

SIMULATION NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE SOUS SERRES TUNNEL EN PRESENCE DE LA PLANTE

S. Bougoul* C. Lebbal et S. Zeroual

Laboratoire de Physique Energétique Appliquée, Département de Physique, Université El-Hadj Lakhdar,
Rue Chahid Mohamed El Hadi Boukhrouf, 05000, Batna, Algérie
s_bougoul@hotmail.com

RESUME

Dans ce travail, on présente une étude du mouvement d'air sous serres tunnel fermées, vides et cultivées. Pour cela on a déterminé le champ dynamique et thermique. L'objectif de cette étude est de voir l'influence de la plante sur le mouvement d'air et sur la variation de la température sous serres. Les écoulements étudiés sont turbulents et la turbulence a été modélisée en utilisant le modèle $k - \epsilon$. La plante a été simulée en utilisant l'approche milieu poreux. La force d'entraînement de la convection naturelle est la force de la flottabilité basée sur l'approche de Boussinesq. Les simulations ont été effectuées par un maillage en coordonnées curvilignes à l'aide d'un logiciel de mécanique du fluide CFD2000® (Computational Fluid Dynamics) basé sur un schéma de discrétisation aux volumes finis. Dans le cas de la serre vide, deux cellules convectives ont été observées dont l'une occupe presque le volume entier de la serre. Dans le cas de la serre cultivée, on constate la présence de quatre cellules convectives. La présence de la plante diminue la vitesse et la température à l'intérieur de la serre. Finalement, les simulations réalisées semblent être réalistes et peuvent permettre d'améliorer le design des serres.

1. INTRODUCTION

La serre est un outil de production permettant de créer artificiellement un microclimat destiné à favoriser la croissance et le développement des cultures. Par sa présence, elle protège la végétation des variations des facteurs climatiques extérieurs.

Les principaux facteurs climatiques internes à une serre sont la température, la lumière et l'humidité.

Les serres plastiques du type tunnel sont largement utilisées, surtout dans les pays du bassin méditerranéen, du fait de leur faible coût d'investissement. Celles-ci sont performantes en hiver et au printemps où l'énergie solaire est utile et suffisante à la production. Par contre, ces serres perdent leur efficacité en été où, le climat est très chaud ce qui provoque des surchauffes excessives. Ces conditions climatiques extrêmes influent sur la qualité et la quantité du produit.

Sur le plan physique, la serre est un système énergétique complexe dans lequel les différents modes d'échange thermique et massique interviennent. S'ils sont relativement simples et bien connus, leur couplage entraîne des difficultés dans la modélisation du système considéré.

Dans le système serre, la convection est le mode qui régit les échanges de chaleur entre l'air intérieur et toutes les autres surfaces solides (sol, parois, toit, culture, systèmes de climatisation et de chauffage) ainsi que les échanges carbonés (CO_2). L'interaction entre ces échanges convectifs et le rayonnement incident donne naissance au climat sous serres.

La compréhension du phénomène de la convection dans les serres agricoles est indispensable pour maîtriser le climat à l'intérieur et assurer une bonne gestion des moyens de contrôle climatique. De nombreux modèles physiques destinés à appréhender les phénomènes énergétiques du système serre, ont été élaborés.

Les modèles dynamiques basés sur la résolution numérique des équations de transport permettent d'approfondir la connaissance des variables climatiques en tout point de la serre. Avec les progrès

récents des puissances de calcul et des codes commerciaux résolvant les équations de la mécanique des fluides (Codes CFD), ces modèles sont devenus des compléments indispensables du travail expérimental et des outils puissants dans l'étude du climat interne des serres agricoles.

La simulation numérique à l'aide des logiciels de la mécanique des fluides (CFD) a été largement utilisée dans l'analyse de l'hétérogénéité climatique sous serres fermées et dans les serres aérées. La plupart des travaux disponibles dans la littérature, portent sur l'étude de la convection et la circulation générale de l'air à l'intérieur des serres mono ou multichapelles généralement installées dans le Nord d'Europe alors que, sont beaucoup moins nombreuses les études traitant les transferts convectifs sous serres tunnels.

Notre étude vise donc à caractériser la circulation générale de l'air due aux transferts convectifs et à modéliser au moyen d'un logiciel de dynamique des fluides (CFD2000), les champs dynamiques et thermiques dans des serres du type tunnel. Pour cela, on a procédé à l'étude de la convection dans deux configurations différentes de la serre tunnel fermée (vide et cultivée). Cette étude permet de choisir le modèle et le maillage le plus adapté à notre problème concret et permet de fournir des informations utiles pour le design des serres.

