

# Condensations et propriétés thermiques des couvertures de serres

Pierre Feuilloley et Gilbert Issanchou

Les serres sont des outils de production intensive actuellement très performants. Le parc est en légère extension et la France possède environ 9 600 ha de serres dont 3 600 ha de serres en verre et 6 000 ha de serres en plastique.

Pour économiser l'énergie, les serres modernes sont de plus en plus étanches. Cette étanchéité, bénéfique au plan thermique, présente un inconvénient majeur, elle empêche le renouvellement d'air, entraînant ainsi une élévation de l'humidité relative dans la serre. Cette élévation pose problème dès qu'apparaissent des condensations sur la couverture et les parois de la serre. Des phénomènes de gouttage provoquent alors des maladies cryptogamiques sur la végétation et des corrosions sur les structures métalliques. Outre ces inconvénients, ces phénomènes sont aussi responsables de modifications importantes des propriétés optiques et thermiques des matériaux de couverture, que ce soit le verre ou le plastique.

Dans les serres en verre, on estime que les dépenses d'énergie supplémentaires pour lutter contre les phénomènes de condensation peuvent atteindre jusqu'à 15 % des dépenses d'énergie totales.

Les serres plastiques, moins chères à l'achat, sont encore plus hermétiques. On admet en effet qu'une serre à couverture de film plastique est deux, voire trois fois plus étanche, à superficie égale, qu'une serre en verre.

En effet, malgré ces progrès et les techniques de contrôle du climat dont dispose l'agriculteur — déshumidification par pompe à chaleur, aération forcée et chauffage simultanés, contrôle climatique par ordinateur — les condensations sont inévitables. Quel que soit le type de couverture, un serriste est donc toujours confronté, à une certaine période de l'année, l'hiver en général, à des condensations sur les parois de sa serre.



Photo 1. - Boîtes chaudes isothermes.

Quels sont les problèmes de condensation dans les serres plastiques, sachant que le matériau verre ne présente pas les mêmes caractéristiques que les matériaux plastiques, et que de nouveaux types de films sont apparus sur le marché, très performants au plan thermique et plus intéressants au niveau des condensations ? Pour répondre à la demande des fabricants et des serristes, une étude a été menée en comparant différents types de couvertures. Nous présenterons ici le bilan des connaissances, les principaux résultats obtenus ainsi que les recommandations qui en découlent, en particulier sur les comportements du verre et du plastique.

## Que sait-on de la condensation et des échanges thermiques sous serre ?

Les divers travaux réalisés dans ce domaine permettent de faire le point sur les résultats déjà obtenus, soit pour le plastique, soit pour le verre.

Pour les matériaux plastiques, la condensation ou l'emprisonnement d'eau entre deux parois améliore l'efficacité thermique. L'émissivité du système film-eau [1] augmente, l'ensemble devient alors opaque au rayonnement thermique [2, 3, 4, 5]. En effet, l'eau a une émissivité proche de 1 vis-à-vis du rayonnement infrarouge.

Le coefficient global de transfert thermique s'améliore également en présence de condensation

\* Cette étude a été réalisée avec le concours de J.-C. Jacques, S. Guillaume, Ch. Mekikdjian, J.-F. Mirabella et A. Merlot.

**Pierre Feuilloley  
et Gilbert Issanchou**

Cemagref,  
division Génie des  
équipements agricoles  
et alimentaires

BP 5095

34033 Montpellier cedex 1

sur film de polyéthylène, résultats obtenus par simulation à l'aide de modèles informatiques [7, 8], ou par mesures *in situ* [1, 10, 9]. Cependant, dans certains cas d'espèce, il y a une diminution [4, 9].

