

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

**UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**



THÈSE

Présentée au Laboratoire de Physique Energétique Appliquée (LPEA)
Pour obtenir le diplôme de Doctorat-en-Science
Spécialité : Mécanique

**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.**

OPTION : **ENERGETIQUE**

Présentée et soutenue publiquement
Le : 09 Décembre 2010 à Batna

Par : **Kamel MESMOUDI**

Devant le jury composé de:

Dr : Saadi BOUGOUL	Professeur, Université de Batna	Président
Dr : Azeddine SOUDANI	Professeur, Université de Batna	Rapporteur
Dr : Mohamed SI AMMER	Professeur, Université de Batna	Examineur
Dr : Zoubir NAMOUCHI	Professeur, Université de Constantine	Examineur
Dr : A/ Hafid MOUMMI	Maitre de Conférences, Université de Biskra	Examineur
Dr : Mahfoud KADJA	Professeur, Université de Constantine	Examineur

Département de Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna
Avenue Chahid Boukhrouf Med El Hadi, 05000 Batna

Dédicace

Je dédie ce travail de recherche à la mémoire de mon père

Mohamed Tahar MESMOUDI (1922-2000)

Père,.....cette réussite aujourd'hui est la vôtre,.....vous avez bien réussie à accomplir votre mission....., votre traversé durant l'automne de l'année 1965,..... merci.

Remerciements

A Azeddine SOUDANI, professeur et chef de département de physique de l'université de Batna qui m'a accueilli dans son département et qui a mis à ma disposition tous les moyens et toutes les conditions nécessaires au bon déroulement de ce travail.

Ce travail n'aurait pu se dérouler dans les meilleures conditions sans l'aide précieuse et nécessaire des deux professeurs Azeddine SOUDANI et Saadi BOUGOUL, qui ont encadré mon travail avec à propos et m'ont fait partager leur savoir et leur enthousiasme. Un énorme merci pour leur disponibilité sans bornes, leur patience et leurs idées toujours constructives.

Je tiens à remercier mon collègue de travail le Docteur Rachid ADJROUDI maître de conférence au département d'agronomie de l'université de Batna qui m'a permis d'acquérir la rigueur nécessaire à l'élaboration d'un tel travail et m'a conforté dans l'idée de poursuivre mes études doctorales.

Le Docteur Pierre Emmanuel Bournet maître de conférences à L'INH d'Angers, Agro campus ouest (France) est vivement remercié pour son aide concernant la publication de quelque résultat de ce travail.

Aux membres de mon jury, pour avoir bien voulu juger ce travail et participer à cette commission.

Kamel MESMOUDI

*Chargé de Cours, Département d'Agronomie
Faculté des Sciences, Université de Batna*

Table des matières

Chapitre 1

Introduction	1
1.1 Enjeux économique	1
1.2 Contexte de l'étude.....	3
1.3 Notre contribution	3
1.3.1 Problématique.....	3
1.3.2 Objectifs	6
1.3.3 Approches envisagées.....	7
1.4 Structure de la thèse.....	8

Chapitre 2

Synthèse Bibliographique

Introduction	10
2.1 Description de la serre et de son micro climat.....	11
2.1.1 Les serres tunnels	11
2.1.2 Les serres d'horticultures.....	11
2.1.3 Composantes d'un abri serre	13
2.1.4 Les matériaux de couverture ou de l'enveloppe.....	14
2.1.5 Les différents types de serre	17
2.1.6 Le micro climat de la serre	20
2.2 Synthèse bibliographique sur les travaux entrepris dans le domaine du fonctionnement du microclimat sous serre.....	25
2.2.1 Les Modèles du bilan énergétique de la serre	25
2.2.2 Les échanges de chaleur dans une serre	26
2.2.3 Les échanges convectifs.....	34
2.2.4 Les échanges conductifs	39
2.2.5 Interaction entre les différents phénomènes physiques	40
2.2.6 Effet de la végétation sur le bilan énergétique dans la serre.....	42
2.2.7 Les mécanismes de la ventilation dans la serre	46
2.2.8 Méthodes de mesures du microclimat des serres	50

2.3 Objectifs de l'étude et la démarche adoptée.....	53
--	----

Chapitre 3

Matériel et méthode

Introduction	56
3.1 Dispositif expérimental.....	57
3.1.1 Objectifs des campagnes de mesures	57
3.1.2 Le climat de BATNA	57
3.1.3 Site d'étude, serres expérimentées, et expérimentations	59
3.2 Approches Physiques et Modélisation.....	72
3.2.1 Description du modèle semi empirique du bilan énergétique globale d'une serre agricole sans couvert végétale.....	72
3.2.2 Approche de l'établissement d'un modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre avec plant de tomate	75
3.3.3 Description du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région semi aride.....	78
3.3.4 Description des modèles du coefficient d'échange convectif près de la paroi de la serre, pour une serre sans couvert végétale en période nocturne.....	83

Chapitre 4

Résultats et discussions

Rappel des objectifs	89
4.1 Distribution de la température de l'air intérieur de la serre durant la saison hivernale dans la région des Aurès.....	89
4.1.1 Introduction.....	89
4.1.2 Interprétation des résultats	90
4.2 Modèle semi empirique de bilan énergétique global de la serre agricole.....	95
4.2.1 Introduction.....	95
4.2.2 Interprétation des résultats.....	96
4.3 Modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre	102
4.3.1 Influence des conditions climatiques sur la température de l'air intérieur...102	

4.3.2 Interprétation des résultats	104
4.4 Approche expérimentale du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région semi aride	110
4.4.1 Introduction.....	110
4.4.2 Interprétation des résultats	111
4.5 Modèles de coefficient d'échange convectif près de la paroi de la serre, pour une serre sans couvert végétale en période nocturne.....	123

Chapitre 5

Conclusion générale	130
Résultats expérimentaux	131
Résultats de la modélisation mathématique	132

Bibliographie

Bibliographie.....	135
--------------------	-----

Annexes

Annexe A.....	143
Annexe B.....	144
Annexe C.....	147
Annexe D.....	150
Publications dans des revues avec comité de lecture	150
Congrès internationaux avec comité de lecture.....	150
Congrès national avec comité de lecture	150

