

Étude comparative de la structure des modèles de transfert d'énergie et de masse dans les serres

R. LACROIX¹ et J.C. ZANGHI²

¹*Agricultural Engineering Department, Macdonald College of McGill University, 2111 Lakeshore Road, Ste-Anne de Bellevue, PQ, Canada H9X 1C0; et* ²*Département de physique, Université du Québec à Montréal, C.P. 8888, Succ. "A", Montréal, PQ, Canada H3C 3P8. Reçue le 4 juillet 1989; acceptée le 24 avril 1990.*

Lacroix, R. et Zanghi, J.C. 1990. Étude comparative de la structure des modèles de transfert d'énergie et de masse dans les serres. *Can. Agric. Eng.* 32:269-284. Afin de simuler numériquement les transferts d'énergie et de masse dans les serres, on doit d'abord construire un modèle ou en choisir un parmi ceux existants. Pour faciliter cette démarche, qui peut être laborieuse, nous avons effectué une classification des modèles trouvés dans la littérature. Deux groupes ont été identifiés: les modèles unicomposantes qui établissent les bilans d'énergie et de masse de l'air intérieur, et les modèles multicomposantes qui considèrent aussi la paroi, le sol et les plantes. Les modèles de ces deux groupes peuvent être statiques ou dynamiques. Deux grilles d'analyse ont été conçues afin de comparer la structure des différents modèles des deux principaux groupes.

Le choix d'un modèle est fonction des besoins des utilisateurs, du degré de complexité requis et des coûts associés aux différents choix. Le nombre de variables d'état et de flux augmente en passant des modèles unicomposantes aux modèles multicomposantes ou des modèles statiques aux modèles dynamiques; cela entraîne un plus grand nombre de paramètres à estimer. Potentiellement, les modèles plus complexes représentent mieux la réalité physique, mais le danger d'erreur et le temps de calcul pour les simulations sont aussi augmentés. Les modèles unicomposantes sont suffisants pour effectuer des analyses globales, rapides ou préliminaires. Des modèles multicomposantes sont requis pour étudier les comportements spécifiques des différentes composantes de la serre. Pour analyser le comportement du système avec de longs pas de simulation, les modèles statiques suffisent. Pour étudier le comportement du système à l'état transitoire, les modèles dynamiques sont nécessaires.

INTRODUCTION

Pour simuler numériquement les transferts d'énergie et de masse dans les serres, il faut construire un modèle ou en choisir un parmi ceux existants. Plusieurs modèles ont été développés jusqu'à présent. Il n'est a priori pas facile, pour un non-initié, d'effectuer un choix éclairé parmi ceux-ci, à cause du manque d'homogénéité qui semble exister. Une classification est donc nécessaire afin de comparer les modèles et de comprendre leur structure globale.

Sadler (1983) a classifié les modèles de transfert d'énergie et de masse dans les serres en cinq groupes. Le premier groupe rassemble les modèles empiriques, généralement basés sur des relations statistiques. Ils sont spécifiques à une serre particulière, à une région et à un climat. Le deuxième groupe est composé des modèles statiques unicomposantes, dans lesquels est établi le bilan énergétique d'une composante de la serre. Ils

servent surtout à prédire le comportement de l'air intérieur. Le troisième groupe est constitué des modèles statiques multicomposantes qui établissent le bilan énergétique de plusieurs composantes. On y retrouve habituellement la paroi, le sol, les plantes et l'air intérieur. Etant statiques, ils ne tiennent pas compte du stockage d'énergie dans les diverses composantes. Les modèles dynamiques multicomposantes forment le quatrième groupe. Ceux-ci établissent les mêmes bilans énergétiques que les modèles du groupe précédent, mais incluent également le stockage d'énergie, au moins dans une partie de la serre. Le cinquième groupe intègre tous les modèles qui tiennent compte des échanges de CO₂ entre l'air et les plantes.

Dans cette étude, nous avons repris certains éléments de la classification de Sadler (1983) pour faire une analyse comparative de la structure d'un certain nombre de modèles. Nous avons élaboré des grilles d'analyse permettant de comparer les variables impliquées, pour ainsi en dégager les domaines d'utilisation et des critères de choix. Nous n'avons pas analysé les modèles empiriques.

MÉTHODOLOGIE

Sadler (1983) utilise trois points de comparaison pour différencier les modèles: les conditions aux limites, les composantes pour lesquelles on établit un bilan d'énergie ou de masse, et les mécanismes de transfert impliqués. Nous avons repris ces trois points pour analyser plusieurs modèles trouvés dans la littérature. Après avoir passé en revue ces modèles, on s'aperçoit que plusieurs des conditions aux limites prises en compte sont communes, tels le rayonnement solaire, le vent, la température et l'humidité. Au niveau des composantes pour lesquelles on établit un bilan d'énergie ou de masse, nous pouvons établir une distinction entre les modèles unicomposantes et les modèles multicomposantes, comme suggéré par Sadler (1983). Pour différencier les modèles à l'intérieur de chacune de ces deux catégories, nous pouvons utiliser le troisième point de comparaison, à savoir les processus mis en cause dans la détermination des bilans d'énergie ou de masse. Parmi ces processus, il en existe un qui nous amène à définir de nouvelles catégories de modèles: le stockage de chaleur ou de masse. Les variables représentant le stockage permettent en effet de distinguer les modèles statiques des modèles dynamiques. Le stockage existe seulement

dans les modèles dynamiques.

Pour faciliter la comparaison des différents modèles, nous avons conçu une grille d'analyse pour les modèles unicomposantes et une autre pour les modèles multicomposantes. Nous avons répertorié les variables considérées dans divers modèles. Un crochet dans une case de la grille signifie qu'un terme se retrouve de façon explicite dans le modèle. Cela ne veut pas dire qu'il est traité de la même façon par les différents auteurs. Nous avons retenu seulement les variables considérées comme ayant un effet non négligeable dans les bilans thermiques ou massiques. Nous ne pouvons rapporter ici le traitement spécifique de chaque variable par les divers auteurs; une description plus complète a été faite par Lacroix (1988). Si certains modèles n'ont pas été cités ou classés dans les grilles d'analyse, une étude ultérieure permettrait de les introduire.

MODÈLES UNICOMPOSANTES

Les modèles unicomposantes sont spécifiques à l'air intérieur de la serre. Les modèles les plus simples ne tiennent compte que de deux termes, les pertes thermiques globales et les gains solaires, pour calculer la charge de chauffage ou de refroidissement (Seginer et Albright 1980; Lovseth 1981; Ewen et al. 1980). Comme ces modèles ne comprennent que ces variables, nous ne les avons pas inclus dans nos grilles d'analyse. Les modèles unicomposantes les plus complexes considèrent les différents processus de transfert séparément. La Fig. 1 constitue la grille d'analyse pour ces modèles. En ordonnée, on trouve la liste des auteurs dont les modèles sont analysés: Morris et al. (1958); Walker (1965); Price et Peart (1973); Rotz (1977); Shen (1977); Duncan et al. (1981); Arinze et al. (1982); Garzoli et Blackwell (1973); Landsberg et al. (1979); Milburn (1982); Wass et Barrie (1984); V. de Braak et al. (1984); Kimball (1986, unité 15).

(1982); Garzoli et Blackwell (1973); Landsberg et al. (1979); Milburn (1982); Wass et Barrie (1984); Van de Braak et al. (1984) et Kimball (1986). Ce dernier donne le choix de plusieurs modèles de transfert dans son programme de simulation MEB (Modular Energy Balance); nous analysons ici l'unité 15 qui constitue un modèle de serre simple. Nous n'avons pas analysé le modèle présenté par Elsner (1980) qui est essentiellement le même que celui de Landsberg et al. (1979). Le modèle de Garzoli et Blackwell (1981) a également été omis puisqu'il ne tient compte que du bilan énergétique de la paroi.

Analyse des modèles

En abscisse de la Fig. 1, nous avons trois parties principales. Dans la première, on retrouve les conditions aux limites du système étudié. La deuxième présente les variables d'état représentant les trois cycles importants trouvés dans une serre: les bilans énergétique, hydrique et de CO₂. Les mécanismes de transfert contribuant aux différents bilans établis dans les modèles sont décrits dans la troisième partie.

En examinant les cycles considérés, on s'aperçoit que tous les auteurs établissent le bilan énergétique de l'air. Seulement deux considèrent le bilan hydrique de l'air et aucun n'analyse le bilan de CO₂.

Au niveau des mécanismes servant à établir le bilan thermique, il y a d'abord les gains solaires qui sont inclus dans tous les modèles. La plupart des auteurs ont attribué une valeur moyenne au facteur de transmission de la paroi, qui n'est pas fonction de l'inclinaison ou de l'azimut des surfaces. Dans les modèles unicomposantes, l'énergie solaire est convertie en chaleur par le sol et les plantes, qui sont souvent considérés comme un tout. On attribue généralement une valeur moyenne

	CONDITIONS AUX LIMITES										CYCLES ANALYSES			FLUX CONSIDERES																		
	TEMPERATURE DIRECT-DIFFUS PAR-NAR*	RADIATIONS ATMOSPHERIQUES	VITESSE DIRECTION	HUMIDITE	TEMPERATURE DU SOL	RAPPORT DE BOMEN	CONCENTRATION DE CO ₂	BILAN ENERGETIQUE	BILAN HYDRIQUE	BILAN DE CO ₂	GAINS SOLAIRES	CONDUCTION GLOBALE PAROI	CONDUCTION THERMIQUES	PERTES A LA PERIPHERIE	STOCKAGE	INFILTRATION	VENTILATION NATURELLE	VENTILATION FORCEE	RESPIRATION	PHOTOSYNTHESE	TRANSPIRATION	EVAPORATION (PLANTES)	EVAPORATION (SOL)	SYSTEME DE TRANSPIRATION	EQUIPEMENT	SYSTEME DE CHAUFFAGE	CHAUFFAGE DE REFRIGERATION	REJETS THERMIQUES	GOUTTIERE	ECLAIRAGE INDUSTRIEL	ISOLATION	COUVERTURES THERMIQUES
MORRIS ET al. (1958)	✓	✓								✓	✓	✓																				
WALKER (1965)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
PRICE ET PEART (1973)	✓	✓								✓	✓	✓																				
ROTZ (1977)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
SHEN (1977)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
DUNCAN ET al. (1981)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
ARINZE ET al. (1982)	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓																				
GARZOLI ET BLACKWELL (1973)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
LANDSBERG ET al. (1979)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
MILBURN (1982)	✓	✓	✓	✓						✓	✓	✓																				
WASS ET BARRIE (1984)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
V. DE BRAAK ET al. (1984)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				
KIMBALL (1986, unite 15)	✓	✓		✓						✓	✓	✓																				

* PAR: RADIATIONS PHOTOSYNTHETIQUEMENT ACTIVES

NAR: RADIATIONS PHOTOSYNTHETIQUEMENT NON-ACTIVES

Fig. 1. Modèles unicomposantes.

au facteur d'absorption du tout ou on relativise les gains solaires par l'importance de la surface de chacun. On considère que le rayonnement absorbé est transformé en chaleur et que celle-ci est entièrement transmise à l'air. Landsberg et al. (1979) et Milburn (1982) ont considéré les gains solaires en tenant compte du rapport de Bowen, qui détermine la fraction de l'énergie solaire transformée en chaleur sensible et en chaleur latente.