En ce qui concerne la transmission du rayonnement visible, le problème est plus complexe. Deux cas sont à considérer. Dans le premier, la présence d'eau entre les parois de plaques alvéolaires en polycarbonate améliore la transmission du rayonnement visible. Dans le second cas, pour un film en polyéthylène, selon le type de condensation et la forme des gouttelettes, on assiste soit à une diminution de la transparence, soit à une augmentation, d'où l'intérêt des films totalement mouillables ou « antibuée » [9, 10, 11, 12] qui sont plus performants humides que secs. La pente de la toiture modifie également la performance thermique et optique du matériau : une pente plus prononcée, à surface égale de toiture, induit moins de perte thermique et plus de lumière [4, 9].

Le comportement du verre est à l'opposé de celui du plastique. Les condensations dégradent le coefficient de transfert thermique sans améliorer l'opacité au rayonnement infrarouge, le verre ayant déjà une émissivité voisine de 1 [2, 5, 8, 9]. Ceci est confirmé aussi bien par les simulations sur des modèles théoriques que par des mesures *in*

*situ*. Une pente plus forte de la toiture semble également améliorer le coefficient de transfert thermique (moins de perte) et la luminosité [9].

Enfin, les quantités d'eau condensée sur le verre ou sur le film en polyéthylène ont rarement été mesurées ou calculées. Le calcul et la mesure sont difficiles et complexes et les résultats très variables d'une expérimentation à l'autre. En effet, des mesures réalisées sur un banc d'essais ont donné, pour le polyéthylène, des flux de condensation variant de 39 à 162 ml/h/m<sup>2</sup> [4]. Dans une serre en plastique, on a noté des flux variant de 3,6 ml/h/m<sup>2</sup> à 25,2 ml/h/m<sup>2</sup>. Un autre essai sur serre en verre a donné une valeur moyenne de 9,43 ml/h/m<sup>2</sup>. Des mesures réalisées sur des boîtes chaudes isothermes ont montré également des différences notables de masse condensée selon le type de film utilisé.

En définitive, le niveau de modification de ces propriétés est mal connu, les références sont peu nombreuses, voire contradictoires, et dépend de nombreux facteurs comme le type de couverture (film plastique mouillable ou non, verre...), la pente de la couverture, la dynamique de la condensation, la taille et la forme des gouttes, etc.

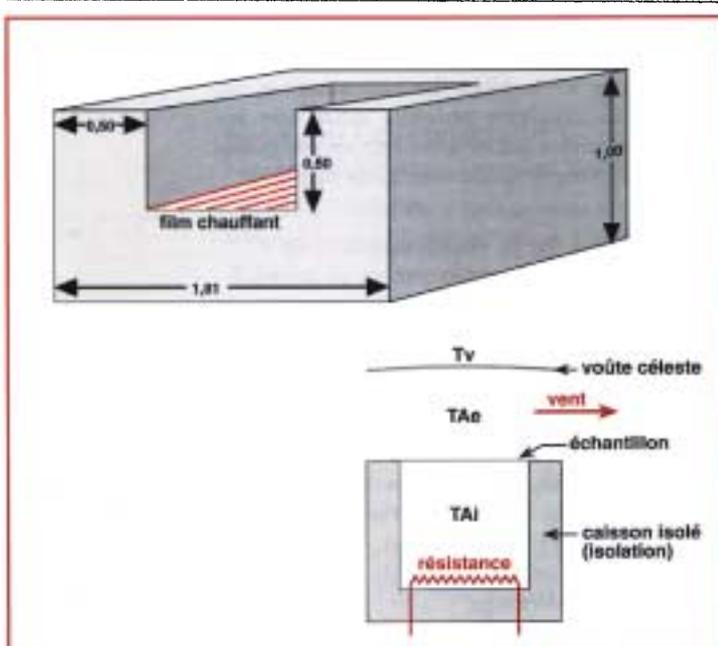
Nous avons donc cherché à déterminer l'incidence des condensations sur le coefficient de transfert thermique de diverses couvertures de serres plastiques, en vue d'en déduire des conseils pour les choix des matériaux de couverture ou pour la conduite climatique des serres. Le verre est le matériau de référence.