Nomenclature

a : constante,	[-]
a : diffusivité thermique,	[m ² s ⁻¹]
b : constante,	[-]
c : couverture, constante,	[-]
C_m : chaleur massique,	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C_p : coefficient de pression,	[-]
C_w : coefficient d'effet global du vent,	[-]
C_p : chaleur massique à pression constante,	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
d : distance,	[m]
d : constante,	[-]
e : épaisseur,	[m]
e : pression de vapeur,	[Pa]
D_{st} : déviation standard,	[-]
E : éclairage solaire,	[W m ⁻²]
E_g : éclairage solaire global,	[W m ⁻²]
E_{gh} : éclairage solaire global sur un plan horizontal,	[W m ⁻²]
E_{ai} : humidité absolue de l'air intérieur,	[kg _{eau} /kg _{air} sec]
f : facteur de forme géométrique,	[-]
G : flux volumique de ventilation,	[m ³ s ⁻¹]
g : accélération de la pesanteur,	[m s ⁻²]
Gr : nombre de Grashof,	[-]
H_r : humidité relative,	[%]
h : coefficient de transfert de chaleur par convection,	[W m ⁻² K ⁻¹]
k : coefficient de transfert hydrique,	[-]
IR : rayonnement infrarouges,	[W]
L : longueur caractéristique de la surface solide,	[m]
LAI : indice foliaire,	[-]
L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau,	[J kg ⁻¹]
Moy : valeur moyenne,	[-]
M_w : masse molaire de l'eau,	[kg mol ⁻¹]
M_{ai} : masse molaire de l'air intérieur de la serre,	[kg mol ⁻¹]
Nu : nombre de Nusselt,	[-]
Nub : nébulosité du ciel,	[-]
q_s : énergie stockée par le sol de la serre,	[W]
qE : terme inertiel lié à la variation de la masse de vapeur d'eau,	[W]
Q : bilan de la serre, quantité de chaleur,	[W]
p : pression statique,	[Pa]
Pr : nombre de Prandtl,	[-]
r : réflectivité,	[-]
R : éclairage solaire,	[W m ⁻²]
Ri : nombre de Richardson,	[-]
Re : nombre de Reynolds,	[-]
\mathfrak{R} : taux de renouvellement d'air,	[h ⁻¹]
r^2, R^2 : coefficients de corrélations,	[-]
rs : coefficient de résistance à la diffusion,	[s m ⁻¹]
S : surface,	[m ²]
T : température,	[K]

$T1$: température de la coche du sol située à 20 cm de profondeur	[K]
$T2$: température de l'air intérieur à 20 cm au dessus de la surface du sol,	[K]
$T3$: température de l'air intérieur à 2 m au dessus de la surface du sol,	[K]
Tai : température de l'air intérieur,	[K]
Ti : température intérieur de la serre,	[K]
Te : température extérieure de la serre,	[K]
Ts : température de la surface du sol abrité,	[K]
Tss : température de la couche du sol situé à une profondeur z ,	[K]
Tc : température de la couverture,	[K]
Tci : température de la face intérieure de la couverture,	[K]
Tce : température de la face extérieure de la couverture,	[K]
Tae : température de l'air extérieur,	[K]
Tv : température de la voute céleste,	[K]
$Tsky$: température du ciel,	[K]
t : temps	[s]
u : vitesse du fluide,	$[m\ s^{-1}]$
Ue : vitesse du vent,	$[m\ s^{-1}]$
Ui : vitesse de l'air intérieur de la serre,	$[m\ s^{-1}]$
V : volume de la serre,	$[m^3]$
z : hauteur verticale,	[m]

Caractères grecs

α : coefficient d'absorption,	[-]
β : coefficient de dilatation thermique,	$[K^{-1}]$
ε : émissivité,	[-]
ε : coefficient d'évaporation,	[-]
τ : coefficient de transmission,	[-]
λ : conductivité thermique,	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
μ : viscosité dynamique,	$[kg\ m^{-1}\ s^{-1}]$
ν : viscosité cinématique,	$[m^2\ s^{-1}]$
ρ : masse volumique	$[kg\ m^{-3}]$
σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5.67\ 10^{-8}$	$[W\ m^{-2}\ K^{-4}]$
Φ : flux de chaleur,	[W]
φ : densité de flux de chaleur,	$[W\ m^{-2}]$
δ : épaisseur de la couche limite dynamique,	[m]
ΔT : gradient de température,	[K]
χ : humidité absolue de l'air,	$[g_{eau} / kg_{air\ sec}]$
κ : conductance du transfert de masse de la vapeur d'eau,	$[kg\ s^{-1}]$
θ : pas horaire,	[h]

Indices

ai : air intérieur
$aici$: air intérieur, face intérieure de la couverture
ae : air extérieur
ao : air extérieur
atm : atmosphère
$aiae$: air intérieur, air extérieur
$aiao$: air intérieur, air extérieur
$aici$: air intérieur, face intérieur de la couverture
$bilan$: bilan global de la serre

c : couverture
ci : face intérieure de la couverture
ce : face extérieure de la couverture
co : face extérieure de la couverture
cice : face intérieure de la couverture, face extérieure de la couverture
cico : face intérieure de la couverture, face extérieure de la couverture
ceae : face extérieure de la couverture, air extérieur
coao : face extérieure de la couverture, air extérieur
ais : état de saturation de l'air de la serre
e : extérieur
f : fuites
fuite : fuites à travers la structure de la serre
gai : surface du sol, air intérieur
sai : surface du sol, air intérieur
g : global, sol de la serre
i : intérieur
ir : infrarouge
L : grandes longueurs d'ondes
o : extérieur
p : à pression constante
s : sol intérieur
se : sol extérieur
so : sol extérieur
sky : ciel
t : rayonnements thermiques
tot : total
u : effet du vent
v : végétation
w : vapeur d'eau
 ∞ : valeur d'un paramètre situé loin de la surface solide

Exposants

C : convection
cov : convection
cod : conduction
D : conduction
evp : évaporation
I : infrarouge
inf : infrarouge
lat : latent
L : latent
net : net
R : rayonnement, rayonnement infrarouge
Ray : rayonnement
S : solaire
sto : stockage
sol : solaire
vent : ventilation
 * : valeur adimensionnelle, état de saturation
 .. : valeur virtuelle

Introduction

1.1 Enjeux économique

Les serres agricoles s'apparentent de plus en plus à des structures industrielles dont l'architecture et les performances doivent être optimisés pour assurer une rentabilité face aux coûts d'investissement qu'elles représentent. Optimiser et gérer le climat de la serre a pour objectif de faire disparaître les facteurs limitant de la production. Ainsi, il est essentiel de maximiser la quantité de rayonnement solaire entrant pour l'élaboration de la matière sèche; les choix se portent sur la géométrie et la structure de la serre, sur le choix de la couverture, sur le choix du site et de l'étage bioclimatique. La croissance du plant abrité dépend de la température de l'air intérieur de la serre maintenue dans l'abri, ce qui implique tantôt du chauffage, tantôt de la ventilation, tantôt de la déshumidification selon la saison. Les performances thermiques de la serre sont aussi à prendre en compte, les équipements d'isolations, de stockage thermique, et de chauffage peuvent s'avérer intéressants à mettre en œuvre. Le refroidissement de l'ambiance de la serre agricole en périodes chaudes, est un peu délicat, on aura recours tout d'abord à l'aération naturelle, puis à l'aération dynamique, puis à la réfrigération évaporative, et enfin à l'ombrage. Il existe peu de méthode de gestion de l'hygrométrie en période froide (déshumidification par aération et chauffage, pompe de déshumidification). Enfin la fumure carbonée tend à augmenter la photosynthèse, ce qui traduira par un gain de productivité et de la qualité. Il pourrait être intéressant récupérer les fumées et de valoriser les biogaz (traitements des déchets urbains par exemple).

