites

Ces déperditions correspondent à la somme du flux de chaleur sensible et de chaleur latente échangés avec le milieu extérieur à cause des défauts d'étanchéité de la serre.

En absence de condensation, le flux de chaleur latente au niveau des fuites représente l'énergie mise en jeu lors du phénomène de l'évapotranspiration sous serre (WALKER, 1965).

Le flux de chaleur sensible dépend du taux horaire de renouvellement d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre.

En retenant la proposition de DE VILLÈLE (1972) selon laquelle la quantité d'énergie mise en jeu dans l'évapotranspiration sous serre peut s'estimer à partir de la relation :

$$LETP_s \simeq 0,67 RG_s \quad (W \cdot m^{-2}), \quad (10)$$

les déperditions énergétiques au niveau des fuites se mettent, par mètre carré de surface couverte, sous la forme :

$$QF = R \frac{V_s}{A_s} \rho c_p (T_{as} - T_{ae}) + 0,67 RG_s \quad (W \cdot m^{-2}). \quad (11)$$

Pour R , nous retenons l'expression (KITTA, 1980) :

$$R = (1 + 0,3 U) / 3\,600 \quad (sec^{-1}). \quad (12)$$

Pour nos estimations, nous avons retenu

$$\rho = 1,25 \text{ Kg} \cdot m^{-3} \quad \text{et} \quad C_p = 0,28 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}.$$

III. UTILISATION DU MODÈLE POUR LA DÉTERMINATION DES BESOINS MOYENS MENSUELS DIURNES DE CHAUFFAGE

A. Les hypothèses simplificatrices

1. L'estimation se fera sur une base mensuelle à partir de la journée moyenne de chaque mois. Les déperditions totales journalières représentent alors la somme

des déperditions horaires pour les heures où la température réelle de l'air de la serre fermée, non chauffée, est inférieure à la température de référence que l'on veut maintenir dans la serre. Tous les calculs se feront entre le lever et le coucher du soleil.

2. Pour la détermination de l'heure de lever et de coucher du soleil, on peut utiliser les formules astronomiques classiques :

$$H_L = 12 - \frac{\omega_c}{15} \quad (13)$$

$$H_c = 12 + \frac{\omega_c}{15} \quad (14)$$

$$\text{où} \quad \cos \omega_c = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad (15)$$

$$\text{avec} \quad \delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left(360 \frac{284 + I}{365} \right). \quad (16)$$

3. L'estimation de la température réelle de l'air de la serre fermée, non chauffée, peut se faire avec une approximation assez satisfaisante à partir de la relation (KITTA *et al.*, 1986) :

$$T_{as} = T_{ae} + \frac{0,017 RG + 2,64}{1 + 0,085 U^{0,8}}. \quad (17)$$

L'équation (17) n'entre pas dans le modèle (5) et constitue seulement un critère pour déterminer s'il y a ou non chauffage. Cette relation est valable pour une serre plastique en couverture de P.V.C., cultivée, bien arrosée. Son utilisation dans le cas d'une serre en verre peut se justifier. En effet :

Le facteur de transmission pour le rayonnement solaire global d'une serre en verre est supérieur à celui d'une serre en P.V.C. d'environ 5 % (DE VILLÈLE, 1983). En général, le chauffage diurne n'est indispensable que pour des valeurs de rayonnement solaire inférieures à 250-300 $W \cdot m^{-2}$. Une intensité de rayonnement solaire global de l'ordre de 300 $W \cdot m^{-2}$ entraîne donc un flux énergétique au niveau du sol-couvert végétal de la serre en verre, supérieur de $300 \times 0,05 = 15 \text{ W} \cdot m^{-2}$ à celui qui arrive au niveau du sol-couvert végétal de la serre en P.V.C. Si on admet que chaleur sensible et chaleur latente participent de manière équivalente à l'accroissement d'enthalpie de l'air de la serre (GARZOLI & BLACKWELL, 1973), le flux énergétique de 15 $W \cdot m^{-2}$ correspond à une énergie susceptible de contribuer à l'échauffement de l'air de la serre de l'ordre de 7,0 $W \cdot m^{-2}$. Cette énergie n'influe pas de façon significative sur les besoins en chauffage diurne.

