

Modèle de bilan hydrique d'une serre horticole Application à l'identification

Belkacem Draoui ^{1*}, Thierry Boulard ², François Pascal Neirac ³ et Alain Baille ⁴

¹ Institut de Génie Mécanique, Centre Universitaire de Béchar, B.P. 417, 08000 Béchar, Algérie

² INRA-URIH, 400 Route des Chappes, B.P. 167, 06903 Sophia Antipolis, France

³ ENSMP, Centre d'Energétique, 06904 Sophia Antipolis, France

⁴ INRA, Station Plante et Système Horticole, 84914 Avignon Cedex 9, France

(reçu le 10 Juin 2006 - accepté le 30 Septembre 2006)

Résumé – Une méthodologie de caractérisation du bilan hydrique d'une serre horticole en régime dynamique a été développée. Un modèle réduit de connaissance a été établi à partir des équations biophysiques décrivant les principaux phénomènes, débouchant sur un modèle paramétrique. Ce modèle de comportement a été validé sur site, par mesure de ses entrées (sollicitations extérieures) et sa sortie (humidité,..). Finalement, les valeurs numériques des paramètres du modèle simplifié ont été identifiées et validées, à partir de mesures expérimentales et les propriétés prédictives du modèle ont été testées avec succès en utilisant des séquences de mesure n'ayant pas servi à l'identification des valeurs des paramètres du modèle.

Abstract – A methodology was developed to characterize in a dynamic regime the coupled energy and water vapor balance of the crop greenhouse system. A reduced model was built, based on equations describing the main physical and biological processes, then leading to a parametric formulation. This model was validated against in-situ measurements of the system inputs and output (humidity,..). Finally, the numerical values of the model parameters were identified in-situ from greenhouse measurements and are used to test the predictive quality of the model.

Mots clés: Bilan hydrique - Caractérisation - Gestion - Identification - Modélisation - Plante - Réduction - Serre - Transpiration.

1. INTRODUCTION

A la suite des travaux effectués ces vingt dernières années, beaucoup de progrès ont été faits dans l'étude et la modélisation du comportement thermohydrique des serres horticoles. Les applications de ces travaux ont surtout concerné le chauffage, qui est actuellement bien maîtrisé. Par contre, les autres fonctions de climatisation ont reçu peu d'attention, alors qu'elles constituent des atouts importants pour la qualité de la production sous serre, citons notamment:

- la gestion de la déshumidification par aération et chauffage,
- l'humidification et l'ombrage estival,
- le contrôle simultané de l'enrichissement en CO₂, de l'humidité et de la température,
- la gestion de l'irrigation.

Les problèmes liés au contrôle de ces fonctions doivent être abordés à partir des bilans couplés d'énergie et de masse (air, vapeur d'eau) et parfois du bilan de carbone (CO₂).

On a donc été amené à développer des modèles du climat des serres qui sont fondés sur l'écriture des bilans d'énergie au niveau des principaux constituants de la serre: les parois, l'air intérieur, la végétation, les différents horizons du sol. Ces bilans d'énergie sont complétés par l'écriture du bilan de vapeur d'eau de l'air intérieur de la serre. Ils aboutissent à l'élaboration de systèmes de n équations (les constituants de la serre) non linéaires à n inconnues (les variables d'état) qui peuvent être résolus par des méthodes numériques adéquates (Runge-Kutta, Newton-

* bdraoui@yahoo.com

Raphson, etc.). Ces modèles, mis en oeuvre sous forme de codes numériques associant la discrétisation spatiale aux techniques numériques classiques, aboutissent à l'élaboration de modèles de connaissance extrêmement détaillés.

Cependant, dans le cadre du contrôle, cette finesse de la description, utile pour des objectifs de recherche, est un obstacle au niveau des applications pratiques, car elle induit certains problèmes au moment de la mise en oeuvre des modèles:

- des problèmes de convergence et de choix du vecteur initial des solutions lors de la résolution numérique du système d'équations (qui peut être d'un ordre élevé et être constitué d'équations non linéaires);
- un problème de durée de temps de calcul, qui est fonction de la finesse du maillage;
- un problème de précision dans la connaissance et le choix des paramètres thermiques (résistances de contact, propriétés thermiques des matériaux très souvent hétérogènes, évoluant en fonction du temps comme le sol et la végétation), hydriques (pourcentage de surface mouillée, résistance aux transferts de vapeur d'eau) et biologiques (surface de feuille, structure du couvert);
- enfin, à la différence des autres systèmes thermiques tels que les bâtiments, dont les composants peuvent être considérés comme invariants dans le temps, les serres abritent des cultures qui évoluent dans le temps, on peut cependant considérer qu'elles ne varient pas sur des périodes courtes, égales ou inférieures à la semaine.

Ces paramètres culturaux sont difficiles à mesurer. Ainsi la surface de feuille par surface élémentaire de sol (ou surface foliaire, LAI) doit être estimée par des procédures destructives qui ne peuvent donc être répétées souvent. De même, la description détaillée des caractéristiques géométriques des feuilles et des rangées de végétation qui conditionnent l'absorption du rayonnement par le couvert ne sont connues qu'à l'issue de mesures complexes.

En conséquence, les travaux de modélisation des bilans couplés sont rarement validés, ou le sont sur des périodes très courtes (durée le plus souvent inférieure à la semaine) et sur des systèmes expérimentaux qui sont difficilement transposables en conditions de production.