Les serres sont largement utilisées dans le monde entier, surtout dans le bassin méditerranéen et le Sud Algérien. Les serres de type tunnel sont des installations légères à ouvrants modulables qui ne demandent pas un investissement important. Celles-ci ne sont pas trop performantes en Été, car le climat estival est naturellement trop chaud. Les serristes constatent alors une diminution sensible du rendement et de la qualité de la production de leurs cultures. Pour la tomate, par exemple, qui constitue la grande majorité des cultures sous serre, il est difficile d'assurer une production de qualité durant la période estivale. Les conditions climatiques extrêmes, telles que la forte hygrométrie

et les températures élevées, favorisent le développement de maladies et entraînent une diminution de fermeté et de calibre. Pour le cas de la rose, la gestion de la culture sous serre est lourde (serre de type multi chapelle) et souvent difficile à maîtriser, notamment en période estivale du fait des températures élevées enregistrées au niveau racinaire (réchauffement des substrats), et aussi du faible niveau de rétention en eau des substrats utilisés. Par ailleurs, ce mode de culture exige des pratiques de conduite appropriées, différentes de celles pratiquées en culture classique, ou l'arrêt de récolte est couramment pratiqué en période estivale.

L'étude et la modélisation du microclimat de la serre avec toutes ces composantes (température, humidité, évapotranspiration, condensation, échange convectif et radiatif, et ventilation) est un des moyens indispensables pour contrôler les paramètres climatiques de la serre. Chaque paramètre peut jouer un rôle essentiel, car il permet : de réguler la température dans la serre, de limiter l'humidité de l'air, d'assurer l'alimentation des plantes en dioxyde de carbone et de limiter le développement de pathologies fongiques.

Les augmentations successives du coût de l'énergie, ont amené les scientifiques de tous les pays où se pratiquent des cultures abritées à se pencher sur les problèmes énergétiques posés par les serres. La surveillance sur place du microclimat peut fournir les données les plus utiles, mais en raison du coût élevé et la sophistication de l'appareillage de mesure, la plupart des techniciens sont peu disposés à surveiller ces appareillages; comme alternative, les évaluations du microclimat doivent être réalisées à partir de modèle simple, qui utilise des données facilement mesurables.

Même si le climat de l'Algérie lui permet de se présenter sur les marchés avec une certaine précocité, par rapport à bon nombre de ses voisins méditerranéens, il a paru intéressant de présenter une étude du comportement énergétique du microclimat de la serre (Caractérisation du climat semi aride), les modèles qui seront établis par notre étude peuvent être facilement manipulables par les ingénieurs et les techniciens dans le domaine agricole. Dans tous les cas, notre étude est susceptible de fournir une

estimation des besoins de la serre agricole en Algérie (chauffage, ventilation, de climatisation, irrigation etc.....).

1.2 Contexte de l'étude

La thèse se focalisera sur l'étude des paramètres du microclimat et du bilan énergétique des serres agricoles en plastique est en verre de type Venlo mono chapelle, sous conditions climatiques semi aride (Région des Aurès).

Le type de serre chapelle est habituellement utilisé en culture ornementale, plantes en pots. Les constructeurs commercialisent ce type de produit et innovent chaque année pour répondre à la demande de la branche horticole. Les serristes souhaitent bénéficier d'un appui scientifique afin de mieux maîtriser le micro climat de l'abri serre.

Il est à signaler que la majorité des travaux déjà menés sur le micro climat des serres agricoles sont des travaux élaborés pour des serres installées dans des régions appartenant à des étages bioclimatiques différents du climat du sud de la méditerrané (climat tempéré Européen, et climat tropicale asiatique).

1.3 Notre contribution

Dans cette thèse, seuls les mécanismes physiques qui interviennent dans la variation et la transformation du micro climat des serres seront considérés. Ainsi, la principale contribution de ce travail de thèse réside dans :

- i) L'étude des paramètres climatiques de l'air intérieur de la serre,
- ii) La modélisation du bilan énergétique de la serre agricole ;
- iii) La modélisation de quelques composantes du climat de la serre (Température et coefficient d'échange convectif) pour les serres installées dans des régions appartenant à un étage bioclimatique semi aride.

1.3.1 Problématique

La gestion du micro climat sous serre relève d'une certaine habilité, notamment dans les régions ensoleillées (région aride et semi aride). Cependant L'analyse de la réponse d'une serre en fonction des conditions climatiques extérieures permet alors de

mieux en cerner le fonctionnement. Une analyse plus précise des mécanismes qui régissent les échanges (de chaleur et de masse) entre l'air intérieur de la serre et son environnement est donc essentielle pour améliorer les systèmes d'irrigation, de ventilation, de chauffage, et parvenir ainsi à une meilleure maîtrise du climat sous abri. Il est même possible d'optimiser les systèmes de fertilisations, et de pulvérisations, ainsi le système agro serre en générale. Cette problématique intéresse d'autant plus les agriculteurs (les serristes) et les constructeurs de serre ensemble; puisque ces mécanismes sont des facteurs limitant qui influent fortement sur la production aussi bien en termes de quantité que de qualité, désormais il apparaît qu'une bonne gestion du microclimat de la serre peut permettre à la fois de mieux préserver les cultures et de réduire les coûts engagés.

Récemment la recherche spécialisée fait état d'un grand nombre de travaux de modélisation destinés à appréhender les phénomènes énergétiques qui régissent le climat intérieur des serres agricoles. L'évolution de ces modèles a été rapide, poussée à la fois par le développement des nouveaux moyens informatiques et par une conjoncture de la maîtrise des phénomènes énergétiques de la serre pour chaque région du monde devenait fondamentale pour un développement optimum des cultures abritées. On peut citer un certain nombre de travaux dans les quels le bilan énergétique de la serre a été particulièrement étudié : Kimbal, (1973); Monteil, et al. (1985); Joliet, (1988); Issanchou, (1991); Meknassi, et al. (1998), la majorité des auteurs ont réalisé des modèles dynamiques des bilans échangés pour simuler le bilan énergétique des abris serres. Quoique la plupart de ces modèles aient produit des évaluations raisonnables, très peu d'entre eux ont été employés dans la pratique pour les prévisions du microclimat de serre sur une longue période continue.