4. La température de l'air extérieur à une certaine heure du jour peut être donnée avec une approximation suffisante par la formule :

$$T_{ae} = T_{min} + K(T_{max} - T_{min}), \quad (18)$$

K étant un coefficient variable avec l'heure et la durée du jour qui peut être obtenu à partir des travaux de HALLAIRE (1950).

5. Le rayonnement solaire RG qui arrive sur une surface horizontale peut être estimé heure par heure, à partir de la formule (COLLARES-PEREIRA *et al.*, 1979) :

$$RG = r_i RG_T \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (19)$$

$$\text{où } r_1 = \frac{\pi}{24} (a_1 + a_2 \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_c}{\sin \omega_c - (2 \pi \omega_c / 360) \cos \omega_c} \quad (20)$$

$$\text{avec } a_1 = 0,409 + 0,5016 \sin (\omega_c - 60) \quad (21)$$

$$\text{et } a_2 = 0,6609 - 0,4767 \sin (\omega_c - 60) . \quad (22)$$

6. Pour la température de surface du sol à l'extérieur T_s , on peut admettre (KIMBALL, 1973) que, quand le sol extérieur n'est pas nu, elle soit assez voisine de la température de l'air extérieur soit :

$$T_s \simeq T_{ae} . \quad (23)$$

7. La température apparente d'émission de l'atmosphère T_A , compte tenu de l'échelle de temps de nos estimations, peut être estimée par la relation (CHIA-PALE *et al.*, 1981) :

$$T_A = i(T_{ae} - 15) + (1 - i)(T_{ae} - 4) \quad (24)$$

$$\text{ou } i = \frac{n}{N} \quad (25)$$

$$\text{et } N = \frac{2 \cdot \omega_c}{15} . \quad (26)$$

8. Dans des travaux antérieurs (KITAS *et al.*, 1986), nous avons proposé un modèle d'estimation de la température de paroi, de la forme :

$$T_p = T_{ae} + \frac{(T_{as} - T_{ae}) + a T_A + b + a_G RG}{c + d U^{0,8}} . \quad (27)$$

Dans ce modèle, qui a été établi expérimentalement à partir d'une serre en P.V.C., nous avons pu mettre en évidence qu'en régime nocturne les facteurs prédominants au niveau de T_p sont l'intensité du chauffage, traduite par l'écart $(T_{as} - T_{ae})$, et la vitesse du vent extérieur. En appliquant le modèle à une serre en verre, nous avons également obtenu une bonne concordance.

L'extension du modèle (27) en régime diurne a été faite par la simple adjonction au modèle nocturne du terme $a_G RG$ traduisant l'absorption par la paroi du rayonnement solaire. L'ajustement statistique à partir des données expérimentales du coefficient a_G a mis en évidence le rôle important du rayonnement solaire dans la définition de T_p .

Après ces considérations, et compte tenu de la différence de comportement vis-à-vis du rayonnement solaire des différents matériaux de couverture, il nous paraît justifié d'en tenir compte afin de pouvoir utiliser le modèle (27) pour une serre en verre.

En nous référant à la littérature (COUTISSE *et al.*, 1982), nous pouvons retenir que le P.V.C. a un facteur d'absorption pour le rayonnement solaire global trois fois plus grand que celui du verre. Ceci amène à penser que l'on peut utiliser le modèle (27) pour une serre en verre en multipliant le terme $a_G RG$ correspondant à l'absorption du rayonnement solaire par 0,33.

L'estimation de la température de paroi peut par conséquent se faire (pour les besoins de nos estimations) à partir de la relation :

$$T_p = T_{ae} + \frac{(T_{as} - T_{ae}) + 0,2 T_A - 3,7 + 0,01 RG}{1,3 + 0,4 U^{0,8}} . \quad (28)$$

B. Les données utilisées

1. Caractéristiques géométriques de la serre

En tenant compte des caractéristiques géométriques des serres les plus répandues en Grèce, on peut retenir :

$$\frac{A_p}{A_s} \simeq 1,4 \quad \text{et} \quad \frac{V_s}{A_s} \simeq 2,6 \text{ m} .$$

Pour le facteur moyen de transmission du rayonnement solaire global, on peut retenir pour les heures où le chauffage diurne intervient une valeur de $\tau_G \simeq 0,75$ (TAKAKURA *et al.*, 1969).