Tous les modèles unicomposantes considèrent les pertes par les parois d'une serre comme étant un flux global pouvant comprendre les échanges par convection, par conduction, par radiation et même, parfois, par infiltration. Les pertes sont ainsi calculées par le produit d'un coefficient d'échange généralisé et de la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur. La valeur de ce coefficient diffère d'un auteur à l'autre, selon qu'il tient compte des échanges radiatifs ou de l'infiltration. Dans la plupart des modèles, ce coefficient est considéré comme constant et est quelquefois égal à l'inverse d'une somme de résistances lorsqu'il y a plusieurs couches. Shen (1977) a ajouté un terme pour simuler les pertes de chaleur par les gouttières séparant les serres jumelées.

Quatre modèles analysés comprennent un terme spécifique pour les échanges radiatifs entre l'intérieur de la serre et l'atmosphère. Le bilan radiatif entre la serre et l'atmosphère a été calculé en fonction de leur température et de leur émissivité respectives. Une valeur apparente a été attribuée pour l'émissivité de l'atmosphère extérieure. Presque tous les auteurs ont considéré la température de l'atmosphère comme étant égale à celle de l'air extérieur près de la surface du sol.

Peu d'auteurs ont calculé un échange thermique entre l'air intérieur et le sol de la serre; un seul a inclus un terme pour les pertes à la périphérie de la serre. Les autres ont souvent mentionné l'existence de pertes de chaleur dans le sol, mais ont considéré ce flux comme négligeable. Presque tous les auteurs ont inclus un terme pour la ventilation forcée ou naturelle ou pour l'infiltration. Il est souvent difficile de percevoir dans laquelle de ces trois catégories se situe le terme utilisé pour le renouvellement d'air. Pour la plupart des auteurs, ces pertes sont fonction du taux de renouvellement d'air. L'expression est donc applicable pour les trois catégories mentionnées et on a seulement à déterminer la valeur du taux de renouvellement d'air.

L'absorption de chaleur durant la photosynthèse et le rejet durant la respiration ont été mentionnés par plusieurs auteurs, mais peu ont considéré leur effet. La présence de plantes et du substrat de culture dans une serre crée des échanges hydriques importants, par le biais de la transpiration et de l'évaporation. A ces échanges sont associés des transferts énergétiques, puisqu'une grande quantité de chaleur est nécessaire pour vaporiser l'eau. Dans les modèles unicomposantes analysés, on ne retrouve pas de termes séparés pour la transpiration et pour l'évaporation; on considère plutôt l'effet combiné de l'évapotranspiration. On calcule celle-ci à l'aide d'une relation empirique pour évaluer la quantité d'eau évapotranspirée en fonction du rayonnement solaire et de la température intérieure, et on multiplie cette quantité par la chaleur latente de vaporisation. La quantité d'énergie associée à ce processus est considérée comme une perte nette dans le bilan énergétique, c'est-à-dire que toute la vapeur d'eau est considérée comme étant évacuée. Ainsi, toute la chaleur latente est perdue.

Dans la plupart des modèles, autres que ceux conçus pour

traiter des surchauffes causées par de fortes insolation, les pertes de chaleur des serres sont compensées à l'aide d'un système de chauffage. Des auteurs ont inclus des systèmes de chauffage solaire et d'autres ont étudié la récupération des rejets thermiques industriels. Certains ont mentionné que l'équipement installé dans une serre produit aussi une chaleur dont nous devons tenir compte dans le bilan thermique de la serre. Les effets de l'éclairage artificiel sur le bilan énergétique de la serre n'ont été considérés dans aucun des modèles étudiés.

Le temps de réponse d'une serre aux divers flux n'est pas instantané car sa masse thermique n'est pas négligeable. Quelques auteurs ont donc modélisé l'inertie thermique. A cet effet, Shen (1977) a ajouté un terme spécifique qui est fonction de la variation de température entre deux pas de calcul et de la capacité thermique de la serre. Celle-ci a été évaluée au triple de celle de l'air intérieur de la serre.

Le bilan de CO₂ n'est établi dans aucun des modèles analysés. Les différents flux dont on aurait pu tenir compte sont l'absorption par photosynthèse, le rejet par respiration, les échanges avec l'air extérieur et l'injection de CO₂.

Les conditions aux limites des modèles sont constituées des variables atmosphériques entourant la serre, de la température du sol pour certains modèles et du rapport de Bowen pour d'autres. La température ambiante extérieure et le rayonnement solaire ont été retenus dans l'ensemble des modèles. Peu d'auteurs ont considéré séparément le rayonnement direct et diffus; aucun ne l'a séparé en PAR-NAR (radiation photosynthétiquement active - radiation non photosynthétiquement active). Afin d'évaluer les échanges par radiations thermiques entre l'intérieur de la serre et l'atmosphère extérieure, Arinze et al. (1982) ont calculé les émissions radiatives de l'atmosphère en lui attribuant une température apparente. Walker (1965) a calculé l'émissivité apparente du ciel en considérant la nébulosité. La vitesse du vent a été utilisée dans la plupart des cas pour calculer sa contribution aux transferts par les parois ou pour le calcul de l'infiltration; sa direction n'a jamais été considérée. On a tenu compte de l'humidité extérieure dans plusieurs modèles pour calculer l'émissivité apparente de l'atmosphère, la quantité d'eau échangée avec l'extérieur par ventilation ou l'enthalpie de l'air extérieur. La température du sol a servi en deux occasions pour calculer les pertes de chaleur par le sol. Pour Landsberg et al. (1979) et Milburn (1982), le rapport de Bowen devient une condition aux limites de leur modèle, puisque sa valeur doit être fournie. Finalement, la concentration extérieure de CO₂ n'est pas un intrant pour les modèles, puisqu'aucun de ceux-ci établit le bilan de CO₂ à l'intérieur de la serre.

MODÈLES MULTICOMPOSANTES

La grille d'analyse pour les modèles multicomposantes est séparée en cinq sections et se trouve dans les Figs. 2 à 6. Dans la Fig. 2, on trouve les caractéristiques générales des modèles. Les quatre autres sections de la grille d'analyse (Figs. 3 à 6) sont spécifiques à une des composantes du système (air, paroi, sol et plantes). Nous avons déjà parlé de la présence de modèles statiques et de modèles dynamiques. Même si parfois ils se différencient peu, les modèles des différents auteurs sont présentés selon ces deux groupes dans la grille d'analyse. La première série de modèles est constituée des modèles statiques; nous retrouvons ensuite les modèles dynamiques.

	CONDITIONS AUX LIMITES										COMPOSANTES CONSIDEREES			CYCLES ANALYSES	INSTRUMENTS DE CONTROLE DU CLIMAT					GENERALITES															
	TEMPERATURE DIRECT-DIFFUS	RAYONNEMENT GLOBAL PAR-MAR	RADIATIONS ATMOSPHERIQUES	NEBULOSITE	VITESSE	DIRECTION	HUMIDITE	TEMPERATURE DU SOL	POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL	CONCENTRATION DE CO ₂	AIR	PAROI	SOL	PLANTE	BILAN ENERGETIQUE	BILAN HYDRIQUE	BILAN DE CO ₂	SYSTEME DE CHAUFFAGE	STOCKAGE SOLAIRE	SYSTEME DE REFRIGERATION	DESHUMIDIFICATEUR	ECLAIRAGE ARTIFICIEL	INJECTEUR DE CO ₂	ISOLATION	COUVERTURES THERMIQUES	DEVELOPPEMENT DES PLANTES	QUASI UNIDIMENSIONNEL	AIR	PAROI	SOL	PLANTE	INERTIE THERMIQUE	INERTIE HYDRIQUE	INERTIE CO ₂	
SELÇUK (1971)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
MAHER ET O'FLAHERTY (1973)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
KIMBALL (1973)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
KIMBALL (1986, unité 14)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
TAKAMI ET UCHIJIMA (1977)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SILVESTON ET al. (1980)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SEGINER ET KANTZ (1986)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SEGINER ET al. (1986)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
TAKAKURA ET al. (1971)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SELÇUK (1970)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SORIBE ET CURRY (1973)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
VAN BAVEL ET SADLER (1979)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KINDELAN (1980)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GLAUB ET TREZEK (1981)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AVISSAR ET MAHRER (1982)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AHMADI ET GLOCKNER (1982)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
COOPER ET FULLER (1983)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ARINZE ET al. (1984)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CORMARY ET NICOLAS (1985)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KIMBALL (1986, unité 5)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fig. 2. Modèles multicomposantes.

Les modèles statiques analysés sont ceux de Selçuk (1971); Maher et O'Flaherty (1973); Kimball (1973); Takami et Uchijima (1977a); Seginer et Kantz (1986); Seginer et al. (1986); et Silveston et al. (1980). Le modèle de Kimball (1973) a été raffiné et présenté par Kimball (1981) pour simuler le comportement de plusieurs types de serre; ce dernier constitue l'unité 14 du programme de simulation MEB (Kimball 1986). Les modèles des auteurs suivants n'ont pas été analysés: Businger (1963); Seginer et Levav (1971); Froelich et al. (1979); Chandra et Albright (1980); Amdurskey (1980); Van de Braak (1981); Bailey (1981); Bailey (1984); Garzoli et Blackwell (1981) et Garzoli et Blackwell (1987).

Les modèles dynamiques analysés sont ceux de Takakura et al. (1971); Selçuk (1970); Soribe et Curry (1973); Van Bavel et Sadler (1979); Kindelan (1980); Glaub et Trezek (1981); Avissar et Mahrer (1982); Ahmadi et Glockner (1982); Cooper et Fuller (1983); Arinze et al. (1984); Cormary et Nicolas (1985) et l'unité cinq du programme MEB (Modular Energy Balance) présenté par Kimball (1986). Notons que lors de l'analyse du modèle présenté par Van Bavel et Sadler (1979); nous avons tenu compte de certaines modifications apportées par Sadler (1983). Nous n'avons pas analysé les modèles dynamiques suivants: O'Flaherty et al. (1973); Bot et Van Dixhoorn (1979); Bot (1980); Tantau (1980); Udink ten Cate et Van de Vooren (1984); Nir et al. (1981); Parker et al. (1981); Short et al. (1981); Chandra (1979); Willits et al. (1983); Huang et Kato (1984); Meyer et al. (1984); Tunç et Venart (1984); Azevov et al. (1984) et Tiwari et Dhiman (1985).

La Fig. 2 fournit une vue d'ensemble des modèles analysés.

On y voit les cycles considérés dans chaque modèle. On constate que tous les modèles traitent du cycle de l'énergie et du cycle hydrique, alors que le cycle du CO₂ est considéré seulement dans deux modèles. Au niveau des composantes pour lesquelles on établit des bilans thermiques ou massiques, tous les auteurs considèrent l'air intérieur. Le bilan thermique de la paroi est calculé dans presque tous les modèles. Le sol et les plantes sont considérés par plusieurs auteurs. Mentionnons que quelques modèles établissent les bilans énergétiques sur plus de quatre composantes. Cependant, pour fin d'analyse, nous n'avons considéré que ces quatre composantes principales, la plupart des modèles multicomposantes n'incorporant que celles-ci.