En Algérie, l'utilisation des serres a graduellement émigré des régions littorales vers le sud du pays, tels que les hauts plateaux, secteurs situés dans une région semi aride, cette dernière est caractérisée par une insolation hivernale élevée, variant entre (1030 et 1400) heures du mois d'octobre au mois de mars de chaque année (Mesmoudi et.al 2007). Les serres en plastique sont largement utilisées en bassin méditerrané et particulièrement en Algérie, cet intérêt est dû à: Leurs structure simple, leurs prix de

reviens modeste et leur aménagement facile. Malheureusement l'hétérogénéité climatique est très marquée dans ce type d'abri, ce phénomène oblige les agriculteurs à augmenter les opérations de fertilisation et d'irrigation, ceci a été observé sur les plants de laitue au sud de la France.

Une distribution homogène des paramètres climatiques du climat de la serre (la température, l'hygrométrie) est non seulement un facteur essentiel pour l'uniformité de croissance du plant abrité, elle est également un paramètre important pour l'optimisation des déperditions énergétiques et des opérations commandées (irrigation, fertilisation, enrichissement en CO₂, et ventilation), dans la plupart des cas, un environnement homogène est désiré. Les paramètres climatiques de la zone d'installation de la serre (la température extérieure, l'éclairement solaire, l'intensité et la direction du vent) sont largement responsables de l'hétérogénéité climatique de la serre et de son bilan énergétique.

Pour le cas de notre région (Les hauts plateaux Est d'Algérie), le développement d'outils d'aide à la décision, reposant sur des modèles fiables, devrait permettre d'ajuster la gestion des composants de la serre (couverture, ouvrants d'aération, géométrie de la serre), voire même de proposer des conceptions plus performantes et adaptables à notre climat (aride et semi aride). La région de Batna qui appartient aux hauts plateaux Est d'Algérie, est caractérisée par un hiver froid et sec, avec des températures minimales moyennes situées entre (-5°C - 2°C) peuvent se produire durant les périodes nocturnes des mois de janvier et Février, avec des états d'humidité faibles. Ces deux facteurs peuvent affecter négativement le rendement et la qualité des cultures abritées. En revanche, parce que peu de travaux sur l'énergétique des serres dans les régions arides et semi aride du sud de la méditerranée ont été réalisées, ces raisons sont suffisantes pour se pencher sur une étude de caractérisation du bilan énergétique d'une serre dans la région (i.e. Région des Aurès, Hauts plateaux Est Algériens) durant la saison hivernal.

Dans ce contexte, Une première partie de cette thèse se focalisera sur une approche expérimentale de l'étude de la variation de la distribution de la température

dans une serre en plastique dans la région des Aurès. Le premier objectif de cette approche est la détermination des champs de température de l'air intérieur et celle de la surface du sol, pour une serre fermée durant la période la plus froide et la plus ventée de la région. Le second objectif est de faire apparaître les deux types d'hétérogénéité climatique (horizontale et verticale) à l'intérieur de la serre sous les effets de la convection naturelle, l'intensité du vent et sa direction. Une deuxième partie de cette thèse se focalise sur l'analyse du bilan énergétique d'une serre en verre de type Venlo dépourvue de chauffage artificiel, et une troisième partie sera réservée pour la détermination de modèle de température de l'air intérieur et des coefficients d'échange convectif de la paroi de la serre. Pour aboutir à ce but, l'étude énergétique de la serre et de chacun de ces composants a été établie. Les échanges radiatifs sont aussi analysés, ces derniers sont actuellement mal connus par les serristes installés dans la région en raison de la difficulté de les mesurer. A partir des résultats expérimentaux, les flux de chaleur et les coefficients d'échange thermiques ont été calculés, et comparés aux résultats obtenus par la recherche dans le domaine.

1.3.2 Objectifs

L'élaboration de modèles qui peuvent prédire d'une manière efficace les paramètres du système agro serre constitue l'un des objectifs prioritaires de notre étude. Compte tenu du constat dressé dans le paragraphe précédent, nous avons essayé de concilier deux types d'objectifs durant ce travail de thèse.

Sur le plan académique nous répondons à des objectifs scientifiques de modélisation des paramètres du micro climat de serre installée dans une région semi aride (région des Aurès) en outre il s'agira de :

- Développer des modèles du bilan énergétique de serre, ainsi développer des modèles empiriques des quelques composantes de ce bilan (Température, coefficient d'échange, bilan énergétique global). ; Cependant, notre objectif c'est de développer des approches et des corrélations facilement manipulables par les techniciens dans le domaine a fin de parvenir aux besoins des agriculteurs et aux serristes.
- Autrement dit l'objectif scientifique de notre travail est l'introduction de l'analyse énergétique des serres en Algérie et de compléter les diverses approches par des

modèles semi empirique et empirique inspirés des modèles classiques déjà proposés, les caractéristiques de nos modèles sont : Les modèles sont établis expérimentalement sous des conditions climatiques différentes (Climat semi aride), les modèles utilisent à la fois des paramètres facilement mesurables et sont basés sur des équations théorique qui intègrent l'ensemble des processus d'échanges thermiques entre les composantes de la serre (couverture, l'air intérieur, le sol, et la plante) ; qui, à notre connaissance, constitue la principale originalité de ce travail de thèse.

- Concernant le coté validation; il importe de noter qu'il est nécessaire de parvenir à un niveau de validation suffisant des modèles développés avant de pouvoir les considérer comme fiables et de les appliquer.

1.3.3 Approches envisagées

Deux approches ont été mises en œuvre dans notre travail de thèse, chacune d'elles répond à des besoins spécifiques :

- l'expérimentation par des mesures *in situ*,
- la modélisation mathématique.

Mesures in situ : La connaissance de l'agro système serre ne peut aboutir par la seule voie de la modélisation et l'approche de terrain constitue l'unique moyen de découvrir des mécanismes mal connus. Cependant, cette approche nécessite d'une part un temps d'étude trop important et d'autre part des moyens en général assez considérables. Toutefois, outre la fourniture des données nécessaires à la mise au point du modèle mathématique et à la vérification puis à la validation de ce dernier, les campagnes de mesure répondent à d'autres préoccupations :

- La connaissance du climat sous serre ;
- La connaissance des échanges entre l'intérieur et l'extérieur de la serre sous un climat semi aride.

Modélisation mathématique : pour étudier un phénomène, le valider, et évaluer sa pertinence par rapport à un objectif donné, on passe généralement par l'élaboration d'un modèle. Le modèle peut être défini comme une représentation simplifié de la réalité, c'est une représentation mathématique formalisé par des équations algébriques

(variables d'états, variables de flux) ainsi que leurs évolutions mathématique. Un modèle est une équation mathématique qui peut être capable de décrire ou de prédire un mécanisme ou un phénomène physique comme dans les dimensions spatiales que dans la dimension temporelle, il devra être aussi puissant au sens où il sera capable de donner des informations sur chaque détail. Un bon modèle, est un modèle utile, efficace et économique.

