

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE EL-HADJ LAKHDAR -BATNA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



Mémoire

Présenté Pour Obtenir le Diplôme de MAGISTERE EN PHYSIQUE

Option : PHYSIQUE ENERGETIQUE

Par

Meguellati Kheireddine

Thème

**Etude Comparative du Comportement Energétiques de
Trois types de Serres Agricoles installées dans une Région
Semi Aride**

Soutenue devant le jury:

Dr S. Bougoul	Président	Prof	Univ. Batna
Dr K. Mesmoudi	Rapporteur	M.C.A	Univ. Batna
Dr A Hafid. Brima	Examineur	Prof	Univ. Biskra
Dr Z. Aouachria	Examineur	Prof	Univ. Batna

Remerciements

Je remercie l'ensemble des personnes qui m'ont permis d'en être à écrire ces quelques mots aujourd'hui. Ce travail n'aurait pu se dérouler dans les meilleures conditions sans l'aide précieuse du Dr Kamel MESMOUDI qui a encadré mon travail avec à propos et ma fait partager son savoir et son enthousiasme. Un énorme merci pour sa disponibilité sans bornes, sa patience et ces idées toujours constructives. Aux membres de mon jury, pour avoir bien voulu juger ce travail.

Je remercie aussi celle qui partage ma vie et qui sait être, de jour en jour, de plus en plus précieuse. Merci pour ton aide, ton soutien, ta présence au quotidien.

A toute ma famille.

Kh-Meguellati

Table des matières

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

1.1. Introduction	4
1.2. Les différents types de serres	4
1.2.1. Les serres tunnels	5
1.2.2. Les serres d'horticultures.....	6
1.3. Composantes d'un abri serre.....	7
<i>L'ossature (armature).....</i>	<i>7</i>
<i>Les matériaux de couverture ou de l'enveloppe</i>	<i>7</i>
1.4. Caractéristiques d'une serre	8
1.4.1 Paramètres influents le climat sous serre.....	8
1.4.2. Orientation de la serre.....	11
1.4.3. Comportement thermique et hydrique sous serre.....	11
o Echanges thermiques	12
o Echange hydrique	15
1.5. Synthèse bibliographique.....	16
1.5.1. Les Approches Utilisés pour la Description du Micro Climat de la Serre...	
1.5.2. Les Effets de la Direction du Vent.....	17
1.5.3. Effets du Chauffage par Tube Chauffants sur la Ventilation Naturelle....	17
1.5.4. Effets de la Ventilation dans la Serre.....	18
- <i>La Ventilation Naturelle</i>	<i>18</i>
- <i>La Ventilation Forcée.....</i>	<i>18</i>
1.5.5. Effets des Filets Anti Insectes sur la Ventilation.....	19
1.5.6. Effets du Rayonnement Solaire sur la Température de l'Air Intérieur.....	20
1.5.6. Effets du gradient de Température sur les échanges d'air.....	20
1.5.8. Les Phénomènes de Turbulence et la Flottabilité dans la serre.....	21

1.5.9. Incorporation des Cultures dans la Modélisation.....	23
1.5.10. Humidité.....	24
1.5.11. Validation des Modèles par l'Expérimental.....	24
- Les modèles statistiques.....	24
- Les types de modèles.....	25
1.5.12. Éléments finis vs volumes finis.....	25

Chapitre II: Formulation Mathématique

2.1. Introduction.....	27
2.2. Equations générales.....	27
2.2.1. Equation de continuité.....	27
2.2.2. Equation de quantité de mouvement.....	27
2.2.3. L'équation d'énergie.....	28
2.2.4. Equation de conservation d'espèces (vapeur d'eau).....	30
2.2.5. Elaboration des modèles de turbulence.....	30
2.2.6. La simulation des équations de Navier Stokes moyennées (RANS).....	30
2.2.7. Concept de la viscosité turbulente.....	31
2.2.8. Modélisation de la viscosité turbulente.....	32
2.2.9. Le modèle k- ϵ standard.....	32
2.2.10. Equations gouvernantes le climat sous serre.....	33
Conditions aux limites.....	34
2.3. Discrétisation des équations.....	35
2.4. Méthode des volumes finis.....	35
2.5. Discrétisation numérique.....	37
2.6. Algorithme SIMPLE pour la résolution des équations discrétisées.....	38

Chapitre III : Résultats et Discussion

3.1. Introduction.....	42
3.2. Domaine physique et maillage.....	42

3.3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	45
3.3.1 Objectifs des campagnes de mesures	45
3.3.2 Le climat de BATNA	45
3.3.3 Site d'étude, serres expérimentées, et expérimentations	45
- <i>Première Expérimentation</i>	45
- <i>Deuxième Expérimentation</i>	47
3.4. Propriétés thermophysiques	48
3.5. Conditions Aux Limites (C.A.L.)	49
3.6. Validation des résultats	50
3.7. Résultats et discussion	53
3.7.1. Cas de nuit	53
a) Distribution des lignes de courant dans la serre	54
b) Distribution de la vitesse dans la serre	55
c) Distribution de la température dans la serre	57
d) Distribution de l'humidité dans la serre	58
3.7.2. Cas du jour	60
a) Distribution de la vitesse dans la serre	60
b) Distribution de la température dans la serre	62
c) Distribution de l'humidité dans la serre	64
d) Profiles des vitesses	65
e) Profiles de Températures	67
f) Profiles d'humidité relatives	68
g) Profiles de flux incident sur les éléments de la serre	69
Conclusion	72
Références bibliographique	75
Annexe	

Nomenclature

Lettres latines

a	vitesse du son	$m.s^{-1}$
C_μ	constante du modèle $k-\varepsilon$	-
C_p	chaleur spécifique à pression constante	$J.kg^{-1}.K$
C_2	facteur de résistance inertielle	-
E_{int}	énergie interne	J
E_c	énergie cinétique	J
F_i	forces de flottabilités	$N.m^{-3}$
g	accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
Gr	nombre de Grashoff	-
h	enthalpie massique	$J.kg^{-1}$
H	humidité relative	%
k	énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-3}$
K	perméabilité du milieu poreux	m^2
L	Luminance	$cd.m^{-2}$
M	nombre de Mach	-
m	masse de l'espèce m	kg
Nu	nombre de Nusselt	-
P	pression	Pa
Pr_t	nombre de Prandtl turbulent	-
Q	chaleur échangée	J
$\dot{Q}$	puissance thermique échangée	W
Re	nombre de Reynolds	-
Sc	nombre de Schmidt	-
S_h	terme source de l'équation de l'énergie	$W.m^{-3}$
T	Température	K
t	Temps	s
T'	composante fluctuante de la température	K

$\bar{T}$	valeur moyenne de la température	K
u'	composante fluctuante de la vitesse	m.s ⁻¹
$\bar{u}$	valeur moyenne de la vitesse	m.s ⁻¹
u_i	composante de la vitesse	m.s ⁻¹
v	vitesse de l'air	m.s ⁻¹
W	travail des forces extérieures	J
$\dot{W}$	puissance des forces extérieures	W

Caractère Grecs

α	<i>perméabilité du milieu poreux</i>	
β	coefficient de dilatation	K ⁻¹
Γ_ϕ	coefficient de diffusion	
δ_{ij}	delta Kronecker	-
ε	taux de dissipation visqueuse	m ⁻² .s ⁻³
κ	coefficient d'absorption	m ⁻¹
λ_{eff}	conductivité thermique effective	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
μ	viscosité dynamique de l'air	Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
ρ	masse volumique	Kg.m ⁻³
σ	constante de Stefan-Boltzmann	W.m ⁻² .K ⁻⁴
σ_s	coefficient de diffusion lumineux	
Φ	dissipation visqueuse	W.m ⁻³
Ω	angle solide	sr

Vecteurs et tenseurs

$\vec{n}$	vecteur unitaire normal à la surface	-
$\vec{s}$	vecteur direction	-
τ_{ij}	tenseur des contraintes visqueuses	Kg.m ⁻¹ .s ⁻²

Liste des figures

Figure 1.1: Serre tunnel	5
Figure 1.2: serre à pieds droits	6
Figure 1.3: Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules chacune.	7
Figure 1.4 : Schéma simplifié de la photosynthèse.	10
Figure 1.5 : schéma du cycle de photosynthèse et respiration de la plante.	10
Figure 1.6: Schéma montrant l'organisation d'une feuille. Le stomate est ici ouvert.	11
Figure 1.7 : Spectre du rayonnement solaire.	14
Figure 1.8 : Diagramme de l'air humide.	16
Figure 2.1 : Différentes contributions du phénomène radiatif	29
Figure 2.2: Maillage de la Serre à pieds droits	34
Figure 2.3: Maillage de la Serre tunnel	34
Figure 2.4: Maillage de la Serre Chapel	34
Figure 2.5 : volume de contrôle entourant le point central P.	35
Figure 2.6 : maillage décalé en vitesse - scalaire	47
Figure 3.1: Serre Tunnel: (a) Domaine physique et (b) Domaine maillé	43
Figure 3.2: Serre à pieds droits: (a) domaine physique et (b) Domaine maillé	43
Figure 3.3: Serre Venlo mono-chapelle: (a) domaine physique, (b) domaine maillé	44
Figure 3.4: Schéma de la serre expérimentée et du positionnement des appareils et des sondes de mesures (Toutes les distances sont en mètre linéaire)	46
Figure 3.5: Schéma de la serre et des points de mesure	48
Figure 3.6 : Contours des lignes de courants: (a) notre travail de simulation, (b) les résultats de la référence	51
Figure 3.7 : Profile de vitesse axiale U_x en fonction de la hauteur de la serre $H(y)$ pour une abscisse $x=2m$	52
Figure 3.8 : Profile de la vitesse axiale U_x en fonction de la hauteur de la serre $H(y)$ pour une abscisse $x=4m$	52
Figure 3.9 : Profiles de vitesse axiale U_x en fonction de la hauteur de la serre $H(y)$ pour une abscisse $x=6m$	53
Figure 3.10: contours (iso-valeurs) des lignes de courant cas de nuit: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	55
Figure 3.11: contours des champs de vitesse cas de nuit: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	56
Figure 3.12: contours des champs de température cas de nuit: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	58
Figure 3.13: contours des champs d'humidité relative cas de nuit: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	60
Figure 3.14: contours des champs de vitesse cas du jour: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	62
Figure 3.15: contours des champs de température cas du jour: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	64
Figure 3.16: contours des champs d'humidité relative cas du jour: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.	65
Figure 3.17: Profile de vitesse U_x dans trois stations de x (cas du jour) : (a) serre Chapel, (b) serre à pieds droits et (c) serre tunnel.	67
Figure 3.18: Profile de température dans trois stations de x (cas du jour) : (a) serre Chapel, (b) serre à pieds droits et (c) serre tunnel.	68

Figure 3.19: Profile d'humidité relative dans trois stations de x (cas du jour) : (a)serre Chapel, (b) serre à pieds droits et (c)serre tunnel.	69
Figure 3.20: Flux incident au sol pour les différentes serres.	70
Figure3.21: Flux incident sur les faces horizontales de la culture pour les différentes serres.	70
Figure 3.22: Flux incident sur les faces verticales de la culture pour les différentes serres.	70

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composantes de la serre	47
TABLEAU 3.2: CONDITIONS CLIMATIQUES EXTERIEURES MOYENNES POUR CHAQUE JOURNEE-TYPE	48
Tableau 3.3: Propriétés thermo-physiques déterminées expérimentalement	49
Tableau 3.4: Conditions aux limites imposées aux frontières de la serre agricole	49
Tableau 3.5: Propriétés thermo-physique de la culture de tomate utilisé comme milieu poreux	50
Tableau 3.6: Propriétés optique des différents matériaux dans le domaine visible	50

Introduction Générale

Introduction Générale

Les serres sont des structures très sophistiquées, qui visent à fournir des conditions climatiques convenables pour la croissance et le développement des plantes et assurer une production tout au long de l'année. Les facteurs de croissance : lumière, température, humidité et composition de l'air, doivent être maintenus à des intervalles optimaux suivant les conditions de consigne pour chaque espèce de plante.

La partie visible du rayonnement solaire, est l'un des facteurs essentiels de la croissance pour une plante sous abri serre. Par conséquent, les couvertures des serres doivent être conçus et fabriquées d'une manière telle que suffisamment de lumière atteint les plantes, en particulier durant les saisons froides. Certaines serres utilisées pour des cultures spéciales, ou situées dans des régions ensoleillées, peuvent avoir besoin d'ombrage pendant les périodes de forte insolation et une partie de chaleur doit être fournie lorsque la température tombe en dessous d'une température souhaitée. Les pertes de chaleur à travers les couvertures doivent être aussi faibles que possible. Désormais la couverture de la serre devrait fournir une transmission du rayonnement solaire maximale combinée avec le besoin minimale de chauffage pendant les saisons froides. En cas de températures élevées, qui dépassent les températures de consignes le surplus de chaleur doit être évacué par ventilation ou climatisation. Une serre bien conçu doit fournir des conditions climatiques nécessaires à la croissance des plantes et doit maintenir les facteurs climatiques aussi près que possible des valeurs optimales. Ainsi, les serres doivent permettre une transmission lumineuse élevée, une faible consommation de chaleur, une ventilation suffisante, une résistance structurelle adéquate, et un faible coût d'exploitation.

Différents types de serres sont conçues pour répondre aux besoins spécifiques et sont utilisés pour une variété de production agricole. Bien qu'il existe des avantages spécifiques à chaque type de serre pour une application particulière, en général, il n'y a pas de serre de type unique, qui peut être considérée comme la meilleure. Cette variété est due essentiellement aux conditions des sites d'implantations, telles que: l'étage bioclimatique, les revenus économiques, les aspects sociaux et les ressources naturelles.

Le choix d'une conception de la serre agricole pour un endroit spécifique sur la planète pour satisfaire les conditions économiques des serristes demeure toujours un défi pour le concepteur. Une approche systématique qui intègre des modèles physiques, biologique et économiques est la manière la plus prometteuse pour la prise de décision stratégique sur la configuration de la serre. Cependant, une méthodologie basée sur une étude comparative du

comportement énergétique d'un ensemble de serres sous les mêmes conditions climatiques est une approche simple, qui peut contribuer aux choix du type de la géométrie de la serre pour le développement des cultures abritées dans notre pays, puisqu'un type de serre qui peut satisfaire les serristes pour le développement des différentes variétés et espèces des cultures protégés n'est pas encore disponible. Le problème du choix de la conception peut être considéré comme un problème multidimensionnel. Une telle approche d'optimisation peut être réalisée sur une compensation quantitative entre les retombés économiques à savoir: la récolte et les coûts liés à la construction, l'entretien et l'exploitation de la serre.

Pour résoudre ce problème, nous proposons à travers ce travail, une étude comparative du comportement énergétiques de trois type de serres agricoles, sous un même type de climat, pour contribuer aux choix de type de la serre la mieux rentable énergétiquement pour les serristes dans notre région (climat semi aride du sud de la méditerranée) en se basant sur un logiciel de calcul de la dynamique des fluides (CFD Fluent 6.3.26) vu sa réputation dans plusieurs disciplines. Ce travail porte essentiellement sur l'interaction des différents phénomènes existent à l'intérieur de la serre en présence de la culture en mode jour et nuit. Pour cela, on se propose de structurer notre travail de la façon suivante:

Le premier chapitre sera consacré aux quelques généralités liées aux serres suivi d'une synthèse bibliographique sur les travaux de modélisation et simulation des phénomènes énergétiques à l'intérieur des serres.

Le modèle physique complet qui décrit les différents phénomènes entre en jeu ainsi que leur interaction sous serre accompagné par la méthode de discrétisation utilisé par le logiciel Fluent sera le but du deuxième chapitre.

Concernant le troisième chapitre, les résultats de simulation sous forme de champs et de profils dynamiques, thermiques et hydriques à l'intérieur de la serre sont présentés, précédés par d'autres résultats de validation.

Enfin, on résumera en conclusion les principaux résultats obtenus et perspectives.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

1.1. Introduction

La serre agricole a pour rôle de produire une récolte en s'affranchissant du climat local. Elle permet soit d'améliorer le rendement des plantes, soit de cultiver des plantes qui ne survivraient pas au climat naturel.

L'objectif le plus général du producteur est de mettre sur le marché des quantités de produits agricoles en rapport avec la demande économique. Pour cela, il faut déterminer les conditions favorables en fonction du stade de développement de la plante. Ces consignes sont d'une part d'ordre climatique, d'autre part de nature nutritive (eau, engrais).

Grâce aux progrès réalisés dans la fabrication des matériaux (vitres, plastiques, structures métalliques, composant électroniques, capteurs) et grâce aux progrès de la recherche agronomique, les serres agricoles sont devenues des enceintes bioclimatiques pouvant créer un milieu semi artificiel, un microclimat permettant de cultiver des végétaux avec des rendements très supérieurs aux rendements des cultures en plein champs.

1.2. Les différents types de serres

Différents types et formes de serres agricoles (Venlo Canaries, tunnel, à pieds droits) sont conçues sous différentes conditions climatiques dans le monde (aride, semi aride, tropicale, tempéré, subhumide) pour abriter différents types de cultures (espèce et variété de plante) et répondre aux besoins du producteur (faibles coûts de production, minimisation des intrants).

L'abri doit dans tous les cas respecter deux contraintes principales : permettre de créer un climat plus favorable aux cultures que le climat extérieur et être suffisamment robuste pour être capable de résister aux vents forts, aux surcharges externes (neige, grêle, ...) ou interne (poids des cultures palissées portées par la charpente, poids des équipements de chauffage, irrigation, ...), le tout en répondant aux considérations économiques (prix de revient, longévité, etc.).

Les contraintes climatiques auxquelles sont soumises les serres sont de divers ordres :

- Les faibles températures extérieures en hiver, engendrant des températures intérieures en dessous de l'optimum biologique, durant les nuits notamment, et rendant nécessaire le chauffage,
- Les vents importants, les chutes de neiges et de grêle pouvant endommager la structure de la serre,
- L'éclairement insuffisant en hiver qui réduit considérablement la photosynthèse,
- Les températures intérieures trop élevées en été et même parfois au printemps qui peuvent être néfastes au végétal,

- Les taux élevés d'humidité nocturne à l'intérieur de la serre qui augmentent les risques de développement de maladies fongiques.

Ces contraintes, plus ou moins fortes selon la région, ont un impact important sur le choix du type de serre utilisée. La classification des serres est très complexe et plus difficile, elle est souvent faite selon les formes données par les cadres porteurs qui constitue l'assemblage. On distingue deux principaux types appartenant à deux grandes familles de serres : Les serres chapelle et les serres tunnels. Comme on peut les distinguer aussi suivant les formes de leur toit : chapelles à versants plats et à poteaux verticaux, les chapelles dissymétriques, les chapelles sans poteaux verticaux, les chapelles à piédroits inclinés...etc.

1.2.1. Les serres tunnels

Ce type de serres se compose d'une série d'éléments juxtaposés constitués chacun par une armature en tube d'acier et en profilés assemblés par des boulons. Le film plastique se fixe par divers systèmes de clips qui coincent le film contre le profil ou entre deux baguettes tout au long de la serre. La serre tunnel classique (fig. 1.1) est arrondie, mais il existe également des modèles à pieds droits (fig.1.2)



Figure 1.1: Serre tunnel



Figure 1.2: serre à pieds droits

1.2.2. Les serres d'horticultures

La chapelle est l'unité de construction de la serre formée par deux parois latérales verticales (ou très légèrement penchées) et un toit à deux pentes, généralement symétriques, La chapelle est caractérisée par sa largeur. Quand deux chapelles consécutives ne sont pas séparées par une paroi verticale interne, on parle de serre multi- chapelles ou chapelles jumelées. La ferme est l'élément de structure porteuse principale de la chapelle répétée à intervalles réguliers. La longueur entre les fermes est caractéristique du type de la serre. Le module est une surface caractéristique de la serre obtenue en réalisant le produit de la largeur de la chapelle par la longueur de l'entre ferme ; Les pignons sont les parois verticales formant les deux extrémités d'une chapelle ; Le faîtage est la ligne constituée par le sommet de la chapelle ; Le portique est la structure porteuse constituée dans les serres anciennes par le pieds de ferme et par une poutre joignant les sommets des pieds droits, il y a de moins en moins de serres à portique ; Les pieds droits sont les parois verticales latérales d'une chapelle; la figure ci-dessous, permettra de retrouver en volume ces différents éléments.

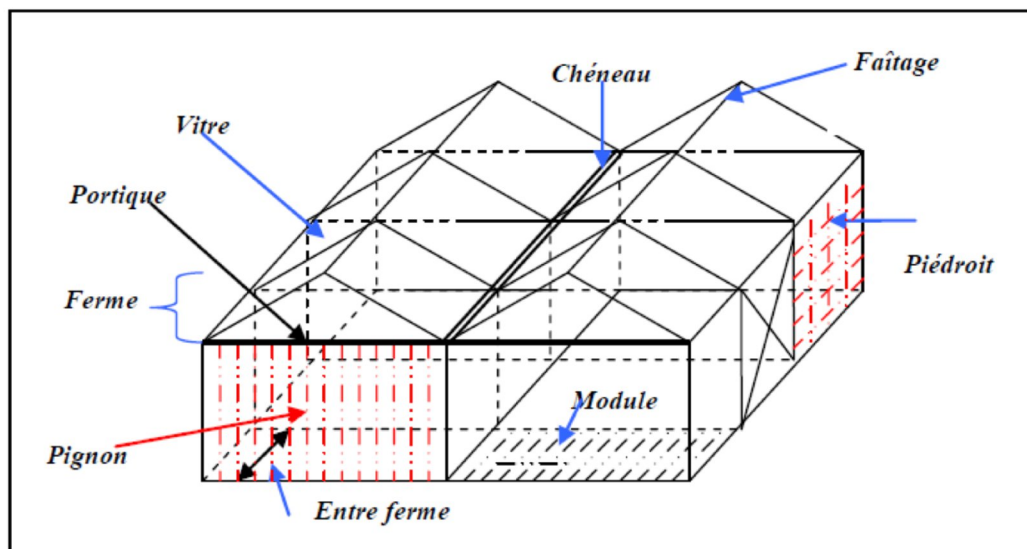


Figure 1.3: Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules chacune.

1.3. Composantes d'un abri serre

D'une manière générale, la serre est composée de deux structures : une armature (ossature) qui constitue le squelette de l'abri, et une couverture (enveloppe) qui réalise l'écran nécessaire à la création d'un microclimat spécifique à la serre.

- **L'ossature (armature)**

C'est la charpente de la serre, elle est un assemblage de cadres porteurs reliés par des pannes et des pièces de triangulation, les éléments porteurs peuvent être constitués par des profils différents, plus ou moins lourds, suivant le type de serre. La charpente, doit être constituée de matériaux résistants aux intempéries notamment aux vents forts. Les matériaux utilisés pour l'ossature sont : l'aluminium, le béton, le bois et l'acier galvanisé, Ceux-ci ne doivent constituer le moindre obstacle à la lumière solaire.

- **Les matériaux de couverture ou de l'enveloppe**

Leurs performances doivent être appréciées à plusieurs niveaux : au niveau de leurs propriétés optiques ; de jour : il s'agit avant tout de présenter la meilleure transmission au rayonnement visible utile à la photosynthèse ; de nuit : il faut que leur émissivité dans l'infrarouge thermique soit la plus faible possible, de manière à limiter les pertes radiatives.

Autrement dit au niveau de leurs propriétés thermiques, leurs coefficients de conductibilité et de pertes par conduction doivent être les plus faibles possibles, de même, leur coefficient de dilatation, pour des problèmes d'étanchéité, doit être faible. Concernant

leurs durées de vie et de leur résistance aux intempéries : si on connaît les propriétés optiques et mécaniques des matériaux de couverture lorsqu'ils sont neufs, il est souvent difficile de porter un jugement lorsque ces matériaux ont subi plusieurs années d'exposition à l'air libre.

Dans le domaine des serres, on distingue deux principales classes de couvertures:

- **Le verre:**

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants (un produit permettant d'abaisser la température de fusion d'un ou plusieurs éléments ou composés chimiques).

Ils existent différents types de verre utilisés dans les serres à savoir : le verre transparent ou claire (appelé verre horticole), le verre martelé ou cathédrale (verre horticole coulé), le verre horticole à faible émissivité, le double vitrage, le verre isolant, le verre trempé, le verre armé et le verre feuilleté.

- **Les matériaux plastiques:**

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. Dans le domaine des serres ces matériaux plastiques sont transparents à la lumière visible. Deux types sont utilisés:

Les matériaux plastiques rigides: On peut citer quatre type principaux de ce type de plastique rigide : Le polyester armé de fibres de verre (PRV), le chlorure de polyvinyle biorienté (PVC biorienté), le polycarbonate (PC), le polyméthacrylate de méthyle (PMMA).

Les matériaux plastiques souples (films): Les films les plus utilisés sont à base de polyéthylène ou plus exactement de polyéthylène à basse densité (PE bd) avec de nombreux produits dérivés, (PE thermiques). Le polychlorure de vinyle (PVC) plastifié est peu employé en couverture de serre dans notre pays.

1.4. Caractéristiques d'une serre :

1.4.1. Paramètres influents le climat sous serre:

La température, l'humidité, la teneur en CO_2 et la lumière sont les paramètres les plus influents dans la production des plantes. Pour améliorer leurs rentabilités, il est indispensable de faire optimiser le climat environnant aux cultures.

- ✓ **Température**

La température sous serre est le paramètre le plus important pour la production des cultures sous serre. Il se décompose en trois types :

– Température issue du sol.

- Température de la plante.
- Température ambiante à la culture.

Elle a une grande influence sur la croissance végétative. En effet, elle intervient dans beaucoup de phénomènes biologiques tels que la photosynthèse et la respiration. La vitesse de réaction augmente facilement avec la température ambiante.

✓ Humidité

L'hygrométrie souhaitée par un agriculteur se situe entre 40% et 60%. Quand l'humidité est en dessous de 40% la plante transpire plus. Ce n'est pas destructif pour la plante, mais cela vide les réserves d'eau un peu rapidement. En outre, quand l'air est trop humide, la plante est exposée aux attaques de champignons, moisissures, ralentissement de la transpiration freinant la croissance de la culture. Trop d'humidité est souvent due au mauvais système d'extraction ou à l'absence de bonne ventilation au sein de la serre.

✓ Humidité absolue

C'est le rapport de la masse de vapeur d'eau, notée $M_{v\text{ eau}}$ au volume V_{total} occupé par l'air humide considéré dans les conditions de pression et de température données :

$$H = \frac{M_{v\text{ eau}}}{V_{\text{total}}} \quad (\text{I.1})$$

✓ Humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air est une grandeur physique qui est très intéressante car elle a une influence considérable et directe sur les processus physico-chimiques et biologiques. Elle est définie comme étant le rapport de pression partielle de vapeur d'eau P_v à la pression de vapeur saturante P_s à une température donnée :

$$HR = \frac{P_v}{P_s(T)} \times 100 \quad (\text{I.2})$$

✓ La lumière

La lumière joue un grand rôle dans la croissance de la plante car elle intervient dans beaucoup de phénomènes physiologiques et conditionne surtout la photosynthèse. En effet, l'énergie lumineuse fixe dans la plante le gaz carbonique et l'eau de l'air pour produire le sucre et l'amidon. Par conséquent, la croissance et le niveau de production des plantes dépendent fortement de la quantité du soleil que la culture reçoit tout au long de sa croissance. Toutefois, on peut prolonger ou raccourcir l'éclairage en utilisant respectivement les lumières artificielles ou les stores.

✓ **Teneur en CO₂**

Le CO₂ est essentiel aux plantes vertes pour la photosynthèse. Une grande quantité de ce type chimique se trouve dans l'atmosphère. Il se fixe dans les feuilles par les stomates et les cellules chlorophylliennes après dissociation. Les stomates des plantes cultivées sous serre, sont indispensables à différentes concentrations de CO₂.

✓ **Photosynthèse:**

La photosynthèse représente l'inversion de la combustion du glucose (respiration). Cette réaction est endothermique et nécessite de l'énergie lumineuse :

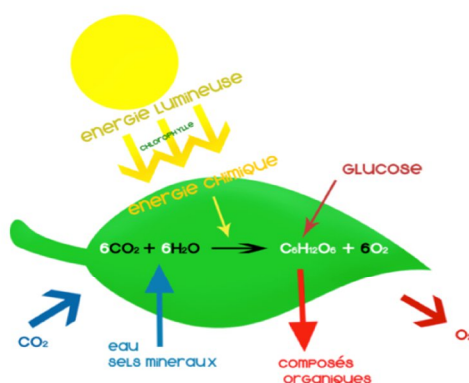
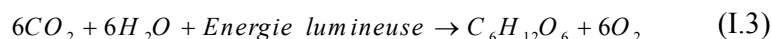


Figure 1.4 : Schéma simplifié de la photosynthèse.

