

Modélisation, caractérisation et analyse du comportement dynamique des transferts de chaleur à travers la paroi en polyéthylène et en verre des serres agricoles

Samya Bendimerad¹, Nacereddine Bibi-Triki¹, Abderrahmane Abène³,
Belkacem Draoui² et Mohammed Benramdane¹

¹ Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables, U.R.M.E.R
Université Abou bakr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algérie

² Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de Béchar, B.P. 417, Béchar Algérie

³ Institut Euro-Méditerranéen de l'Environnement et des Energies Renouvelables, I3ER
Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, France

(reçu le 20 Juin 2010 – accepté le 25 Septembre 2010)

Résumé – *La serre tunnel agricole classique est largement répandue dans les pays méditerranéens malgré les insuffisances qu'elle présente, notamment la surchauffe pendant le jour et le refroidissement nocturne intense, qui parfois se traduit par l'inversion thermique interne. La serre chapelle habillée en verre est relativement performante, mais son évolution reste lente en raison de son coût d'investissement et son amortissement. La serre agricole a pour objectifs de créer un microclimat favorable aux exigences et à la croissance des plantes à partir des conditions climatiques environnantes ; de produire en fonction des calendriers culturaux des fruits, légumes et fleurs hors saison à bon marché et largement disponibles le long de l'année. Elle est définie par son architecture structurelle et fonctionnelle, par la qualité optique, thermique et mécanique de sa paroi et par les moyens techniques d'accompagnement. La serre est considérée comme un milieu confiné où plusieurs composantes s'échangent entre elles et dont les principaux facteurs intervenant sont: la lumière, la température et l'humidité relative. La culture protégée s'échauffe bien plus qu'à l'air libre grâce à la présence de la paroi faisant barrière aux influences néfastes des vents et des variations climatiques environnantes, ainsi qu'à la réduction de la convection de l'air intérieur. Cet état d'évolution thermique est fonction du degré d'étanchéité de la couverture et de ses caractéristiques physiques, pour être transparente aux rayonnements solaires, absorbante et réfléchissante des rayonnements infrarouges émis par le sol, d'où l'effet de piégeage des radiations solaires autrement appelé «effet de serre». Nous proposons dans cet article la modélisation du système serre dynamique, la caractérisation et l'analyse du comportement thermique de la paroi des deux serres expérimentales, l'une en polyéthylène (serre tunnel) et l'autre en verre (serre chapelle) à travers l'expérimentation et la simulation couronnées enfin par l'identification de l'évolution du coefficient (K) des déperditions thermiques à travers la paroi.*

Abstract - *The conventional agricultural greenhouse tunnel is widespread in Mediterranean countries despite the shortcomings it has, including overheating during the day and intense night cooling, which sometimes resulted in internal temperature inversion. The greenhouse chapel dressed in glass is relatively more efficient, but its development remains slow due to its cost of investment and its depreciation. The greenhouse farming aims to create a favorable microclimate requirements and growth of plants from the surrounding weather conditions, to produce what crop calendars fruits, vegetables and flowers out of season cheap and widely available along year. It is defined by its structural architecture and functional by the optical quality, thermal and mechanical his wall and the technical support. The greenhouse is considered a confined environment where many components are exchanged between them and which are the main factors involved: light, temperature and relative humidity. Protected cultivation heats up much more than in air due to the presence of the barrier wall to adverse*

influences of wind and surrounding climatic variations, and the reduction of convection of air inside. This state of thermal evolution depends on the degree of tightness of the cover and its physical characteristics, to be transparent to solar radiation, absorbing and reflecting infrared radiation emitted by the ground, where the effect of radiation trapping Solar otherwise called "greenhouse effect". We propose in this paper the dynamic system modeling emissions, characterization and analysis of the thermal behavior of the wall of the two experimental greenhouses, a polyethylene (greenhouse tunnel) and the other glass (greenhouse chapel) through experimentation and simulation crowned finally by the identification of the evolution of the coefficient (K) of heat loss through the wall.

Mots clés: Serre – Microclimat – Thermique – Matériaux – Modélisation – Micrométéorologie – Gestion de l’agrosystème – Energie solaire – Economie d’énergie.

1. INTRODUCTION

La serre conçue à l’origine comme une simple enceinte limitée par une paroi transparente, telle est le cas pour les serres tunnel conventionnelle et chapelle, largement répandues dans le bassin méditerranéen. Elles amplifient certaines caractéristiques du climat environnant, se caractérisent par des variations de l’énergie interne et entraînent des déperditions thermiques assez importantes en raison de la faible inertie du système.

Pour maintenir un microclimat adapté aux exigences de la culture protégée, l’apport énergétique devient nécessaire pour chauffer l’enceinte surtout pendant la nuit.

Dans cette étude, nous traitons globalement les déperditions thermiques qui se produisent dans le système serre. Les déperditions thermiques par fuites dues à la qualité de l’étanchéité du système serre et les déperditions thermiques dues aux flux de chaleur latente et sensible extrait par ventilation sont traitées sur la base des travaux de recherches et articles publiés.

Nous nous intéressons, dans ce travail, surtout aux déperditions thermiques à travers la paroi des deux serres expérimentales, tunnel à paroi en PE et chapelle habillée en verre. Il s’agit surtout de caractériser le fonctionnement dynamique du système complexe que constitue la serre avec ses différents compartiments (sol, couverture, culture, environnements extérieur et intérieur), de développer les modèles qui permettent de reproduire l’essentiel des propriétés, mécanismes et interactions entre les différents compartiments et d’approcher quantitativement et qualitativement l’analyse du comportement thermique de la paroi de la serre agricole, par l’identification des paramètres essentiels du système, la caractérisation et l’analyse de l’évolution du coefficient global des déperditions thermiques (K) à travers la paroi.