Toutes ces difficultés expliquent que les modèles complexes 'serre/culture' soient difficilement utilisables tel quel pour le contrôle du climat sous serre; cependant, des techniques récentes, issues du domaine de l'automatique appliquée à la thermique des systèmes dynamiques [1-3] permettent maintenant de simplifier les modèles thermiques et de résoudre certains problèmes soulevés plus haut.

Il existe donc un besoin de modèles simplifiés mais réalistes qui puissent être utilisés dans le cadre du contrôle (multivariable) du climat des serres. Une approche empruntée à la théorie des systèmes et déjà appliquée dans le cadre de l'étude dynamique de la thermique des bâtiments semble pouvoir satisfaire à ce besoin.

L'objectif de ce travail est donc d'appliquer l'approche 'système' à une serre horticole. Plus particulièrement, il concerne la mise au point et le test d'une méthode de contrôle du comportement hydrique de la serre dont les paramètres statiques, ainsi que la constante de temps peuvent être identifiés in-situ.

Pour cela, il sera fait appel au formalisme mathématique emprunté à la théorie des systèmes et déjà mis en oeuvre dans le domaine du bâtiment. Dans ce cadre, on s'attachera à reproduire de façon réaliste les échanges d'eau du couvert végétal, et dans un second temps à tester la méthode et à identifier expérimentalement les paramètres de ce système.

2. LES PRINCIPES DE L'IDENTIFICATION APPLIQUES AU MODELE DE BILAN THERMOHYDRIQUE DES SERRES

L'utilisation des techniques d'identification des systèmes dynamiques repose sur une approche systémique des transferts thermiques. Dans cette approche, la modélisation d'un processus fait appel à trois types de grandeurs:

- les entrées du système (les grandeurs exogènes au système), qui sont la cause de son évolution dynamique et seront dénotées par le vecteur $U(t)$;
- les sorties du système, qui sont les variables au travers desquelles est observé le système; ce sont par définition des grandeurs pouvant faire l'objet d'une mesure expérimentale: [vecteur $Y(t)$];
- enfin l'état du système [vecteur $X(t)$] qui regroupe l'ensemble des variables (éventuellement non mesurables) permettant à un instant donné de caractériser son état dynamique.

La dynamique du système est généralement formalisée par un ensemble de deux équations liant ces grandeurs entre elles:

$$\text{- une équation d'état: } \frac{dX(t)}{dt} = f[X(t), U(t)] \quad (1)$$

$$\text{- une équation d'observation } Y(t) = g[X(t), U(t)] \quad (2)$$

Dans le cas de la thermique du bâtiment, on peut linéariser les seconds membres des équations (1) et (2). Les deux fonctions f et g seront donc des fonctions linéaires, et l'identification des coefficients des matrices qu'elles mettent en jeu a déjà donné des résultats satisfaisants [1-5].

Les techniques d'identification ont été également mises en oeuvre dans le domaine du contrôle de procédés biotechniques, tels que les cultures d'algues en vue de la production de biomasse [6]. En revanche, on ne relève pas d'application des méthodes d'identification concernant des modèles thermohydriques de serre qui prennent en compte des processus biologiques tels que la transpiration du couvert végétal.

La transposition de ces méthodes au cas des serres agricoles se heurte en effet à certaines difficultés, liées d'une part au couplage étroit entre transferts de chaleur sensible et chaleur latente dans la serre (qui rendent le système non linéaire), d'autre part à la modélisation du fonctionnement de la transpiration des plantes du couvert. Dans notre étude, le système 'serre + végétation' sera approché au travers des variables suivantes:

Entrées $U(t)$	R_g Rayonnement global; V Vitesse du vent; s Surface ouverte des ouvrants;
	ϕ_1 Energie absorbée par brumisation; p_e Pression de vapeur d'eau de l'air extérieur;
	T_r Flux de transpiration de la culture
Sorties $Y(t)$	p_i Pression de vapeur d'eau de l'air intérieur
Etat $X(t)$	p_i Pression de vapeur d'eau de l'air intérieur

Nous donnons dans les paragraphes suivants la forme générale des équations liant ces différentes variables et conduisant à la modélisation du système (équations d'état et d'observation du système). Elles conduisent à un système couplé faisant intervenir un grand nombre de paramètres, ce qui, comme nous le verrons, pose des problèmes quant à l'obtention de résultats précis par identification.

3. MODELE DE CONNAISSANCE DECRIVANT LE BILAN THERMOHYDRIQUE DE LA SERRE

3.1 Schéma général

On représente généralement la serre comme un système monodimensionnel constitué de quatre milieux distincts: la paroi séparant l'intérieur de l'extérieur, l'air intérieur, les plantes et

enfin le sol. On considère que chacun d'eux est homogène, à l'exception du sol, du fait de l'hétérogénéité de sa composition et de son humidité.

Ces milieux sont le siège d'échanges thermiques et évapocondensatifs qui sont récapitulés sur la figure 1. On distingue les échanges radiatifs de courte longueur d'onde (Fig. 1a) aussi bien directs que diffus, qui sont transmis, réfléchis ou absorbés par les différents milieux considérés. On distingue également les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre ces milieux, le ciel et l'extérieur (Fig. 1b); les échanges conductifs et convectifs (Fig. 1c) et enfin les échanges de masse et évapocondensatifs (Fig. 1d) qui sont fortement liés à la transpiration des plantes.

Ces différents modes d'échange n'ont cependant pas la même importance selon le degré de précision recherché et l'objectif de la simulation mise en oeuvre.