L'air intérieur

La Fig. 3 présente les résultats de l'analyse pour l'air intérieur. Les premières colonnes indiquent les variables d'état considérées dans les modèles. On constate que tous les auteurs établissent les bilans énergétique et hydrique de l'air. Le bilan de CO₂ n'est retrouvé que dans deux modèles. A chacun de ces bilans est associée un ensemble de flux.

Les échanges convectifs avec la paroi, le sol et les plantes sont présents dans plusieurs modèles. Comme pour les modèles unicomposantes, le renouvellement d'air peut se décomposer en infiltration, en ventilation naturelle et en ventilation forcée. Si ces phénomènes sont clairement énoncés par les auteurs, leur présence est indiquée par un crochet dans la grille; sinon, on l'a indiqué comme étant "indéterminée". Seize auteurs ont inclus un terme pour le chauffage. Puisque

	VARIABLES D'ETAT			VARIABLES DE FLUX										CO ₂														
	TEMPERATURE	HUMIDITE	CONCENTRATION DE CO ₂	CHALEUR SENSIBLE					CHALEUR LATENTE																			
	PAROI	SOL	PLANTE	CONDUCTION PAR PAROI	VENTILATION	VENTIL. NATURELLE	RENOUVELLEMENT D'AIR	INERTIE THERMIQUE	REFROIDISSEMENT	GAINS SOLAIRES	ECHANGE AVEC LE SOL	INERTIE THERMIQUE	TRANSPIRATION	CONDENSATION	EVAPORATION	CONDENSATION	EVAPOTRANSPIRATION	CONDENSATION	EVAPORATION	RENOUVELLEMENT D'AIR	REFROIDISSEMENT	DESHUMIDIFICATEUR	SYSTEME DE CHAUFFAGE	INERTIE HYDRIQUE	ABSORPTION PAR LES PLANTES	REJET PAR LES PLANTES	INJECTION DE CO ₂	REJET PAR LE SOL
SELÇUK (1971)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAHER ET O'FLAHERTY (1973)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KIMBALL (1973)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KIMBALL (1986, unité 14)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TAKAMI ET UCHIJIMA (1977)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SILVESTON ET al. (1980)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SEGINER ET KANTZ (1986)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SEGINER ET al. (1986)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TAKAKURA ET al. (1971)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SELÇUK (1970)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SORIBE ET CURRY (1973)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VAN BAVEL ET SADLER (1979)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KINDELAN (1980)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GLAUB ET TREZEK (1981)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AVISSAR ET MAHRER (1982)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AHMADI ET GLOCKNER (1982)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
COOPER ET FULLER (1983)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ARINZE ET al. (1984)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CORMARY ET NICOLAS (1985)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KIMBALL (1986, unité 5)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

STATIQUE
DYNAMIQUE

Fig. 3. Modèles multicomposantes: l'air.

l'air ne participe pas aux échanges radiatifs, les échanges avec le système de chauffage se font au niveau convectif. Huit auteurs ont également tenu compte de la diminution de la température de l'air intérieur par des systèmes de refroidissement.

Nous avons mentionné que la différence entre les modèles statiques et dynamiques se situait essentiellement au niveau de l'inertie thermique ou massique d'une des composantes de la serre. Parmi les douze modèles dynamiques analysés, sept ont inclus un terme pour représenter le stockage d'énergie dans l'air. Cela signifie que dans ces modèles, les variations de température ne sont pas instantanées ou ne se font pas à l'intérieur de l'intervalle de temps correspondant au pas de simulation. Pour les autres modèles dynamiques et pour tous les modèles statiques, la température de l'air est toujours considérée en régime permanent.

La transmission de chaleur latente joue un grand rôle comme mode de transport d'énergie d'une composante à l'autre. La plupart des auteurs considèrent que les transferts d'humidité de ou vers l'air ne contribuent pas à son bilan énergétique; ils établissent cependant son bilan hydrique. Par contre, certains auteurs, en plus d'établir le bilan hydrique de l'air, considèrent que certains flux de chaleur latente contribuent à son bilan énergétique. Le plus grand apport de vapeur d'eau dans une serre est causé par la transpiration des plantes. Tous les modèles comprenant des plantes ont inclus ce flux. L'évaporation du sol contribue aussi d'une façon importante

au bilan hydrique et a été considérée par plusieurs auteurs. Les phénomènes de condensation et d'évaporation subséquente sur les diverses composantes de la serre constituent également des flux hydriques importants. Ainsi, la condensation sur les plantes peut favoriser le développement de certaines maladies (Seginer et Kantz 1986); dans ce cas, l'évaporation est souhaitée. Seul Kimball (1986, unité 14) a inclus la condensation sur les plantes, mais en ne considérant pas l'évaporation subséquente. La condensation sur le sol a été prise en compte dans deux modèles. La paroi est probablement la composante où la condensation met en jeu les plus grandes quantités d'eau. La plupart des auteurs en tiennent compte, alors que trois seulement prennent en compte une évaporation subséquente. Le renouvellement d'air amène des transferts de vapeur d'eau en plus des échanges de chaleur sensible. Tous les auteurs, à l'exception de Selçuk (1970) ont inclus ce terme dans l'établissement du bilan d'humidité. Nous n'avons pas détaillé la façon dont chaque auteur en tenait compte car, dans la majorité des cas, le calcul était le même que pour les échanges de chaleur sensible par renouvellement d'air. Sept auteurs ont inclus un terme pour considérer la transmission de chaleur latente par un système de refroidissement. Deux auteurs ont inclus un terme pour calculer les effets d'un humidificateur et deux autres, ceux d'un déshumidificateur. Avissar et Mahrer (1982) ont tenu compte de l'apport de chaleur latente par le système de chauffage. Parmi les modèles dynamiques, six modèles considèrent que l'équilibre hydrique ne s'établit pas

instantanément; ils ont par conséquent inclus un terme pour l'inertie hydrique.

Le CO₂ est essentiel pour la croissance des plantes; il faut établir sa concentration dans l'air pour prédire le développement des plantes. Les flux de CO₂ dans la serre se font de diverses façons. Il y a d'abord l'absorption par les plantes durant la photosynthèse et son rejet durant la respiration. Le renouvellement d'air implique aussi des échanges de CO₂ avec l'extérieur. Il peut également provenir du sol. Si les concentrations à l'intérieur ne sont pas suffisantes pour obtenir des rendements optimaux, on peut en injecter à l'aide d'un brûleur ou à partir de CO₂ liquide. On peut aussi tenir compte d'une certaine "inertie" de CO₂ si on considère que les équilibres ne sont pas atteints instantanément. Chez Van Bavel et Sadler (1979), on retrouve ces six flux, alors que Seginer et al. (1986) en ont inclus trois.

La paroi

La Fig. 4 est spécifique à la paroi d'une serre. La paroi peut être simple ou double. Certains auteurs ont établi un simple bilan énergétique pour une paroi même si elle était double. D'autres ont considéré séparément chacune des parois ou chaque côté d'une paroi simple. Au niveau du bilan hydrique, trois modèles considèrent la condensation sur la paroi et son évaporation subséquente; la quantité d'eau qui y est condensée doit par conséquent être calculée.

Les radiations solaires peuvent être considérées de trois façons. La plupart des auteurs se servent du rayonnement

global, cinq tiennent compte des composantes directe et diffuse, alors que deux utilisent plutôt la séparation PAR-NAR. Un certain nombre d'auteurs ont inclus dans leur bilan la quantité de rayonnement réfléchi par les composantes intérieures, particulièrement par les plantes et, quelquefois, par le sol. Quelques-uns ont aussi comptabilisé le rayonnement qui était réfléchi sur les surfaces extérieures. Seuls Seginer et al. (1986) ont inclus l'éclairage artificiel et ont tenu compte de la partie du rayonnement visible qui atteint la paroi. Presque tous les auteurs ayant établi un double bilan énergétique de la paroi, comptabilisent dans chaque équation la quantité de rayonnement solaire incident.

La paroi peut échanger de l'énergie par radiations thermiques avec plusieurs composantes, suivant les facteurs de vue. La plupart des auteurs ont inclus les échanges radiatifs avec les plantes lorsque celles-ci sont présentes dans le modèle. Neuf modèles incluent les échanges radiatifs avec le sol. Tous les auteurs tiennent compte des échanges par rayonnement infrarouge long entre la paroi et le ciel. Seuls trois auteurs incluent également des échanges avec l'environnement extérieur. Takakura et al. (1971) et Cormary et Nicolas (1985) incluent les échanges radiatifs avec le système de chauffage. Seginer et al. (1986) comptabilisent les échanges radiatifs avec le système d'éclairage artificiel dont une partie du rayonnement se situe dans l'infrarouge. Tous les modèles ayant établi deux bilans thermiques distincts incluent le rayonnement dans chaque équation. Dans plusieurs cas, la relation pour la partie inférieure de la paroi n'inclut des échanges qu'avec l'intérieur de la

	VARIABLES D'ÉTAT			FLUX ÉNERGETIQUES										FLUX HYDRIQUES							
	BILAN ÉNERGÉTIQUE SIMPLE	BILAN ÉNERGÉTIQUE DOUBLE	QUANTITÉ D'EAU CONDENSÉE	RADIATIONS SOLAIRES			RADIATIONS INFRAROUGES				CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE										
	GLOBAL	DIRECT-DIFFUS	PAR-NAR	FLUX RÉFLÉCHI DE L'INTÉRIEUR	ECLAIRAGE ARTIFICIEL	BILAN SUR CHAQUE PAROI	PLANTES	SOL INTÉRIEUR	ATMOSPHÈRE	ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR	ECLAIRAGE RADIANT	BILAN SUR CHAQUE PAROI	CONVECTION INTÉRIEURE	CONVECTION EXTÉRIEURE	TRANSFERT ENTRE LES PAROIS	CONDENSATION (INTÉRIEUR)	ÉVAPORATION (INTÉRIEUR)	INERTIE THERMIQUE (EXTÉRIEUR)	CONDENSATION (EXTÉRIEUR)	ÉVAPORATION	
SELÇUK (1971)	✓																				
MAHER ET O'FLAHERTY (1973)	✓																				
KIMBALL (1973)		✓																			
KIMBALL (1986, unité 14)		✓																			
TAKAMI ET UCHIJIMA (1977)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SILVESTON ET al. (1980)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SEGNER ET KANTZ (1986)	✓																				
SEGNER ET al. (1986)	✓																				
TAKAKURA ET al. (1971)		✓																			
SELÇUK (1970)	✓																				
SORIBE ET CURRY (1973)	✓																				
VAN BAVEL ET SADLER (1979)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
KINDELAN (1980)	✓	✓																			
GLAUB ET TREZEK (1981)	✓	✓																			
AVISSAR ET MAHRER (1982)	✓	✓																			
AHMADI ET GLOCKNER (1982)	✓																				
COOPER ET FULLER (1983)	✓	✓																			
ARINZE ET al. (1984)	✓	✓																			
CORMARY ET NICOLAS (1985)	✓	✓																			
KIMBALL (1986, unité 5)	✓																				

Fig. 4. Modèles multicomposantes: la paroi.

serre; pour la partie supérieure, on considère seulement les échanges avec l'extérieur de la serre. Dans le cas d'une paroi double, tous les modèles établissant un bilan spécifique pour chaque paroi, incluent la présence de l'échange radiatif entre les deux écrans transparents.