La photosynthèse est très importante pour la production végétative. Remarquons dans l'équation précédente que le dioxyde de carbone est obtenu à partir de l'air puis converti à l'aide de l'eau et de l'énergie lumineuse en glucose et en oxygène.

✓ **Respiration:**

Pour la respiration (mode nuit), il s'agit du cycle inverse pendant lequel la plante absorbe de l'oxygène (O₂) et rejette du dioxyde de carbone (CO₂), comme un humain (mais dans des proportions différentes bien évidemment). Ce phénomène est une réaction exothermique et ne nécessite pas de l'énergie lumineuse:

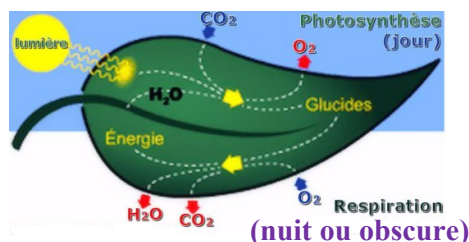
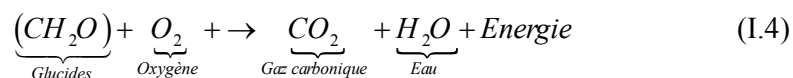


Figure 1.5: schéma du cycle de la photosynthèse et de la respiration chez la plante.

✓ **Transpiration:**

Lors de la photosynthèse les stomates (fig.1.3) s'ouvrent afin de laisser rentrer du CO_2 . Il y a alors mise en contact de la solution des feuilles avec l'air extérieur. La différence entre le potentiel hydrique atmosphérique et celui des feuilles induit la sortie de l'eau (présente dans les feuilles) dans l'atmosphère. On appelle ce phénomène la transpiration qui contribue au rafraîchissement des plantes et elle permet le transfert des sels minéraux aux endroits où la plante en a besoin, principalement dans les feuilles qui sont le siège de la photosynthèse.

✓ **Stomates:**

Sont des orifices situés en dessous de la feuille permettent l'entrée et la sortie des gaz dans la cellule (le gaz carbonique et l'oxygène).

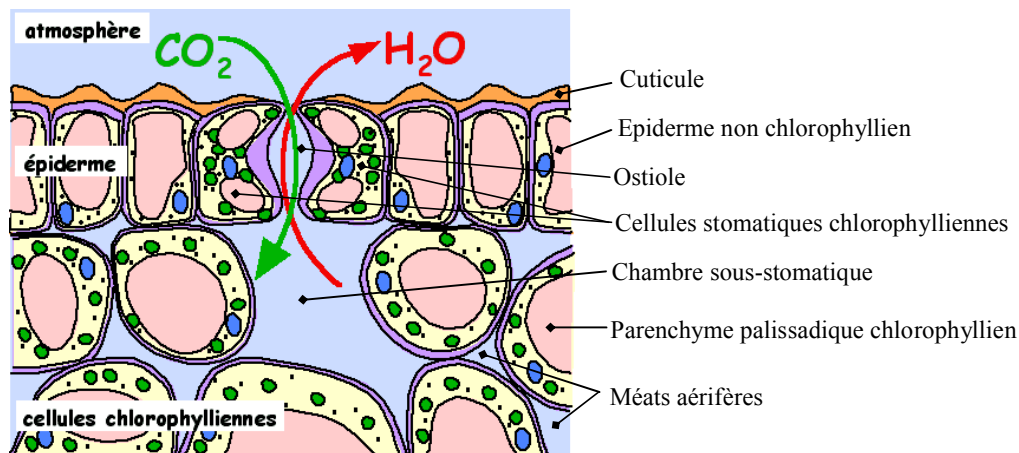


Figure 1.6: Schéma général montrant l'organisation d'une feuille (le stomate est ici ouvert).

1.4.2. Orientation de la serre :

La serre doit être orientée de telle sorte qu'elle se bénéficie d'un maximum de lumière l'été et du réchauffement de l'air le plus rapide l'hiver. Le meilleur compromis reste d'orienter l'arrête du toit dans l'axe nord-sud. Un des pignons sera donc vers le sud, de préférence celui où se trouve la porte.

1.4.3. Comportement thermique et hydrique sous serre:

La compréhension des différents phénomènes physiques qui interviennent à l'intérieur de la serre et leur interaction nous permet de contrôler la quantité des différents paramètres influents le climat sous serre précités (température, humidité, teneur en CO_2 et lumière).

▪ Echanges thermiques

Les échanges de chaleur à l'intérieur de la serre entre ses différents constituants se produit généralement par les trois modes de transfert de chaleur: conduction, convection et rayonnement. Souvent ces trois types d'échange de chaleur se produisent simultanément.

o Conduction:

Dans les serres, les principaux échanges de chaleur par conduction concernent les transferts de chaleur entre la surface du sol et ses couches profondes ainsi que les déperditions thermiques à travers la structure (parois latérales, revêtement de toiture...). Cependant, les couches profondes du sol ne sont généralement pas homogènes verticalement. Le sol peut en effet être constitué de différentes couches qui ont des propriétés thermiques différentes (composition, texture, humidité,...). Dans ce cas il peut être représenté comme l'empilement de couches homogènes. La résolution numérique des transferts conductifs dans le sol se fait alors en discrétisant l'équation de la chaleur selon des couches horizontales successives du sol

o Convection:

L'échange de chaleur par convection à l'intérieur de la serre se produit grâce à la ventilation et l'infiltration (les ventilateurs et les fuites d'air). Ce mode d'échange de chaleur comprend non seulement le mouvement de l'air, mais aussi le mouvement de la vapeur d'eau. Dans ces deux cas, il n'y a pas de changement de phase et la convection est dite sans changement de phase. Quand l'eau dans la serre s'évapore, il absorbe de l'énergie et dans le cas contraire, cette vapeur d'eau libère de l'énergie et se condense. Dans ces derniers cas la convection est dite avec changement de phase.

La convection peut être naturelle, forcée, ou mixte, dans des configurations d'écoulements laminaires ou turbulents.

- Convection naturelle:

La convection naturelle ou libre est un phénomène qui se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide. Ce gradient peut être une différence de température ou de concentration d'un soluté. Ce phénomène se caractérise pour un gradient de température par le nombre sans dimension de Grashof Gr . Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. Ce nombre porte le nom de l'ingénieur allemand Franz Grashof. On le définit de la manière suivante :

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (I.5)$$

Avec :

g : accélération de la pesanteur, β : coefficient de dilatation, ΔT : différence de température, L_c : longueur caractéristique, ρ : Masse volumique du fluide, μ : viscosité dynamique.

Pour un gradient de concentration d'un soluté une différence de masse volumique qui sert de force motrice pour un déplacement du solvant est engendrée. Le nombre de Grashof massique est alors défini de la manière suivante :

$$Gr_m = \frac{g \beta^* \Delta C L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (I.6)$$

Avec :

β^* : coefficient de dilatation en fonction de la concentration, ΔC : différence de concentration.

- **Convection forcée:**

La convection est dite forcée lorsque le mouvement du fluide est provoqué par un champ de force extérieur (ventilateur, pompe). Le coefficient de convection forcée entre la paroi et l'air dépend de la vitesse du vent qui est lui-même la résultante du gradient local de la pression atmosphérique.

- **Convection mixte:**

Lorsque les deux types de convection existent la convection est dite mixte. Ce cas se rencontre souvent, quand la vitesse du vent est faible. Les mouvements de l'air sont alors produits à la fois par les facteurs qui entretiennent le vent et par les gradients verticaux de température. Les transferts de chaleur et de masse sont alors dus en partie à la convection naturelle et en partie à la convection forcée.

o **Rayonnement:**

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible¹. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. La gamme de longueurs d'ondes (ou de fréquences) concernées est très vaste et correspond à ce que l'on appelle communément le spectre de rayonnement électromagnétique voir figure 1.4.

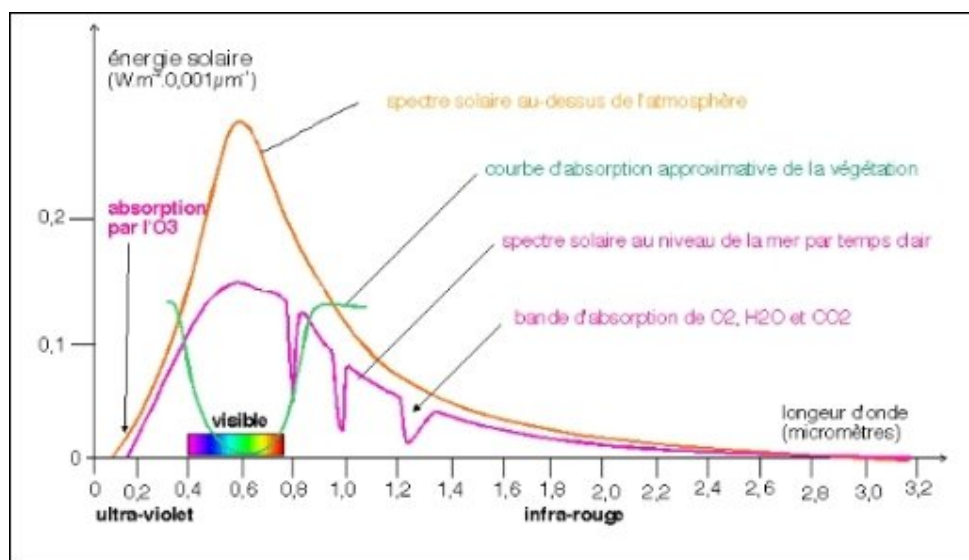


Figure 1.4: rayonnement solaire (spectre).

- **Rayonnement à courtes longueurs d'onde :**

La propriété de transparence de la couverture des serres vis-à-vis de certains rayonnements permet de pénétrer une grande partie du rayonnement solaire et plus précisément celui qui est compris entre 0.4 et 0.7 [μm] (rayonnement visible) et qui contribue au processus de la photosynthèse. Sur un plan quantitatif, la portion du rayonnement extérieur transmis dans la serre a été estimée d'environ 60%, le reste étant absorbé ou réfléchi par les parois et les différentes structures. La grande partie du rayonnement pénétrant est interceptée ou absorbée par la culture surtout lorsque la culture est bien développée. La partie qui contribue à la photosynthèse peut être négligée car elle ne représente que 1 à 2 [%] du rayonnement global incident au sommet de la culture, mais la part du rayonnement réfléchi vers l'extérieur n'est pas négligeable dans certains cas, notamment le cas de cultures hors sol.

- **Rayonnement à Grandes longueurs d'onde :**

Les échanges se produisent essentiellement en grande partie entre le sol, les plantes, les parois, et l'extérieur. La nature de couverture joue un rôle très important dans ce genre d'échange car les propriétés de transmission dans l'infrarouge thermique varient suivant la nature du matériau. Les matériaux utilisés pour la couverture doivent être le plus transparent possible dans le domaine du visible et bloquer les infrarouges et donnent naissance à ce que l'on appelle (l'effet de serre) c'est le cas du verre opaque aux grandes longueurs d'onde. Du fait de son importance, les échanges radiatifs entre les différents constituants de la serre ont été profondément étudiés par nombreux auteurs, où la simulation du rayonnement était l'objectif principal de ces études. Par conséquent, ces travaux ont conduit à élaborer des

modèles très détaillés qui prennent en compte l'ensemble des échanges radiatifs en fonction de facteurs caractéristiques.

▪ **Echange hydrique:**

A tous les phénomènes précédemment décrits s'ajoutent d'autres échanges qui sont principalement induits par la présence du végétal dans la serre. Il s'agit du transfert d'espèces constituant l'air de la serre : la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone sont les espèces considérées en priorité dans ces transferts puisqu'elles influent sur les rendements quantitatifs et qualitatifs des cultures.

- **Vapeur d'eau**

La quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur d'eau a une influence sur la transpiration des cultures ainsi que sur le risque de condensation. La transpiration des plantes est le phénomène qui permet la circulation de la sève. Plus l'écart de pression de vapeur d'eau (appelé déficit de pression de vapeur d'eau) entre l'air près du végétal et l'air à l'intérieur des feuilles (chambre sous stomatique) est élevé, plus la transpiration est favorisée. Cette transpiration est alors une source de vapeur d'eau dans l'air au voisinage des cultures. Il résulte de ce phénomène une humidité plus élevée à proximité du végétal que dans le reste de la serre. Pour une serre ouverte, les vitesses de l'air sont plus élevées que pour une serre fermée et cette humidité est convectée (chassée de la serre). L'aération naturelle permet donc de renouveler l'air à proximité du végétal, ce qui maintient un gradient de pression de vapeur d'eau important entre le végétal et l'air. La transpiration étant d'autant plus importante que ce gradient est élevé, ce transfert de vapeur d'eau grâce au mouvement de l'air favorise donc les pertes hydriques du végétal. Ce transport de vapeur d'eau peut néanmoins avoir lieu lorsque la vitesse de l'air est faible du simple fait de gradient de concentration de vapeur d'eau dans l'air. En effet, en présence de différence de concentration de vapeur d'eau, des phénomènes de diffusion tendent à réduire les hétérogénéités. Il s'agit en fait d'un transfert au niveau microscopique des composantes de l'air sans mouvement macroscopique de l'air. Ce transfert a lieu depuis les zones les plus humides (proches du végétal) vers les zones présentant les concentrations de vapeur d'eau les plus faibles ; en particulier, vers les parois lorsqu'il y a condensation, puisque le phénomène de condensation "soutire" de la vapeur d'eau à l'air.

Dans une serre, il est préférable d'éviter la condensation pour deux raisons principales:

- l'apparition d'eau libre sur les feuilles des plantes favorise le développement de certaines maladies (fongiques comme le botrytis par exemple),

- la formation de gouttes sur les parois de la serre réduit sensiblement la transmission du rayonnement.

La condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air se produit lorsque de l'air humide est refroidi jusqu'à atteindre le point de rosée (Figure 1.5). En effet, l'eau se condense quand la pression de vapeur d'eau dans l'air atteint la pression de vapeur saturante (courbe de saturation). Cette pression de vapeur saturante augmente avec la température. Ainsi, un air chaud peut présenter une humidité absolue importante sans qu'il y ait de condensation. Par contre, à humidité absolue constante, si cet air est refroidi, alors son humidité relative (i.e le rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante, usuellement exprimé en pourcentage) augmente jusqu'à atteindre 100% c'est-à-dire le point de rosée : il y a alors condensation.

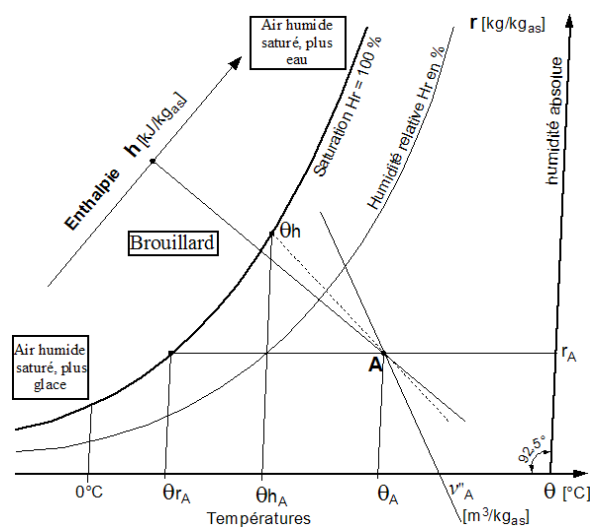


Figure 1.5 : Diagramme de l'air humide (Diagramme de Mollier)

1.5. Synthèse Bibliographique

Approches Utilisés pour la Description du Micro Climat de la Serre

Sous un type de climat (Etage Bioclimatique), le contrôle approprié du micro climat de la serre agricole est nécessaires pour assurer l'uniformité efficace de son environnement.

1.5.1. Les Effets de la Géométrie des Ouvrants et leurs Emplacement

Les travaux de Rico et al., (2006) [3], sur deux serres différentes, ont montré l'importance de la géométrie sur le taux de ventilation pour une serre équipée d'ouvrant en toiture, et une serre équipée de fenêtres d'aération sur les parois, ils ont abouties à des résultats meilleurs pour le premier type de conception concernant l'efficacité de la ventilation. Diverses

modifications telle que la taille et la forme des ouvrants, peuvent améliorer la circulation et l'écoulement de l'air près des cultures ou la vitesse de l'air est très faible et l'humidité de l'air est très élevée [4]. Une étude du bilan énergétique réalisée par Bakker et al., 2008 [5], a aboutie à la quantification de l'énergie thermique nécessaire pour un mètre carré sous serre. Cette étude a été réalisée dans le but d'améliorer la conversion d'énergie, le contrôle du micro climat de l'abri, la réduction de la consommation énergétique et l'augmentation de l'efficacité de la production agricole.

1.5.2. Les Effets du Vent sur le Micro Climat de la Serre

La direction du vent à l'extérieur de la serre est un facteur important pour la détermination du taux de ventilation et du comportement du micro climat à l'intérieur de la serre. La distribution de la vitesse du vent ainsi que sa direction par rapport à l'axe longitudinal de la serre, (variant entre 0° à 90°) peuvent être déduites à partir des données expérimentales. Roy et al., (2005) [6] ont simulé les effets du vent suivant les direction (45° et 90 °) par rapport à l'axe de la serre, ils ont fait apparaitre l'influence de la direction du vent sur la vitesse de l'air intérieur, ainsi que son effet sur la distribution de la température et l'humidité à l'intérieur de la serre; des résultats similaires ont été confirmés par Campen (2008) [7]. Dans une étude réalisée par Ouedl Khaoua et al., (2006) [8], sur quatre types d'ouvertures de ventilation installées sur le toit de la serre, les chercheurs ont abouties à un taux de ventilation variant respectivement entre: 9 et 26,5 le volume de la serre par heure, cet éventail de variation du taux d'aération peut maintenir des conditions climatiques acceptables et uniformes pour des cas particuliers (la direction du vent perpendiculaire à l'axe principal de la serre). Les ouvertures dont la surface est perpendiculaire à la direction du vent génèrent le plus haut taux de ventilation ; Cependant, l'homogénéité de la température et de la vitesse de l'air est induite de la combinaison des ouvertures installées sur la toiture de la serre et des ouvrants réalisés sous la gouttière de l'abri serre (Bournet et al., 2007) [1]. Dans un travail réalisé par Kacira et al., (2008) [9] ce dernier montre que la température de l'air à l'intérieur de la serre était plus élevée sur le côté amont que sur le côté aval de l'écoulement de l'air sous l'effet du vent lorsque les ouvertures d'aérations de la toiture de la serre sont ouverts . Ils ont démontré aussi que le volume d'air occupant la partie de la serre située entre la surface du sol et l'ouverture d'aération été caractérisée par une température plus élevée et une masse d'air plus humide, la combinaison de l'effet du vent et les forces de flottabilité étaient le moteur du mouvement de cette dernière, contrairement à la masse d'air évacuée par les ouvrants situé au niveau supérieur de la toiture où l'intensité de la température et l'humidité

étaient relativement plus faible. Désormais, ces résultats montrent bien que l'augmentation de la ventilation ne peut pas induire automatiquement l'amélioration de l'uniformité et de l'homogénéisation de l'air intérieur. Jusqu'à présent il existe peu d'informations sur le mouvement de l'air affectant l'efficacité du refroidissement et l'uniformité de l'environnement de l'air intérieur de la serre [10]. Ces mêmes résultats ont été rapportés par Bournet et al., (2010) [11].

1.5.3. Effets du Chauffage

Un travail de simulation pour faire apparaître les effets du chauffage du sol de la serre sur la distribution de la vitesse et la température de l'air intérieur, par l'introduction de tuyaux d'eau chaude le long d'une serre durant la période nocturne, a été réalisé par Rouboa et al., [12], l'étude a été réalisée pour trois types de chauffage: chauffage par convection naturelle, chauffage par tubes radiants, et chauffage artificiel par tubes et ventilation naturelle en utilisant le modèle de turbulence. Ils ont observé une augmentation de la température moyenne de l'air variant respectivement entre (2,2 °C - 6,7 °C et 3,5 °C) la turbulence était plus faible dans le premier cas, une légère croissance a été remarquée pour le deuxième cas. Contrairement au premier et au deuxième cas, la turbulence était plus élevée pour le dernier cas, en raison de l'effet de la ventilation naturelle.

1.5.4. Effets de la Ventilation

La ventilation est le processus qui permet à l'air frais d'entrer dans la serre pour faire sortir l'air intérieur caractérisé par des propriétés indésirables. La ventilation est essentielle pour réduire l'intensité de la température, la concentration de CO₂ et contrôler l'humidité relative (Bournet et al., 2006) [13]. L'aération a des effets directement sur les transferts de chaleur et de masse entre l'environnement extérieur et intérieur de la serre, elle affecte ainsi fortement le micro climat qui règne à l'intérieur de la serre. Or une distribution hétérogène des variables microclimatiques dans une serre engendre une hétérogénéité de la production, notamment en termes de qualité. L'efficacité de l'aération joue donc un rôle important dans la production agricole sous abri serre. Le système de ventilation peut être soit un système passif (ventilation naturelle), ou un système actif (ventilation forcée) en utilisant des ventilateurs mécaniques.

La Ventilation Naturelle : Dans la ventilation naturelle, l'air chaud devient moins dense et s'élève. Cet air chaud sort et permet à l'air frais de s'écouler dans la serre à travers les ouvrants de ventilation. Plusieurs facteurs interagissent et interviennent dans la ventilation naturelle :

- Les paramètres géométriques de la serre (hauteur, longueur, et forme de la serre) ;
- le mode de gestion des ouvrants ;
- les aménagements particuliers réalisés à l'intérieur de la serre (présence d'écran thermique ou d'écran d'ombrage, présence de filets d'insectes (*insect-proof*) ;
- les conditions météorologiques qui règnent à l'extérieur de la serre : température, vitesse et direction du vent notamment.

La Ventilation Forcée

La ventilation forcée permet d'éviter la condensation de la vapeur d'eau sur les parois de la serre et surtout sur la surface du feuillage des plantes en forçant l'air à circuler à l'intérieur du couvert végétal par l'installation sur deux faces opposées de la serre les installations suivantes: disposés d'une part des ventilateurs mécaniques, et de l'autre part des ouvertures obturables (surfaces d'ouvertures variables). Les inconvénients de ce dispositif sont une répartition des échanges de chaleur et de masse non homogène, ainsi qu'une consommation d'énergie importante, notamment en période estivale [14]. L'efficacité de la ventilation forcée dépend essentiellement de la puissance des ventilateurs et éventuellement du débit d'eau dans le cas d'une ventilation forcée avec apport d'eau (c-à-d *cooling system*). La ventilation peut être quantifiée par le taux de renouvellement d'air, par la différence de température entre l'air intérieur et extérieur ainsi que par la longueur maximale de balayage d'air entre les deux extrémités de la serre [15]. L'étude réalisée par Hughes et al., (2010) [16] a pris en compte l'effet de l'angle d'inclinaison des volets de l'appareil de ventilation (Wind vent) et de la vitesse d'écoulement de l'air afin d'optimiser les performances du dispositif. L'angle optimal trouvé était entre 35° à 40° avec une vitesse d'air d'environ 4,5 ms⁻¹. Selon Sase (2006) [10] pour une serre équipée d'un système de brumisation combiné à la ventilation naturelle « fog-cooling », l'air refroidi par ce dernier est très susceptibles de déposer de la buée au dessus des plantes. Kim et al., (2007) [17] ont développé un modèle CFD pour simuler la température de l'air et la distribution de l'humidité relative dans une serre sans couvert végétale et équipée par système de brumisation. Une légère différence a été constatée entre les températures simulées et mesurées les gradients variaient de 0,1°C à 1,4°C, quant aux valeurs de l'humidité relative ils variaient entre 0,3% à 6,0%. Les résultats trouvés par cette équipe de recherche ont montré que la meilleure performance de ce type de système de refroidissement se produit lorsque les buses de brumisation sont installées à une hauteur d'environ 2,3m du sol et à 1,9m des parois latérales de la serre avec un espacement

uniforme d'environ 3,7 m, et le meilleur emplacement des injecteurs de la pulvérisation doivent être placées à l'entrée des ouvertures latérales de la serre.

1.5.5. Effets des filets anti insectes

Les filets anti insectes réduisent significativement le taux de ventilation de l'ordre de 33% selon une étude réalisée par Kittas et al., (2005) [18]. Dans une étude réalisée par Harmanto et al., (2006) [19] ils ont démontré que l'utilisation de filets anti insectes (avec différentes tailles de mailles) sur les ouvertures d'aération, a un effet significatif sur le taux de ventilation et crée un gradient de température variant entre 1 et 3°C. Ces résultats ont été confirmés par Majdoubi et al., (2007) [20] , ils ont constaté que les filets anti-insectes réduisent considérablement le flux d'air, ce qui augmente les gradients de température à l'intérieur de la serre de 46%. L'expérimentation réalisée par Teitel et al., (2008a) [21] dans une soufflerie avec des filets anti insectes de différentes mailles variant entre (0,62; 0,52 et 0,4 mm) a montré qu'un filet incliné par rapport au flux d'air réduit la traînée, ce qui permet une augmentation du taux de ventilation variant entre : 15 à 30% et 25% par rapport au flux exposée à un filet perpendiculaire au flux d'air. L'augmentation de la température et de l'humidité induites de l'installation des écrans anti-insectes est particulièrement évidente au voisinage du couvert végétal (Majdoubi et al., 2009) [22]. Une autre étude réalisée par Romero et al., (2010) [23] ont constaté qu'une plus grande surface consacrée aux ouvrants de ventilation sur le toit de la serre peut fortement améliorer la ventilation, tandis que l'extension d'un filets anti-insectes sur les parois latérales ne change guère le taux de ventilation.

1.5.6. Effets du Rayonnement Solaire

Certaines études ont utilisé des modèles de rayonnement et de l'évapotranspiration inspirés des bilans thermiques et hydriques du végétal à fin de réaliser des investigations sur les distributions de température et de l'humidité de l'air intérieur et les interactions existantes entre la culture et l'air environnant [10]. D'après l'étude de Tablada (2005) [24], les coefficients radiatifs de la couverture jouent un rôle crucial dans le maintien de conditions thermiques stables à l'intérieur de la serre, même si la température de l'air extérieur est plus élevée. La température de la couverture de la serre est un paramètre essentiel et nécessaire pour une analyse rigoureuse du transfert de chaleur dans les serres, un modèle du coefficient du transfert thermique a été développé par Impron et al., (2007) [2] pour calculer la transmission du rayonnement à travers la serre, y compris la transmission du rayonnement infrarouge à travers le toit. Tong et al., (2009) [25] ont développé un modèle numérique pour déterminer les distributions temporelle de la température de l'air intérieur sur la base de

données météorologiques instantanés mesurées près de la serre (rayonnement solaire, température de l'air, du sol et de l'air extérieure) , durant la période hivernale au nord de la Chine.

1.5.7. Effet du Gradient de Température

Le transfert radiatif dans le couvert végétal est souvent une préoccupation majeure par les chercheurs qui travaillent dans le domaine, car il influe sur la détermination des deux mécanismes principaux qui agissent sur les fonctions physiologiques des plantes: transpiration et photosynthèse. Ce déficit est maintenant le sujet qui aura probablement beaucoup d'attention par les chercheurs dans les prochaines années à venir (Bournet et al., 2010) [11].