2. THEORIE

2.1 Approche numérique

L'équation de transport d'une grandeur ϕ (vitesse, température ...) peut être mise sous une forme générale. Cette équation de transport s'écrit, en coordonnées cartésiennes pour un écoulement tridimensionnelles d'un fluide incompressible et stationnaire (Patankar, 1980) :

$$\frac{\partial(u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(w\phi)}{\partial z} = \Gamma \cdot \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (1)$$

Où ϕ est la propriété transportée, u , v et w sont les trois composantes dimensionnelles du vecteur vitesse, Γ est le coefficient de diffusion et S_ϕ le terme source. Ces variables avec leurs coefficients de diffusion et le terme source sont représentés dans le tableau (1). Les équations obtenues sont des équations aux dérivées partielles non linéaires, leur résolution analytique est difficile, donc il faut faire appel à des méthodes numériques. Pour cela, on a utilisé le logiciel CFD2000 (Computational Fluid Dynamics), basé sur un schéma de discrétisation aux volumes finis et empruntant l'algorithme SIMPLER (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation Revised).

D'après les études réalisées (Boulard et al., 2000), les écoulements d'air sont fortement turbulents dans les serres, en conséquence, les modèles de turbulence doivent être introduits dans les équations de Reynolds écrites en séparant la valeur moyenne de la fluctuation. Une des procédures la plus largement répondue, est le modèle de fermeture $k - \varepsilon$ (Launder et Spalding, 1974) qui introduit deux variables phénoménologiques : l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation ε . Les détails sur le modèle $k - \varepsilon$ peuvent être trouvés dans Mohammadi et Pironneau (1994). Les paramètres couramment utilisés dans ce modèle (déterminés empiriquement) sont donnés dans le manuel du CFD2000 (1999).

Tableau 1. Présentation des différents termes de l'équation de transport considérée.

Grandeur transportée	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Conservation de masse	1	0	0

Quantité de mouvement selon x_i	\bar{v}_i	ν	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{v'_i v'_j} \right] + g_i \beta (\bar{T} - T_0)$
Energie	\bar{T}	$\frac{\lambda}{\rho c_p}$	$-\frac{\partial}{\partial x_j} \overline{v'_j T'}$
Energie cinétique turbulente	k	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}$	$P_t - \varepsilon$
Taux de dissipation	ε	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_t - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$

2.2 Écoulement à travers un milieu poreux

La végétation est assimilée à un milieu poreux. Pour caractériser un écoulement monophasique dans un milieu poreux homogène, on applique la loi de Darcy. Cette loi permet de relier la perméabilité K du milieu et la vitesse moyenne u à travers les pores avec les pertes de charge ΔP mesurées le long du système comme suit (Bartzanas et al., 2002) :

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

L'équation (2) est valable pour un écoulement isotherme, se déplaçant avec une vitesse faible sous l'action d'un gradient de pression. L'application de l'équation (2) est limitée pour des nombres de Reynolds modifiés ($Re = \rho u K^{0.5} / \mu$) inférieurs à l'unité. Pour des nombres de Reynolds élevés, il a été démontré expérimentalement l'existence d'un régime d'écoulement non linéaire. Pour cela, Forcheimer (1901) a modifié l'équation de départ en ajoutant un terme contenant le carré de la vitesse et l'équation (2) prend la forme suivante (Haxaire, 1999):

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K} u - \rho \left(\frac{c_F}{\sqrt{K}} \right) u^2 \quad (3)$$

Où c_F est le coefficient de perte de charge non linéaire (adimensionnel).

2.2.1 Maillage et conditions aux limites

La serre utilisée dans ce cas est une serre tunnel de forme classique de 8 m de large, 22 m de long et une hauteur de 3.5 m. La géométrie de cette serre ressemble à celle utilisée par Charles Chemel (2001) et Boulard et al., (2000) dans leurs études.

Dans ce cas, on a appliqué aux parois la condition de non glissement et on a imposé des flux de chaleur non nuls conformément aux conditions expérimentales (Chemel, 2001). Sur l'ensemble du domaine, nous avons imposé aussi des forces de flottabilité conformément à l'hypothèse de Boussinesq. Les valeurs des conditions aux limites sont indiquées dans le tableau 2.

Afin d'inclure l'effet dynamique de la culture dans les simulations, le couvert végétal a été introduit comme milieu poreux dans l'écoulement d'air et décrit par l'équation de Darcy-Forcheimer.

