

Utilisation de l'Énergie Géothermique pour le Chauffage des Serres Agricoles au Sud Algérien

B. Bouchekima et Y. Babi

Institut de Chimie Industrielle, Centre Universitaire de Ouargla, 30000 Algérie

Résumé - L'énergie géothermique a été utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour chauffer les serres agricoles.

En Algérie, les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation humaine et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres agricoles qu'à partir des années soixante dix et c'était une contribution assez modeste de l'énergie géothermale dans le développement du secteur agricole, bien que les domaines d'application directe de cette énergie sont vastes.

Le secteur agro-alimentaire est celui où les applications directes de l'énergie géothermique sont les plus développées ; plus important encore, c'est celui qui offre le plus de perspectives. Le chauffage des serres agricoles constitue l'usage le plus répandu de l'énergie géothermique en agriculture. Il existe toute une gamme de techniques de chauffage pour fluides de basse température qui peuvent s'adapter aux besoins des différentes espèces de plantes, aux conditions climatiques, aux types de serres ainsi qu'aux caractéristiques de la saumure géothermale.

Notre travail de recherche dans ce domaine, entamé depuis quelques années, concerne l'exploitation d'un aquifère géothermique situé dans la banlieue de Ouargla où l'eau, ressource basse énergie et située à une profondeur moyenne de 2000 m, atteint une température de 60 - 65 °C.

L'objectif de ce travail est l'amélioration de la production des cultures sous serres, qui constituent un domaine d'application important dans la mesure où les besoins en énergie sont assez élevés. Le réseau thermique est, soit enterré, soit aérien ; mais la meilleure solution paraît reposer sur une combinaison chauffage du sol et irrigation en même temps.

Les résultats obtenus sont fort encourageants : une nette amélioration de la production a été enregistrée, comparativement aux serres non chauffées. Néanmoins, l'impact sur l'environnement doit être analysé tout au long des diverses phases d'évolution d'une opération : lors de la réalisation du forage, étude de la salinité de l'eau, suivi pendant toute la durée de l'exploitation.

Mots clés: Serre - Basse énergie - Energie géothermique - Eau thermique - Chauffage des plantes.

1. INTRODUCTION

La géothermie est une source d'énergie qualifiée de nouvelle, douce et renouvelable ; elle a été utilisée dans plusieurs pays dans le domaine de l'agriculture pour chauffer les serres agricoles. En Algérie, les puits d'eau chaude qui étaient destinés depuis plusieurs décennies pour la consommation humaine et pour l'irrigation, ne furent exploités pour le chauffage des serres agricoles qu'à partir des années 70 et c'était une contribution assez modeste de l'énergie géothermale dans le développement du secteur agricole. Le chauffage des serres a commencé d'être appliqué au début de 1950 en Hollande, en Belgique et notamment dans les cultures ornementales ; les pays comme l'Italie, la France et l'Espagne ont considéré jusqu'à lors que les conditions favorables d'ensoleillement et de température ne justifiaient pas tel outil de production.

Dans les années 1960, le coût de la thermie était tel que dans les installations réalisées, on cherchait à réduire le coût d'investissement sans se soucier du coût de fonctionnement auxquels conduisait le système de chauffage et de climatisation.

Toutefois, des améliorations immédiates et faciles à réaliser de l'équipement des serres ont été rationalisés, comme le réglage des brûleurs des chaudières, l'amélioration de l'étanchéité et l'isolation des tuyaux d'amenée. Ces actions se sont vite révélées insuffisantes et leur effet était vite résorbé par l'augmentation successive du prix de l'énergie conventionnelle. Il était nécessaire de considérer le problème sous plusieurs angles : amélioration des techniques de chauffage et d'isolation thermique en tenant compte d'un microclimat lumineux et thermiquement favorable au bon développement des cultures, utiliser d'autres sources que l'énergie fossile et faire en sorte que la serre joue réellement un rôle de captation et de stockage de l'énergie solaire, adaptation des techniques culturales au nouveau système, à partir d'une approche rationnelle des problèmes posés, développement et création des variétés adaptées aux particularités de ce microclimat (lumière, hygrométrie). Un important effort de recherche fondamentale et appliquée était donc nécessaire sur les plans surtout thermique et micro climatique et comme sur les plans biologique et agronomique, des analyses de type économique devaient en être tirées de manière à déterminer les solutions et les techniques les plus rationnelles pour le maraîcher ou l'agriculteur au niveau de la rentabilité et de l'exploitation. Estimer l'impact de ce choix technique au niveau de l'économie nationale.

