



HAL
open science

Analyse du comportement thermique du sol d'une serre agricole par simulation dynamique

C. Monteil, M. Amouroux

► **To cite this version:**

C. Monteil, M. Amouroux. Analyse du comportement thermique du sol d'une serre agricole par simulation dynamique. *Journal de Physique III*, 1997, 7 (2), pp.405-440. 10.1051/jp3:1997130 . jpa-00249586

HAL Id: jpa-00249586

<https://hal.science/jpa-00249586>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse du comportement thermique du sol d'une serre agricole par simulation dynamique

C. Monteil (^{1,*}) et M. Amouroux (²)

(¹) I.N.P.T./E.N.S.A.T (Institut National Polytechnique de Toulouse, École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse), Laboratoire d'Ingénierie Agronomique, 145 avenue de Muret, 31076 Toulouse Cedex, France

(²) C.N.R.S./I.M.P. (Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Sciences et de Génie des Matériaux et Procédés), Université de Perpignan, avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan Cedex, France

(Reçu le 10 avril 1996, révisé le 10 juin et le 18 septembre 1996, accepté le 22 octobre 1996)

PACS.44 90.+c – Other topics in heat transfer, thermal and thermodynamic processes

Résumé. — Le comportement énergétique global d'une serre agricole est influencé de manière parfois importante par le stockage diurne et la restitution nocturne d'énergie au sein de son sol, seul élément à grande capacité thermique. Le rôle spécifique joué par le sol est analysé en appliquant un modèle de simulation dynamique déjà existant. Une première partie compare les effets de 4 types d'échangeurs de chauffage sur chaque mois d'une période de culture : aérotherme, tubes aériens à circulation d'eau chaude, paillage radiant ou tubes enterrés à circulation d'eau tiède. Une seconde partie développe le comportement horaire de la serre et du sol pour une journée-type froide en présence de chacun des échangeurs. Une troisième partie précise la sensibilité du bilan thermique de la serre et du sol à différents types de facteurs dans le cas d'un échangeur par aérotherme : environnement climatique, politique de contrôle de la serre, propriétés intrinsèques de la serre (caractéristiques du sol, densité de culture, transparence de la couverture)

Abstract. — The overall energetical behaviour of a greenhouse is significantly affected by diurnal storage and nocturnal release of energy inside the soil, which is the only element with high thermal capacitance. Its specific part is analysed with a pre-existing dynamic simulation model. The first part of this paper studies the effects of 4 kinds of heating exchangers along each month of an entire cultivation period: hot air convector, aerial metallic pipes with hot water circulation, radiant mulch or buried pipes with warm water circulation. The second part develops the hourly behaviour of both greenhouse and soil during a cold standard-day with each of the 4 exchangers. The third part is a sensibility study to various classes of factors in the case of hot air convector exchanger: climatic environment, control policy, intrinsic properties of the greenhouse (soil characteristics, crop density, cover transparency).

(*) Auteur auquel doit être adressée la correspondance (e-mail : monteil@ensat.fr)

Introduction

La serre agricole est un outil de production permettant de créer artificiellement un microclimat destiné à favoriser la croissance et le développement de cultures maraîchères ou horticoles. Le principal facteur à contrôler est la température d'air intérieur, sur laquelle on agit à la hausse par chauffage auxiliaire, ou à la baisse par ventilation, pour ne citer que les moyens classiques de régulation.

Le rayonnement solaire, dont le rôle premier est de permettre la photosynthèse, constitue également une source d'énergie, naturelle et gratuite, qui permettra de limiter plus ou moins le recours au chauffage artificiel, selon les conditions climatiques du lieu. Si l'on analyse sommairement le comportement thermique de la serre sur un cycle journalier, on observe que le rayonnement solaire intervient pendant le jour de manière directe en compensant tout ou une partie des pertes thermiques ; mais il intervient également pendant la nuit de manière indirecte à travers le sol de la serre, qui restitue l'énergie stockée pendant la journée, et diminue donc d'autant l'intensité du système de chauffage auxiliaire. Seul élément à grande capacité thermique, le sol de la serre joue donc un rôle important dans le comportement énergétique global de celle-ci.

On peut citer un certain nombre de travaux dans lesquels le sol de la serre a été plus particulièrement étudié. À une période où les économies d'énergie faisaient l'objet de recherches plus intenses, certains auteurs ont essayé d'augmenter la capacité calorifique du sol, et donc son efficacité en tant que capteur énergétique passif, en utilisant la chaleur latente liée au changement d'état solide/liquide d'un matériau contenu dans des récipients disposés à la surface du sol ou à faible profondeur [4]. Plus près de nous, d'autres auteurs ont étudié le renforcement du stockage thermique dans le sol à l'aide d'un système actif ventilant l'excès d'énergie diurne à travers un réseau de tuyaux enterrés dans le sol [2]. Citons enfin les travaux menés en lien avec le C.E.R.N. de Genève pour évaluer l'intérêt agronomique et énergétique de systèmes de chauffage dits "à basse température" (20 – 40 °C) permettant notamment de valoriser des eaux de rejets industriels [3] : le modèle global du comportement thermique de la serre développé dans ce cadre intègre une évaluation des apports solaires, d'une part diurnes, d'autre part nocturnes différés (*via* le sol) avec une loi simplifiée. Conscients des limites d'une telle loi, les auteurs eux-mêmes rappellent que le stockage dans le sol est lié à de nombreux paramètres (densité de feuillage, mode de chauffage, qualité et humidité du sol, consignes diurnes et nocturnes, consignes de ventilation), et que seule une simulation dynamique permettrait de déterminer l'influence relative de chacun de ces paramètres.

L'objet du présent article est précisément de compléter ces diverses approches pour analyser le rôle thermique du sol d'une serre classique à l'aide d'un modèle dynamique simulant son comportement énergétique. Après un rappel des principes de la modélisation effectuée, déjà décrite dans deux articles précédents [10, 11], l'analyse s'attache d'abord à comparer globalement les effets de plusieurs systèmes de chauffage au niveau d'une journée-type pour chacun des mois d'une période de culture (octobre à juin). On détaille ensuite le comportement horaire de la serre pour une journée-type particulière avec chacun des systèmes de chauffage afin d'explicitier les différences précédemment observées et analyser la dynamique induite par chaque type d'échangeur. Enfin, une étude de sensibilité à divers paramètres complète cette analyse.

1. Principes de la modélisation

Le modèle de serre sur lequel s'appuie notre étude a été décrit dans deux articles précédents, l'un définissant le modèle de base avec un système de chauffage par tubes aériens à circulation d'eau chaude [10], l'autre développant deux autres types d'échangeur adaptés au chauffage

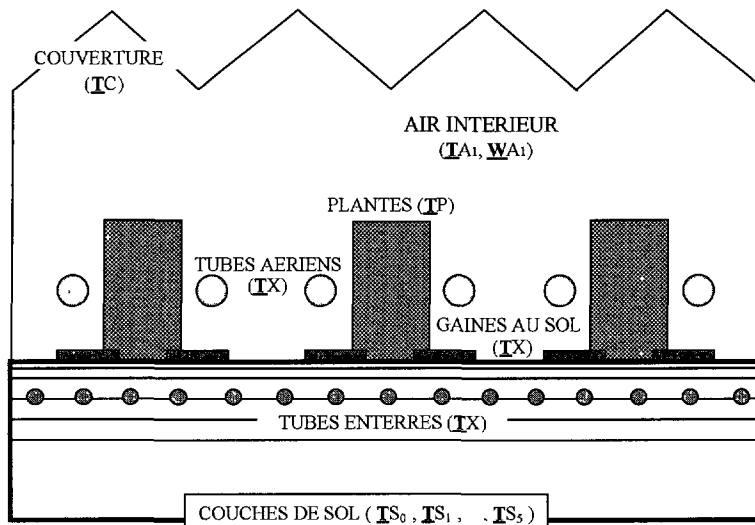


Fig 1. — Section schématique de la serre
[Schematic section of the greenhouse.]

localisé avec circulation d'eau à température plus faible : le paillage radiant (gaines posées au sol) et les tubes enterrés [11]. Nous nous limitons ici à en rappeler les fondements et hypothèses essentiels.

1.1. LES COMPOSANTS DU MODELE. — Le modèle est constitué de cinq éléments de base (Fig. 1) : couverture (C), air intérieur (Ai), plantes (P), sol (S) et échangeur de chauffage principal (X). Le sol est lui-même subdivisé en un certain nombre de couches horizontales d'épaisseur croissante avec la profondeur : 1 cm en surface (S_0), 4 cm (S_1), 10 cm (S_2 , S_3 et S_4) et enfin 30 cm (S_5), soit une profondeur totale de 65 cm en dessous de laquelle on néglige les échanges conductifs vers le sol profond dans les conditions de cet article. L'état de chaque élément est caractérisé par sa température T , supposée uniforme ; en outre l'air intérieur est également caractérisé par son humidité absolue (W_{Ai}). Les pertes conductives par le pourtour du sol de la serre avec le sol extérieur sont prises en compte dans le cas d'un échangeur par tubes enterrés, et négligées dans les autres cas.

Les plantes sont représentées par des rangées de forme parallélépipédique, parallèles entre elles, de longueur égale à celle de la serre. La largeur des rangées, tout comme celle des allées, est constante. En outre, l'ensemble des blocs est centré sur l'axe médian de la serre. La géométrie de la végétation est exploitée, d'une part dans la détermination des échanges par rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde (avec calcul des facteurs de forme mutuels entre les différents composants), d'autre part dans l'évaluation du rayonnement solaire capté par les plantes, le sol et, le cas échéant, l'échangeur de chauffage (avec prise en compte des effets d'ombrage sur le rayonnement solaire direct).

L'échangeur de chauffage principal est choisi parmi l'un des quatre types suivants :

- *aérotherme* : sa présence se traduit par l'injection d'une puissance Q_X dans l'air intérieur ;
- *tubes aériens* : chaque rangée de plantes est associée à une paire de 2 tubes, disposés symétriquement par rapport à l'axe de la rangée ;

Tableau I. — *Bilans d'énergie des éléments de la serre avec échangeur par tubes aériens.*
 [Energy balances of greenhouse components (aerial pipes case).]

Couverture (C)		$V_C + I_C - C_{CAe} - L_{CAe} + C_{A1C} + L_{A1C} = 0$
Air intérieur (A_1)	Chaleur Sensible (S_0)	$-C_{A1C} + C_{PA1} + C_{SA1} - C_{A1Ae} + C_{XA1} + Q_Y = P_{A1}$
	Chaleur Latente	$L_{PA1} + L_{SA1} - L_{A1C} - L_{A1Ae} = P_W$
Plantes (P)		$V_P + I_P - C_{PA1} - L_{PA1} = 0$
Sol (S)	Couche de surface (S_0)	$V_S + I_S - C_{SA1} - L_{SA1} - G_{S_0S_1} = P_{S_0}$
	Autres couches (S_j)	$G_{S_{j-1}S_j} - G_{S_jS_{j+1}} = P_{S_j}$
	Dernière couche (S_{p-1})	$G_{S_{p-2}S_{p-1}} = P_{S_{p-1}}$
Échangeur principal (X)		$V_X + I_X - C_{XA1} + Q_X = P_X$

- *paillage radiant* : chaque rangée de plantes est associée à une paire de 2 gaines de section rectangulaire, posées sur le sol symétriquement de part et d'autre de l'axe de la rangée ;

- *tubes enterrés* : le réseau de tubes, disposés régulièrement dans le sol de la serre à une profondeur comprise entre 15 et 35 cm, est assimilé à un plan chauffant dont les caractéristiques sont corrélées à la géométrie du réseau (diamètre des tubes, écartement, profondeur).

Dans tous les cas peut être ajouté un système de chauffage d'appoint de type aérotherme, générant une puissance Q_Y dans l'air de la serre.

Le tableau I récapitule le système obtenu dans le cas d'une couverture simple avec un échangeur principal par tubes aériens. À chaque variable d'état est associée un bilan d'énergie mettant en œuvre les différents types de transferts thermiques : flux conductifs (G), flux convectifs de chaleur sensible (C) et de chaleur latente (L), bilans nets des flux radiatifs infrarouges de grande longueur d'onde (I) et des flux radiatifs solaires (V). Les termes inertiels (P) interviennent dans les seconds membres des bilans. À titre d'exemple, le flux C_{CAe} représente l'échange convectif sensible (C) de la couverture (C) vers l'air extérieur (Ae) lorsque sa valeur est positive, une valeur négative traduisant un flux en sens inverse.

L'environnement extérieur intervient à travers la température et l'humidité de l'air, la nébulosité du ciel, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. La température apparente de rayonnement de la voûte céleste est déterminée à partir de la nébulosité et de la température extérieure par interpolation entre 2 lois, l'une définie par ciel clair [13] et l'autre par ciel couvert [1]. La part de rayonnement solaire absorbé par les différents éléments est déterminée en prenant en compte les effets d'ombrage des rangs de culture selon la position du soleil ; en outre, l'ensoleillement parvenant à l'intérieur de la serre influe sur la résistance stomatique de la culture (loi dérivée de van Bavel [14]) et donc sur le coefficient de transfert hydrique des plantes vers l'air intérieur. Le vent conditionne le coefficient de transfert convectif sur la paroi externe de la couverture (loi de Kindelan [8]), ainsi que le taux de renouvellement horaire de la serre.

Le détail des expressions des différents flux et des coefficients d'échange est développé dans les deux articles précités [10,11]. La validation de ce modèle de connaissance a été réalisée dans diverses conditions de serres : serre-verre de 8600 m² avec tubes aériens sur culture de rosiers vers Hyères (Var, France) [6], serre-verre de 6300 m² avec aérothermes et paillage radiant en polyéthylène sur culture de tomates vers Marseille (Bouches-du-Rhône, France) [6], serre-verre de 1040 m² avec aérothermes et tubes annelés posés au sol sur culture de tomates vers Toulouse (Haute-Garonne, France) [9].

1.2. MÉTHODOLOGIE DE SIMULATION DYNAMIQUE. — Le principe fondamental de la simulation dynamique repose sur le concept de "journée-type" :

- une journée-type représente une *journée moyenne, représentative d'une période de référence plus longue*, en pratique le mois ; les variables climatiques sont générées heure par heure à l'aide d'un générateur climatique utilisant comme entrées le minimum et le maximum de température et d'humidité, la durée d'insolation et la vitesse du vent à 10 mètres, sur la base de relations développées par Choisnel [5] et Perrin de Brichambaut et Vauge [12] ; ces valeurs sont prédéterminées à partir d'un fichier météorologique rassemblant les données moyennées mois par mois pour une quarantaine de stations du territoire français sur la base de statistiques trentenaires ;

- une journée-type représente une *journée périodique, reproductible à l'identique sur toute la période de référence sans aucune discontinuité* : après détermination d'un état initial approché, la simulation est réitérée au pas horaire jusqu'à observer une répétitivité de toutes les variables d'état sur la période de 24 heures ; ce principe permet ainsi de déterminer de manière réaliste les états de la serre, tout particulièrement pour les composants à très forte inertie que sont les couches de sol ;

- les algorithmes de contrôle du chauffage et de la ventilation sont considérés idéaux, relativement aux puissances installées : en ce qui concerne le chauffage, on détermine à chaque pas horaire s'il faut chauffer ou non (en fonction de la température de consigne), avec priorité au chauffage principal ; si la puissance installée est insuffisante, la température intérieure pourra donc s'abaisser en dessous du niveau de consigne ; la ventilation s'effectue uniquement de façon forcée par l'intermédiaire de ventilateurs ; le débit de ventilation est calculé de manière discrète selon un nombre fixé de paliers, correspondant chacun à 1/20 du débit maximal, lequel est déterminé en fonction du nombre de ventilateurs et de leur débit propre ; ici encore, la température intérieure peut devenir supérieure à la consigne de ventilation si le fonctionnement simultané de tous les ventilateurs ne suffit pas à évacuer l'excès de chaleur.

L'intérêt majeur des journées-types est de bien représenter la dynamique du comportement de la serre lors de journées représentatives du climat moyen d'un site, permettant notamment d'illustrer les tendances fondamentales du stockage/déstockage moyen du sol à l'échelle des 24 heures. Les 9 journées-types que nous utilisons dans la suite de l'article permettent d'avoir des conditions météorologiques moyennes très diversifiées (froides, tempérées, chaudes). Afin d'apprécier le comportement du sol lors de journées s'écartant de la moyenne, nous complétons cette approche par l'analyse d'un scénario de survenance d'une journée ensoleillée pendant un mois froid, avec simulation sur 4 jours consécutifs, permettant d'évaluer la variabilité du stockage du sol par rapport au comportement moyen.