Pontikakos et al., (2006) [26] ont analysé les données obtenues à partir d'un modèle CFD, montrant que la température externe de la couverture de la serre est un paramètre crucial concernant la distribution des températures intérieures de la serre, ils ont démontré que pour des températures extérieures et une direction du vent spécifique, la vitesse de l'air intérieur devienne un paramètre important concernant les fonctions physiologiques des plantes. Nebbali et al., (2006) [28] ont utilisé une méthode semi-analytique pour déterminer le profil de température dans le sol de la serre à partir de paramètres météorologiques et d'autres caractéristiques thermo physiques des composantes de la serre, afin de réaliser une évaluation de l'échange de chaleur entre la surface du sol et l'air intérieur. En outre, les travaux de Majdoubi et al., (2009) [22], dans le même contexte ont démontré que les phénomènes de convection et rayonnement sont les formes dominantes de transfert de chaleur, dans les serres agricoles, désormais les mesures effectuées par cette équipe de recherche montrent bien que la différence entre la température de l'air l'intérieur et l'extérieur de la serre est fortement liée au rayonnement solaire et à la vitesse du vent. Cependant, Chow et al., (2010) [29] ont obtenu des résultats assez remarquables concernant les forces de flottabilité due aux gradients de températures et des échanges thermiques:

1. Le Rayonnement thermique en absence du vent modifie la distribution de la température de l'air par rayonnement thermique sous l'effet d'échange radiatif entre une paroi chaude et paroi froide de la serre, ce phénomène affecte la température de l'air intérieur par conduction et convection.
2. La prise en compte de l'absorption du rayonnement thermique par l'air augmente l'effet de la redistribution thermique à l'intérieur de la serre en permettant à l'air d'absorber et de rayonner de la chaleur, ce qui réduit les gradients de température supplémentaire.

3. Les conditions aux limites thermiques affectent beaucoup les seuils de température absolue prévus, mais n'affectent pas la distribution de la température.
4. Les conditions de rayonnement jouent un rôle important dans la redistribution de la chaleur, ainsi que les conditions atmosphériques, notamment l'humidité relative, pour le calcul des transferts radiatifs dans la serre.

1.5.8. Les Phénomènes de Turbulence et de Flottabilité dans la serre

Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, le CFD est devenu de plus en plus sophistiqué. Selon Norton et al., (2006) [30], le modèle de turbulence k- ϵ le plus utilisé dans certains cas, fournit des résultats insuffisants, désormais le choix des modèles de turbulence doit être basé sur les phénomènes impliqués dans la simulation. Différents modèles de turbulence peuvent provoquer des incohérences dans les profils de vitesse, de température et d'humidité, ce qui confirme l'importance du choix du modèle qui correspond le mieux aux conditions réelles de turbulence (Roy et al., 2005) [6]. Dans le travail réalisé par Teitel et al., (2005) [31], les chercheurs ont montré que l'écoulement turbulent est principalement due à l'air froid qui s'introduit dans la serre, ce qui produit des recirculations à l'intérieur de la serre. Roy et al., (2005) [6] ont montré que les effets de la direction du vent sur les paramètres climatiques de la serre sont généralement détectables en utilisant des modèles de turbulence différents du modèle k- ϵ , le travail a été réalisé dans le but de déterminer le bilan énergétique entre le flux de transpiration et le flux de rayonnement du couvert végétal. En outre, Rouboa et al., (2007) [12] ont noté que le modèle de turbulence RNG est le mieux adapté pour simuler des microclimats dans les serres tunnel. Rico et al., (2008) [3] ont indiqué que les effets des gradients de températures sont les principales forces motrices qui provoquent le phénomène de flottabilité. Ces mécanismes fournissent un moyen simple pour étudier les modes de ventilation et le mouvement de l'air intérieur. Majdoubi et al., (2009) [22] ont montré que les forces de flottabilité induites par la température de l'air fait augmenter significativement l'humidité entre les ouvertures d'aérations et les feuillages des plantes et accélèrent le rythme de l'évacuation de la vapeur d'eau et améliorent l'homogénéisation du climat intérieur. Fidaros et al., (2010) [32] ont étudié la turbulence à l'intérieur d'une serre agricole installée sous un climat méditerranéen en Grèce; ils ont constaté que les effets de la température extérieure sur le microclimat de la serre est très importants car la variation de la température intérieure est liée étroitement à la convection naturelle. et les zones de recirculations se situent essentiellement dans les zones où les effets du courant d'air est faible près des angles de la serre et du couvert végétal. Selon Bournet et al., (2010) [11], les

modèles de turbulences K- ϵ même s'ils ont été utilisés pendant une longue période dans les travaux liés à l'agronomie et l'environnement, d'autres approches empiriques basées sur l'utilisation des ERP n'ont jamais été appliquées pour la modélisation du climat sous serre et pourraient être utilisés pour des situations plus complexes. Vera et al., (2010b) [33] ont étudié la flottabilité de l'air dans des espaces clos, ils ont aboutis aux conclusions suivantes:

1. Le mouvement de l'air et l'échange d'humidité sont étroitement liés à la différence de température entre la partie inférieure et la partie supérieure de l'enceinte; plus il fait chaud dans la partie supérieure, plus les phénomènes des transports aériens diminues.
2. L'existence des courants d'air du bas vers le haut dans une serre provoquent une distribution non homogène de la température dans la partie supérieure de la serre.
3. La ventilation naturelle limite fortement le débit d'air à travers les ouvertures d'aérations.

La principale difficulté pour le choix du modèle de turbulence pour les serres agricoles c'est que les systèmes agro-serre couvrent une grande gamme d'échelles qui nécessitent généralement différentes approches de modélisation (Bournet et al., 2010) [11].

1.5.9. Incorporation des Cultures dans la Modélisation

L'effet des plantes sur la ventilation des serres agricoles a également été étudié auparavant. Bournet et al., (2007) [1], en se basant sur les études de Nederhoff (1985) [34], et Lee (1998) [35], ils ont constaté qu'une culture de 90 cm de hauteur et de faible densité fait diminuer l'efficacité de la ventilation d'environ 12 et 15%. Roy et al., (2005) [6] ont développé un modèle 3D pour la caractérisation des paramètres climatiques dans une serre agricole, on intégrant cinq rangées de plantes de tomates comme un milieu poreux tout en considérant les différents phénomènes à savoir: le phénomène de flottabilité, le transfert de masse (humidité) entre la culture et son milieu environnant, ainsi que la circulation de l'air à l'intérieur des plantes. Les coefficients de transfert de chaleur et de masse ont été calculés à partir des caractéristiques de la couche limite laminaire de la feuille de la plante de la tomate, et de la vitesse de l'air à l'intérieur du couvert végétale variant entre 0.1 à 0.3 ms^{-1} . Par ailleurs, une étude de simulation réalisée par Sapounas et al., (2007) [36] sur une culture de tomate prise comme un milieu poreux, tout en tenant compte de l'adjonction du phénomène de flottabilité pour développer un modèle qui fait apparaître le mécanisme de la chute de pression du flux d'air causé par la présence du végétale dans la serre. Le modèle dépend du stade foliaire de la plante et de son état de croissance. Une étude réalisée par Roy et al., (2008) [37] au niveau de la feuille d'une plante de Soja, ont utilisé un dispositif expérimental

constitué de sondes et de capteurs pour mesurer la température, l'humidité relative et les différents flux de chaleur échangés entre les feuilles et leur environnement, dans le but d'obtenir des valeurs de la résistance stomatique de la feuille de plante; les valeurs trouvées ont été entre 66 à 200 sm^{-1} . Teitel et al., (2008b) [38] ont construit un modèle à petite échelle, il ont constaté que la direction du vent affecte de manière significative le taux de ventilation et la distribution de la température dans le couvert végétal. En outre, le couvert végétal dans la serre agricole fait induire une résistance aérodynamique (force de traînée) sur les écoulements d'air qui provoquent des interactions dans le processus de la transpiration de la plante, la distribution des températures et d'humidité du micro climat (Bournet et al., 2010) [11].

1.5.10. Les effets de l'humidité

Roy et al., (2005) [6] ont réalisé un travail de simulation de l'effet de la direction du vent (variation de l'angle entre les valeurs $(0^\circ, 45^\circ \text{ et } 90^\circ)$ par rapport à l'axe de l'orientation de la serre) dans le but de déterminer la distribution des paramètres du micro climat de la serre (la vitesse, la température et l'humidité), ils ont constaté une bonne approximation concernant la distribution de l'humidité. Le même modèle a été utilisé par Demrati et al., (2007) [39], pour estimer les besoins en eau d'une culture de banane sous serre dans les régions arides. Roy et al., (2008) [37] ont étudié l'humidité sur la surface des feuilles; les modèles de l'évapotranspiration et du flux d'air ont été intégrés dans un modèle unique en tenant compte de la résistance stomatique du feuillage de la plante. Campen (2008) [40] a montré que le climat distribué est plus homogène si la serre est équipée par un système de ventilation et un procédé classique d'extraction de vapeur. Ces mêmes résultats ont été démontrés par Kim et al., (2008) [40] en utilisant un modèle 3D permettant d'identifier la répartition de l'humidité relative dans une serre agricole.

1.5.11. Validation des Modèles

Selon Sase (2006) [10], les progrès récents du CFD ont accéléré d'une manière significative l'analyse détaillée du microclimat de la serre. Cependant, plus de détails dans ce domaine sont devenus nécessaires pour répondre aux besoins d'information concernant chaque élément impliqué dans le climat distribué de la serre (Flores et al., 2010) [42]. La qualité des résultats est souvent déduite de la concordance entre les données expérimentales et les résultats théoriques ou numériques. Néanmoins, jusqu'à présent aucune procédure standard n'a été adoptée pour évaluer les précisions des simulations, car le type de comparaison est souvent différent d'une étude à une autre (Bournet et al., 2010) [11]. Les nouvelles technologies telles que l'anémométrie sonique, et les caméras infrarouges ont

beaucoup contribuer pour compléter les prévisions des études et de rapprocher le réalisme des simulations (Norton et al., 2007) [43]

Les modèles statistiques

L'utilisation des modèles statistiques développés par Pontikakos et al., (2006) [26] est simple et sont moins gourmands concernant le temps de calcul, désormais ils sont moins coûteux que les modèles CFD. Ce type de modèle peut être utilisé pour les estimations en temps réel de la température et du débit dans une serre.

Les types de modèles : Récemment Teitel et al., (2008b) [38], ainsi que Chen et al., (2010) [44] ont développés plusieurs modèles (analytique, empirique, petite échelle, éseau multizones, et CFD) pour simuler le climat sous serre et prédire les taux de ventilation et de transpiration. Ils ont constatés ce qui suit:

- 1- Le modèle analytique donne généralement une évaluation globale du phénomène.
- 2- Le modèle empirique a des capacités similaires à celles du modèle analytique, mais il est développé à partir d'une base de données expérimentale spécifique.
- 3- Le modèle à petite échelle peut être utile pour examiner les problèmes de ventilation si une similitude de flux peut être maintenue entre le modèle et la réalité.
- 4- Le modèle à grande échelle est le plus fiable pour les prédictions, mais il est coûteux et prend beaucoup de temps de calcul.
- 5- Le modèle multizones est un outil très utile pour la conception et la prédiction des phénomènes, mais ne peut pas fournir des informations détaillées.
- 6- Le modèle CFD fournit des informations plus détaillées c'est le plus sophistiqué. Cependant, le modèle doit être validé par données expérimentales et l'utilisateur doit avoir des connaissances en mécanique des fluides et en calcul numérique. Par conséquent, le choix d'un modèle approprié dépend du problème à résoudre.

1.5.12. Éléments finis vs volumes finis

Dans une étude réalisée par Molina et al., (2010) [45] sur l'efficacité de la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode de volumes finis (FVM) pour deux écoulements turbulents incompressibles, ils ont constaté que la MEF nécessite deux fois plus de temps de calcul et 10 fois plus de mémoire de stockage que la FVM. C'est pour cette raison que les logiciels basés sur la méthode des volumes finis FVM (ANSYS / FLUENT v 6.3.) englobent le paquet de la CFD les plus fréquemment utilisés dans le domaine de la thermique de bâtiments.

Chapitre II

Formulation Mathématique

2.1. Introduction:

La modélisation d'un problème réel est basée essentiellement sur les lois de la physique (mécanique, thermodynamique, électromagnétisme, acoustique, etc.) en utilisant le concept du milieu continu. Généralement, ces lois expriment le bilan des influences subies par des grandeurs physiques (masse, énergie, quantité de mouvement, ...).

Ces lois se traduisent mathématiquement par des Equations Différentielles Ordinaires (EDO) ou par des Equations aux Dérivées Partielles (EDP), associées pour une étude bien déterminé à des conditions aux limites sur le domaine considéré ainsi qu'à des conditions initiales (cas instationnaire) qui dépendent du phénomène présenté. La résolution des EDO ou EDP nous permet d'évaluer les grandeurs physiques dans le domaine.

2.2. Equations générales

Concernant notre étude (climat sous serre cultivé), il s'agit des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, des espèces (vapeur d'eau, ...) et des caractéristiques turbulentes (énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation) en présence d'un milieu poreux (culture).

2.2.1. Equation de continuité

Elle exprime le principe de conservation de la masse sur chaque élément de fluide contenu dans le volume de contrôle lorsque l'on suit ce dernier dans son mouvement. Elle

s'écrit:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Tels que:

ρ : la masse volumique du fluide, u_i : le vecteur vitesse.

2.2.2. Equation de quantité de mouvement

Elle est développée en appliquant le principe fondamental de la dynamique sur un volume élémentaire de fluide, soit :

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho f - \nabla P + \Delta \tau \quad (\text{II.2})$$

Cette équation exprime l'équilibre entre le taux de variation de quantité de mouvement par unité de volume et les forces extérieures appliquées à l'unité de volume : les forces de volume ρf , la force de pression ∇P et la force de viscosité $\nabla \tau$.

Cette équation prend la forme simplifiée des équations de *Navier-Stokes* dans le cas des fluides newtoniens:

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho f - \nabla P + \mu \nabla^2 u + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot u) \quad (\text{II.3})$$

Avec : μ la viscosité dynamique de l'air.

Les milieux poreux sont modélisés dans Fluent par l'ajout d'un terme source pour les équations d'écoulement. Ce terme source est composé de deux parties: un terme de perte visqueuse (Darcy, le premier terme sur le côté droit de l'équation de II.4), et un terme de perte d'inertie (le second terme sur le côté droit de l'équation II.4)

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{module} v_j \right) \quad (\text{II.4})$$

Où S_i est le terme source pour l'ième (x, y ou z) équation du mouvement, et D et C sont des matrices prédéfinis. Ce terme (puits) contribue comme un gradient de pression dans la cellule poreuse, créant ainsi une chute de pression qui est proportionnelle à la vitesse du fluide (ou de la vitesse au carré) dans la cellule.

Pour le cas d'un milieu poreux simple et homogène:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho v_{module} v_i \right) \quad (\text{II.5})$$

Où α est la perméabilité du milieu poreux et C_2 est le coefficient de résistance inertielle.

2.2.3. L'équation d'énergie

Cette équation est déduite en appliquant le premier principe de la thermodynamique, la forme finale du bilan énergétique du système s'écrit:

$$\underbrace{\frac{d}{dt}(\rho C_p T)}_I = \underbrace{\nabla(\lambda \nabla T)}_{II} + \underbrace{T \beta \frac{dP}{dt}}_{III} + \underbrace{\mu \Phi}_{IV} + \underbrace{q}_{V} \quad (\text{II.6})$$

- I : variation totale d'énergie du système.
- II : variation d'énergie due à la conduction.
- III : variation d'énergie due à la compressibilité.
- IV : dissipation visqueuse.
- V : production interne de chaleur.

Dans notre cas, la source vient du rayonnement thermique. Pour cela, on résout l'Equation de Transfert Radiatif (ETR) [46], qui est couplée à l'équation de conservation de l'énergie à travers le terme source "q" comme suit:

$$q = S_h = \text{div} \left[\int_0^{4\pi} L(\vec{s}) \cdot \vec{\Omega} d\Omega \right] \quad (\text{II.7})$$

L : luminance, $\vec{S}$: vecteur direction, Ω : angle solide.

Equation de Transfert Radiatif:

L'Equation de Transfert Radiatif (ETR) pour un milieu absorbant, émettant et diffusant à une position $\vec{r}$ dans une direction $\vec{S}$ est:

$$\underbrace{\frac{dL(\vec{r}, \vec{S})}{ds}}_I + \underbrace{(a + \sigma_s) L(\vec{r}, \vec{S})}_{II} = \underbrace{an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi}}_{III} + \underbrace{\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} L(\vec{r}, \vec{S}') \Phi(\vec{S} \cdot \vec{S}') d\Omega'}_{IV} \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$\vec{r}$: vecteur position, $\vec{S}$: vecteur direction, $\vec{S}'$: vecteur direction de diffusion, a : coefficient d'absorption (m^{-1}), σ_s : coefficient de diffusion (m^{-1}), n : indice de réfraction, σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.672 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), L : luminance, T : température locale (K), Φ : fonction de phase, Ω' : angle solide et $(a + \sigma_s)s$: l'épaisseur optique du milieu.

Chaque terme de l'ETR (eq. II.8) est montré sur la figure 2.1, et est définie comme suit:

I : Variation de la luminance à travers l'élément ds du milieu semi transparent considéré.

II : Perte par absorption (a) et diffusion (σ_s). La première perte est due à l'absorption du rayonnement par le milieu, tandis que pour la deuxième perte, une partie du rayonnement provenant de la direction $\vec{S}$ est diffusée par le milieu dans toutes les autres directions $\vec{S}'$.

III : Gain par émission propre, ce renforcement du rayonnement est lié à la température du milieu.

IV : Gain par diffusion. Il représente le rayonnement issu de toutes les autres directions $\vec{S}'$ de l'espace, redirigé vers la direction $\vec{S}$ par diffusion.

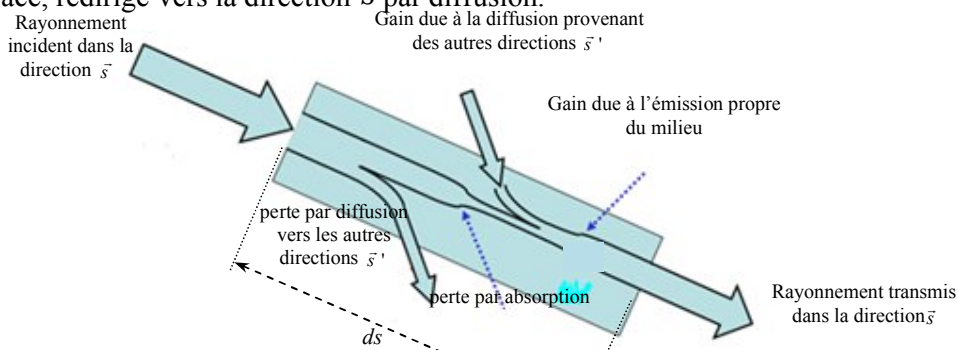


Figure 2.1 : – Différentes contributions du phénomène radiatif local.

L'équation II.8 est de type intégral-différentielle et est difficile à résoudre analytiquement, alors on a utilisé la méthode des ordonnées discrètes pour l'a résoudre [46].

2.2.4. Equation de conservation d'espèces (vapeur d'eau)

Dans une serre les composants de l'air se trouvent en quantité variable selon le lieu considéré. Les concentrations de ces composants (espèces) varient au voisinage des plantes et dans le reste de la serre. Donc ces espèces vont se diffuser à travers l'air. On peut décrire ce phénomène sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho y_e) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho y_e u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \Gamma_e \frac{\partial y_e}{\partial x_i} \right) + S_e \quad (\text{II.9})$$

Avec : y_e : la fraction massique, qui présente le rapport entre la masse de l'espèce e et la masse totale de toutes les espèces contenues dans le volume de contrôle et Γ_e est le coefficient de diffusion.

2.2.5. Elaboration des modèles de turbulence :

Il existe trois principales méthodes de modélisation d'un écoulement turbulent : la simulation numérique directe (*DNS: Direct Numerical Simulation*), dans laquelle on cherche à représenter la totalité des phénomènes physiques (le système d'équations précédemment décrit), la simulation des grandes échelles (*LES: Large Eddy Simulation*), dans laquelle on représente seulement les plus gros tourbillons en fonction du temps, et la simulation à moyenne de Reynolds (*RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes*) dans laquelle on représente seulement l'écoulement moyen. Cette dernière méthode est couramment employée dans les codes de calcul de mécanique des fluides numérique.

Dans le présent travail, on a basé sur la troisième méthode (*RANS*) pour la modélisation de la turbulence.

2.2.6. La simulation des équations de Navier Stokes moyennées (RANS)

Cette approche dite de Reynolds, basée sur les lois de la statistique, considère que toute grandeur physique est une fonction aléatoire de l'espace et du temps dont on décompose les valeurs instantanées ϕ en une composante moyenne $\bar{\phi}$ et une autre fluctuante ϕ' :

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (\text{II.10})$$

Pour deux variables aléatoires $\Phi(x_i, t)$ et $\Psi(x_i, t)$, en se basant sur la relation de décomposition précédemment décrite, on considère les propriétés suivantes:

$$\begin{aligned}
\overline{\Phi + \Psi} &= \bar{\Phi} + \bar{\Psi} \\
\overline{\lambda \Phi} &= \lambda \bar{\Phi} ; \lambda = Cte \\
\overline{\bar{\Phi}} &= \bar{\Phi} \\
\overline{\Phi \cdot \Psi} &= \bar{\Phi} \bar{\Psi} + \overline{\Phi' \Psi'} \\
\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial t} &= \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial t} , \quad \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} \\
\int \overline{\Phi} dt &= \int \bar{\Phi} dt , \quad \int \overline{\Phi} dx = \int \bar{\Phi} dx
\end{aligned} \tag{II.11}$$

On applique ces dernières propriétés sur les équations II.1, II.3, II.6 et II.9, on trouve le système d'équations suivant:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{II.12}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_j u'_i} \right) + f_i \tag{II.13}$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) + \frac{q}{\rho C_p} \tag{II.14}$$

$$\frac{\partial \bar{y}_e}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{y}_e}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_e \frac{\partial \bar{y}_e}{\partial x_j} - \overline{u'_j y'_e} \right) + S_e \tag{II.15}$$

Les équations ainsi trouvées sont appelés équations de mouvement moyennées ou équations de Reynolds (*RANS*). On remarque l'apparition des termes supplémentaires $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$, $(-\rho C_p \overline{u'_j T'})$ et $(-\rho \overline{u'_j y'_e})$ appelés respectivement: tensions de Reynolds, flux turbulent thermique et flux turbulent massique. Ces termes doivent être modélisés afin de fermer le système d'équations.

2.2.7. Concept de la viscosité turbulente:

Généralement, les méthodes de fermeture sont classées en fonction du nombre d'équations supplémentaires à résoudre (Modèle à zéro équation, à une équation et à deux équations). La stratégie adoptée par les modèles du premier ordre repose sur le concept de viscosité turbulente proposé par Boussinesq. L'approche de moyenne de Reynolds appliquée à la modélisation de la turbulence exige que les contraintes de Reynolds dans les équations

déjà trouvées soient correctement modélisées. Une méthode courante emploie l'hypothèse de Boussinesq pour relier le tenseur de Reynolds aux gradients de vitesse moyenne tels que:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (\text{II.16})$$

Ici μ_t : la viscosité turbulente qui est une propriété d'écoulement et n'est pas du fluide. k : est l'énergie cinétique turbulent définie par:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right) \quad (\text{II.17})$$

Par analogie on détermine les termes fluctuants:

$$-\rho \overline{u'_i T'} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (\text{II.18})$$

$$-\rho \overline{u'_i y'_e} = \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial y_e}{\partial x_i} \quad (\text{II.19})$$

Où : Pr_t et Sc_t sont respectivement les nombres de Prandtl et Schmidt turbulent. En général, on admet que $Pr_t = 1$ et $Sc_t = 1$.

L'avantage de cette approche est le coût de calcul relativement faible associé au calcul de la viscosité turbulente.

2.2.8. Modélisation de la viscosité turbulente

La viscosité turbulente μ_t doit être déterminée en fonction du modèle utilisé. Dans ce travail elle est déterminée en combinant l'énergie cinétique turbulente, k , et son taux de dissipation ε , comme suit:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.20})$$

Où C_μ est une constante.

Pour déterminer l'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ε , deux équations de transport supplémentaires pour k et ε , sont considérées. Ce modèle à deux équations de transport est appelé modèle k - ε et est largement utilisé depuis longtemps.

2.2.9. Le modèle k-ε standard

C'est un modèle semi-empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente (k) et son taux de dissipation (ε). Il est obtenu tout en supposant que

l'écoulement est turbulent, et les effets de la viscosité moléculaire est négligeable. Donc le modèle $k-\varepsilon$ n'est valable que pour les écoulements totalement turbulents.

L'équation de l'énergie cinétique s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{Pr_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (\text{II.21})$$

L'équation de la dissipation visqueuse donnée par :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.22})$$

Avec le taux de dissipation visqueuse $\varepsilon = C_d \frac{k^{3/2}}{l}$, Les constantes du modèle ont les valeurs :

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, Pr_k = 1.0, Pr_\varepsilon = 1.3 [48].$$

2.2.10. Equations gouvernantes le climat sous serre:

Le système d'équations a été établi sur les hypothèses suivantes :

- Le fluide : Newtonien et incompressible
- L'écoulement : stationnaire et bidimensionnel.
- Les propriétés thermophysiques du fluide supposées constante.
- La dissipation visqueuse est négligeable.

En tenant compte de ces hypothèses, on obtient le système suivant :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.23})$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \nu_t \right) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \quad (\text{II.24})$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{Pr_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (\text{II.25})$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II.26})$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\alpha + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \frac{q}{\rho C_p} \quad (\text{II.27})$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{y}_e}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\Gamma_e + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \bar{y}_e}{\partial x_j} \right) + S_e \quad (\text{II.28})$$

Dans ce travail, trois types de serres sont présentées à savoir: serre à pieds droits (figure 2.2), serre tunnel (figure 2.3) et serre de type Chapel (figure 2.4). Cette étude est bidimensionnelle (plan (X,Z) passant par le milieu de chaque type de serre).

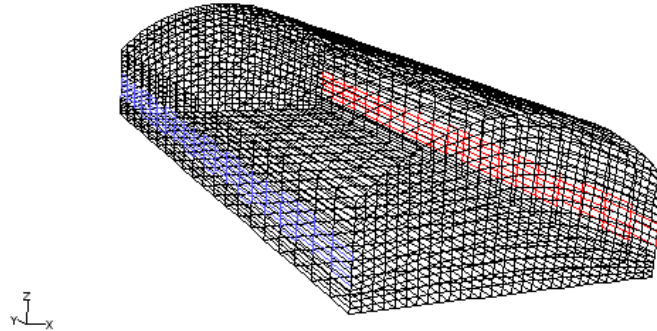


Figure 2.2: Maillage de la Serre à pieds droits

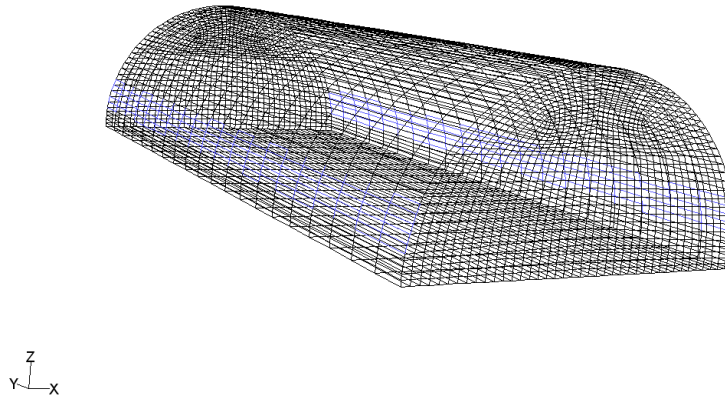


Figure 2.3: Maillage de la Serre tunnel

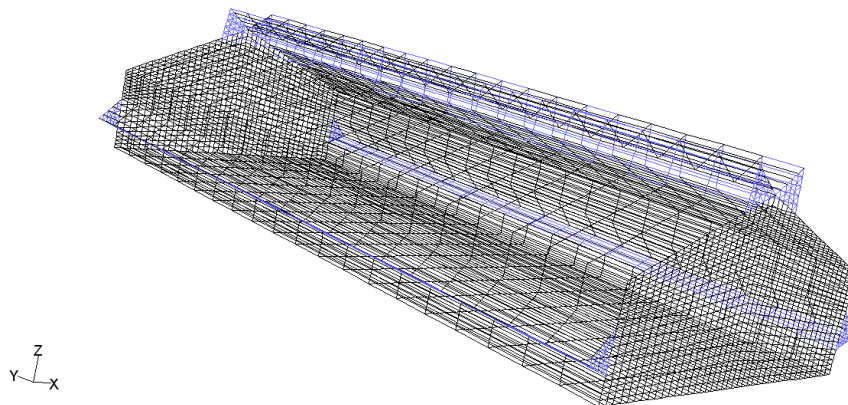


Figure 2.4: Maillage de la Serre Chapel

2.4. Discrétisation des équations

La discrétisation permet de transformer le système d'équations différentielles qui est compliqué en système d'équations algébriques facile à résoudre. Pour discrétiser ce système, on distingue différentes méthodes :

- Méthode des différences finies.
- Méthode des volumes finis.
- Méthode des éléments finis.
- Méthode des spectrales.