2. PROCÉDES DE CHAUFFAGE GEOTHERMIQUE

Plusieurs types d'échangeurs internes ont été expérimentés, on sous-entend le paillage radiant, le polyéthylène haute densité et l'agrotherm PP25. On préconise l'utilisation des tubes en polypropylène de 25 mm de diamètre car ils présentent les avantages techniques et économiques suivants : augmentation considérable de la surface d'échange, épaisseur réduite favorisant les échanges entre l'eau et la milieu ambiant, les anneaux provoquent une turbulence à l'intérieur du tube augmentant ainsi le brassage de l'eau et la dispersion des calories, diminution de la formation des bulles d'air dans le circuit de chauffage, bonne répartition des débits dans les tubes de chauffage. La disposition des tuyaux de chauffage dans la serre assure la répartition de l'énergie, en tenant compte des ouvertures et des portes d'aération. La disposition qui se trouve actuellement dans la serre étudiée est en boucle simple (aller/retour) ; cette façon est très économique mais présente une distribution non homogène de la chaleur et la température de l'eau chaude diminue avec la distance parcourue.

3. BESOIN EN ENERGIE D'UNE SERRE

La demande en chaleur nécessaire pour maintenir une température désirée de l'air intérieur, provenant de l'eau géothermale doit être égale à la quantité de chaleur perdue. Le besoin de chaleur peut aussi être exprimé, en se rapportant à la surface du sol couvert :

$$Q = k' A_s (T_{ai} - T_{ae}) \quad (1)$$

Expression où : k' est le coefficient de déperdition de chaleur calculé expérimentalement et exprimé en W/m^2 de surface couverte. A_s est la surface du sol couvert. T_{ai} est la température de l'air intérieur de la serre et peut être considérée comme température de consigne et est exigée par la végétation, pour lui assurer un développement favorable.

4. DIMENSIONNEMENT DE L'ECHANGEUR

Le dimensionnement de l'échangeur se résume au calcul de la surface d'échange, ce qui revient au calcul de la longueur de l'agrotherm nécessaire pour chaque serre. Ceci dépend essentiellement du besoin en énergie et à la température d'entrée et de sortie de l'eau dans les tuyaux de chauffage. Par exemple, si $T_{ai} = 14^\circ C$, la surface de la serre couverte par le polyéthylène $A_s = 404 m^2$, $k' = 10,5 cal/h/m^2C$, nous pouvons calculer le besoin énergétique comme suit : $Q = 10,5 \times 404 (14 - 2) = 59,105 W$

Exemple de calcul de la longueur de l'agrotherm et du nombre de noeuds : Comme la quantité de chaleur perdue à travers la surface de l'agrotherm vers l'air intérieur de la serre, due aux différents modes de transferts, doit être égale à la chaleur apportée par le débit d'eau géothermale entre son entrée et sa sortie, alors on écrit l'équation suivante :

$$Q_d = Q_g \quad (2)$$

Expression où : Q_d est la puissance amenée par l'eau chaude et Q_g est la puissance dissipée à travers le tuyau chauffant.