1.3 FORMULATION DU BILAN GLOBAL JOURNALIER. — Si l'on s'intéresse à ce qui se passe aux frontières de notre système-serre, le bilan thermique au niveau de chacun des pas horaires se formule algébriquement ainsi :

$$Q_X + Q_Y + V_{\text{total}} + I_{\text{total}} - C_{CAe} - L_{CAe} - C_{A1Ae} - L_{A1Ae} = P_{\text{total}} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (\text{bilan horaire}).$$

Les différents termes, correspondant à des puissances moyennes (par unité de surface au sol de la serre) maintenues constantes pendant le pas de calcul horaire, ont la signification suivante :

- Q_X et Q_Y représentent le *chauffage auxiliaire*, respectivement pour l'échangeur principal et pour l'appoint par aérotherme ; ces termes sont tous deux positifs ou nuls ;

- V_{total} correspond à l'énergie solaire captée par la serre : c'est la somme des termes V_C , V_P , V_S et V_X représentant le bilan solaire net de la couverture, des plantes, du sol et de l'échangeur de chauffage ; ce terme est positif ou nul ;
- I_{total} correspond au bilan net des rayonnements infrarouges de grande longueur d'onde absorbés par la serre (somme des termes I_C , I_P , I_S et I_X , représentant chacun le bilan infrarouge de chaque élément rayonnant) ; en pratique, I_{total} est toujours strictement négatif et représente donc, en valeur absolue, les pertes radiatives de la serre ;
- C_{CAe} est le transfert convectif sensible à la surface de la couverture vers l'air extérieur ; il est en général positif, sauf en période chaude où l'air extérieur peut être plus chaud que la couverture ;
- L_{CAe} correspond à la condensation sur la face externe de la couverture ; dans les conditions des simulations de cet article, ce terme est toujours nul, et sera donc ignoré dans la suite ;
- C_{AiAe} et L_{AiAe} représentent les pertes par renouvellement de l'air intérieur, d'une part sous forme de chaleur sensible, d'autre part sous forme de chaleur latente liée à la variation d'humidité de l'air ; dans les conditions des simulations de cet article, ces termes sont toujours positifs ;
- P_{total} cumule les inerties thermiques des éléments dont la capacité calorifique a été prise en considération, à savoir les différentes couches de sol (P_S), l'air intérieur (terme sensible P_{Ai} et terme latent P_W) et l'échangeur de chauffage (P_X).

Lorsque l'on formule ce bilan au niveau de l'ensemble d'une journée, le cumul des termes inertiels s'annule, du fait de la périodicité sur 24 heures de la simulation dynamique. Par contre, on doit tenir compte des termes qui peuvent être alternativement positif ou négatif au cours de la journée, sans quoi le cumul ne serait plus pertinent. Enfin, on différencie dans le renouvellement d'air ce qui est naturel (les fuites liées à la plus ou moins bonne étanchéité de la serre) de ce qui est artificiel (mise en route des ventilateurs). Le bilan journalier s'écrit donc ainsi, en mettant les gains en partie gauche et les pertes en partie droite :

$$Q_{\text{chauf}} + V_{\text{capt}} + Q_{\text{AeC}} = Q_{\text{ir}} + Q_{\text{CAe}} + Q_{\text{fuites}} + Q_{\text{ventil}} \quad (\text{MJ m}^{-2}) \quad (\text{bilan journalier brut}).$$

Les termes, correspondant à des énergies par unité de surface au sol de la serre, sont tous positifs ou nuls et représentent respectivement .

- Q_{chauf} : énergie de chauffage (cumul de Q_X et Q_Y) ;
- V_{capt} : énergie solaire captée par la serre (cumul de V_{total}) ;
- Q_{AeC} : énergie apportée par l'air extérieur à la couverture (valeur absolue du cumul des valeurs négatives de C_{CAe}) ;
- Q_{ir} : pertes radiatives dans l'infrarouge de grande longueur d'onde (valeur absolue du cumul de I_{total}) ;
- Q_{CAe} : énergie perdue par la couverture vers l'air extérieur (cumul des valeurs positives de C_{CAe}) ;
- Q_{fuites} : pertes par fuites d'air de la serre (cumul de C_{AiAe} et L_{AiAe} lorsque la ventilation n'est pas en service) ;
- Q_{ventil} : énergie rejetée par ventilation forcée (cumul de C_{AiAe} et L_{AiAe} lorsque la ventilation est en service).

Lorsque l'on doit recourir à la ventilation forcée ($Q_{\text{ventil}} \neq 0$), l'énergie rejetée vise à limiter les apports solaires excessifs ; on formule donc un bilan journalier net de la façon suivante :

$$Q_{\text{chauf}} + V_{\text{util}} + Q_{\text{AeC}} = Q_{\text{bilan}} = Q_{\text{ir}} + Q_{\text{CAe}} + Q_{\text{fuites}} \quad (\text{MJ m}^{-2}) \quad (\text{bilan journalier net}).$$

Les 2 nouveaux termes introduits dans ce bilan par rapport au bilan précédent (bilan journalier brut) ont la définition suivante :

- Q_{bilan} représente le *bilan global journalier*, c'est-à-dire le bilan énergétique permettant d'assurer une plage de température d'air entre les extrema de consigne minimale (chauffage) et maximale (ventilation) que l'on se fixe en fonction des contraintes agronomiques de la culture ; compte tenu de la répétitivité sur les 24 heures, il correspond donc tout à la fois aux gains énergétiques naturels et artificiels d'une part, et aux déperditions thermiques d'autre part ; Q_{bilan} peut être vu comme une approximation par excès des *besoins thermiques* de la serre, c'est-à-dire de la quantité d'énergie globale utilisée par la serre à l'échelon de la journée pour satisfaire une température d'air intérieur minimale ; Q_{bilan} sera toujours supérieur à ce besoin minimal dans la mesure où, compte tenu de l'écart important entre les consignes minimale et maximale, les journées-types pourront conduire à des états énergétiques moyens différents (par exemple une température diurne d'air, de sol et de plante plus élevée) ;
- V_{util} est l'énergie solaire utile pour la serre ; c'est la différence entre l'énergie solaire captée (V_{capt}) et l'énergie rejetée par ventilation forcée (Q_{ventil})

1.4. STOCKAGE THERMIQUE DANS LE SOL. — Le bilan journalier net précédemment formulé ne fait pas apparaître explicitement le rôle que joue le sol dans la prise en compte partielle des besoins thermiques, puisque la restitution nocturne d'énergie vers l'air intérieur intervient entre 2 éléments internes du système-serre. Afin de mettre en évidence cet effet, nous définissons l'énergie restituée par le sol (Q_{sol}) par totalisation, sur la journée de 24 heures, du flux conductif *ascendant* traversant la surface du sol, c'est-à-dire la valeur absolue du cumul des valeurs négatives de :

$$V_S + I_S - C_{SA1} - L_{SA1}$$

où V_S représente l'énergie solaire captée par le sol, I_S le bilan net des échanges infrarouges du sol avec les autres éléments radiatifs, C_{SA1} le flux convectif de chaleur sensible du sol vers l'air intérieur, et enfin L_{SA1} le flux de chaleur latente liée à l'évaporation d'eau du sol.

Dans le cas de l'échangeur par gaines posées au sol est rajouté un terme supplémentaire G_{XS} correspondant au flux conductif de contact des gaines vers le sol (cf. [11]).

Compte tenu de la formulation des bilans dans les diverses couches de sol (cf. Tab. I), l'énergie restituée par le sol correspond au cumul des variations des stocks thermiques (en valeur absolue) constitués dans les diverses couches du sol (termes P_S , en partie droite des bilans). Le cas de l'échangeur par tubes enterrés constitue une exception, puisque se superpose un apport d'énergie de chauffage au sein même du sol : sur l'ensemble de la journée de 24 heures, cet apport d'énergie est calculable en totalisant la partie utile de l'énergie de chauffage parvenant à la surface du sol, différence entre le flux de chauffage principal Q_X et les pertes conductives vers le sol extérieur G_{XS_e} (cf. [11]) ; cette énergie est déduite de la sommation des flux de surface pour obtenir l'énergie Q_{sol} restituée en propre par le sol.

L'énergie stockée dans le sol, cumul des valeurs *descendantes* du flux de surface (valeurs positives), est égale en valeur absolue à l'énergie restituée, du fait même de la périodicité du comportement thermique de la serre sur les 24 heures de la journée-type. Le stockage d'énergie que nous prenons ici en compte correspond, non pas au stockage "absolu" d'énergie au sein du sol (caractérisé par la température du sol), mais à un stockage "relatif" utilisable à l'échelon de cycles journaliers répétitifs. L'énergie stockée dans le sol représente une approximation des *apports solaires différés*, c'est-à-dire de la part de l'énergie solaire utile non immédiatement utilisée pendant le jour pour compenser une partie des besoins thermiques du moment, et restituée pendant la nuit.

2. Analyse globale

Dans un premier temps, nous comparons le comportement énergétique de la serre et du sol pour chacun des quatre systèmes de chauffage dans les conditions climatiques moyennes variées susceptibles d'être observées lors d'une période de production (octobre à juin).

2.1. DÉFINITION DE LA SERRE DE RÉFÉRENCE. — La serre de référence est définie à partir d'une serre réelle de 1040 m² (40 m de long sur 26 m de large) utilisée pour la validation du modèle [9], située à Ondes (Haute-Garonne, France) par 43° 47' de latitude nord et 1° 19' de longitude est. Chacune des 4 chapelles a une hauteur de 4,40 m sous faitage et 3 m sous chéneau, ce qui conduit à un volume total de 3850 m³. La couverture et les parois sont en verre horticole de 4 mm d'épaisseur. Les propriétés spectrales retenues sont, pour l'infrarouge de grande longueur d'onde, une transmissivité nulle et une émissivité de 90 %, et pour le rayonnement solaire, des coefficients de transmission, d'absorption et de réflexion moyens variant en fonction du mois pour tenir compte des trajectoires plus ou moins élevées du soleil (Tab. II).

Les propriétés du sol, considéré à humidité moyenne, correspondent à 1,3 W m⁻¹K⁻¹ pour la conductivité thermique, 1480 J kg⁻¹K⁻¹ pour la chaleur massique et 1620 kg m⁻³ pour la masse volumique, soit une capacité calorifique de 2,40 MJ m⁻³K⁻¹.

L'étanchéité de la serre a également été prise comme moyenne avec un taux de renouvellement par fuites fixé à 0,50 + 0,25 × U_e renouvellements par heure, où U_e est la vitesse du vent à l'extérieur (m s⁻¹).

La plante cultivée lors de l'expérimentation était la tomate, avec des plants disposée en 12 rangées espacées de 2 m d'axe à axe. On considère ici un développement moyen de la végétation, avec des rangées de 0,60 m de large sur 1,00 m de haut et un indice de recouvrement foliaire de 2. Dans cette approche globale, on considère constantes ces valeurs, quel que soit le mois, afin de mieux mettre en évidence les effets bruts du climat et du type d'échangeur. L'influence du développement de la culture est discuté dans l'étude de sensibilité.

Les caractéristiques de chaque type d'échangeur principal sont les suivantes :

- *tubes aériens* : ils sont situés à 20 cm au-dessus du sol, avec un diamètre de 57 mm et un entr'axe de 90 cm par rangée de plantes ; leur puissance utile maximale est fixée à 120 W m⁻² ;
- *gaines posées au sol* : elles sont larges de 40 cm et écartées de 10 cm autour de l'axe de chaque rangée de plantes ; la surface de sol couverte correspond à 37 % de la superficie totale ; leur puissance utile maximale est également fixée à 120 W m⁻² ;
- *tubes enterrés* : ils sont enterrés à 15 cm sous la surface du sol, avec un diamètre de 40 mm et un espacement de 54 cm (soit 48 tubes) ; leur puissance utile maximale est limitée à 60 W m⁻² afin d'éviter le développement de températures de sol excessives, susceptibles d'endommager les cultures.

La puissance de l'aérotherme (qu'il soit seul ou utilisé en appoint de l'un des 3 échangeurs précédents) est suffisamment dimensionnée pour permettre dans tous les cas de respecter la température de consigne de chauffage.

Les consignes de température sont fixées à 14 °C pour le chauffage et 22 °C pour la ventilation. La ventilation dynamique est assurée par 4 ventilateurs de 40 000 m³ h⁻¹ chacun (1 par chapelle) capables d'assurer un renouvellement global pouvant atteindre 41,6 volumes de serre par heure.

Les conditions climatiques des journées-types correspondant à l'ensemble de la période de production sont issues des données de la station météorologique de Toulouse-Blagnac (Tab. II). Nous donnons (Fig. 2) un exemple d'évolution-type de la température de l'air extérieur et de la température apparente de rayonnement de la voûte céleste (température de ciel) pour le mois de février (utilisé comme mois de référence dans l'étude de sensibilité).

Tableau II. — Conditions climatiques et coefficients spectraux de la couverture pour chaque journée-type mensuelle.

[Monthly climatic conditions and cover spectral coefficients of every standard-day].

MOIS	Temp de l'air mini / maxi (°C)	Durée insolation (heures)	Ensoleillement global (MJ m ⁻²)	Vent à 10 mètres (m s ⁻¹)	Temp de ciel mini / maxi (°C)	coefficients couverture transmis - absorpt
octobre	8,8/18,6	5,2	8,3	3,1	-1,8/9,3	58 % - 19 %
novembre	4,4/12,5	3,0	4,2	3,1	-4,7/4,0	54 % - 21 %
décembre	2,7/9,3	1,9	2,5	3,7	-5,4/1,5	52 % - 22 %
janvier	1,5/8,7	2,5	3,2	3,5	-7,3/0,3	54 % - 21 %
février	2,1/10,5	4,0	6,2	3,8	-8,0/1,2	58 % - 19 %
mars	4,1/13,6	5,6	10,4	4,5	-7,0/3,6	63 % - 17 %
avril	6,3/16,0	6,2	14,1	4,6	-4,6/6,3	68 % - 15 %
mai	9,5/20,0	7,6	18,1	3,8	-1,7/10,3	72 % - 13 %
juin	12,7/23,7	8,0	19,6	3,5	2,0/14,6	74 % - 12 %

Température extérieure et température de ciel

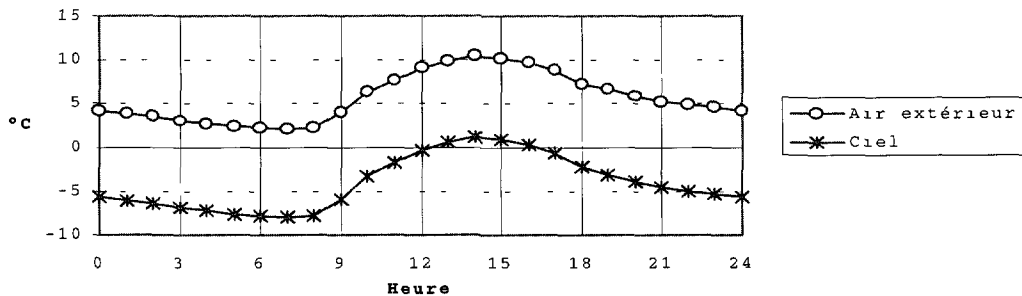


Fig. 2. — Évolution-type de la température d'air extérieur et de la température apparente de rayonnement du ciel - mois de février.

[Standard daily evolution of outside air temperature and sky temperature (February)]

2.2. COMPARAISON DU BILAN GLOBAL JOURNALIER. — Quelle que soit la date, le bilan journalier moyen est du même ordre de grandeur pour les différents types d'échangeur, à l'exception du chauffage par aérotherme seul (Fig. 3a) : sur l'ensemble de la saison, il s'élève à 8,5 MJ m⁻² pour le chauffage par aérotherme seul, 9,2 MJ m⁻² pour l'échangeur par tubes aériens, 9,3 MJ m⁻² pour celui par gaines posées au sol ou par tubes enterrés. Il faut cependant nuancer la baisse des pertes énergétiques apparemment observée dans le cas de l'aérotherme : d'une part, le modèle ne tient pas compte de l'augmentation des coefficients de transfert convectifs liés au brassage d'air provoqué par la mise en route de l'aérotherme, considérant la présence d'une gaine de distribution de l'air ; d'autre part, la régulation sur la base d'une même consigne de température d'air intérieur conduit à un état agro-thermique sensiblement moins favorable puisque les températures de plantes et de sol sont inférieures à celles observées en présence des autres types d'échangeur, localisés à proximité plus directe de ces éléments (cf. Monteil et Amouroux [11]) ; sur l'ensemble de la période, la température moyenne nocturne de la culture se situe respectivement à 13,7 °C, 14,3 °C, 14,5 °C et 14,1 °C pour les 4 échangeurs, et celle du sol à 10 cm de profondeur à 17,3 °C, 18,0 °C, 19,3 °C et 21,7 °C ; comme l'indique Bourgeois *et al.* [3], une même "température de référence agronomique" peut être obtenue avec une température de consigne d'air intérieur plus basse en présence d'échangeurs situés à proximité

du feuillage, l'application d'une consigne de 15 °C avec un échangeur par aérotherme (1 K de plus par rapport au cas précédent), permettant d'observer une température moyenne nocturne des plantes de 14,4 °C analogue au cas des tubes aériens, aboutit à un bilan journalier de 9,1 MJ m⁻², tout à fait comparable aux autres types d'échangeurs localisés en surface du sol.

Les 3 composantes des pertes thermiques se répartissent de manière analogue pour les échangeurs autres que l'aérotherme : globalement sur l'ensemble de la saison, on observe une proportion de 53 % de pertes infrarouges, 32 % de convection de la couverture vers l'air extérieur et 15 % de fuites vers l'air extérieur (hors-ventilation) ; cette répartition est très liée au mois puisque ces trois pertes s'échelonnent depuis respectivement 42 %, 40 % et 18 % en janvier, jusqu'à 72 %, 18 % et 10 % en octobre ou juin : lors des mois chauds, les pertes convectives s'affaiblissent considérablement ; si l'on restreint le calcul à la période novembre-avril où le chauffage intervient de manière significative, le taux moyen de répartition s'établit alors à 49 % pour le radiatif, 35 % pour le convectif et 16 % pour les fuites. Dans le cas de l'aérotherme seul, la baisse des pertes énergétiques est essentiellement due à la diminution des pertes convectives à la surface externe de la couverture, de sorte que leur part diminue de 3 à 4 % du total tandis que celle des pertes infrarouges augmente d'autant, la part des fuites étant analogue au cas des autres échangeurs.