Dans ce travail on a utilisé le code commercial Fluent 6.3.26 (basé sur la méthode des volumes finis) pour résoudre le système d'équations différentielles déjà trouvé. On présente dans ce qui suit la méthode de discrétisation des volumes finis [49, 50].

2.5. Méthode des volumes finis :

La technique des volumes finis consiste à discrétiser la forme intégrale des équations de conservations, à l'aide du théorème de *Green-Ostrogradsky* où les intégrales de volume sont converties en intégrales sur la surface. Les lois de conservation intégrées sur un volume élémentaire dV (une maille) de frontière S peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (\text{II.29})$$

Où ϕ est le scalaire transporté, ρ est la masse volumique, u et v sont les composante de la vitesse suivant les directions x et y , Γ_ϕ est le coefficient de diffusion dépend du scalaire transporté et S_ϕ est le terme source qui dépend aussi du scalaire transporté.

Dans la méthode des volumes finis, on manipule des valeurs moyennes prises sur un volume de contrôle entourant les points de calcul (figure 2.5).

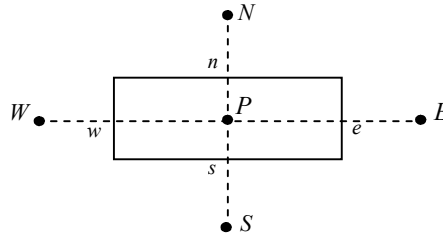


Figure 2.5 : volume de contrôle entourant le point central P.

En intégrant l'équation de transport sur le volume de contrôle, on a :

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dt dy dx}_{I} + \underbrace{\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) dt dy dx}_{II} + \underbrace{\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) dt dy dx}_{III} = \\
 & \underbrace{\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dt dy dx}_{IV} + \underbrace{\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dt dy dx}_{V} + \underbrace{\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} S dt dy dx}_{VI}
 \end{aligned} \tag{II.30}$$

Après intégration des différents termes par la méthode des volumes finis [49,50], on trouve :

$$\begin{aligned}
 & [(\rho\phi)_P^1 - (\rho\phi)_P^0] \Delta x \Delta y = f \cdot \left[\left(\frac{\Gamma_e (\phi_E^1 - \phi_P^1)}{(\delta x)_e} \right) - \left(\frac{\Gamma_w (\phi_P^1 - \phi_W^1)}{(\delta x)_w} \right) \right] \Delta y \\
 & + (1-f) \left[\left(\frac{\Gamma_e (\phi_E^0 - \phi_P^0)}{(\delta x)_e} \right) - \left(\frac{\Gamma_w (\phi_P^0 - \phi_W^0)}{(\delta x)_w} \right) \right] \Delta y + f \cdot \left[\left(\frac{\Gamma_n (\phi_N^1 - \phi_P^1)}{(\delta y)_n} \right) - \left(\frac{\Gamma_s (\phi_P^1 - \phi_S^1)}{(\delta y)_s} \right) \right] \Delta x \\
 & + (1-f) \left[\left(\frac{\Gamma_n (\phi_N^0 - \phi_P^0)}{(\delta y)_n} \right) - \left(\frac{\Gamma_s (\phi_P^0 - \phi_S^0)}{(\delta y)_s} \right) \right] \Delta x + \frac{1}{2} \cdot f \cdot [(\rho u)_e (\phi_E^1 + \phi_P^1) - (\rho u)_w (\phi_P^1 + \phi_W^1)] \Delta y \\
 & + \frac{1}{2} (1-f) [(\rho u)_e (\phi_E^0 + \phi_P^0) - (\rho u)_w (\phi_P^0 + \phi_W^0)] \Delta y + \frac{1}{2} \cdot f \cdot [(\rho v)_n (\phi_N^1 + \phi_P^1) - (\rho v)_s (\phi_P^1 + \phi_S^1)] \Delta x \\
 & + \frac{1}{2} (1-f) [(\rho v)_n (\phi_N^0 + \phi_P^0) - (\rho v)_s (\phi_P^0 + \phi_S^0)] \Delta x + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} S_\phi dt dy dx
 \end{aligned} \tag{II.31}$$

On pose $F = \rho u$, $D = \frac{\Gamma}{\delta x}$ et $P = \frac{F}{D}$.

Ainsi la forme réduite :

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \tag{II.32}$$

Où :

$$a_E = D_e A(|P_e|) + [-F_e, 0] \tag{II.33}$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + [F_w, 0] \tag{II.34}$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + [-F_n, 0] \tag{II.35}$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + [F_s, 0] \tag{II.36}$$

Où le symbole $[a, b]$ désigne le maximum entre a et b , tandis que le symbole $|P|$ désigne la valeur absolue de P .

$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} \tag{II.37}$$

$$b = \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} S_\phi dt dy dx + a_p^0 \phi_p^0 \quad (\text{II.38})$$

$$a_p = a_E + a_w + a_n + a_s + a_p^0 \quad (\text{II.39})$$

$$F_e = (\rho u)_e, D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e} \text{ et } P_e = \frac{F_e}{D_e}; \quad (\text{II.40})$$

$$F_w = (\rho u)_w, D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w} \text{ et } P_w = \frac{F_w}{D_w}; \quad (\text{II.41})$$

$$F_n = (\rho u)_n, D_n = \frac{\Gamma_n \Delta y}{(\delta x)_n} \text{ et } P_n = \frac{F_n}{D_n}; \quad (\text{II.42})$$

$$F_s = (\rho u)_s, D_s = \frac{\Gamma_s \Delta y}{(\delta x)_s} \text{ et } P_s = \frac{F_s}{D_s}; \quad (\text{II.43})$$

La fonction $A(|P|)$ s'écrit pour différent schéma comme suit :

$$\text{Schéma aux Différences Centrées} \quad A(|P|) = 1 - 0.5|P|; \quad (\text{II.44})$$

$$\text{Schéma Upwind} \quad A(|P|) = 1; \quad (\text{II.45})$$

$$\text{Schéma Hybride} \quad A(|P|) = [0, 1 - 0.5|P|]; \quad (\text{II.46})$$

$$\text{Schéma au Loi de Puissance} \quad A(|P|) = [0, (1 - 0.1|P|)^5]; \quad (\text{II.47})$$

$$\text{Schéma Exponentielle} \quad A(|P|) = |P| / [\exp(|P|) - 1]; \quad (\text{II.48})$$

Dans notre cas on a choisi le schéma Upwind d'ordre deux qui s'écrit à la face "w" comme suit :

$$A(|P|) = 1; \quad \phi_w = \phi_w + \nabla \phi \cdot \vec{r}, \quad \vec{r} = \overrightarrow{Ww}, \quad \nabla \phi = \frac{\phi_w - \phi_P}{\|\overrightarrow{WP}\|} \quad (\text{II.49})$$

2.6. Equations discrétisées :

Les équations gouvernantes les différents phénomènes présents dans la serre sont discrétisées par la méthode des volumes finis décrite précédemment. On définit aussi la notion du maillage sur lequel est basé la méthode des volumes finis (les variables scalaires comme pression, concentration, température, énergie cinétique) sont définies dans les nœuds aux centres, tandis que les flux sont définies aux frontières comme le montre la figure 2.6.

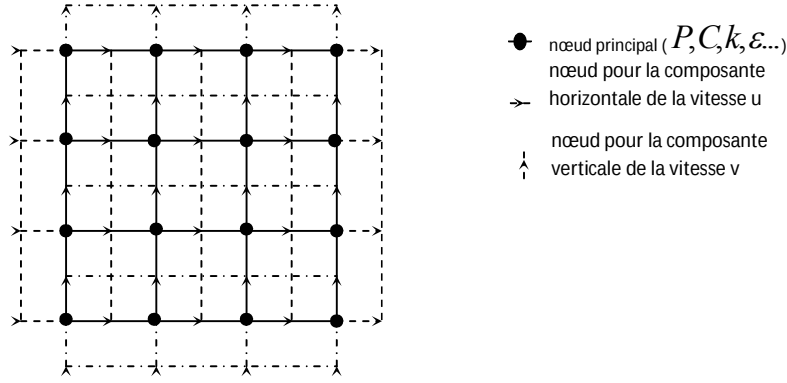


Figure 2.6 : maillage décalé en vitesse - scalaire

On obtient le système d'équations algébriques suivant:

$$(\rho u)_e - (\rho u)_w + (\rho v)_n - (\rho v)_s = 0 \quad (\text{II.50})$$

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b_u + (P_P - P_E) A_e \quad (\text{II.51})$$

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b_v + (P_P - P_N) A_n \quad (\text{II.52})$$

$$a_p^{ye} y e_p = a_E^{ye} y e_E + a_W^{ye} y e_W + a_N^{ye} y e_N + a_S^{ye} y e_S + b^{ye} \quad (\text{II.53})$$

$$a_p^T T_p = a_E^T T_E + a_W^T T_W + a_N^T T_N + a_S^T T_S + b^T \quad (\text{II.54})$$

$$a_p^k k_p = a_E^k k_E + a_W^k k_W + a_N^k k_N + a_S^k k_S + b^k \quad (\text{II.55})$$

$$a_p^\varepsilon \varepsilon_p = a_E^\varepsilon \varepsilon_E + a_W^\varepsilon \varepsilon_W + a_N^\varepsilon \varepsilon_N + a_S^\varepsilon \varepsilon_S + b^\varepsilon \quad (\text{II.56})$$

2.6. Algorithme SIMPLE pour la résolution des équations discrétisées :

2.6.1. Equation de correction de la vitesse

Soit un champ de pression initial P^* . La solution provisoire des équations (II.51) et (II.52) sera noté u^* et v^* (notons que u^* et v^* ne vérifient pas l'équation de continuité).

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + A_e (P_P^* - P_E^*) + b \quad (\text{II.57})$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + A_n (P_P^* - P_N^*) + b \quad (\text{II.58})$$

A ce stade, aucune des variables n'est correcte. Elles nécessitant une correction.

$$\begin{aligned}
 P &= P^* + P' & (a) \\
 u &= u^* + u' & (b) \\
 v &= v^* + v' & (c)
 \end{aligned} \quad (\text{II.59})$$

Nous pouvons alors déduire les équations pour u' et v' en faisant la différence entre (II.51) et

(II.57) et entre (II.52) et (II.58) :

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + A_e (P'_P - P'_E) + b \quad (II.60)$$

$$a_n v'_n = \sum a_{nb} v'_{nb} + A_n (P'_P - P'_N) + b \quad (II.61)$$

Pour linéariser les équations (II.60) et (II.61), les termes $\sum a_{nb} u'_{nb}$ et $\sum a_{nb} v'_{nb}$ ont été négligé. Normalement, ce terme doit s'annuler lors de la convergence de la procédure. C'est à dire que cette omission n'influe pas sur le résultat final, mais elle fausse un peu le résultat temporaire. C'est d'ailleurs la seule simplification faite dans l'algorithme SIMPLE [49,50]. On obtient :

$$u'_e = d_e (P'_P - P'_E) \quad (II.62)$$

$$v'_n = d_n (P'_P - P'_N) \quad (II.63)$$

$$d_i \equiv \frac{A_i}{a_i} \quad (i = e, n) \quad (II.64)$$

On remplace (II.62) et (II.63) dans (II.59.b) et (II.59.c), respectivement, les valeurs corrigées des composantes de vitesse sont :

$$u_e = u_e^* + d_e (P'_P - P'_E) \quad (II.65)$$

$$v_n = v_n^* + d_n (P'_P - P'_N) \quad (II.66)$$

2.6.2. Equation de correction de la pression

L'équation de continuité intégrée peut se mettre sous la forme suivante :

$$[(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta x = 0 \quad (II.67)$$

En remplaçant u_e , u_w , v_n , v_s par leurs expressions correspondantes (II.65) et (II.66), on aboutit à l'équation de correction de la pression :

$$a_p P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b \quad (II.68)$$

avec :

$$\left. \begin{aligned} a_E &= \rho d_e \Delta y \\ a_W &= \rho d_w \Delta y \\ a_N &= \rho d_n \Delta x \\ a_S &= \rho d_s \Delta x \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S \\ b &= [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (II.69)$$

On remarque que le terme b dans l'équation de la pression, n'est autre que l'équation de continuité discrétisée à un signe moins près. Si b est nul, le champ (u^*, v^*) vérifie la conservation de la masse.

Résumons les différentes étapes de l'algorithme SIMPLE :

1. Estimation d'un champ de pression P^* .
2. Résolution des équations de quantité de mouvement pour obtenir u^* et v^* .
3. Correction de la pression P' en considérant la solution de l'équation de Poisson $(P = P^* + P')$.
4. Correction des vitesses à partir des équations du mouvement linéarisées $(u = u^* + u'$ et $v = v^* + v')$.
5. Résolution des autres équations $(y_e, k, \varepsilon, T, \dots)$.
6. Retour à l'étape 2 jusqu'à convergence.

Chapitre III

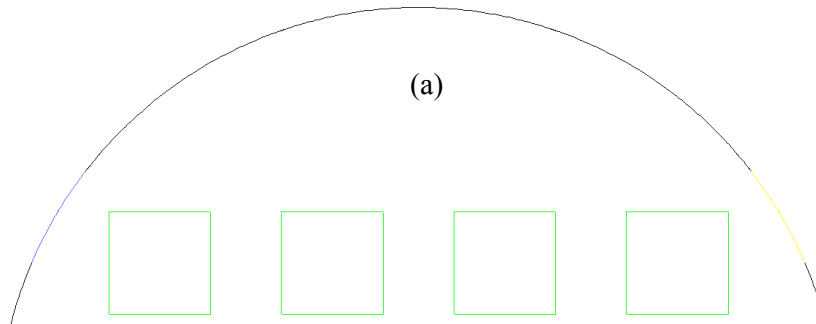
Résultats et Discussion

3.1. Introduction

Après avoir présenté dans les deux chapitres précédents (L'analyse bibliographique & La Formulation mathématique) les différents phénomènes physiques intervenant dans l'évolution du comportement du micro climat de la serre agricole, et les équations qui gouvernent ces mécanismes ainsi que les méthodes de résolution adapté pour ce types d'équations, un logiciel de la CFD (Computational Fluid Dynamics) Fluent 6.3.26 a été utilisé pour simuler le comportement thermique de trois type de serre agricoles en mode jour et nuit et en présence de couvert végétal sous forme de quatre rangés de plante de tomate. Les trois géométries de serres agricoles étudiées sont: serre tunnel en plastique (fig. 3.1), serre en plastique a pieds droits (fig. 3.2) et en fin une serre en verre horticole mono-chapelle de type Venlo (fig. 3.3), pour cette dernière on a utilisé seulement deux rangés de plante a cause de sa taille réduite.

3.2. Domaine physique et maillage

L'indépendance de maillage est presente dans l'annexe. Dans ce qui suit, on présente le domaine physique pour chaque type de serre a étudiée ainsi que le domaine de calcul correspondant. Le maillage utilisé pour les différents domaines d'études où le traitement près de la paroi est basé sur le critère de y^+ [51] est ainsi présenté.



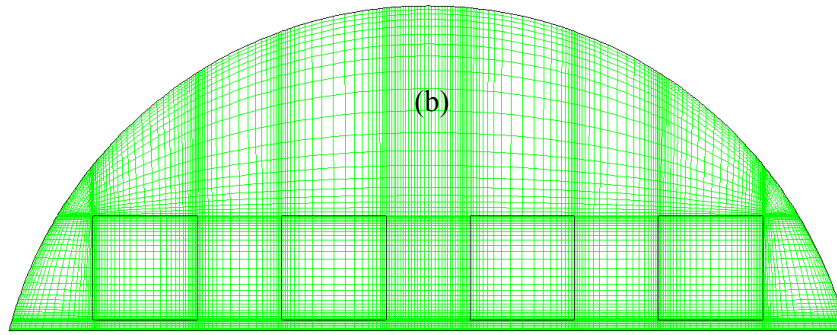


Figure 3.1: Serre Tunnel: (a) Domaine physique et (b) Domaine maillé

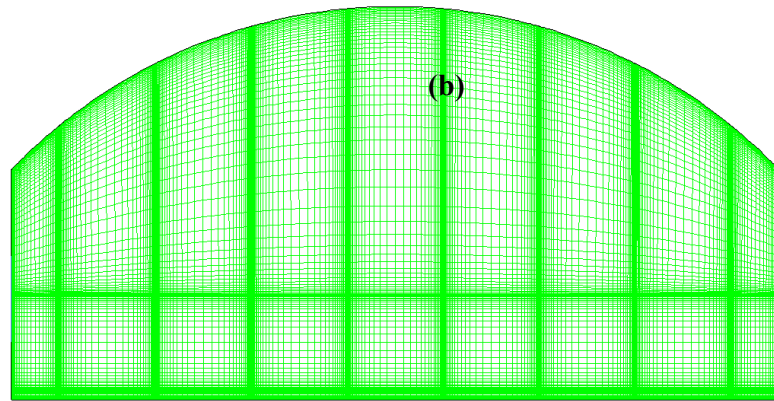
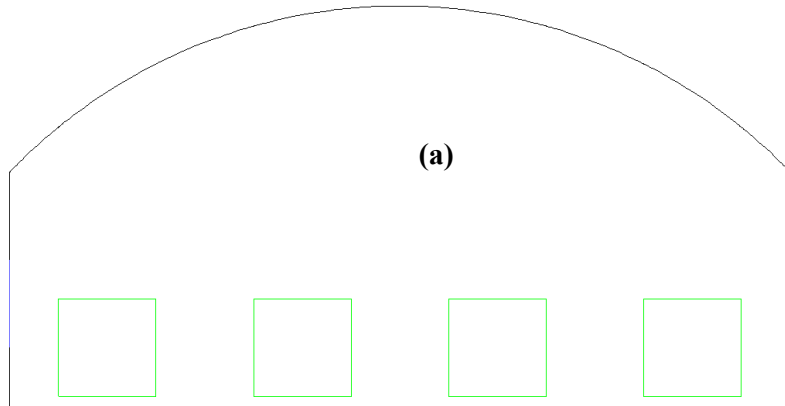


Figure 3.2: Serre à pieds droits: (a) domaine physique et (b) Domaine maillé

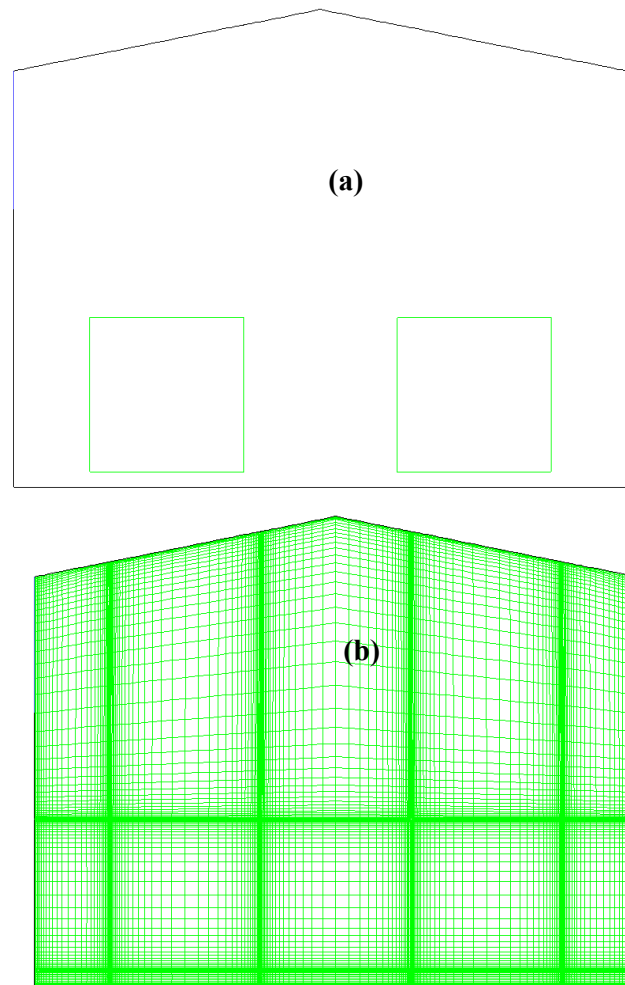


Figure 3.3: Serre Venlo mono-chapelle: (a) domaine physique, (b) domaine maillé

Les données utilisés dans notre travail de simulation soient concernant les conditions aux limites ou bien les courbes de validation des résultats de simulation, étaient inspirés à partir des travaux de monsieur Mesmoudi [52,53]. Les deux travaux expérimentaux que nous avons utilisé sont: Une expérimentation qui consiste à l'établissement d'un modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre avec une plante de tomate, la seconde expérimentation est une approche expérimentale de la modélisation du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région semi aride.

3.3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

3.3.1. Objectifs des campagnes de mesures

Les campagnes de mesures répondent principalement à deux types de préoccupation :
i) Disposer des éléments nécessaires à la mise au point du modèle mathématique ii) Recueillir des données permettant de caler les paramètres de ce modèle, et fournir les données nécessaires à la vérification puis à la validation des résultats de simulation.

3.3.2. Le climat de la région d'étude

La ville de Batna est située entre la latitude 35° 33' Nord et la longitude 06° 10' Est, dans la jonction de l'Atlas tellien et de l'Atlas saharien. La ville de Batna est construite sur un relief en cuvette, entourée de montagnes, sa superficie est de 12 192 km² ; le climat de la ville est caractérisé par un climat semi aride.

3.3.3 Site d'étude, serres expérimentées, et expérimentations

Première Expérimentation

Cette expérimentation a été effectuée dans une serre naturellement aérée de type Venlo avec deux rangées de plant de tomates. La serre est orientée Est-Ouest de 32m² (L=8m, l=4m) de surface, installée dans le nouveau terrain d'expérimentation du département d'agronomie de l'université de Batna. La serre a une forme de serre d'horticulture d'une hauteur 3.10m sous faîtage et 2.70m sous chéneau, ce qui conduit à un volume de $V= 103.04 \text{ m}^3$. La couverture de la serre est en verre ordinaire (Verre horticole) de 4mm d'épaisseur. Les propriétés spectrales moyennes de ce type de couverture sont retenues à partir des abaques du fabricant (ENAVA Algérie) et sont rapportées sur le tableau 3.1. Les propriétés des deux sols extérieur et intérieur, considérés à humidité moyenne sont aussi rapportées sur le même tableau. Durant les mesures, les ouvertures latérales d'aération ont été ouvertes, et la serre était naturellement aérée. Les plants de tomate développés à l'intérieur de la serre durant la période des mesures avaient une taille moyenne de 0.8m, et leur densité était de 3,5 plants par m². Les plants ont été cultivés comme suit : Quatre rangées avec une distance entre deux rangées adjacentes de 0.6m et une distance inter rangée de 0.7m. Les mesures ont été effectuées durant trois périodes, à partir de janvier à mars 2008 (25 janvier, 21 février, et 10 mars) entre 8 heures du matin et 18^h d'après midi. A l'intérieur de la serre, la température et l'humidité relative de l'air ont été mesurées par deux sondes, naturellement aérées et protégées contre l'influence du rayonnement solaire direct par une boîte en carton qui sert d'abri. Les mesures ont été prélevées chaque intervalle de temps de 5s ; Le stockage et le traitement des données été

réalisés par le logiciel de suivis (OAKTON Microlab plus). A cause de l'hétérogénéité de la distribution de la température de l'air intérieur, la température de l'air intérieure moyenne a été déduite des températures mesurées dans 15 points avec 15 sondes distribuées le long d'une section transversale au centre de la serre dans un même plan vertical, la valeur moyenne de ces 15 points a été considérée comme la température de l'air intérieur. Le rayonnement solaire entrant a été mesuré avec un pyranometre placé au centre de la serre à 1.5m au-dessus de la surface du sol abrité. Les températures des surfaces de la couverture de la serre ont été mesurées sur quatre positions, distribuées le long des parois et le toit de la serre, à l'aide de thermocouples fixés sur la couverture par un ruban adhésif transparent. Les données climatiques extérieures ont été mesurées avec quatre sondes installées au-dessus du toit de la serre à une hauteur de 1m. La vitesse et la direction du vent ont été mesurées par deux anémomètres, une girouette et une palette. Le rayonnement solaire global extérieur a été mesuré avec un pyranometre. La température de l'air et l'humidité extérieure ont été également mesurées en utilisant une sonde de platine abritée dans un boîtier naturellement aérés situées à la même hauteur que le pyranometre extérieur.

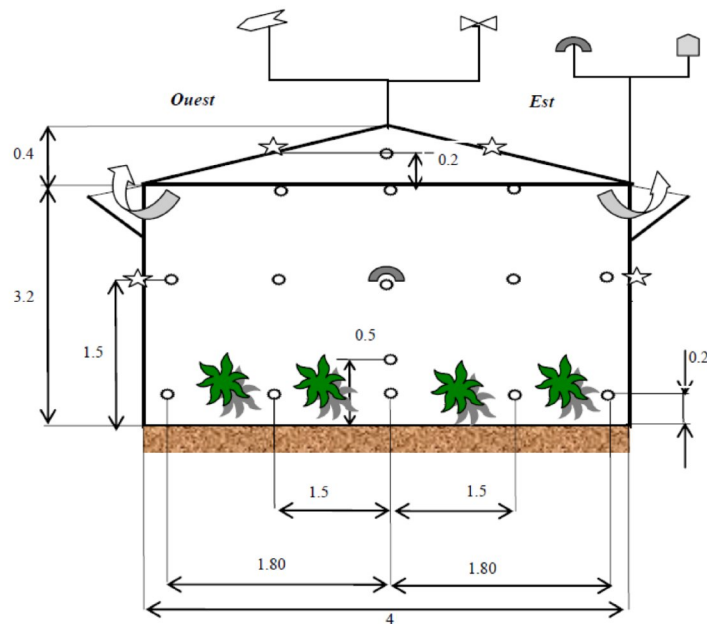


Figure 3.4: Schéma de la serre expérimentée et du positionnement des appareils et des sondes de mesures (Toutes les distances sont en mètre linéaire)[53].

◊: Sonde de l'hygro-thermomètre (Oakton log sensor). ◻: Sonde de Platine. ⇨: Palette de la direction du vent. ⚙: Girouette de vent. ☀: Pyranometer. 🌿: Plants de Tomate. ☆: Thermocouples.

	ρ (kg./m ³)	λ (W/m.K)	C_m (J/kg.K)	Ray. visible	Ray. infrarouge long
Sol	1620	13.21	1480	$r_s=0.25$ $\alpha_s=0.75$ $\tau_s=0$	$\varepsilon_s=0.9$ $r_{st}=0.2$ $\alpha_{st}=0.8$ $\tau_{st}=0$
Air	1.161	223.02	1007.26	-	-
Verre	840	0.85	2700	$r_c=0.1$ $\alpha_c=0.15$ $\tau_c=0.75$	$\varepsilon_c=0.93$ $r_{ct}=0.1$ $\alpha_{ct}=0.9$ $\tau_{ct}=0.0$

Tableau 3.1 : Caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composantes de la serre [53].

Deuxième Expérimentation

La deuxième expérimentation a été effectuée dans la même serre que la précédente. Le sol de la serre était nu (serre sans couvert végétale) et la serre était dépourvue de toute installation de ventilation ou de chauffage artificiel. La figure 5 montre en détail le positionnement des points des mesures de la température et de l'humidité relative, tous les points sont dans un même plan vertical au milieu de la serre à 4 m de la face Nord de l'abri. La température et l'humidité relative de l'air intérieur de la serre sont mesurées à une hauteur de 1.5 m au dessus de la surface du sol abrité; à 1cm au dessous de la surface du sol est mesurée la température de la surface du sol de la serre, et à une profondeur de 40 cm dans le sol est mesurée la température du sous sol. Sur la face intérieure de la couverture à une hauteur de 2 m du sol est mesurée la température de la face intérieure de la couverture. Sur la face extérieure de la couverture à la même hauteur (2m) est mesurée la température de la couverture extérieure. La température et l'humidité de l'air extérieur sont mesurées a une distance de 4m à l'Est de la serre à une hauteur de 2 m au dessus du sol. La température du sol extérieur est mesurée à la même distance à 1cm au dessous de la surface du sol. Les mesures ont été effectuées toutes les heures durant les 24 heures de chaque journée type, par un système de mesure à distance. Un maillage des points de mesure des températures de l'air intérieur de la serre par des thermocouples et des thermomètres a été prévu dans le même plan de mesure pour pouvoir suivre la variation et la distribution verticale de la température de l'air intérieur voir figure 5. Les données météorologiques du climat extérieur près de la serre, sont

mesurées par la station météorologique du laboratoire d'études des systèmes énergétiques industriels de l'université de Batna, le tableau 3.2 résume les valeurs moyennes de ces conditions durant les trois périodes d'expérimentation.