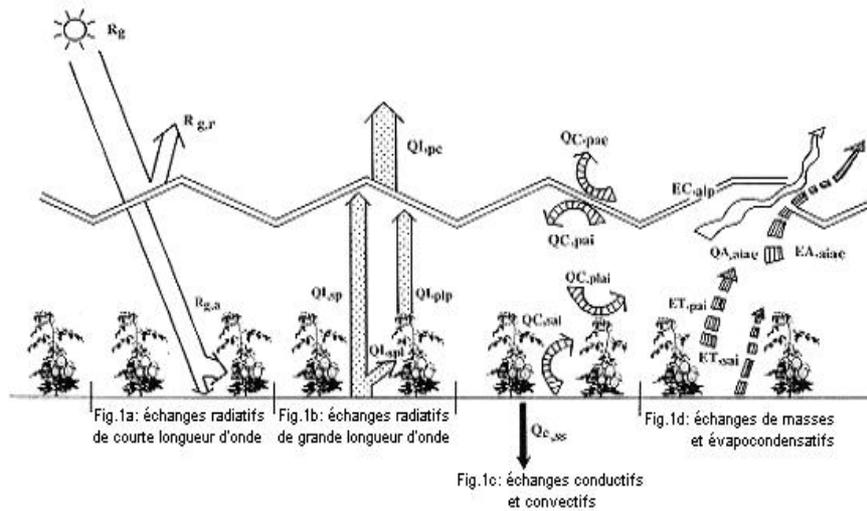


Fig. 1. Schéma de différents échanges thermiques et de masse considérés dans la modélisation du climat dans une serre

3.2 Modèle dynamique général

On considère que la serre est constituée de j compartiments, de caractéristiques thermophysiques connues (température T , volume v , capacité thermique C_p , surface d'échange S_j). Le bilan d'énergie d'un compartiment j échangeant de l'énergie avec les autres compartiments peut être représenté par une équation simplifiée du type:

$$\rho C_{pj} \frac{v_j}{S_j} \frac{dT_j}{dt} = \sum \left((T_j - T_{j+1}) \pm EC_j + R_{gj} \right) \quad (3)$$

où le 1^{er} terme du membre de droite regroupe l'ensemble des échanges conductifs, convectifs et radiatifs de grande longueur d'onde, le paramètre K_{sj} représentant le coefficient d'échange global par conduction, convection et rayonnement de grande longueur d'onde entre les compartiments j . Le second terme EC_j correspond à la chaleur latente des échanges évapo-condensatifs et le 3^{ème} terme R_{gj} à l'absorption du rayonnement de courte longueur d'onde (rayonnement solaire).

De même, l'équation du bilan de vapeur d'eau d'un compartiment j peut s'écrire:

$$v_j \frac{C_{p_j}}{S_j} \frac{dp}{dt} = \sum K_{1j} (p_j - p_e) \pm EC_j \quad (4)$$

où le premier terme du membre de droite regroupe les différents types d'échanges liés au transport et le second correspond aux échanges évapocondensatifs dont la transpiration, T_r , est la plus importante composante.

Généralement, les modèles publiés dans la littérature [7-9] considèrent les constituants suivants (Fig. 3a): - la ou les parois selon qu'il s'agit d'une serre simple ou double paroi; - l'air intérieur, avec les bilans d'énergie et de vapeur d'eau correspondant; - la culture; - la surface du sol; - 3 ou 4 couches successives de sol.

On détermine ainsi un système de 8 à 10 équations, susceptible d'être simplifié.

3.3 Modèle simplifié

La simplification des modèles thermiques peut être entreprise, comme cela a été le cas dans le domaine du bâtiment [3-5], à partir de la théorie de l'analyse modale ou bien, plus empiriquement, à partir de l'analyse des temps caractéristiques des transferts de chaleur entre les éléments du modèle considéré. Dans le cadre de la modélisation thermohydrique des serres, c'est cette dernière approche que nous avons utilisée.

Les connaissances théoriques acquises en matière de thermique des serres [7-9] et les modèles simplifiés [13, 14] qui en découlent, nous ont conduit à écrire des équations d'évolution réalistes selon le formalisme des formules (1) et (2) reflétant les différents modes de transfert thermique et de vapeur d'eau dans une serre, et synthétisant les phénomènes de transfert pris en compte dans les équations (3) et (4).

On considérera que la serre (Fig. 3b) est constituée d'un élément.

- l'air et la végétation, de temps caractéristique faible ($\tau_a = 200$ s, $\tau_v = 1000$ s) par rapport au temps de scrutation (3600 s) et qui sont également le siège d'échanges évaporatifs. Les mécanismes évaporatoires, liés à la transpiration des plantes, permettent de maintenir la température des feuilles à une température sensiblement égale à celle de l'air, à ± 1 degré près [12], légèrement inférieure en période nocturne et légèrement supérieure en période diurne (Fig. 2). On considérera donc que ces deux éléments sont regroupés en un seul, dont on négligera la capacité thermique et que l'on appellera, sans doute abusivement, 'l'air de la serre'. Il sera caractérisé par sa température résultante T_i et sa pression de vapeur d'eau p_i . Cependant, dans le cas de modèles utilisés pour le contrôle en ligne, où le pas d'observation est de l'ordre de quelques minutes, l'inertie de ce dernier compartiment ne pourra pas être négligée.