$$Q_g = K_{ch} \cdot A_{ch} \cdot T_{ML} \quad (3)$$

$$Q_d = m \cdot C (T_{ee} - T_{se}) \quad (4)$$

Avec : K_{ch} : coefficient de transfert à travers l'échangeur (tuyau de chauffage) ($kcal/h/m^2C$), A_{ch} : surface du tuyau (m^2), T_{ML} : moyenne logarithmique de la température ($^\circ C$), T_{ee} et T_{se} sont respectivement la température d'entrée et de sortie de l'eau chaude dans la serre, m est le débit massique de l'eau de chauffage.

$$T_{ML} = (T_{ee} - T_{se}) / [\ln(T_{ee} - T_{ai}) / (T_{es} - T_{ai})] \quad (5)$$

$$A_{ch} = 0,0785 \times L \quad (6)$$

On peut aussi remplacer T_{ML} par ΔT où $\Delta T = T_m - T_{ai}$ alors l'équation (3) devient :

$$Q_g = K_{ch} \cdot A_{ch} \cdot \Delta T \quad (8)$$

avec $T_m = (T_{se} + T_{ee})/2$ (9)

Le coefficient K_{ch} dépend de la nature de l'échangeur ainsi que de la température de l'eau qui y circule. En vertu des équations précédentes, l'expression donnant la longueur de l'agrotherm s'écrit :

$$L = V \cdot \rho \cdot C_p (T_{ec} - T_{se}) / 0,0785 \cdot K_{ch} (T_m - T_{ai})$$
 (10)

Exemple : Prenons $T_m = (65 + 25)/2 = 46^\circ C$. Comme le tuyau de chauffage est un agrotherm en polypropylène de type PP 25, alors on prend $K_{ch} = 13,5 \text{ kcal/h/}^\circ C$, pour la gamme de température de l'entrée de l'eau 65 - 67,5 °C, la longueur L sera égale : $L = 50904 / [0,0785 \times 13,5(46 - 14)]$, soit $L = 1501 \text{ m}$.

Le nombre de noeuds N est fonction de la longueur de la serre et de l'arrangement des plantes qui est limité par la surface et les conditions agroclimatiques. On écrit alors :

$$N = A_{ch} / 0,0785 \cdot L \quad \text{avec } L : \text{longueur de la boucle}$$
 (11)

Calcul du débit d'eau de chauffage dans une serre : Il est important de rappeler que la température de sortie de l'échangeur doit être la plus basse possible, généralement elle est prise entre 25 et 27 °C (valeurs testées expérimentalement). Une basse température présente deux avantages considérables : extraction du maximum de chaleur de l'eau géothermale et optimisation de l'utilisation des ressources géothermales pour le chauffage des serres.

$$V = m / \rho = k' \cdot A_s (T_{ai} - T_{ae}) / \rho \cdot C_p (T_{ee} - T_{se}) \quad (\text{en } m^3 / h)$$
 (12)

Cette expression est déduite des équations précédentes où : V est le débit volumique d'eau dans une serre exprimé en (L/s/serre) ou bien (l/s/h), ρ est la masse volumique de l'eau.

Pour une température d'entrée de l'eau égale à 65° C, le débit d'eau nécessaire pour chauffer la serre est :

$$V = 59105 / [1000 \cdot 4180(65 - 27)] = 3,710^{-4} \text{ m}^3 / s \text{ soit } V = 0,37 \text{ L/s}$$

La surface maximale du sol susceptible d'être chauffée par le puits géothermal dépend du débit maximal de l'eau en tête de puits ; elle peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$S_{max} = V_{max} / V'$$
 (13)

Expression où : S_{max} (m^2) est la surface maximale pouvant être chauffée par un débit V_{max} , qui est le débit volumique du puits non vanné (L/s). V' étant le débit nécessaire pour chauffer une serre (L/sm^2).

5. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est une serre monotunnel protégée du vent et entourée par d'autres serres monotunnel se trouvant à la station expérimentale ITDAS de Hassi Ben Abdellah près de Ouargla (Fig 1). La station se trouve entourée par une palmeraie dont l'eau d'irrigation provient d'un puits albien artésien se trouvant à une distance de 1,5 km de la serre expérimentale ; la température et le débit en tête de puits sont respectivement environ 65 °C et 200 L/s. C'est une serre monotunnel dont les caractéristiques sont les suivantes : Surface couverte : (45,7 x 8,7) m^2 , orientée vers le Sud-Est, Surface latérale de la paroi : (45,7 x 10) $m^2 = 457 \text{ m}^2$, Hauteur maximale moyenne = 3,30 m, Surface des portes : 2 x (2,5 x 3) = 15 m^2 , Coefficient de forme $S_s / S_c = 0,85$, Surface du sol couvert (47,5 x 8,5) = 403,75 m^2 , Volume de la serre = 1093 m^3 .

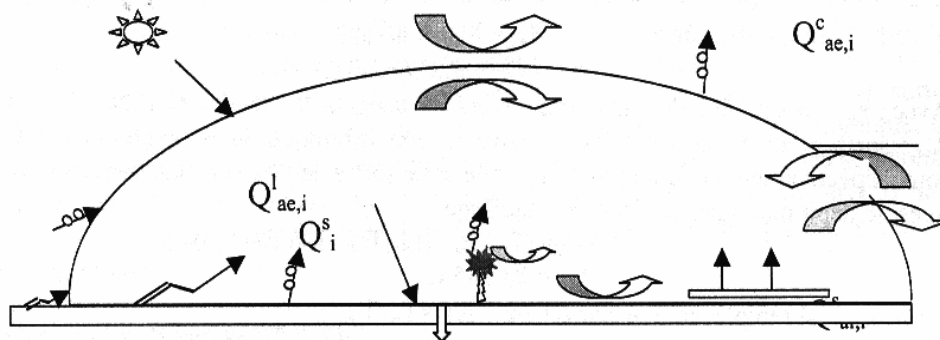


Fig. 1: Schéma d'une serre agricole

6. CHAUFFAGE DE LA SERRE ET MESURES EFFECTUEES

Le système de chauffage est constitué par une vanne thermostatée et un tube très long en plastique façonné en anneaux de type agrotherm qui permet de maintenir la température du sol à une température d'environ 18 °C. L'agrotherm est placé en boucle simple (allée/retour). L'agrotherm utilisé présente les caractéristiques suivantes: PP25 : polypropylène de diamètre 25 mm, le coefficient de déperdition de chaleur $K_{ch} = 13,5 \text{ kcal/h/m}^2/\text{°C}$ posé sur le sol, la pression normale d'utilisation est de 0,5 à 1,5 bars, la pression maximale admissible sous une température de 67 à 70 °C est de 2 à 2,5 bars, la pression d'éclatement est de 6 à 7 bars, la surface externe d'un mètre linéaire du tube est de 0,0785 m². La régulation automatique de la température dans la serre se fait par vanne thermostatée dotée d'une sonde et d'un régulateur de température fixant une température de consigne entre 10 et 40 °C. La puissance installée de chauffage est de 0,59 kW.

La température est mesurée à différents niveaux : air intérieur, air extérieur, paroi, sol intérieur, sol extérieur à différentes profondeurs. Les températures de l'air intérieur et extérieur sont mesurées à l'aide des thermographes. La température du sol est mesurée à l'aide d'un thermomètre approprié enfoncé à 20 cm en profondeur.

L'humidité relative de l'air à l'extérieur et à l'intérieur de la serre est mesurée en continu à l'aide de deux hygromètres à cheveux. On obtient ainsi une courbe représentative des variations de l'humidité relative en fonction du temps (Fig. 2, 3).