2. PRESENTATION DES DEUX SERRES EXPERIMENTALES

2.1 Serre tunnel

La serre tunnel expérimentale occupe une surface au sol de 320 m², 8 m de largeur, 40 m de longueur et 4 m de hauteur. La structure est entièrement en tubes métalliques légers galvanisés.

La couverture est une simple paroi en polyéthylène d’épaisseur de 15×10⁻⁵ m. La porte d’accès est de 2.40 m de largeur et de 2.5m de hauteur, facilement manipulable et suffisamment étanche.

Le sol intérieur est entièrement isolé du sol extérieur sur une profondeur de 0.70 m par un voile en pierres de construction et du béton.

2.2 Serre chapelle

La serre chapelle expérimentale occupe une surface au sol de 210 m², 7 m de largeur, 30 m de longueur et 4 m de hauteur au centre. La structure est entièrement métallique avec minimisation d'ombrage. La serre est complètement habillée d'une paroi en verre de 3 mm d'épaisseur. Les portes d'accès sont coulissantes et relativement étanches de 2 m de largeur et de 2.20 m de hauteur. Le sol intérieur, lui aussi est complètement isolé du sol extérieur sur une profondeur de 0.80 m par un voile et fondation en pierres de construction et du béton.

Les deux serres expérimentales sont équipées de rampes de brumisation.

2.3 Equipements et moyens d'expérimentation

Le renouvellement d'air est assuré par deux extracteurs disposés en opposition de part et d'autre de la serre.

Le chauffage est constitué de:

- Un chauffage au sol par tubes en P.V.C raccordés en serpentins de 0.40 m de profondeur au sol.
- Un chauffage aérien assuré par deux aérothermes situés sur l'axe de la serre à une hauteur de 3 m.

L'irrigation et la fertilisation sont réalisées simultanément par l'intermédiaire d'un système de goutte à goutte géré par un automate de fertirrigation.

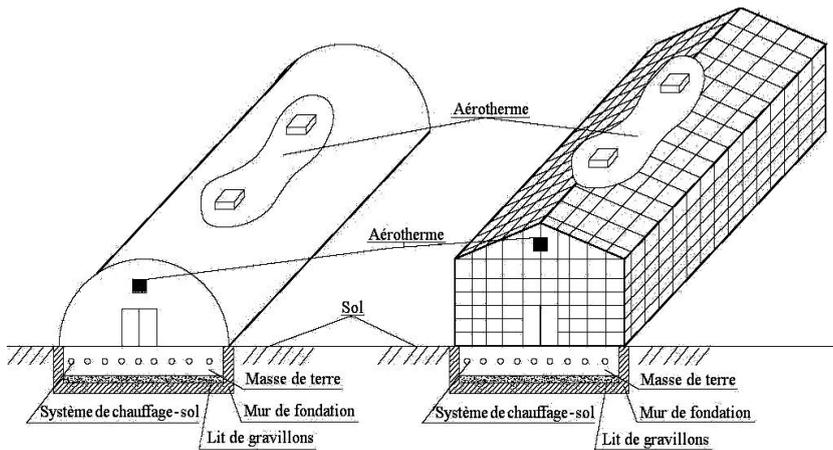


Fig. 1: Schéma des deux serres expérimentales -tunnel et -chapelle

Les équipements de commande comprennent des armoires électriques qui centralisent toutes les mesures. Le système de régulation des données climatiques de la serre est assuré par le système AGAPES (Algorithme de Gestion Automatique des Productions En Serre). Ce système est composé d'un module d'acquisition et de commande (MAC), qui assure l'acquisition des mesures et les commandes des appareils reliés au micro-ordinateur qui sert de superviseur. Il permet:

1. L'affichage des mesures climatiques commandables et non commandables
2. La modification des consignes climatiques

3. La constitution d'une base de données

4. De scruter les mesures effectuées toutes les minutes, établir les valeurs moyennes des différents capteurs tous les quarts d'heures et de les garder en mémoire.

Les capteurs utilisés pour la mesure des températures sèche et humide de l'air intérieur et extérieur sont des psychromètres ventilés utilisant des sondes à résistance électrique (sondes en cuivre).

Les températures de paroi ont été mesurées sur chaque serre à l'aide de thermocouples cuivre-constantan très fin (diamètre du fil 0.1 mm) placé sur la paroi à l'extérieur (T_{pe1} et T_{pe2}) et à l'intérieur (T_{pi3} , T_{pi4} et T_{pi5}).

Le rayonnement atmosphérique a été mesuré à l'aide d'un pyrgéomètre (Eppley).

La vitesse du vent a été mesurée à l'aide d'un anémomètre à coupelle (seuil de démarrage ± 0.5 m/s) placé à 4 m de hauteur à proximité des deux serres.

Les mesures des températures sèche et humide de l'air, ainsi que les températures des parois (nocturnes) ont été effectuées avec une résolution de 0.02 K, y compris l'erreur de la chaîne d'acquisition de 0.1 K. Quand un de ces écarts est ≤ 0.1 K, nous considérons qu'il y a condensation.

Cette mesure et toutes les mesures ultérieures pendant cette nuit sont alors rejetées. Après la sélection des mesures et le dépouillement sur des valeurs moyennes établies sur des pas de temps de 15 mn, le traitement des données et mesures prend effet.

3. APPROCHE ET ANALYSE DE L'AGROSYSTEME

La gestion et l'optimisation de la production sous serre peuvent être intégrées dans le schéma classique des systèmes. Elles sont décomposées en trois modules successifs, caractérisés par une échelle de temps et un niveau de décision:

- Le sous système: serre/microclimat instantané
- Le sous système: serre/microclimat à court terme
- Le sous système: serre/microclimat à long terme.