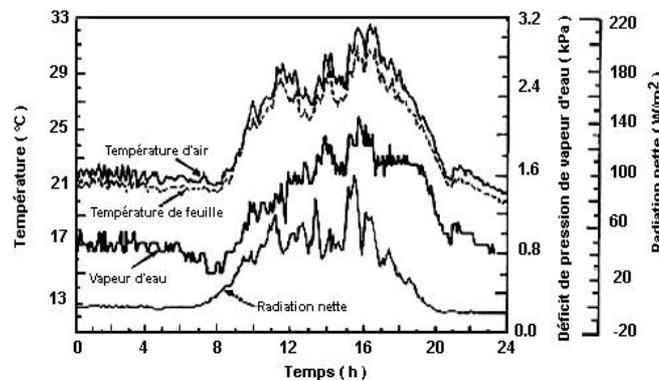


Fig. 2: Exemple d'évolution journalière de la température intérieure d'air et de feuille pour une tomate sous serre en fonction du rayonnement net et du déficit de saturation [12]

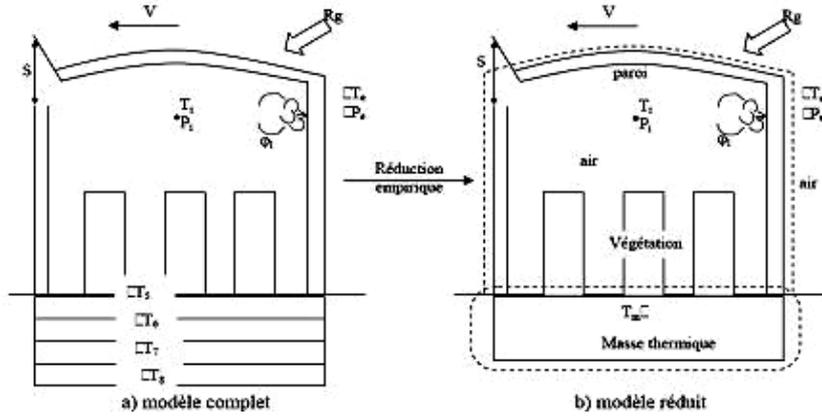


Fig. 3: Schéma de différents compartiments et termes du bilan thermohydrique d'une serre

Le modèle mathématique du système est obtenu en écrivant le bilan de vapeur d'eau en un noeud. Sa représentation selon la symbolique RC est représentée sur la figure 4.

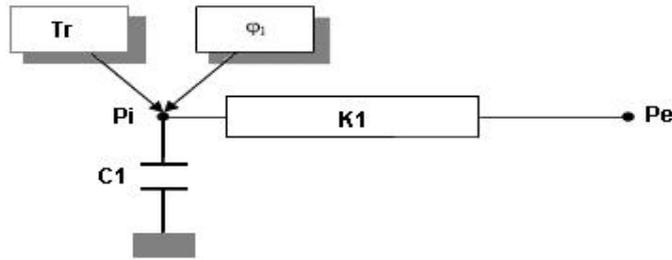


Fig. 4: Modèle de serre RC d'ordre 1, du bilan hydrique

- Bilan de la vapeur d'eau

$$C_1 \frac{dp_i}{dt} = T_r - K_1 (p_i - p_e) + \phi_1 \quad (5)$$

$C_1 = \rho C_p v / \gamma S$ est la capacité calorifique équivalente de la vapeur d'eau de l'air;

h est le coefficient d'échange convectif entre l'air intérieur et cette masse thermique;

K est le coefficient d'échange global à travers les parois;

$K_1 = \rho C_p G_v / \gamma S$ caractérise les pertes latentes des transferts de chaleur par infiltration.

Elles sont proportionnelles au débit volumique d'air ventilé G_v ;

ϕ_1 est la quantité d'énergie extraite par brumisation.

La transpiration T_r peut être représentée de façon simplifiée mais néanmoins précise [15, 16] par une fonction du rayonnement global sous serre R_{gi} et du déficit de saturation de l'air de la serre $D_i = [p^*(T_i) - p_i]$:

$$T_r = A R_{gi} + B D_i \quad (6)$$

L'équation (5) devient alors:

$$C_1 \frac{dp_i}{dt} = A \tau' R_g + B (p^*(T_i) - p_i) - K_1 (p_i - p_e) + \phi_1 \quad (7)$$

Dans le cas de la ventilation naturelle des serres, on a montré que G_v est lié à la vitesse du vent V , à la surface ouverte des ouvrants s [17], mais aussi aux fuites: celles liées au vent, s_0 , et indépendantes du vent, d_0 et où F est un paramètre fixe caractéristique de l'aération de la serre. On a donc:

$$G_v = \left\{ \frac{(s + s_0)}{2} \right\} FV + d_0 \quad (8)$$

Dans le traitement du bilan de vapeur d'eau, l'activité transpiratoire des plantes est prise en compte:

- soit en utilisant la transpiration mesurée T_r comme entrée du système (5);

- soit en modélisant la transpiration T_r (modèle simplifié de la transpiration d'une culture de tomate empruntant une approche physique) en fonction de deux sollicitations extérieures: le rayonnement intérieur $R_{g_i} = \tau' R_g$ et le déficit de saturation de l'air intérieur D_i (eq. 7). Les valeurs de A et B sont caractéristiques d'une culture et prennent en compte son indice foliaire LAI, exprimé en m^2 de feuille par m^2 de sol de la serre.

On sait également que le rapport $r = A/B$ possède une valeur constante [16] que l'on peut fixer, ce qui permet de diminuer d'une unité le nombre de paramètres à déterminer.

