

# Amélioration du bilan thermique sous abri-serre.

H. Verlodt

## Résumé

*De l'utilisation des films plastiques résulte une augmentation très souvent trop importante des températures maximales sous serre, tandis que l'amélioration des températures minimales est le plus souvent trop faible. Une approche théorique des déperditions énergétiques sous serre plastique montre l'importance des déperditions par rayonnement. L'utilisation de nouveaux films thermiques et d'écrans thermiques dans le but de réduire ces déperditions nocturnes est discutée. Le chauffage par générateur d'air chaud semble trop coûteux et trop peu efficace. Le chauffage alternatif, soit par énergie solaire, soit par géothermie est discuté. La réduction des températures maximales est également discutée.*

## Summary

### **Improvement of the thermal balance under PE greenhouse**

*Use of a longlife polyethylene film for crop protection under greenhouse results in an important, and very often too important improvement of the maximum air temperature, and in a very small improvement of the minimum air temperature during the night. A theoretical approach of energy losses under PE greenhouse in Tunisia allows the constatation of the importance of infra-red radiation during the night. Use of new and improved polyethylene films and thermal screens reducing energy losses by infra-red radiation, are discussed. Heating of the greenhouse by an air blower peak heating system seems to be expensive under our conditions. Alternative heating with back radiant mulch film tubes using solar captors and geothermic resources are discussed. Reduction of maximum temperature under PE greenhouse is also discussed.*

## 1. Introduction

La protection d'une culture consiste dans l'interposition d'un écran de forme et de matériau variable, entre le milieu naturel et le milieu dans lequel pousse la plante. L'utilisation de cet écran résulte dans une augmentation considérable et souvent excessive des températures diurnes de l'air ambiant et du substrat de culture, ainsi que dans une augmentation faible et insuffisante des températures nocturnes. Ces augmentations de température obtenues dépendront essentiellement de la nature de la paroi. Le climat spontané imparfait résultant de l'utilisation de ces couvertures a suscité chez l'homme des interventions afin de parfaire le climat et d'instaurer un climat artificiel, se rapprochant plus des exigences de la plante et ayant pour but essentiel d'abaisser la température diurne (ombrage, aération, ventilation, humidification de l'air, pad and ven cooling, etc...), d'élever la température nocturne (chauffage) et d'abaisser ou d'élever l'humidité relative.

Enfin l'utilisation de certaines techniques culturales peut favoriser également une meilleure maîtrise de climat.

## 2. Le bilan thermique sous serre polyéthylène

Les échanges d'énergie qui interviennent entre la serre PE et son environnement se font sous différentes formes en outre: chaleur latente, chaleur sensible et rayonnement.

En désignant par les symboles suivants:

- $R_n$  : résultante des échanges par rayonnement au-dessus de la serre,
- $P$  : échanges en chaleur sensible entre la serre et l'extérieur au niveau des parois,
- $F$  : échanges de chaleur sensible et de chaleur latente au niveau des fuites,
- $Le$  : évapotranspiration diurne ou condensation nocturne sous la serre (chaleur latente de vaporisation),
- $S$  : chaleur sensible échangée entre le sol et la surface de la serre,
- $Q_{ch}$  : le terme de chauffage, soit solaire le jour ou artificiel la nuit

et sans se préoccuper du sens des échanges on peut écrire:

$$Q_{ch} + R_n + P + Le + S + F = 0 \quad (8)$$

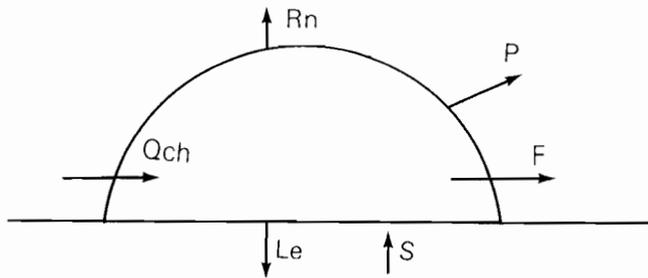


Figure 1

La nuit le terme  $Le$  peut être considéré comme négligeable, tandis que le terme  $S$  est faible également et avoisine une valeur de  $10 \text{ kcal/h.m}^2$  (8).

Donc le chauffage nocturne pour une serre

$$Q_{ch} = R_n + P + F$$

- avec:  $R_n$ : le refroidissement nocturne par rayonnement  
 $P$ : le refroidissement par conduction-convection au niveau des parois  
 $F$ : le refroidissement et l'émission de vapeur au niveau des fuites.

Afin de pouvoir calculer les déperditions et donc aussi le terme de chauffage il faut connaître les données suivantes:

- les dimensions de la serre (hauteur, largeur et longueur) permettant de calculer la surface intérieure ( $S_i$ ), le volume intérieur ( $V_i$ ) et la surface de la couverture ( $S_p$ ). Les serres à 4 cintres par arceau du type Filclair et Fournier présentent pour une surface intérieure de  $512 \text{ m}^2$  un volume intérieur de  $1286 \text{ m}^3$  et une surface de la paroi de  $730 \text{ m}^2$ , alors que les serres à 2 cintres par arceau du type Richel présentent un  $V_i$  de  $1367 \text{ m}^3$  et une  $S_p$  de  $714 \text{ m}^2$ ;
- les données météorologiques de la région, surtout:
  - température maxi et mini moyenne à l'extérieur permettant de calculer la température moyenne de nuit ( $t_n$ )
  - hygrométrie moyenne nocturne
  - la vitesse moyenne du vent: la vitesse du vent à 2 m de hauteur est égale à 0,77 fois la vitesse à 10 m de hauteur mesurée par les services de la météorologie, tandis qu'à une hauteur de 3,5 m on peut utiliser le coefficient 0,85 (5)
 la durée ou mieux la fraction d'insolation: en effet le nombre d'heures claires de nuit est en relation avec le nombre d'heures claires durant la journée et on admet en général le même pourcentage de nébulosité la nuit et le jour
- les données météorologiques sous serre: essentiellement la température et l'humidité de l'air à maintenir sous serre.

Il faut alors admettre que si la température moyenne nocturne à l'extérieur dépasse la température de consigne sous serre, les besoins en chauffage sont nuls. Nous considérons une température de consigne de  $12^\circ\text{C}$  comme minimale pour la tomate et une tempéra-

ture de  $15^\circ\text{C}$  comme minimale pour le piment et le melon.

La température moyenne de nuit est à déterminer par la formule de Hallaire:  $(10) t_n = m + k.A$ , dans laquelle  $m$  représente la température minimale moyenne mensuelle,  $A$  l'amplitude entre les minimas et les maximas moyens mensuels tandis que le facteur  $k$  est estimé en fonction de la durée de la journée. Les valeurs de  $k$  ont été calculées par mois pour la Tunisie à partir des données météorologiques (17).

Les déperditions par rayonnement peuvent s'estimer par la formule suivante:  $3,8 \times (T_a - T_p) \text{ Kcal/h.m}^2$ , dans laquelle  $T_a$  et  $T_p$  représentent respectivement la température apparente d'émission de l'atmosphère et de la paroi de la serre (1).

Par ciel clair  $T_a - T_p = 22^\circ\text{C}$ , alors que par ciel couvert  $T_a - T_p = 7^\circ\text{C}$ . Donc les déperditions par rayonnement sont de l'ordre de  $84 \text{ Kcal/h.m}^2$  par ciel clair et de l'ordre de  $27 \text{ Kcal/h.m}^2$  par ciel couvert (8). Nous voyons donc que les serres à 4 cintres par arceau avec une  $S_p$  légèrement plus importante par rapport à la surface du sol sont normalement plus sensibles aux déperditions par rayonnement, exprimées par rapport à la surface cultivée, puisque

$$RN = \frac{S_p}{S_i} [84 \times i + 27(1 - i)]$$

$$\text{avec } i = \frac{n}{N} = \frac{\text{nombre d'heures d'insolation}}{\text{durée de la journée}}$$

Le coefficient  $i$  a été calculé pour les différentes régions de la Tunisie (17).