<i>Jours Types</i>	T_{ae} (°C) (min/max) T_{ai} (°C)	Humidité H_{ae} (%)	Eclairement solaire global E_g (W m ⁻²)	Durée d'insolation (heure)	U_e moy (ms ⁻¹)
1er jour	6 - 24.33 4 - 40	52.08	610.77	7h11'	1.3
2eme jour	4.6 – 13.5 7.5 - 26	63.5	466.33	2h14'	3.2
3eme jour	4 – 15.67 4 – 20.33	67.83	150.74	20'	1.8

Tableau 3.2: Conditions climatiques extérieures moyennes pour chaque journée-type[53]

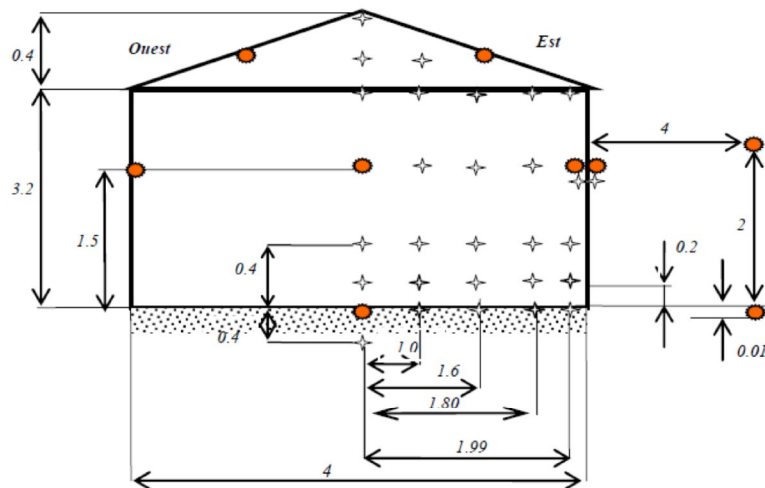


Figure 3.5: Schéma de la serre et des points de mesure: Toutes les distances sont en mètre[53] linéaire. ● : Capteur de température et d'humidité. ☆ : Thermocouples et thermomètres.

3.4. Propriétés thermo-physiques

Dans le tableau ci-dessous on donne les propriétés thermo-physiques des différents matériaux constituant les composantes de la serre et de son environnement présents dans le domaine de calcul.

Propriétés thermo-physiques					
	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	μ [kg/m.s]	C_p [J/kg.K]	β [1/K]
Air	ρ (T)	λ (T)	μ (T)	C_p (T)	β (T)
Sol	1625.91	2.541	-	1491.62	-
Couverture	840	0.76	-	2700	-

Tableau 3.3: Propriétés thermo-physiques déterminées expérimentalement [53]

3.5. Conditions Aux Limites (C.A.L.)

Concernant les conditions aux limites imposées sur les frontières du domaine de calcul, deux cas liés aux rayonnements solaires sont présentés à savoir la période diurne (midi) et la période nocturne (minuit), les conditions aux limites C.A.L. sont décrites dans le tableau ci dessous. Dans le cas du jour un flux radiatif est imposé sur les parois de la serre, et un profil de vitesse longitudinale à l'entrée des ouvrants d'aération de la serre a été imposé. Concernant la période nocturne, la serre est totalement fermée avec une température et une humidité imposée au sol.

			V_x [m/s]	V_y [m/s]	T [K]	H[%]	I [%]	ℓ [m]
C.A.L	Entrée	Midi	$V_x(y)$	0	292.95	10	5	1
		Minuit	/		287.47	/		
	Sortie	Midi	/	/	/	/	5	1
		Minuit			287.47	/		
	Toiture	Midi	/	/	/	/	/	/
		Minuit			287.47	/		
	Paroi droite	Midi	/	/	/	/	/	/
		Minuit			287.47	/		
	Paroi gauche	Midi	/	/	/	/	/	/
		Minuit			287.47	/		
	Sol	Midi	/	/	318.50	50	/	/
		Minuit			291.00	40		
	Plante	Midi	/	/	/	10	/	/
		Minuit			/	80		

Tableau 3.4: Conditions aux limites imposées aux frontières de la serre agricole

	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	C_p [J/kg.K]	K [m ²]	$C1$ [m ⁻²]	$C2$ [m ⁻¹]
Culture	700	0.173	2310	$3.6523 \cdot 10^{-5}$	27380	1.534
Plant de Tomate						

Tableau 3.5: Propriétés thermo-physique de la culture de tomate utilisé comme milieu poreux [54].

C.A.L : conditions aux limites

V_x : composante de la vitesse suivant x

$V_x(y)$: composante de la vitesse suivant x dépend de y.

V_y : composante de la vitesse suivant y

T : température

H: humidité relative

I : intensité turbulente

ℓ : échelle de longueur du modèle de turbulence

K : perméabilité

C1 : résistance visqueuse

C2 : résistance inertielle.

	Absorptivité α	Emissivité ε	Coefficient de diffusion σ	Indice de réfraction n
Sol	0.75	0.95	-10	1.92
Air	0.19	0.9	0	1
Plant de tomate	0.46	0.46	0	2.77
Verre	0.15	0.75	0	1.65
Polyéthylène	0.08	0.7	0	1.86

Tableau 3.6: Propriétés optique des différents matériaux dans le domaine visible [53]

3.6. Validation des résultats:

Pour débiter ce paragraphe on préfère présenter quelques résultats de travaux réalisés dans le même contexte que le notre. Dans la figure (6-a) il est présenté les lignes de courant de l'air intérieur d'une serre à pieds droit en période diurne réalisé par Baxevanou et *al.* [54] au sud de la Grèce sous un climat semi aride; concernant la figure (6-b) elle présente la variation de la fonction dans notre cas d'étude pour le même type de serre. On remarque qu'il existe une forte ressemblance entre les deux résultats soit dans l'allure des lignes de courant soit dans les valeurs de la fonction dans le plan de la serre.

Concernant les profils de la composante axiale de la vitesse à chaque pas (un pas égale a 2m) de la largeur de la serre (fig. 7, 8 et 9), on remarque aussi une bonne concordance et une forte ressemblance entre les profils déterminés a partir de notre travail de simulation et ceux déterminés par Baxevanou et *al.* [54] pour le même type de serre durant la même période (Période diurne, midi jour).

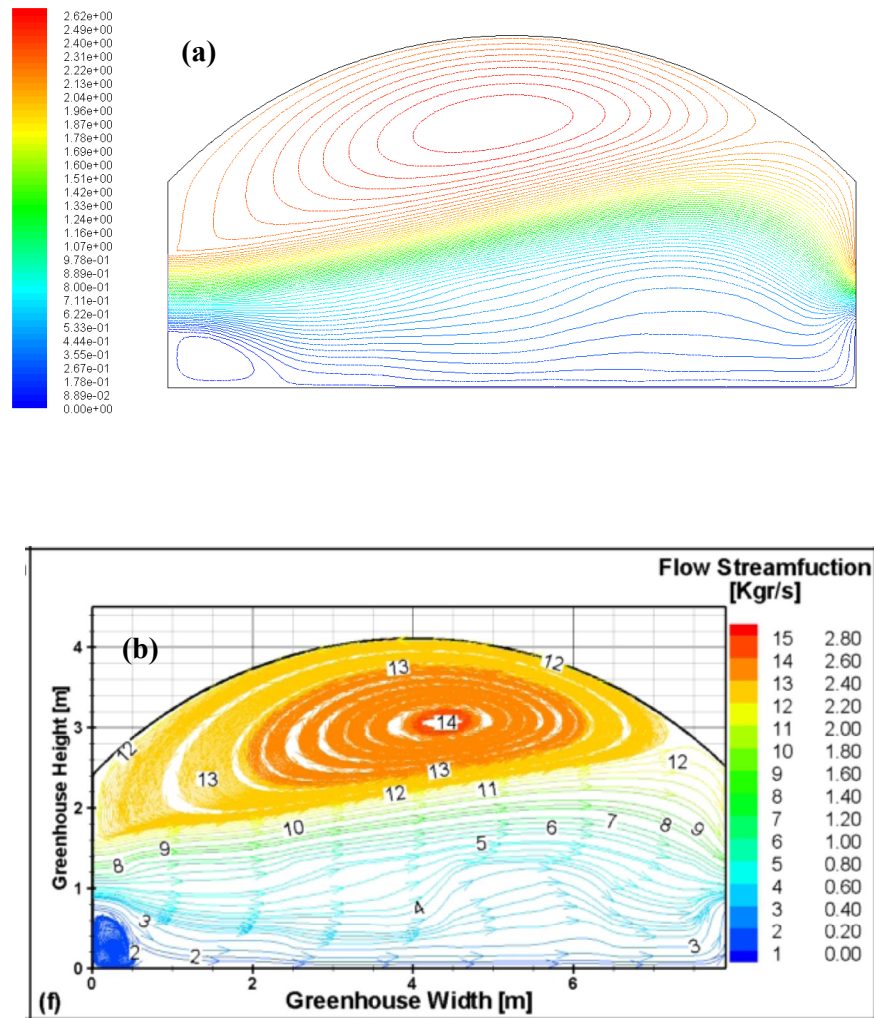


Figure 3.6 : Contours des lignes de courants:

(a) notre travail de simulation, (b) les résultats de la référence [54]

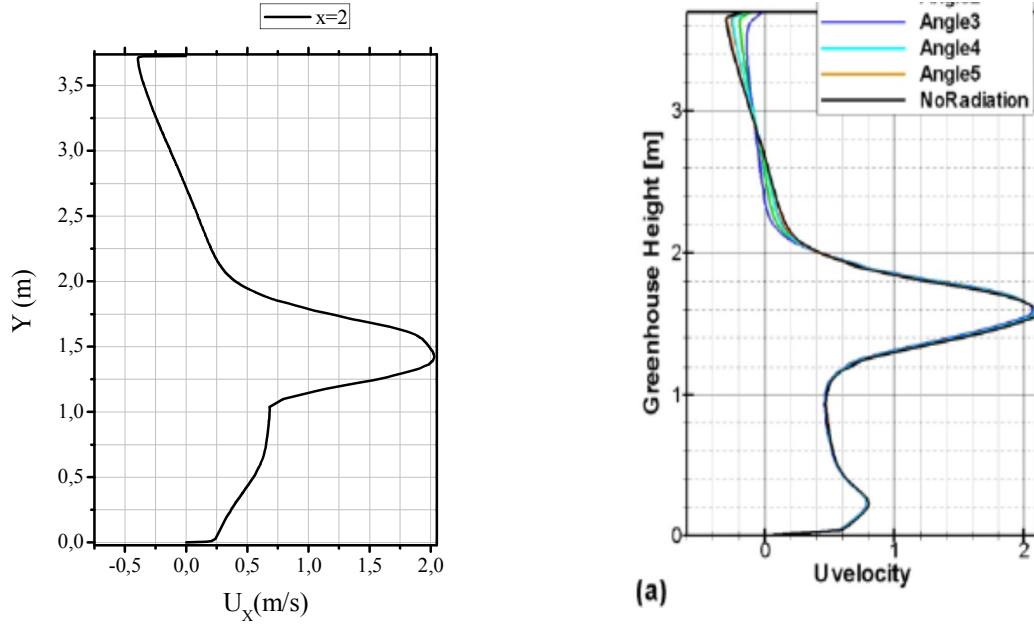


Figure 3.7 : Profile de vitesse axiale U_x en fonction de la hauteur de la serre $H(y)$ pour une abscisse $x=2$ m: dans notre cas c'est la figure à gauche; dans le cas de [54] c'est la figure à droite pour différents angle d'inclinaison du soleil

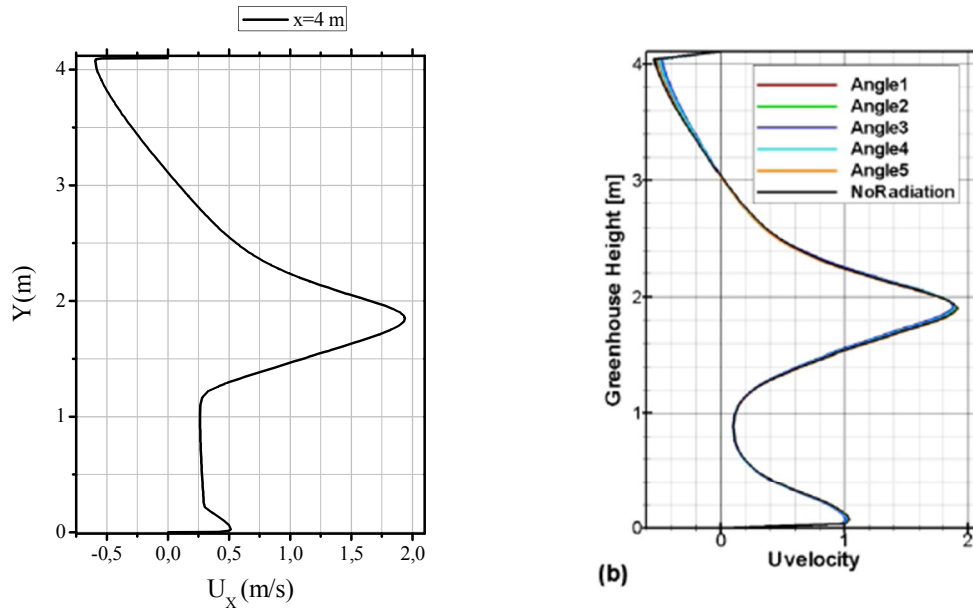


Figure 3.8 : Profile de la vitesse axiale U_x en fonction de la hauteur de la serre $H(y)$ pour une abscisse $x=4$ m: dans notre cas c'est la figure à gauche; dans le cas de [54] c'est la figure à droite pour différents angle d'inclinaison du soleil

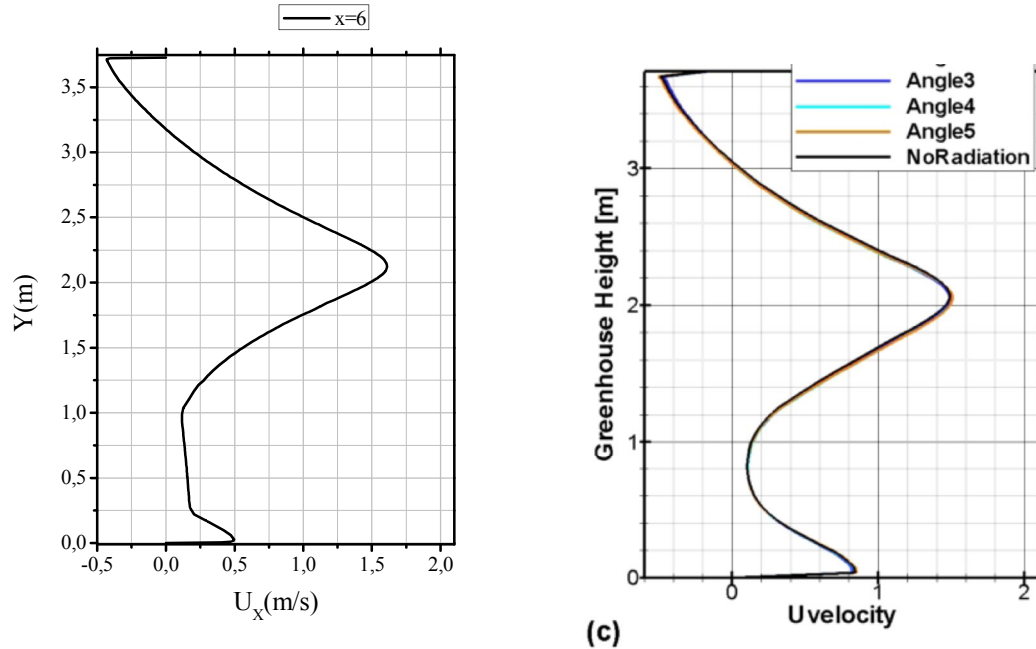


Figure 3.9 : Profils de vitesse axiale U_x en fonction de la hauteur de la serre $H(y)$ pour une abscisse $x=6$ m: dans notre cas la figure à gauche; dans le cas de [54] c'est la figure à droite pour différents angle d'inclinaison du soleil

3.7. Résultats et discussion

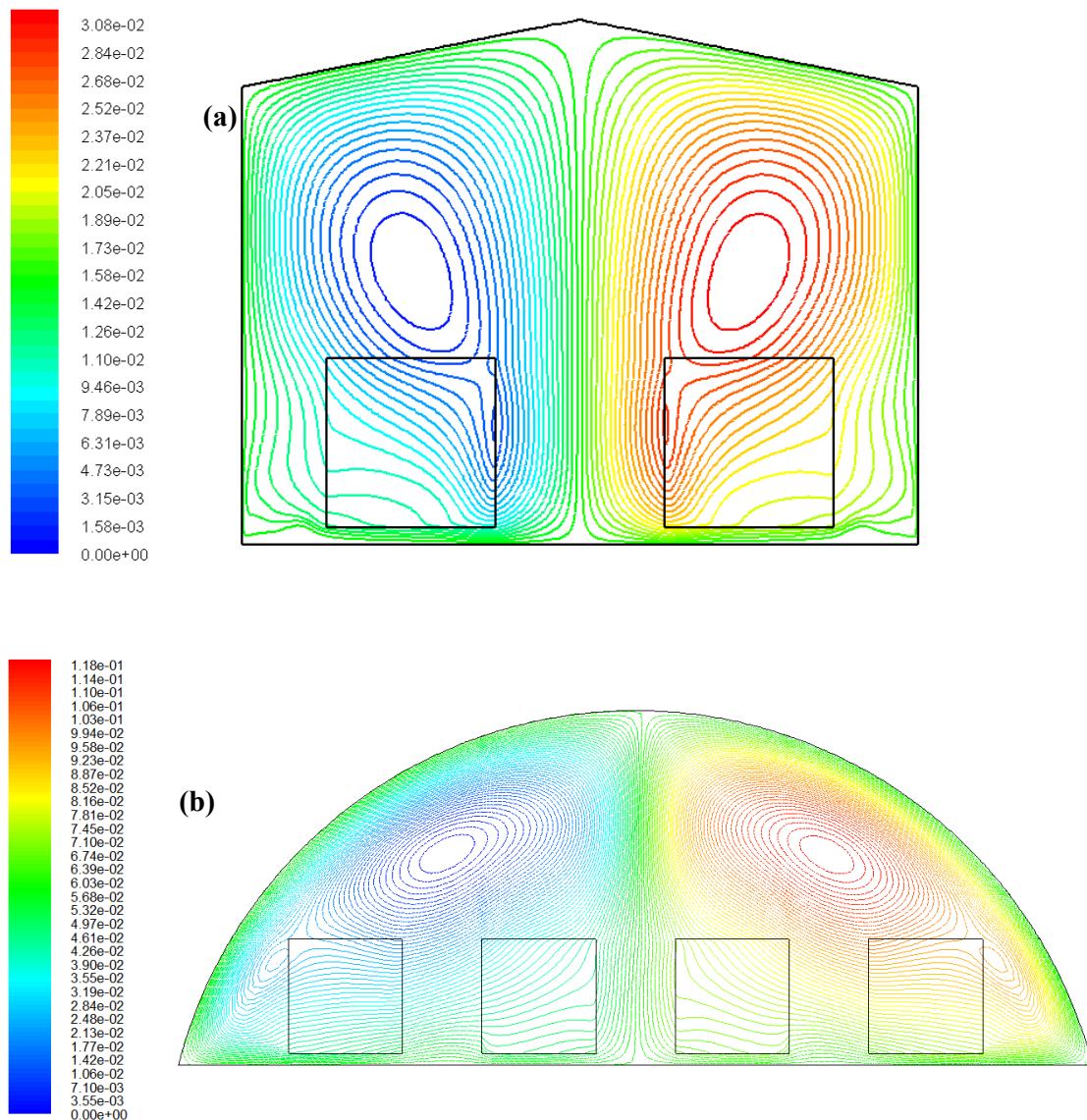
Les résultats obtenus sont présentés dans les figures de 10 à 22 en termes de champs des lignes de courant, de vitesses, de températures et d'humidité relative pour chaque type de serre (serre tunnel en plastique, serre a pieds droit en plastique et serre Venlo en verre horticole). En outre, les profils de vitesse, de température et d'humidité relative sont présentées dans des sections spécifiques (à l'entrée des événements de ventilation, au milieu de la serre et près des ouvertures de sortie).les résidus sont présentés dans l'annexe. Deux période d'étude ont été considérées pour les trois géométries de serres agricole à savoir: une période diurne ensoleillée avec la présence du rayonnement solaire (cas du jour : midi), et une période nocturne (cas du nuit: minuit).

3.7.1. Cas de la période nocturne

Durant cette période les trois types de serres sont fermées (c.-à-d. aucun ouvrant n'aura lieu) et l'effet du rayonnement solaire est exclu du modèle. Les valeurs imposées sur les frontières du domaine d'étude (C.A.L) concernant les différentes grandeurs physique ont été déjà mentionnées dans les tableaux (3.1 -3.5). Les valeurs des ces grandeurs sont prises à partir des expérimentations réalisées par [53].

a) Distribution des lignes de courant dans la serre

Dans la figure 3.10, les contours des lignes de courant de l'air intérieur de la serre des trois types de serre sont présentés durant la période nocturne (mode nuit). Pour le cas de la serre mono chapelle (a), la serre tunnel (b) et la serre à pieds droits (c), deux cellules déformées occupent tout le volume de la serre, la déformation est essentiellement due a la présence du couvert végétal (les rangs de culture).



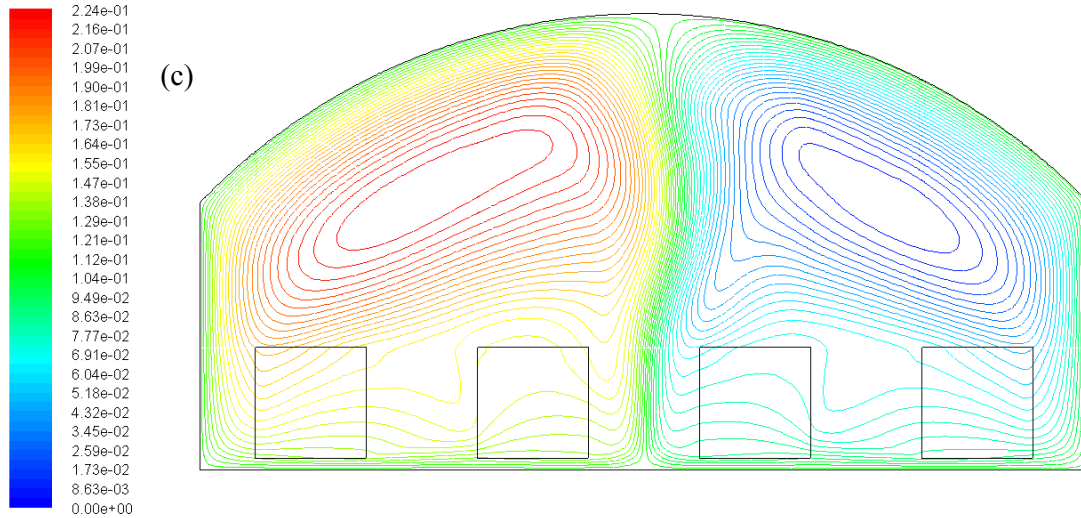


Figure 3.10: contours (iso-valeurs) des lignes de courant cas de nuit: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

b) Distribution de la vitesse dans la serre

La figure 3.11 montre les contours du champ de vitesse des trois types de serre durant la période nocturne sans tenir compte des effets du rayonnement. Pour le cas de la serre mono-chapelle, le mouvement ascendant de l'air est remarquable au milieu de la serre, le mouvement prend naissance à partir de la surface du sol abrité et fini près de la toiture où il change de direction. Le mouvement de descente commence à partir de cette position (le toit), le fluide descend le long des surfaces intérieures des parois latérales de la serre. La montée est provoquée par la chaleur restituée par le sol durant cette période et la descente est provoquée par la faible température des parois. Une faible vitesse de l'air (quelques millimètres par second) est remarquée au niveau des plantes (résistance du milieu poreux) et au centre des cellules de mouvement (vitesse nulle au centre de rotation). La vitesse de déplacement de l'air augmente à partir de cette position, elle augmente jusqu'à elle atteint un maximum (0.2 ms^{-1}) près du sol et des surfaces latérales (rayon max par rapport au centre de rotation $V = \omega r$).

Concernant les deux autres types de serres, le même phénomène est remarquable soit pour la serre tunnel soit pour la serre à pieds droit, les valeurs des vitesses sont élevées au milieu des serres et près des parois, elles varient entre (0.19 et 1.15 ms^{-1}), Les faibles valeurs des vitesses sont remarquables près du couvert végétale (0.05 et 0.02 ms^{-1}).