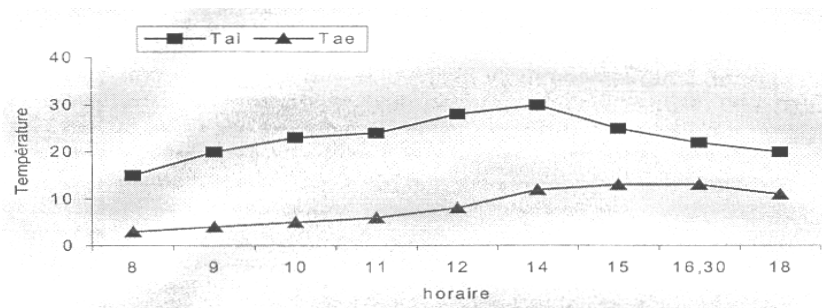


Fig. 2: Température de l'air intérieur et extérieur

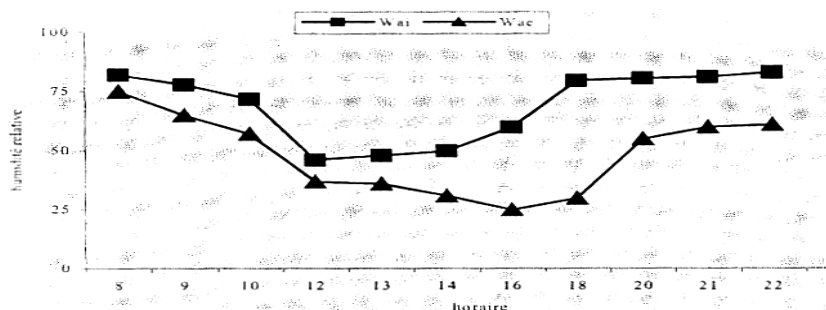


Fig. 3: Humidité relative de l'air intérieur et extérieur

7. RESULTATS EXPERIMENTAUX

7.1 Comportement de la serre chauffée

Du fait que l'agrotherm est posé sur le sol, la température de celui-ci pendant la journée dans la période de chauffage s'élève nettement par rapport à celle du sol extérieur. Cette augmentation favorise la germination ainsi que le développement de la plante. Le transfert thermique par conduction et convection à travers la paroi du corps chauffant a fait que la température de l'air intérieur de la serre augmente considérablement par rapport à celle de l'air extérieur, bien entendu l'excès de celle-ci est à éviter car le phénomène photosynthétique de la plante sera arrêté. Il faut donc que la température de l'air de la serre chauffée réponde aux exigences de la plante.

On remarque que l'humidité de l'air intérieur de la serre chauffée est assez élevée tout en ne dépassant pas 75 % pendant le jour, ceci est dû à l'aération statique en ouvrant les portes se trouvant aux extrémités de la serre. Il faut aussi noter que cette valeur est acceptable par la végétation et qu'un excès de l'humidité provoque un développement des maladies qui attaquent la plante à tout moment.

La température de l'air intérieur pendant le jour ne pose pratiquement pas de problème puisque le chauffage est dû à l'énergie solaire. L'apport de chaleur par énergie géothermale s'avère très visible pendant la nuit. On

remarque aussi qu'à partir de quelques heures du lever de soleil, les températures de l'air de la serre chauffée et témoin tendent à s'équilibrer. On rappelle que la nécessité de chauffage pendant cette durée n'étant pas indispensable. La figure 4 montre l'écart de température entre les deux serres.

La meilleure valeur de l'humidité, pour obtenir une bonne activité de la plante et un bon fonctionnement du transport des éléments nutritifs, est de l'ordre de 80 % à une température de 25 °C. La serre chauffée de sa part, n'assure pas cette valeur, mais, l'améliore jusqu'à 60 % (Fig. 5).