D'autre part, on voit également que les régions du Centre et du Sud avec une pluviométrie et une nébulosité plus faible sont beaucoup plus soumises aux déperditions par rayonnement. Le tableau 1 montre les déperditions théoriques par rayonnement pour une serre à 4 arceaux de  $512 \text{ m}^2$  dans différentes régions.

TABLEAU 1

**Déperditions théoriques par rayonnement  
par unité de serre (en Kcal/h)**

| Mois     | Région<br>Tunis<br>Bizerte<br>Siliana | Sousse<br>Kairouan | Gabes<br>Gafsa |
|----------|---------------------------------------|--------------------|----------------|
| Novembre | 44 600                                | 46 800             | 48 850         |
| Décembre | 42 600                                | 44 600             | 46 800         |
| Janvier  | 40 500                                | 42 600             | 44 600         |
| Février  | 42 600                                | 40 500             | 42 600         |
| Mars     | 44 600                                | 42 600             | 44 600         |
| Avril    | 46 800                                | 48 850             | 51 000         |

Les déperditions au niveau des fuites dépendent du type de serre (relation  $V_i/S_i$ ), de la vitesse du vent, de l'étanchéité de la serre et de l'état de la couverture, ainsi que des caractéristiques de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la serre.

Le taux de renouvellement de l'air (a) augmente avec la vitesse du vent (8, 9) :

|                                  |     |     |     |     |      |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| vitesse du vent en m/sec         | 0   | 5   | 10  | 15  | 20   |
| taux de renouvellement par heure | 0,7 | 3,2 | 5,8 | 8,3 | 10,8 |

Pour les calculs on peut utiliser la formule suivante:

$a = 0,6 + (0,22 U + 0,008) U$  (5) avec U la vitesse du vent en m/sec.

La connaissance du taux de renouvellement et du volume de la serre ainsi que la différence en enthalpie entre l'air intérieur et extérieur permet de calculer les déperditions par les fuites (F)

$$F = a.Vi/Si \text{ de } 1,295 \text{ (8)}$$

A titre d'exemple la différence en enthalpie durant une nuit assez ventée entre un air extérieur à 7°C et à 60% HR et un air chauffé à 12°C et 90% HR est de 3,8 Kcal/kg d'air. Cette différence peut être obtenue grâce au diagramme de Mollier. Si on admet un taux d'infiltration moyen de 8 nous obtenons alors 97,5 Kcal/h.m<sup>2</sup> et 107,5 Kcal/h.m<sup>2</sup> pour respectivement une serre à 4 cintres et 2 cintres par arceau.

Dans le tableau n° 2 nous représentons les déperditions d'une serre à 4 cintres pour plusieurs régions en tenant compte des données climatologiques moyennes de ces régions et en respectant une température de consigne de 12°C (cas de la tomate).

**Déperditions moyennes par les fuites pour une serre de 512m<sup>2</sup> (en Kcal/h).**

| Mois     | Région  |        |        |        |         |
|----------|---------|--------|--------|--------|---------|
|          | Bizerte | Tunis  | Sousse | Gabes  | Siliana |
| Novembre | —       | —      | —      | —      | 13 900  |
| Décembre | 3 800   | 10 100 | 13 900 | 20 200 | 30 300  |
| Janvier  | 15 300  | 13 900 | 16 500 | 12 600 | 38 000  |
| Février  | 16 500  | 13 900 | 24 000 | 12 700 | 48 000  |
| Mars     | 6 300   | 13 900 | 13 900 | 11 000 | 35 500  |
| Avril    | 2 500   | —      | —      | —      | 26 600  |

Les déperditions par les fuites augmentent donc dans les régions continentales (températures basses et humidité faible donc enthalpie extérieure faible) par rapport aux zones côtières et également dans les régions côtières plus au Sud par rapport à celles plus au Nord (air plus sec en descendant vers le Sud).

Les déperditions par conduction-convection au niveau des parois dépendent surtout de la vitesse du vent, de la différence en température et du type de serre. Elles s'estiment par la formule  $P = Sp/Si.K.dt$  dans laquelle K représente les déperditions horaires par m<sup>2</sup> de paroi pour 1°C de différence entre les deux côtés des parois. En fonction de la vitesse du vent le facteur K tend rapidement vers la valeur de 5 Kcal/h.m<sup>2</sup>.°C (7).

|                              |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Vitesse du vent en m/sec     | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 10  | 20  |
| K(Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C) | 2,5 | 3,1 | 3,5 | 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,5 | 4,7 |

Pour les besoins des calculs précis Chiappale J.P. et al (5) ont admis l'équation de la forme suivante:

$$K = \frac{5U + 7,9}{U + 3,2}$$

avec U la vitesse du vent m/sec.

Dans le tableau n° 3 nous représentons les déperditions moyennes par conduction-convection par région et ceci pour une température de consigne de 12°C dans une serre à 4 cintres par arceau

**TABLEAU 3: Déperditions moyennes par conduction-convection pour une serre de 512 m<sup>2</sup> (en Kcal/h)**

| Mois     | Région  |        |        |       |         |
|----------|---------|--------|--------|-------|---------|
|          | Bizerte | Tunis  | Sousse | Gabes | Siliana |
| Novembre | —       | —      | —      | —     | —       |
| Décembre | 700     | 3 150  | 700    | 5 000 | 11 100  |
| Janvier  | 5 700   | 5 000  | 4 000  | 5 700 | 13 600  |
| Février  | 5 300   | 44 300 | 6 800  | 5 000 | 14 600  |
| Mars     | —       | 3 200  | 1 400  | —     | 9 200   |
| Avril    | —       | —      | —      | —     | 6 000   |

Les déperditions par conduction-convection sont donc très sujettes à l'exposition de la serre aux vents, ainsi qu'à l'orientation de la serre face aux vents dominants (un pignon face aux vents dominants réduit considérablement les pertes par conduction-convection vu la surface réduite soumise au vent).

Dans le tableau n° 4 nous représentons les besoins totaux en chauffage pour une serre à 4 cintres par arceau cultivée en tomate.

**TABLEAU 4: Déperditions totales d'une serre de 512 m<sup>2</sup> cultivée en tomate (température de consigne de 12°C) exprimées en Kcal./h**

| Mois     | Région  |        |        |        |         |
|----------|---------|--------|--------|--------|---------|
|          | Bizerte | Tunis  | Sousse | Gabes  | Siliana |
| Novembre | 44 600  | 44 600 | 46 800 | 48 850 | 62 750  |
| Décembre | 56 000  | 47 150 | 59 250 | 72 200 | 88 500  |
| Janvier  | 59 600  | 61 000 | 63 150 | 63 000 | 96 600  |
| Février  | 62 000  | 64 600 | 71 500 | 60 400 | 105 600 |
| Mars     | 61 800  | 50 900 | 58 500 | 58 500 | 89 600  |
| Avril    | 46 800  | 49 300 | 48 850 | 51 000 | 83 000  |

Il ressort donc de cette approche théorique que les besoins totaux en chauffage sont pratiquement égaux pour les différentes régions côtières et si les besoins théoriques sont légèrement plus élevés à Sousse et à Gabes, ceci est surtout dû au rayonnement nocturne plus important et à la présence d'une hygrométrie plus faible, ce qui réduit l'enthalpie. Par contre, dans les régions continentales, les besoins sont beaucoup plus élevés et ceci pour une augmentation considérable des

dépense par les fuites (air plus froid et plus sec) et par conduction-convection (dt plus élevé). Notons toutefois que les dépenses par rayonnement ont lieu dans chaque période de l'année et qu'on ne commencera seulement à chauffer que si la température moyenne de nuit descend en dessous de 12°C pour la tomate. Nous voyons que dans ces conditions la période de chauffage pour la tomate se situe de décembre à mars pour les régions côtières, sauf pour Gabes où l'on peut se contenter de chauffer jusqu'à fin février. Par contre à Siliana la période de chauffage s'étend de la fin novembre jusqu'à la fin avril.