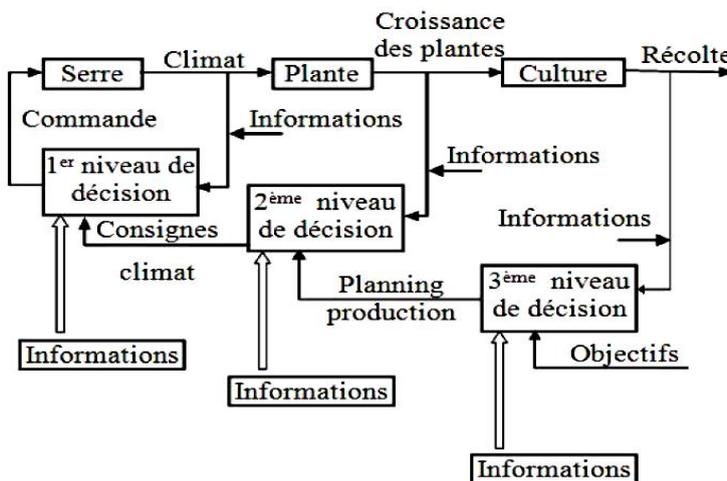


Fig. 2: Schéma des niveaux de commandes d'une serre

4. SPECIFICITE DE LA THERMIQUE DES SERRES PAR RAPPORT A CELLE DES BATIMENTS D'HABITATION

La serre présente un comportement thermique assez différent des bâtiments d'habitation, du fait de ses caractéristiques particuliers:

- Une structure légère supportant une enveloppe transparente à faible inertie qui transmet une grande partie du rayonnement solaire
- Une culture qui capte la majorité de ce rayonnement et le transforme en grande partie en chaleur latente de vaporisation (transpiration des plantes) et de chaleur sensible. Elle participe donc aux échanges d'énergie et de masse.
- Un sol qui absorbe le rayonnement incident et en transforme une partie en chaleur latente. Le sol constitue l'essentiel de la masse thermique de la serre, contrairement aux bâtiments où les murs et la toiture sont des éléments prédominants de stockage.

La serre se signale par des phénomènes de transfert thermique par rayonnements, par conduction - convection et par fuite.

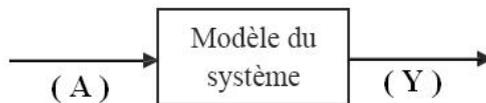
5. CONCEPT DE L'APPROCHE SYSTEME

La serre est considérée en tant que système de production caractérisé par les différentes composantes physiques et biologiques qui échangent entre elles des flux thermiques et énergétiques. L'approche système peut être utilisée dans le but d'analyser les interactions entre les compartiments du système et prédire le comportement dynamique de la serre. Ce comportement va être caractérisé par l'évolution de variables d'état et de flux de sortie en fonction des entrées (perturbation, contrôle et commandes, critères économiques...) que l'on suppose connues.

La mise au point d'un modèle du système est nécessaire. Elle permet:

- d'analyser et de prédire le comportement du processus,
- de guider l'évolution d'un processus à travers les lois de régulation,
- d'aider à la conception du système.

Le modèle du système peut être défini par la relation mathématique ξ entre les entrées E et les sorties Y du système.



$$Y = \xi \times [E] \tag{1}$$

Fig. 3: Schéma synoptique d'un système et de son modèle

5.1 Base de la théorie des systèmes

La théorie des systèmes constitue une branche des mathématiques appliquées susceptible d'être utilisée dans un grand nombre de problèmes techniques. Elle s'attache à décrire l'évolution de systèmes au cours du temps. Ce dernier possède une essence fondamentale et la distinction se fait entre les systèmes statiques (ou à réponse

instantanée) et dynamique (ou à réponse retardée, caractérisée par l'existence d'une constante de temps).

L'expression mathématique généralisée pour la description d'un système est constituée des deux équations suivantes:

- Equation d'état décrivant le comportement interne du système:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F_1(t, X(t), E(t), p) \tag{2}$$

-Equation d'observation (ou de sortie)

$$Y(t) = F_2(t, X(t), E(t), p) \tag{3}$$

Où $X(t)$: de dimension (n), représente le vecteur des variables d'état du système;

$Y(t)$: de dimension (p), représente le vecteur des observations du système; $\frac{dX(t)}{dt}$:

de dimension (n), représente la dérivée de $X(t)$ par rapport au temps; $E(t)$: variables d'entrées commandables et non commandables (sollicitations); p : paramètres physiques et biologiques du système et t : temps.

5.2 Expression mathématique du système serre

Les équations générales pour le système serre que nous allons étudier et pour lequel nous opérons à certaines simplifications, se présentent comme suit:

Equation d'état décrivant le comportement interne du système serre

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + BE(t) \tag{4}$$

Equations d'observation (ou de sortie)

$$Y(t) = CX(t) + DE(t) \tag{5}$$

Les coefficients A, B, C et D sont des matrices dont les dimensions sont liées aux dimensions respectives des vecteurs d'état, de commande, de perturbation et de sortie; où A: de dimension (n×n) est la matrice dynamique du système; B et D: de dimension (q×n) sont les matrices caractérisant les paramètres de commande du système et C: de dimension (q×n) est la matrice des observations.

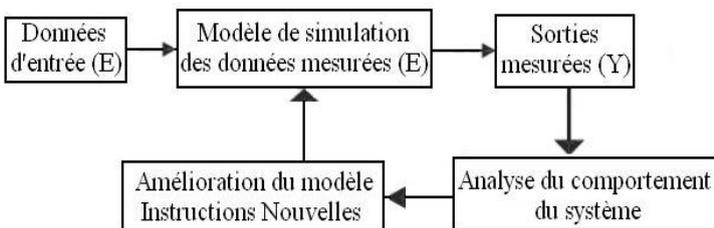


Fig. 4: Schéma de simulation

5.3 Simulation

Une séquence de simulation comporte généralement deux étapes. Dans la première, il s'agit d'effectuer la description du réseau à étudier puis d'éditer les tâches et commandes à exécuter. Dans la seconde, les commandes sont exécutées et débouchent sur l'exploitation proprement dite des résultats de calcul.