Nous avons déjà vu que tous les modèles tiennent compte de l'échange convectif entre la paroi et l'air intérieur. Tous incluent également la convection extérieure qui est, dans la majorité des cas, fonction de la vitesse du vent. Parmi les huit auteurs ayant modélisé une paroi double, seuls Avissar et Mahrer (1982) ont pu considérer les mouvements convectifs entre les deux parois, car ils ont établi un bilan énergétique pour la lame d'air séparant les écrans transparents. Les autres considèrent plutôt une transmission de chaleur par conduction entre les deux parois. Les deux auteurs ayant établi un bilan énergétique pour chaque côté d'une paroi simple (Takakura et al. 1971; Kindelan 1980) considèrent la conduction à travers la paroi. Sadler (1983) a inclus dans sa version du programme SG79 présenté par Van Bavel et Sadler (1979), la conduction de chaleur par les séparations des canaux d'air de panneaux de polycarbonate.

La condensation sur les parois internes a été incluse par tous les auteurs sauf Selcuk (1971). Ce phénomène entraîne de grands transferts de chaleur latente et augmente la température de la paroi. Le film d'eau formé influence également les échanges radiatifs. Seuls Cooper et Fuller (1983) et Kimball (1986, unité 14) ont inclus cet effet dans leur modèle; dans les deux cas, le facteur de transmission thermique est considérablement diminué en présence de la condensation. Dans Kimball (1986, unité 14), le facteur de transmission au rayonnement solaire est également diminué en présence de condensation. Comme nous l'avons déjà vu, seuls trois modèles considèrent le phénomène inverse, c'est-à-dire l'évaporation de l'eau accumulée par condensation. La plupart des auteurs considèrent donc que toute l'eau s'écoule sur la paroi à mesure qu'elle se condense. Par contre, Takami et Uchijima (1977a) et Van Bavel et Sadler (1979) ne considèrent pas que la paroi peut retenir seulement une partie de l'eau qui s'y condense; pour eux, il n'y a pas d'écoulement. Cormary et Nicolas (1985) tiennent compte de la quantité d'eau maximale qui peut s'accumuler sur la paroi; dans leur modèle, il ne peut s'évaporer plus d'eau que la paroi peut en retenir. Cinq modèles ont également tenu compte des phénomènes de condensation survenant à l'extérieur de la paroi; on ne peut savoir si ceux-ci ont tenu compte de l'évaporation subséquente. Dans la dernière partie de la Fig. 4, on trouve les variables de flux qui servent à établir la quantité d'eau totale qui est présente sur la paroi.

Quelques modèles considèrent que la paroi a une capacité thermique suffisante pour que son équilibre énergétique ne soit pas atteint instantanément. En effet, cinq modèles incluent un terme pour tenir compte de l'inertie thermique de la paroi.

Le sol

Le sol peut être modélisé en deux parties: la surface et les couches sous la surface. Le bilan énergétique peut alors être établi pour chacune de ces parties, comme le montre la Fig. 5. Parmi les seize auteurs qui établissent la température de surface, treize calculent le bilan énergétique du sol sous la surface, dans plusieurs couches ou blocs. Les échanges de chaleur de la couche la plus profonde sont fonction d'une

température en profondeur qui, pour la majorité des auteurs, est constante sur la durée de simulation. Comme Kindelan (1980) et Avissar et Mahrer (1982) considèrent cependant que cette température est influencée par la présence de la serre, ils calculent cette température. La quantité d'eau dans le sol est représentée par son potentiel hydrique et peut être constante ou varier au cours d'une simulation, mais la plupart des auteurs ont considéré le sol comme sec ou saturé. Seuls Avissar et Mahrer (1982) parlent d'un potentiel hydrique variable.

Les radiations solaires entraînent des gains de chaleur pour le sol et sont fonction de son facteur d'absorption en surface. Selon les auteurs, le rayonnement est considéré sous sa forme globale, en ses composantes directe et diffuse ou en PAR-NAR. Trois modèles calculent aussi le rayonnement réfléchi sur les autres composantes de la serre et aucun modèle considère des apports par l'éclairage artificiel.

Presque tous les auteurs ont inclus les échanges de chaleur par radiations infrarouges. Les échanges radiatifs avec la paroi ont déjà été discutés. Le sol échange aussi des radiations avec les plantes. Parmi les modèles incluant des plantes et établissant le bilan énergétique du sol, seul Selcuk (1971) ne traite pas des échanges radiatifs entre le sol et les plantes. La paroi peut être transparente aux radiations infrarouges, notamment dans le cas des polyéthylènes; six auteurs ont tenu compte de ce fait en calculant des échanges radiatifs directs entre le sol et l'atmosphère. Quatre modèles ont intégré les échanges radiatifs avec un système de chauffage. Aucun modèle n'a inclus les échanges radiatifs avec les luminaires.

Nous avons déjà discuté des échanges convectifs entre l'air intérieur et le sol. Nous avons également déjà parlé de l'évaporation. Pour ce calcul, tous les modèles considèrent le sol comme étant saturé d'eau. Deux modèles seulement tiennent compte de la condensation sur le sol.

Tous les modèles, à part ceux qui ne considèrent pas le sol de façon explicite, incluent la conduction de chaleur dans le sol. Celle-ci constitue un mode de transmission de chaleur important au niveau du sol. Habituellement, on sépare verticalement le sol en blocs homogènes entre lesquels existent des transferts par conduction; pour chacun, on établit un bilan énergétique. Les échanges de chaleur entre le bloc le plus profond et le sol sous-jacent se font en fonction de la température de ce dernier. Celle-ci constitue une des conditions aux limites. Elle est constante pour la plupart des modèles. Seuls Kindelan (1980) et Avissar et Mahrer (1982) ont considéré celle-ci comme influencée par la présence de la serre. Pour ceux-ci, cette température est variable et calculée à partir d'une équation de diffusion dans le sol. Le nombre de couches prises en compte par les différents auteurs est indiqué à droite de la Fig. 5. Dans Kimball (1986, unité 14) et Kimball (1986, unité 5), ce nombre est spécifié par l'utilisateur. Le flux conductif est dans la plupart des cas unidimensionnel. Trois modèles permettent la simulation du chauffage du sol; celui-ci contribue au bilan thermique du sol par conduction.

Le sol constitue sans aucun doute la masse thermique la plus importante dans la serre. Tous les modèles dynamiques en ont tenu compte. Pour cinq modèles parmi ceux-ci, le sol est la seule composante qui est considérée dans son état transitoire et comme zone tampon pour les variations de température. Le sol transforme le rayonnement solaire en chaleur sensible qui est retransmise au reste du système avec un certain délai.

Le potentiel hydrique du sol est calculé dans un seul mo-

	VARIABLES D'ETAT	FLUX ENERGETIQUES										FLUX HYDRIQUES		GENERALITES			
	TEMPERATURE EN SURFACE TEMPERATURE SOUS SURFACE POTENTIEL HYDRIQUE	RADIATIONS SOLAIRES			RADIATIONS INFRAROUGES			CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE						FLUX			
	GLOBAL DIRECT-DIFFUS PAR-NAR REFLECHI DE L'INTERIEUR ECLAIRAGE ARTIFICIEL	PLANTES PAROI ATMOSPHERE CHAUFFAGE RADIANT ECLAIRAGE ARTIFICIEL	CONVECTION ECHANGES AVEC L'AIR EVAPORATION CONDENSATION	PERDES AU PERIMETRE CHAUFFAGE DANS LE SOL INERTIE THERMIQUE	EVAPORATION CONDENSATION ABSORPTION INFILTRATION PAR PLANTES IRRIGATION	UNIDIMENSIONNEL BIDIMENSIONNEL TRIDIMENSIONNEL	NOMBRE DE COUCHES										
SELCUK (1971)	✓																
MAHER ET O'FLAHERTY (1973)																	
KIMBALL (1973)	✓	✓															6
KIMBALL (1986, unite 14)	✓	✓															X*
TAKAMI ET UCHIJIMA (1977)																	
SILVESTON ET al. (1980)																	
SEGNER ET KANTZ (1986)	✓																
SEGNER ET al. (1986)																	
TAKAKURA ET al. (1971)	✓	✓															5
SELCUK (1970)	✓	✓															20
SORIBE ET CURRY (1973)	✓	✓															10
VAN BAVEL ET SADLER (1979)	✓	✓															15
KINDELAN (1980)	✓	✓	✓														
GLAUB ET TREZEK (1981)	✓																
AVISSAR ET MAHRER (1982)	✓	✓	✓	✓													
AHMADI ET GLOCKNER (1982)	✓	✓															4
COOPER ET FULLER (1983)	✓	✓															2
ARINZE ET al. (1984)	✓	✓															7
CORMARY ET NICOLAS (1985)	✓	✓															4
KIMBALL (1986, unite 5)	✓	✓															X*

* LE NOMBRE DE COUCHES EST SPECIFIE PAR L'UTILISATEUR

Fig. 5. Modèles multicomposantes: le sol.

dèle, soit celui d'Avissar et Mahrer (1982). Ceux-ci établissent en effet la distribution d'humidité dans le sol pour trouver la diffusivité thermique du sol à différentes profondeurs. Les auteurs entrent dans leur bilan seulement l'absorption d'eau par les racines des plantes; celle-ci est supposée égale à la transpiration.

On pourrait ajouter au bilan hydrique du sol les flux suivants: l'apport par irrigation, l'évaporation, la condensation et l'infiltration dans le sol. Tous les auteurs autres qu'Avissar et Mahrer (1982) et qui ont calculé l'évaporation du sol, l'ont considéré saturé d'eau. Tous les auteurs qui n'ont pas calculé ce flux simulaient un sol sec.

Les plantes

La composante formée par les plantes est analysée à l'aide de la Fig. 6. Nous avons caractérisé l'état des plantes à quatre niveaux. Les plantes jouent un rôle important dans les transferts d'énergie et de masse dans une serre. Il est nécessaire de connaître leur température pour étudier leurs effets dans les échanges énergétiques, ce que font tous les modèles incluant une composante pour les plantes. Le potentiel hydrique des plantes peut influencer leur rôle dans les transferts de masse, mais deux auteurs seulement incluent cette variable d'état dans leur modèle. Le développement des plantes peut être analysé de deux façons complémentaires: quantitativement et qualitativement. Les modèles incluant le développement de plantes (quatre sur seize) en discutent essentiellement en terme d'accumulation de biomasse, donc quantitativement. On y

calcule l'accroissement de matière sèche dans le temps. Un seul modèle permet une analyse plus complète en incluant un modèle de développement qualitatif; Cormary et Nicolas (1985) traitent en effet de divers stades de croissance (floraison, fructification, récolte).