2.3. APPORTS SOLAIRES ET CHAUFFAGE AUXILIAIRE. — Les apports thermiques proviennent essentiellement de deux sources d'énergie, l'énergie solaire (Fig. 3b) et l'énergie de chauffage (Fig. 3c), qui se répartissent sur l'ensemble de la saison entre 40 et 47 % pour le chauffage, et entre 59 et 53 % pour les apports solaires ; un troisième appoint thermique, la convection depuis l'air extérieur vers la couverture, intervient uniquement lors des périodes plus chaudes (octobre, mai et juin), de manière très marginale puisqu'il n'excède pas les 4 à 7 % du bilan. Si l'on se limite aux périodes où le chauffage intervient significativement (novembre à avril), l'énergie de chauffage représente 47 % des apports pour l'aérotherme, 52 % pour les tubes aériens et gaines au sol, et 53 % pour les tubes enterrés.

Les apports solaires sont pratiquement indépendant du système de chauffage sur la période de novembre à février ; dans le cas des tubes enterrés, les apports solaires utiles sont significativement plus faibles lors des périodes tempérées et chaudes nécessitant un recours à la ventilation ; le mois de juin fait exception car le système de chauffage n'a pas fonctionné du tout.

La consommation énergétique du chauffage auxiliaire est très nettement inférieure pour l'aérotherme (avec les réserves déjà notées), puisque les pertes thermiques sont plus faibles que dans les autres cas et les apports solaires équivalents. À l'inverse, le chauffage est plus élevé dans le cas des tubes enterrés puisque, à pertes thermiques équivalentes avec tubes aériens et gaines au sol, l'apport solaire est plus faible.

Les rejets thermiques par ventilation (Fig. 3d) sont plus élevés en présence des tubes enterrés qu'avec les autres échangeurs, l'écart semblant diminuer avec la durée du chauffage. En outre, on observe une ventilation en mars, alors qu'elle n'est pas nécessaire avec les autres échangeurs. On verra que ceci est notamment lié au fait que, de jour, l'air intérieur est également chauffé par le sol qui se décharge de l'énergie accumulée la nuit.

La répartition entre chauffage auxiliaire et apports solaires varie très sensiblement tout au long de l'année. Si l'on prend l'exemple du chauffage par tubes aériens (Fig. 4a), on remarque que la part assurée gratuitement par les apports solaires varie de 16 % en décembre jusqu'à dépasser les 75 % en période chaude. À titre de comparaison, les valeurs mesurées sur la serre du C.E.R.N. à Genève (à une latitude plus élevée) variaient de 21 % en décembre jusqu'à 70 % en juin [3]. La figure fait également apparaître une limite maximale des apports solaires (ici de l'ordre de 7 à 8 MJ m⁻²), du fait de l'utilisation de la ventilation.

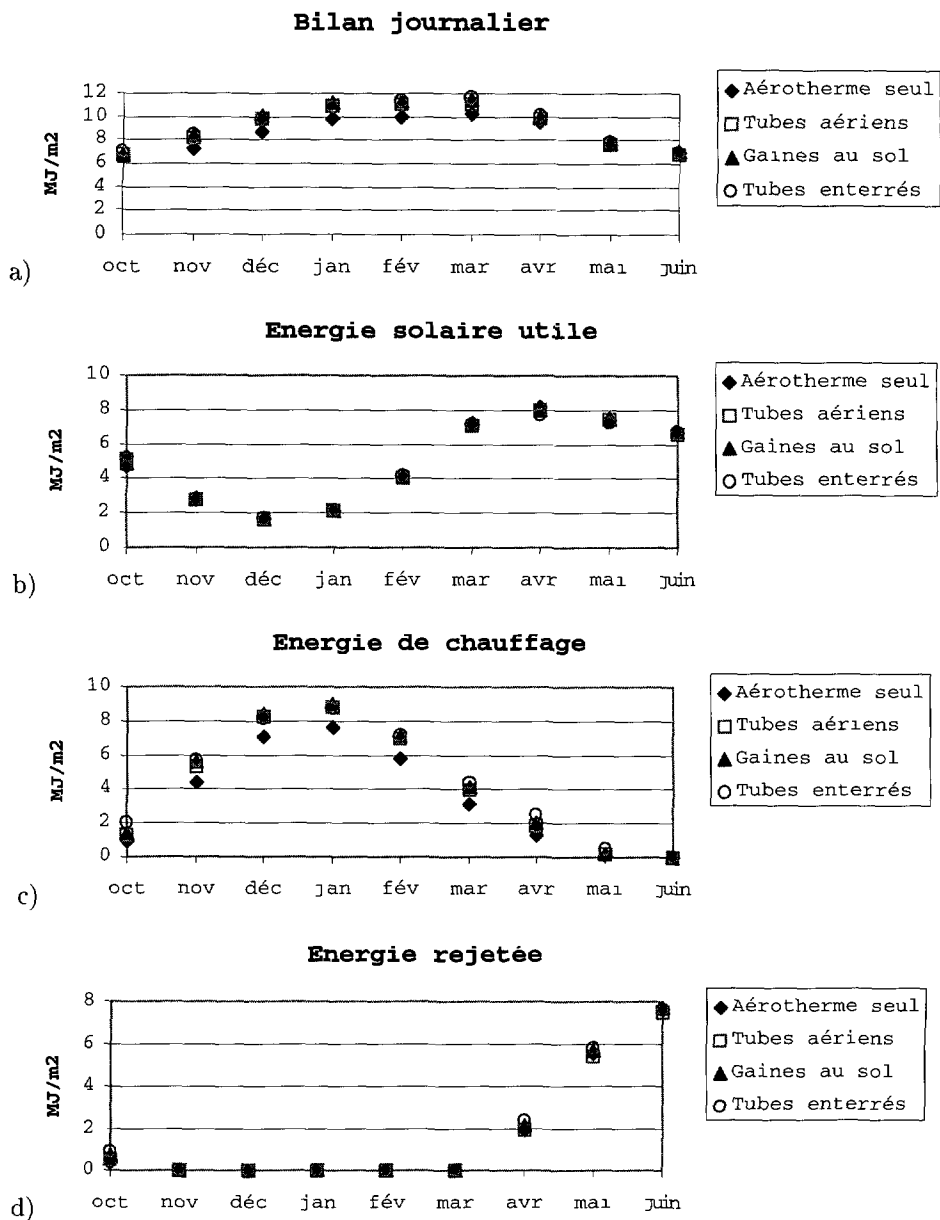


Fig 3. — Évolution mensuelle du bilan journalier (a), des apports solaires (b), du chauffage auxiliaire (c) et de l'énergie rejetée par ventilation (d) pour une consigne de chauffage de 14 °C.

[Monthly evolution of global daily balance (a), solar gains (b), auxiliary heating flow (c) and ventilated energy (d) (14 °C heating setpoint).]

L'énergie solaire captée représente entre 65 et 72 % de l'énergie solaire incidente, valeur comparable au coefficient de captage de 0,65 déterminé sur la serre du C.E.R.N. [3]. Lors des périodes de ventilation, l'énergie solaire utile est plus faible et s'abaisse à 34 % de l'énergie solaire incidente en juin (Fig. 4b).

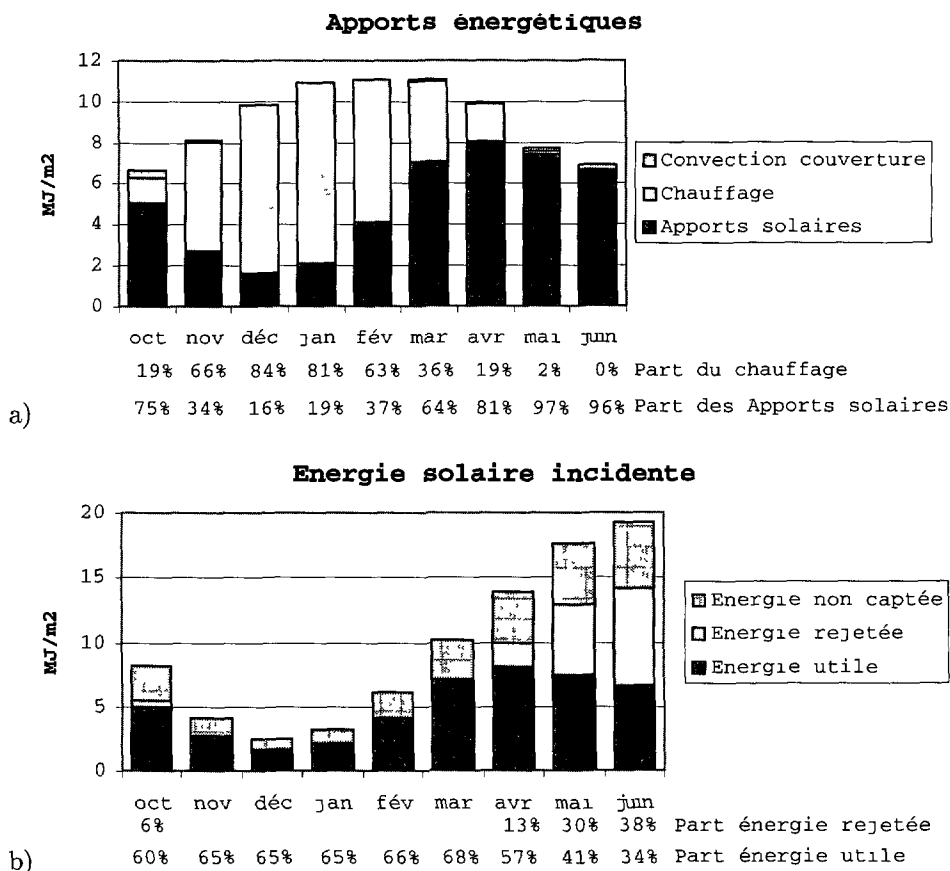


Fig. 4. — Répartition mensuelle des apports énergétiques (a) et de l'énergie solaire incidente (b) - cas des tubes aériens.

[Monthly distribution of energetical gains (a) and incident solar energy (b) (aerial pipes case).]

2.4. STOCKAGE THERMIQUE DANS LE SOL. — Le stockage thermique dans le sol fait apparaître des valeurs plus faibles pour les mois froids (Fig. 5), ce qui est à relier à l'ensoleillement, dont le minimum intervient en décembre. Les disparités apparaissent plus nettement entre les différents échangeurs : le cas des tubes enterrés est le plus défavorable, avec un stockage quasi-nul lors des mois froids, et un stockage très significativement plus faible que les autres échangeurs pour les autres mois ; l'échangeur par gaines posées au sol montre également un stockage très faible lors des mois très froids (décembre, janvier), avec une valeur un peu plus élevée qu'avec les tubes enterrés dans les autres périodes ; l'aérotherme seul et les tubes aériens font apparaître les stockages les plus importants, assez voisins en période tempérée ou chaude, et plus favorables à l'aérotherme en période froide.

Si l'on raisonne en valeur relative par rapport au bilan journalier, le taux de stockage dans le sol pendant les mois où le chauffage a fonctionné pendant plus de 10 heures (octobre à avril) représente environ 14 % avec l'aérotherme, 11 % avec les tubes aériens, 8,5 % avec les gaines posées au sol et 6 % avec les tubes enterrés. L'examen de l'évolution de ce taux mois par mois confirme ce "classement" entre les différents échangeurs (Tab. III).

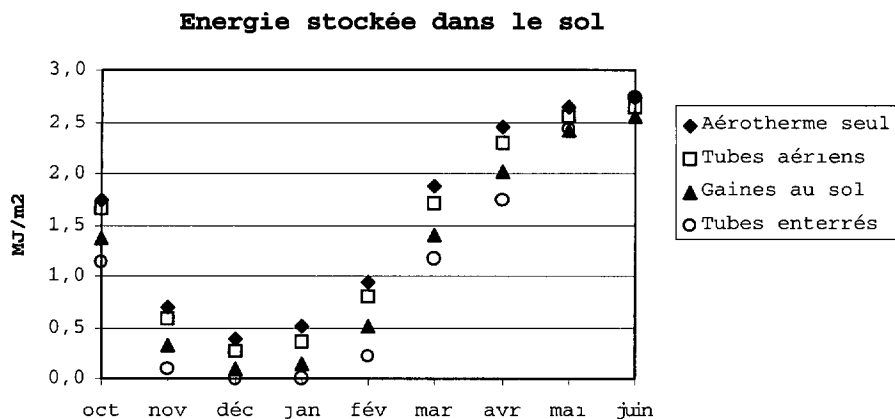


Fig 5. — Évolution du stockage thermique journalier dans le sol sur une période de culture.
[Daily soil thermal storage within a cultural cycle]

Tableau III. — Taux de l'énergie stockée dans le sol par rapport aux apports thermiques (et à l'énergie solaire utile).

[Percentage of soil stored energy vs. thermal gains (and useful solar energy)].

	Aérotherme		Tubes aériens		Gaines au sol		Tubes enterrés	
octobre	26 %	(33 %)	25 %	(33 %)	21 %	(28 %)	17 %	(24 %)
novembre	10 %	(25 %)	7 %	(21 %)	4 %	(12 %)	1 %	(3 %)
décembre	4 %	(24 %)	3 %	(17 %)	1 %	(6 %)	0 %	(0 %)
janvier	5 %	(24 %)	3 %	(17 %)	1 %	(6 %)	0 %	(0 %)
février	9 %	(23 %)	7 %	(20 %)	5 %	(12 %)	2 %	(5 %)
mars	18 %	(26 %)	15 %	(24 %)	12 %	(19 %)	10 %	(16 %)
avril	26 %	(30 %)	23 %	(28 %)	20 %	(25 %)	17 %	(23 %)
moyenne	13,8 %	(27 %)	11,3 %	(27 %)	8,5 %	(19 %)	6,3 %	(14 %)

Il est également intéressant de visualiser la part que représente le stockage dans le sol par rapport à l'énergie solaire utile, en tant qu'approximation des apports différés nocturnes. L'évolution mensuelle du stockage dans le sol sur l'exemple du chauffage avec tubes aériens (Fig. 6) montre que la part du stockage dans le sol représente environ 17 % de l'énergie solaire captée lors des mois froids, jusqu'à environ 30 à 40 % de l'énergie solaire utile lors des mois chauds, déduction faite des rejets par ventilation.

On peut rapprocher ces résultats des mesures rapportées par Bourgeois *et al.* [3] sur la serre du C.E.R.N. Pour une culture de tomates avec chauffage par aérotherme, le stockage dans le sol varie en valeur absolue entre 0,7 et 1,4 MJ m⁻² jour⁻¹ sur la période de février à juin pour une cinquantaine de mesures, avec un maximum isolé vers 1,7 MJ m⁻² et 4 mesures comprises entre 0,3 et 0,55 MJ m⁻².

Sur la base de ces expérimentations, ces auteurs évaluent le stockage dans le sol en moyenne mensuelle à 25 % de l'énergie solaire captée lorsque l'ensoleillement est faible, avec une borne

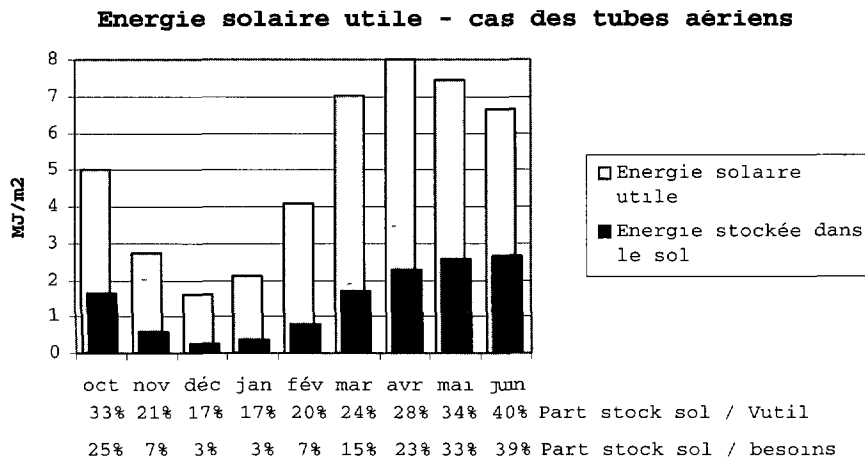


Fig. 6 — Répartition mensuelle du stockage dans le sol par rapport à l'énergie solaire utile.
 [Monthly distribution of soil thermal storage *vs.* useful solar energy]

maximale fixée comme suit pour les autres cas :

$$Q_{\text{sol}} = C_{\text{chauf}}(1,5 - 0,5C_{\text{dens}}) \text{ MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1} \quad (\text{apports différés nocturnes})$$

Le coefficient C_{chauf} est fonction du type de chauffage (0 pour sol à faible inertie thermique, 0,8 pour chauffage sur le sol et 1 pour chauffage dans l'air ou enterré dans le sol) tandis que C_{dens} représente un indice de densité de culture (0 en l'absence de culture, 1 pour une densité moyenne telle la tomate, 2 pour une densité forte tel le chrysanthème).

L'application de cette formule à notre cas conduirait, pour les mois de mars à juin, à un plafond constant de 1 MJ m^{-2} dans le cas de l'aérotherme, des tubes aériens et des tubes enterrés, et $0,8 \text{ MJ m}^{-2}$ pour les gaines au sol, ce qui est plus faible que les valeurs ici simulées en mars (Fig. 5) et *a fortiori* pour les mois suivants où un seuil semble apparaître plutôt vers les $2,7 \text{ MJ m}^{-2}$. En ce qui concerne les mois de novembre à février, c'est l'inverse qui se produit puisque le taux des 25 % de l'énergie solaire captée, fixé indépendamment du type d'échangeur, s'avère comparable (Tab. III) dans le cas de l'aérotherme (23 à 25 %), mais plus franchement élevé pour les tubes aériens (17 à 21 %), et totalement surestimé pour les gaines au sol (6 à 12 %) et les tubes enterrés (0 à 5 %).