## La méthode: le verre, matériel de référence

### ■ Les boîtes chaudes isothermes

Le coefficient global de transfert thermique  $K$  s'exprime en W/m<sup>2</sup>/°C. Pour le mesurer, on utilise en laboratoire la technique des boîtes chaudes gardées ou de la plaque chaude gardée. Ces méthodes sont normalisées [13] pour la détermination de la conductibilité thermique des matériaux isolants épais utilisés dans la construction des habitations.

Concernant des matériaux minces de couverture de serre, nous avons dû adapter la méthode aux conditions extérieures, de façon à intégrer les phénomènes supplémentaires intervenant en climatologie des serres, tels que le vent, la température radiative du ciel, les condensations sur les parois.



- Figure 1. – La boîte chaude isotherme.

Les mesures ont donc été réalisées à l'aide de trois boîtes chaudes isothermes identiques, de façon à pouvoir réaliser des essais comparatifs dans les mêmes conditions climatiques. Les dimensions de chaque boîte sont indiquées sur la figure 1.

Le principe de fonctionnement est le suivant : chaque boîte est chauffée par une résistance électrique (film chauffant) déposée au fond de la cavité ; cette énergie ne peut s'évacuer que par l'échantillon de film plastique (ou de verre) qui ferme la face supérieure de la boîte (figure 1), les autres faces étant pratiquement adiabatiques (forte isolation). Connaissant les températures d'air intérieure et extérieure et l'énergie apportée par la résistance, on en déduit le coefficient K.

Les mesures sont effectuées dès que les boîtes sont en équilibre thermique avec le milieu extérieur. Cet état d'équilibre est atteint 4 à 5 heures après la mise en route des résistances.

### ■ Les mesures effectuées

Les climats intérieur (températures diverses et hygrométrie) et extérieur (station météo) sont mesurés.

De plus, un dispositif de réhumidification d'air est installé à l'intérieur de chaque boîte. Il permet d'atteindre la saturation de l'air de la boîte et d'obtenir une condensation sur toute la surface du film, sans gouttage ni ruissellement.

Le poids d'eau condensée sur l'échantillon ( $W_c$  en g) est également mesuré par différence de pesée entre le film sec et humide. Ces poids sont appréciés au 1/10<sup>e</sup> de g.

L'étanchéité des boîtes a également été déterminée par la méthode des gaz traceurs : du protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) est injecté dans la boîte et on enregistre sa vitesse de disparition. Cette méthode de mesure est normalisée en France. On qualifie alors l'étanchéité par un coefficient de renouvellement (nombre de renouvellements complets du volume d'air de la boîte par heure). Ce coefficient est fonction de la vitesse du vent.

### ■ Précision de la méthode

Les essais ont lieu la nuit, lorsque le système est proche d'un état d'équilibre, et quand les conditions climatiques extérieures sont stables (ceci est souvent réalisé entre 1 h et 5 h du matin environ).

L'expression du coefficient de transfert thermique est :  $K = P_s / (S_c(T_{Ai} - T_{Ae}))$  avec

- $S_c$  = Surface de l'échantillon en  $m^2$
- $P_s$  = Puissance délivrée par le chauffage en W
- $T_{Ai}$  = Température intérieure en  $^{\circ}C$
- $T_{Ae}$  = Température extérieure en  $^{\circ}C$

Ce coefficient K est donc exprimé en  $W/m^2/^{\circ}C$  et il n'a de sens que si on précise les conditions climatiques expérimentales.

Il s'agit là d'une valeur brute, ne tenant pas compte des déperditions par les parois des boîtes et les fuites par défaut d'étanchéité.

Il convient donc d'abord de faire une correction, en calculant la part d'énergie perdue par les parois et les fuites d'air, et ensuite de tenir compte de la précision des instruments de mesure. On obtient ainsi une valeur nette de K. Cette correction due aux pertes est réalisée grâce à un logiciel utilisant le principe des bilans énergétiques.