### 3. Amélioration du bilan thermique par les matériaux de couverture

Le bilan thermique peut être modifié par le choix du matériau de couverture de la serre. En Tunisie on utilise presque exclusivement le PE., matériel facile à produire et exigeant une ossature légère seulement. Dans la même gamme des films souples on connaît également le PVC (chlorure de polyvinyle), l'EVA (polyéthylène vinylacétate), le PEir (polyéthylène qualité infra-rouge s'opposant davantage au rayonnement) et le PE double paroi.

C'est ainsi que les films en PE basse densité (bd) laissent passer plus la lumière visible rouge et bleue que le PVC, l'EVA et le PEir et moins que le verre; il en est de même dans l'IR proche où le PVC et en moindre lieu l'EVA et le PEir sont moins transparents que le PEbd, le verre étant le moins transparent. La nuit le rayonnement du sol devient très important et nous constatons que la vitre a le meilleur comportement; le PVC a un comportement très favorable également tandis que les films EVA et PEir, ainsi que la double paroi ont un comportement intermédiaire entre le PVC et le PEbd. L'énergie non retenue est de l'ordre de 60% pour le PEbd, de 20% pour le PVC, de 27% pour le PEir, de 30 à 35% pour l'EVA et ceci suivant sa teneur en vinylacétate et de 40% pour le PE double paroi. De ces propriétés physiques très différentes résulteront donc des différences au niveau du climat spontané se créant sous le film. Le choix du film paraît donc d'une très grande importance, surtout dans un climat où une grande partie des dépenses se fait par rayonnement.

Deux années d'expériences à l'I.N.A.T. (16) montrent qu'en matière de températures maximales diurnes on obtient en plein hiver un gain de 1,7°C et 1,5°C en moyenne sous respectivement une serre EVA et PEir par rapport à la serre PEbd.

Au fur et à mesure que le climat s'améliore les écarts de température se réduisent et à partir de la mi-mars la température maximale sous serre EVA devient plus faible que sous serre PEbd, alors que pour le film PEir la même chose se produit à partir de mi-avril. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en fonction de l'amélioration

du climat et de l'ensoleillement les dépenses par rayonnement diurne deviennent de moins en moins importantes par rapport à l'énergie reçue par le soleil en lumière visible et IR court. Les films EVA et PEir sont en effet plus opaques le jour vis-à-vis du spectre solaire, ce qui réduit considérablement la quantité d'énergie reçue, tandis que les dépenses par rayonnement diurne du sol deviennent de plus en plus négligeables. Les différences en températures minimales sont de l'ordre de 0,7°C en moyenne en plein hiver et restent au même niveau durant pratiquement tout le printemps pour le PEir, tandis que pour l'EVA on constate une légère diminution du gain en température minimale et ceci en fonction de l'amélioration du climat pour se situer vers la fin avril à 0,4°C environ. Ceci est tout à fait compréhensible puisque la température nocturne dépend aussi bien de la transparence du film vis-à-vis du rayonnement nocturne que de la température diurne obtenue, surtout au niveau du sol.

En ce qui concerne la température maximale du sol nous constatons la même évolution que pour la température maximale de l'air. En plein hiver la température maximale moyenne du sol est supérieure de 0,7 à 1,0°C sous serre PEir et EVA par rapport à la serre PEbd, mais à partir de début mars la température maximale moyenne du sol sous serre EVA devient inférieure à celle obtenue sous serre PEbd, tandis que vers le début avril nous constatons le même phénomène sous serre PEir. Vers la fin avril la température maximale du sol devient en moyenne inférieure de 1,0 et 0,3°C respectivement dans les serres EVA et PEir.

En plein hiver les températures minimales du sol sont supérieures de 0,7 et 0,8°C en moyenne dans les serres PEir et EVA respectivement. Ces différences s'amenuisent au fur et à mesure et vers la fin avril les moyennes minimales du sol sont supérieures de 0,1°C sous film EVA et de 0,5°C sous film PEir.

Sous film PEbd neuf on mesure environ 70% du rayonnement global extérieur, alors que les films EVA et PEir réduisent davantage la luminosité intérieure. Nous constatons que les serres couvertes avec un film EVA ou PEir permettent d'obtenir des températures de l'air et du sol favorables au développement des cultures, mais qu'il y a une diminution de la luminosité, surtout sous serre PEir.

Les résultats culturaux sur une culture de tomate ont permis de constater une meilleure croissance en longueur de la plante, ainsi qu'une floraison et une nouaison plus précoce sous serre EVA et en moindre lieu sous serre PEir. Les résultats présentés dans le tableau 5 permettent de constater que la récolte précoce et semi-précoce était plus élevée sous serre EVA, tandis que les différences entre la serre PEir et la serre PEbd sont assez faibles. Le rendement total était le plus élevé sous serre EVA, tandis que les différences en rendement total entre les serres PEir et PEbd sont très faibles. Le calibre des fruits était le meilleur sous serre EVA, suivi de la serre PEir et de la serre PEbd.

TABLEAU 5:

**Production de la tomate sous l'influence de différents films.**

| Film de couverture         | Rendement précoce au 1/4 (kg/m <sup>2</sup> ) | Rendement semi-précoce au 15/5 (kg/m <sup>2</sup> ) | Rendement total | Poids moyen en g |
|----------------------------|---|---|-----------------|------------------|
| EVA                        | 2,890   | 8,870   | 11,750          | 75,2             |
| PEir                       | 2,080   | 6,850   | 9,980           | 69,4             |
| PEbd                       | 2,000   | 6,590   | 9,630           | 61,6             |
| PEbd + écran permanent EVA | 1,890   | 6,990   | 10,280          | 72,1             |

La serre couverte par le film EVA permet donc d'obtenir une température de l'air et du sol plus favorable à la plante et malgré une diminution de la luminosité ceci se traduit par une meilleure croissance, une meilleure précocité, un meilleur rendement et un meilleur calibre. Sous serre PEir l'avantage en rendement et en précocité n'est pas du tout sensible et il y a seulement un léger gain en calibre. Les films en EVA et en PEir coûtent respectivement 30 et 8% plus cher que le film PEbd. Un essai avec une serre couverte avec le PE double paroi nous a montré que l'augmentation de la température minimale était de 0,7 à 1,0°C et la diminution de la température maximale de 1 à 2°C en hiver et de 3 à 4°C vers avril-mai, alors qu'il y a également une diminution considérable de la luminosité (55% de transparence sous double paroi contre 70% sous PEbd simple paroi). Il en est résulté une diminution de la récolte précoce (5,570 kg/m<sup>2</sup> contre 5,700 kg/m<sup>2</sup> pour le témoin) sans pour autant modifier le rendement total (12,08 kg/m<sup>2</sup> contre 12,34 kg/m<sup>2</sup> pour le témoin), mais avec une légère amélioration du calibre sous serre double paroi par suite de formation de bouquets moins ramifiés (11).