Si l'effet de masque joué par les gaines posées sur le sol peut partiellement expliquer la moins bonne propension au stockage dans le sol, cela ne peut jouer dans le cas des tubes enterrés ; en fait, la raison fondamentale est à corréliser à la valeur importante de la température du sol induite par ce type d'échangeur : *plus le sol est chaud, plus importantes sont ses pertes en direction des autres éléments de la serre, et donc moins le sol peut emmagasiner vers ses couches plus profondes de l'énergie utilisable à l'échelon du cycle journalier*. Cet effet joue également pour les autres échangeurs localisés près du sol : pour la journée-type du mois de février, par exemple, la température moyenne du sol à 10 cm de profondeur s'établit à $14,1 \text{ °C}$ avec l'aérotherme, $15,5 \text{ °C}$ avec les tubes aériens, $17,2 \text{ °C}$ avec les gaines posées au sol et $20,8 \text{ °C}$ avec les tubes enterrés. L'étude détaillée du comportement horaire de la serre lors d'une journée-type permet d'affiner cette hypothèse.

3. Analyse détaillée

Le mois de février a été choisi car il correspond à une journée sans ventilation pour laquelle les énergies stockées dans le sol sont les plus différenciées entre les quatre types de mode de chauffage (Fig. 5).

3.1. PUISSANCE DE CHAUFFAGE. — L'évolution de la puissance de chauffage (Fig. 7a) est quasi-identique pour les 2 échangeurs en contact direct avec le sol, avec une montée en puissance régulière au fur et à mesure de l'avancée de la nuit et de la baisse de la température extérieure, minimale avant le lever du soleil. La courbe des tubes aériens est légèrement décalée vers le bas (5 à 10 W m^{-2}), avec simplement un appel de puissance plus important à la mise en route en fin de journée du fait d'une inertie des tubes assez élevée pour une surface d'échange réduite. L'évolution dans le cas de l'aérotherme a une allure analogue, si ce n'est avec une intensité bien plus faible que pour les autres échangeurs (20 à 30 W m^{-2} en moins)

3.2. TEMPÉRATURE DE L'AIR. — La température de l'air intérieur (Fig. 7b), égale à la valeur de consigne pendant la nuit, est plus chaude dans la journée pour les échangeurs les plus proches du sol : la moyenne pendant le jour est de $14,3 \text{ °C}$ pour l'aérotherme, $14,8 \text{ °C}$ pour les tubes aériens, $15,0 \text{ °C}$ pour les gaines au sol et $15,5 \text{ °C}$ pour les tubes enterrés, avec des maxima respectivement égaux à $15,1 \text{ °C}$, $16,0 \text{ °C}$, $16,5 \text{ °C}$ et $17,4 \text{ °C}$. La valeur plus élevée de la température dans le cas des tubes enterrés explique que, pour les mois plus chauds, la mise en route du chauffage pourra s'opérer un peu plus tard, et que le recours à la ventilation sera plus important.

3.3. TEMPÉRATURE DE SURFACE DU SOL. — Le niveau de température d'air est à corrélérer à celui de la température de surface du sol (Fig. 7c), dont les évolutions sont très clairement parallèles et décalées en valeur, sauf pour les gaines au sol : dans ce cas, le niveau de la température nocturne est relevé du fait de l'action directe de contact des gaines sur la surface du sol lorsque le chauffage est en route. De ce fait, tubes enterrés et gaines au sol induisent une même température de surface nocturne, supérieure d'environ 2 K au cas des tubes aériens, et de 4 K à celui de l'aérotherme. Le jour, les températures ont tendance à se resserrer, sauf dans le cas des tubes enterrés où la pente de croissance est plus marquée. Ceci tient au fait que la chaleur emmagasinée dans le sol par les tubes de chauffage continue à migrer lentement vers la surface dans la journée ; la surface se trouve ainsi chauffée à la fois par le haut (rayonnement solaire) et par le bas (apports différés diurnes du chauffage).

3.4. FLUX TRAVERSANT LA SURFACE DU SOL. — L'observation du flux énergétique traversant la surface du sol confirme cette interprétation (Fig. 7d). La courbe de ce flux pour l'aérotherme présente l'évolution typique d'un stockage diurne important (valeurs négatives du flux de 9 h à 15 h , avec un extremum de $-55,4 \text{ W m}^{-2}$ à 13 h) suivi d'une restitution nocturne atteignant son maximum de puissance en début de nuit ($22,6 \text{ W m}^{-2}$) puis décroissant de manière très lente et régulière au cours de la nuit au fur et à mesure que le sol se décharge de l'énergie qu'il contient : le flux atteint encore $13,4 \text{ W m}^{-2}$ à 7 h du matin, juste avant le lever du soleil. La valeur moyenne sur la période nocturne s'établit à $16,9 \text{ W m}^{-2}$.

L'évolution est du même type pour le cas des tubes aériens, avec cependant 3 différences :

- le stockage est un peu moins important (extremum de flux de $-49,5 \text{ W m}^{-2}$) ;
- la restitution démarre un peu plus tôt, avec une intensité décroissant un peu moins lentement : partant d'un maximum de $24,4 \text{ W m}^{-2}$ à 17 h , elle a diminué de plus de moitié à 7 h du matin ($10,3 \text{ W m}^{-2}$) ; la moyenne nocturne vaut $13,6 \text{ W m}^{-2}$.

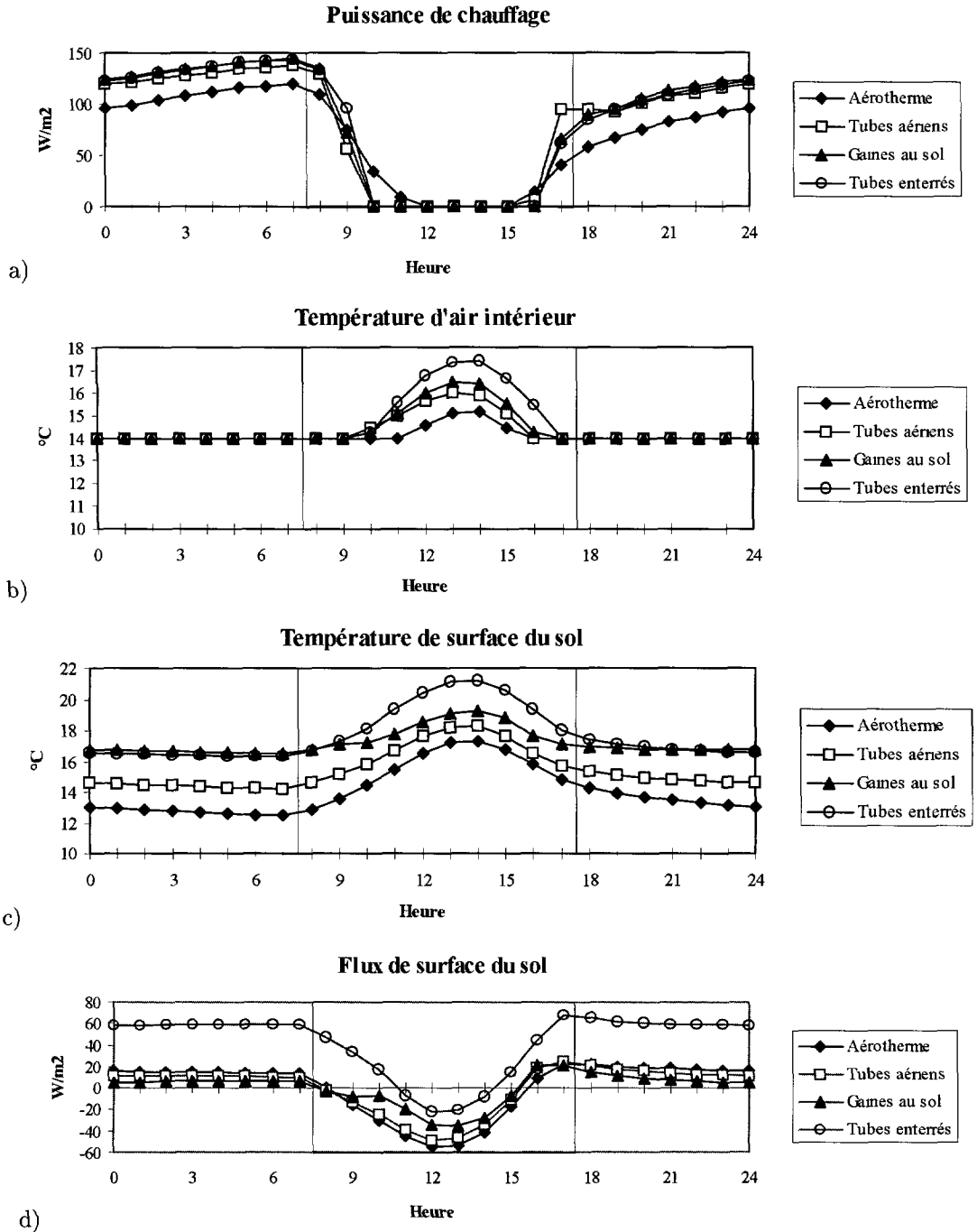


Fig. 7 — Évolution horaire de la puissance de chauffage (a), de la température intérieure (b), de la température de surface du sol (c) et du flux traversant la surface du sol (d) au mois de février

[Hourly evolution of heating power (a), inside temperature (b), soil surface temperature (c) and flow across soil surface (d) (February)]

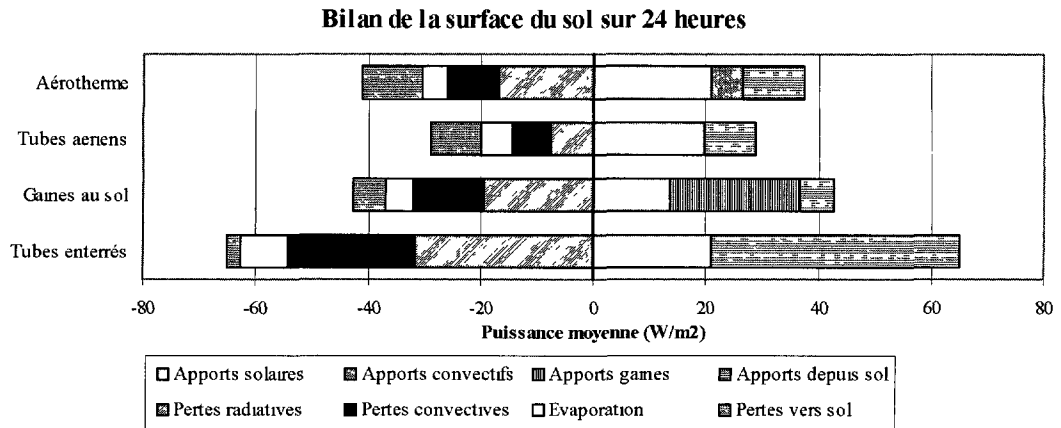


Fig. 8. — Bilan de surface du sol – valeurs moyennes sur la journée.

[Daily average values of soil surface balance.]

Le cas des gaines au sol présente ces mêmes tendances, de manière encore accentuée. L'extremum de stockage n'atteint plus que $-35,0 \text{ W m}^{-2}$; la restitution démarre dès 16 h, avec un maximum de $21,4 \text{ W m}^{-2}$ analogue aux cas précédents, mais le minimum de $5,4 \text{ W m}^{-2}$ est atteint dès minuit, et la moyenne nocturne ne vaut plus que $8,2 \text{ W m}^{-2}$, soit pratiquement la moitié qu'avec l'aérotherme. Par ailleurs, la courbe montre ici très clairement un point nouveau : l'intensité de restitution se met à augmenter très légèrement à partir de 1 h du matin ; ce phénomène est provoqué par la présence des gaines de chauffage à même le sol : une partie de l'énergie apportée par le sol à l'air intérieur (convection et évaporation), ou rayonnée par le sol, correspond à celle apportée par l'échangeur par conduction directe de contact des gaines sur le sol. Ainsi, il apparaît que le flux de surface du sol combine à la fois une énergie de restitution différée des apports solaires, et une énergie de distribution du chauffage. C'est pourquoi la valeur du flux restitué dans le sol sur les 24 heures ne représente qu'une approximation des apports solaires différés, puisqu'il n'est pas possible de différencier de ces derniers ce qui relève de la distribution indirecte d'énergie de chauffage.

Cet effet joue de manière encore plus extrême dans le cas des tubes enterrés puisqu'à présent le sol constitue le seul intermédiaire pour distribuer l'énergie de chauffage à l'air intérieur. Le phénomène de stockage dans le sol n'intervient qu'au plein cœur de la journée (11 h–14 h), le sol trop chaud perdant plus d'énergie qu'il n'en capte tant que le soleil ne chauffe pas suffisamment (jusqu'à 10 h et dès 15 h). Sur la période nocturne, le flux s'établit à une valeur proche de la puissance de chauffage principale (60 W m^{-2}), variant de $65,0 \text{ W m}^{-2}$ à 18 h jusqu'à $59,0 \text{ W m}^{-2}$ à 7 h du matin.

3.5. BILAN DE SURFACE DU SOL. — L'examen du bilan de surface du sol sur l'ensemble de la journée (Fig. 8) corrobore ces différences de comportement entre les 4 échangeurs :

- l'aérotherme est le seul cas où apparaît un terme de chauffage convectif du sol par l'air intérieur (terme "Apports convectifs"), ce flux étant toujours en sens inverse pour les autres échangeurs ; on retrouve également la plus forte valeur de stockage et restitution du sol (termes égaux "Pertes vers sol" et "Apports depuis sol") ; l'évolution heure par heure des composantes du bilan de surface du sol (Fig. 9a) permet d'observer très clairement l'effet de relais entre le stockage dans le sol sur l'essentiel de la journée, puis l'effet de restitution nocturne, complété

au fur et à mesure qu'il diminue par une augmentation des apports convectifs de l'air intérieur ; les pertes tant radiatives que par évaporation demeurent pratiquement constantes au cours de la nuit ;

- le cas des *tubes aériens* fait apparaître la plus faible valeur des pertes par rayonnement infrarouge de grande longueur (terme "Pertes radiatives", Fig. 8) : la proximité directe des tubes de chauffage placés juste au-dessus du sol limite le bilan infrarouge net de la surface ; l'évolution horaire du bilan (Fig. 9b) montre la très faible valeur des pertes infrarouges pendant la nuit ; à l'inverse du cas précédent, ces pertes sont plus importantes dans la journée du fait de l'arrêt du chauffage ;

- les *gainés au sol* induisent une conduction directe vers la surface du sol (terme "Apports gainés", Fig. 8) ; l'augmentation de température du sol se manifeste à travers une augmentation très nette des pertes radiatives, convectives (chaleur sensible) et évaporatives du sol ; à cet effet se combine le masquage partiel du sol vis-à-vis du rayonnement solaire (terme "Apports solaires" le plus faible de tous les cas), ce qui aboutit à un stockage dans le sol notablement diminué. Le diagramme des bilans horaires (Fig. 9c) montre que s'ajoute aux apports solaires un apport indirect *via* la surface des gainés : celles-ci captent l'énergie solaire, et transmettent une partie de l'énergie au sol ; ce phénomène ne permet cependant pas de compenser la diminution globale des apports solaires qui en résulte ;

- l'augmentation des pertes radiatives, conductives et évaporatives est encore considérablement accrue dans le cas des *tubes enterrés* car c'est en fait par elles que se répartit vers la surface l'apport du chauffage (terme "Apports depuis sol", Fig. 8) ; elles expliquent à elles seules le très faible niveau de stockage thermique dans le sol, puisque les apports solaires se retrouvent ici du même ordre qu'avec l'aérotherme ou les tubes aériens. Dans la journée, l'ensemble de ces pertes, bien que diminuant légèrement, continue de demeurer très important (Fig. 9d), de sorte que le sol ne peut capter que très faiblement de l'énergie aux heures les plus chaudes de la journée.

3.6. TEMPÉRATURES DANS LE SOL. — Il est intéressant de conclure cette étude détaillée d'une journée-type en observant l'évolution des températures de sol à diverses profondeurs (Fig. 10).

- Les courbes relatives au cas de l'*aérotherme* (Fig. 10a) montrent très clairement les 2 effets liés à la pénétration de l'onde thermique solaire dans le sol : d'une part un *amortissement des amplitudes* avec la profondeur (4,8 K en surface, 1,8 K à 10 cm, 0,6 K à 20 cm et 0,3 K à 30 cm), d'autre part un *déphasage de l'onde* avec la profondeur (maximum de 15,6 °C à 14 h en surface, de 15,1 °C vers 16 h à 10 cm, de 14,4 °C vers 19 h à 20 cm et de 14,3 °C vers 23 h à 30 cm) ; la température moyenne du sol se situe à 14,1 °C, quelle que soit la profondeur puisqu'on est sous l'hypothèse d'une absence de pertes vers le sol extérieur.

- Dans le cas des *tubes aériens* (Fig. 10b), l'évolution générale a la même allure, sauf que le niveau moyen des températures est plus élevé (15,5 °C) et que les amplitudes de variation sont un peu plus faibles : 4,1 K en surface, 1,4 K à 10 cm, 0,6 K à 20 cm et 0,2 K à 30 cm.