En ce qui a trait aux radiations solaires, huit modèles ont considéré le rayonnement global et cinq ont considéré séparément les composantes directe et diffuse. Cinq modèles ont plutôt séparé le rayonnement en ses composantes PAR et NAR. Quatre modèles ont inclus les réflexions à l'intérieur de la serre. Seginer et al. (1986) ont également tenu compte des radiations de courtes longueurs d'onde émises par un système d'éclairage artificiel.

Nous avons déjà discuté des échanges de radiations thermiques avec les autres composantes de la serre. Neuf modèles considèrent également des échanges radiatifs directs entre les plantes et l'atmosphère extérieure, dans le cas de parois transparentes au rayonnement infrarouge. Kimball (1973) inclut aussi les échanges avec l'environnement extérieur, plus précisément avec le sol extérieur. Seginer et al. (1986) ont inclus un terme pour tenir compte des radiations infrarouges émises par les luminaires et reçues par les plantes. Le chauffage radiant joue un rôle dans quatre modèles.

Nous avons déjà traité des transferts de chaleur par convection. En ce qui a trait à la respiration et à la photosynthèse, leurs effets sur le bilan thermique sont considérés comme négligeables par tous les auteurs.

La transpiration entraîne des rejets considérables de vapeur

	VARIABLES D'ETAT				RADIATIONS SOLAIRES		FLUX ENERGETIQUES				CHALEUR SENSIBLE ET LATENTE		FLUX HYDRIQUES	FLUX DE CO ₂								
	TEMPERATURE	POTENTIEL HYDRIQUE	DEVELOPPEMENT	QUANTITATIF	GLOBAL	DIRECT-DIFFUS	RADIATIONS INFRAROUGES	ENVIRONNEMENT	CHAUFFAGE ARTIFICIEL	CONVECTION	RESPIRATION	PHOTOSYNTHESE	TRANSPIRATION	CONDENSATION		EVAPORATION	BIENNE THERMIQUE	TRANSPIRATION	ASSORPTION	ASSORPTION	REJET	
SELGUK (1971)	✓																					
MAHER ET O'FLAHERTY (1973)	✓																					
KIMBALL (1973)	✓																					
KIMBALL (1986, unité 14)	✓																					
TAKAMI ET UCHIJIMA (1977)	✓	✓																				
SILVESTON ET al. (1980)																						
SEGINER ET KANTZ (1980)																						
SEGINER ET al. (1986)	✓																					
TAKAKURA ET al. (1971)	✓																					
SELGUK (1970)	✓																					
SORIBE ET CURRY (1973)	✓																					
VAN BAVEL ET SADLER (1979)	✓	✓																				
KINDELAN (1980)	✓																					
GLAUB ET TREZEK (1981)																						
AVISSAR ET MAHRER (1982)	✓																					
AHMADI ET GLOCKNER (1982)	✓																					
COOPER ET FULLER (1983)	✓	✓																				
ARINZE ET al. (1984)	✓																					
CORMARY ET NICOLAS (1985)	✓	✓																				
KIMBALL (1986, unité 5)	✓																					

Fig. 6. Modèles multicomposantes: les plantes.

d'eau, donc de chaleur latente. Ce phénomène est très important pour les plantes puisqu'il constitue entre autres, un agent stabilisateur pour leur température. Tous les modèles l'ont inclus, mais pour la plupart, elle ne dépend pas du stade de développement des plantes. La transpiration est fonction d'un coefficient de résistance et d'une différence d'humidité entre la plante et l'air intérieur. L'humidité de la plante est considérée à saturation en fonction de sa température. Pour la majorité des modèles, le coefficient de résistance est constitué d'une somme de résistances en série. La plupart du temps, on a une résistance stomatique et une résistance de surface liée à la convection.

Pour prévoir le développement de champignons ou de maladies sur les plantes, il faut étudier la condensation et l'évaporation subséquente sur les feuilles. Seul Kimball (1986, unité 14) inclut dans son modèle la condensation sur les plantes.

Finalement, le gain en énergie des plantes est un terme qui est inclus par quatre auteurs sur les dix modèles dynamiques intégrant les plantes. La masse thermique des plantes est fonction de leur stade de développement mais aucun des quatre ne l'a considérée ainsi. Mentionnons que les plantes constituent finalement la composante dont l'inertie thermique est la moins prise en compte.

Pour la plupart des auteurs, le stress hydrique n'existe pas. On ne tient donc pas compte de la différence entre ce que la plante transpire et ce qu'elle absorbe. Les échanges de CO₂ sont évidemment essentiels lorsqu'on parle de croissance des plantes. La photosynthèse requiert une grande quantité de CO₂, alors que durant la respiration, une quantité moindre est

rejetée.

Nous avons vu que quatre auteurs intègrent un modèle de développement quantitatif pour les plantes. Ils se sont généralement basés sur des relations empiriques reliant la concentration de CO₂ dans la serre, le rayonnement PAR et la température foliaire à la production nette de biomasse. Celle-ci est calculée en faisant la différence entre la photosynthèse et la respiration. La relation, essentiellement empirique, est basée sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres.

Généralités

Sur la Fig. 2, on trouve quelques caractéristiques des modèles, pour la plupart déjà effleurées. Examinons d'abord les conditions aux limites des divers modèles. Tous ont tenu compte de la température extérieure. Deux modèles n'ont pas utilisé le rayonnement solaire, alors que onze modèles ont utilisé le rayonnement global. Sept auteurs ont tenu compte séparément des composantes directe et diffuse. Cinq auteurs ont ajouté la séparation PAR-NAR qui, dans tous les cas, est calculée à partir du rayonnement global, ou des composantes directe et diffuse.

L'humidité extérieure est un intrant dans tous les modèles. La nébulosité ou le degré de couverture nuageuse entre dans six modèles. La vitesse du vent est considérée par presque tous les auteurs, alors qu'aucun ne tient compte de sa direction. Pour évaluer l'importance des pertes par radiations thermiques, il faut faire le bilan entre celles émises par la serre et celles reçues; celles-ci sont regroupées dans le terme "radiations atmosphériques" et sont émises par la vapeur d'eau et les autres particules de l'atmosphère. Cinq auteurs sur vingt ont

comme condition aux limites la concentration de CO₂. Pour évaluer les pertes thermiques par le sol, la température de celui-ci doit être fournie. Au niveau des instruments de contrôle du climat, on retrouve dans la majorité des modèles un système de chauffage. Quelques modèles permettent l'utilisation de systèmes de chauffage solaire. Ces derniers sont couplés avec un réservoir de stockage, comme Takami et Uchijima (1977b) qui reprennent le modèle de Takami et Uchijima (1977a). Dans la moitié des modèles, on trouve des systèmes de climatisation. On intègre aussi à quelques reprises l'humidification ou la déshumidification. L'éclairage artificiel est présent dans un seul modèle, alors que l'injection de CO₂ se fait dans deux modèles. Deux modèles permettent d'ajouter un isolant thermique dans certaines parties de la serre; on permet l'emploi d'une couverture thermique ou ombrageante dans six modèles. Finalement, quatre modèles ont inclus le développement des plantes.

DISCUSSION

Modèles unicomposantes

Dans les modèles unicomposantes, de par leur structure, les phénomènes physiques sont simplifiés. Ainsi, les gains solaires d'une serre sont fonction de plusieurs processus qui ne sont pas pris en compte dans les modèles mentionnés; ils mettent en cause les plantes et le sol, et les échanges thermiques entre les diverses composantes de la serre. Dans les modèles unicomposantes, toute l'énergie solaire est transformée en chaleur et celle-ci est rendue disponible pour la serre. Au niveau des pertes par radiations thermiques, on conçoit qu'elles soient fonction de la température des plantes et du sol. Mais on n'établit pas le bilan thermique de ceux-ci; on ne connaît pas leur température réelle. On la prend donc égale à la température de l'air intérieur. Cela constitue une mauvaise représentation de la réalité puisque la température des plantes et celle de l'air peuvent différer de cinq degrés celsius à certains moments de la journée (Takakura et al. 1971).

Les flux thermiques relatifs à la paroi sont également simplifiés, surtout pour les doubles parois. En fait, les échanges se font principalement par convection entre l'air intérieur et la paroi, et entre la paroi et l'air extérieur. Il y a aussi des échanges radiatifs avec les plantes et le sol. Tous ces échanges sont fonction de la température de la paroi. Comme on n'établit pas le bilan énergétique de la paroi, on ne connaît pas sa température.

Les phénomènes thermiques sont aussi simplifiés au niveau du sol. Celui-ci échange de la chaleur par convection avec l'air intérieur et par radiation avec les plantes, la paroi et l'extérieur. Ces phénomènes se produisent en surface; il faut ajouter des flux par conduction avec le sol sous la surface dont la température et la teneur en eau varient dans l'espace et le temps. Dans les modèles unicomposantes, on ne peut que simuler un échange de type conductif global entre l'air et le sol, celui-ci possédant une température que l'on doit fournir.

Le renouvellement de l'air est simulé de façon beaucoup plus réelle, puisque nous connaissons la température de l'air. Cela nous permet de calculer assez bien le flux de chaleur sensible correspondant. Les pertes de chaleur latente se font aussi par ventilation. Mais la plupart des modèles ne considèrent pas les modifications de l'enthalpie de l'air et de son contenu en eau causées par l'évapotranspiration. Pour bien

simuler ce fait, il faut établir le bilan hydrique de la serre et évaluer les transferts de chaleur latente avec l'air extérieur par ventilation ou avec les parois par condensation.

Comme on ne connaît pas la température des plantes et du sol (donc la pression de vapeur à saturation pour ces températures), on ne peut évaluer séparément et physiquement la transpiration des plantes et l'évaporation du sol. On doit donc utiliser un concept plus global (l'évapotranspiration) et développer une relation empirique, qui correspond à des conditions de croissance particulières. Le rapport de Bowen est un concept qui peut être intéressant, mais qui nous rapproche d'une méthode empirique. Il dépend des caractéristiques des plantes au niveau de la surface qu'elles couvrent et de la quantité d'eau qu'elles peuvent potentiellement transpirer. Son utilisation est donc incertaine.

Finalement, l'absorption et le rejet de chaleur par photosynthèse et respiration sont considérés comme des termes négligeables par la majorité des auteurs. Les plantes ne jouent donc pas un rôle dans le bilan thermique, sinon qu'avec le sol, elles servent de convertisseur thermique et contribuent aux pertes de chaleur latente.

Quelques modèles donnent la possibilité d'intégrer l'emploi de couvertures thermiques. Cela se fait en augmentant la valeur de la résistance thermique de la paroi, ce qui constitue une simplification de la réalité. Le rôle de la couverture thermique est surtout de diminuer les pertes par radiation et par convection. Elle complexifie la structure des échanges thermiques et sa présence peut être modélisée de façon beaucoup plus complète.

Même si les échanges thermiques sont simplifiés, il ne faut pas en déduire que les résultats de simulations seront pour autant biaisés. Au contraire, il semble que ces modèles fournissent des résultats assez proches des données observées. Aucun modèle unicomposante intègre le développement des plantes, la modélisation de celles-ci étant basée sur un bilan énergétique des plantes. Il serait cependant possible d'intégrer une relation empirique fonction des radiations solaires, de la température de l'air et même de la concentration de CO₂.