Le calcul, non détaillé ici, montre que cette valeur nette de K est connue à 1,7 % près. Ce même calcul souligne l'intérêt d'augmenter la précision des instruments de mesure et de travailler avec des écarts de températures importants, c'est-à-dire de réaliser les essais en hiver, la nuit, avec une forte puissance de chauffage.

Les paramètres sensibles de la méthode sont donc les mesures de température et de puissance électrique consommée.

N° du film	Nature	$\epsilon$	$\tau$	$\phi$	Lc
1	PEbd traité anti UV	0,40	0,53	0,07	180
2	PEbd + EVA	0,59	0,38	0,03	180
3	PEbd Coextrudé + EVA	0,59	0,38	0,03	180
4	PE bd + EVA	0,70	0,27	0,03	180
5	PEbd + EVA	0,66	0,31	0,03	180
6	PEbd + EVA coextrudé 3 couches	0,59	0,38	0,03	200
7	PEbd + charges minérales	0,76	0,21	0,03	200
8	PE bd + EVA coextrudé 3 couches	0,59	0,38	0,03	200
9	PEbd + EVA	0,59	0,38	0,03	200
10	PEbd + EVA coextrudé 3 couches antibuée	0,59	0,38	0,03	200
11	PEbd + charges minérales	0,76	0,21	0,03	200
Verre	Verre horticole	0,90	0	0,10	4000

Abréviations : IR = Infrarouge ; PEbd = Polyéthylène basse densité ; EVA = Éthyl-Vinyl-Acétate

▲ Tableau 1. – Propriétés optiques des films dans l'infrarouge.

## RÉSULTATS

### – Propriétés optiques des films testés

Il est d'abord nécessaire de déterminer les propriétés des films et du verre vis-à-vis de l'infrarouge. Elles sont résumées dans le tableau 1 où  $\epsilon$ ,  $\tau$  et  $\phi$  désignent respectivement l'émissivité, la transmission et la réflexion du matériau.  $L_c$  est l'épaisseur en  $\mu\text{m}$ .

Les mesures de  $\epsilon$ ,  $\tau$  et  $\phi$  ont été réalisées par un spectrographe IR dans la bande de 2,5 à 25  $\mu\text{m}$ .

Le film n° 1 n'est pas chargé. Par contre, les films 2 à 6 sont chargés par des dopes thermiques à base d'EVA, dont le dosage n'est pas fourni par le fabricant. Pour les films 7 et 11, la charge thermique est d'origine minérale et le dosage n'est pas fourni par le fabricant.

Ces charges améliorent l'émissivité du film et donc sa performance thermique (diminution de sa transparence vis-à-vis de l'IR et par conséquent amélioration de l'effet de serre).

Le film n° 10 est le film n° 8 rendu antibuée par addition d'un agent tensioactif au moment de son extrusion.

Nous avons également réalisé des mesures sur une plaque de verre, considéré comme matériau de référence.

### – Les masses d'eau condensée

Nous avons donc provoqué des condensations sous ces matériaux en vue de modifier leur comportement thermique. Cette condensation est statique, il n'y a ni gouttage, ni ruissellement.

En outre, deux essais ont été réalisés à 2 ans d'intervalle, en 1991 et 1993, sur les mêmes films, en vue de tester l'effet du vieillissement sur le comportement du matériau.

Les résultats sont présentés au tableau 2, et une interprétation est donnée en conclusion.

### – Les valeurs des coefficients K

Les figures 2 et 3 ci-après résument les valeurs nettes des coefficients K mesurées sur le verre et les films 1 à 11 décrits ci-dessus, selon que le matériau est sec ou avec condensation.