6. MONDELISATION PHYSIQUE DE SERRES ET LE CHOIX D'UN MODELE SIMPLIFIE

L'établissement des équations générales régissant le système serre cultivée en régime dynamique et le choix judicieux d'un modèle simplifié suffisamment réaliste peuvent contribuer à l'analyse du comportement de l'ensemble «serre-culture».

6.1 Principe de base

L'étude physique de la serre couvre tous les processus physiques mis en jeu dans son fonctionnement. Elle est donc un préalable à l'élaboration d'un modèle mathématique.

Les bilans énergétiques représentent les règles d'évolution du modèle d'un état de départ à un état final. Ils traduisent le principe de conservation de l'énergie.

L'équation du bilan d'énergie sous sa forme générale s'écrit:

$$\text{Energie reçue} - \text{Energie perdue} = \text{Variation d'énergie interne}$$

Le second membre traduit un terme différentiel par rapport au temps. Il caractérise l'inertie de l'élément, c'est l'aptitude de la variable d'état à évoluer rapidement (inertie faible) ou lentement (inertie forte) sous l'action des sollicitations extérieures.

6.2 Modèle de la serre

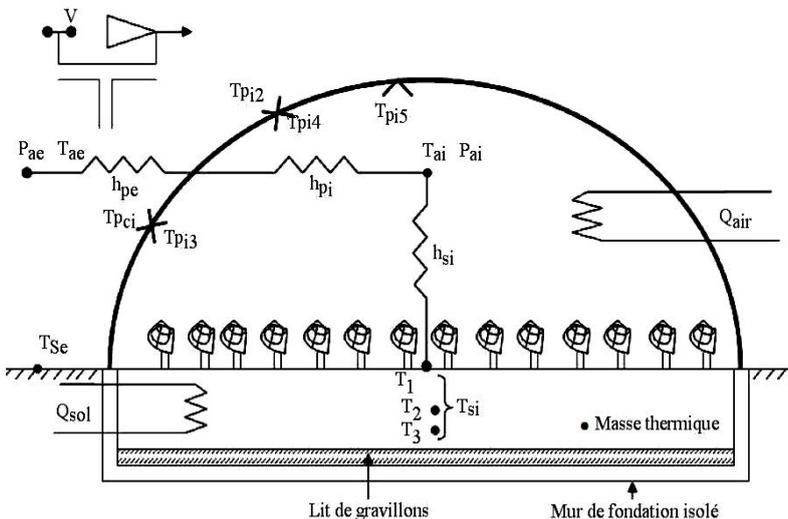


Fig. 5: Modèle réduit

6.3 Modèle de serre R.C d'ordre 1

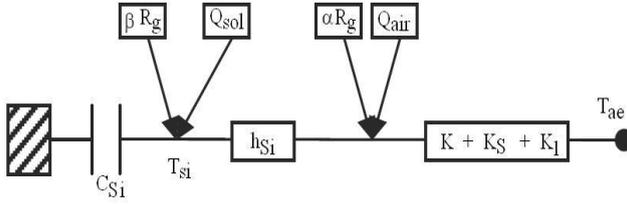


Fig. 6: Modèle de serre R.C d'ordre 1 – Bilan thermique

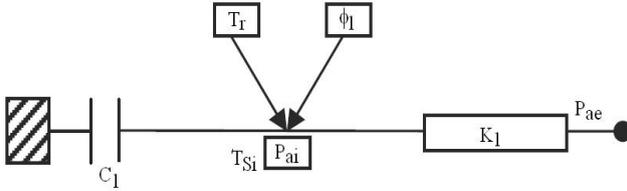


Fig. 7: Modèle de serre R.C d'ordre 1 – Bilan hydrique

6.4 Bilan d'énergie

6.4.1 Bilan d'énergie de l'ambiance interne

$$\alpha R_g + Q_{air} + h_{Si} \times (T_{Si} - T_{ai}) + K \times (T_{ae} - T_{ai}) + K_S \times (T_{ae} - T_{ai}) + K_L \times (p_{ae} - p_{ai}) = 0 \quad (6)$$

6.4.2 Bilan de la vapeur d'eau de l'air de la serre

$$C_1 \frac{dp_{ai}}{dt} = T_r - K_L (p_{ai} - p_{ae}) + \phi_1 \quad (7)$$

En micrométéorologie, l'équation du bilan d'énergie fait souvent appel au quotient de Bowen (B_0) qui représente le rapport du flux de chaleur sensible au flux de chaleur latente où:

$$B_0 = \frac{K_S (T_{ai} - T_{ae})}{K_L (p_{ai} - p_{ae})} \quad (8)$$

L'équation (6) du bilan d'énergie de l'ambiance interne de la serre devient:

$$\alpha R_g + Q_{air} - h_{Si} \times (T_{ai} - T_{Si}) - K \times (T_{ai} - T_{ae}) - K_S \times (T_{ai} - T_{ae}) \times \left[\frac{(B_0 + 1)}{B_0} \right] = 0 \quad (9)$$

6.4.3 Bilan d'énergie de la masse thermique

$$C_{Si} \frac{dT_{Si}}{dt} = h_{Si} \times (T_{ai} - T_{ae}) + Q_{sol} + \beta R_g \quad (10)$$

Le bilan d'énergie de la masse thermique peut être formulé en fonction de tous les paramètres et flux intervenant dans le milieu ambiant de la serre par l'expression:

$$C_{Si} \frac{dT_{Si}}{dt} = (\alpha + \beta)R_g + Q_{air} + Q_{sol} - K \times (T_{ai} - T_{ae}) - K_S \times (T_{ai} - T_{ae}) \times \left[\frac{(B_0 + 1)}{B_0} \right] \quad (11)$$

6.5 Coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi de la serre

Les déperditions thermiques à travers la paroi représentent le degré d'efficacité du matériau de couverture de la serre en tant que barrière entre le microclimat et son environnement. La compensation énergétique pour chauffer l'enceinte suite au déficit causé par ces déperditions thermiques constitue un complément d'énergie significatif.