Nous verrons par la suite que, selon que l'on peut disposer ou non de la mesure de la transpiration (par exemple au moyen de lysimètre), nous adopterons la forme (5) ou (7) pour le modèle de bilan de vapeur d'eau.

3.4 Résolution de l'équation du bilan de vapeur d'eau

Le bilan de vapeur d'eau de la serre peut être traité indépendamment du bilan de chaleur sensible. Son intégration permet alors de présenter l'équation de p_i sous forme récursive entre le pas de temps $n+1$ et n , en fonction des sollicitations et des caractéristiques du système: T_r , p_e , φ_1 pour l'équation (8) et en fonction de R_g , p_e , $p^*(T_i)$, A , B , K_1 pour l'équation (7).

En considérant T_r comme une entrée, on obtient après intégration l'équation suivante:

$$p_{i,n+1} = p_{i,n} \exp(-\eta \Delta t) + (1 - \exp(-\eta \Delta t)) \begin{pmatrix} \frac{1}{\eta v \delta} & 1 & \frac{1}{\eta v \delta} \\ & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_r \\ p_e \\ \varphi_1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Si on modélise la transpiration selon l'équation (9), on obtient la forme récurrente suivante:

$$p_{i,n+1} = p_{i,n} \exp(-\zeta \Delta t) + (1 - \exp(-\zeta \Delta t)) \begin{pmatrix} \frac{rSB\gamma\tau'}{\xi} & \frac{\chi}{\xi} & \frac{\gamma SB}{\xi} & \frac{\gamma S}{\xi} \\ & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_g \\ p_e \\ p^*(T_i) \\ \varphi_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

La signification des symboles η , δ , ζ , ξ et χ qui combinent des paramètres biophysiques est donnée en annexe 1. Les variables τ et v des équations (12, 13) représentent des combinaisons de paramètres biophysiques et sont données en annexe 1.

4. APPLICATION DE LA METHODE A UNE SERRE BICHAPELLE ABRITANT UNE CULTURE DE TOMATES

4.1 Dispositif expérimental

L'étude expérimentale a porté sur une serre expérimentale (Fig. 5), à double paroi plastique, de $416 m^2$, située dans la région d'Avignon.

Les mesures de température sèche et humide ont été effectuées à l'aide de sonde cuivre (précision $\pm 0,1^\circ\text{C}$) situées à 1,5 m du sol au milieu de la serre; le rayonnement à l'aide de pyranomètres (précision de $\pm 5 \text{ W.m}^{-2}$) situé sur le toit de la serre, coté nord; la transpiration par lysimètre (balance électronique supportant quatre plantes et leur substrat, d'une précision de $\pm 1\text{g}$), l'apport de chauffage par compteur de calories ($\pm 10 \text{ W.m}^{-2}$), la vitesse du vent par anémomètre à coupelle (seuil de démarrage = $0,5 \text{ m.s}^{-1}$) situé sur le toit de la serre, coté nord. Toutes ces mesures ont été enregistrées chaque minute et moyennées sur l'heure pendant la période de culture, de mars à juillet 1991. Les valeurs des variables de commande (ouverture des ouvrants et flux de brumisation) ont été également mesurées et moyennées sur le même pas de temps pendant toute cette période.

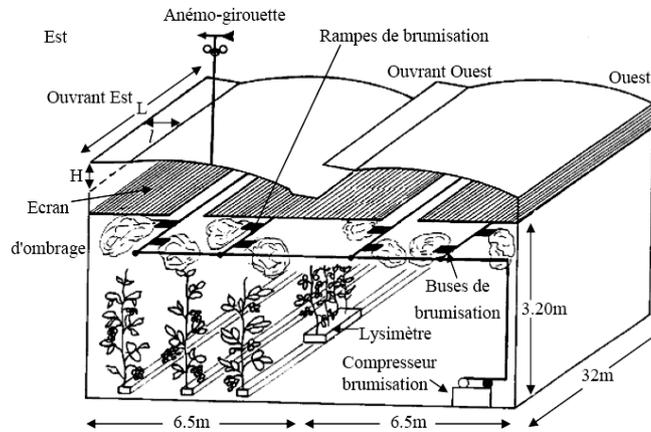


Fig. 5: Schéma de la serre expérimentale (416 m^2) et les dispositifs de climatisation

4.2 Identification des paramètres

Le degré d'accord entre le modèle de comportement 'serre' et le modèle de connaissance 'équations physiques' sera évalué à travers le critère de minimisation (noté J) qui mesure l'écart quadratique moyen des valeurs mesurées (Y) et estimées des sorties (Y^*) du système pendant l'intervalle de temps étudié.

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (Y^* - Y)^2 \quad (11)$$

Le critère J devient somme des carrés de l'écart de pression, pondérée par des coefficients de la pression. La méthode de minimisation du critère qui conduit à l'obtention des paramètres optimaux est un programme écrit en Fortran, empruntant l'algorithme de Marquardt et baptisé LADYS (Logiciel d'Analyse DYnamique des Serres) qui a été développé en collaboration avec le L.A.S.H (Laboratoire des Sciences de L'Habitat de l'ENTPE) et l'E.M.P (Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis).

4.3 Résultats

4.3.1 Bilan de vapeur d'eau

Les tableaux 1 et 2 récapitulent pour la même période les valeurs identifiées ou fixées des paramètres du modèle de bilan de vapeur d'eau et le critère d'estimation de p_i , J . On a considéré successivement, le paramètre d'aération F soit comme étant fixe (**Tableau 1**) soit à identifier (**Tableau 2**). De même, deux types de modèles ont été pris en compte:

-eq (5), pour le mois d'avril, où la transpiration T_r a été mesurée et peut être prise comme sollicitation;

-eq (7), qui modélise la transpiration à partir du rayonnement et du déficit de saturation de vapeur d'eau de l'air intérieur (tous les mois sont traités).