Les mesures sont parfaitement comparatives puisque, disposant de plusieurs boîtes, nous en avons réservé deux pour le même film : une boîte

n° du film	Essai 1991 Wc en g/m <sup>2</sup>	Essai 1993 Wc en g/m <sup>2</sup>
8	26	39
9	49	55
10	16	50
11	35	44

▲ Tableau 2. – Masses d'eau condensée moyennes sur les films, en 1991 et 1993.

avec le film sec et une boîte avec le film mouillé. Les conditions climatiques au moment des mesures sont celles du climat méditerranéen en hiver, la nuit, soit sensiblement les suivantes :

Température extérieure =	5 °C
Température intérieure =	15 °C
Température radiative du ciel =	-10 °C
Vitesse du vent =	1 m/s

## Recommandations différentes selon le matériau

L'analyse des résultats montre que, pour les films plastiques, le facteur de transfert thermique K du film mouillé est systématiquement inférieur au facteur K du film sec. Ainsi, à sec, le film plastique laisse passer les infrarouges, donc perte de chaleur ; par contre, aucune énergie n'est consommée par la condensation. En revanche, une fois le plastique recouvert d'une pellicule d'eau, le passage des infrarouges est quasiment interrompu. L'économie d'énergie réalisée est supérieure à la perte occasionnée par la condensation. Il y a globalement économie.

Pour le verre, c'est l'inverse : tous les facteurs K « mouillés » sont supérieurs aux facteurs K « secs » (les écarts sont tous significatifs selon la méthode indiquée ci-dessus – seuil de 1,7%). Le verre sec arrête les infrarouges. Lorsque le verre est mouillé, les infrarouges sont également arrêtés ; par contre, la condensation consomme de l'énergie supplémentaire, d'où perte par rapport à la situation sèche.

L'interprétation de ce résultat est aisée. Il y a concurrence entre deux phénomènes dus à la condensation :

- 1) diminution du facteur de transmission dans le rayonnement IR long (l'eau a une émissivité voisine de 1), et donc amélioration de l'effet de serre ;
- 2) augmentation des pertes par chaleur latente de condensation.

Pour les films plastiques, le phénomène 1 l'emporte sur le phénomène 2, le polyéthylène étant peu

opaque aux IR longs. L'eau joue donc le rôle d'une charge thermique de très bonne qualité, d'où la bonne performance des films plastiques lorsqu'ils sont humides et d'autant meilleure quand le film n'est pas chargé.

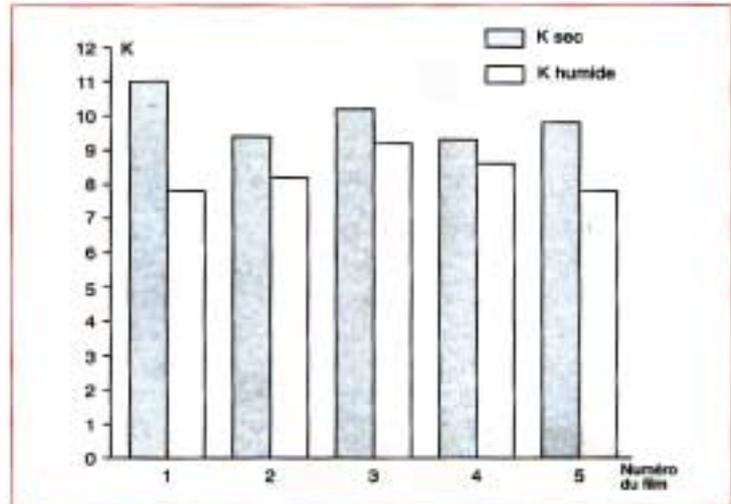
Pour le verre, c'est l'inverse : il est déjà opaque à l'IR et seul le phénomène 2 est actif. L'eau, en se condensant, cède de la chaleur au verre et donc au milieu extérieur, d'où la dégradation du bilan thermique du verre lorsqu'il est mouillé.

Concernant les poids d'eau condensée, nous retrouvons sensiblement les mêmes résultats en 1991 et en 1993 (tableau 2), avec toutefois une tendance à une augmentation du poids d'eau retenu par le film, surtout pour le n° 10 qui est antibuée. Cette rétention d'eau est responsable du gouttage. Il y a donc une dégradation dans le temps de l'agent antigoutte et de l'effeur antibuée, même si le film est stocké à l'abri. En outre, le calcul statistique montre qu'il n'y a aucune corrélation entre le poids d'eau condensée (sans ruissellement) et la valeur du facteur K.