L'évaluation du flux de chaleur échangé entre le milieu intérieur et extérieur à la serre à travers la paroi est étroitement lié au coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi de la serre (K). Son approche rationnelle représente un outil important pour la décision sur le choix des types de matériaux de l'enveloppe et aussi pour d'autres applications techniques, notamment l'orientation structurelle et architecturale des serres.

Le flux de chaleur échangé entre les milieux intérieur et extérieur à travers la paroi de la serre Q_p est déduit de l'équation (9) du bilan d'énergie de l'ambiance interne de la serre qui est exprimé par la relation suivante:

$$Q_p = K \times (T_{ai} - T_{ae}) \quad \text{en} \quad (W/m^2) \quad (12)$$

Modèle d'estimation du coefficient global de transmission de la chaleur à travers la paroi (K)

En régime nocturne et permanent, le flux de chaleur traversant la paroi s'écrit comme suit:

1- Sur la face intérieure de la paroi

$$Q_p = h_{ri} \times (T_{ai} - T_{pi}) + h_{ci} \times (T_{ai} - T_{pi}) = h_{pi} \times (T_{ai} - T_{pi}) \quad \text{en} \quad (W/m^2) \quad (13)$$

A travers la paroi

$$Q_p = \frac{\lambda}{e} \times (T_{pi} - T_{pe}) \quad \text{en} \quad (W/m^2) \quad (14)$$

2- Sur la face extérieure de la paroi

$$Q_p = h_{re} \times (T_{pe} - T_{ae}) + h_{ce} \times (T_{pe} - T_{ae}) = h_{pe} \times (T_{pe} - T_{ae}) \quad \text{en} \quad (W/m^2) \quad (15)$$

D'après l'équation (12),

$$\frac{Q_p}{K} = \frac{Q_p}{pe} + \frac{Q_p}{pi} + \frac{Q_p}{\lambda/e} \quad (K) \quad (16)$$

D'où
$$\frac{1}{K} = \frac{1}{pe} + \frac{1}{pi} + \frac{1}{\lambda/e}$$

Le coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi de la serre aura pour expression:

$$K = \frac{h_{pi} \cdot h_{pe} \cdot \lambda}{\lambda(h_{pi} + h_{pe}) + e \cdot h_{pi} \cdot h_{pe}} \quad \text{en} \quad (\text{W} / \text{m}^2\text{K}) \quad (17)$$

6.6 Formulation et intégration du modèle réduit

Après intégration des équations (9) et (10) et mise sous forme récurrente entre les pas de temps n et $n+1$, on obtient par approximation numérique en simplifiant le quotient de Bowen, $B_0 = f(T_{ai}, p_{ai})$:

$$T_{si(n+1)} = T_{s(n)} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right)\right) \left(\frac{\alpha h_{si} + \beta \mu}{h_{si}(K + K_S)} \frac{\mu}{h_{si}(K + K_S)} \right) \begin{pmatrix} T_{ae} \\ R_g \\ Q_{sol} \\ Q_{air} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$T_{ai(n+1)} = \frac{h_{si}}{h_{si} + K + K_S} T_{si(n+1)} + T_{ai(n+1)} = \frac{h_{si}}{h_{si} + K + K_S} T_{si(n+1)} + \left(\frac{K + K_S}{h_{si} + K + K_S} \frac{\alpha}{h_{si} + K + K_S} \frac{1}{h_{si} + K + K_S} \right) \begin{pmatrix} T_{ae} \\ R_g \\ Q_{air} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Où τ est la constante de temps du système et μ un paramètre intermédiaire définis par :

$$\tau = \frac{C_{si} \cdot \mu}{h_{si}(K + K_S)} \quad \text{et} \quad \mu = h_{si} + K + K_S \left(\frac{(B_0 + 1)}{B_0} \right)$$

La solution issue de la résolution du système composé par les équations (9) et (19), selon laquelle la serre se comporte en tant que système thermique d'ordre 1, permet de prédire les températures de l'ambiance interne (T_{ai}) en régime dynamique, connaissant bien entendu les sollicitations et les commandes du système.

7. RESULTATS

La problématique de la gestion et du contrôle du système serre où cohabitent des sous-systèmes physiques et biologiques et dont l'ensemble est soumis aux actions et sollicitations du climat environnant, impose le développement des bases théoriques de modélisation et du contrôle du système et implique le choix du modèle et méthodes d'interprétation de tous les phénomènes physiques et biologiques qui s'y produisent. En ce sens, nous présentons sur le **tableau 1**, les valeurs des paramètres identifiés pour quatre séquences de mesures des variables d'entrée et de sortie. Les séquences sont pour des périodes de cinq jours pour les mois de janvier, mars, avril et mai.