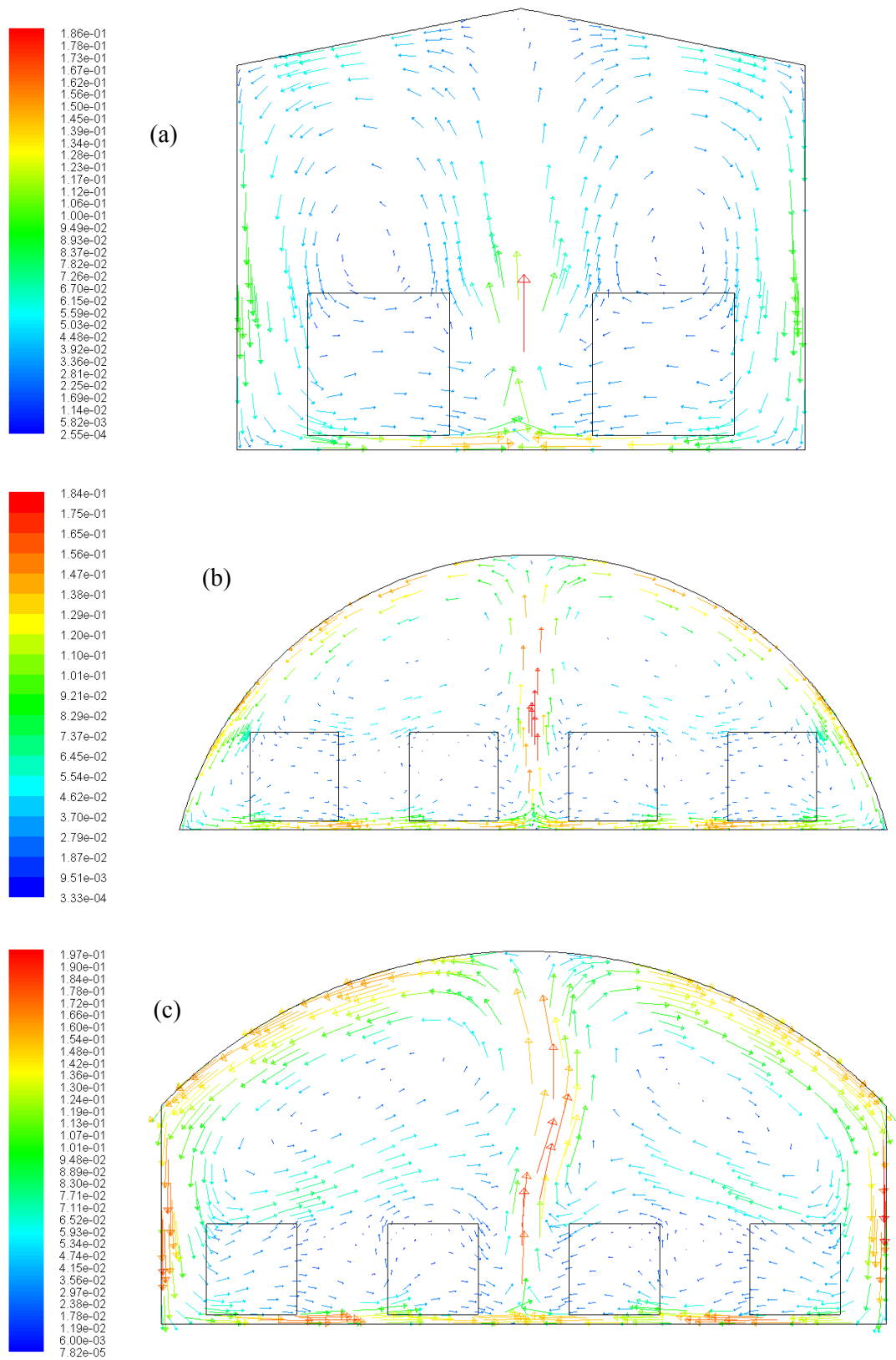
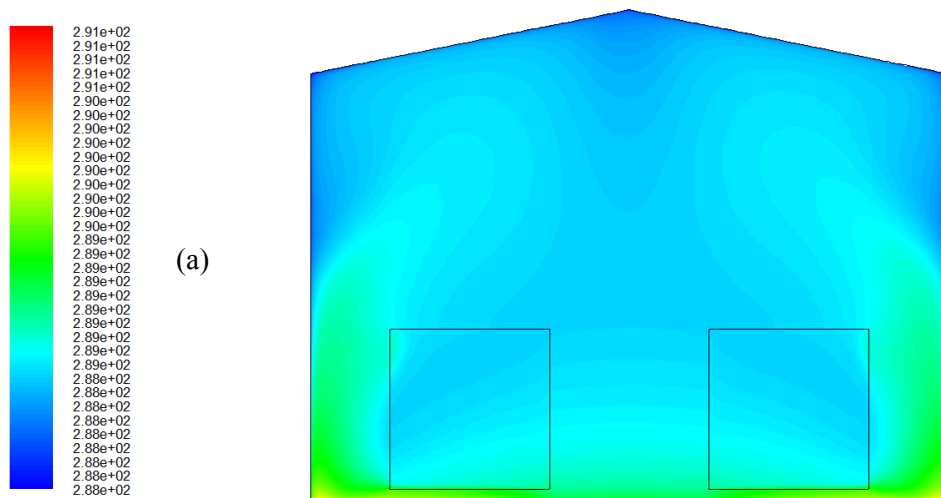


Figure 3.11: contours des champs de vitesse cas de nuit:
(a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

c) Distribution de la température dans la serre:

La distribution de la température à l'intérieur de la serre pour les trois types de serre est présentée sur la figure 3.12. On voit bien que pour les trois types de serres il existe une symétrie de distribution de température par rapport à l'axe vertical passant par le milieu de la serre. Durant cette période (cas de nuit), la température du sol est supposée constante et supérieure à celle du milieu extérieur (condition inspiré des travaux de Mesmoudi [53]), d'où la propagation de la chaleur est ascendante. Les particules d'air sont chauffées par l'énergie thermique restituée par le sol et sont refroidies par les faibles températures des parois latérales et celles de la toiture, le chauffage et le refroidissement sont provoqués par le phénomène de la convection naturelle près des deux surfaces. En plus du gradient de température existant entre les composantes de la serre, un facteur important qui peut influencer le phénomène de propagation de la chaleur c'est la conductivité thermique des différents composants de la serre à savoir: l'air intérieur, la culture ainsi que la couverture et la charpente. Cette variété de matériaux (variété de conductivité thermique) peut provoquer une hétérogénéité de la distribution de la température en période nocturne en absence de chauffage artificielle ou de ventilation pour les différentes serres agricoles



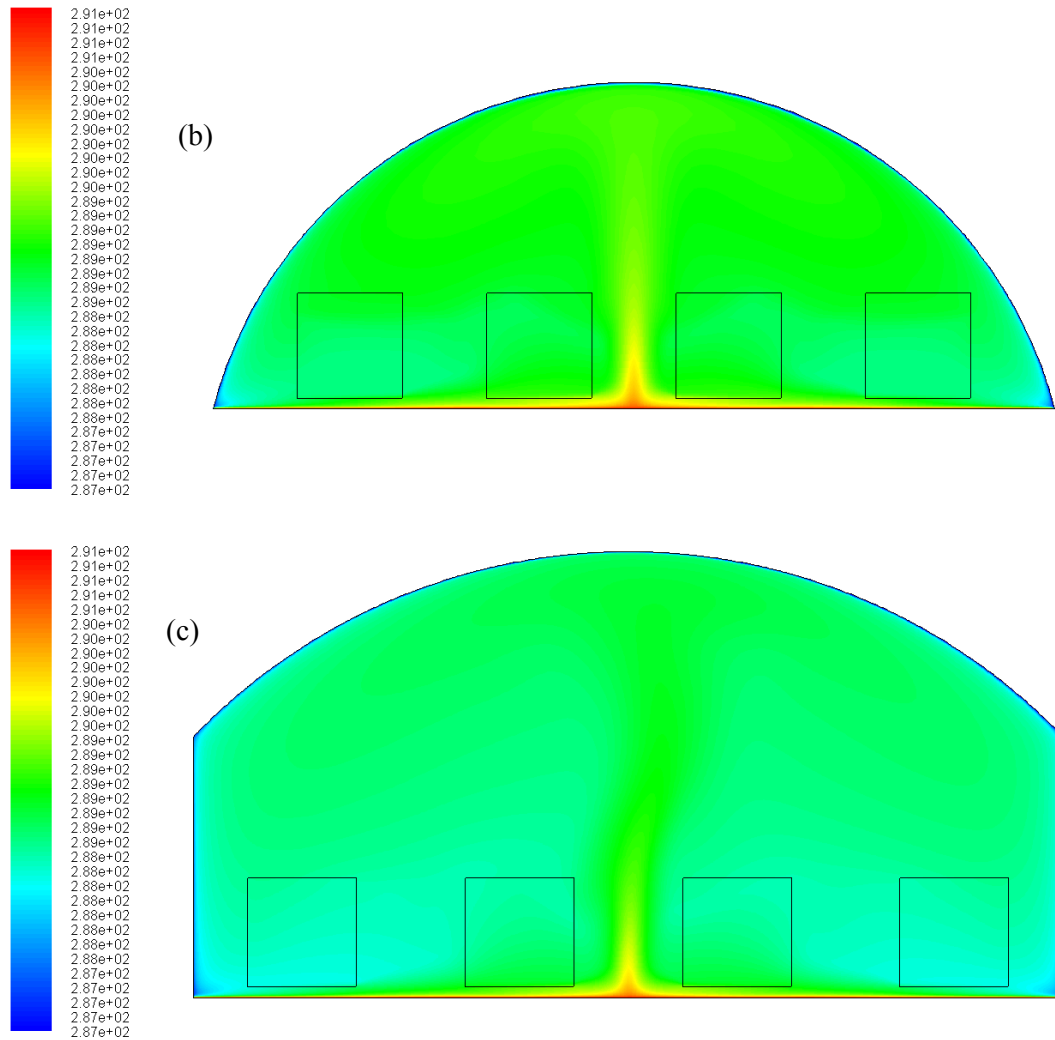
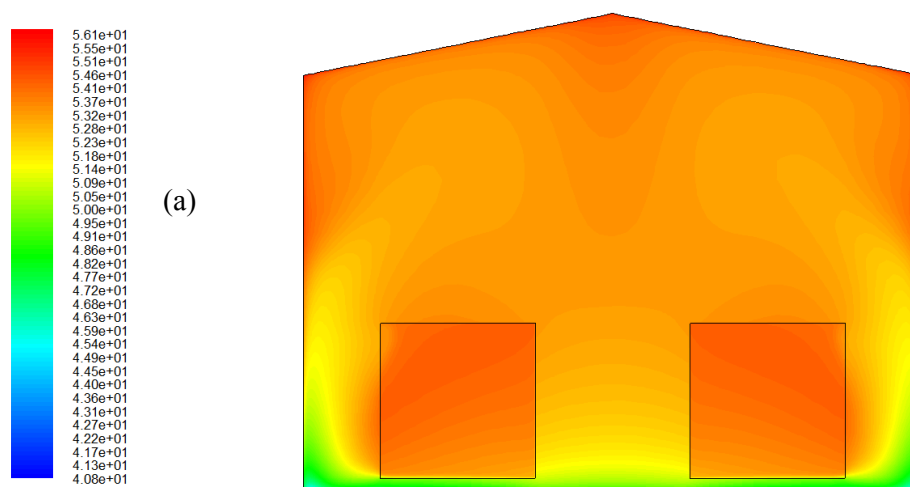


Figure 3.12: contours des champs de température cas de nuit: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

d) Distribution de l'humidité dans la serre:

La figure 3.13 montre la distribution ainsi que la variation de l'humidité relative à l'intérieur des trois types de serres sans phénomènes de changement de phases (absences de la condensation sur les parois, absence de l'évaporation du sol, absence de l'évapotranspiration des plantes). Nous avons pris comme conditions aux limites, les valeurs de l'humidité suivante: l'air près du sol est humide à 40% tandis que près de la culture de tomate l'air a une humidité relative de 55 % et quant à l'air dans l'espace restant (air intérieur au milieu et près des parois) son humidité relative est supposée initialement à une valeur de 20%. Ces conditions aux limites sont toujours inspirées des travaux expérimentaux menés par Mesmoudi 2010 [53].

D'après les résultats on peut remarquer que les zones froides sont plus humides que les zones chaudes à cause du mouvement convectif partant du sol vers la toiture et les parois de la serre. Un autre mécanisme provoque la distribution de l'humidité est le gradient de la concentration de l'eau dans l'air, on remarque que l'air situé près du végétal possède des valeurs d'humidité plus élevées d'où le transfert de masse commence à partir de cette zone vers les autres zones. Même que l'humidité de l'air près du sol a une valeur relativement élevée au début du calcul mais le fait que la surface du sol abritée est la surface la plus chaude, l'humidité est chassée de cette zone par le phénomène de convection provoqué par le gradient de température entre le sol et l'air intérieur. Le couplage des deux phénomènes (convectif et massique) provoque une distribution relativement symétrique par rapport à l'axe vertical de la serre comme le montre la figure 3.13 ci-dessous.



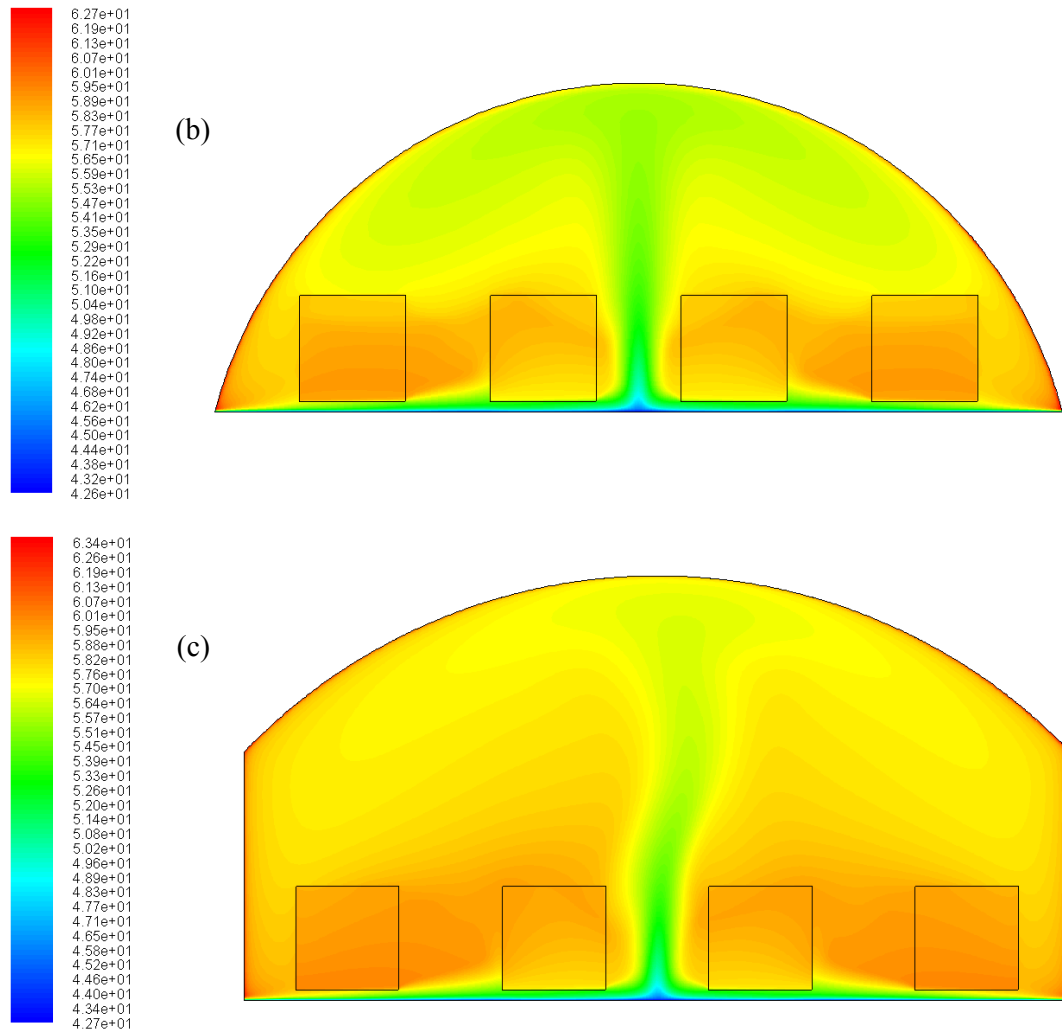


Figure 3.13: contours des champs d'humidité relative cas de nuit:
(a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

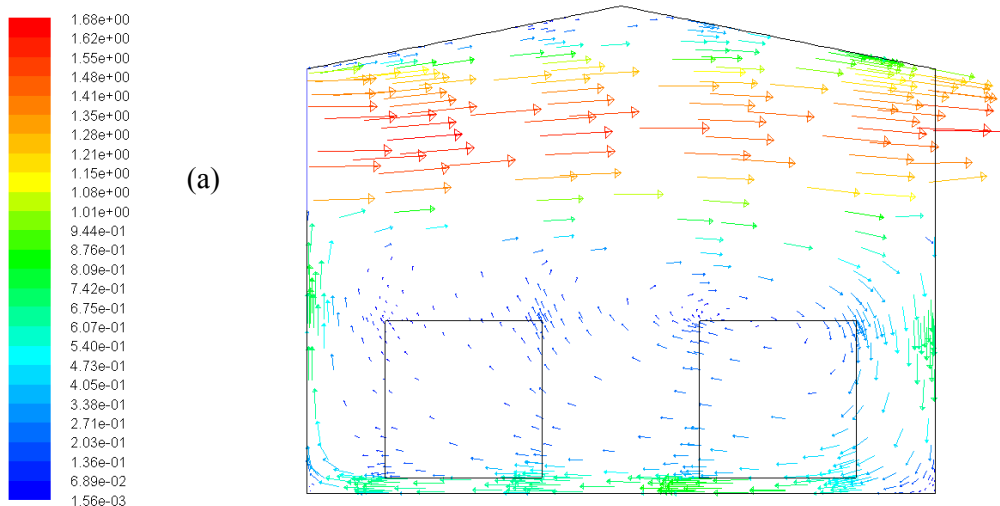
3.7.2. Cas de la période diurne

Dans ce deuxième cas les trois types de serres étudiées sont ouvertes (les ouvrants dépendent du type de serre) et l'effet du rayonnement solaire est pris en compte dans le modèle. Les valeurs imposées sur les frontières du domaine d'étude (C.A.L) concernant les différentes grandeurs physiques déjà parlé sont pris à midi en se basant toujours sur des données expérimentales [53].

a) Distribution de la vitesse dans la serre:

Dans la figure 3.14, le champ de vitesse des trois types de serres est présenté. Pour la serre mono-chapelle les ouvrants sont situés juste sous les chenaux d'une taille de 0.9 m où

une zone de recirculation s'est produite entre la partie inférieure des ouvrants et le sol. La vitesse présente un maximum (1.64 ms^{-1}) au centre des ouvrants et l'écoulement ne rencontre aucun obstacle dans sa principale direction. Quant aux deux autres types de serres tunnel et à pieds droits, l'écoulement est dominé par la forte convection de l'air entrant à travers l'ouverture gauche; ce dernier est amorti par les plantes (perméabilité) où il est séparé en deux courants de différente intensité. Le principal courant, s'écoule dans la partie supérieure des plantes avec une vitesse comparable à celle de l'entrée (1.35 ms^{-1}) et le second s'écoule sous les plantes avec une vitesse relativement inférieure de l'ordre de 0.7 ms^{-1} . Les particules d'air à l'intérieur des régions poreuses (couvert végétale) sont freinées par la résistance visqueuse et inertielle. Trois schémas de recirculation sont observés dans le champ examiné. Deux d'entre eux apparaissent dans le coin haut et en bas de l'entrée, piégeant de petites quantités de fluide. La recirculation formée dans le coin inférieur près de l'entrée semble être indépendante du rayonnement. Au contraire, l'existence de la recirculation au coin supérieure est due aux effets du rayonnement (concentration du rayonnement solaire dans cette zone). Lorsque le rayonnement est négligé, la recirculation au coin supérieure disparaît [54]. Sa taille est déterminée par la combinaison du rayonnement solaire et la direction de l'écoulement principal dans la serre. Cette zone présente un maximum à midi qui est le cas étudié. La troisième recirculation est située entre la couverture et l'écoulement principal.



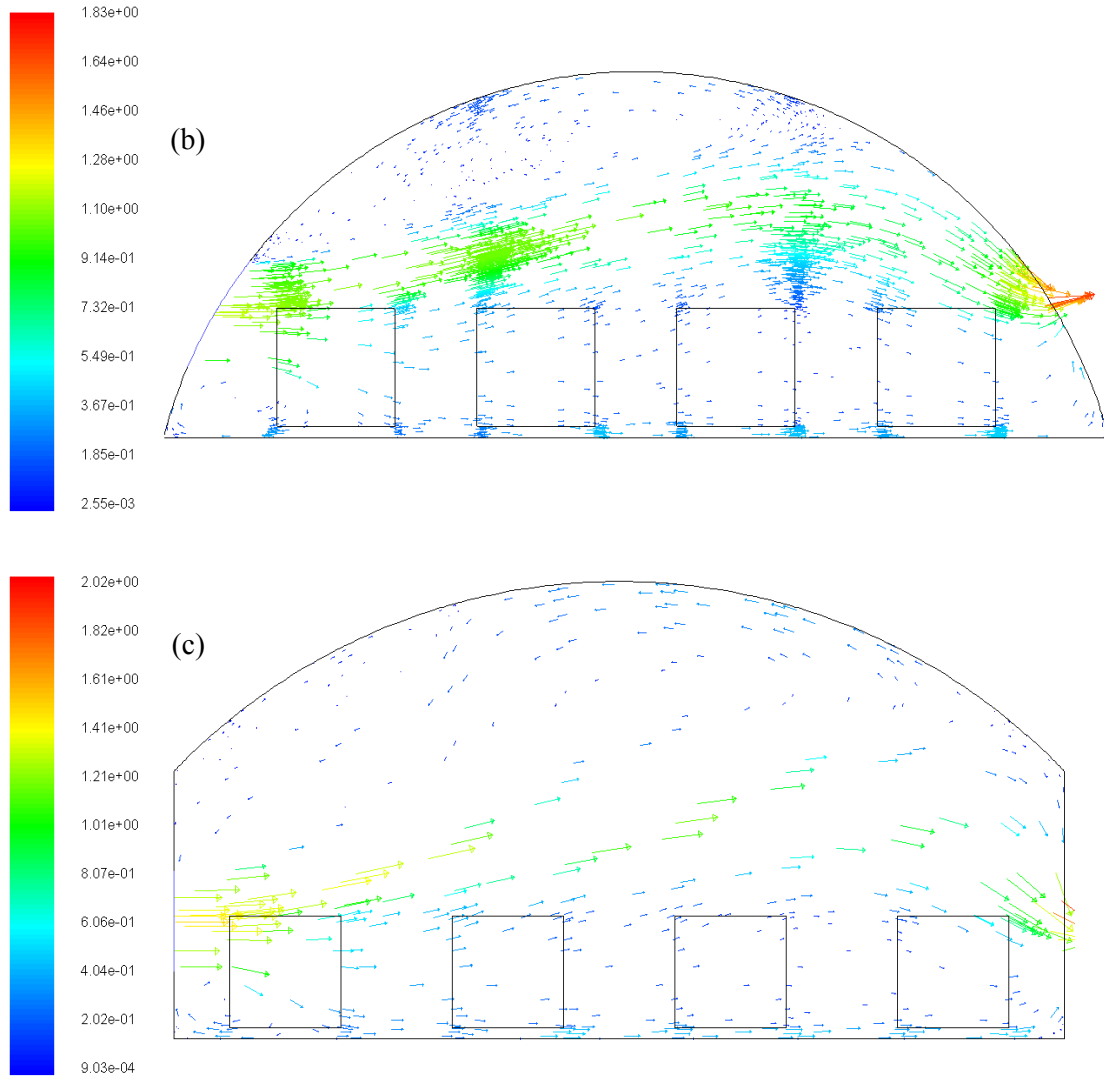
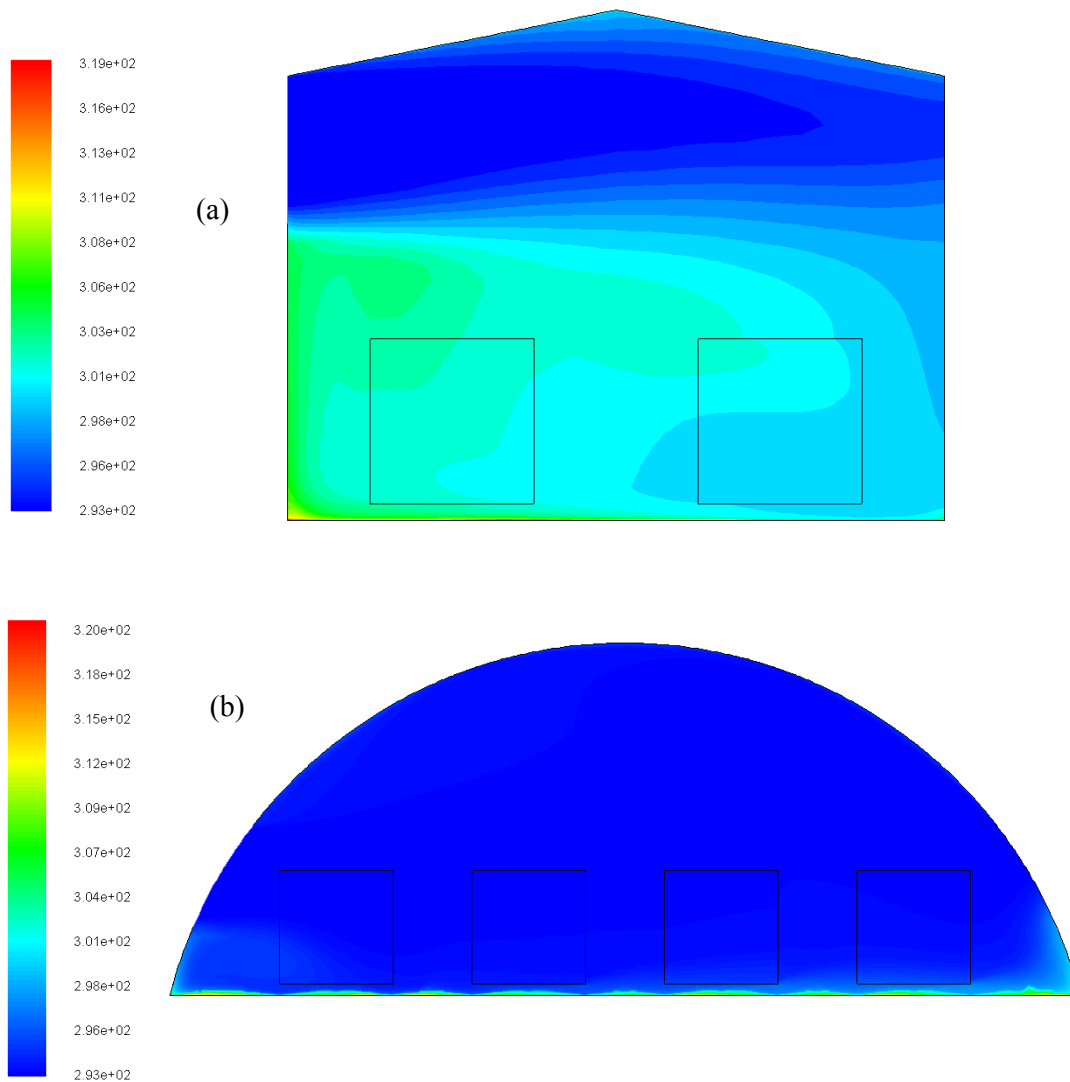


Figure 3.14: contours des champs de vitesse cas du jour:
(a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

b) Distribution de la température dans la serre:

La distribution de la température à l'intérieur de la serre des trois types pour le cas du jour (midi) est montrée sur la figure 3.15. Le mécanisme principal du transfert de chaleur est la convection forcée. La température d'écoulement d'entrée règne presque dans l'ensemble du domaine (cas de la serre tunnel et celle à pieds droits), à l'exception de la zone proche du sol et les coins inférieurs où la température est affectée par la température du sol (plus chaud), en raison de la vitesse réduite de l'air et à la recirculation. Concernant la serre mono-chapelle, la température d'écoulement d'entrée affecte juste la partie supérieure du domaine où les ouvrants sont situés. Concernant la température de la partie inférieure de la serre cette dernière est affectée par la température du sol (sol chauffé par l'éclairement solaire). La température

d'écoulement d'air dans ce cas est généralement influencée par la combinaison des effets du rayonnement solaire et les échanges d'énergie avec le couvert végétale (par rayonnement et par convection). L'effet du rayonnement solaire dans les régions de recirculation plus intensives se traduit par une augmentation remarquable de la température.



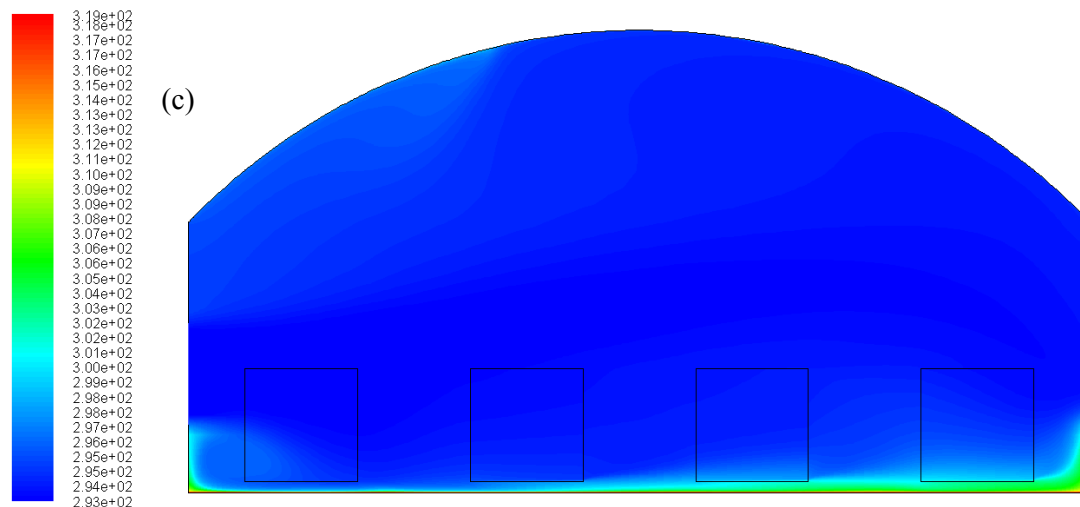
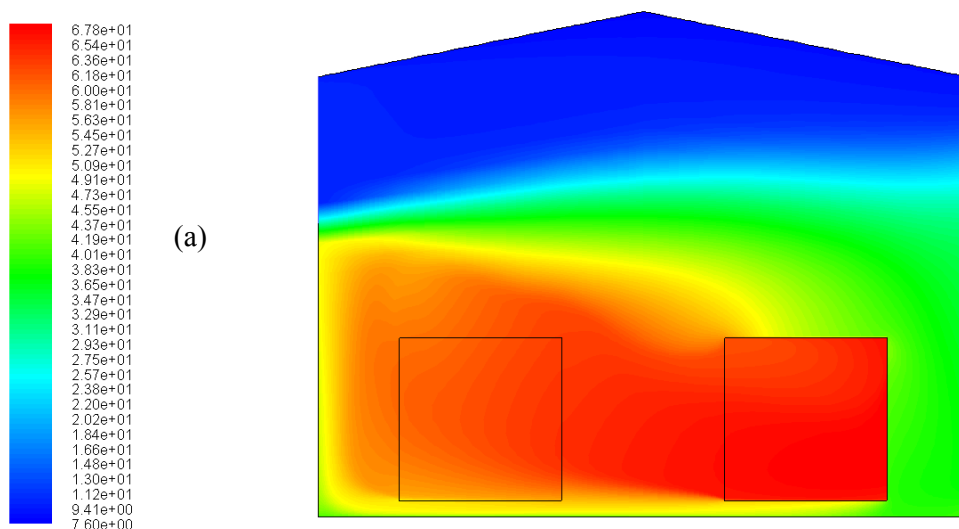


Figure 3.15: contours des champs de température cas du jour: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

c) Distribution de l'humidité dans la serre:

La figure 3.16 représente la distribution de l'humidité à l'intérieur de la serre pour les trois cas. A cause de l'effet de la convection forcée, effet de l'air entrant à travers l'ouverture gauche avec une humidité relative de 10% qui occupe presque la partie supérieure du domaine pour les différents type de serres, l'humidité relative présente ses maximum dans la partie inférieure de la serre où l'air proche du couvert végétale possède une humidité relative de l'ordre de (70% - 90%).