Modèles multicomposantes

Nous avons vu que la majorité des modèles multicomposantes considèrent quatre composantes principales, à savoir l'air intérieur, la paroi, le sol et les plantes. Pour mieux rendre compte de certaines réalités, les modèles devront offrir la possibilité d'ajouter des composantes. Par exemple, les échanges thermiques à travers une paroi double pourraient être mieux représentés si on établissait le bilan énergétique de la couche d'air entre les parois, comme l'ont fait Avissar et Mahrer (1982). L'ajout de couvertures thermiques serait aussi mieux modélisé en considérant séparément les deux volumes d'air qu'elles séparent, comme le suggère le modèle de Cormary et Nicolas (1985) qui comprend en tout dix-sept composantes. La culture sur substrat artificiel constituant probablement le mode de sericulture de l'avenir, les modèles doivent en venir à considérer le lit de croissance des plantes en tant que composante à part entière, comme dans le modèle de Cooper et Fuller (1983).

Cette question est liée aux simplifications importantes qui sont faites dans tous les modèles, où les diverses composantes sont considérées en bloc plutôt que de façon distribuée. On considère les diverses parties comme étant non stratifiées et

homogènes, verticalement et horizontalement. Cette situation reflète mal la réalité de l'air de la serre que l'on sait très stratifié; les plantes, quant à elles, ne possèdent pas les mêmes caractéristiques et n'interviennent pas dans les échanges thermiques ou massiques de la même façon sur toute leur hauteur. Rappelons que le sol est, pour la plupart des auteurs, stratifié et considéré comme une série de blocs homogènes interreliés. L'ajout de composantes aux modèles peut être souhaité, mais à un certain prix. Chaque nouvelle composante implique l'addition de nouvelles variables et de nouvelles équations pour les bilans énergétiques et massiques. Plus il y a de composantes, plus les systèmes d'équations à résoudre simultanément sont lourds et complexes.

Cette question touche aussi à celle des dimensions des modèles. La plupart des modèles multicomposantes sont quasi-unidimensionnels. Un modèle est unidimensionnel si l'ensemble des flux sont verticaux; le terme "quasi" indique que la ventilation entraîne des flux horizontaux, sans que la méthode de calcul soit influencée, comme en ont discuté Seginer et Levav (1971). Cette façon de structurer les modèles a des incidences à trois niveaux: les radiations solaires, les radiations infrarouges et la chaleur sensible et latente. Le facteur de transmission des parois aux radiations solaires est fonction de son inclinaison, de son azimut et de la position du soleil. Une paroi peut être séparée en plusieurs surfaces inclinées différemment. Les modèles quasi-unidimensionnels traitent la paroi comme étant horizontale. Quelques auteurs ont tout de même considéré un facteur de transmission variable; d'autres ont calculé un facteur de transmission moyen pour l'ensemble des surfaces. Les radiations solaires constituant un intrant important, cet aspect devra être amélioré dans la modélisation des serres. Un modèle unidimensionnel simplifie la réalité pour les échanges radiatifs, ceux-ci étant fonction des facteurs de vue d'une surface à l'autre. Les échanges entre le sol et la paroi ou le sol et l'atmosphère ont été éliminés dans plusieurs modèles. Lorsque les plantes sont à un jeune stade de développement, ces échanges peuvent être importants. La convection étant fonction de l'inclinaison d'une surface, les modèles unidimensionnels simplifient également la nature des échanges de chaleur sensible et latente. Ainsi, les transferts entre l'air et le mur ne sont pas les mêmes qu'avec le toit. Il est aussi impossible de simuler l'ajout d'isolant dans un tel type de modèle. L'action du vent se fait plus sentir sur certains murs dans la réalité; on n'en simule pas les effets réels dans ces modèles. Seul Kimball (1986, unité 5) permet de séparer la serre en toits et murs.

Les modèles quasi-unidimensionnels sont donc conçus pour simuler ce qui se passe au centre d'une large serre. Ils sont très bien adaptés pour les études relatives aux complexes de serres jumelées. Il faut en être conscient si on veut étudier les transferts dans une serre individuelle; il en va de même si on veut simuler ce qui se passe dans des serres jumelées mais séparées par des écrans pour maintenir différents climats pour différents types de culture. Dans un modèle unidimensionnel, chaque composante forme une strate; les échanges se font entre les strates et les échanges latéraux n'existent pas.

Nous ne passerons pas en revue l'ensemble des flux associés aux différents cycles, ainsi que les améliorations pouvant être apportées. Des recherches s'effectuent à tous les niveaux et il y a de la place pour une amélioration partout, que ce soit au niveau du rayonnement solaire, des radiations infrarouges

et de la chaleur latente et sensible. Soulignons seulement que les améliorations nécessaires sont plus évidentes au niveau du cycle hydrique et du cycle de CO₂.

CHOIX D'UN MODELE

Définition des besoins

Si on veut simuler les échanges thermiques et massiques à l'intérieur d'une serre, il faut élaborer un modèle ou effectuer un choix parmi ceux qui s'offrent à nous. Ce choix est a priori difficile à cause du manque d'homogénéité qui semble exister parmi les modèles. Les grilles d'analyse élaborées peuvent orienter ce choix. Nous ne devons pas partir du fait qu'un modèle puisse être meilleur qu'un autre; ils ont été conçus pour des besoins particuliers. Chaque type de modèle est approprié à un champ d'étude et il importe de saisir les forces et les limites de chacun. Nous devons donc effectuer le choix le plus judicieux en fonction d'un certain nombre de critères: les besoins d'une recherche, la complexité recherchée et les coûts associés à la validation et au temps de calcul. Le premier point est de définir les objectifs d'une recherche. En fonction de ceux-ci, on choisira un modèle qui aura le plus grand pouvoir explicatif en fonction de ce qu'on veut étudier. On cherchera celui qui a la plus grande probabilité de répondre adéquatement aux besoins définis. Le second aspect est de déterminer la précision requise; elle doit correspondre aux objectifs de l'étude à effectuer. Cela nous amène au troisième point qui est lié au précédent: le degré de précision sera établi en fonction des coûts associés aux différents choix. La complexité varie grandement d'un groupe à l'autre; plus un modèle intègre un grand nombre de composantes et de flux, plus le nombre de paramètres à valider est grand et plus les calculs sont nombreux lors des simulations.

Nous avons constaté que les conditions aux limites sont semblables pour tous les groupes de modèles. Elles ne servent donc pas comme critère dans le choix d'un modèle. Les variations se situent surtout au niveau des bilans établis et des flux servant à établir les bilans; les groupes de modèles se différencient principalement sur ces points. Une fois les besoins définis, on doit d'abord choisir le groupe: unicomposante ou multicomposante. Ensuite, on doit choisir le type: statique ou dynamique.

Nous avons donc le choix entre quatre groupes: de modèles statiques unicomposantes à des modèles dynamiques multicomposantes. En passant du premier au dernier groupe, la complexité augmente. A celle-ci est associée une précision potentiellement plus grande, mais aussi une plus grande possibilité d'erreur.

Dans l'ensemble, les modèles unicomposantes ont servi pour étudier des aspects particuliers du bilan énergétique de l'air comme l'effet du rayonnement solaire ou de la ventilation sur les variations de température. Certains auteurs se sont servis de leur modèle pour évaluer l'impact de différentes mesures d'économie d'énergie, ou pour comparer des systèmes de chauffage ou différents types de serre. Certains les ont inclus dans des modèles plus globaux, notamment pour étudier la récupération de rejets thermiques industriels. Les simulations avec ce type de modèle sont rapides et coûtent peu en temps de calcul. Ces modèles sont parfaitement adaptés pour faire des études préliminaires ou plus globales, comme l'évaluation de la charge de chauffage ou de refroidissement

sur une saison, le design des équipements et des structures.

Les modèles unicomposantes réduisent l'ensemble des processus physiques à quelques-uns. Il en découle un manque de précision quant à l'importance de chaque phénomène, même si les résultats globaux peuvent être assez justes. On ne connaît finalement que les bilans énergétique ou massiques de l'air. En n'ayant pas de données sur le bilan des autres composantes de la serre, le modèle nous restreint dans les usages que l'on peut en faire. Nous devons choisir des modèles multicomposantes pour faire des études spécifiques à une composante autre que l'air. Par exemple, si on veut prédire le développement des plantes, ainsi que leur contribution réelle à l'humidité de la serre par le phénomène de la transpiration, on doit choisir un modèle de ce groupe. C'est aussi en étudiant le sol comme une composante à part entière qu'on peut évaluer son impact réel dans le bilan énergétique, en particulier dans ses rôles de convertisseur thermique du rayonnement solaire et d'accumulateur thermique. Le processus d'évaporation peut alors être déterminé avec exactitude. Le cycle hydrique en général sera ainsi mieux modélisé. La simulation des couvertures thermiques sera également meilleure avec un tel type de modèle.

Seuls les modèles multicomposantes permettent d'établir le bilan énergétique des parois; on doit y recourir pour effectuer des études de condensation, étudier l'effet du vent sur les pertes par convection ou évaluer les pertes par radiations avec précision. L'impact réel de certaines nouvelles technologies doit être simulé par ces modèles; pensons par exemple à l'éclairage artificiel ou au chauffage infrarouge dont les effets se font surtout sentir au niveau radiatif, et non pas par le biais de l'air. Les modèles multicomposantes constituent une meilleure représentation des processus physiques; par contre, à cause du grand nombre de paramètres à évaluer, le danger d'erreur est plus grand. Il est par conséquent plus long de valider ce type de modèle. Le temps de calcul est également plus long car, contrairement aux modèles unicomposantes, on doit résoudre simultanément des systèmes d'équations pour établir les différents bilans. Toutefois, ils permettent des analyses plus fines, sur des aspects précis et relatifs aux différentes composantes.

Les modèles de type statique peuvent fournir de bons résultats si les besoins d'étude portent sur une longue période, comme sur des intervalles de temps journaliers, mensuels ou saisonniers. Ils sont cependant peu adaptés pour fournir des résultats horaires. Les simulations sur de courts intervalles de temps avec ces modèles risquent donc d'apporter des inexactitudes. Un modèle statique est suffisant pour étudier le comportement des composantes sur des pas de simulation suffisamment longs pour que les flux soient à l'équilibre. Mais, seuls les modèles dynamiques permettent des analyses sur des temps de calculs plus courts. Les processus sont alors saisis dans leur aspect transitoire. Ces modèles peuvent servir pour prédire l'état énergétique des diverses composantes à chaque instant. Ils représentent mieux le temps de réponse réel du système. Ils simulent l'effet de l'inertie thermique, qui est déterminante dans des études portant sur un cycle diurne; cela est particulièrement valable pour le sol qui constitue un réservoir d'énergie important à cause de son imposante masse thermique. Il ne faut cependant pas oublier, qu'en général, la masse thermique des serres met en jeu des quantités d'énergie relativement faibles par rapport à un intrant comme l'énergie solaire; la réponse thermique du système est rapide. Il faut aussi se souvenir que les modèles statiques sont représentés

par des équations algébriques, alors que les modèles dynamiques le sont par des équations différentielles; il est plus long d'intégrer numériquement plusieurs équations différentielles tout en assurant une stabilité, comparativement à résoudre des systèmes simultanés d'équations algébriques.