Tableau 1: Valeurs identifiées pour les serres tunnel (ST) et les serres chapelle (SC) des paramètres

séq. 5J/mois	serre	T_{Si0} K	C_{Si} kJm ⁻² K ⁻¹	h_{Si} Wm ⁻² K ⁻¹	α -	K Wm ⁻² K ⁻¹	τ h	ε °C
Janvier	S.T	288	1740 ±1470	12.7 ±2.4	0.41 ±0.07	10.2 ±2.2	95.7	2.31

Mars	S.C	288	1417 ±1340	11.4 ±1.4	0.37 ±0.03	7.2 ±1.5	75.5	1.77
	S.T	289	794 ±317	16.1 ±4.2	0.30 ±0.02	12.4 ±3.6	41.7	1.71
	S.C	289	701 ±247	13.2 ±3.1	0.35 ±0.02	6.2 ±0.4	21.2	1.34
Avril	S.T	291	320 ±247	14.7 ±2	0.35 ±0.07	12.2 ±4.2	14.1	1.49
	S.C	291	295 ±114	12.4 ±1.4	0.32 ±0.05	7.4 ±1.7	11.5	1.17
Mai	S.T	293	124 ±74	11.7 ±1.9	0.42 ±0.04	11 ±3	12.4	0.57
	S.C	293	117 ±24	10.7 ±1.3	0.4 ±0.09	6.1 ±0.5	10.5	0.45

T_{SiO} , C_{Si} , h_{Si} , α , K et τ , avec le critère de minimisation $\varepsilon = \sqrt{J/N}$

Les paramètres fixes sont $AL\sqrt{C} = 0.26$, $\beta = 0.2$, $sf = 0.9\text{ m}^2$ et $df = 0.8\text{ m/s}$ pour les serres tunnel, $sf = 0.5\text{ m}^2$ et $df = 0.8\text{ m/s}$ pour les serres chapelle.

D'après les résultats du **Tableau 1** obtenu à partir de l'identification des paramètres de l'équation du bilan d'énergie utilisant le quotient de Bowen (éq. 8, 18 et 19) et selon que nous fixons ou que nous laissons libres la température initiale T_{SiO} , les critères obtenus ont tendance à s'améliorer et paraissent relativement viables.

Ils varient de 0,45 à 1,77 °C pour la chapelle et de 0,57 à 2,31 °C pour la serre tunnel. Ces valeurs sont relativement petites par rapport à la précision de la chaîne de mesures de la température de 0,5 °C, mis à part la séquence de janvier où la valeur de C_{Si} n'est pas réaliste et se démarque nettement des valeurs obtenues pour les autres séquences.

C_{Si} : les valeurs de la capacité calorifique du sol varie de 117 à 1417 $\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les serres chapelle et de 124 à 1740 $\text{kJm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les serres tunnel. La séquence de janvier reste hors normes.

h_{Si} : les valeurs du coefficient d'échanges convectifs entre l'air et le sol intérieur paraissent légèrement élevées.

α : les valeurs du taux d'absorption du rayonnement global extérieur par l'air intérieur et la végétation restent cohérentes et conformes à la réalité.

K : les valeurs du coefficient global de transmission de la chaleur à travers la paroi varient de 6.1 à 7.4 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les S. chapelle et 10.2 à 12.4 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ pour les S. tunnel. La variation de ce coefficient (K) qui est ± 0.5 à ± 1.5 pour les serres chapelles et de ± 2.2 à ± 4.2 pour l'autre type de serre, peut être admise et les valeurs de K restent cohérentes particulièrement de nuit.

τ : la constante de temps τ du système varie de 10.5 à 75.5 h pour la serre chapelle et pour la serre tunnel elle est comprise entre 12.4 à 95.7 h. C'est sur ce paramètre que l'amélioration était significative, excepté pour la séquence de Janvier.

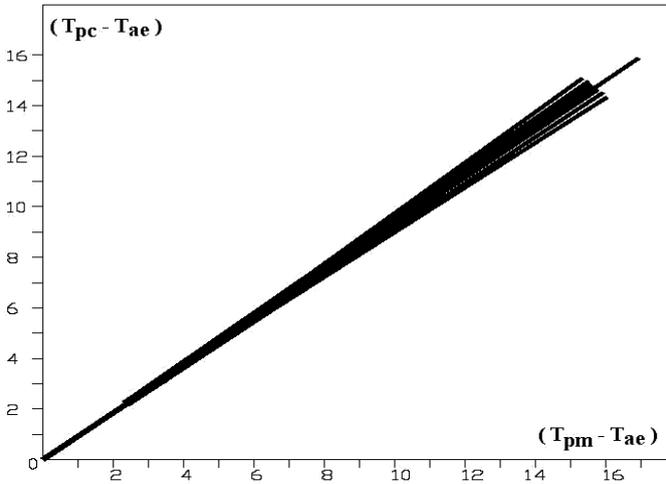


Fig. 8: Comparaison entre $(T_{pm} - T_{ae})$ et $(T_{pc} - T_{ae})$

Les écarts de températures mesurées $(T_{pi} - T_{pe})$ ont tendance à augmenter avec l'élévation de la vitesse du vent de 0 m/s à 10 m/s. Ils varient de 0.2 °C à 0.7 °C pour la serre chapelle et moins de 0.12 °C pour la serre tunnel. Les températures T_{pi} et T_{pe} mesurées sur la paroi en PE de la serre tunnel sont extrêmement proches, au regard de l'inertie du matériau. Les écarts de températures mesurées de la paroi pour les deux serres ont tendance à se rapprocher davantage quand la température T_{ae} augmente. Ils varient de 0.42 à 0.2 pour la serre chapelle et moins de 0.08 pour la serre tunnel.

L'estimation de la température de la paroi à partir de l'expression suivante:

$$T_p = T_{pe} = T_{ae} + \frac{K \times (T_{ai} - T_{ae})}{h_{pe}} \quad (20)$$

Déduite des équations (12) et (15) est relativement juste, vue les écarts $(T_{pi} - T_{pe})$ très petits. L'estimation de T_p est subordonnée au coefficient (K) de transmission de la chaleur à travers la paroi et aux coefficients d'échanges superficiels h_{pi} et h_{pe} qui se produisent au niveau de la paroi.

L'échantillon de courbes de la figure 9 exprime la variation du coefficient global de transmission de la chaleur à travers la paroi (K) en fonction de l'évolution de la température de la paroi T_p pour les deux serres chapelle et tunnel. Ces courbes confirment la non linéarité de coefficient (K) .