1.4 Structure de la thèse

La thèse a été divisée en 5 chapitres. Le chapitre 1 est une introduction générale ; Le chapitre 2 dans sa première partie rappelle la description de la serre et de son micro climat, dans la deuxième partie de ce même chapitre on rappelle les principaux processus physiques qui concourent à l'établissement du bilan énergétique de la serre, et de la structure aérodynamique et thermique de son microclimat. A la fin de ce chapitre nous avons procédé à un état de l'art en matière d'étude des paramètres climatique des serres en analysant différents travaux expérimentaux et numériques entrepris par plusieurs auteurs.

La première partie du chapitre 3 présente les dispositifs expérimentaux ainsi que les principales techniques de mesures employées *in situ*, la deuxième partie de ce même chapitre concerne la formulation mathématique des principaux phénomènes physiques qui interviennent dans la détermination des composantes du bilan énergétique des serres. Cinq approches sont présentées :

- Une approche pour l'étude de la distribution de la température de l'air intérieur de la serre ;
- Une approche pour la caractérisation du bilan énergétique global de la serre agricole ;
- Une approche pour la détermination d'un modèle de température de l'air intérieur de la serre ;
- Une approche pour l'étude du bilan énergétique nocturne de la serre ;
- Une approche pour la détermination des coefficients d'échanges convectifs de la couverture de la serre.

Toutes les approches sont des études purement expérimentales de caractérisation du bilan énergétique des serres agricoles installées sous conditions climatiques appartenant

à un étage bioclimatique semi aride. Les étapes successives de mise au point de la modélisation sont aussi présentées dans cette partie.

Dans le chapitre 4, les données acquises et les résultats obtenus sont interprétés et validés en relation avec des modèles empruntés à la littérature.

Finalement le chapitre 5 englobe une conclusion générale du travail de thèse.

Chapitre 2

Synthèse Bibliographique

Introduction

La serre vient du verbe « serrer », on peut donc en déduire, logiquement, qu'il s'agit d'un espace réduit, où on essaiera de faire tenir le plus grand nombre de plantes possibles. Ce n'est sans doute là qu'un aspect très partiel du rôle de la serre moderne. La serre est conçue à l'origine comme un simple abri, ou une enceinte destinée à la culture ou à la protection des plantes en exploitant le rayonnement solaire, elle est devenue un local industriel de production de la matière végétale ou l'on tente d'adapter l'environnement immédiat de la plante, de façon à améliorer sa productivité et sa qualité, en l'affranchissant du climat extérieur, du sol local et même des saisons.

Les facteurs climatiques qui influencent le climat intérieur de la serre sont la température et l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, le vent extérieur... En réalité, chacun de ces facteurs engendre une combinaison d'effets qui peuvent être favorables ou non au fonctionnement de la serre selon les conditions locales qui prévalent. La température intervient de façon prépondérante dans la croissance et le développement de la végétation ; Les concentrations de CO₂ et de vapeur d'eau, jouent un rôle déterminant dans la transpiration et dans la photosynthèse des plantes ainsi que dans le développement des maladies fongiques ; Le rayonnement solaire intervient également dans la photosynthèse. Certains matériaux de couverture comme le verre, transparents au rayonnement de courtes longueurs d'ondes et opaques au rayonnement infrarouge, créent un effet de serre qui provoque lui-même une augmentation de température sous l'abri. Le vent génère des différences de pression sur la serre qui peuvent l'endommager dans les cas extrêmes. Il provoque également des pertes par convection et contribue de façon déterminante à l'aération naturelle. Un contrôle bien maîtrisé du bilan énergétique du climat permet donc de gérer ces paramètres et d'améliorer le fonctionnement physiologique des plantes (Mistriotis *et al.* 1997b).

Notre objectif dans ce chapitre est de rappeler les mécanismes qui interviennent dans le fonctionnement du microclimat sous serre puis de procéder à un état de l'art en matière d'étude de du bilan énergétique des serres en analysant les travaux déjà

entrepris sous différents étages bioclimatiques. Nous présentons enfin les objectifs de notre travail ainsi que la méthodologie que nous avons choisie de mettre en œuvre.

2.1 Description de la serre et de son micro climat

Il existe deux types de serre : les serres d'horticulture (pour les cultures ornementales) et les serres tunnels.

2.1.1 Les serres tunnels

En général, la serre tunnel se compose d'une série d'éléments juxtaposés constitués chacun par une armature en tube d'acier et en profilés assemblés par des boulons. La largeur est de (3 à 9) m. 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 est arrondie, mais il existe également des modèles à pieds droits comme pour les serres en verre, Certaines d'entre elles sont d'ailleurs convertibles pour leurs couvertures.

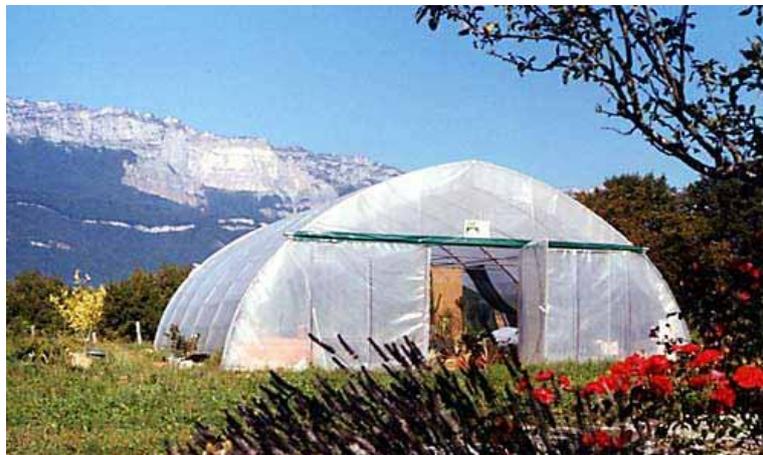


Figure (2.1) : Photo d'une serre tunnel

2.1.2 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, les dimensions courantes sont approximativement entre (3, 6, 9,12 et 16m). 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, fig. 2.2 permettra de retrouver en volume ces différents éléments.

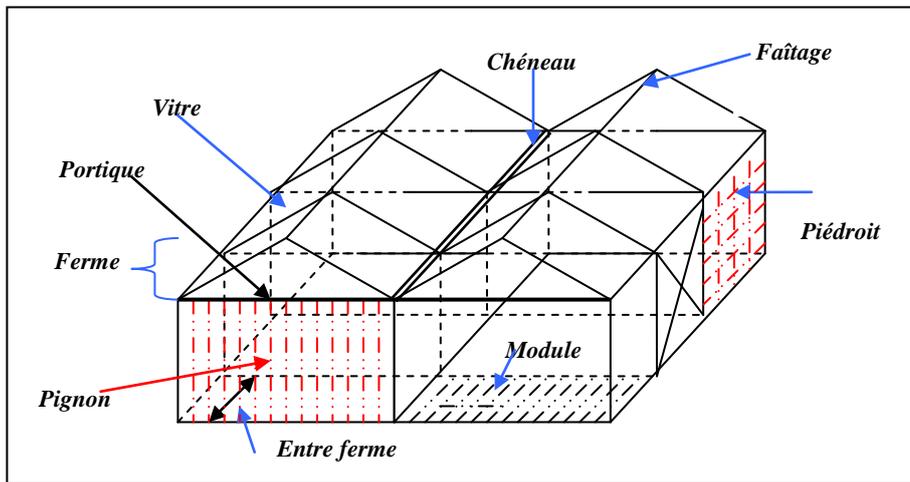


Figure (2.2a) : Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules chacune, Waquant (2000).