Les flux mis en jeu et les paramètres à identifier pour ces flux sont moins nombreux que ceux du bilan d'énergie: ce sont F , s_0 , d_0 , B . Ce dernier paramètre ne figurant pas dans le bilan d'énergie alors que les autres paramètres sont communs aux deux bilans.

Tableau 1: Valeurs identifiées de B pour 4 séquences d'avril à juillet, et le critère J

Période	B [W.m ⁻² .mbar ⁻¹]	$1/\zeta$ [min]	Critère J [mbar]
Avril	$5,57 \pm 0,232$	24,5	1,85
Avril	$0,23^* \pm 0,01$		1,4
Mai	$8,92 \pm 0$	15,3	1,45
Juin	$4,29 \pm 0$	31,7	1,91
Juillet	$4,42 \pm 0$	30,8	1,22
Valeurs citées dans la littérature [16]	5 à 12		

Paramètres fixés: $p_{i0} = 16$ mb, $F = 0,2$, $s_0 = 0,7$ m², $d_0 = 0,6$ m³.s⁻¹,

coefficient de brumisation = 1; $1/\zeta$: constante de temps calculée pour $V = 0$ et $d_0 = 0$.

*: T_r est pris comme sollicitation.

Tableau 2: Valeurs identifiées de F et B pour 4 séquences d'avril à juillet, et critère J

Période	F	B [W.m ⁻² .mbar ⁻¹]	$1/\zeta$ [min]	Critère J [mbar]
Avril	$0,106 \pm 0,01$	$3,86 \pm 0,204$	35,3	1,74
Mai	$0,238 \pm 0,027$	$10,15 \pm 0,145$	13,4	1,45
Juin	$0,31 \pm 0,032$	$5,84 \pm 0$	23,3	1,76
Juillet	$0,307 \pm 0,0156$	$8,02 \pm 0$	17,0	1,24
Valeurs citées dans la littérature [14, 16 et 22]	0,2 à 0,25	5 à 12		

Paramètres fixés: $p_{i0} = 16$ mb, $F = 0,2$, $s_0 = 0,7$ m², $d_0 = 0,6$ m³.s⁻¹,

coefficient de brumisation = 1; $1/\zeta$: constante de temps calculée pour $V = 0$ et $d_0 = 0$.

*: T_r est pris comme sollicitation.

Une fois fixées les valeurs des paramètres communs aux bilans d'énergie et de vapeur d'eau (F , s_0 , d_0), on peut identifier une valeur du coefficient B qui intervient de façon prépondérante dans le modèle de transpiration. Les valeurs estimées de B (Fig. 6) sont en bon accord avec celles estimées à l'aide de lysimètres [15, 16] qui varient de 5 à 12 suivant le stade de développement de la culture. L'augmentation de B , que l'on peut observer d'avril à mai, correspond au développement du couvert végétal, puis à sa stabilisation à partir de cette date (effeuillage). L'identification de B permet de recalculer la transpiration à travers l'équation 6.

Si on laisse libre le coefficient d'aération F (**Tableau 1**), on observe une légère amélioration du critère et on identifie des valeurs de ce coefficient dont l'ordre de grandeur est très proche de celui qui a été déduit de mesures de renouvellement d'air faisant appel à la technique des gaz traceurs [21].

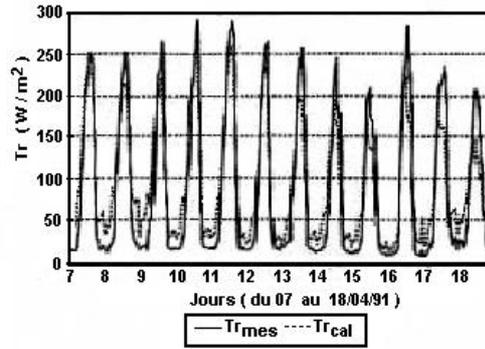


Fig. 6: Valeurs de la transpiration de la culture mesurées (Tr_{mes}) et calculées (Tr_{cal}) à l'aide des paramètres identifiés in situ

La précision de l'estimation de p_1 est bonne, comme l'illustrent les valeurs de J (1,2 à 2,3 mbar) et les graphes des valeurs de p_1 mesurées et calculées (Fig. 7).

Comme on le verra plus loin pour la température (cf 4.3.2) et sans que l'on sache en définir précisément la cause, on observe une amélioration sensible de la détermination de p_1 lorsqu'on passe de la période froide (avril) à la période plus chaude (juillet).