Une autre manière d'améliorer le bilan thermique consiste en l'utilisation d'écrans thermiques portés par les fils de fer servant au tuteurage des cultures. Plusieurs types d'écrans peuvent être utilisés notamment des films transparents de 100 microns en PEbd, PEir, EVA ou PVC et ceci en utilisation continue. Ces écrans provoquent alors une diminution des températures diurnes avec environ 1 à 2°C et une légère augmentation des températures nocturnes (0,5°C à 1°C suivant le matériel), ainsi qu'une diminution assez considérable de la luminosité (10 à 15%) et une augmentation de l'humidité relative d'environ 10%, ce qui rend les cultures dans ces conditions plus sensibles au mildiou et à la pourriture grise. Une utilisation exclusive nocturne semble à notre avis à conseiller, même pour les écrans thermiques transparents.

Les écrans en PE noir permettent un gain nocturne plus important, mais ils nécessitent une ponctualité certaine de l'agriculteur en ce qui concerne le dépliement et le repliement d'un tel écran. La température minimale obtenue sous serre PEbd avec un écran thermique en PE noir est plus élevée que sous serre EVA ou sous

serre PEir et les gains en température minimale par rapport à la serre témoin (PEbd) peuvent aller jusqu'à 2°C en moyenne.

Le gain en température minimale du sol se situe aux environs de 1°C. (16)

Plusieurs autres films sont utilisables comme écran thermique. (18). En outre:

- les films aluminisés (Peritherm) constitués d'un film PE noir couvert avec un polyester aluminisé. Son effet comme écran thermique est très bien mais son prix est 6 fois plus cher que celui du PE noir,
- les films non tissés perméables (Floratex, Fibertex, Tyvek noir) sont utilisables si bien en ombrage qu'en écran thermique la nuit. Ils ont un très bon comportement envers le rayonnement et réduisent également l'humidité (par rapport aux écrans classiques) grâce à leur perméabilité.
- les films tissés du type acrylique sont également à action double (ombrage et écran thermique), réduisent l'humidité et ont une meilleure résistance technique que les films non tissés perméables.
- les films non tissés aluminisés (Tyvek noir aluminisé).
- les films alvéolés noir ou transparent (Isobulle): ces films sont surtout utilisés pour leurs qualités isolantes surtout pour isoler les pignons et les parois verticales des serres, mais leur utilisation comme écran thermique classique est envisageable.

Le film Peritherm, ainsi que les films en PE noir, peuvent s'utiliser comme écran thermique permanent du côté Nord des serres orientées Est-Ouest sur une largeur de 3,5m tout en laissant à la base 1m de libre pour l'aération. La réduction de la luminosité est très faible et ne dépasse pas 5% tandis qu'un gain de 0,5 à 1°C est possible au niveau de la température minimale. En combinaison avec un écran thermique transparent en EVA un gain de 1 à 1,5°C est possible.

Pour les serres florales la vitre est plus indiquée et plus adaptée que pour les cultures légumières. Dans un but d'économiser de l'énergie on a commencé à utiliser le vitrage double ou le vitrage isolant.

La plupart de ces doubles vitrages (Texotherm, Sedo, Vitrotherm, Hortipane et Gerrix Toptherm) ont une transparence de 82 à 84% et un coefficient de transmission de chaleur de 3,2 à 3,5 W/h/K, alors que l'Hortipane plus n'a qu'une transparence de 75% mais permet une plus grande économie vu son coefficient k de 2,5 W/m<sup>2</sup>/K (12). Vu le poids de la vitre et surtout du vitrage double ou isolant et vu ainsi le prix de ces deux dernières solutions, on essaie de remplacer le verre par plusieurs autres matériaux, plus légers, permettant ainsi l'utilisation d'une ossature plus légère et offrant d'autre part des possibilités d'économie d'énergie.

Parmi ces matériaux on peut citer (18):

- le doublage du verre au moyen d'un film plastique transparent ou d'un film alvéole transparent: la

luminosité diminue d'environ 15 % mais l'économie en énergie atteint 30-35 % suivant la qualité du film utilisé;

- les plaques en polyester stratifié armé de fibre de verre: on les utilise soit en plaques planes, soit en plaques à ondulations petites, ceci afin de diminuer les surfaces d'échange d'énergie. Elles coutent environ le même prix que la vitre pour une longévité de maximum 10 ans.
- les plaques en PVC (maxolux) ont des propriétés physiques inférieures à celui de la vitre et sont plus légères; on préfère les plaques ondulées vu la dilatation thermique assez forte avec les plaques planes.
- les plaques en polymétacrylate de méthyle (Plexi): elles ont des propriétés physiques identiques à la vitre, mais sont assez fragiles en plaques ondulées. L'utilisation en panneau double de 16 mm donne une transmission lumineuse de 89% de celle de la vitre avec un facteur k très favorable (3,4 contre 6,6 W/m<sup>2</sup>/K pour la vitre simple); elle est plus légère que la vitre (5 kg/m<sup>2</sup> contre 7,8 kg/m<sup>2</sup>) et présente un très bon comportement à l'UV, mais reste tout de même 5 à 6 fois plus chère que la vitre ordinaire et même légèrement plus chère que le vitrage double.
- les plaques en polypropylène (Correx) ont une transmission lumineuse de 81 % de celle de la vitre, mais vieillissent assez rapidement sous l'influence du soleil;
- les plaques en polycarbonate (Correxine, Qualex) sont très légères (1,2 kg/m<sup>2</sup> en panneau double de 16 mm avec une transmission de 85% de la luminosité par rapport à la vitre et un facteur K de 3,3. Son prix est 3 fois plus élevé que celui de la vitre, mais les investissements supplémentaires peuvent s'amortir en 3 ans par les gains en énergie obtenus, alors que pour le polymétacrylate l'amortissement des investissements supplémentaires nécessiterait 12 ans.
- les plaques à canaux polyacryliques permettent d'économiser 40 à 45 % d'énergie par rapport aux vitres, mais on accuse une diminution de la luminosité de 15 %, d'où résulte une baisse des rendements de 8 % en moyenne. On l'utilise actuellement en combinaison avec la vitre en couvrant respectivement 2/3 et 1/3 de la surface, permettant de réduire les frais de chauffage de 30-35% et en perdant seulement 5% au niveau de la luminosité, d'où résulte une réduction insignifiante des rendements.
- les vitres spéciales avec un coating de SnO<sup>2</sup> en épaisseur faible (1/1 000 à 1/2 000 mm): ces vitres spéciales ont une transparence plus faible pour l'énergie solaire incidente que la vitre classique. Malgré une réduction d'environ 12 % de la luminosité il résulterait néanmoins une économie d'énergie de 25% pour l'Hortiplus et de 20 — 22% pour l'Agriplus.

#### 4. Amélioration du bilan thermique des serres plastiques par le chauffage

Le maintien d'une température minimale donnée peut se faire moyennant un chauffage. Néanmoins pour le chauffage d'une serre plastique à ossature légère, il est très difficile de le concevoir par eau chaude classique, avec des tuyaux portés par l'ossature. Le système de chauffage par tuyaux à eau chaude ne nous paraît utilisable qu'avec des tuyaux installés à même le sol. Pour maintenir une température de 12°C il faudrait installer ainsi 30 rangées de tuyaux de 50 mm de diamètre ou environ 18 rangées de tuyaux de 80 mm, tout en utilisant une eau dont la température se situe entre 60 et 80°C. Ce système, très coûteux, offre cependant l'avantage de pouvoir utiliser les tuyaux comme rail de transport pour les récoltes. En plus, il faut implicitement des tuyaux mobiles, ceci afin de faciliter les travaux de préparation de la serre. Ce système permettra en outre un chauffage plus facile du sol et un chauffage plus homogène de l'air. Il est également possible de brancher plusieurs serres sur une chaudière centrale, ce qui réduit les frais d'achat par serre. Le transfert de la chaleur se fait presque essentiellement par conduction-convection.