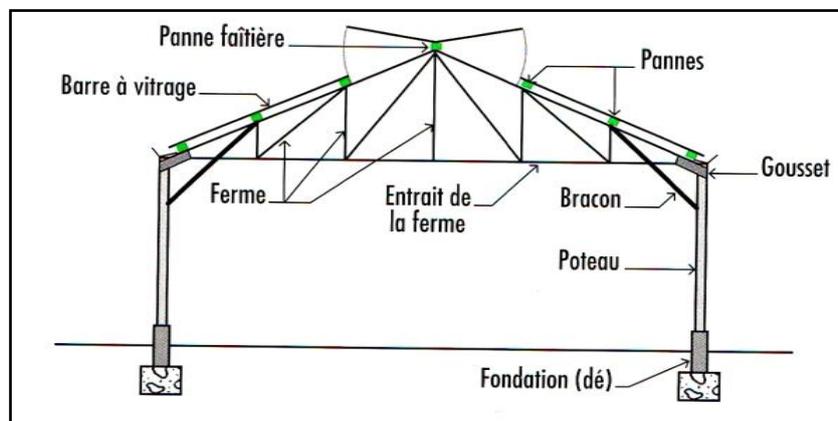


Figure (2.2b) : Structure d'une serre traditionnelle, Waquant (2000).

2.1.3 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.

- *L'acier* : Est largement utilisé dans l'ossature de la serre : poteaux, fermes, arceaux, poutres, pannes, chéneaux. L'acier est parfois utilisé pour les barres à vitrage ; depuis quelques années, il est souvent remplacé pour cet usage par l'aluminium. Les caractéristiques mécaniques avantageuses d'acier sont : la limite de résistance à la rupture, la limite d'élasticité, l'allongement, la résilience, et la résistance à la rupture sont favorable à ce type de construction. En construction, on emploie surtout l'acier doux ordinaire et des aciers mi-durs. En revanche on compte pour l'acier les inconvénients suivant: Présenter une conductivité thermique élevée, et la continuité des liaisons entre la charpente et les éléments métalliques de la couverture favorise les pertes de chaleur par «pont thermique»

- *L'aluminium* : Les alliages d'aluminium sont très utilisés aujourd'hui dans la construction des serres. Cependant, dans la pratique, l'aluminium est surtout utilisé en association avec une ossature à base d'acier, Les alliages d'aluminium ont différents avantages : Ils résistent, à la corrosion grâce à la formation par oxydation de l'aluminium, d'une fine couche superficielle d'alumine. Il y a donc peu ou pas d'entretien ; Les éléments ou profils même de dimension réduite ont une bonne résistance mécanique ; Ils sont légers et donc très maniables lors de la construction et des réparations. L'inconvénient majeur que peut présenter ce matériau est sa faible résistance mécanique et sa Forte conductivité thermique supérieure à celle de l'acier.

- *le béton* : Le béton est utilisé dans la réalisation des fondations, des murets situés à la base des parois et pour le recouvrement des allées. Malgré sa résistance (mécanique) cet élément présente plusieurs inconvénients : constituer un obstacle à la lumière solaire ; Très coûteux pour les serres en verre.

- *le bois* : Ne sert plus que pour quelques constructions artisanales. Très utilisé aussi bien pour les serres à couverture de verre que pour les serres à couverture de matière plastique. Ses avantages peuvent être résumés en: bonne qualité d'isolation thermique ; son prix modéré et sa facilité d'emploi ; Ces inconvénients sont : une mauvaise adaptation à des structures étanches (ouvrant) ; un entretien non négligeable.

2.1.4 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.

- **Le Verre**

Le verre minéral plat transparent ou translucide est un silicate de chaux et soude (silice 71 à 74 % chaux 10 à 15 % . soude 13 à 17 %). Les différents types de verre utilisés dans les cultures sous serre sont : 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.

- Le verre horticole clair est très transparent à l'ensemble du rayonnement solaire, entre 380 et 2500 nm, sa transmission dans le visible est particulièrement élevée, comprise généralement entre 89 et 91 % en incidence normale. La transparence

au rayonnement actif sur la photosynthèse (PAR) est meilleure que celle du rayonnement infra rouge court. La transmission lumineuse reste élevée jusqu'à un angle d'incidence de 60° , au-delà, les pertes par réflexion augmentent fortement. Il est pratiquement opaque, comme la majorité des verres aux ultraviolets en dessous de 300 nm et laisse passer environ la moitié des UV entre 300 et 400 nm. Il est pratiquement opaque aux infrarouges longs au-delà de 5000 nm, c'est-à-dire aux rayonnements thermiques terrestres. Aux épaisseurs utilisées, le verre est peu isolant, son coefficient de transmission thermique est assez élevé (5,5 à $6.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Une partie des pertes thermiques (45 %) est due à une émissivité assez élevée (coefficient d'émissivité de 0,9). Ses avantages sont : Un bilan lumineux excellent, une grande stabilité chimique et physique, une grande longévité ; en revanche il présente trois inconvénients : un poids élevé (10 kg/m^2 pour 4mm d'épaisseur), une faible résilience et une faible résistance aux chocs thermiques.

- Le verre martelé ou cathédrale, est très utilisé durant les années 60, il présente une face plane et l'autre volontairement ondulée. La face plane est dirigée vers l'extérieur. Il est beaucoup moins utilisé actuellement. Ses avantages sont : Ce verre diffuse fortement la lumière, ce qui est avantageux dans l'éclairage des plantes. Ses inconvénients les pertes par réflexion sont très élevés.
- Le verre horticole à faible émissivité, il peut diminuer les pertes d'origine radiative grâce à une fine couche d'oxyde d'étain, cette couche est toujours mise sur la face dirigée vers l'extérieur, Sa transmission dans le visible (le PAR) (83% au lieu de 90%). Elle décroît rapidement au-delà de 1 000 nm pour devenir nulle vers 2700 nm. La transmission des infrarouges longs est pratiquement nulle. Les pertes par rayonnement sont réduites en moyenne de 70 %. Ce type de verre permet de réaliser des économies d'énergie de 40% par ciel clair et vent faible, mais seulement de 5% par ciel couvert et vent fort. En comparaison avec le verre horticole (verre plat transparent ou martelé), malgré une réduction des pertes calorifiques et un bilan thermique favorable, la réduction sensible de la lumière conduisant à des baisses de rendement est un inconvénient notable. Son coût d'investissement est un peu plus élevé.
- Le double vitrage est conçu pour réduire les pertes thermiques, on utilise souvent, sur les parois latérales, un double vitrage constitué de deux vitres

posées de (6 à 20 mm) l'une de l'autre. Les vitres peuvent avoir la même épaisseur (4mm). L'espace entre les vitres contient de l'air (sec de préférence). L'étanchéité avec l'intérieur doit être parfaite. Ce type de vitrage permet d'économiser une partie d'énergie pour le chauffage des serres, mais il présente un coût d'investissement plus élevé.