L'échantillon de courbes de la figure 10 exprime les variations du coefficient (K) en fonction de la vitesse du vent de 0 m/s à 10 m/s. Il ressort que le coefficient (K) a tendance à augmenter fortement sous l'effet de la vitesse du vent, allant de 0 m/s à 3 m/s. Cette évolution est moins accentuée jusqu'à la vitesse de 5 m/s, puis il varie très peu au-delà de cette vitesse.

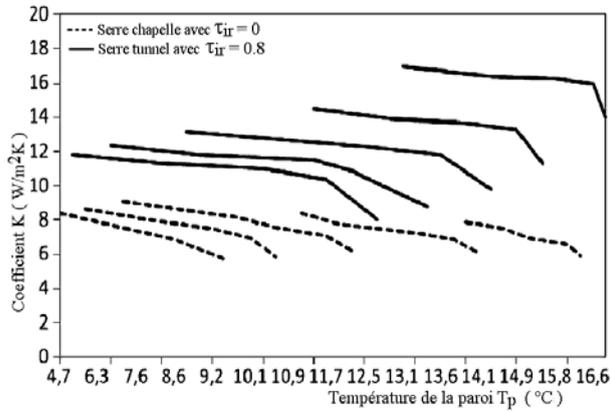


Fig. 9: Courbes de variation de K en fonction de la température de la paroi

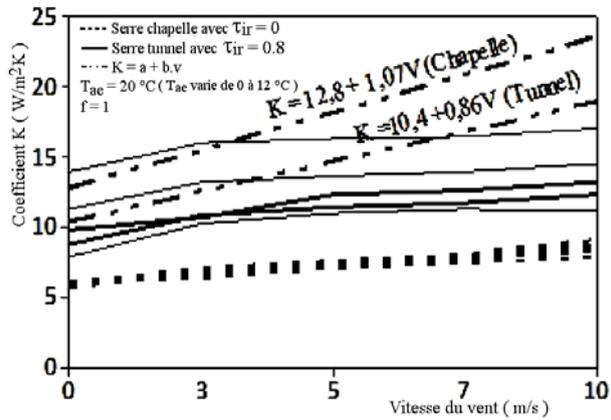


Fig. 10: Courbes de variation de K en fonction de la vitesse du vent

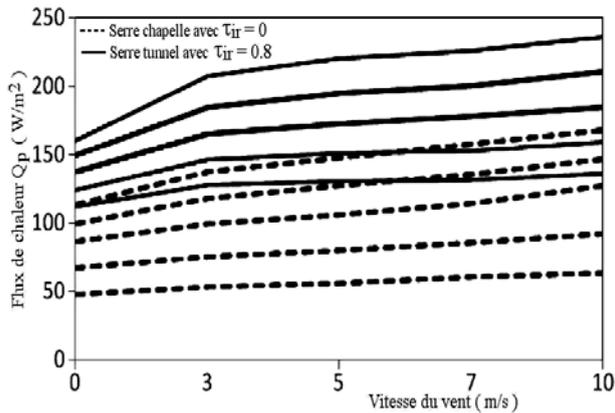


Fig. 11: Courbes des déperditions thermiques à travers la paroi de la serre en fonction de la vitesse du vent

Les courbes de la figure 11 représentent les déperditions thermiques à travers la paroi des deux serres chapelle et tunnel en fonction de l'évolution de la vitesse du vent allant jusqu'à 10 m/s et pour T_{ae} qui varie de 0 °C à 12 °C. On remarque que ces flux de chaleur sont relativement importants de $v = 0$ m/s à $v = 3$ m/s.

Sur la figure 12, il est présenté les courbes des déperditions convectives. Elles constituent une part importante dans les déperditions par les flux de chaleur à travers la paroi des deux serres chapelle et tunnel. Ceci illustre l'importance des effets du vent et de la ventilation des serres sur le comportement de la paroi et de l'ambiance interne.

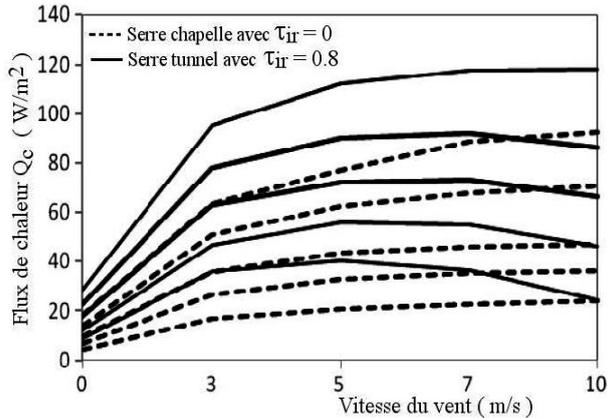


Fig. 12: Courbes de flux de chaleur par convection à travers la paroi de la serre en fonction de la vitesse du vent

8. CONCLUSION

Les travaux présentés dans cet article, ont permis de caractériser l'évolution du coefficient global de transmission de la chaleur à travers la paroi (K) selon les résultats de l'identification présenté dans le **tableau 1**.

Les échantillons de courbes matérialisent l'évolution du coefficient (K) en fonction de la vitesse du vent et de la température de la paroi de la serre. Elles confirment la non linéarité de ce coefficient (K). Le coefficient d'échanges global évoluant en fonction de la vitesse du vent noté $K = a + bv$ (Baille *et al.*, 1983), longtemps utilisé dans nos calculs est une droite linéaire. Elle surestime les valeurs de ce coefficient (K). Cette surestimation entraîne un gonflement des flux de chaleur à travers la paroi.

L'estimation de la température de la paroi en égalisant T_p et T_{pe} mesurée de la paroi, paraît correcte en vue des écarts ($T_{pi} - T_{pe}$) très petits. Elle nous permet de mieux appréhender les échanges superficiels radiatifs et convectifs au niveau de la paroi.