- La présence de gainés au sol (Fig. 10c) qui chauffent le sol la nuit, alors que le soleil le chauffe le jour, tend à tasser les variations de température du sol : l'amplitude n'est plus que de 2,7 K en surface, 0,9 K à 10 cm, 0,3 K à 20 cm et 0,1 K à 30 cm ; le niveau moyen des températures s'est également élevé de plus de 2 K par rapport au cas précédent puisqu'il atteint à présent 17,4 °C.

- Les tubes enterrés (Fig. 10d) induisent un comportement différent des 3 cas précédents puisque la source d'énergie est cette fois dans le sol, à 15 cm de profondeur ; en surface, l'évolution est comparable à celle des aérothermes en forme et en amplitude (4,9 K), sauf qu'elle se situe à un niveau plus élevé (moyenne de 17,7 °C, supérieure de 3,6 K au cas de l'aérotherme) ;

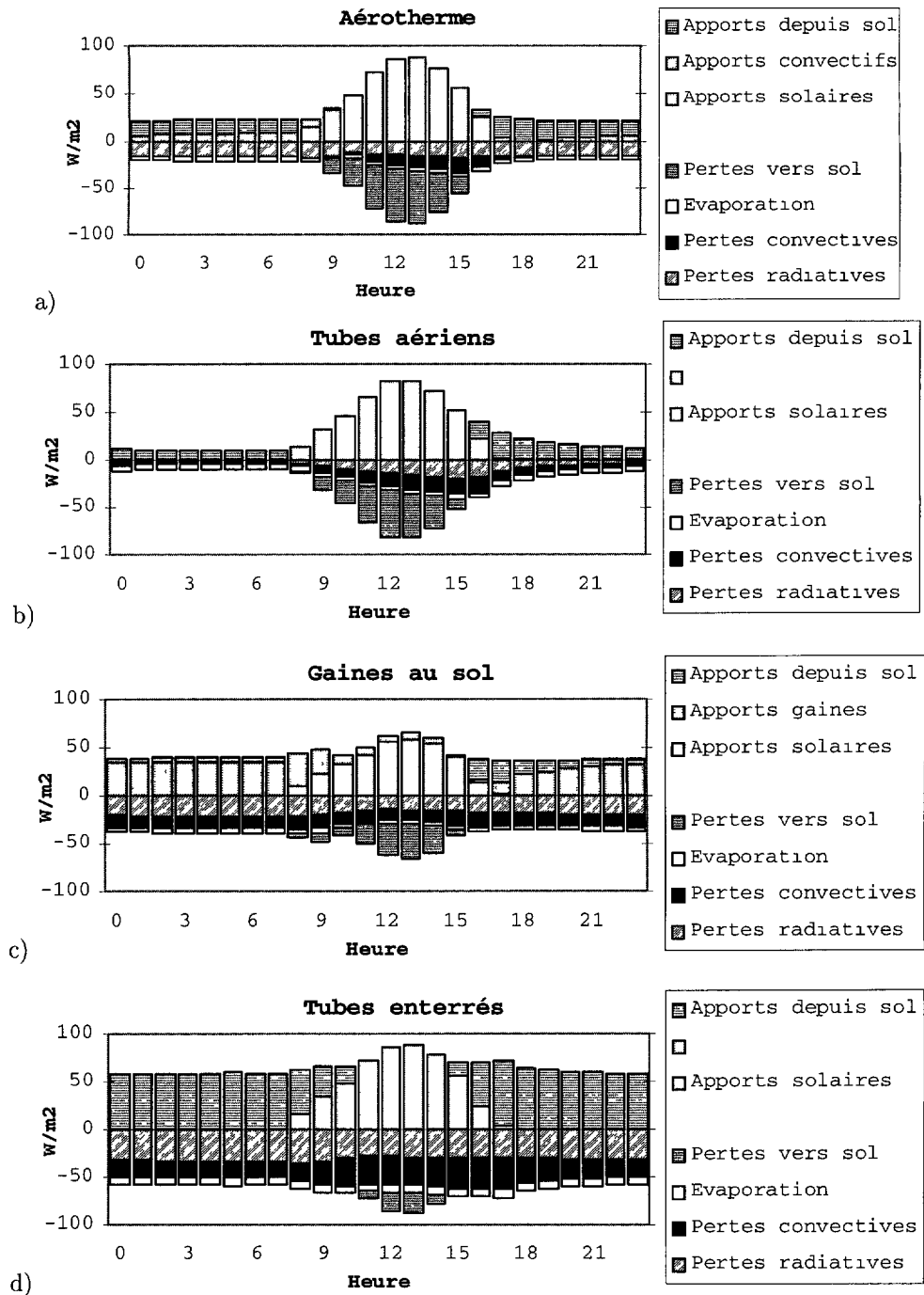


Fig. 9. — Évolution horaire du bilan de surface du sol - aérotherme (a), tubes aériens (b), gains au sol (c) et tubes enterrés (d)

[Hourly evolution of soil surface balance aeroconvector (a), aerial pipes (b), radiant mulch (c) and buried pipes (d).]

à 10 cm, l'amplitude de variation est très faible (0,5 K), sous l'effet de l'apport d'énergie par le bas la nuit, et par le haut en pleine journée ; en dessous de la profondeur des tubes, l'onde thermique est inversée par rapport au soleil, puisqu'elle est fixée par le fonctionnement nocturne et l'arrêt diurne du chauffage ; l'amplitude demeure faible (1,0 K à 20 cm) et le niveau moyen (22,4 °C) est plus élevé qu'au-dessus des tubes (20,7 °C à 10 cm).

4. Étude de sensibilité

Selon Jolliet [7], "en première approximation, l'énergie stockée dans le sol devrait dépendre directement du rayonnement solaire ; cette corrélation n'est toutefois pas manifeste. Ceci est dû d'une part, à la forte densité du feuillage (qui limite sensiblement le rayonnement direct au sol), d'autre part à la fraction importante de chaleur rejetée par beau temps (afin d'éviter les surchauffes trop importantes)". Sur la base de la journée-type précédemment étudiée, nous allons évaluer l'influence relative de divers facteurs susceptibles d'influer sur le stockage d'énergie au sein du sol, en distinguant :

- les facteurs liés à l'environnement climatique : ensoleillement, température, vent ;
- les facteurs liés à la politique de contrôle de la serre : consignes de chauffage et de ventilation ;
- les facteurs liés aux propriétés intrinsèques de la serre : caractéristiques du sol (capacité calorifique, conductivité thermique), densité de la culture, transparence de la couverture.

Dans tous les cas, nous conservons le système de chauffage par aérotherme seul, afin d'éviter les interférences des géométries des échangeurs sur les paramètres étudiés.

4.1. INFLUENCE DE L'ENSOLEILLEMENT

4.1.1. Journée-type froide. — Sur la journée-type de février, nous faisons varier la durée d'insolation de 1,2 à 9,6 heures, ce qui a pour effet de modifier simultanément *l'ensoleillement et la nébulosité* depuis respectivement 3,2 MJ m⁻² et 7,7 octas jusqu'à 11,2 MJ m⁻² et 1 octa. Afin de ne pas y associer l'influence de la température extérieure, nous maintenons à l'identique l'évolution de cette dernière, même si dans la réalité l'effet d'un fort ensoleillement et d'une faible nébulosité entraînerait légitimement une augmentation de l'amplitude de la température extérieure. La ventilation n'intervient dans aucun des cas.

Le bilan global journalier (Fig. 11a) augmente sensiblement, d'une part sous l'effet de la baisse de nébulosité qui fait croître très notablement les pertes infrarouges de la serre (passage de 3,7 à 8,4 MJ m⁻², soit de 42 à 65 % du bilan), d'autre part à cause de l'élévation du niveau énergétique global de la serre puisque ses éléments, ayant capté davantage d'énergie pendant la journée, sont plus chauds : la température diurne moyenne de l'air passe de 14,0 à 15,9 °C, et la température moyenne du sol à 10 cm de 13,2 à 15,6 °C. Le captage d'énergie solaire augmente très largement, passant de 2,1 à 7,3 MJ m⁻², constituant ainsi 25 % des apports à faible ensoleillement et 57 % de ceux-ci à fort ensoleillement.

Par contre, le chauffage auxiliaire ne diminue que très faiblement car il se produit une compensation globale entre les apports solaires et les pertes radiatives : il diminue légèrement en valeur absolue (6,6 à 5,6 MJ m⁻²), restant pratiquement constant au-delà de 3,6 heures d'ensoleillement (Tab. IV).

Le stockage dans le sol s'élève de manière continue, triplant de 0,54 à 1,62 MJ m⁻². En revanche, il semble atteindre un plafond en valeur relative, aux alentours de 12 % du bilan journalier.

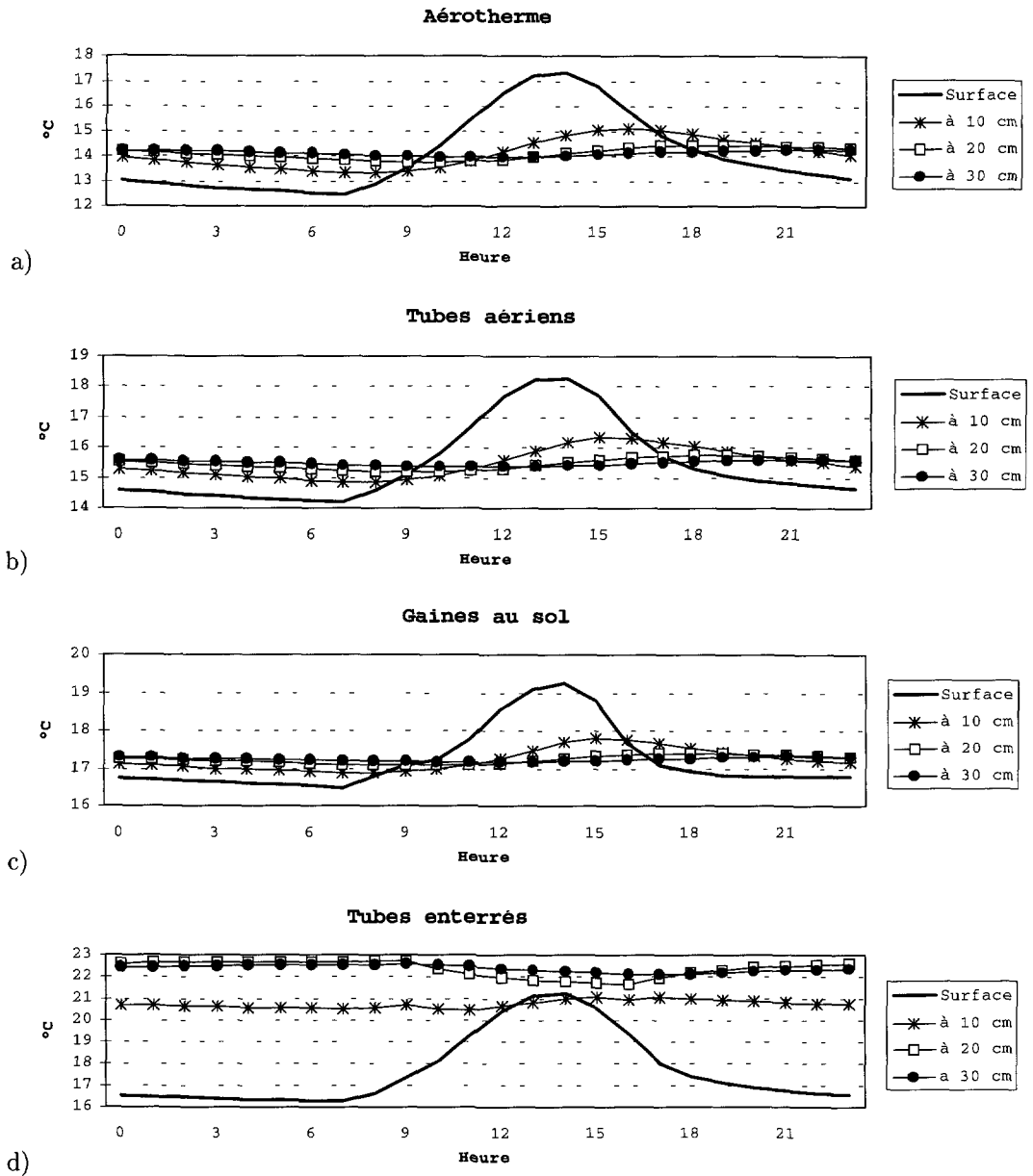
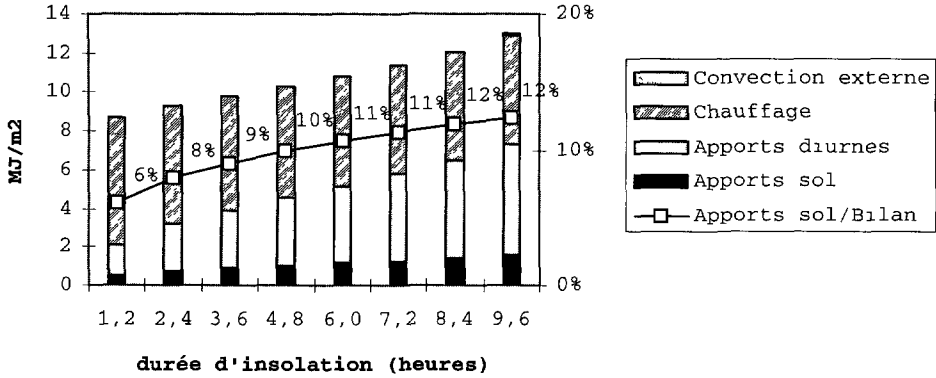


Fig. 10. — Évolution horaire des températures de sol - aérotherme (a), tubes aériens (b), gains au sol (c) et tubes enterrés (d)

[Hourly evolution of soil temperatures: aeroconvector (a), aerial pipes (b), radiant mulch (c) and buried pipes (d).]

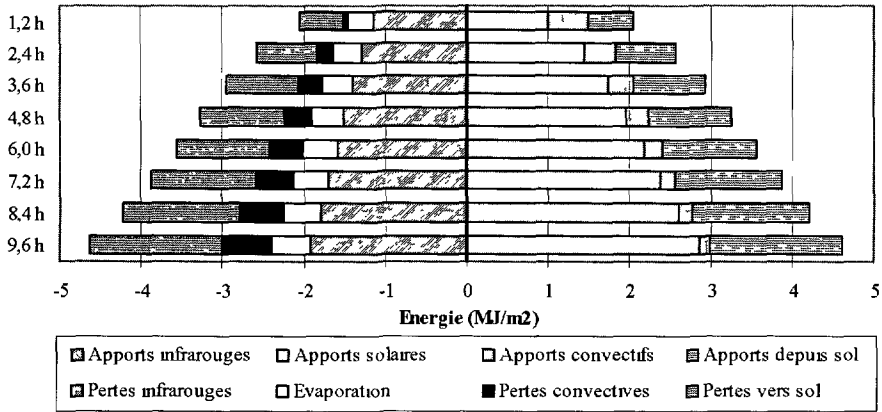
L'analyse du bilan thermique de la surface du sol sur l'ensemble des 24 heures (Fig. 11b) fait clairement apparaître du côté des gains l'augmentation des apports solaires et de la restitution thermique du sol - les apports convectifs depuis l'air intérieur (en diminution) ne représentant

**Bilan journalier des apports thermiques
février**



a)

Bilan de surface du sol - février



b)

Fig. 11. — Influence de l'ensoleillement sur le bilan global journalier (a) et le bilan de surface du sol (b) - mois de février.

[Influence of sunlight on global daily balance (a) and soil surface balance (b) (February)]

qu'une faible part du bilan global ; en ce qui concerne les pertes, on observe tout comme pour le bilan global de la serre une augmentation continue des pertes infrarouges nettes, en lien avec la température plus élevée de sol déjà notée, le terme évaporatif n'augmentant que de manière plus mesurée.

4.1.2. *Journée-type tempérée.* — Afin d'évaluer l'incidence de la ventilation lorsque l'ensoleillement devient trop important, nous analysons également la journée-type du mois d'avril (Fig. 12), pour laquelle la durée d'insolation varie de 1,6 à 12,8 heures, soit un ensoleillement global de 6,9 à 23,8 MJ m⁻², de l'ordre du double de celui observé en février pour chacun des cas. Sur les 8 valeurs testées, la ventilation a fonctionné pour les 6 dernières, le maximum de température intérieure atteint étant identique dans tous les cas (21,8 à 22 °C) sauf le premier (19,7 °C).

Tableau IV. — *Influence de l'ensoleillement sur les apports solaires, les pertes radiatives et le chauffage artificiel – mois de février.*

[Influence of sunlight on solar gains, radiative losses and artificial heating (February)].