- Le verre isolant, est un ensemble préfabriqué de deux feuilles de verre espacées l'une de l'autre de façon définitive et étanche, emprisonnant un gaz déshydraté (mélange riche en CO₂, par exemple), ce type de vitrage est bien performant en isolation thermique, en revanche il présente une réduction de la transmission lumineuse; et un coût d'investissement plus élevé.
- Verre trempé, verre armé, verre feuilleté ils sont plus solide que les verres *précédent*, ces matériaux sont utilisables dans des zones à fort risque de grêle ou sur des serres recevant du public (jardineries). Ils sont alors en concurrence avec des matières plastiques. Ils sont caractérisés par leur résistance à la flexion et au choc suivant certaines directions. Lorsque le verre trempé est brisé, il se réduit en miettes. Leur Inconvénient le surcoût élevé par rapport à un verre normal.

- ***Les matériaux plastiques***

- Les matériaux plastiques rigides, ces matériaux appelés également verres organiques, se présentent soit sous forme de plaques rigides d'une épaisseur de l'ordre du 4 mm (PVC, Polyester), soit sous forme de plaques à double ou triple paroi (polycarbonate, poly-méthacrylate de méthyle). 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), ce sont des matériaux plastiques souples ou films souples utilisés sur des structures simples et économiques de type tunnel ou sur des constructions plus élaborées, mais à charpente plus légère que celles des serres vitrées. Le choix de l'utilisation se fait généralement à partir des caractéristiques de ces matériaux qui dépendent en grande partie de leur composition chimique. 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.

2.1.5 Les différents types de serre

La classification des serres est très complexe est 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 distinguées aussi suivant les formes leur toit : chapelles a versants plats et a poteaux verticaux, les chapelles dissymétriques, les chapelles sans poteaux verticaux, les chapelles à piédroits inclinés....etc.