Les facteurs de forme intervenant dans les échanges radiatifs sont donnés par les expressions suivantes (OGURA, 1970) :

$$f_{pA} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{A_s}{A_p} \right) \simeq 0,85 \quad \text{et} \quad f_{ps} = 1 - f_{pA} \simeq 0,15 .$$

2. Climat extérieur

L'utilisation de la méthode développée nécessite les données ci-après :

$$\varphi, T_{\max}, T_{\min}, RG_T, n, U .$$

IV. APPLICATION DE LA MÉTHODE EN GRÈCE

La programmation des calculs a permis d'appliquer la méthode à 4 régions de la Grèce dont les latitudes couvrent presque tout le territoire grec et où le développement des serres a pris de l'importance (fig. 1).

Les estimations ont été faites pour deux valeurs de température de consigne :

$$T_{as} = 15^\circ \text{C} \quad \text{et} \quad T_{as} = 20^\circ \text{C}$$

et en utilisant une journée « moyenne » pour chaque mois de l'année.

Figure 1

Villes de la Grèce utilisées pour l'application de la méthode.
Cities of Greece where the method was applied.

TABLEAU 2

Estimation des besoins de chauffage diurne pour Thessalonique, Athènes, Kalamata et Ierapetra (en Kwh. m⁻². mois⁻¹).
Estimation of day-time heating requirements for Thessalonika, Athens, Kalamata and Ierapetra (in Kwh. m⁻². month⁻¹).

Localité	Thessalonique 40°33 N		Athènes 37°58 N		Kalamata 37°04 N		Ierapetra 35 °N	
Temp. de consigne	15 °C	20 °C	15 °C	20 °C	15 °C	20 °C	15 °C	20 °C
Mois								
1	19,4	33,5	7,9	26	4,6	17,2	3,8	15,4
2	12,3	28,4	5,8	20,6	5,3	15,6	3,4	14,0
3	7,5	23,8	6,6	17,9	4,6	13,9	2,9	11,3
4	3,6	10,7		7,6		6,7		4,9
5		7,3		4,7		4,8		
6								
7								
8								
9								
10		7,4		4,9		4,5		
11	3,7	15,3		7,7	2,0	5,9		4,6
12	15,3	31	4,1	22,3	3,5	11,8		9,6
TOTAL	61,8	157,4	24,4	111,7	20	80,4	7,3	59,8

Les résultats de nos estimations sont donnés dans le tableau 2. Il nous a paru intéressant d'estimer les importances relatives des besoins diurnes annuels par rapport aux besoins annuels totaux. Ceci devrait permettre d'avoir une idée de l'ordre de grandeur des frais annuels de chauffage correspondants, selon la température de référence souhaitée et l'implantation géographique des serres. Les résultats sont donnés dans le tableau 3. Il faut noter que les estimations des besoins nocturnes ont été extraites d'un article précédent (KITAS, 1986).

TABLEAU 3

Importance relative des besoins de chauffage diurne par rapport aux besoins totaux.
Relative importance of day-time heating requirements in relation to overall heating requirements.

		Besoins diurnes CH _D	Besoins nocturnes CH _N	Besoins totaux CH _T	$\frac{CH_D}{CH_T} \cdot 100$
		(Kwh. m ⁻² . an ⁻¹)			
Thessalonique	15 °C	61,8	229	290,8	21 %
	20 °C	157,4	430	587,4	26 %
Athènes	15 °C	24,4	190,9	215,3	12 %
	20 °C	111,7	391,0	502,7	22 %
Kalamata	15 °C	20	166	186	11 %
	20 °C	80,4	345,0	425,4	19 %
Ierapetra	15 °C	9,3	111,0	120,3	8 %
	20 °C	59,8	301	360,8	17 %

V. DISCUSSION

Le modèle proposé a pris en considération le comportement thermique d'une serre en régime diurne. Un

tel modèle paraît adapté à l'utilisation que l'on veut en faire pour estimer les déperditions énergétiques diurnes des serres, d'autant plus qu'il n'utilise que des données climatiques communément disponibles à partir du réseau des services météorologiques.

En première approximation, il semble que les ordres de grandeur de nos estimations correspondent aux consommations réelles observées. Il s'agit bien sûr des besoins moyens mais l'échelle de temps choisie correspond aux objectifs de notre étude. Par ailleurs, l'approximation de la journée moyenne du mois, qui est très répandue en thermique du bâtiment et en héliotechnique (DUFFIE & BECKMAN, 1980), donne des résultats dont les erreurs sont du même ordre de grandeur que la fiabilité des données météorologiques utilisées (KLEIN & BECKMAN, 1979).