Les transferts énergétiques de chauffage peuvent en effet se faire par conduction, par convection et par rayonnement. Chaque corps possédant une température supérieure ou 0°K émet un rayonnement, mais jusqu'à une température de 80 à 100°C l'émission par rayonnement ne dépasse pas les 20% de l'énergie émise, alors que vers 250 à 300°C l'émission énergétique se fait pour environ 65% sous forme de rayonnement. Cette notion de transfert énergétique par rayonnement est très importante depuis que les travaux de Cormary (6) en France ont démontré que dans le cas de chauffage par conduction-convection on chauffe essentiellement l'air et puis la culture, ce qui se traduit par une température des feuilles sensiblement la même que celle de l'air, alors qu'avec un générateur d'air chaud la température du feuillage se situe environ 1,5°C plus bas que la température de l'air. En cas de chauffage par paillage radiant, la température du feuillage dépasse de 1,2°C la température de l'air. Nous constatons aussi des différences aussi importantes et dans le même sens pour la température du sol avec ces 3 moyens de chauffage. Le rayonnement, même à température relativement basse, est très important pour un corps noir.

Le chauffage *par air pulsé* par générateur d'air chaud se fait au moyen d'un air chauffé à 35-50°C et pulsé à une vitesse ne dépassant pas 5 m/sec. Le plus souvent et dans un but d'homogénéiser la température dans la serre on utilise une gaine de distribution, mais il est alors très important, soit d'espacer plus les trous en début de la gaine, soit de faire des trous plus grands à la fin de la gaine, ceci afin de compenser la baisse de température par une augmentation du débit. Ce système est relativement bon marché à l'achat (700 à 1 000 D pour une série de 512 m<sup>2</sup>) et facile à installer,

mais il est très difficile de chauffer le sol et la base de la plante vu que l'air chaud monte et s'accumule sous le faitage. Le transfert de chaleur se fait exclusivement par conduction-convection. La consommation en gas-oil est très importante et peut atteindre 80 litres par jour et par serre durant le mois le plus froid et atteint environ 22 l/m<sup>2</sup> par saison soit 2,2 l/kg de tomate (320 milligrammes/kg) pour un rendement de 10 kg/m<sup>2</sup> ou 1,8 l/kg ou 270 milligrammes/kg pour un rendement de 12 kg/m<sup>2</sup> ou 1,5 l/kg (213 milligrammes/kg) pour un rendement de 15 kg/m<sup>2</sup>, ceci sans parler de l'amortissement de la chaudière (25 ml/kg) et de la consommation en électricité (25 ml/kg). Notons toutefois que le pourcentage de déchet sera beaucoup plus faible et que la plupart des fruits pourront faire l'objet d'une commercialisation.

Un autre système de chauffage est le *paillage radiant*. Ce système consiste dans l'utilisation d'une gaine noire méplate de 20 à 35 cm de largeur et posée sur le sol entre les cultures. Dans ces gaines on laisse circuler de l'eau tiède à faible débit (1,5 l/sec par serre de 512 m<sup>2</sup>) et dont la température ne dépasse pas les 35°C. La gaine, étant noire, émet une bonne partie de son énergie par rayonnement ce qui contribue à améliorer la température des plantes et donc de leur activité par rapport aux systèmes classiques. Le paillage radiant couvrant 50% du sol, chauffe le sol par conduction et vu la couverture ce transfert est assez important (23%) par rapport à un chauffage classique (6,4%) et un générateur d'air chaud (0%). Une grande partie de l'énergie est utilisée pour le chauffage direct du feuillage par rayonnement (33%). Dans un chauffage classique seulement 13% n'est utilisé pour le chauffage direct du feuillage et pour le générateur 0%. Le chauffage de l'air intervient dans les 3 types de chauffage pour respectivement 26%, 53% et 100% (6).

Les gaines «Sunstock» sont en PVC noir et avaient une épaisseur de 250 microns, mais pour améliorer leur résistance afin de pouvoir garantir une longévité de 3 à 4 ans on les fabrique actuellement en épaisseurs de 400 microns. Pour les gaines de 35 cm de largeur le prix est d'environ 1 D/m départ usine. En tenant compte du fait qu'il faut au moins une couverture de 50% de la surface il faut donc compter sur un investissement de l'ordre de 1,400 D/m<sup>2</sup> pour les gaines, soit environ 700 D/serre, auquel il faut encore ajouter une pompe de circulation de l'eau (70 D/serre) et les raccordements avec la source d'eau tiède.

Le paillage radiant est très facile à combiner avec une pompe à chaleur eau-eau, à condition qu'on dispose d'une source d'eau pas trop froide (15 à 20°C), ce qui permet de produire d'une part de l'eau à 25-30°C et d'autre part de l'eau à 5-10°C. La pompe à chaleur se compose d'un évaporateur, d'un condenseur de fréon et d'un compresseur, mais est très chère à l'achat, cependant son rendement est deux fois plus élevé que celui d'une chaudière classique.

Le paillage radiant peut s'utiliser également sur les rejets thermiques (eaux de refroidissements) des usi-

nes, des centrales thermo-électriques (Sousse) ou des centrales électro-nucléaires. Dans le cas de la centrale thermique de Sousse où on utilise l'eau de mer pour refroidir les turbines on évacue environ 3 m<sup>3</sup>/sec avec un dt de 6°C, ce qui fournit en plein hiver une eau à 20-21°C permettant le chauffage par paillage radiant de presque 150 ha de serres en relevant la température aérienne d'environ 1,5-2°C et la température du feuillage d'environ 3,5°C.

Le paillage radiant peut se brancher également sur les sources géothermiques basse énergie (20-35°C). Dans la région de Gabes et de Kébili plusieurs forages débitent une eau de cette qualité.

Vu le prix élevé des gaines de paillage radiant nous avons essayé de fabriquer en Tunisie des gaines de paillage radiant en PE noir. Ces gaines ont été installées dans la région de Chenchou (El Hamma) et à la Manouba et semblent pouvoir donner entière satisfaction pour une utilisation durant une saison. En gaines de 150 microns de 27 cm de largeur et avec une couverture de 55% du sol leur prix revient est d'environ 160 ml/m<sup>2</sup> alors que pour les gaines Sunstock il faut compter un coût de 350 ml/m<sup>2</sup> en amortissant en 4 ans et 470 ml/m<sup>2</sup> en amortissant en 3 ans.

Pour le chauffage des serres on peut également utiliser *l'énergie solaire*. Plusieurs types de capteurs sont possibles, notamment le capteur parabolique. Ce capteur produit de l'eau à 75-80°C mais nécessite une poursuite continue du soleil, nécessitant une mobilité sur deux axes. Il est très cher à l'achat et assez compliqué à faire fonctionner.

Le capteur plan orienté perpendiculairement à la direction du soleil le 21 décembre à midi coûte moins cher (100 à 140 D/m<sup>2</sup>) et produit de l'eau à 55-60°C. Pour satisfaire les besoins d'une serre il faut néanmoins prévoir 1/4 à 1/5 de la surface de la serre en capteurs, ce qui revient à environ 100 à 125 m<sup>2</sup> de capteur, soit un investissement de 10 000 D/serre au minimum.

L'eau chauffée par ces deux types de capteurs peut être utilisée dans des aérothermes, des tubes à eau chaude, classiques ou en PVC, des gaines de paillage radiant, etc... L'investissement est de toute façon élevé.