Le comportement des films « antibuée » reste donc à préciser, en particulier sur la taille des gouttelettes, les quantités d'eau condensée, et la durabilité de l'agent antigoutte (dans le temps et/ou en présence d'eau).

Les condensations provoquent également l'augmentation de température du film ou du verre, l'écart étant fonction des conditions expérimentales. Il est plus important pour les films (0,2 à 2,2 °C) que pour le verre (0,4 °C max.). Cette augmentation de température est due à la chaleur latente de condensation déjà évoquée plus haut. On confirme ainsi des résultats déjà obtenus lors d'essais antérieurs.

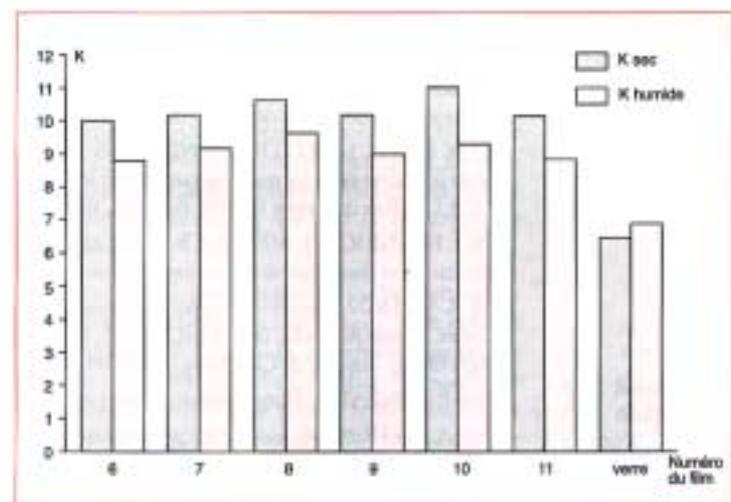
En conclusion, dans une serre de verre, on le savait déjà, la condensation n'est pas souhaitable car elle entraîne des pertes d'énergie supérieures à ce qu'il faut dépenser pour « sécher » la surface. Par contre, la situation est inversée pour les serres plastique. En effet, les phénomènes de condensation améliorent le facteur K : il y a intérêt à avoir des condensations sous serre plastique pour améliorer le bilan thermique. Ces condensations doivent néanmoins être limitées et contrôlées pour éviter le gouttage, responsable de dégâts sur la végétation et les structures. On se trouve donc devant une sorte de contradiction que l'agriculteur devra gérer : sous serre plastique on pourra accepter une humidité



▲ Figure 2. – Effets de la condensation sur le facteur K (mesures réalisées en 1988 sur films plastique).

sur la couverture, ce qui augmente la performance radiative et thermique du film, mais pas de gouttage.

Sous serre plastique également, on s'efforcera de préférer les films antibuée, plus transparents au rayonnement visible lorsqu'ils sont mouillés (gains de 2 à 3 %), et qui évitent le gouttage grâce aux agents tensioactifs. Il est également possible d'accentuer la pente de la toiture pour lutter contre les condensations, tout en augmentant la transparence. Si cela est difficile pour les serres en verre (structures lourdes et standardisées), en revanche certains constructeurs de serres en plastique



▲ Figure 3 – Effets de la condensation sur le facteur K (mesures réalisées en 1991-93 sur films plastique et verre).

proposent maintenant des serres tunnels en forme d'ogive, ce qui améliore nettement les problèmes de gouttage au niveau faîtage.

Pour le verre, les condensations sont néfastes et coûtent cher, en particulier en présence d'eau ruisselant sur les parois. Il faut donc les supprimer

complètement. Dans les serres plastique, toute la difficulté va être, pour le serriste, de chauffer assez pour empêcher le gouttage, mais pas trop pour permettre une condensation convenable.