La confrontation de nos calculs à la littérature montre une concordance satisfaisante de nos estimations aux résultats de VICKERMANN (1969) obtenus pour les conditions de l'Allemagne (voir tabl. 4) et aux propositions de CHIAPALE (1983) selon lequel « les besoins de chauffage diurne, relativement faibles comparés aux besoins nocturnes, peuvent atteindre entre 10 p. 100 et 25 p. 100 des besoins globaux ».

Les hypothèses simplificatrices adoptées pour l'application de la méthode ont été justifiées soit par l'échelle de temps choisie, soit par des raisonnements

TABLEAU 4

Répartition des frais annuels de chauffage des serres entre jour et nuit pour les conditions d'Allemagne (d'après VICKERMANN (1969)).
Distribution of the greenhouse annual heating cost between day and night for the German conditions (according to VICKERMANN (1969)).

Consommation en %	Températures à l'intérieur de la serre				
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
Consommation de jour	9,2	16	19,8	22,7	25,6
Consommation de nuit	90,8	84	80,2	77,3	74,4
Consommation totale	100	100	100	100	100

théoriques qui n'entraînent que des erreurs admissibles pour les études habituelles de la thermique des serres. En effet, s'agissant ici d'une estimation des besoins diurnes de chauffage, une erreur de 20 p. 100 semble être tout à fait admissible puisque, compte tenu de l'ordre de grandeur de ces besoins par rapport aux besoins totaux une telle erreur n'apporte aux estimations globales de déperditions qu'une imprécision inférieure à 5 p. 100.

La méthode proposée permet cependant d'affiner les estimations des besoins de chauffage diurne qui se font en principe de manière très empirique. Des améliorations restent à apporter selon l'échelle de temps à laquelle on veut travailler et l'affinement désiré. Mais d'ores et déjà, elle peut être utilisée comme un guide pour l'estimation des frais annuels de chauffage des serres, et les résultats de notre étude peuvent servir comme outil pratique pour les serristes de la zone méditerranéenne.

VI. CONCLUSION

L'analyse du bilan énergétique de la serre a permis de proposer un modèle semi-empirique pour l'estimation des déperditions énergétiques des serres en régime diurne.

L'application du modèle à la Grèce a permis de constater que les besoins moyens de chauffage diurne varient selon la température que l'on souhaite maintenir à l'intérieur de la serre et la latitude du lieu d'implantation.

Par ailleurs, l'ordre de grandeur des importances relatives des besoins diurnes par rapport aux besoins totaux semble montrer que l'on peut, dans la pratique, pour la Grèce et, plus généralement, pour les régions méditerranéennes, se contenter d'un calcul des besoins de chauffage de nuit et de les augmenter d'environ 15 p.100 pour une température de référence de 15 °C et de 25 p. 100 pour une température de référence de 25 °C pour tenir compte du chauffage de jour.

Reçu le 18 juin 1986.

Accepté le 2 décembre 1986.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon collaborateur D. GIANNAKOPOULOS pour son aide technique.

ANNEXE

1. Rayonnement solaire global absorbé par le sol de la serre : RG_s

Soit

$\tau_G RG$, le rayonnement solaire global qui arrive à la surface du sol, par mètre carré de surface couverte.

α , l'albédo du sol.

r , α_s , les facteurs moyens de réflexion et d'absorption de la paroi pour le rayonnement solaire global.

f_{pp} , f_{psi} , les facteurs de forme paroi-paroi et paroi-sol intérieur.

Le rayonnement $\tau_G RG$, après sa réflexion initiale (fig. A1), va subir des multiples réflexions par la paroi et le sol.

Si on se réfère à la figure A2 et en retenant seulement le premier terme des multiples réflexions, on peut écrire :

$$RG_s = \tau_G RG(1 - \alpha)(1 + f_{psi} r\alpha). \quad (I)$$

Figure A1

Absorption initiale du rayonnement solaire global par le sol de la serre.

Initial absorption of total solar radiation by the greenhouse soil.

Figure A2

Absorption du rayonnement solaire global par le sol de la serre après réflexion sur la paroi.