Les pertes convectives dues aux effets du vent et de la ventilation de la serre, constitue une part importante dans les déperditions globales des flux de chaleur à travers la paroi. Cette tentative d'identification n'est qu'un indicateur primaire.

D'autres travaux d'identification plus élaborés, élargi au bilan hydrique peuvent préciser davantage l'évolution du coefficient global de transmission de la chaleur à travers la paroi de la serre et caractérise mieux le comportement de la paroi de la serre

vis-à-vis des phénomènes d'échanges superficiels radiatives et convectives qui se produisent à son niveau.

NOMENCLATURE

A_l, C	Paramètres du modèle de renouvellement d'air de la serre
C_{Si}	Capacité calorifique du sol intérieur de la serre, KJ/m^2K
d_f	Débit de fuite, m^3/s
e	Epaisseur du matériau, m
h_{Si}	Coefficient d'échange convectif (air/sol), W/m^2K
h_{pi}, h_{pe}	Coefficient d'échanges superficiels (p. interne - p. externe), W/m^2K
K	Coefficient de transmission de chaleur, paroi de la serre, W/m^2K
K_l	Coefficient de transfert de chaleur latente par ventilation, W/m^2K
K_s	Coefficient de transfert de chaleur sensible par ventilation, W/m^2K
P_{ai}, P_{ae}	Pressions partielles de vapeur d'eau, air intérieur et extérieur, hPa
Q_{air}, Q_{sol}	Quantité de chaleur apportée par le système de chauffage à l'air intérieur et au sol intérieur, W/m^2
Q_c	Dépensements convectifs de la serre, W/m^2
Q_p	Flux de chaleur à travers la paroi de la serre, W/m^2
R_g	Rayonnement global extérieur, W/m^2
s_f	Surface de fuites, m^2
T_{ai}, T_{ae}	Température sèche de l'air intérieur, de l'air extérieur, K
T_{pi}, T_{pe}	Température de la face interne et externe de la paroi, K
T_{si}, T_{se}	Température du sol intérieur, du sol extérieur, K
τ	Constante de temps thermique du système, s
τ_{ir}	Facteur de transmission dans l'infrarouge (.)
v	Vitesse du vent, m/s
V	Volume, m^3
α	Taux d'absorption du rayonnement global par l'air de la serre (.)
β	Taux d'absorption du rayonnement global par le sol intérieur (.)
λ	Coefficient de conductivité thermique, W/mK

REFERENCES

- [1] J. Damagnez and J.P. Chipale, 'Recent Developments in Research on the Microclimate of Greenhouses: Applications to Plastic Greenhouses', INRA.
- [2] J.P. Chipale, A. Mareno et J. Damagnez, 'Influence du Climat Extérieur sur le Microclimat des Serres Niveau de la Surface d'Echange', Coll. ISHS, Acta Horticulturae 42: Symposium on Cultivation of Vegetables under Protection in the Mediterranean Regions
- [3] B. Nielsen and H. Madsent, 'Identification of Transfert Function for Control of Greenhouse Air Temperature', Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 60, N°1, pp. 25 - 34, 1995.

- [4] N. Bibi-Triki, F. Benyarou, B. Benyoucef et M.A.R. El-Sayed, '*Bilan Thermique d'Estimation des Besoins Energétiques de la Serre Agricole Tunnel à Double Paroi Constituée dans sa Face Nord d'un Mur en Panneau Sandwich*', Rev. Energ. Ren., Valorisation, pp. 77 – 82, 1999.
- [5] M.K. Ghosal, G.N. Tiwari, D.K. Das and K.P. Pandey, '*Modeling and Comparative Thermal Performance of Ground Air Collector and Earth Air Heat Exchanger for Heating of Greenhouse*', Energy and buildings, Vol. 37, N°6, pp. 613 – 621, 2005.
- [6] T. Boulard and B. Draoui, '*In-Situ Calibration of a Greenhouse Climate Control Model Including Sensible Heat, Water Vapour and CO₂ Balances*', 1994
- [7] D. Jain and G.N. Tiwari, '*Modeling and Optimal Design of Ground Air Collector for Heating in Controlled Environment Greenhouse*', Energy Conversion and Management, Vol. 44, N°8, pp. 1357 – 1372, 2003.
- [8] G.N. Tiwari, M.A. Akhtar, A. Shukla and M. Emran Khan, '*Annual Thermal Performance of Greenhouse with an Earth-Air Heat Exchanger: An Experimental Validation*', Renewable Energy, Vol. 31, N°15, pp. 2432 – 2446, 2006.
- [9] Mathala J. Gupta and Pitam Chandra, '*Effect of Greenhouse Design Parameters on Conservation of Energy for Greenhouse Environmental Control*', Energy, Vol. 27, N°8, pp. 777 – 794, 2002.
- [10] A.M. Abdel-Ghany and T. Kozai, '*On the Determination of the Overall Heat Transmission Coefficient and Soil Heat Flux for a Fog Cooled, Naturally Ventilated Greenhouse: Analysis of Radiation and Convection Heat Transfer*', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°15-16, pp. 2612 – 2628, 2006.
- [11] M.K. Ghosal and G.N. Tiwari, '*Mathematical Modelling for Greenhouse Heating by Using Thermal Curtain and Geothermal Energy*', Solar Energy, Vol. 76, N°5, pp. 603 – 613, 2004.
- [12] M.N. Bargach, A.S. Dahman and M. Boukallouch, '*A Heating System using Flat Plate Collectors to Improve the Inside Greenhouse Microclimate in Morocco*', Renewable Energy, Vol. 18, N°3, pp. 367 – 381, 1999.
- [13] G. Papadakis, M. Mermier, J.F. Meneses and T. Boulard, '*Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings*', Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 63, N°3, pp. 219 – 228, 1996.