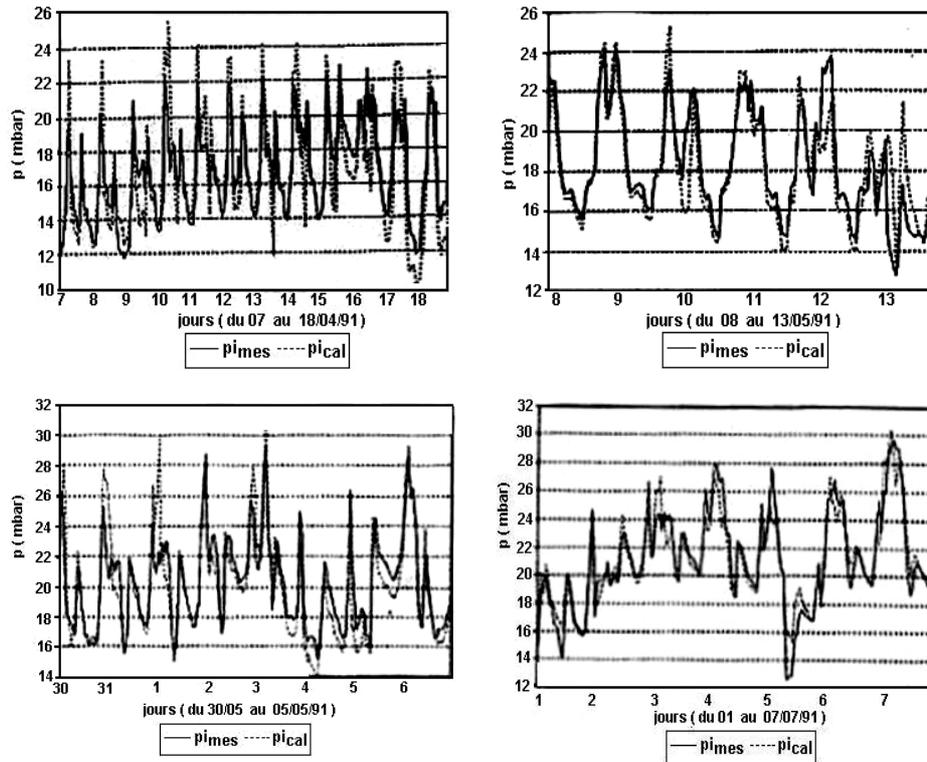


Fig. 7: Valeurs de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air de la serre mesurées (p_{mes}) et calculées (p_{cal}) à l'aide des paramètres

Enfin, la constante de temps $1/\zeta$ correspondant à l'équation (11), est comprise entre un maximum de l'ordre de 35 minutes et un minimum de l'ordre de 13 minutes soit, dans tous les cas de figure, une durée inférieure au pas de temps de l'observation. Une prise en compte du bilan de vapeur d'eau sous une forme stationnaire serait donc suffisante lorsque le pas de temps d'observation excède la 1/2 heure comme dans notre cas. En conclusion partielle, il apparaît que les techniques d'identification des systèmes dynamiques appliquées jusque là aux phénomènes d'échanges thermiques conviennent également aux échanges de vapeur d'eau, même lorsque ceux-ci font intervenir des phénomènes biologiques comme la transpiration de la culture.

5. CONCLUSION

Cette étude théorique et expérimentale a montré que les principes de l'identification peuvent être appliqués au bilan hydrique d'une serre cultivée, en s'inspirant notamment des recherches et de la méthodologie d'identification utilisée dans le cadre du bâtiment. On obtient ainsi un modèle simplifié décrivant de façon réaliste le comportement hydrique d'une serre cultivée et il est possible d'identifier les paramètres de la culture. Les valeurs de ces paramètres sont cohérents sur les plans physique et biologique et permettent de recalculer, avec une bonne précision, l'humidité interne de la serre ainsi que la transpiration de la culture.

Les fuites influencent surtout le bilan de vapeur d'eau en équilibrant, en tant que puits, la source que constitue la transpiration de la culture. En conséquence, le fait de négliger les fuites lorsque la serre est fermée minimise l'estimation de la transpiration qui elle-même minimise l'énergie utilisée pour la transpiration.

Remerciements - Ce travail a été rendu possible d'une part, grâce au soutien financier de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et, d'autre part, grâce à l'aide technique de M. Mermier et G. Conus de la Station de Bioclimatologie.

NOMENCLATURE

A, B	Paramètres du modèle de transpiration ($W.m^{-2}hPa^{-1}$)
F	Paramètre du modèle de renouvellement d'air de la serre (.)
C_1	Capacité thermique équivalente de la vapeur d'eau de l'air ($JhPa^{-1}.m^2$)
C_p	Capacité thermique massique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D_i	Déficit de saturation (hPa)
d_0	Débit de fuite ($m^3.s^{-1}$)
G_v	Débit d'air volumique ($m^3.s^{-1}$)
K_1	Coefficient de transfert de chaleur latente par ventilation ($W.m^{-2}hPa^{-1}$)
L	Enthalpie de vaporisation ($J.kg_{eau}^{-1}$)
LAI	Indice foliaire (m^2 de feuille. m^{-2} de sol)
$p^*(T_i)$	Pression de vapeur d'eau saturante à la température T_i (hPa)
r	Rapport A/B (s/m)
R_g	Rayonnement global extérieur (Wm^{-2})
$S_{j,n}$	Surface d'échange entre compartiments constitutifs de la serre (m^2)
s	Surface ouverte des ouvrants (m^2)
s_0	Surface de fuite (m^2)
p_e	Pression partielle de vapeur d'eau de l'air extérieur (hPa)
p_i	Pression partielle de vapeur d'eau de l'air intérieur (hPa)

T_r	Transpiration de la culture ($W.m^{-2}$)
U	Vecteur des grandeurs exogènes au système (solllicitations)
V	Vitesse du vent (ms^{-1})
v	Volume de la serre (m^3)
X	Vecteur des variables d'état du système
Y	Vecteur des variables d'observations du système (sortie)
Δt	Pas de temps d'observation (s)
γ	Constante psychrométrique ($hPaK^{-1}$)
η	Constante de temps hydrique du système (s)
ϕ_1	Puissance apportée par le système de brumisation (Wm^{-2})
ρ	Masse volumique de l'air (kgm^{-3})
τ	Constante de temps thermique du système (s)
τ'	Transmittivité de la paroi (.)