Absorption of total solar radiation by the greenhouse soil after reflection in the greenhouse wall.

2. Rayonnement solaire global absorbé par la paroi de la serre : RG_p

En suivant le même raisonnement que pour RG_s , on peut écrire que, par mètre carré de surface couverte on a :

$$RG_p = \frac{A_p}{A_s} \alpha_s RG + \alpha \tau_G RG \alpha_s. \quad (II)$$

3. Rayonnement solaire absorbé par le système

Les équations (I) et (II) permettent d'écrire :

$$RG_s + RG_p = \tau_G RG [(1 - \alpha)(1 + f_{psi} r\alpha) + \alpha\alpha_s] + \frac{A_p}{A_s} \alpha_s RG. \quad (III)$$

Pour les valeurs moyennes de mise en œuvre des coefficients qui entrent dans l'équation (III), l'ordre de grandeur du facteur multiplicateur de $\tau_G RG$ est de 0,85-0,90.

En admettant une valeur de l'ordre de 0,1. τ_G pour α_s , on peut conclure que, pour les calculs pratiques, il est possible de retenir :

$$RG_p + RG_s \simeq \tau_G RG.$$

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chiapale J. P.**, 1983. Le bilan énergétique de la serre : comment l'optimiser. In : « *L'I.N.R.A. et les cultures sous serre.* » I.N.R.A. Paris ed., 39-53.
- Chiapale J. P., Kittas C., de Villèle O.**, 1981. Estimation régionale des besoins de chauffage des serres. *Acta Horticulturae*, 115, Energy in protected cultivation, 493-503.
- Collares-Pereira M., Rabl A.**, 1979. The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation value. *Solar Energy*, 22, 155.
- Coutisse S., Deltour J., Nijskens J., Nisen A.**, 1982. Etude expérimentale de la réaction de laitues cultivées sous différents abris en plastique. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, 17, 25-38.
- Duffie J., Beckman W.**, 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New York, 762 p.
- Garzoli K., Blackwell J.**, 1973. The response of a glasshouse to high solar radiation and ambient temperature. *J. Agric. Eng. Res.*, 18, 205-216.
- Hallaire M.**, 1950. Les températures moyennes nocturnes, diurnes et nycthérales en fonction du minimum et du maximum journaliers de température. *Cr. Acad. Sci.*, 231, 406-408.
- Kimball B. A.**, 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. *Agric. Meteorol.*, 11, 243-260.
- Kittas C.**, 1980. *Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres*. Thèse Docteur-Ingénieur. Université de Perpignan, 161 p.
- Kittas C.**, 1986. Estimation des besoins de chauffage des serres en Grèce. *Agronomie*, 6 (7), 633-637.
- Kittas C., Chiapale J. P., Villèle de O., Ariès F.**, 1986. 1. Modèle d'estimation de la température de paroi d'une serre. Admis pour publication à la revue « *Agricultural and Forest Meteorology* ». 2. Paramètres significatifs du déterminisme de la température de l'air de la serre. Soumis pour publication à la revue « *Agricultural and Forest Meteorology* ».
- Klein S. A., Beckman W.**, 1979. A generalized design method for closed-loop solar energy systems. *Solar Energy*, 22, 269.
- Ogura Y.**, 1970. Some considerations on the floor-film ratio of plastic house. *J. Agric. Meteorol. Japan*, 27, 15-18.
- Perrier A.**, 1975. Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles, *Ann. Agron.*, 26, 1-18.
- Vickermann E.**, 1969. Heizkostenkalkulation für Gewächshäuser. *Forschungsberichte aus dem Institut für Technik in Gartenbau der Universität Hannover*, 4, 132 p.
- Villèle de O.**, 1972. Besoins en eau des cultures sous serre. *Acta Horticulturae*, 35, 123-130.
- Villèle de O.**, 1975. Variabilité des besoins de chauffage des serres selon leur implantation géographique. *C. R. Journées d'Orléans, INVUFLEC*, 163-167.
- Villèle de O.**, 1983. La serre, agent de modification du climat. In : « *L'I.N.R.A. et les cultures sous serre.* » I.N.R.A. Paris ed., 21-28.
- Takakura T., Jordan K. A., Boyd L. L.**, 1969. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago III*, Paper No 69-942.
- Walker J. N.**, 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouses. *Transactions of the ASAE*, 8 (3), 445-448.