Durée d'insolation (heures)	Apports solaires (MJ m ⁻²)	Pertes radiatives (MJ m ⁻²)	Chauffage artificiel (MJ m ⁻²)
1,2	2,1	3,7	6,6
2,4	3,2	4,2	6,1
3,6	3,9	4,7	5,9
4,8	4,5	5,2	5,7
6	5,1	5,9	5,7
7,2	5,8	6,6	5,6
8,4	6,5	7,4	5,6
9,6	7,3	8,4	5,6

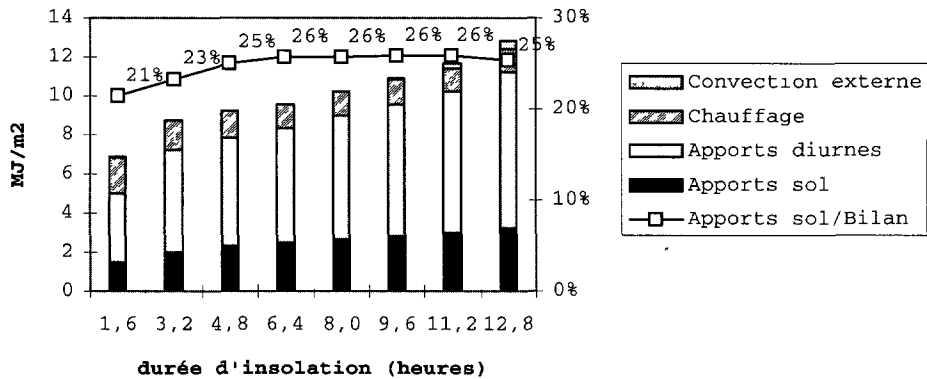
Le bilan global journalier continue d'augmenter avec l'ensoleillement, mais de manière nettement inférieure en présence de ventilation : l'écart est de 1,9 MJ m⁻² entre les 2 premiers cas (hors ventilation), alors qu'il se limite dans la fourchette 0,5–0,8 MJ m⁻² pour les cas suivants. Cette constatation s'applique également aux apports solaires utiles, car les *apports liés au chauffage, s'ils diminuent en l'absence de ventilation, se révèlent quasi-constants dès lors que l'on ventile* (compris entre 1,2 et 1,4 MJ m⁻²). Le stockage thermique dans le sol suit une variation absolue de même forme, en continuant d'augmenter de manière plus modérée mais néanmoins continue pendant la ventilation : passage de 1,5 à 2,3 MJ m⁻² sur les 3 premières valeurs, pour atteindre ensuite à 3,3 MJ m⁻² sur la dernière des 5 valeurs suivantes. Tout comme en février, on observe une *stagnation du stockage dans le sol en valeur relative au bilan global*, le plafond se situant cette fois-ci vers 26 % et non vers les 12 % (soit environ le double) en raison de températures extérieures plus élevées.

Le bilan de surface du sol montre des tendances analogues au mois de février, avec des intensités d'échange pratiquement doublées. Le sol étant à présent plus chaud que l'air intérieur, la convection sensible entre ces 2 éléments apparaît maintenant du côté des pertes, avec une valeur d'autant plus élevée que l'ensoleillement est important (3,9 MJ m⁻², soit 34 % du bilan, dans le cas de 12,8 heures).

En étendant sur l'ensemble des mois de janvier à mai les tests faits ci-dessus, la représentation des valeurs de stockage thermique dans le sol en fonction de l'ensoleillement global (Fig. 13) ne semble pas confirmer l'approximation proposée par Bourgeois *et al.* [3] selon laquelle le stockage dans le sol évoluerait proportionnellement à l'ensoleillement pour atteindre un plafond constant dès lors que l'ensoleillement devient tel que la ventilation doit intervenir (seuil d'environ 4 MJ m⁻²) ; on observe une croissance non linéaire, dont la dérivée diminue avec l'ensoleillement sans pour autant atteindre un plafond. La ventilation, qui intervient ici sur les 3 dernières valeurs de mars, les 6 dernières d'avril et l'ensemble du mois de mai, diminue le taux de croissance sans l'annuler. Le groupage des valeurs liées à un même mois montre l'influence très sensible de la température extérieure.

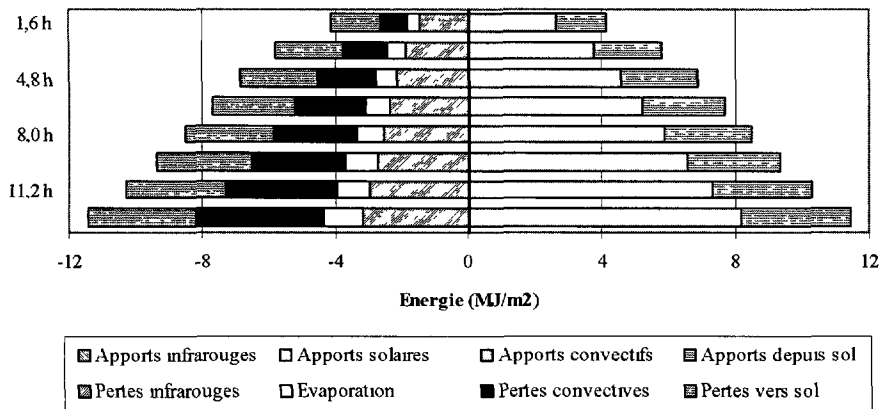
4.1.3. *Journée ensoleillée isolée dans une période-type froide.* — Après avoir observé l'influence de l'ensoleillement et de la nébulosité sur des journées moyennes froides (février) puis sur des

Bilan journalier des apports thermiques avril



a)

Bilan de surface du sol - avril



b)

Fig. 12. — Influence de l'ensoleillement sur le bilan global journalier (a) et le bilan de surface du sol (b) – mois d'avril.

[Influence of sunlight on global daily balance (a) and soil surface balance (b) (April).]

jours moyennes tempérées (avril), nous utilisons à présent les capacités dynamiques du modèle pour simuler l'influence d'une journée ensoleillée isolée au cours du mois de février et évaluer la variabilité du comportement thermique du sol par rapport au comportement moyen déjà étudié. Le scénario se compose de 4 journées successives simulées au pas horaire (Fig. 14a) :

- la 1^{re} journée correspond à la journée-type du mois de février, pour laquelle la durée d'insolation vaut 4 heures (ensoleillement global de $6,1 \text{ MJ m}^{-2}$, nébulosité de 6 octas) ;
- la 2^e journée bénéficie de l'ensoleillement maximal : nébulosité nulle du lever au coucher du soleil, soit un ensoleillement global de $12,1 \text{ MJ m}^{-2}$ valant le double du jour précédent ; afin d'éviter la discontinuité brutale de la nébulosité, celle-ci passe linéairement de 6 octas (instant 0 h) à 0 octa (instant 6 h) avec une variation de 1 octa par heure ; de même, après le coucher du soleil, on passe linéairement de 0 octa (instant 17 h) à 6 octas (instant 23 h) ;
- les conditions climatiques des 3^e et 4^e journées sont identiques à la première.

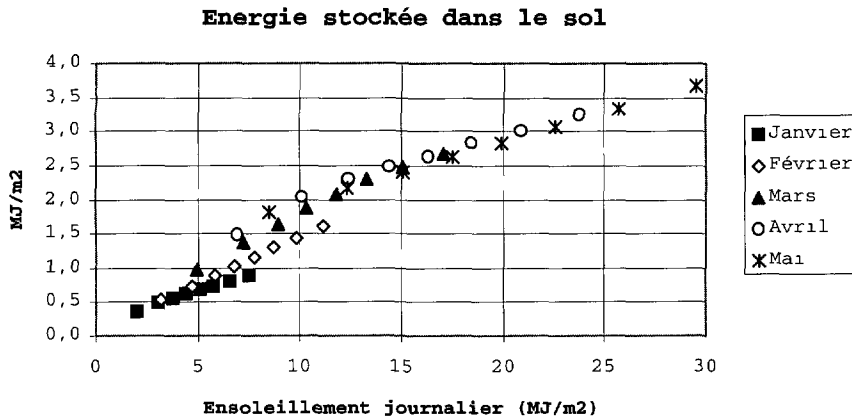


Fig. 13 — Énergie stockée dans le sol en fonction de l'ensoleillement global journalier.

[Soil stored energy *vs.* daily global sunlight.]

L'éclaircissement progressif du ciel à partir du milieu de la première nuit provoque une très légère augmentation des pertes thermiques (de $5,3$ à $5,6$ MJ m^{-2}) par rapport à la nuit-type de référence, avec une hausse des pertes radiatives ($+0,8$ MJ m^{-2}) et une baisse des pertes convectives ($-0,5$ MJ m^{-2}) car la température de couverture devient plus basse ; le chauffage compense cette perte en passant de $4,8$ à $5,0$ MJ m^{-2} (Tab. V).

Au cours de la seconde journée, on assiste simultanément à une hausse importante de la captation solaire (de $4,1$ à $7,9$ MJ m^{-2} , soit $+3,8$ MJ m^{-2}) mais également des pertes ($+2,4$ MJ m^{-2}), pour l'essentiel sous forme radiative ($+1,9$ MJ m^{-2}) en l'absence de nébulosité, mais aussi sous forme convective ($+0,3$ MJ m^{-2}) car la serre est globalement plus chaude (Fig. 14b) ; le recours au chauffage en début et fin de journée est d'ailleurs moins important (Fig. 14c), passant de $1,0$ à $0,7$ MJ m^{-2} entre les 2 jours. Le sol se charge davantage en énergie, avec un stockage de $1,9$ MJ m^{-2} supérieur de $1,0$ MJ m^{-2} au stockage du jour précédent.

Lors de la nuit qui fait suite au jour ensoleillé, les pertes sont identiques à la nuit précédente. Le déstockage du sol est plus important ($1,2$ MJ m^{-2} , soit $0,3$ MJ m^{-2} de plus) mais ce surplus de déstockage ($0,3$) reste bien inférieur au surplus de stockage observé dans la journée ($1,0$) : la puissance de restitution du sol (Fig. 14d) est un peu plus élevée que lors de la nuit précédente (maximum de $39,3$ W m^{-2} à 18 h, contre $22,6$ W m^{-2} la veille), mais le différentiel tombe en dessous des 5 W m^{-2} dès 1 h du matin. En conséquence, l'énergie de chauffage apportée au cours de la nuit n'est que faiblement modifiée ($4,7$ MJ m^{-2} au lieu de $5,0$).

On retrouve dès le 3^e jour un comportement énergétique quasi-identique à la journée-type de référence : l'effet de la journée isolée chaude est pratiquement amorti 24 heures après. Seul, le sol demeure un peu plus chaud en dessous de la surface, amortissant de manière plus lente la pénétration de l'onde thermique provoquée par l'ensoleillement du second jour, mais la puissance de restitution nocturne lors de la 3^e nuit est à peine plus élevée que dans les conditions de référence (écart inférieur à 2 W m^{-2}).

4.2. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE. — Pour mieux mettre en évidence le rôle propre joué par la température extérieure indépendamment de l'ensoleillement, nous faisons varier la température extérieure moyenne de 0 à 12 $^{\circ}\text{C}$ par pas de 2 $^{\circ}\text{C}$ en conservant la même forme d'évolution sur la journée de 24 heures, et en maintenant à l'identique l'évolution de l'ensoleillement pour le mois de février (Fig. 15a).

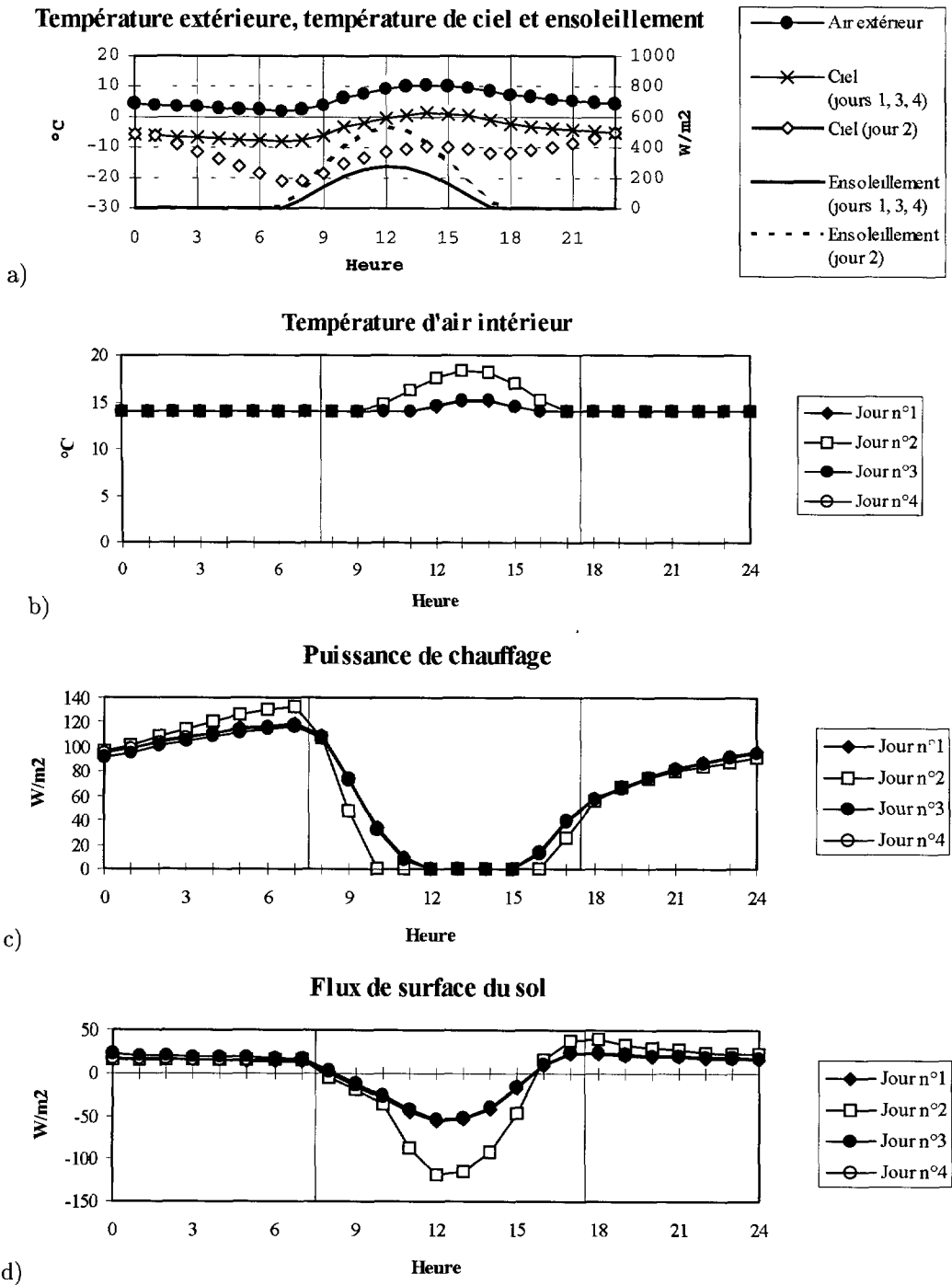


Fig 14. — Scénario de jour ensoleillé dans une période froide . conditions climatiques (a), température intérieure (b), puissance de chauffage (c) et flux traversant la surface du sol (d).

[Simulation of a sunny day in a cold period: climatic conditions (a), inside temperature (b), heating power (c) and flow across soil surface (d).]

Tableau V. — *Scénario de jour ensoleillé dans une période froide : apports et pertes énergétiques (MJ m⁻²).*[Simulation of a sunny day in a cold period: energetical gains and losses (MJ m⁻²).]

	nuit-type	jour-type	nuit 1	jour 2	nuit 2	jour 3	nuit 3	jour 4
Jours (14 h)	18 h - 7 h		18 h - 7 h		18 h - 7 h		18 h - 7 h	
Nuits (10 h)		8 h - 17 h		8 h - 17 h		8 h - 17 h		8 h - 17 h
pertes Infrarouges	2,8	2,1	3,6	4,0	3,2	2,1	2,8	2,1
pertes Convectives	1,8	1,5	1,3	1,9	1,6	1,5	1,8	1,5
pertes par Renouvellement	0,7	0,3	0,7	0,4	0,7	0,3	0,7	0,3
TOTAL PERTES	5,3	3,9	5,6	6,3	5,5	3,9	5,3	3,9
Captation solaire	0,0	4,1	0,0	7,9	0,0	4,1	0,0	4,1
Chauffage	4,8	1,0	5,0	0,7	4,7	1,0	4,7	1,0
TOTAL APPORTS	4,8	5,1	5,0	8,6	4,7	5,1	4,7	5,1
Stockage dans le sol		0,9		1,9		0,9		0,9
Déstockage depuis le sol	0,8	0,1	0,9	0,2	1,2	0,1	0,9	0,1

L'influence sur le bilan global journalier est bien sûr très sensible, puisque celui-ci décroît de 15,0 à 6,0 MJ m⁻², soit une décroissance moyenne de 0,75 MJ m⁻² par degré, plus marquée pour les basses températures. Le stockage thermique dans le sol passe de 0,87 MJ m⁻² à 1,28 MJ m⁻², soit une augmentation globale de 48 % ; cette croissance est très peu sensible au début, un peu plus nette vers la fin. Compte tenu de la baisse des besoins thermiques, la valeur relative du stockage dans le sol par rapport au bilan évolue de manière très marquée, avec un pourcentage passant de 6 % à plus de 20 %.

Le bilan de surface du sol (Fig. 15b) montre la baisse des apports convectifs depuis l'air intérieur simultanément à l'augmentation de la restitution thermique du sol, cette dernière ne parvenant à compenser la première que pour les plus fortes valeurs de température extérieure et, corrélativement, de sol. Malgré l'augmentation de la température de surface du sol, les pertes infrarouges diminuent graduellement, en raison de la diminution des pertes vers la voûte céleste.

4.3. INFLUENCE DU VENT. — L'augmentation de la vitesse du vent à 10 mètres de hauteur, depuis 0 jusqu'à 10 mètres par seconde (Fig. 16), fait essentiellement croître le chauffage auxiliaire, principalement en raison d'un plus fort taux de fuites (les pertes par renouvellement passent de 0,9 à 3,2 MJ m⁻²), mais également à cause de plus grandes pertes par convection à la surface de la couverture (qui passent de 2,3 à 3,9 MJ m⁻²) ; les pertes infrarouges diminuent légèrement car les températures des éléments sont un peu plus basses. Par contre, *le stockage thermique dans le sol reste relativement insensible à la vitesse du vent* puisqu'il n'accuse qu'une très légère baisse de 1,06 à 0,87 MJ m⁻².