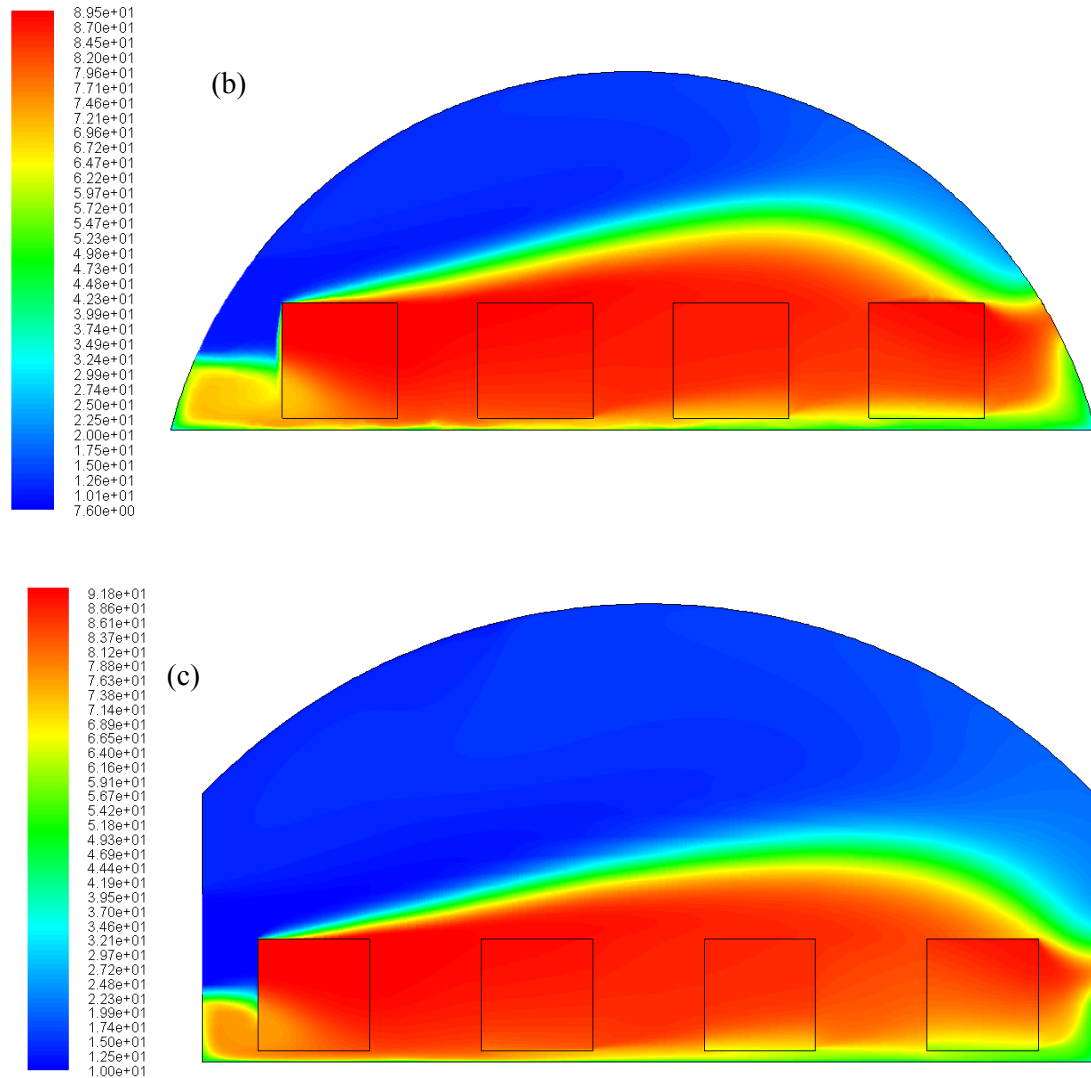


Figure 3.16: contours des champs d'humidité relative cas du jour: (a) serre mono-chapelle, (b) serre tunnel et (c) serre à pieds droits.

d) Profils des vitesses: La figure 3.17 montre les profils de la composante axiale de la vitesse dans trois positions à l'intérieur de la serre et à des distances différentes de l'entrée pour les trois types de serre. On remarque que près du sol, le profil de vitesse est presque identique pour les 3 types de serres et pour les 3 cas, ce dernier est caractérisé par un ralentissement provoqué par la résistance des rangées de plantes. Mais au voisinage immédiat du sol, près du sol, un petit pic se développe, c.à.d. une légère augmentation de la vitesse se produit. Toutefois, le grand pic apparaît un peu plus haut au dessus des rangées de plantes où l'écoulement accélère. Cette augmentation (le pic de vitesse) diminue de plus en plus qu'on s'éloigne de l'entrée, (son amplitude diminue entre l'entrée et la sortie) étant donné que le motif d'écoulement initial est dissipé. A proximité du toit pour le cas de la serre tunnel et la serre à pieds droits, des valeurs négatives de la vitesse axiale (U_x) apparaissent car ils

correspondent à des zones de recirculation du fluide dans ces endroits. Concernant la serre Chapelle, le même phénomène de recirculation se situe près du sol (basse ordonné) car l'emplacement des ouvrants dans ce cas est près de la toiture de la serre.

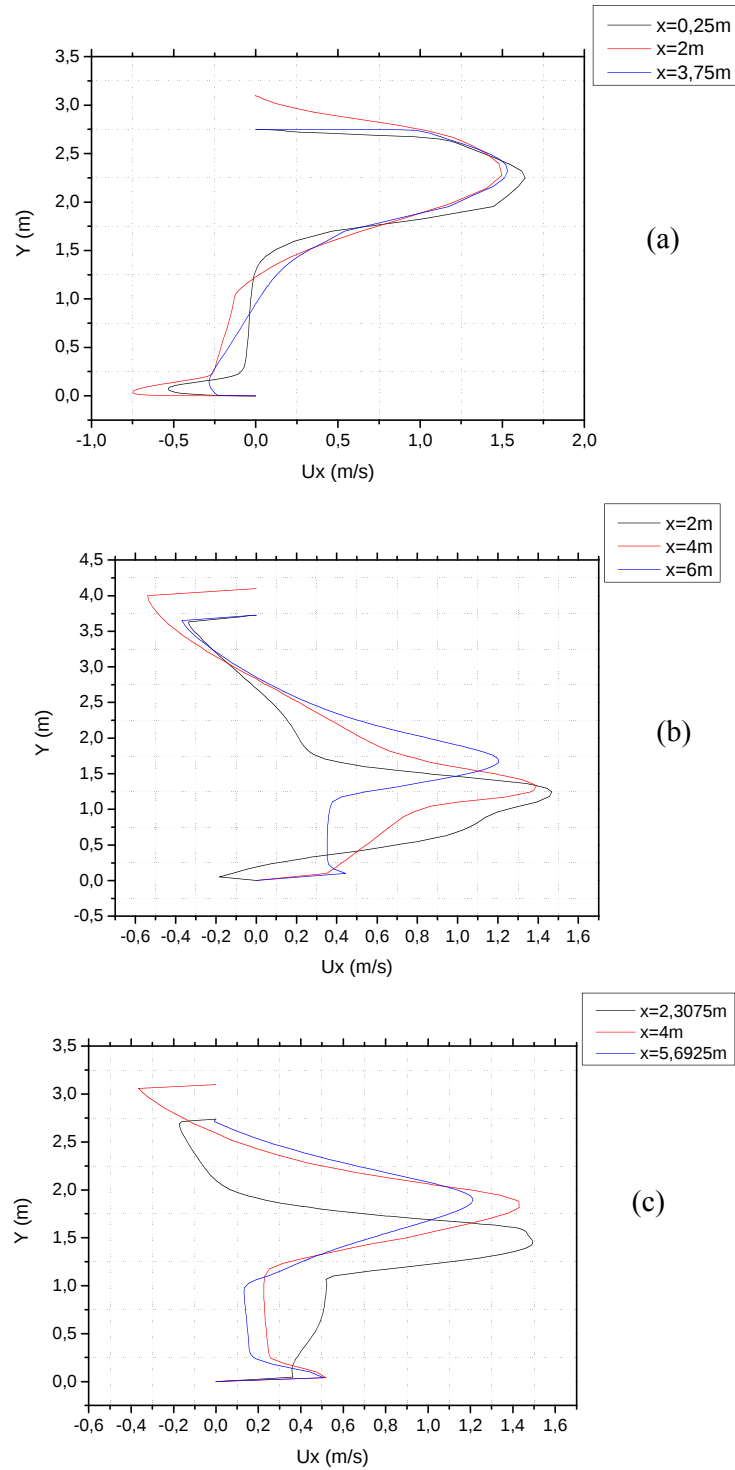
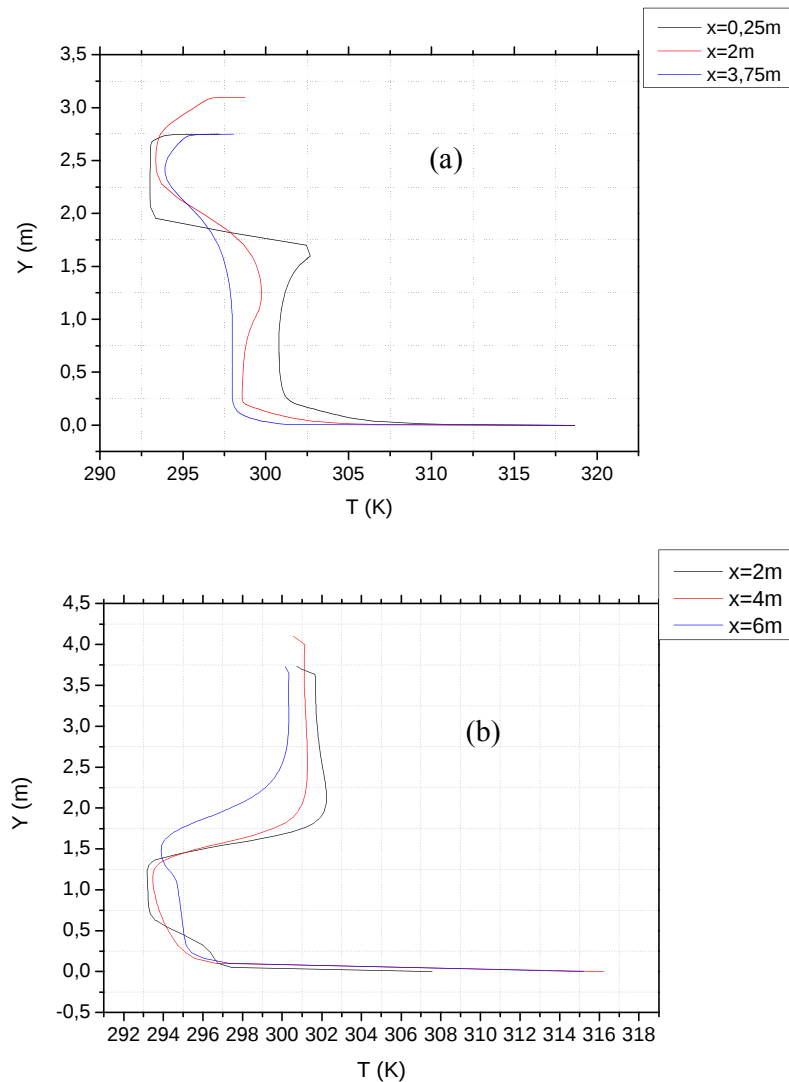


Figure 3.17: Profile de vitesse U_x dans trois stations de x (cas du jour) : (a) serre Chapelle, (b) serre à pieds droits et (c) serre tunnel.

e) Profils de Températures:

Dans la figure 3.18 les profils de température de l'air pour les mêmes positions décrites sur la figure 3.17 sont présentés. Deux zones distinctes peuvent être observées: une dans la partie inférieure du domaine, où la distribution de température est principalement affectée par la température du flux d'entrée (flux de ventilation) et de l'échange d'énergie avec les plantes. Concernant la deuxième zone c.-à-d. la partie supérieure du domaine la température de l'air est principalement affectée par le rayonnement solaire incident, son intensité varie d'un type de serre à une autre et dépend du type de la position des ouvrants.



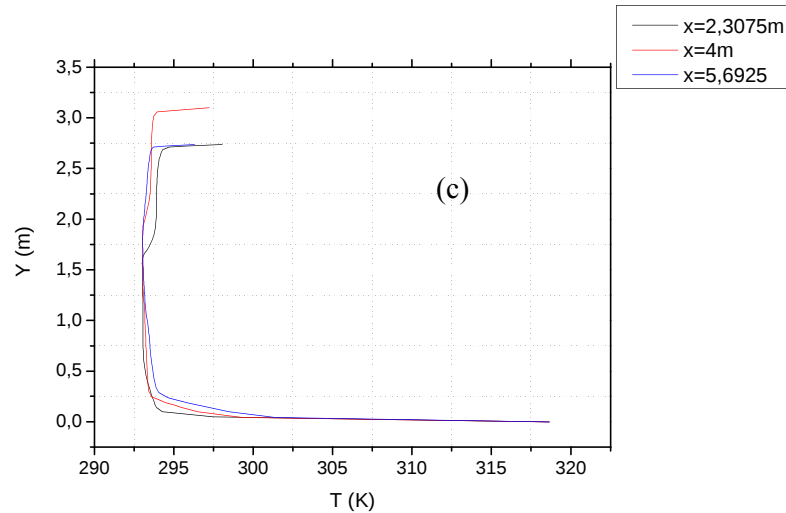
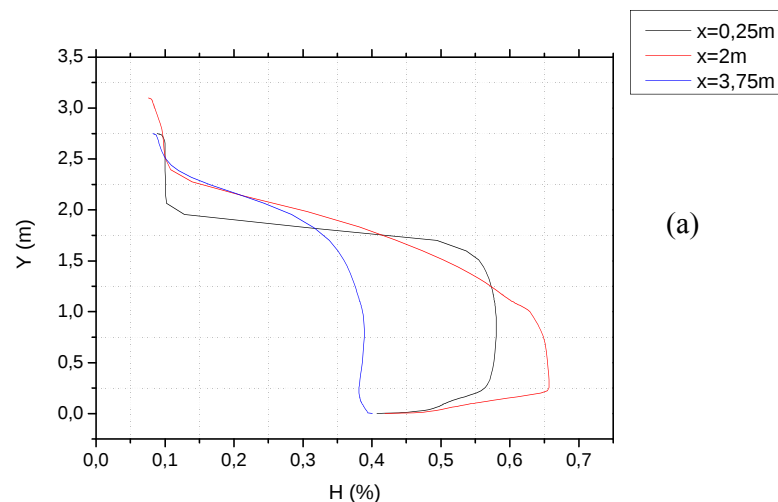


Figure 3.18: Profile de température dans trois stations de x (cas du jour) : (a) serre Chapel, (b) serre à pieds droits et (c) serre tunnel.

f) Profils d'humidité relatives:

On présente sur la figure 3.19 les profils d'humidité relatives dans les zones ($x=0.25\text{m}$; $x=2\text{m}$, $x=3.75\text{m}$) pour les trois types de serres. On constate qu'il existe deux zone de gradients d'humidité relative comme pour le cas du profile de la température. Concernant la première zone qui est la partie inférieure du domaine, l'humidité relative de l'air environnant dépend étroitement de l'humidité de la surface du feuillage des plantes et du sol caractérisés par un taux d'humidité élevé, et une vitesse découlement très faible, désormais l'air dans cet espace est peut loin d'être affecté le degré hygrométrique de l'écoulement d'air d'entrée. Contrairement a la partie inférieure la zone supérieure est fortement affecté par le faible taux d'humidité du flux de ventilation, ce qui est traduit par les figures 3.18 et 3.19.



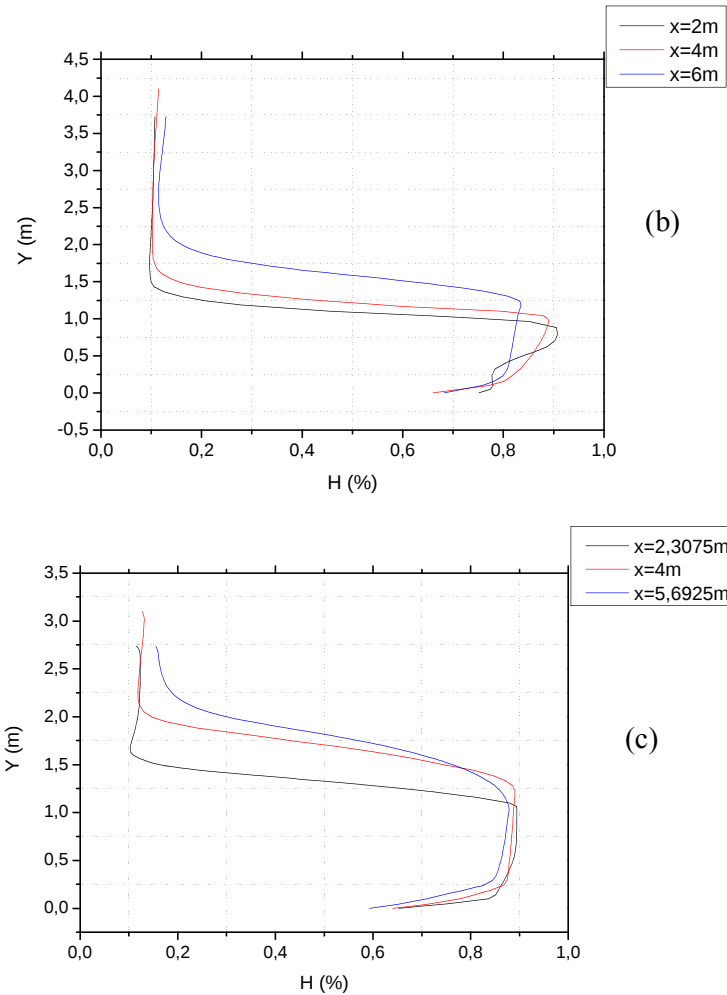


Figure 3.19: Profile d'humidité relative dans trois stations de x (cas du jour) : (a) serre Chapel, (b) serre à pieds droits et (c) serre tunnel.

g) Profils de flux incident sur les éléments de la serre:

Dans la figure 3.20, on représente le flux radiatif arrivant sur la surface du sol abrité, pour les trois types de serre. On peut remarquer aisément que le sol de la serre Venlo reçoit moins de flux radiatif que les sols des deux autres serres (serre à pieds droits et Tunnel). Le sol de la serre tunnel est le sol qui reçoit le maximum du flux radiatif par rapport aux autres. Ce même ordre est observé aussi sur les deux figures 3.21 et 3.22 qui représentent la variation du flux de chaleur radiatif reçu par le couvert végétale suivant les deux directions horizontales et verticales (faces horizontale et faces verticales).

A partir de ces figures, on peut calculer le flux radiatif moyen reçu par les plantes:

$$q_{\text{chapl}} = 613.2 \text{ w/m}^2 \quad q_{\text{pieds droits}} = 790.2 \text{ w/m}^2 \quad q_{\text{tunnel}} = 2013.1 \text{ w/m}^2$$

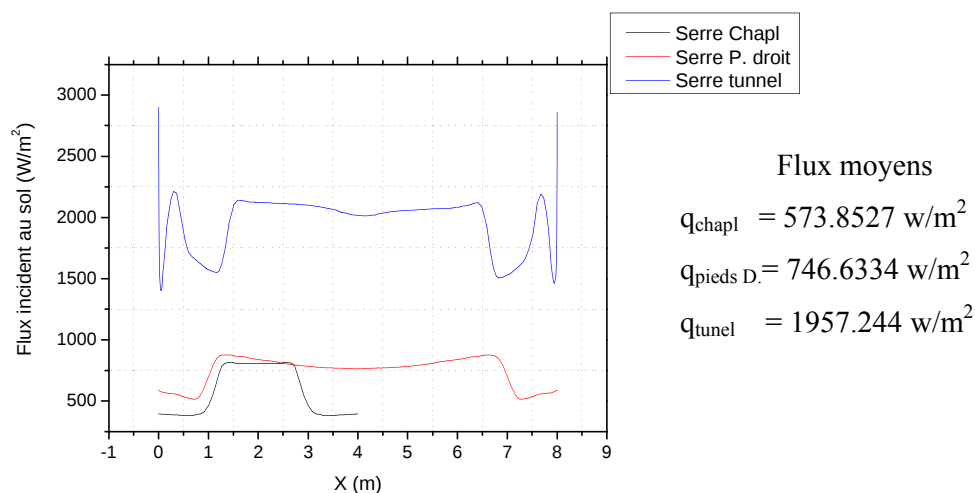


Figure 3.20: Flux incident au sol pour les différentes serres.

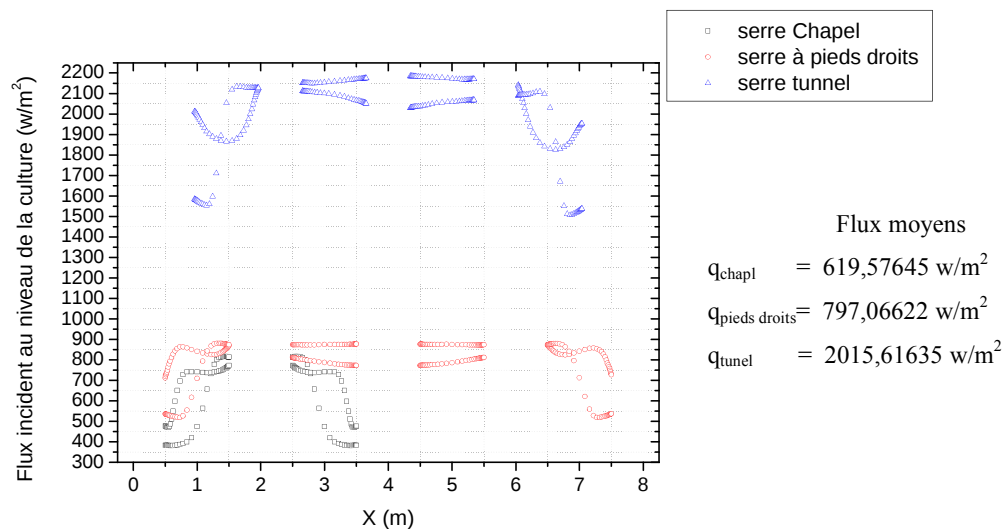


Figure 3.21: Flux incident sur les faces horizontales de la culture pour les différentes serres.

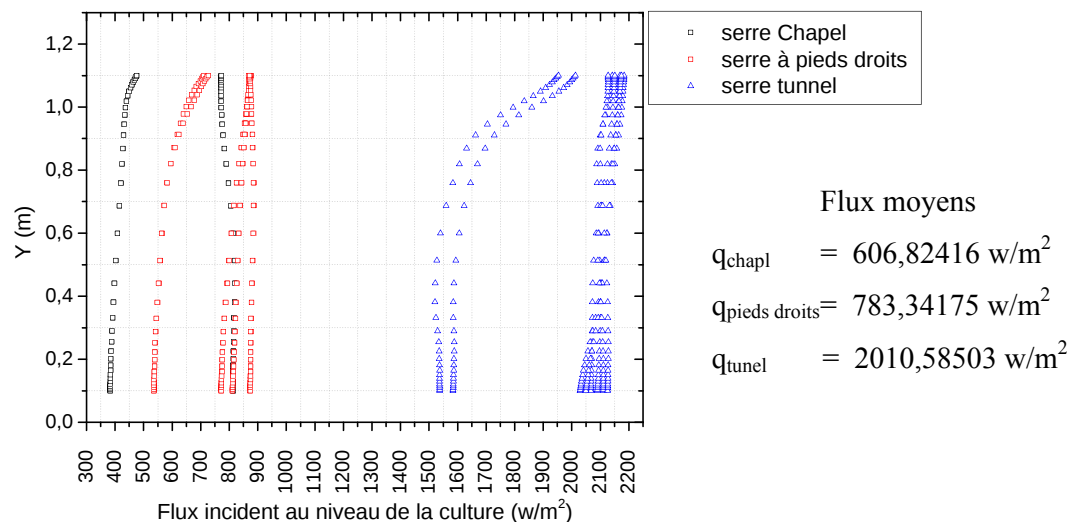


Figure 3.22: Flux incident sur les faces verticales de la culture pour les différentes serres.

Conclusions

CONCLUSIONS

Le travail de thèse est basé sur une étude comparative du comportement énergétique d'un ensemble de serres (serre tunnel, serre Venlo et serre a pieds droits) sous les mêmes conditions climatiques, cet approche simple que nous avons utilisé pourra contribuer au développement des cultures abritées dans notre pays et aux choix du type et la géométrie de la serre la mieux rentable énergétiquement pour les serristes dans notre région (climat semi aride du sud de la méditerranée). Notre travail porte essentiellement sur l'interaction des différents phénomènes existent à l'intérieur de la serre en présence du couvert végétale durant deux périodes: le mode jour et le mode nuit.

D'après les résultats trouvés par notre étude l'influence de la conception de la serre et sa configuration sur son microclimat et son bilan énergétique est bien remarquable. Les résultats indiquent bien que pour la période nocturne les champs de température de l'air ambiant dans la serre tunnel et la serre a pieds droit étaient relativement élevés et homogènes comparativement aux températures de l'air intérieur de la serre de type Venlo. Désormais on peut conclure d'après les résultats trouvés que durant la période nocturne, les serres en plastique, particulièrement la serre tunnel a un meilleur comportement énergétique en période nocturne (stockage d'énergie et homogénéisation du micro climat).

Concernant la période diurne, d'après les résultats trouvés, on peut dire que pour les serres en plastiques équipées d'ouvrants latéraux de ventilation entièrement ouverts, l'air situé entre les rangées de plante et la couverture près du la toiture, ainsi que celui situé près de la surface du sol des serres demeure très lent, n'excédant pas la vitesse de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ ce qui diminue les performance de la ventilation des deux serres en période chaudes. Concernant la serre de type Venlo durant la même période, la boucle de recirculation située au-dessus des rangés de plante et le toit de la serre pourra a notre avis améliorer d'une manière significative le brassage et le mélange d'air de ventilation avec les surfaces des composantes de la serre et contribuera a une bonne homogénéisation du micro climat comparativement aux deux géométries de serres précédentes. En conséquence la serre Venlo possède la meilleure performance en termes de ventilation, en particulier près du couvert végétale ou la vitesse de l'air est de l'ordre de $(0,4 - 0,6 \text{ ms}^{-1})$ comparée à celle des serres en plastiques pour les quelles les vitesses de l'air dans le même endroit sont inférieures à $0,3 \text{ ms}^{-1}$. La serre en verre de type Venlo représente également un gradient de température (entre l'intérieur et l'extérieur de la serre) relativement bas qui est de l'ordre de $(6 - 7^\circ\text{C})$ comparé à celui des deux serres en plastique $(8-10^\circ\text{C})$ ce qui augmente ces performances de ventilation en périodes diurne.