Les serres solaires à double paroi soit en polyméthacrylate de méthyle pour les serres tunnels, soit en plaques de polycarbonates pour les serres chapelles sont encore au stade expérimental. On utilise en général l'eau contenant 1 à 2% de chlorure de cuivre, qu'on chauffe dans la paroi double pour la mettre ensuite en stockage pour la nuit. La nuit l'eau chaude circule dans la double paroi et ainsi tient la serre chaude, sachant que la température du feuillage est en équilibre avec la température de la paroi. Le jour on obtient une diminution de la température sous serre, tout en diminuant également la luminosité. Le réservoir de stockage doit être de 50 à 150 litres par m<sup>2</sup> de surface cultivée suivant la température à maintenir (2, 3).

De nouveaux procédés utilisant un vitrage double paroi avec une vitre normale et une vitre KOA très absorbant

dans l'infra-rouge proche. Comme fluide on utilise de l'eau normale et le réservoir de stockage a été réduit à 5 litres par m<sup>2</sup> de surface en utilisant comme source secondaire l'eau de nappe phréatique, source d'eau infinie et à température constante (4).

Certains systèmes de chauffage solaire sous serre utilisent l'air chaud qui est amené par ventilateur vers des conduites souterraines pour y chauffer des pierres ou pour y liquéfier certaines substances comme le chlorure de calcium ou la parafine. La nuit les objets chauffés cèdent leur chaleur au sol, qui va contribuer au chauffage de l'air ambiant.

Le système de chauffage solaire le moins cher consiste à utiliser la gaine de paillage radiant comme capteur le jour et comme distributeur la nuit. Cette gaine étant noire capte facilement l'énergie le jour et la transmet la nuit sous forme de rayonnement. Le système est constitué d'une piscine d'eau, installée soit à l'intérieur soit à l'extérieur de la serre, d'où est pompée l'eau au moyen d'une pompe de 250W pour la faire circuler dans les gaines sous faible débit (1 à 1,5 l/sec par serre de 500m<sup>2</sup>) et ceci moyennant un peigne de distribution taraudé afin d'obtenir un débit homogène dans chaque gaine. A la fin de la serre l'eau chauffée par l'énergie solaire est amenée de nouveau vers la piscine à moyen d'un peigne de collecte large, évitant des surpressions dans les gaines. Pour une serre de 500m<sup>2</sup> il faut disposer d'environ 25m<sup>3</sup> d'eau, ce qui prend environ 1/15 de la surface de la serre si on l'installe à l'intérieur.

Les résultats culturaux obtenus montrent un gain moyen de la température minimale de l'air d'environ 2°C en utilisant 60% de couverture du sol; ce gain peut atteindre 3°C durant les nuits à rayonnement intense. Une réduction considérable (3°C) de la température maximale est obtenue les jours chauds. La température minimale du sol est augmentée de 1°C. Tout ceci se traduit par une meilleure croissance de la tomate en longueur, un diamètre de la tige moins grand, une floraison et une nouaison plus précoces. La récolte est intervenue plus précocement également et au 1<sup>er</sup> avril le rendement était de 930 g/m<sup>2</sup> pour le témoin, tandis que vers le 1<sup>er</sup> mai on avait récolté respectivement 4,970 g/m<sup>2</sup> et 2 480 g/m<sup>2</sup>. Au 15 juin la culture a été arrêtée et le rendement total était de 8 500 g/m<sup>2</sup> pour le témoin contre 11 010 g/m<sup>2</sup> pour la serre chauffée. Nous avons constaté également une augmentation du poids moyen global (15).

Un autre essai avec 40% de couverture seulement comparé à un essai utilisant une couverture de 40% combinée avec un écran thermique transparent en EVA (utilisé uniquement la nuit) a permis de constater une augmentation de la température minimale en moyenne de 0,9°C sans écran et de 2,0°C avec l'écran thermique. Les températures maximales dépendaient de la journée. La température minimale du sol sous serre avec écran thermique a augmenté en moyenne de 2°C au début de la culture, mais les différences diminuent au fur et à mesure que le climat s'améliore pour se

situer à un gain de 0,8°C vers la mi-avril. Dans la serre chauffée sans écran thermique les gains en température minimale du sol étaient respectivement 0,8°C au début et 0,3°C à la fin de la période d'observation. Les températures maximales du sol deviennent rapidement plus faibles dans les serres chauffées, surtout à 5 cm de profondeur.

La croissance d'une culture de piment cv Anaheim a extériorisé une hauteur plus élevée, un nombre de ramifications plus important et une surface foliaire plus grande sous les serres chauffées, les différences étant moins importantes sous la serre sans écran. La production précoce et semi-précoce était la plus élevée sous serre chauffée avec écran présentant respectivement 560/m<sup>2</sup> et 2 550 g/m<sup>2</sup> contre 490 g/m<sup>2</sup> et 2 140 g/m<sup>2</sup> pour la serre sans écran et 320 g/m<sup>2</sup> et 1 830 g/m<sup>2</sup> pour le témoin non chauffé. Le rendement total se situait entre 3 400 et 3 500 g/m<sup>2</sup> pour les 3 serres. Le poids moyen global était légèrement plus élevé sous serre témoin, 26,5 contre 23,5 et 22,5 g pour les serres chauffées.

Nous avons pu constater également que ce système de chauffage est fort intéressant sur une culture faiblement développée, mais présente certaines limites sous serre hivernale avec des cultures plantées précocement en automne et donc bien développées en plein hiver. Nous essayons actuellement pour ce cas de combiner le capteur intérieur avec une surface de captage extérieure, dont la surface doit être de l'ordre de 15-20% de la surface de la serre. Ce capteur extérieur peut être constitué d'une gaine en PE transparent méplate, qui semble contribuer d'une meilleure façon au chauffage de l'eau que la gaine en PE noir. La meilleure gaine de captage serait une gaine combinée avec une surface inférieure noire et une surface supérieure transparente. Les essais avec les gaines de captage extérieur sont en cours à l'I.N.A.T. et à la SAN de Monastir et il est encore trop tôt pour conclure. D'autre part nous essayons également de remplacer la piscine par une tranchée centrale de 1 m de profondeur et 0,5 m de largeur dans le sens de la longueur de la serre, revêtue de PE et couverte par un dallage léger. Ce système présente l'avantage d'éviter les pertes en surface de culture tandis que les pertes d'énergie latérales, qui de toute façon sont faibles vu le faible coefficient K du sol, se transmettent au profit des plantes cultivées de part et d'autre de la tranchée centrale.

Un autre moyen de chauffage des serres est la géothermie, se présentant sous trois formes différentes, notamment :

- basse énergie (20-35°C) : parmi ces ressources on peut classer les puits de surface dans certaines régions et des forages à faible profondeur, comme par ex. à Ghannouch
- moyenne énergie (40-60°C) : comprenant les forages à profondeur moyenne comme par exemple à Chenchou (55°C) et certaines sources thermales comme par exemple Ain Atrous à Korbous (57°C)

- haute énergie (65-80°C) : comprenant les forages à grande profondeur (+ 1 000m) comme le nouveau forage dans la région de Tozeur où l'eau sort à environ 73°C.