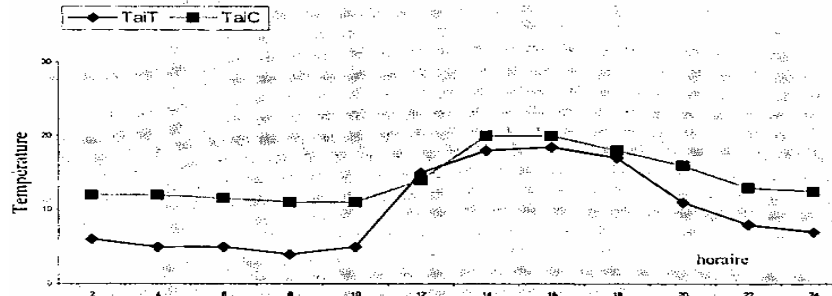


Fig. 4: Température de l'air intérieur des serres chauffée et témoin

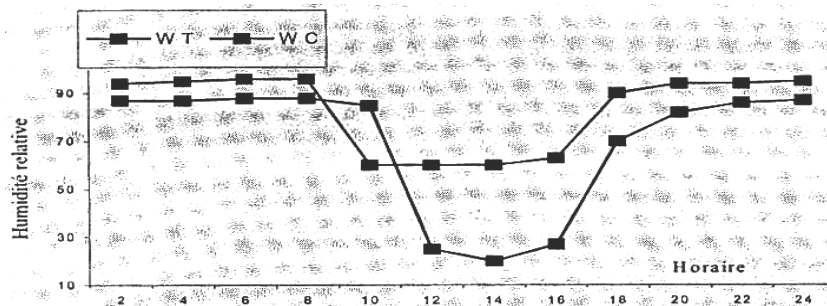


Fig. 5: Humidité relative : serre chauffée et serre témoin

7.2 Production agricole

Un suivi de la production de ces deux serres pendant quatre mois a permis de mettre en évidence l'apport de chauffage pendant la période la plus froide de l'année, la figure 6 nous montre une comparaison productive cumulative entre les deux serres. Ainsi, on montre que le calibre du fruit est beaucoup plus important pour la serre chauffée que pour la serre non chauffée. Le rendement agricole rapporté au mètre carré de la surface plantée de la serre chauffée est nettement supérieur à celui de la serre non chauffée (témoin) (Fig. 6).

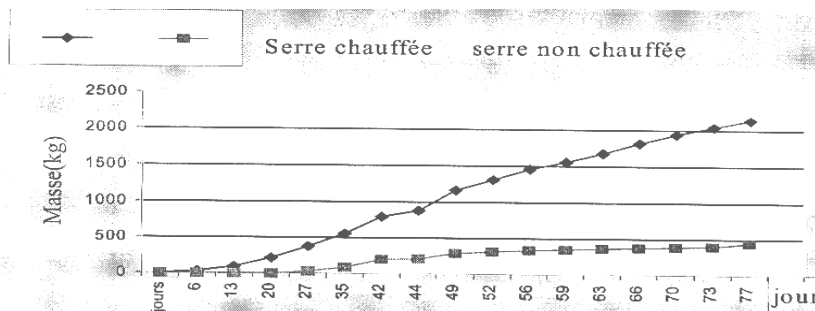


Fig. 5: Histogramme cumulé de la production en tomate

8. MISE EN EQUATIONS DU BILAN ENERGETIQUE

8.1 Hypothèses simplificatrices

On considère un système unidimensionnel : serre de dimensions horizontales infinies. En fait, le modèle unidimensionnel ne correspond pas à la réalité (système à trois dimensions). Cette considération se rapproche d'une juxtaposition de plusieurs serres héli-cylindriques pour constituer une serre dite multi-chapelle. Dans ce cas, le rapport surface de paroi sur la surface du sol tend vers 1 (en général, $S_p/S_s = 1,1$ à $1,2$). Dans le cas d'une serre monotunnel, ce rapport tend vers 2, ce qui nous éloigne du modèle unidimensionnel. Car pour traiter les

échanges par rayonnement, il faut prendre en compte des facteurs de formes des composants de la serre, ainsi le calcul du rayonnement serait plus compliqué.