La plante est présente sous forme d'une rangée de plantes de 2.1 m de hauteur et de 1.16 m de large disposée au milieu du tunnel. Les coefficients qui interviennent dans le modèle de Darcy-Forcheimer

sont calculés expérimentalement (Haxaire, 1999) et dans le cas de la tomate, ces coefficients ont pour valeurs : $K = 0.884 \text{ m}^2$ et $c_F = 1$.

Tableau 2. Conditions aux limites imposées.

Paramètre	Valeur numérique
Flux thermique imposé au sol	100 W m^{-2}
Flux thermique imposé aux parois	15 W m^{-2}
Température de l'air extérieur	293 K

Le maillage retenu est de type BFC (*i.e.* maillage quadratique non-structuré), composé de 36 mailles suivant x et 20 mailles suivant y (Figure. 1). Il est affiné près des parois de la serre et il est plus large loin des frontières du domaine de calcul.

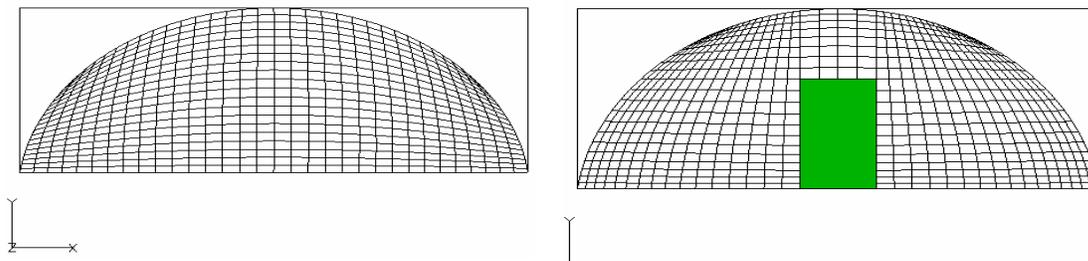


Figure 1. Maillage utilisé pour les différentes configurations.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Circulation d'air et distribution de température sous serre vide

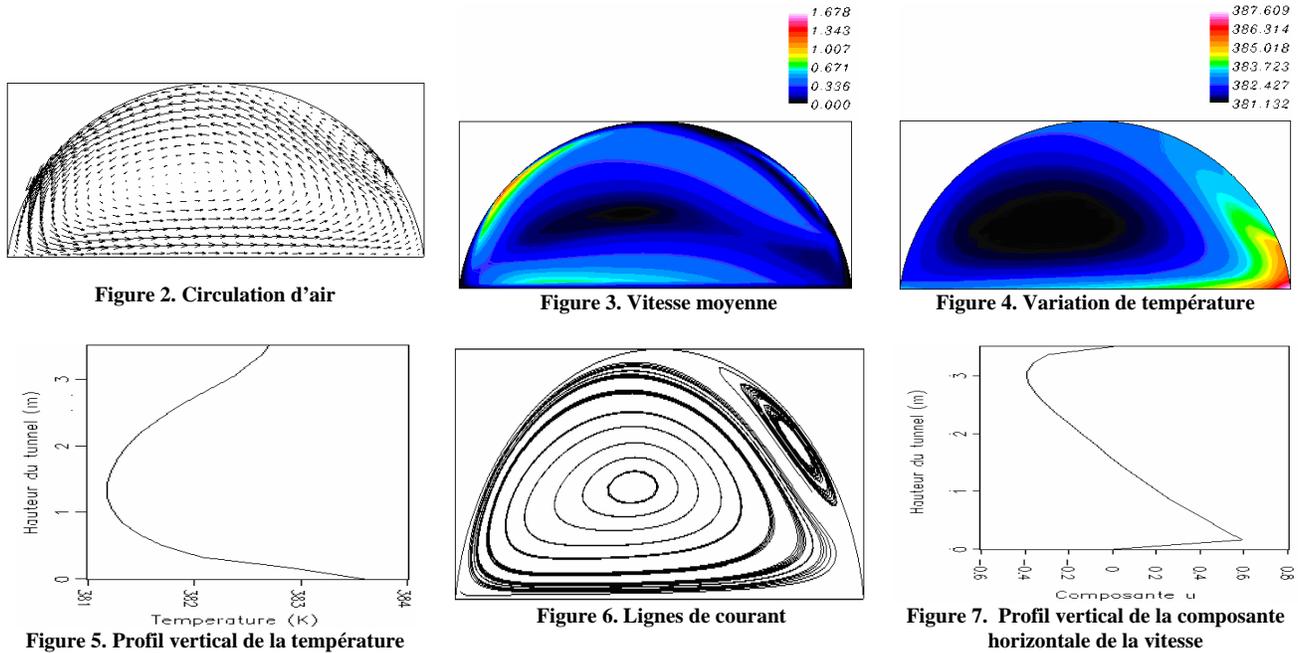
La circulation de l'air dans le tunnel est représentée dans la figure 2. Cette figure donne la formation de deux cellules de convection dont l'une est dominante et occupe presque la totalité du domaine d'écoulement. La vitesse moyenne de l'air dans le tunnel est donnée dans la figure 3, on constate que la vitesse est maximale proche du sol ($V_{\text{max}} = 48 \text{ cm.s}^{-1}$) et des parois ($V_{\text{max}} = 72 \text{ cm.s}^{-1}$) par contre, elle est faible au centre des boucles de convection. La vitesse moyenne d'air calculée dans le tunnel est égale à 27.6 cm.s^{-1} .