Choix des variables et ajustement des paramètres

Après avoir choisi un type de modèle en fonction des composantes ou des bilans désirés, il importe d'intégrer les flux les plus déterminants. Nous avons vu que certains flux comme la respiration et la photosynthèse pouvaient avoir un effet négligeable dans le bilan thermique. On ne doit pas perdre trop de temps à valider des paramètres associés à des flux qui ont un poids négligeable dans le bilan. Des analyses de sensibilité peuvent nous aider à ce niveau.

Les modèles se différencient en fonction des composantes étudiées, des bilans établis et des flux considérés, mais on peut considérer qu'ils se différencient peu à l'intérieur de chaque groupe. On a vu, dans les grilles d'analyse, tous les flux qui sont communs à la majorité des modèles. Ce qui différencie le plus les modèles, ce sont les valeurs assignées aux paramètres. Comme pour tout modèle, il est très important d'assigner les bonnes valeurs aux paramètres. Parmi les principaux paramètres, il y a d'abord le coefficient de transfert thermique global pour les modèles unicomposantes, et les coefficients de convection air-paroi, air-sol et air-plantes pour les modèles multicomposantes. Le taux de renouvellement d'air est aussi un paramètre dont la valeur doit être établie, puisqu'il détermine les quantités d'énergie et de masse transférées par infiltration, par ventilation naturelle et par ventilation forcée. Le taux de renouvellement est spécifique à chaque serre et dépend de la grandeur des ouvertures et de leur orientation. Pour les modèles dynamiques, il faut aussi évaluer la capacité thermique des diverses composantes. Dans l'ensemble des modèles, il importe également de déterminer les propriétés optiques des diverses parties de la serre. Il semble que le consensus soit plus grand pour les divers auteurs à ce niveau. Il serait intéressant qu'une étude soit effectuée afin de répertorier les valeurs attribuées aux divers paramètres dans l'ensemble des modèles. L'existence de tableaux indiquant les valeurs à assigner selon les conditions dominantes accélérerait le calage de modèles. De telles études ont été initiées par quelques auteurs comme Kimball (1973) ou Sadler (1983).

UNIFORMISATION DES MODÈLES

Nous devons tendre vers une diminution du nombre de modèles ou, au moins, vers une plus grande homogénéité de ceux-ci. Certains standards doivent être adoptés. C'est dans ce sens que les grilles d'analyse ont été développées. Celles-ci permettent un classement des modèles et nous font percevoir les points communs et les principales différences chez les divers auteurs. Nous devons souligner les efforts entrepris par Van Bavel et al. (1985) qui ont comparé trois modèles dynamiques: celui de Bot (1983), celui de Takakura et al. (1971) et celui de Van Bavel et Sadler (1979). Des simulations ont été faites avec différents ensembles de données climatiques pour les trois pays suivants: Etats-Unis (Texas), Hollande et Japon. Les résultats obtenus par les trois modèles ont généralement coïncidé. Les auteurs ont conclu que les priorités sont du côté de l'amélioration des modèles existants et non dans la construction de nouveaux. Leur étude a inclus seulement des

modèles dynamiques, car ils considèrent que seuls ceux-ci peuvent réellement représenter l'état d'une serre à un instant donné. Ce point est valide, mais ils n'ont rien spécifié par rapport aux avantages que peut comporter l'utilisation des autres types de modèles.

Des améliorations peuvent être apportées aux modèles dans le traitement de la plupart des flux. Il existe cependant un certain nombre d'apports majeurs essentiels à effectuer en priorité. Le plus important est l'intégration de sous-modèles de développement des plantes. Cette partie est la moins développée, la moins connue et sans aucun doute la plus complexe. Elle est pourtant très importante pour étudier les effets réels des diverses technologies et voir leur rentabilité. Mentionnons que Sadler (1983) a effectué une revue de littérature exhaustive des divers modèles de développement des plantes. Il est possible d'améliorer les modèles unicomposantes à ce niveau en intégrant des modèles de croissance empiriques fonction de la température de l'air, de la luminosité et de la concentration de CO₂, puisqu'on peut connaître tous ces aspects dans ces modèles. Par exemple, Shen (1977) a couplé son modèle de transfert avec un modèle de développement de plantes. Les modèles multicomposantes sont cependant plus appropriés pour intégrer la croissance des plantes, car ils établissent leur bilan énergétique. La précision est ainsi potentiellement plus grande.

Pour intégrer la croissance des plantes dans les modèles, il faut établir le bilan de CO₂ de l'air. De plus, l'injection de CO₂ est une technologie de plus en plus employée; pour mieux rentabiliser et contrôler celle-ci en rapport avec les autres appareils de contrôle du climat, il faut inclure le cycle du CO₂ dans les modèles. Cela peut être fait sans difficulté majeure, car le nombre de flux impliqué est peu élevé. Aussi, ce cycle a peu d'incidences sur les autres, contrairement à l'énergie et à la vapeur d'eau qui sont très liées. Le seul impact est l'ajout de chaleur et de vapeur d'eau par certains systèmes produisant du CO₂.

Les chercheurs ont beaucoup étudié les transferts énergétiques dans les serres depuis une trentaine d'années. On commence à saisir assez bien la nature de ces échanges. Les modèles élaborés prédisent la température des diverses composantes avec une assez grande précision. Ainsi, selon une revue de littérature effectuée par Albright et al. (1985), différents modèles prédisent cette température avec une erreur se situant entre un et trois kelvins. Par contre, le cycle hydrique est moins bien connu. Au début, les modèles étaient souvent utilisés pour évaluer l'effet de variables tels que le rayonnement solaire ou la ventilation. Pour simplifier le nombre d'échanges, les plantes étaient omises des modèles et des expériences servant à la calibration; de plus, le sol était sec. On en est venu à assez bien connaître les échanges thermiques et à intégrer graduellement les échanges hydriques. Il importe de mieux connaître le cycle hydrique avec les serres étanches que l'on construit maintenant. Ces connaissances favoriseront un contrôle plus efficace de l'environnement des plantes. Mentionnons que les principales lacunes se situent au niveau de la condensation sur les diverses composantes de la serre et sur la transpiration des plantes.

Plusieurs technologies employées depuis un certain nombre d'années et qui sont appelées à être de plus en plus présentes dans la sericulture, ne se retrouvent pas encore dans les modèles. Des améliorations devront être apportées à ce niveau. L'intégration des technologies suivantes est probable: l'éclair-

age artificiel, le chauffage radiant et la culture sur substrat artificiel ou sur film nutritif. Il reste également beaucoup à faire sur les écrans thermiques ou ombrageants, le chauffage du sol et les pompes à chaleur. Nous devons souligner l'utilité d'un programme de simulation comme celui présenté dans Kimball (1986), qui facilite l'ajout de sous-programmes pour représenter de nouveaux appareils de contrôle du climat.

Les modèles doivent présenter une grande souplesse vis-à-vis des différents types de serres que l'on veut étudier. Ceux-ci doivent être adaptables aux différents revêtements comme le verre ou le polyéthylène double. Il n'est cependant pas trop difficile de concevoir des modèles aussi polyvalents. Ce qui importe est de laisser la possibilité de modéliser les échanges de chaleur par radiations thermiques entre les composantes intérieures de la serre et l'extérieur, pour simuler la transparence des parois aux rayons infrarouges. De plus, on devrait pouvoir établir plus d'un bilan thermique pour une paroi double dans un modèle multicomposante. Mentionnons que peu de modèles, parmi ceux analysés, étaient spécifiques au verre; la majorité laissait la possibilité de choisir le matériau de recouvrement. Plusieurs ont indiqué les modifications à apporter si on est en présence d'un matériau ou d'un autre, ou d'une paroi simple ou double.

On a vu que la plupart des modèles multicomposantes ont été conçus pour représenter les transferts énergétiques et massiques au centre de la serre et non à la périphérie: ils sont quasi-unidimensionnels. Rappelons que ce type de modèle est peu adapté pour les serres individuelles ou pour les serres jumelées et cloisonnées; il importe de développer des modèles multidimensionnels.

Quelques remarques doivent être faites quant aux conditions aux limites des modèles. La température, l'humidité et la vitesse du vent constituent des intrants facilement mesurables et dont l'effet est assez bien connu. La direction du vent devrait être considérée si l'on veut améliorer la modélisation du renouvellement d'air, que ce soit par ventilation ou par infiltration. Cet intrant peut aussi influencer les pertes convectives des différents murs dans le cas des modèles multidimensionnels. Le rayonnement solaire est un phénomène plus difficile à mesurer et dont les effets sont déterminés avec moins de précision; il en va de même pour les radiations atmosphériques. On a vu comment les auteurs ont intégré différemment le rayonnement solaire: global, direct-diffus, PAR-NAR. La séparation du rayonnement en ses composantes directe et diffuse permet potentiellement de comptabiliser les gains solaires avec plus de précision. Si l'on veut prédire le développement des plantes, on doit aussi connaître la proportion des composantes PAR et NAR. Les pertes par radiations thermiques peuvent être très élevées à certains moments, comme par des nuits d'hiver sans nuage. Il faut donc connaître avec précision les radiations atmosphériques pour calculer le bilan thermique. Ces radiations ne sont généralement pas mesurées par les stations météorologiques; il faut par conséquent les générer à l'aide de modèles. Il existe plusieurs modèles pour évaluer le rayonnement solaire et les radiations atmosphériques. Les recherches devront se poursuivre pour connaître les plus adéquats pour leur utilisation avec les modèles de transfert dans les serres.

Finalement, pour optimiser la rentabilité des systèmes, on devra aussi pouvoir effectuer des évaluations économiques à l'aide des modèles. Certains auteurs ont inclus des modèles de

rendements économiques dans leur étude. Par exemple, Rotz (1977) a présenté une théorie de l'évaluation économique; il s'est servi de celle-ci dans les simulations. Des programmes tels que celui présenté par Meyer et al. (1984), qui intègre également un système d'évaluation économique, seront nécessaires pour améliorer les études.

RECOMMANDATIONS

Les modèles ont été conçus pour différents besoins. Plutôt que d'en construire de nouveaux, il devrait généralement suffire de reprendre ceux existants, en les adaptant aux besoins particuliers et en leur apportant des améliorations. Ainsi, le traitement de la plupart des flux peut être amélioré. Des recherches doivent se poursuivre sur les échanges hydriques, notamment au niveau de la transpiration des plantes et de la condensation sur les diverses composantes de la serre. Il est nécessaire d'intégrer des sous-modèles pour prendre en compte la croissance et le développement des plantes. L'inclusion du bilan de CO₂ est requise pour les modèles de croissance et le développement de stratégies optimales de contrôle de l'enrichissement carboné. Il importe d'intégrer les effets de l'éclairage artificiel, du chauffage radiant et de toutes les technologies qui s'implantent dans les serres. Il faudra ajouter une composante particulière pour l'environnement racinaire des plantes afin de simuler la culture sur substrat artificiel ou sur film nutritif.