Quand au flux de chaleur conductif dans le sol, le système unidimensionnel est suffisant dans notre étude, car la propagation de la chaleur se fait principalement vers la profondeur. Une distribution homogène des différentes variables d'intensité au niveau des surfaces d'échange entre la serre et son environnement (paroi, sol, air intérieur), cette hypothèse bien qu'elle ne corresponde pas à la réalité, a l'avantage de permettre la formulation d'équations dont les solutions représentent l'état moyen de ces variables. Les épaisseurs de la paroi et celle de la végétation sont très faibles pour pouvoir négliger les échanges conductifs. La végétation est uniformément répartie à la surface du sol : surface du sol et surface de la végétation sont égales, le facteur de forme végétation/sol est égal à 1 et est supposée opaque au rayonnement infrarouge thermique. L'air de la serre est supposé transparent du point de vue radiatif.

8.2 Bilan d'énergie au niveau de la couverture d'indice i

La puissance globale nette sur la couverture d'indice i de la serre représente l'énergie globale stockée par cette partie dans l'intervalle de temps dt, soit :

$$V_{pi} C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{ga} + Q_{IR,i}^r + Q_{ai,i}^c + Q_{al,i}^c + Q_{ai,i}^l + Q_{ae,i}^l + Q_i^{cond} + Q_{ch,pi}^r \quad (14)$$

8.3 Bilan thermique de l'air intérieur

L'air intérieur échange de la chaleur par convection avec la partie intérieure de la paroi et avec le sol intérieur, ainsi qu'avec la végétation. Une forme d'échange de chaleur se fait par un transfert d'air intérieur et extérieur qu'on appelle transfert par fuite (ou aération selon le taux de renouvellement de l'air intérieur (R)).

Bilan de chaleur sensible

$$C_{ai} V_{ai} \frac{dT_i}{dt} = Q_{ai,i}^c + Q_{ai,s}^c + Q_{mem} + Q_{v,i}^c + Q_{ch} \quad (15)$$

Bilan des puissances de chaleur latente

$$L V_{ai} \frac{dW_{ai}}{dt} = Q_{ai,s}^l + Q_{ai,p}^l + Q'_{mem} + ETP \quad (16)$$

8.4 Bilan des puissance au niveau du sol intérieur de la serre

Le bilan au niveau du sol s'écrit sous la forme suivante :

$$C_s V_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{gs}^s + Q_s^r + Q_{ai,s}^l + Q_{ai,s}^c + Q_s^{cond} \quad (17)$$

9. CONCLUSIONS

Cette étude concerne l'exploitation de la chaleur de la terre (géothermie) pour le chauffage des serres agricoles dans le but d'augmenter leur rendement. La modification du climat intérieur de la serre est relié aux différents paramètres qui ont une influence sur l'humidité et la température durant la période de chauffage et donc sur le développement de la plantation durant son évolution. La mesure de la température et de l'humidité durant la période de chauffage s'effectue pour deux considérations différentes : l'air intérieur n'emmagasine pas de chaleur sous ses deux formes : chaleur sensible et latente. La température de l'air intérieur, en tenant compte de son inertie thermique, ne varie pas considérablement par rapport à celle mesurée sans tenir compte de l'inertie thermique, tout en sachant que la serre est une unité dépendante des variations du climat extérieur et varie continuellement avec celui-ci. L'augmentation du rendement de la serre chauffée, comparativement à la serre non chauffée, a été bien illustrée dans cette étude. Il serait donc fort utile de généraliser ce thème de recherche de grande importance sur le plan économique, en tenant compte de son impact sur l'environnement.

REFERENCES

- [1] A. Clot, La Recherche, N° 76, pp. 213-223, 1977.
- [2] M. Santamouris, A. Argiriou and M. Vallindras, Solar Energy, Vol. 52, N°5, pp. 371-378, 1994.
- [3] H. El Mehiri, S. El Golli et M.T. Benkhelifa, J.I.TH., pp. 822-831, Alger, 1989.
- [4] T. Boulard, Thèse de Doctorat, E.N.S.P. de Montpellier, France, 1996.
- [5] B. Draoui, Thèse de Doctorat à l'Université de Nice, Sofia-Antipolis, France, 1994.