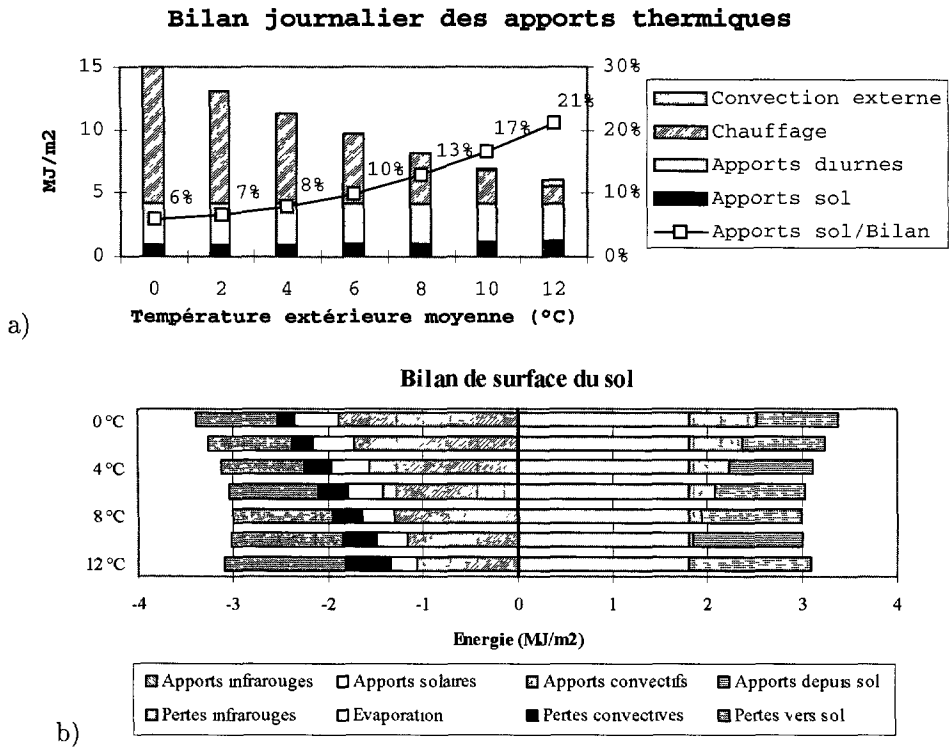


Fig 15 — Influence de la température extérieure sur le bilan global journalier (a) et le bilan de surface du sol (b).

[Influence of outside temperature on global daily balance (a) and soil surface balance (b)]

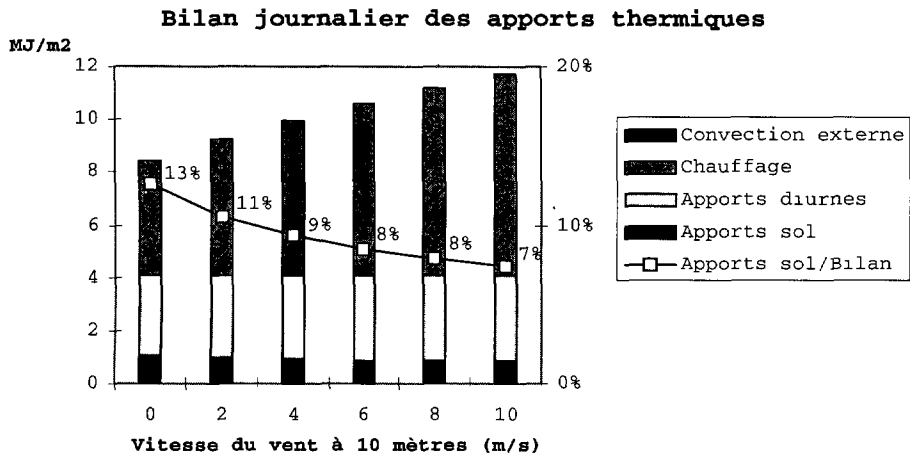
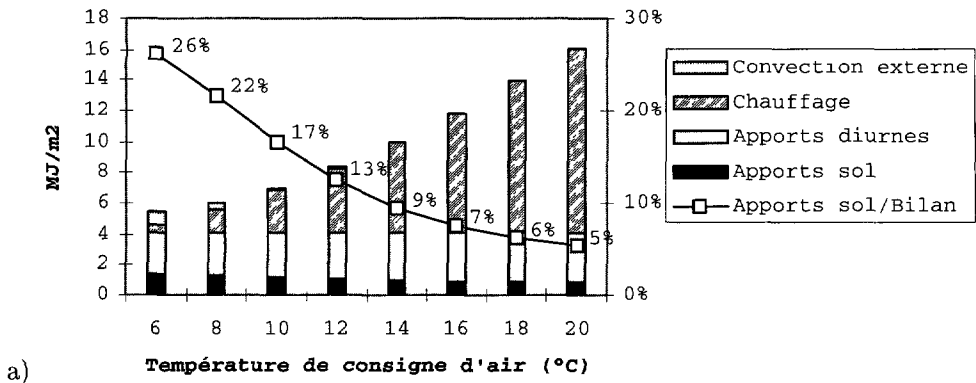


Fig 16 — Influence du vent sur le bilan global journalier.

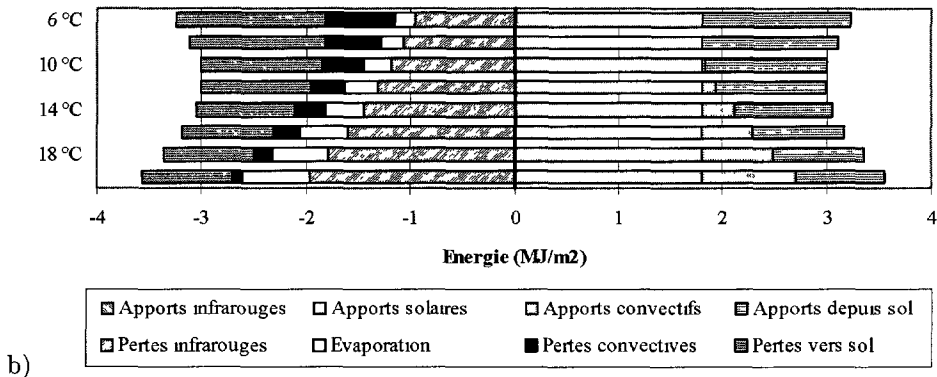
[Influence of wind on global daily balance]

Bilan journalier des apports thermiques



a)

Bilan de surface du sol



b)

Fig 17. — Influence de la consigne de chauffage sur le bilan global journalier (a) et le bilan de surface du sol (b).

[Influence of heating setpoint on global daily balance (a) and soil surface balance (b)]

4.4. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE CONSIGNE DE CHAUFFAGE — Sur la base de la journée-type de février, on fait varier la température de consigne de chauffage de 6 à 20 °C, par pas de 2 °C. Le bilan journalier (Fig. 17a) croît avec la consigne, de manière d'autant plus forte que la consigne est élevée : l'augmentation est de 0,3 MJ m⁻² par degré pour les basses consignes, alors qu'elle atteint 1,1 MJ m⁻² vers les consignes élevées. Les pertes convectives sont d'autant plus fortes que la consigne est élevée, variant de 11 % à faible consigne jusqu'à 46 % à forte consigne ; dans le même temps les pertes radiatives passent de 75 % à 36 %.

L'énergie utile apportée par le soleil est indépendante de la consigne, en l'absence ici de toute ventilation. La part restituée par le sol baisse au fur et à mesure qu'augmente la consigne de chauffage : en valeur relative par rapport au bilan journalier, le stockage représente le quart du total à faible consigne (26 % à 6 °C), tandis qu'il s'abaisse au vingtième à forte consigne (5 % à 20 °C) ; en valeur absolue, la baisse est également très significative puisque le stockage dans le sol perd plus du tiers de sa valeur (-40 %) entre les extrema de consigne (1,43 MJ m⁻² à 6 °C contre 0,86 MJ m⁻² à 20 °C).

La baisse du pouvoir de stockage du sol est à relier à l'augmentation de sa température : celle-ci croît avec la consigne, quoique moins rapidement (température moyenne de sol de 9,6 °C pour 6 °C de consigne, et de 18,7 °C pour 20 °C de consigne). L'évolution du bilan

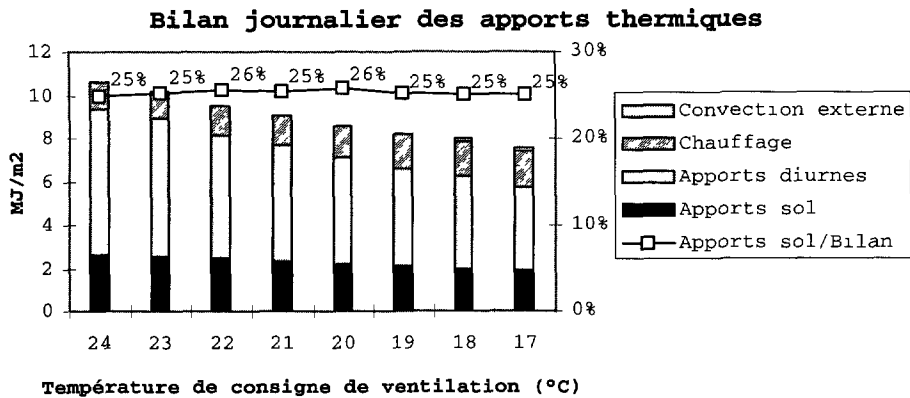


Fig. 18. — Influence de la consigne de ventilation sur le bilan global journalier

[Influence of ventilating setpoint on global daily balance.]

thermique de la surface du sol (Fig. 17b) permet d'appréhender l'influence des différents types de flux. L'intensité globale du bilan passe par un minimum vers les 12 °C de consigne. Au niveau des apports énergétiques, on observe, à partir de 10 °C de consigne, une croissance régulière et importante de la convection de l'air vers le sol, en lien avec un différentiel $T_{Ai} - T_{So}$ (température d'air intérieur moins température de surface du sol) de plus en plus important ; à l'inverse, les pertes convectives du sol vers l'air intérieur diminuent graduellement. Les pertes radiatives infrarouges représentent une part croissante des pertes (30 % pour 6 °C jusqu'à 55 % à 20 °C), du fait de la température plus importante du sol ; pour la même raison, les pertes évaporatives sont continûment croissantes.

4.5. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE CONSIGNE DE VENTILATION. — L'influence de la consigne de ventilation est testée sur la journée-type du mois d'avril, pour laquelle la consigne a été diminuée depuis 24 °C jusqu'à 17 °C (Fig. 18), la consigne de chauffage restant fixée à 14 °C. La ventilation a fonctionné dans tous les cas.

Le bilan journalier baisse de manière très sensible (environ -30 % sur la plage testée), dans la mesure où l'état énergétique global de la serre est artificiellement maintenu plus bas pendant le jour : les températures moyennes diurnes passent de 20,1 à 16,2 °C pour l'air intérieur, de 20,9 à 18,7 °C pour le sol (à 10 cm de profondeur), de 20,4 à 16,5 °C pour les plantes, et de 15,1 à 13,9 °C pour la couverture.

La baisse des apports solaires globaux correspond exactement aux rejets thermiques par ventilation, qui atteignent $4,3 \text{ MJ m}^{-2}$ à la plus basse consigne de ventilation. On assiste parallèlement à une augmentation mesurée mais cependant nette de la consommation de chauffage (+39 %), qui passe de $1,23$ à $1,70 \text{ MJ m}^{-2}$. Le stockage dans le sol est également affecté de manière très sensible, puisqu'il perd environ $0,1 \text{ MJ m}^{-2}$ pour chaque degré de consigne en moins, soit globalement 28 % sur l'ensemble des cas testés (passage de $2,65$ à $2,27 \text{ MJ m}^{-2}$). Cependant, rapporté au bilan global, le stockage dans le sol reste stable en valeur relative, aux alentours des 25 %.

4.6. INFLUENCE DE LA DENSITÉ DES CULTURES. — Six classes de densités des cultures sont analysées (Fig. 19), en considérant d'une part une absence totale de végétation (index de recouvrement foliaire nul, sol complètement sec), d'autre part une présence de culture (avec sol irrigué) en faisant varier simultanément l'index de recouvrement foliaire de 1 à 5, la hauteur

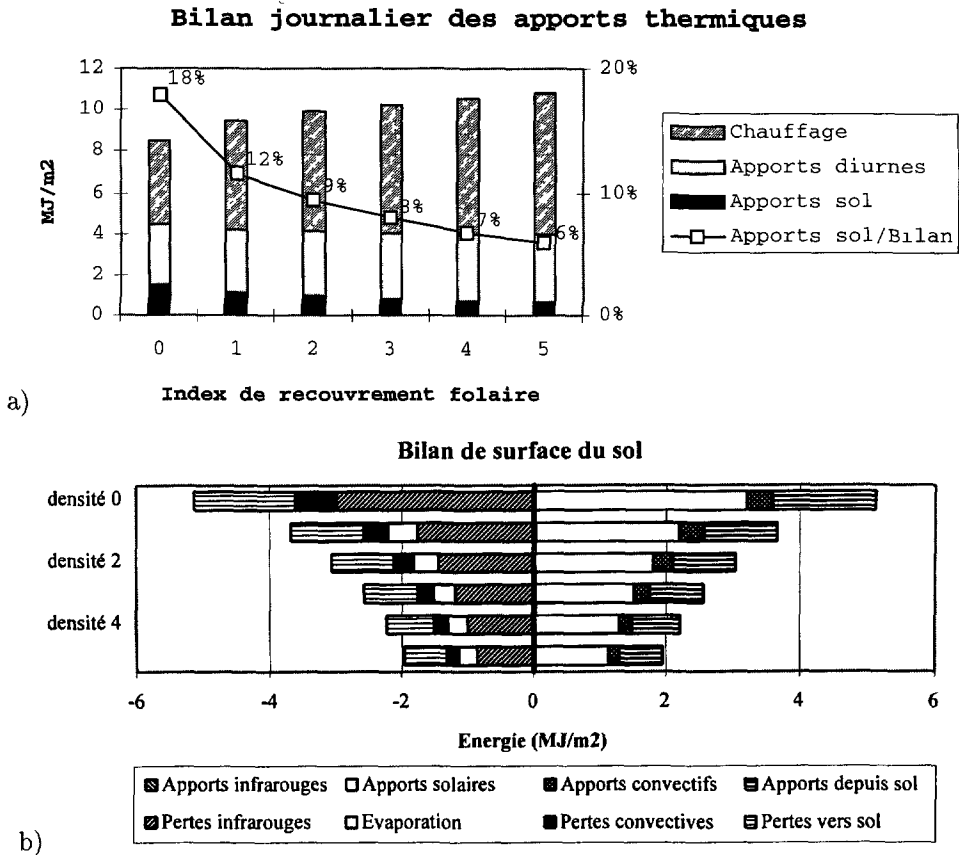


Fig. 19. — Influence de la densité des cultures sur le bilan global journalier (a) et le bilan de surface du sol (b)

[Influence of crop density on global daily balance (a) and soil surface balance (b).]

des rangs de 0,60 m à 2,20 m (avec pas de 0,40 m) et leur largeur de 0,50 m à 0,90 m (avec pas de 0,10 m).

Le bilan journalier augmente avec la densité des plantes (Fig. 19a), globalement de 27 % entre l'absence de culture (8,6 MJ m⁻²) et un développement maximal de celle-ci (10,8 MJ m⁻²). L'augmentation des pertes est principalement liée à la transpiration des plantes, qui provoque plusieurs effets : l'humidité intérieure est plus importante (83 % en moyenne en présence de culture, contre 51 % en leur absence), de sorte que les fuites enthalpiques augmentent de 1,0 MJ m⁻² ; en outre, cette plus forte humidité favorise une condensation sur la face interne de la couverture, ce qui réchauffe celle-ci et augmente les pertes convectives sur sa face externe, d'également 1,0 MJ m⁻².

Cette augmentation des pertes thermiques s'accompagne d'une consommation accrue en chauffage auxiliaire (+67 %), renforcée par une légère baisse de l'énergie solaire captée, car les plantes sont un peu plus réfléchissantes que le sol

Dans le même temps, le *stockage dans le sol diminue considérablement* puisqu'il voit sa valeur réduite de plus de moitié (passage de 1,53 à 0,65 MJ m⁻²) ; en valeur relative, la baisse est encore plus marquée, le taux du stockage dans le sol par rapport au bilan global passant de 18 % à 6 %.

Le bilan de surface du sol varie, quant à lui, dans un rapport de 2,5 à 1 environ (Fig. 19b). On observe très nettement la diminution du captage d'énergie solaire par le sol, liée à l'effet de masque opéré par la végétation. Les autres apports diminuent approximativement dans une même proportion. Pour la même raison, les pertes infrarouges du sol faiblissent, puisque celui-ci "voit" davantage les plantes que la couverture, plus froide : la température moyenne des éléments varie, entre les cas extrêmes, de 6,9 à 7,4 °C pour la couverture, 15,5 à 14,9 °C pour l'air intérieur, 14,5 à 14,2 °C pour le sol à 10 cm de profondeur, la température des plantes valant 14,3 °C dans le dernier cas.