La variation de la température est donnée dans la figure 4.

On constate que la température est constante dans le centre du tunnel, par contre elle varie au niveau du sol et des parois. Cette variation de température est confirmée par la circulation d'air. Les particules fluides s'échauffent au niveau du sol, elles s'élèvent le long de la paroi droite jusqu'au toit ou elles se refroidissent et descendent le long de la paroi adjacente pour atteindre le niveau du sol. Il en résulte que les zones d'ascension d'air sont plus chaudes que les zones de descente.

La figure 5 représente le profil vertical de température au centre de la serre. On constate le développement de forts gradients thermiques dans la couche limite proche du sol. La température est homogène au centre du tunnel.

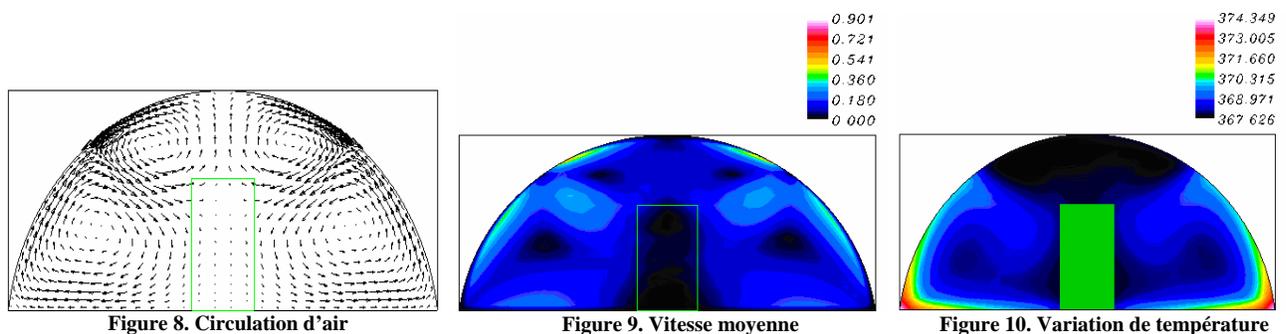
Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature et en particulier et particulier le cas de l'écoulement d'air dans une boîte chauffée par le bas (Lakhal et al., 1994). Les lignes de courant sont représentées dans la figure 6. Le profil vertical de la composante horizontale de la vitesse au milieu de la serre est donné en figure 7. Ce profil est dû à la circulation d'air.



3.2 Circulation d'air et distribution de la température sous serres en présence de la plante

La circulation générale de l'air dans le tunnel fermé cultivé est donnée dans la figure 8. On constate une symétrie parfaite de l'écoulement d'air par rapport au plan médian passant par la rangée de plantes. Cette circulation d'air est caractérisée par quatre cellules convectives tournant dans des sens différents. La présence de la plante fait augmenter le nombre de cellules convectives et cette augmentation de cellules signifie que l'écoulement d'air est instable. En regardant le champ dynamique représenté dans la figure 9, on constate que la vitesse d'air est faible au centre des cellules convectives et au niveau de la rangée de la plante qui induit un effet de perte de charge. La vitesse moyenne calculée au niveau de la rangée de la plante est de l'ordre de 3.6 cm.s^{-1} . La vitesse d'air augmente légèrement au niveau du sol 18 cm.s^{-1} et atteint des valeurs maximales aux extrémités du tunnel $V_{\text{max}} = 37 \text{ cm.s}^{-1}$. La valeur de la vitesse moyenne calculée dans le tunnel est égale à 12.5 cm.s^{-1} .