L'utilisation de ces ressources géothermiques peut se faire par l'utilisation du paillage radiant pour les ressources basse énergie. Une tentative dans ce genre est prévue pour la campagne prochaine à Ghannouch. Pour les ressources moyenne énergie, il faut plutôt penser à une combinaison de tuyaux à eau chaude (PVC ou PEhd) pour l'aller avec éventuellement un retour sous forme de paillage radiant si la température est descendue à un niveau acceptable. Une tentative dans ce genre est programmée pour la campagne 1982-1983 dans le périmètre de Chenchou. Pour les ressources haute énergie il faut prévoir un chauffage par tuyaux à eau chaude au moins dans deux serres successives, tout en adaptant la surface d'échange dans la deuxième serre à la température d'entrée (nombre de tuyaux supérieur, tuyaux de dimensions inférieures). Après sortie de la 2<sup>e</sup> serre, un chauffage mixte tuyaux-paillage radiant est possible dans une 3<sup>e</sup> et on peut prévoir éventuellement un paillage radiant dans une 4<sup>e</sup> serre.

Parmi les systèmes basse énergie on peut signaler également la possibilité d'utiliser chez un agriculteur, disposant de deux puits, l'eau d'un puits pour rafraîchir une serre au printemps, en automne et éventuellement en été, et de stocker l'eau chauffée dans la masse du 2<sup>e</sup> puits (chaud). Pendant la période froide on utilisera le circuit inverse et on chauffera la serre par refroidissement de l'eau du puits chaud en versant l'eau refroidie dans le 1<sup>er</sup> puits (froid). Des résultats préliminaires dans ce sens sont encourageants (14).

## 5. Amélioration du bilan thermique par les techniques culturales

L'exploitation de l'opacité d'un film d'eau vis-à-vis du rayonnement IR long permet de diminuer les déperditions nocturnes sous serre PE. Un léger bassinage l'après-midi sur les sentiers dans la serre permet d'augmenter l'humidité de l'air par la vaporisation de l'eau. Au coucher du soleil cette humidité supplémentaire favorisera la formation d'une buée plus promptement et c'est cette buée qui va s'opposer aux transferts énergétiques par rayonnement de la paroi. Comme la buée peut gêner la croissance en favorisant l'apparition de maladies cryptogamiques, certains producteurs de PE ont mis au point des films antibuée, auxquels on ajoute un mouillant (Sunclear), évitant la formation de gouttelettes et favorisant la formation d'une mince pellicule d'eau, glissant le long des parois.

L'élevage des plantes en pots de grande dimension permettant de planter une serre avec des plants plus développés, à activité respiratoire plus forte, permet également de produire plus facilement une buée nocturne sous serre et rend donc la culture moins sensible

aux inversions par rayonnement. Le meilleur moyen pour y arriver serait le chauffage de la pépinière à l'aide d'un chauffage électrique du sol ou d'un chauffage à air pulsé en élevant les plantes en mottes de 14 cm ou en pots perforés de la même dimension, permettant ainsi de maintenir au maximum 40 plantes par m<sup>2</sup> et de planter sans dépotage (et sans perturber les plantes) au stade 1<sup>o</sup> bouquet noué et 2<sup>o</sup> bouquet épanoui, sachant qu'à ce moment les 3<sup>o</sup>, 4<sup>o</sup> et 5<sup>o</sup> bouquets sont déjà induits. Ceci permettra donc d'obtenir 5 bouquets convenables non bifurqués, avec des fleurs de bonne qualité, mieux disposées à nouer convenablement ou répondant plus favorablement à un traitement hormonal ou à la vibration.

## 6. Amélioration du bilan thermique par réduction de la température

Le réduction de la température sous serre en période chaude peut se faire de plusieurs façons, notamment par accroissement des déperditions calorifiques (aération, ventilation), par refroidissement de l'air et par réduction des apports calorifiques.

Sous serre plastique l'accroissement des déperditions calorifiques se fait essentiellement par aération. Cette aération se réalise par l'ouverture complète des portes ou des pignons et latéralement par écartement des laizes plastiques. Si cette méthode d'aération est suffisante en hiver, il est tout de même difficile pour l'agriculteur d'adapter l'aération aux variations du climat durant la journée, tandis qu'au printemps et en automne cette méthode est tout à fait insuffisante. Plusieurs solutions sont possibles pour améliorer l'aération en période chaude :

- la mécanisation de l'ouverture latérale par fixation du bout des laizes sur un câble mû par un treuil. Ceci rend plus facile l'adaptation instantanée de l'aération aux changements brusques du climat.
- la présence d'ouvrants latéraux reliés à un câble et mû par treuil. Cette aération latérale semble de toute façon, et ceci malgré sa mécanisation, insuffisante durant les jours chauds du printemps et de l'automne et c'est pour cette raison que plusieurs autres solutions ont été envisagées :
  - le positionnement des ouvrants dans le faîtage de la serre, facilitant ainsi l'évacuation de l'air chaud accumulé en haut de la serre;
  - l'écartement latéral des laizes paires combiné avec l'écartement dans le faîtage des laizes impaires par l'installation de 3 treuils, contribuera à dynamiser davantage l'aération statique;
  - l'utilisation d'un PE annuel de 120 microns, ce qui permet de couvrir en automne au moment où le climat se refroidit et d'aérer au printemps en trouant de plus en plus le PE en fonction de l'amélioration du climat. Ceci n'est possible que dans la mesure où le prix du PE normal est sensiblement inférieur à celui du PE longue durée.

- la couverture de la serre dans le sens de la longueur par 2 films, écartés dans le faitage de 30 cm. Durant la période froide on glisse en dessous de ces 2 films un film de PE normal de 1 m de largeur, qu'on enlève dès l'amélioration du temps. L'aération se fait en soulevant à certains endroits le PE du sol et en le maintenant par un bâton. L'air frais entre au niveau du sol, aère la base des plantes et chasse l'air chaud à travers la fente centrale dans le faitage. Des serres de ce genre fonctionnent déjà dans la région d'Angers (France) et de Hertford (Angleterre).

Dans le cas où on veut fixer définitivement le film dans le sol, on peut prévoir une bande soudée de 1 m de largeur environ, permettant de recouvrir les trous d'aération pratiqués dans le premier film.

A Corquefou en France on expérimente actuellement une serre où les 2 films se touchent dans le faitage, mais leur écartement est possible par treuil.

- la dernière nouveauté dans ce domaine consiste en une serre à toit découvrable jusqu'à la hauteur de 2 m. Cette serre du type Fournier est très chère et revient à environ 6D/m<sup>2</sup>, soit plus de 2 fois le prix des serres actuelles.
- l'utilisation d'une laize de 2 m de large en PE annuel amovible entre deux laizes de 6,5 m de large en PE longue durée permet également d'entrevoir des améliorations dans l'aération des serres.

Sous serre vitrée ou couverte en plaques remplaçant la vitre, l'aération se fait normalement par des volets d'aération soit par voie mécanique, soit par voie automatique. Dans ce dernier cas la commande se fait par thermostat, mais il y a une protection automatique contre les vents trop violents.

L'accélération des déperditions calorifiques peut se faire par ventilation (extraction de l'air chaud). Pour pouvoir maintenir sous serre la température ambiante extérieure il faut prévoir 50 à 60 renouvellements de l'air par heure, ce qui limite la longueur de l'axe à ventiler à environ 60 mètres. Pour une serre de 500 m<sup>2</sup> il faut prévoir un débit horaire de 72 000 m<sup>3</sup>, ce qui demande au moins deux gros ventilateurs de 1 m de diamètre, tournant à environ 500 tours par minute. La commande de ces ventilateurs se fait par thermostat. Les résultats obtenus à Avignon (13) montrent tout de même la faible efficacité de ce système et on ne conseille pas d'installer un système de ventilation permettant plus de 10 renouvellements par heure.