L'utilisation de l'ordinateur « climatique » pour la conduite du chauffage pourrait résoudre la question.

### Résumé

Les condensations sur les parois des serres, fréquentes en particulier sous serres plastiques, modifient les propriétés physiques de la couverture, telles les transmissions lumineuse et thermique. Ces modifications sont étudiées sur divers films plastiques et sur le verre, in situ avec des boîtes chaudes isothermes. Les résultats montrent que les films plastiques sont plus performants mouillés que secs. Pour le verre, c'est l'inverse, les condensations sont néfastes.

### Abstract

Condensations are responsible for important modifications of optic and thermal properties of greenhouses covering materials. Comparison of the impact of condensations of various plastic films and the glass, by using the method of isothermal hot boxes "in situ". Results show that wet films perform better. On the contrary condensations reduce the performance of glass.

### Bibliographie

- (1) H. KON, T. DOI, J. HANYU, K. NAKAYAMA, An experiment on the change in the emissivity of the plastic film due to dew condensation, Faculty of Horticulture, Chiba University, 648, Matsudo, Chiba, JAPON, J. Agr. Met. 41 (2) : 115-120, 1985
- (2) D. de HALLEUX, J. NIJSKENS, J. DELTOUR, S. COUTISSE, A. NISEN, Effer de la condensation sur les transferts thermiques des couvertures de serres : cas du verre et du polyéthylène, *Plasticulture*, n° 66, juin 1985
- (3) M. CHIAPALE, Influence de la condensation sur la transmission de l'Infrarouge, CPA, 65, rue de Prony, 75017 PARIS, Comité des Plastiques en Agriculture, Congrès de Montpellier, 23-25/05/84
- (4) S.R. DELWICHE, D.H. WILLITS, The effect of condensation on heat transfert through polyethylene films, *Transactions of the ASAE*, 1984, 1476-1482
- (5) J. NIJSKENS, J. DELTOUR, S. COUTISSE, A. NISEN, Heat transfert through covering materials of greenhouses, *Agricultural and Forest Meteorolgy*, 33 (1984) 193-214
- (6) P. FEUILLOLEY, S. GUILLAUME, G. ISSANCHOU, Mesure de la transparence thermique des matériaux plastiques de couverture de serre, *Plasticulture*, n° 81 (1989/1)
- (7) A. NISEN, J. DELTOUR, J. NIJSKENS, S. COUTISSE, Considérations pratiques sur la transmission solaire et de la chaleur pour les matériaux utilisés en serre comme couverture, ombrage et écran thermique, 1985, 1986, I.R.S.I.A., Rue de Crayer 6, 1050 Bruxelles, BELGIQUE
- (8) I. FAHRNICH, J. MEYER, Ch. Von ZABELTITZ, Influence de la condensation sur la transmission lumineuse et thermique des matériaux de couverture de serres, *Plasticulture*, n° 84, 1989/4
- (9) A. JAFFRIN, Phénomènes superficiels mis en jeu dans la condensation sur parois, URIH-INRA, Route des Colles, Sophia Antipolis, 06410 BIOT, CPA, 65 rue de Prony, 75017 PARIS, Comité des Plastiques en Agriculture, Congrès de Cherbourg, 16-18/04/91
- (10) P. TONEATTI, Films antibuée, mythes et réalités, *Plasticulture*, n° 84, 1989/4
- (11) A. JAFFRIN, Mécanisme des pertes de transmission lumineuse d'un film non mouillable en présence de condensation, CPA, 65, rue de Prony, 75017 Paris, Comité des Plastiques en Agriculture, Congrès de Marignane, 12-14/04/89
- (12) Anonyme, Détermination en laboratoire des coefficients de transmission thermique des parois par la méthode de la boîte chaude gardée, Norme NF X 10-022, AFNOR, Tour Europe, Cedex 7, Paris-La Défense.