N.B. Tous les flux sont ramenés au m^2 de sol. (.) : sans unité _ j : Indice correspondant aux compartiments de serre considérés _ n : Indice correspondant au pas de temps considéré

Annexe 1

Dans l'équation 9, au lieu d'identifier A et B, on peut n'identifier que B connaissant par ailleurs le rapport $r = A / B$.

Dans les équations (8 et 9), les paramètres sont:

$$\eta = ((F_s V) + (F_{s_0} V) + d_0) / v$$

$$\delta = (\rho L / S)$$

$$\zeta = ((F_s V) + (F_{s_0} V) + d_0 + (B \gamma S / \rho C_p)) / v$$

$$\xi = ((\rho C_p F_s V) + (\rho C_p F_{s_0} V) + (\rho C_p d_0) + B \gamma S)$$

$$\chi = \xi - B \gamma S$$

où η est la constante de temps du bilan hydrique, δ , ζ , ξ et χ des paramètres intermédiaires du système.

REFERENCES

- [1] P. Bacot, 'Identification de Modèles de Comportement des Systèmes Thermiques', Revue Générale de Thermique, pp. 15 – 21, 1985,
- [2] A. Neveu, P. Bacot et R. Regas, 'Modèles d'Evolution Thermique des Bâtiments - Conditions Pratiques d'Identification', Revue Générale de Thermique, pp. 413 – 420, 1986.
- [3] F.P. Neirac, 'Approche Théorique et Expérimentale des Modèles Réduits du Comportement Thermique des Bâtiments', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 267 p., 1989.
- [4] D. Petit, 'Système Thermique Diffus - Modélisation de leur Comportement par Identification de Modes Dominants', Revue Générale de Thermique, pp. 302 – 311, 1993.
- [5] P. André et J. Nicolas, 'Application de la Théorie des Systèmes à la Thermique du Bâtiment - Problème de Modélisation, d'Identification et de Contrôle', Revue Générale de Thermique, pp. 600 – 615, 1992.
- [6] A. Munack, 'Measurement and Parameter Identification Problems for Control of Biotechnical Process in the Computerized Greenhouse', Academic Press, Inc., pp. 75 – 93, 1993.
- [7] B.A. Kimball, 'A Modular Energy Balance Program Including Subroutines for Greenhouses and the Other Latent Devices', U.S.D.A., Agricultural Research Service, ARS-33, 360 p., 1986.

- [8] G. Issanchou, 'Modélisation Energétique des Serres - Contribution à la Mise au Point d'un Logiciel de Thermique Appliqué à l'Ingénierie des Serres', Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 250 p., 1991.
- [9] O. Jolliet, 'Modélisation du Comportement Thermique d'une Serre Horticole', Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 247 p., 1988.
- [10] C. Kittas, 'Détermination du Coefficient Global de Transmission de Chaleur à Travers la Paroi d'une Serre', Agric. and Forest. Meteorology, Vol. 69, pp. 205 – 221, 1994.
- [11] M. Baille, J.C. Laury et A. Baille, 'Influence du Matériau de Couverture sur les Echanges Energétiques d'une Serre : Etude Comparative Verre Normal-Verre à Faible Emmissivité', I. Agronomie, Vol. 3, N°3, pp. 197 - 202.
- [12] G. Papadakis, A. Frangoudadis and S. Kyritsis, 'Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Transfers Between a Tomato Crop and Greenhouse Environment', J. Agric. Engn. Res, Vol. 57, pp. 212 – 227, 1993.
- [13] K.V. Garzoli, 'A Simple Greenhouse Climate Model', Acta Horticulturae, Vol. 174, pp. 393 – 400, 1985.
- [14] T. Boulard and A. Baille, 'Analysis of Thermal Performance of Greenhouse as a Solar Collector', Energy in Agriculture, Vol. 6, pp. 17 – 26, 1987.
- [15] T. Boulard, A. Baille, M. Mermier et F. Villette, 'Mesure et Modélisation de la Résistance Stomatique Foliaire et de la Transpiration d'un Couvert de Tomate', Agronomie, Vol. 11, pp. 259 – 274, 1991.
- [16] T. Boulard and R. Jemaa, 'Greenhouse Tomato Crop Transpiration Model Application to Irrigation Control', Acta Horticulturae, 335, pp. 381 – 387, 1993.
- [17] T. Boulard, A. Baille et F. Le Gall, 'Etude de Différentes Méthodes de Refroidissement sur le Climat et la Transpiration de Tomates de Serre', Agronomie, Vol. 11, pp. 543 – 553, 1990.
- [18] D.W. Marquardt, 'An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non Linear Parameters', J. Soc. Indust. Appl. Math, 1963.
- [19] C.E.T.E., 'Elaboration d'un Logiciel Robuste d'Identification : L.A.D.Y.', Rapport final AFME, 1991.
- [20] C. Cools, R. Gicquel and F. Neirac, 'Identification of Building Reduced Models - Application to the Characterization of Passive Solar Components', International Journal of Solar Energy, Vol. 7, N°3, pp. 127 – 158, 1989.
- [21] T. Boulard, A. Baille and B. Draoui, 'Greenhouse Natural Ventilation Measurements and Modelling', Acta Horticulturae, International Workshop on Cooling Systems for Greenhouses, Tel Aviv, 1993.