Le champ de température d'air dans la serre cultivée est représenté dans la figure 10. On constate que la température est symétrique par rapport au plan médian passant par le centre de la serre. La température est homogène au dessus de la rangée de la plante et atteint des valeurs faibles. On constate aussi le développement de gradients de température proche du sol et des parois. Les particules d'air réchauffées au niveau du sol s'élèvent le long des parois, elles se refroidissent au niveau du toit puis elles descendent le long des plans proches des frontières de la plante. Les lignes de courant sont représentées dans la figure 11. Le profil horizontal de la composante verticale de la vitesse à 1 m du sol est donné dans la figure 12. Ce profil est dû à la recirculation d'air.



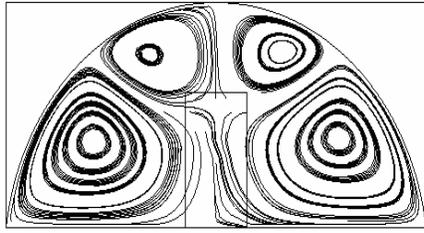


Figure 11. Lignes de courant

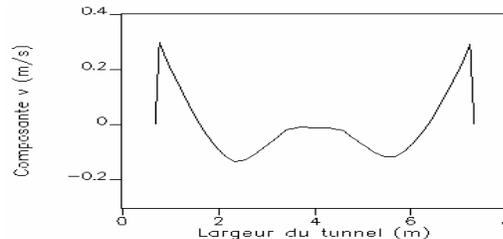


Figure 12. Profil horizontal de la composante verticale de la vitesse calculée à 1m du sol

4. CONCLUSION

Nous avons simulé numériquement les champs de vitesse et de température dans les serres tunnels classiques. La circulation d'air a été analysée en régime turbulent avec ou sans la végétation au moyen du code de calcul CFD2000. L'influence de la végétation a été également prise en compte. Ainsi, sur la base des résultats numériques obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La circulation d'air en serre tunnel fermée est caractérisée par deux cellules convectives dont l'une est dominante et occupe presque la totalité du volume entier.
- La présence de la plante diminue la vitesse et la température à l'intérieur de la serre et donne naissance à des cellules convectives supplémentaires, ce qui augmente l'hétérogénéité du mouvement d'air sous serres.
- La mise en œuvre des modèles numériques de mécanique des fluides prenant en compte l'effet dynamique de la végétation, permet de caractériser finement les champs dynamique et thermique distribués à l'intérieur des serres.
- La simulation du climat sous serres à l'aide du logiciel CFD2000, permet de contourner les difficultés rencontrées dans l'étude expérimentale.

L'approche CFD2000 fournit des simulations réalistes du climat sous serres. Néanmoins, c'est un premier pas vers la détermination du microclimat vrai au niveau de la plante. Ces résultats de la simulation sont particulièrement intéressants pour la compréhension des phénomènes physiques à l'intérieur des serres par conséquent on peut arriver à améliorer la conception des serres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. S. V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, 1980, Hemisphere, New York.
2. T. Boulard, S. Wang, R. Haxaire, 2000, Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel, *Agricultural and Forest Meteorology*, 100., 169-181.
3. B. E. Launder, D. B. Spalding, 1974, The numerical computation of turbulent flows, *Comp, Meth, App, Mech, Eng*, 3., 269-289.
4. B. Mohammadi, O. Pironneau, 1994, Analysis of the k-epsilon turbulence model, *In: Research in Applied Mathematics*, Wiley, Masson, New York.
5. CFD2000/STORMv3.45, 1999, *Computational Fluid Dynamics systems*, Pacific Sierra Corp, USA.
6. T. Bartzanas, T. Boulard, C. Kittas, 2002, Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings, *Computers and Electronics in Agriculture*, 34., 207-221.
7. P. Forchheimer, 1901, *Wasserbewegung durch boden*, Z, Ver, Deutsch, 45., 1782- 1788.
8. R. Haxaire, 1999, Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre, Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, France.
9. C. Chemel, 2001, Modélisation et simulation des écoulements d'air dans les serres, Rapport de stage effectué à l'INRA d'Avignon, France.
10. E. K. Lakhal, M. Hasnaoui, P. Vasseur, E. Bilgen, 1994, Convection naturelle dans une cellule carrée chauffée périodiquement par le bas, *Revue Générale de Thermique*, 392-393., 480-485.