REFERENCES

AHMADI, G. et P.G. GLOCKNER. 1982. Dynamic simulation of the performance of an inflatable greenhouse in the southern part of Alberta. I. Analysis and average winter conditions. *Agric. Meteorol.* 27:155-180.

AMDURSKEY, V. 1980. Computer models for climatic conditions et short-wave radiations in greenhouses. *Acta Hortic.* 106:147-148.

ARINZE, E.A., G.J. SCHOENAU et R.W. BESANT. 1982. Simulation study on the effectiveness of external thermal insulations on energy conservation in greenhouses. Paper No.82-4539, Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, MI.

ARINZE, E.A., G.J. SCHOENAU et R.W. BESANT. 1984. A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 27(2):508-519.

AVISSAR, R. et Y. MAHRER. 1982. Verification study of a numerical greenhouse microclimate model. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 25(6):1711-1720.

AZEVOV, R.R., S.K. NIYAZOV et A.A. ABDULLAEV. 1984. Finite-difference method of calculating the temperature conditions of a solar greenhouse with experimental confirmation of the calculations. *Geliotekhnika* 20(3):78-80.

BAILEY, B.J. 1981. The reduction of thermal radiation in glasshouses by thermal screens. *J. Agric. Eng. Res.* 26:215-224.

BAILEY, B.J. 1984. Limiting the relative humidity in insulated greenhouses at night. *Acta Hortic.* 148:411-419.

BOT, G.P.A. et J.J. van DIXHOORN. 1979. Bond graphs and minicomputers in greenhouse climate control. *EPPO Bull.* 9(3):205-218.

BOT, G.P.A. 1980. A validated dynamical model of greenhouse climate. *Acta Hortic.* 106:149-158.

BOT, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph.D.Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 240pp.

BUSINGER, J.A. 1963. The glasshouse (greenhouse) climate. In: *Physics of Plant Environment*. W.R.van Wijk (Ed.). p.277. North-Holland Pub.Co. Amsterdam.

CHANDRA, P. 1979. A time dependent analysis of thermal energy and moisture exchanges for greenhouses. Ph.D.Thesis, Cornell University, Ithaca, NY. 263 pp.

CHANDRA, P. et L.D. ALBRIGHT. 1980. Analytical determination of the effect on greenhouse heating requirements of using night curtains. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 23(5):994-1000.

COOPER, P.I. et R.J. FULLER. 1983. A transient model of the interaction between crop, environment and greenhouse structure for predicting crop yield and energy consumption. *J. Agric. Eng. Res.* 28:401-417.

CORMARY, Y. et C. NICOLAS. 1985. La thermique des serres. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Volume 58. Eyrolles. Paris. 357pp.

DUNCAN, G.A., O.J. LOEWER, Jr. et D.G. COLLIVER. 1981. Simulation of energy flows in a greenhouse: magnitudes and conservation potential. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 24(6):1014-1021.

ELSNER, B.V. 1980. Significant parameters for characterization of the ventilation and cooling of glasshouses. *Acta Hortic.* 107:91-97.

EWEN, L.S., J.N. WALKER et J.W. BUXTON. 1980. Environment in a greenhouse thermally buffered with ground-conditioned air. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 23(5):985-989,993.

FROELICH, D.P., L.D. ALBRIGHT, N.R. SCOTT et P. CHANDRA. 1979. Steady-periodic analysis of glasshouse thermal environment. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 22(2):387-399.

GARZOLI, K.V. et J. BLACKWELL. 1973. The response of a glasshouse to high solar radiation and ambient temperature. *J. Agric. Eng. Res.* 18:205-216.

GARZOLI, K.V. et J. BLACKWELL. 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 26:203-214.

GARZOLI, K.V. et J. BLACKWELL. 1987. An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 36:75-85.

GLAUB, J.C. et G.J. TREZEK. 1981. Heat and mass transfer analysis of greenhouses. Paper No.81-4031, Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, MI.

HUANG, B.K. et A. KATO. 1984. Dynamic simulation of greenhouse thermal behavior. Paper No.84-4030, Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, MI.

KIMBALL, B.A. 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. *Agric. Meteorol.* 11:243-260.

KIMBALL, B.A. 1981. A versatile model for simulating many types of solar greenhouses. Paper No.81-4038, Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, MI.

KIMBALL, B.A. 1986. A modular energy balance program

- including subroutines for greenhouses and other latent heat devices. Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture. ARS 33. 356pp.
- KINDELAN, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 23(6):1232-1239.
- LACROIX, R. 1988. Une étude comparative de la structure des modèles de transfert d'énergie et de masse dans les serres de production. Thèse de M.Sc, Université du Québec à Montréal, Montréal, PQ, Canada. 119pp.
- LANDSBERG, J.J., B. WHITE et M.R. THORPE. 1979. Computer analysis of the efficacy of evaporative cooling for glasshouses in high energy environments. *J. Agric. Eng. Res.* 24:29-39.
- LOVSETH, J. 1981. A greenhouse system with energy storage and high level CO₂ atmosphere. *Acta Hortic.* 115:605-615.
- MAHER, M.J. et T. O'FLAHERTY. 1973. An analysis of greenhouse climate. *J. Agric. Eng. Res.* 18:197-203.
- MEYER, G.E., J.B. FITZGERALD et J.A. DeSHAZER. 1984. Computer simulation of environmental control and energy management in greenhouses. Paper No.84-4032, Am. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, MI.
- MILBURN, W.F. 1982. Analysis of thermal energy systems in greenhouses. Ph.D.Thesis, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA. 167pp.
- MORRIS, L.G., E.S. TRICKETT, F.H. VANSTONE et D.A. WELLS. 1958. Limitation of maximum temperature in a glasshouse by the use of a water film on the roof. *J. Agric. Eng. Res.* 3:121-130.
- NIR, A., A. AMIEL, J. KRANT et M. EPSTEIN. 1981. Solar heat supply for greenhouses with stratified soil heat storage: data collection and feasibility study. *Acta Hortic.* 115:591-598.
- O'FLAHERTY, T., B.J. GAFFNEY et J.A. WALSH. 1973. Analysis of the temperature control characteristics of heated greenhouses using an analog computer. *J. Agric. Eng. Res.* 18:117-132.
- PARKER, J.J., M.Y. HAMDY, R.B. CURRY et W.L. ROLLER. 1981. Simulation of buried warm pipes beneath a greenhouse. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 24(4):1022-1025, 1029.
- PRICE, D.R. et R.M. PEART. 1973. Simulation model to study the utilization of waste heat using a combination multiple reservoir and greenhouse complex. *J. Environ. Qual.* 2:216-224.
- ROTZ, C.A. 1977. Computer simulation to predict energy use and system costs for greenhouse environmental control. Ph.D.Thesis, Pennsylvania State University, University Park, PA. 132pp.
- SADLER, E.J. 1983. Simulation of the energy, carbon, and water balance of a fluid-roof greenhouse. Ph.D.Thesis, Texas A&M University, College Station, TX. 264 pp.
- SEGINER, I. et N. LEVAV. 1971. Models as tools in greenhouse climate design. Agricultural Engineering Faculty. Technion-Israel Institute of Technology. 80pp.
- SEGINER, I. et L.D. ALBRIGHT. 1980. Rational operation of greenhouse thermal curtains. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 23(6):1240-1245.
- SEGINER, I. et D. KANTZ. 1986. In-situ determination of transfer coefficients for heat and water vapour in a small greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 35:39-54.
- SEGINER, I., A. ANGEL, S. GAL et D. KANTZ. 1986. Optimal CO₂ enrichment strategy for greenhouses; a simulation study. *J. Agric. Eng. Res.* 34:285-304.
- SELCUK, M.K. 1970. Use of digital computers for the heat and mass transfer analysis of controlled environment greenhouses. In: Proceedings of the first symposium on the use of computers for engineering related to buildings. National Bureau of Standards. Gaithersburg. MD.p.557-577.
- SELCUK, M.K. 1971. Analysis design and performance evaluation of controlled-environment greenhouses. *ASHRAE Trans.* 23(6):1240-1245.
- SHEN, H. 1977. Dynamic simulation of the utilization of industrial waste heat for greenhouses. Ph.D.Thesis, Rutgers University, New Brunswick, NJ. 154pp.
- SHORT, T.H., W.L. ROLLER et W.L. BAUERLE. 1981. Energy research for the present and for future U.S.A. greenhouse industry. *Acta Hortic.* 115:429-436.
- SILVESTON, P.L., W.D. COSTIGANE, H. TIESSEN et R.R. HUDGINS. 1980. Energy conservation through control of greenhouse humidity. I. Condensation heat losses. *Can. Agric. Eng.* 22(2):125-132.
- SORIBE, F.I. et R.B. CURRY. 1973. Simulation of lettuce growth in an air-supported plastic greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* 18:133-140.
- TAKAKURA, T., K.A. JORDAN et L.L. BOYD. 1971. Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 14(5):964-971.
- TAKAMI, S. et Z. UCHIJIMA. 1977a. A model for the greenhouse environment as affected by the mass and energy exchange of a crop. *J. Agric. Meteorol.(Japan)* 33(3):117-127.
- TAKAMI, S. et Z. UCHIJIMA. 1977b. A model of the greenhouse with a storage-type heat exchanger and its verification. *J. Agric. Meteorol.(Japan)* 33(3):155-166.
- TANTAU, H.-J.. 1980. Climate control algorithms. *Acta Hortic.* 106:49-54.
- TIWARI, G.N. et N.K. DHIMAN. 1985. Periodic theory of a greenhouse. *Energy Convers. Manage.* 25(2):217-223.
- TUNÇ, M. et J.E.S. VENART. 1984. Unsteady thermal behaviour of the greenhouse environment. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer* 11(3):251-266.
- UDINK TEN CATE, A.J. et J. VAN de VOOREN. 1984. New models for greenhouse climate control. *Acta Hortic.* 148:277-285.
- VAN BAVEL, C.H.M. et E.J. SADLER. 1979. SG79 - a computer simulation program for analyzing energy transformations in a solar greenhouse. Mimeographed report. Texas A&M University, College Station, TX. 75 pp.
- VAN BAVEL, C.H.M., T. TAKAKURA et G.P.A. BOT. 1985. Global comparison of three greenhouse climate models. *Acta Hortic.* 174:21-33.
- VAN de BRAAK, N.J. 1981. Thermal problem solving by hand calculations, and application of network theory. *Acta Hortic.* 115:365-376.
- VAN de BRAAK, N.J., J.J.G. BREUER et B.J. HEYNA. 1984. Cumulative frequency distribution curves of green-

houses heat requirements. *Acta Hortic.* 148:337-344.

WALKER, J.N. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouses. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.* 8(3):445-448.

WASS, S.N. et I.A. BARRIE. 1984. Application of a model for calculating glasshouse energy requirements. *Energy in Agric.*

3:99-108.

WILLITS, D.H., P. CHANDRA et M.M. PEET. 1983. Modeling solar energy storage systems for greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 32:73-93.