Le refroidissement des serres peut se faire par le «pad and ven cooling» consistant à faire passer à travers un matelas poreux maintenu homogènement humide et dont l'efficacité se rapproche de celui du thermomètre

mouillé, un air sec et chaud afin d'augmenter son humidité et de baisser sa température, en se chargeant à travers le panneau humide d'une certaine quantité de vapeur d'eau. Plus on veut refroidir l'air, et plus épais doit être le matelas, afin de permettre à l'air de se charger davantage en vapeur d'eau. En serre étanche on utilisera la dépression (environ 3 mm de colonne d'eau) en utilisant des ventilateurs extracteurs; dans ces conditions l'air pénètre par les fuites (= le matelas humide) pour remplacer l'air extrait. En serre étanche on optera pour le système par surpression: l'air extérieur sera chassé par le ventilateur à travers un matelas humide, pénétrera dans la serre et sortira de nouveau par les fuites. Ce dernier système s'appliquera par exemple pour les serres gonflables, sans ossature portante. Pour obtenir un fonctionnement adéquat il faut prévoir environ 60 renouvellements par heure du volume total de la serre, ce qui limite la distance entre le ventilateur et le matelas d'environ 60 m dans un système fonctionnant par dépression. Avec un système pareil on peut obtenir une baisse de la température d'environ 12 °C par rapport à l'air extérieur, à condition que l'air extérieur soit très chaud et très sec (35-40 °C et 20-30% HR). Le fonctionnement des ventilateurs et des humidificateurs est réglé par thermostat.

Un système plus simple pour le refroidissement est l'utilisation de l'eau courante sur le toit d'une serre vitrée. L'eau se vaporise et la chaleur de vaporisation va être soutirée à la serre par le biais du contact avec la vitre. Ce système peut donner une diminution de la température de l'air d'environ 3-4 °C.

La réduction de l'énergie incidente peut également contribuer à la diminution de la température sous serre. Parmi les moyens d'ombrage utilisables on peut citer les enduits (lait de chaux ou blanc d'Espagne) apportés soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de la paroi, ainsi que les écrans d'ombrage (jute, PE coloré, claies d'ombrage rudimentaires ou sophistiquées — bois ou plastique — toiles en nylon ou en matières plastiques) mus soit manuellement, soit mécaniquement, soit automatiquement par thermostat. Plusieurs écrans thermiques sont utilisables comme toile d'ombrage.

Pour les serres vitrées on utilisait dans le temps le verre martelé, dissipant mieux les rayons que le vitrage ordinaire. Les dernières années on s'oriente surtout vers l'utilisation de vitrages spéciaux, qui sont de deux types différents:

- vitrage à transmission variable consistant dans un polymère synthétique pris en sandwich entre deux feuilles de verre. Ce polymère a la caractéristique de virer de la transparence vers l'opalescence suivant la température et ceci selon un processus réversible. La température de virage se situe entre 35 ° et 90 °C suivant le matériel utilisé et suivant les additifs.
- vitrage à transmission non variable parmi lequel on peut classer le vitrage diffusant (ou vitrage strié), le vitrage réfléchissant (Hortiplus) et le vitrage absorbant coloré dans la masse.

## 7. Conclusion

Nous constatons donc qu'un nombre très important de possibilités existent pour mieux maîtriser le climat sous serre, mais que le choix est parfois difficile, nécessitant plusieurs années d'observations du comportement des cultures.

En matière d'amélioration du bilan thermique nocturne, problème très important pour les cultures de primeurs destinées à l'exportation, il s'agit surtout d'un problème énergétique, afin de produire plus et mieux, avec un coût de production acceptable. Notons également que la génétique peut apporter une aide appréciable et que

par exemple des variétés parthénocarpiques, exploitant le gène *pat 2*, ne nécessiteront plus 12°C comme température minimale, mais 8-9°C seulement, et soulageront ainsi considérablement le prix de revient de la production. Il va de soi que la création de variétés de tomates nouant à des températures plus basses, ouvre les mêmes perspectives, ainsi que l'obtention de variétés à maturation ralentie à partir de certains mutants de maturation (les gènes *rin* et *nor*).

Le chemin pour aboutir à cet objectif est long et difficile, mais moyennant un renforcement, une meilleure structuration et coordination de la recherche et de l'expérimentation en Tunisie, nous pensons que les cultures sous abris offrent de bonnes perspectives.

## Bibliographie

1. Chiappale J.P., Mozeno A. et Damagnez J. (1974) Influence du climat extérieur sur le microclimat des serres au niveau de la surface d'échange — *Acta Horticulturae* 42 — p.
2. Chiappale J.P., Damagnez J. et Denis P. (1977) — Modification of a greenhouse environment through the use of a collecting fluid — *International Symposium on controlled environment agriculture* — p. 122-138.
3. Chiappale J.P. (1978) Une année de mesures sur le nouveau procédé de « serre solaire » résultats physiques et agronomiques — *Acta Horticulturae* 76 — p. 219-228.
4. Chiappale J.P. (1981) La serre solaire INRA-CEA: résultats physiques — *Acta Horticulturae* 115 — Vol. 2 — p. 387-400.
5. Chiappale J.P., Kittas C. et De Villèle O. (1981) Estimation régionale des besoins de chauffage des serres — *Acta Horticulturae* 115 — Vol. 2, — p. 493-502.
6. Cormary Y. (1981) How to calculate greenhouse heat losses according to the plant comfort and the type of greenhouse heat exchanger — *Acta Horticulturae* 115 — Vol. 2 — p. 637-647.
7. Gac A. (1967) — Construction des serres. Etude de leurs caractéristiques physiques — B.T.I. Minist. Agric. n° 217
8. Gac A., (1974) — Echanges thermiques dans les serres et abris. C.R. Réunion Comité des plastiques en agriculture.
9. Gudehus H.C. (1978) Determination of air exchange figures with regard to closed greenhouses — *Acta Horticulturae* 76 — p. 301-304.
10. Hallaire M. (1950) : Les températures moyennes nocturnes, diurnes et nycthémerales exprimées en fonction du minimum et du maximum journaliers de température — *CR Acad. Sc* 1950 — 231 — p. 1533-1535.
11. Mougou A. et Verlodt H. (1978) — Influence de différents types d'abris sur le bioclimat — *Med. fac. Landbouw Rijksuniv. Gent*, 43, 1471-1480.
12. Tantau H.J., (1975) Der Einfluss von Einfach- und Doppelbedachungen auf das Klima und den Wärmehaushalt von Gewächshäusern — *Gartenbautechnische Informationen Heft 4* — Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft TU Hannover — Taspo Verlag Braunschweig.
13. Van Bavel C.H.M., Sadler E.J., Damagnez J. (1981) — Cooling greenhouses crops in a mediterranean summer climate — *Acta Horticulturae* 115 — Vol. 2 — p. 527-536.
14. Verlodt H. et Mougou A. (1981) — Premiers résultats de l'utilisation géothermique de la gaine de paillage radiant sur une culture de melon.
15. Verlodt H., Nasraoui B. et Mougou A. (1981) — Agronomical results of solar energy recovery and heating by the Sunstock system on an early tomato crop under plastic polyethylene greenhouse — *Acta Horticulturae* 115 — Vol. 2 — p. 565-574.
16. Verlodt H., Driss Z. et Knani H., en préparation Influence sur le climat diurne et nocturne et sur le comportement agronomique de différentes couvertures de serre et d'un écran thermique.
17. Verlodt H. (1981) Manuel de travaux dirigés en Cultures Maraîchères de la 3<sup>e</sup> année Agronomie — Chapitre VI — 8 pages.
18. Von Zabeltitz Chr. (1982) — Energieeinsparung und alternative Energiequellen im Gartenbau — *Ulmer Verslag Stuttgart* p. 15-29.