Vu la complexité des phénomènes qui interviennent dans le comportement énergétiques des serres agricoles, nous n'avons pas tout pris en considération dans ce travail de thèse, désormais nous suggérons dans le futur proche d'inclure ou de prendre en considération les phénomènes suivants:

- o Etude tridimensionnelle.
- o Large gamme de longueur d'ondes.
- o Les phénomènes de changement de phase (condensation, évaporation, et évapotranspiration des plantes).
- o Utilisation des ventilateurs mécaniques en cas d'excès de chaleur.
- o L'utilisation des filets anti-insectes sur les ouvertures d'aérations.

Références Bibliographiques

- [1]. Bournet .P.E, Ould Khaoua .S.A, Boulard .T, Migeon .C, Chassériaux .G (2007). Effect of roof and side opening combinations on the ventilation of a greenhouse using computer simulation. *Asabe*, 50: 201–212.
- [2]. Impron . I, Hemming. S, Botb GPA(2007). Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland. *Biosyst.Eng.* 98 :79-89.
- [3]. Rico-Garcia .E, Lopez-Cruz .I.L, Herrera-Ruiz .G, Soto-Zarazua .G.M,Castaneda-Miranda .R (2008). Effect of temperature on greenhouse natural ventilation under hot conditions: Computational Fluid Dynamics simulations. *J. Appl. Sci.* 8: 4543-4551.
- [4]. Baeza. E. J, Perez-Parra. J.J, Lopez.J .C, Montero J.I(2008).CFD simulation of natural ventilation of a parral greenhouse with a baffle device below the greenhouse vents. *Acta Hortic.* 801 :885-892.
- [5]. Bakker.J.C, Adams .S.R, Boulard.T, Montero J.I(2008).innovative technologies for an efficient use of energy. *Acta Hortic.* 801 :49-62.
- [6]. Roy JC, Boulard T (2005). CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models. *Acta Hortic.* 691: 457-464.
- [7]. Campen JB (2008). Vapor removal from the greenhouse using forced ventilation when applying a thermal screen. *Acta Hortic.* 801: 863-868.
- [8]. Khaoua SAO, Bournet PE, Migeon C, Boulard T, Chassériaux G (2006).Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosyst. Eng.* 95: 83-98.
- [9]. Kacira .M, Sase .S, Ikeguchi .A, Ishii .M, Giacomelli .G, Sabeh.N (2008).Effect of vent configuration and wind speed on three-dimensional temperature distributions in a naturally ventilated multi-span greenhouse by wind tunnel experiments. *Acta Hortic.* 801: 393-401.
- [10]. Sase .S.(2006). Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. *Acta Hortic.* 719 :313-324.
- [11]. Bournet .P.E, Boulard .T (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74:195–217.
- [12]. Rouboa A, Montero E (2007). Computational Fluid Dynamics analysis of greenhouse microclimates by heated underground tubes. *J. Mech. Sci. Tech.* 21(12): 2196 - 2204.
- [13]. S.A. Ould Khaoua, P.E. Bournet, C. Migeon, T. Boulard, G. Chassériaux Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, V95, Issue 1, September 2006, Pages 83-98.
- [14]. Wacquant, Effects of air humidity on growth, flowering, keeping quality and water relations of four short-day greenhouse species. *Scientia Horticulturae* 2000;86:299–310.
- [15]. Bordes, 1993
- [16]. Hughes BR, Ghani SAA (2010). A numerical investigation into the effect of windvent louvre external angle on passive stack ventilation performance. *Build. Environ.* 45: 1025-1036.
- [17]. Kim .K, Giacomelii .G.A, Yoon .J.Y, Sase .S, Son .J.E, Nam.S.W, Lee .I.B (2007). CFD modeling to improve the design of a fog system for cooling greenhouses. *Jpn. Agr. Res. Q.* 41: 283-290.
- [18]. C. Kittas, M. Karamanis, N. Katsoulas. Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings* 37 (2005) 807–812
- [19]. Harmanto; H.J. Tantau; V.M. Salokhe . Microclimate and Air Exchange Rates in Greenhouses covered with Different Nets in the Humid Tropics. *Biosystems Engineering* (2006) 94 (2), 239–253.

- [20]. Majdoubi .H, Boulard .T, Hanafi .A, Bekkaoui .A, Fatnassi .H, Demrati .H, Nya .M, Bouirden .L (2007). Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. *Asabe*, 50: 641-650.
- [21]. Teitel .M, Liron .O, Haim .Y, Seginer .I (2008a). Flow through inclined and concertina-shape screens. *Act.Hort.* 801: 99-106.
- [22]. Majdoubi .H, Boulard .T, Fatnassi .H, Bouirden .L (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agric. For. Meteorol.* 149: 1050-1062.
- [23]. Romero GP, Choi CY, Lopez-Cruz IL (2010). Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central Mexico. *Agrociencia*, 44: 1-15.
- [24]. Tablada. A, Blocken .B, Carmeliet .J, De Troyer .F, Verschure. H (2005). The influence of courtyard geometry on air flow and thermal comfort: CFD and thermal comfort simulations. *22nd Conf. Passive and Low Ener. Archit.* 1: 75-80.
- [25]. Tong G, Christopher DM, Li B (2009). Numerical modelling of temperature variations in a chinese solar greenhouse. *Comput.Electron. Agric.* 68: 129-139.
- [26]. Pontikakos C, Ferentinos KP, Tsiligiridis TA, Sideridis AB (2006). Natural ventilation efficiency in a twin-span greenhouse using 3D Computational Fluid Dynamics. *Of The 3rd I.Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture*, September: 20-23.
- [27]. Molina-Aiz FD, Valera DL, Pena AA, Alvarez AJ, Gil JA (2006). Analysis of the effect of rollup vent arrangement and wind speed on Almería type greenhouse ventilation performance using CFD. *Acta Hort.* 719: 173-180.
- [28]. Nebbali .R, Makhoulf .S, Boulard .T, Roy .J.C (2006). A dynamic model for the determination of thermal boundary conditions in the ground of a greenhouse. *Acta Hort.* 719: 295-302.
- [29]. Chow .K, Hold .A.E (2010). On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation. *Build. Environ.* 45: 437-444.
- [30]. Norton .T, Sun .D.W (2006). (CFD) an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trend Food Sci. Tech.* 17: 600-620.
- [31]. Teitel M, Tanny J (2005). Heat fluxes and airflow patterns through roof windows in a naturally ventilated enclosure. *Flow, Turbulence and Combustion* 74(1): 21-47.
- [32]. Fidaros DK, Baxevanou CA, Bartzanas T, Kittas C (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Ren. Energ.* 35: 1380-1386.
- [33]. Vera S, Fazio P, Rao J (2010b). Interzonal air and moisture transport through large horizontal openings in a full-scale two-story test-hut: part 1 – experimental study. *Build. Environ.* 45: 1192-1201.
- [34]. Nederhoff, E.M., van de Vooren, J. and Udink ten Cate, A.J., 1985. A practical tracer gas method to determine ventilation in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.*, 31: 309.
- [35]. Lee I B; Short T H (1998). A CFD model of volumetric flow rates for a naturally ventilated multi-span greenhouse. *92nd. Annual International Meeting of ASAE*, Paper No 987011, Orlando, FL, USA, July 12–16
- [36]. T. Bartzanas, C. Kittas, A.A. Sapounas, Ch. Nikita-Martzopoulou. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. *B I O.SYST. ENG.* 97 (2007) 229 – 239
- [37]. Roy JC, Vidal C, Fargues J, Boulard T (2008). CFD based determination of temperature and humidity at leaf surface. *Comput.Electron. Agric.* 61: 201-212.

- [38]. Teitel M, Ziskind G, Liran O, Dubovsky V, Letan R (2008b). Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosyst. Eng.* 101: 351-369.
- [39]. H. Demrati, T. Boulard, H. Fatnassi. Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop. *B I O S Y S T E M S E N G I N E E R I N G* 98 (2007) 66 – 78.
- [40]. Campen J.B (2008). Vapor removal from the greenhouse using forced ventilation when applying a thermal screen. *Acta Hortic.* 801: 863-868.
- [41]. Kim K, Yoona JY, Kwonb HJ, Hana JH, Sonc JE, Namd SW, Giacomelli GA, Lee IB (2008). 3-d cfd analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosyst. Eng.* 100: 245-255.
- [42]. Francisco B. Flores, Paloma Sanchez-Bel, Maria T. Estain, The effectiveness of grafting to improve tomato fruit quality. *Scientia Horticulturae* 125 (2010) 211–217.
- [43]. Norton, T., Sun, D.W., Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., 2007. Applications of (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresour. Technol.* 98, 2386–2414.
- [44]. Chen Q, Lee K, Mazumdar S, Poussou S, Wang L, Wang M, Zhang Z (2010). Ventilation performance prediction for buildings: model assessment. *Build. Environ.* 45: 295-303.
- [45]. Molina FD, Fatnassi H, Boulard T, Roy JC, Valera DL (2010). Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* 72: 69-86.
- [46]. R.Vaillon. “ Méthode Numérique En Rayonnement Thermique La Méthode Des Ordonnées Discrètes ”. Version juin 1997.
- [47]. Morille Benjamin. Elaboration D'un Modèle Du Climat Distribué A L'échelle De L'abri Et De La Plante En Cultures Ornementales Sous Serres : Analyse Des Transferts De Masse Et De Chaleur, Bilans Energétiques. THESE.version 1 - 13 Mar 2014.
- [48]. Guide théorique Fluent 6.3.26.
- [49]. Patankar, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, Washington, D, C. PP 115-120.1980.
- [50]. Versteeg H. K., Malalasekera W. 1995."An introduction to computational Fluid dynamics: the finite volume method". Longman Scientific & Technical.England.
- [51]. Anna Bykalyuk, Frédéric Kuznik, Kévy Johanes, (2015). "Studying the evolution of both thermal and kinetic boundary layers in the vicinity of a vertical conductive gypsum plate under dynamic time-depending conditions at the building scale". *Energy and Buildings* (86) 898–908.
- [52]. Mesmoudi K. 2007."Etude de la distribution de la température de l'air à l'intérieur d'une serre en plastique sans couvert végétal dans la région des Aurès, Etude Expérimentale". *Proc. International Conferences of Renewable Energy and Sustainable Development*..
- [53]. Kamel Mesmoudi.2010." Etude Expérimentale et Numérique de la Température et de l'Humidité de l'Air d'un Abri Serre Installé dans les Haut Plateaux d'Algérie, Région des Aurès.". Thèse de Doctorat-en-Science Spécialité : Mécanique université de Batna.
- [54]. Catherine Baxevanou¹, Dimitrios Fidaros, Thomas Bartzanas, Constantinos Kittas. Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse.

Annexe

Equation de Transfert Radiatif (ETR):**Milieu non-gris (notre cas ne considère qu'une seule bande du visible)**

L'Equation de Transfert Radiatif (ETR) pour un milieu non-gris, absorbant, émettant et diffusant à une position $\vec{r}$ le long d'une direction $\vec{s}$ dans une bande spectrale $\Delta\lambda$ est:

$$\nabla \cdot (L_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s) L_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 L_{0\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} L_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (I)$$

Avec:

λ : la longueur d'onde (m), $\vec{r}$: vecteur position, $\vec{s}$: vecteur direction, $\vec{s}'$: vecteur direction de diffusion, a_λ : coefficient d'absorption spectral (m^{-1}), σ_s : coefficient de diffusion (m^{-1}), n : indice de réfraction, L_λ : la Luminance spectrale ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$), T : température locale (K), Φ : fonction de phase, Ω' : angle solide, $(a_\lambda + \sigma_s)s$: l'épaisseur optique du milieu et $L_{0\lambda}$: la luminance spectrale du corps noir donnée par la fonction de Planck:

$$L(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad ; \quad c_{1L} = 2hc^2, \quad c_2 = \frac{hc}{k_B}$$

k_B : Constante de Boltzmann ($1.38064852 \times 10^{-23}$ J/K)

h : Constante de Planck ($6.62607004 \times 10^{-34}$ J.s)

c : Vitesse de la lumière dans le vide (299 792 458 m/s)

Milieu gris (pas de variation avec la longueur d'onde)

Pour un milieu gris, absorbant, émettant et diffusant, l'équation (I) s'écrit:

$$\underbrace{\frac{dL(\vec{r}, \vec{s})}{ds}}_I + \underbrace{(a + \sigma_s) L(\vec{r}, \vec{s})}_{II} = \underbrace{an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi}}_{III} + \underbrace{\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} L(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'}_{IV} \quad (II)$$

a : coefficient d'absorption (m^{-1}), σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5.672 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$), L : luminance, T : température locale (K), Φ : fonction de phase, Ω' : angle solide et $(a + \sigma_s)s$: l'épaisseur optique du milieu.

Chaque terme de l'ETR (Eq. II) est montré sur la figure 1, et est définie comme suit:

- I* : Variation de la luminance à travers l'élément ds du milieu semi transparent considéré.
- II*: Perte par absorption (a) et diffusion (σ_s). La première perte est due à l'absorption du rayonnement par le milieu, tandis que pour la deuxième perte, une partie du rayonnement provenant de la direction $\vec{s}$ est diffusée par le milieu dans toutes les autres directions $\vec{s}'$.
- III*: Gain par émission propre, ce renforcement du rayonnement est lié à la température du milieu.
- IV*: Gain par diffusion. Il représente le rayonnement issu de toutes les autres directions $\vec{s}'$ de l'espace, redirigé vers la direction $\vec{s}$ par diffusion.

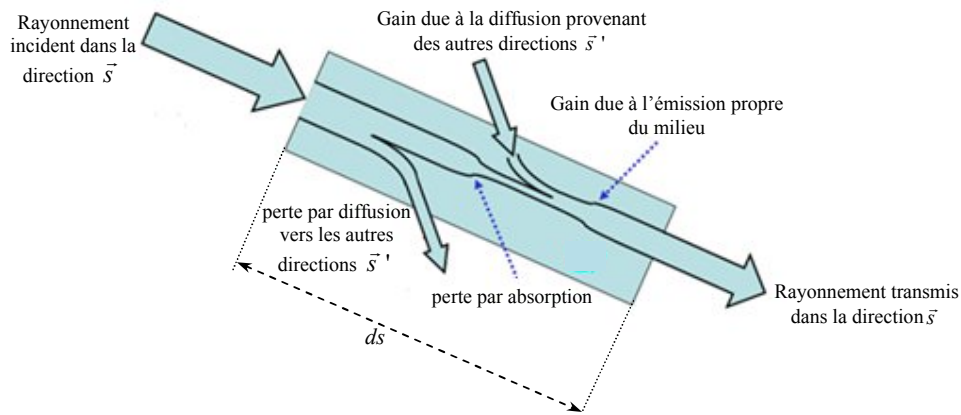


Figure 1 : – Différentes contributions du phénomène radiatif local.

La mise en œuvre de la méthode des ordonnées discrètes pour un milieu non-gris commence par la division du spectre de rayonnement en N bandes de longueur d'onde, qui ne doivent pas être contigus ou égale en étendue. Dans notre cas on a choisi une seule bande qui correspond au domaine visible $\lambda \in [0.4 - 0.76] \mu m$.

L'ETR est intégrée sur chaque intervalle de longueur d'onde, ce qui donne les équations de transport de la quantité $L_\lambda \Delta\lambda$, qui est l'énergie de rayonnement contenue dans la bande de longueur d'onde $\Delta\lambda$. Le comportement dans chaque bande est supposé gris (Eq. II).

La luminance totale $L(\vec{r}, \vec{s})$ dans chaque direction $\vec{s}$ à la position $\vec{r}$ est calculé par :

$$L(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k L_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k \quad (III)$$

Où la sommation est faite sur toutes les bandes spectrales.

Discrétisation angulaire et Pixellisation

Chaque octant de l'espace angulaire 4π à tout emplacement spatial est discrétisé en $N_\theta \times N_\phi$ angles solides de poids ω_i . Les angles θ et ϕ sont l'angle polaire et azimutal respectivement, et sont évalués par rapport au repère cartésien (x, y, z) comme représenté sur la figure 2.

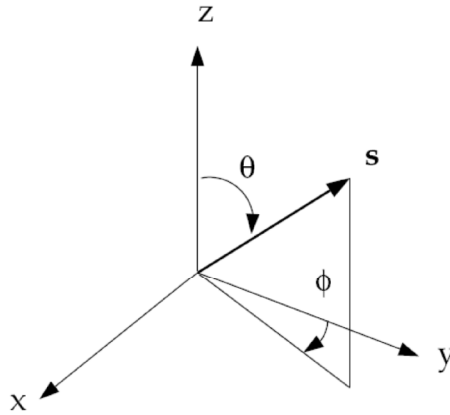


Figure 2 : système de coordonnées angulaires.

En 3D, la totalité des directions résolues est $8 N_\theta \times N_\phi$, tandis que pour le cas 2D juste 4 $N_\theta \times N_\phi$ directions sont résolues.

Dans notre cas $N_\theta \times N_\phi = 4 \times 4$. Chaque angle de contrôle est divisé en pixels où on a choisi 3×3 (Fig. 3). Cette discrétisation angulaire et pixellisation est recommandé par fluent.

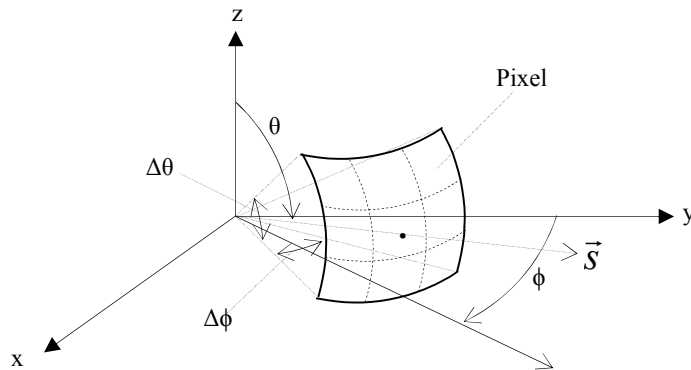
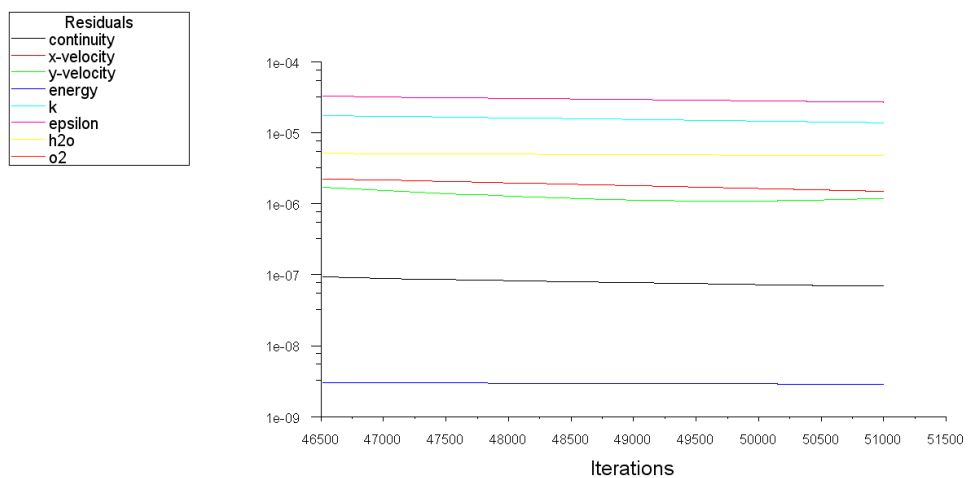


Figure 3 : Pixellisation de l'angle de contrôle.

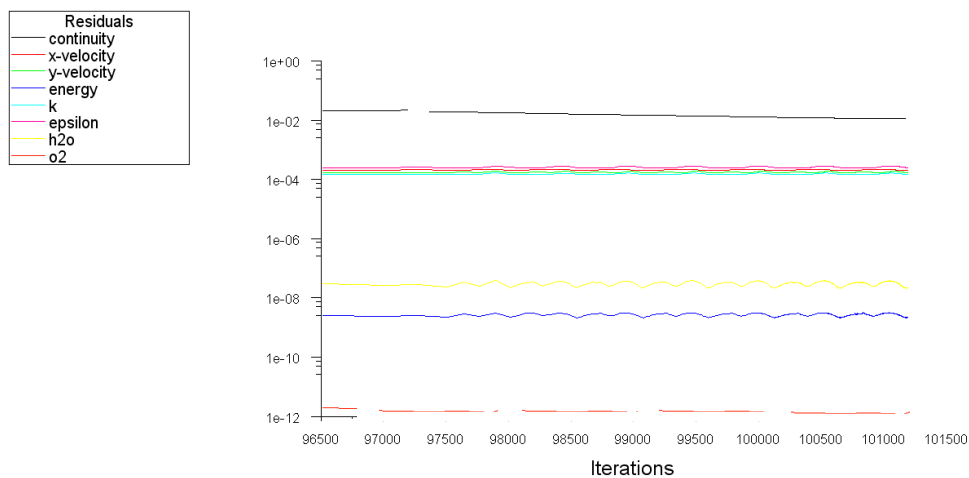
Residus :

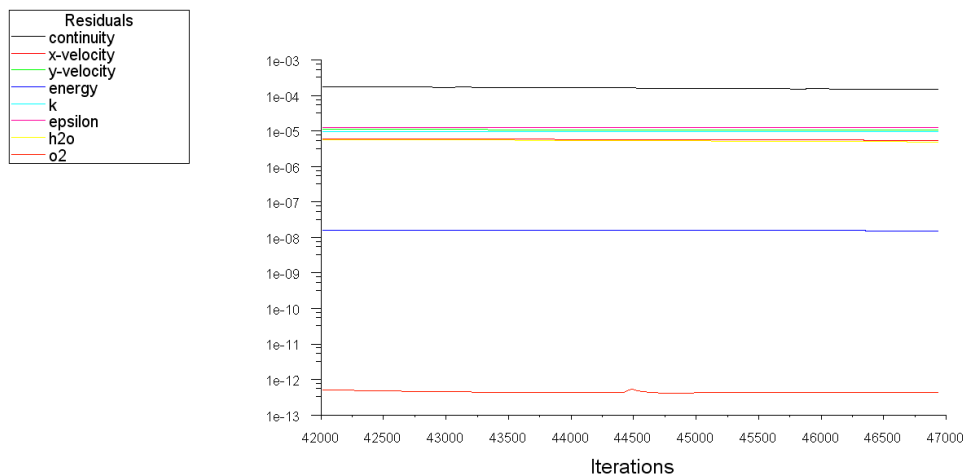
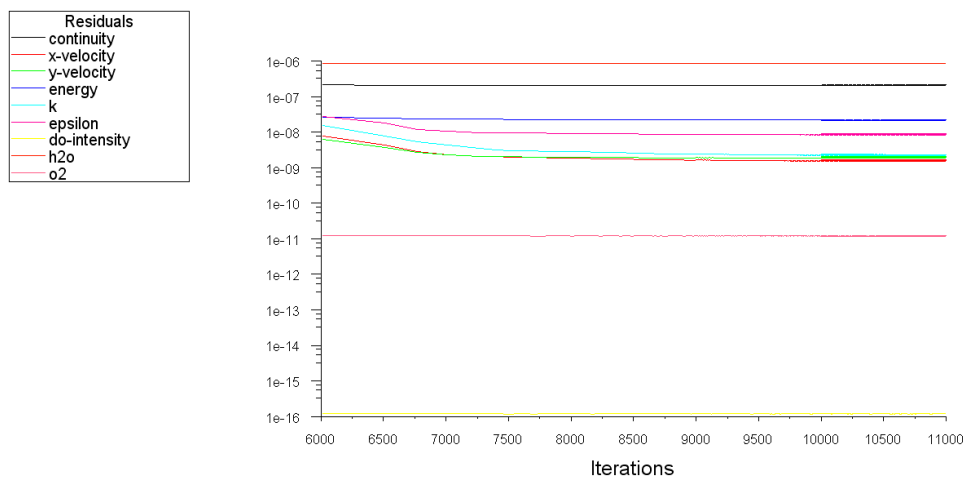
Cas Nocturne :

Chapel



Pied droit :



Tunel :**Cas diurne :****Chapel ; Tunnel ; Pied Droit :**

Résumé

La gestion du microclimat intérieur des serres agricoles est essentielle à la production des cultures et à la garantie de la qualité des produits. Au cours des dernières années, la CFD a prouvé son efficacité concernant la prédiction du micro climat des serres agricoles. Cependant il existe seulement quelques travaux qui ont contribué à l'analyse de la thermique des serres agricoles sous des conditions climatiques semi arides. Le but essentiel de ce travail est d'étudier l'impact des conditions bioclimatiques du sud de la méditerranée sur le comportement énergétiques de trois types de serres non chauffée (tunnel, Venlo et serre à pieds droits). Une étude de simulations 2D a été réalisée afin d'estimer l'influence de la géométrie et du matériau de couverture de la serre sur le comportement énergétique des serres. Pour établir les conditions aux limites et valider les modèles, des expériences ont été réalisées à l'intérieur des serres équipées de quatre rangs de plantes et dépourvues de tout système de chauffage artificiel. La serre Venlo a été recouverte d'un verre horticoles, et les autres d'un film en plastique (polyéthylène). Les simulations ont été effectuées pendant deux périodes contrastées à savoir (midi jour & minuit nuit) afin de faire apparaître les performances énergétiques de chaque type de serre. Une très bonne concordance ont été trouvés entre les résultats de simulation et ceux des expérimentations, une bonne cohérence avec les résultats de la littérature pour différentes tailles et types de serre a été remarquée. Ce travail de recherche pourra contribuer à la compréhension des phénomènes et des mécanismes qui gèrent la thermique des serres en générale et plus particulièrement le micro climat des serres agricoles installées dans notre pays. D'autre part cette étude pourra également contribuer à la détermination des coefficients d'échanges thermiques par convection entre les différentes surfaces des composantes de la serre.

ملخص:

يعتبر المناخ الداخلي ضروريا لإنتاج المحاصيل وضمان جودتها في البيوت البلاستيكية. وفي السنوات الأخيرة استعمل برنامج CFD لدراسة المناخ الداخلي لهذه البيوت في طقس حار وجاف. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير شروط محددة جنوب البحر الأبيض المتوسط والنظر في ثلاث أنواع من البيوت البلاستيكية (نفق، Venlo ونفق بجدار عمودي) وإجراء محاكاة ببعدين لمعرفة تأثير هندسة ومادة صنع الغطاء على الحصيلة الطاقوية، مع التركيز بشكل خاص على فقدان الحرارة. لتحديد الشروط الحدية والتحقق من صحة النموذج، قدمت تجارب حول هذه البيوت التي تحتوي على أربعة صفوف من المحاصيل بعيدا عن أي نوع من التدفئة الاصطناعية. البيت من نوع Venlo مغطى بالزجاج، أما البيوت الأخرى فهي مغطاة بالبلاستيك. أجريت المحاكاة خلال الليل و النهار مع الأخذ بعين الاعتبار إشعاع الشمس نهارا، والتحقق من الأداء الطاقوي لكل نوع من هذه البيوت. حيث وجد توافق جيد مع التجارب والتدفق يختلف من نوع إلى آخر ولكن كل الأنواع تحتوي على حلقتين. تمكن هذه الدراسة أيضا من تحديد معاملات التبادل الحراري بين التربة والهواء لكل نوع.

Abstract

Managing the indoor microclimate is essential to warranty crop production and quality in greenhouses. In recent years, computational fluid dynamics (CFD) proved to be efficient to predict the microclimate inside greenhouses but few CFD works analyzed hot and arid climatic conditions. The aim of this work is to investigate the impact of such specific conditions prevailing in the southern Mediterranean basin considering three different unheated greenhouses (tunnel, Venlo and plastic vertical wall greenhouse). 2D Simulations were conducted in order to estimate the influence of the greenhouse geometry and cover material on the energy balance, focusing in particular on the heat losses. To establish the boundary conditions and validate the model, experiments were launched inside greenhouses equipped with four rows of crop and deprived of any artificial heating system. The Venlo greenhouse was covered with a horticultural glass, and the others with a polyethylene film. Simulations were conducted during daytime, taking account of solar radiation, and at night to investigate the energy performance of each type of greenhouse. A good agreement was found with experiments. The predicted stable flow patterns slightly differed from one greenhouse to another, but they all disclosed a tow convective loop sweeping the floor, rising along the insulated side of the greenhouse, cooling down along the roof and moving down along the opposite side. This study made it also possible the determination of the heat exchange coefficients from the floor to the air and from the air to the roof for each greenhouse shape. The obtained values were coherent with results found in the literature for different greenhouse types and sizes.