On peut enfin noter que l'effet "oasis" des plantes joue ici assez peu, dans la mesure où l'on se situe dans une journée moyenne du mois de février, avec un ensoleillement relativement modique et une nébulosité importante (6,1 octas). Lorsque la densité de culture croît, la transpiration croît mais de manière non proportionnelle, car l'air intérieur est de plus en plus saturé d'humidité, ce qui limite le transfert hydrique ; en outre, la taille plus importante de la culture (en hauteur et en largeur) augmente leur captation solaire, ce qui atténue l'effet réfrigérant de l'évaporation. En revanche, l'effet "oasis" sera plus marqué lors de périodes plus ensoleillées ; à titre indicatif, la comparaison du scénario de journée ensoleillée isolée (*cf.* 4.1.3) entre une absence de culture, et une présence avec une densité foliaire de 2 (cas standard de cet article), montre que l'échauffement maximal de l'air diminue de 20,3 à 18,3 °C, la température maximale des plantes valant 19,3 °C dans ce dernier cas. La température maximale de surface de sol s'abaisse de 25,9 à 21,5 °C, et celle à 10 cm de profondeur de 19,0 à 16,7 °C.

4.7. INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS DU SOL

4.7.1. Conductivité thermique du sol. — La conductivité du sol n'influence pratiquement pas le comportement global de la serre. Lorsqu'on la fait varier de 0,7 à 2,2 W m⁻¹K⁻¹, le bilan journalier passe de 10,0 à 9,9 MJ m⁻² ! L'influence sur la capacité de stockage du sol reste également très faible (passage de 0,83 à 1,02 MJ m⁻², soit une augmentation de 23 % pour un triplement de la conductivité).

4.7.2. Capacité calorifique du sol. — Des conclusions analogues peuvent être formulées pour la capacité calorifique du sol : en faisant varier celle-ci de 1,5 à 3,6 MJ m⁻³K⁻¹ (par modifications simultanées de la masse volumique et de la chaleur massique du sol), on observe que le bilan journalier demeure stable (passage de 10,0 à 9,9 MJ m⁻²) et que le stockage dans le sol augmente légèrement de 16 %, évoluant de 0,86 à 1,00 MJ m⁻².

4.7.3. Paillage du sol. — Le recouvrement du sol par un film en matière plastique a pour effet de bloquer l'évaporation d'eau à sa surface. Dans ces conditions, on observe que le bilan global journalier diminue mais de manière faible (de 9,9 à 9,8 MJ m⁻²). Le stockage thermique dans le sol reste, quant à lui, rigoureusement constant ; l'analyse du bilan de surface du sol montre que la disparition du flux évaporatoire est compensée, pour la majeure partie par une augmentation des pertes radiatives, pour le reste par une diminution des gains convectifs sensibles depuis l'air intérieur, ces 2 phénomènes résultant d'une légère augmentation de la température moyenne du sol (14,5 °C avec paillage contre 14,1 °C sans paillage).

4.8. INFLUENCE DE LA TRANSPARENCE DE LA COUVERTURE. — La valeur de 58 % prise jusqu'alors pour le taux de transmission correspond à une transmission globale moyenne pour une trajectoire solaire relativement basse. Afin d'évaluer l'incidence de couvertures plus ou moins transmissives, nous faisons varier le coefficient de transmission solaire de 75 % à 45 %, la réflexion et l'absorption étant augmentées en conséquence en conservant leurs proportions relatives (depuis 15 % jusqu'à 33 % pour la réflexion par incrément de 3 %, et de 10 % à 22 % pour l'absorption par incrément de 2 %).

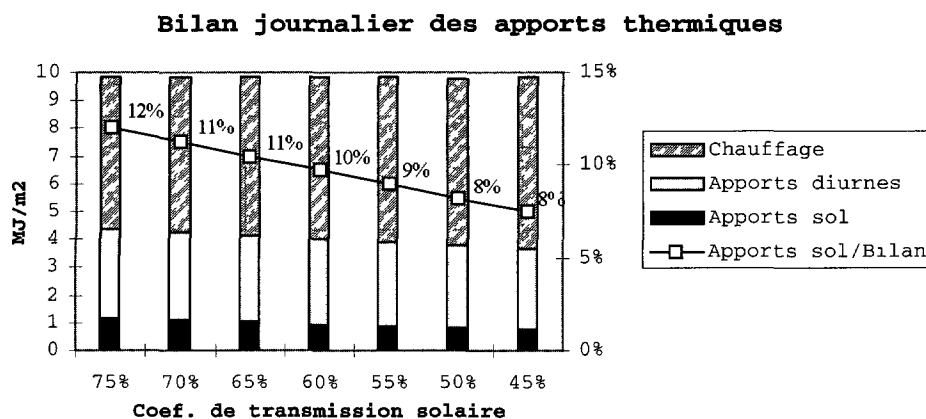


Fig 20. — Influence de la transparence de la couverture sur le bilan global journalier
[Influence of cover transparency on global daily balance.]

Si le bilan global journalier demeure constant (Fig. 20), on observe un léger transfert entre apports naturels et artificiels : le captage d'énergie solaire diminue de $0,70 \text{ MJ m}^{-2}$ (soit -16% en valeur relative), tandis que le chauffage auxiliaire augmente de $0,66 \text{ MJ m}^{-2}$ ($+12 \%$ en valeur relative). On peut remarquer que la baisse du captage solaire n'est pas proportionnelle à celle de la transparence de la couverture, car l'énergie solaire captée par la serre inclut celle de la couverture (qui augmente avec le coefficient d'absorption), le captage des plantes et du sol subissant lui une baisse proportionnelle au taux de transmission. La part respective de chaque type de pertes (rayonnement infrarouge, convection externe, fuites) n'est pas modifiée.

Le stockage dans le sol diminue avec la transparence de la couverture de $1,18$ à $0,74 \text{ MJ m}^{-2}$, ce qui, tout en étant faible en valeur absolue ($-0,44 \text{ MJ m}^{-2}$), représente cependant une diminution de plus du tiers de sa valeur (-38%).

Conclusion

La mise en œuvre d'un modèle de simulation dynamique (au pas horaire) du comportement énergétique d'une serre a permis, d'une part de formuler un bilan énergétique global journalier mettant en évidence les apports thermiques naturels et artificiels relativement aux besoins énergétiques de la serre, d'autre part de préciser l'évolution de ces termes au cours de la journée, ceci en fonction de divers modes de chauffage. Le rôle de réservoir thermique joué par le sol a notamment été analysé et discuté, non seulement en fonction des types d'échangeur, mais également en prenant en compte la variabilité des paramètres de contrôle et d'environnement climatique extérieur ; de même, les rejets thermiques liés à la ventilation artificielle ont pu être évalués et discutés.

Le *bilan global journalier* quantifie l'équilibre énergétique quotidien entre les apports (naturels et artificiels) d'une part, les pertes d'autre part, lors de journées climatiques moyennes représentatives de chaque mois ; ils sont du même ordre de grandeur pour 3 des 4 types d'échangeurs étudiés (tubes aériens, gaines posées au sol, tubes enterrés), à température de consigne d'air fixée. L'usage d'un aérotherme seul fait apparaître un bilan global moins important, associé à un état thermique des plantes et du sol moins élevé ($0,4$ à $0,8 \text{ K}$ en moins sur la température moyenne nocturne des plantes, 1 à 5 K en moins pour la température du sol à 10 cm de profondeur) et donc moins efficace agronomiquement parlant.

Dans les conditions testées, simulant une serre réelle régulée entre 14 °C et 22 °C sous des conditions climatiques moyennes, les *pertes thermiques* se répartissent globalement, sur les 9 mois de la saison considérée, à 53 % de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde, 32 % de convection à la surface externe de la couverture, et 15 % de fuites vers l'extérieur. Si les fuites demeurent assez stables tout au long de l'année, les 2 autres pertes varient de manière beaucoup plus importante puisque, lors des mois de forts besoins thermiques, les pertes radiatives peuvent baisser à 42 % du bilan journalier, et les pertes convectives monter jusqu'à 40 %.

Les *apports solaires utiles* (apports thermiques naturels) varient de 16 % des apports thermiques lors des mois froids jusqu'à plus de 90 % lors des mois chauds ; ils représentent de 65 à 72 % de l'énergie solaire incidente (avec un taux s'abaissant à 59 % si la couverture est peu transparente), et plafonnent à environ 7 à 8 MJ m⁻² lorsque l'ensoleillement croît. Sur l'ensemble de la période de culture testée, ils satisfont globalement 40 à 50 % des besoins totaux, selon le mode de chauffage ; lors des mois froids, les apports solaires utiles sont peu dépendants du système de chauffage et se situent entre 16 % (décembre) et 37 % (février), avec un pourcentage légèrement plus élevé pour l'aérotherme seul (41 %) ; pour les autres mois, ils sont significativement moins importants en présence de tubes enterrés, du fait de rejets thermiques par ventilation plus fréquents : la température de l'air intérieur est dans ce cas plus élevée, en particulier parce que la chaleur emmagasinée la nuit dans le sol (chauffé de l'intérieur) continue à migrer vers la surface du sol et l'air intérieur dans la journée. Si l'on élève la consigne de chauffage, les apports solaires diminuent (environ 4 % de moins par degré de consigne en plus).

Le *stockage d'énergie dans le sol* permet d'évaluer les apports solaires différés, c'est-à-dire la part d'énergie solaire stockée le jour et restituée la nuit. Ce terme est très dépendant du type d'échangeur utilisé : sur l'ensemble des journées pendant lesquelles on chauffe plus de 10 heures, le stockage thermique dans le sol peut représenter jusqu'à 11 % du bilan journalier (cas de l'aérotherme), et décroît à 11 % (tubes aériens), 8,5 % (gainés posés au sol) voire 6 % (tubes enterrés) ; il est plus faible lors des mois froids (respectivement 4 %, 3 %, 1 % et 0 %), plus élevé lors des mois chauds (26 %, 25 %, 21 % et 17 %). Ces différents taux sont très sensibles à la densité de la culture (baisse de plus de la moitié si la culture est très développée) et à la transparence de la couverture (réduction au tiers si le coefficient de transmission passe de 75 à 45 %).

L'analyse de l'évolution du *flux thermique transmis par la surface du sol au cours de la journées* montre la combinaison de 2 effets :

- la restitution directe, mais différée, des apports solaires diurnes stockés dans le sol ;
- la distribution indirecte des apports de chauffage nocturne, d'autant plus marquée que l'échangeur est proche du sol.

La *puissance maximale de stockage thermique dans le sol* peut atteindre des valeurs instantanées élevées, variables selon le type d'échangeur : 55 W m⁻² (aérotherme), 50 W m⁻² (tubes aériens), 35 W m⁻² (gainés au sol), 22 W m⁻² (tubes enterrés) ; par contre, la *puissance maximale de restitution* (en fin de journée ou début de nuit) ne dépend pas de l'échangeur : 21 à 24 W m⁻² pour les 3 premiers échangeurs (la valeur de 68 W m⁻² n'étant pas significative pour les tubes enterrés puisqu'elle dénote la puissance du chauffage artificiel).

L'étude de sensibilité à divers facteurs du bilan journalier, de l'énergie solaire utile, du stockage thermique dans le sol et des apports artificiels a été réalisée sur le cas d'un échangeur par aérotherme seul :

- L'augmentation de *l'ensoleillement* (à température extérieure identique), corrélée à une baisse de *nébulosité* du ciel, influence très peu les besoins en chauffage auxiliaire, car la

meilleure captation solaire est pratiquement compensée par une augmentation globale des pertes (notamment infrarouges) du fait du ciel dégagé et d'un état énergétique plus élevé de la serre ; le stockage dans le sol atteint, en valeur relative au bilan global, un plafond de manière asymptotique, dont la valeur n'est pas fixe mais dépendante de la température extérieure ; en fait, les variations d'ensoleillement interviendront indirectement à travers les variations de température extérieure qu'elles pourront provoquer. Ce constat est corroboré par l'analyse d'un scénario de survenance d'une journée ensoleillée isolée (sans modification du cycle de température extérieure) pendant une période-type froide : l'énergie supplémentaire stockée dans le sol n'est restituée que partiellement dans la nuit qui suit (moins du tiers), ne diminuant que faiblement le besoin de chauffage, et l'effet de la journée ensoleillée est pratiquement amorti dès le lendemain.

- La décroissance de la *température extérieure* influe très notablement sur les besoins thermiques (augmentation d'environ 0,7 à 0,9 MJ m⁻² par degré de température extérieure en moins). Dans le même temps, le stockage thermique dans le sol décroît fortement en valeur relative. La représentation de l'énergie stockée dans le sol en fonction de l'ensoleillement pour diverses températures extérieures moyennes ne permet pas de conclure à une loi simplificatrice : l'évolution en fonction de l'ensoleillement est non linéaire, avec une pente dont l'intensité décroît avec l'ensoleillement ; la ventilation artificielle induit également une modification de la pente, sans pour autant l'annuler complètement (pas d'effet de plafonnement).
- La part restituée par le sol baisse avec l'augmentation de la *consigne de chauffage*, non seulement en valeur relative par rapport au bilan global (qui augmente de plus en plus), mais également en valeur absolue (diminution de 40 % lorsque la consigne passe de 6 à 20 °C) : plus le sol est chaud, et moins il est capable de stocker l'énergie solaire incidente.
- Si l'on diminue la *consigne de ventilation* (mois tempérés ou chauds), le bilan global journalier diminue puisque l'état énergétique de la serre est maintenu plus bas pendant la journée ; le stockage thermique dans le sol demeure stable en valeur relative (22 % du bilan global pour le mois testé).
- La *densité des cultures* influence de manière importante le besoin en chauffage auxiliaire, et plus nettement encore le stockage thermique dans le sol (diminué de moitié entre un sol nu et une végétation très développée) : l'effet de masquage du sol par la culture limite la captation solaire dans le sol, mais également ses pertes radiatives.
- Le stockage thermique dans le sol est pratiquement indépendant de ses propriétés intrinsèques (conductivité, capacité calorifique).
- La diminution de *transparence de la couverture* au rayonnement solaire ne modifie pas le bilan global journalier, mais provoque une légère augmentation du chauffage artificiel consécutive à la baisse de l'apport solaire ; le stockage dans le sol diminue sensiblement.

Enfin, l'une des applications de cette étude était d'examiner la possibilité de définir une loi simplificatrice à usage de l'ingénieur ou du thermicien susceptible d'évaluer la part d'énergie solaire récupérable pour le chauffage de la serre. Notre analyse montre que la loi proposée par Bourgeois *et al.* [3] n'est pas généralisable : dans les périodes froides, le rapport de l'énergie solaire stockée dans le sol relativement à l'énergie solaire captée n'est pas constant, mais dépend très significativement du type d'échangeur : 24 à 27 % (aérotherme), 16 à 22 % (tubes aériens), 4 à 12 % (gainés au sol), 0 à 3 % (tubes enterrés) , plus le sol est chaud, plus importantes sont

ses pertes vers les autres éléments, et moins élevée est sa propension à emmagasiner en son sein l'énergie solaire ; pour les mois plus chauds, ce taux peut atteindre des valeurs respectivement égales à 35 %, 34 %, 29 % et 21 % selon l'échangeur, avec un effet de plafonnement situé entre 1,9 et 2,0 MJ m⁻² variable selon l'échangeur. Les investigations pour proposer une loi générale plus fine n'ont pas permis d'aboutir car trop de facteurs rentrent significativement en ligne de compte de façon non indépendante, tout particulièrement l'ensoleillement, la température externe, la consigne de chauffage et la densité de la culture.

Bibliographie

- [1] Arinze E.A., Schoenau G.J. and Besant R.W., A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage, *Trans. ASAE* **27** (1984) 508-519.
- [2] Boulard T. and Baille A., Simulation and analysis of soil heat storage systems for a solar greenhouse, *Energy Agric.* **5** (1987) 175-184.
- [3] Bourgeois M., Calame F., Danloy L., Darbellay C., Gay J.-B., Jolliet O., Mantillieri S., Moncousin C., Munday G.L. et Reist A., Serre-pilote CERN, Rapport final de la première expérience, CERN/DIR/EN/86-2 (1986) pp. 187
- [4] Jaffrin A. and Cadier P., Latent heat storage applied to horticulture, La Baronne solar greenhouse, *Solar Energy* **28** (1982) 313-321.
- [5] Choissnel E., Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol, *La Météorologie* **11** (1977) 103-133.
- [6] Issanchou G., Modélisation énergétique des serres. Contribution à la mise au point d'un logiciel de thermique appliqué à l'ingénierie des serres, Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan (1991) pp. 250.
- [7] Jolliet O., Modélisation du comportement thermique d'une serre horticole, Thèse n°713 (1988) pp. 247.
- [8] Kindelan M., Dynamic modelling of greenhouse environment, *Trans ASAE* **23** (1980) 1232-1239.
- [9] Monteil C., Validation d'un modèle informatique de serre agricole destiné à l'analyse énergétique des serres et au dimensionnement des systèmes de chauffage, Rapport final de la convention A.F.M.E./Région Midi-Pyrénées/E.N.S.A.T. du 28/11/88 (1990) pp. 116.
- [10] Monteil C., Issanchou G. et Amouroux M., Modèle énergétique de la serre agricole, *J. Phys. III France* **1** (1991) 429-454.
- [11] Monteil C. et Amouroux M., Analyse thermique de systèmes de chauffage localisé à basse température dans les serres agricoles : paillage radiant et tubes enterrés, *J. Phys. III France* **3** (1993) 1981-2031.
- [12] Perrin de Brichambaut C. et Vauge C., Le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique, *Technique et Documentation* (1982) pp. 222.
- [13] Swinbank W.C., Long-wave radiation from clear skies, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **89** (1963) 339-348.
- [14] van Bavel C.H.M. and Sadler E.J., SG79: a computer simulation program for analyzing energy transformations in a solar greenhouse, Texas A&M University, College Station (1979).