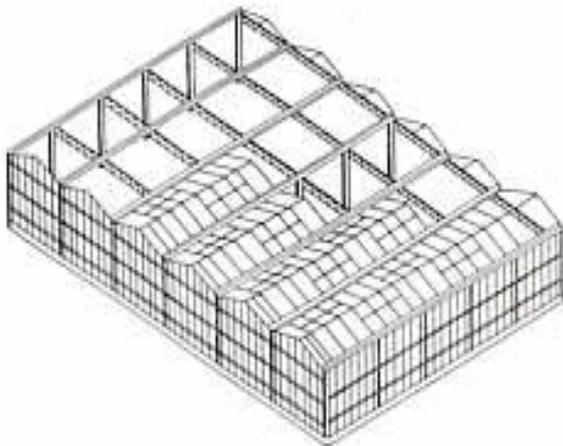


Fig. 2.3 : serres multi chapelles

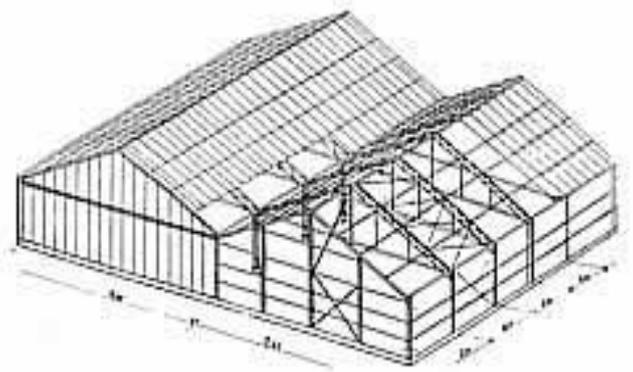


Fig. 2.4 : serre doubles chapelles



Fig. 2.5 : petit tunnel



Fig. 2.6 serre de multiplication

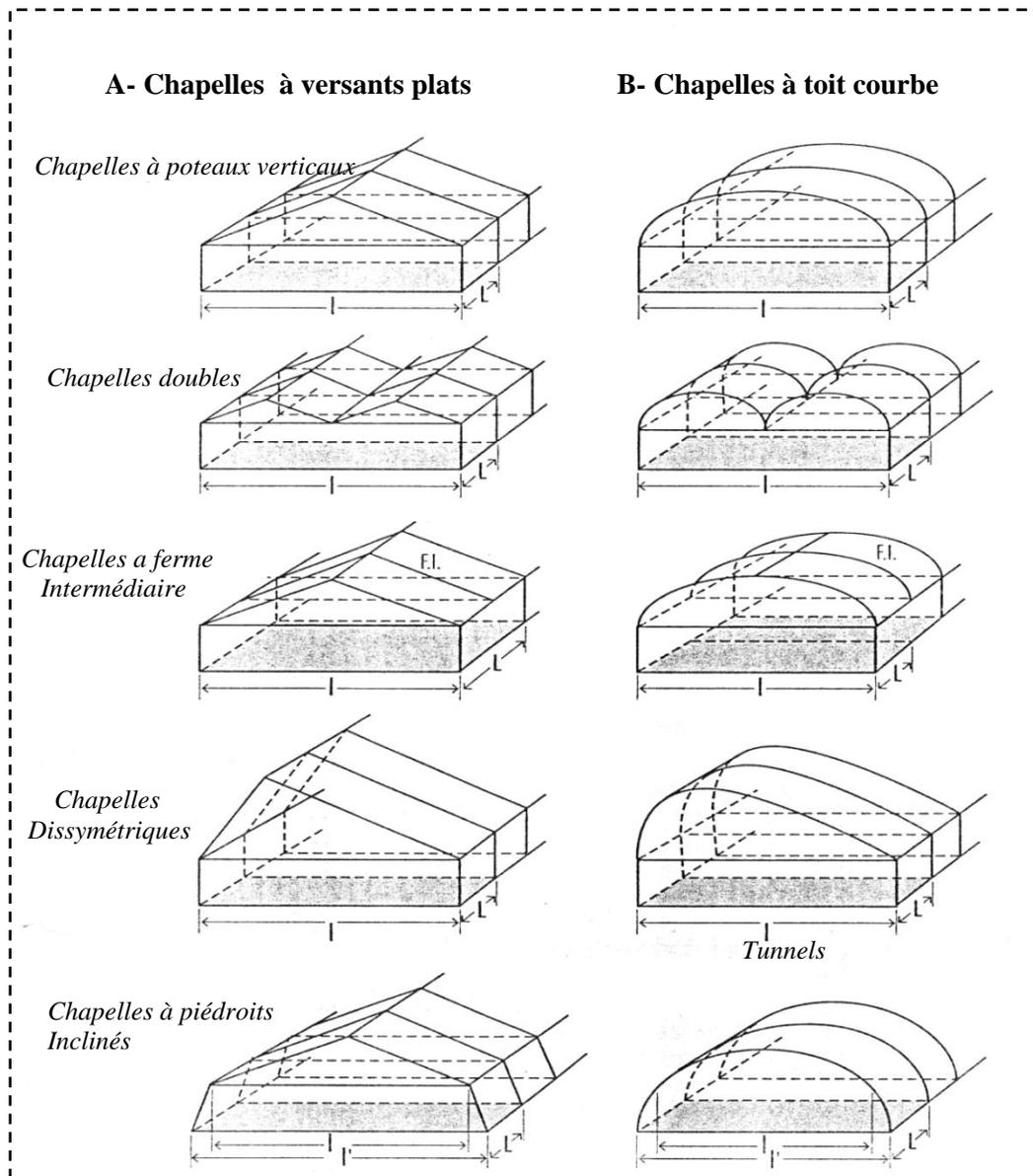


Figure 2.7 : Schéma de la classification des serres agricoles

Il existe aussi d'autre type de serre plus petite appelée petit tunnel fig. 2.5, ce type s'est rapidement développé dans les pays méditerranéens en raison de leur faible coût de revient. Sa largeur à la base des arceaux est de 1,5 mètre et sa hauteur est de 0,45 mètre, sa longueur ne dépasse pas les 20 mètres. Le classement des serres peut se faire aussi suivant leur domaine d'utilisation :

- les serres enterrées, qui sont surtout orientées vers la multiplication fig. 2.6 où les cultures en pots. Elles reposent sur des murettes, le niveau des tablettes est presque au niveau du sol. Par contre les couloirs sont creusés dans les terrains puis maçonnés.
- les serres maraîchères, Elles sont généralement souvent dénommées serres de type Hollandais, dénomination aujourd'hui inexacte. La largeur est de 3 mètres. On en rencontre dans l'ancien établissement d'horticulture florale, et utilisé surtout en maraîchage.
- la serre de multiplication, Elle est étroite et traque, bien isolée de façon à pouvoir maintenir des températures élevées. La hauteur est basse et les largeurs de chapelles sont de l'ordre de 3 mètres
- la serre horticole et la serre florale fig.2.9. Elles sont aérées. Elles peuvent être simples ou multi-chapelles, les largeurs de chapelle varient de 6 à 20 m. Pour la serre florale utilisée pour la production des fleurs coupées, elle est souvent très large.
- les serres horticoles utilisées pour les plantes en pots fig.2.8, leurs largeur est de 15 à 20 m.
- les serres roulantes, qui sont assez particulier, elles sont utilisées pour le forçage sur des plantes vivaces ou des arbustes qui restent en place durant de longue période.



Fig. 2.8 : Serre Horticole



Fig. 2.9 : serre Florale

2.1.6 *Le micro climat de la serre*

Le déroulement de la croissance et du développement des différents organes d'une plante, d'une culture, obéit étroitement aux conditions climatiques. Pour cela, les serristes considèrent le climat comme un facteur de rendement qu'il faut essayer de chiffrer afin d'avoir des rendements optimums, en assurant des conditions climatiques dont elles ont besoin.

- *Le climat spontané de la serre*

Le climat spontané à l'intérieur de la serre dépend essentiellement du climat extérieur, des caractéristiques physiques de l'air intérieur, de la forme de la serre, le volume de la serre, son orientation, et les qualités physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisée. Les principaux facteurs du milieu interne à une serre, qui sont modifiés par rapport à l'extérieur, sont : la température, la lumière, l'humidité et les concentrations des gaz (CO₂, et O₂).

Sous serre, les conditions d'éclairement sont donc sous l'étroite dépendance du climat lumineux naturel, avec une réduction quantitative de l'énergie et une modification qualitative plus ou moins importante selon les matériaux employés (de l'ossature et de l'enveloppe), la meilleure utilisation de ce climat naturel sera liée au choix des matériaux de couverture et aux conditions de leur mise en œuvre (structure, forme et orientation des abris).

La température de l'air dans une serre est, un résultat du bilan énergétique de l'abri. L'effet de serre a généralement les conséquences suivantes :

En période diurne: les effets conjugués du « piégeage » des apports radiatifs solaires et de la réduction des échanges convectifs conduisent à une élévation de la température de l'air qui devient rapidement excessive lorsque le rayonnement solaire est intense, en l'absence d'une ventilation. La température du sol et la température des organes végétaux suivent les variations de la température ambiante mais avec une plus faible amplitude. Elles peuvent être évalués d'une façon un peu différente selon les matériaux de couverture. La température du végétal est influencée par celle du vitrage, avec un effet plus marqué à faible distance du fait des échanges par rayonnement.

En période nocturne: du fait de la réduction des pertes par rayonnement infrarouge, les températures minimales sont, en moyenne, de 1 à 3 °C plus élevées qu'à l'extérieur.

Cependant, par nuit claire, il peut se produire des «inversions de températures», c'est-à-dire des abaissements plus marqués qu'en plein air.

Le confinement et l'étanchéité de la serre favorisent l'augmentation de l'humidité absolue tandis que l'élévation de la température de l'air tend à accroître le déficit de saturation avec pour conséquence :

En période diurne: l'humidité absolue augmente avec la transpiration, mais l'élévation de la température de l'air peut entraîner un abaissement exagéré de son humidité relative, et provoquer un véritable « stress Hydrique » au niveau de la végétation.

En période nocturne: les serres étant généralement fermées, l'humidité relative est élevée. En cours de nuit, la température baisse, il se produit fréquemment des condensations sur les parois et sur la végétation (conditions favorables à certaines maladies). De nuit, par accumulation du gaz carbonique de la respiration des végétaux, le taux s'élève au-dessus de la teneur normale extérieure, alors que le jour, du fait de la photosynthèse, le taux descend en dessous de celui de l'extérieur. Par journée ensoleillée et lorsque la serre est fermée, le taux peut être bas, inférieur à 200 ppm et devenir un facteur limitant de la production. Ce climat spontané peut être amélioré en utilisant différents équipements de climatisation : aération, chauffage, aspersion ou brumisation, etc.

- ***L'aération:***

L'aération ou ventilation est l'échange d'air entre la serre et l'extérieur, ce mécanisme permet : d'évacuer la chaleur en excès et diminuer la température de l'air ambiant ; de modifier l'humidité en évacuant plus ou moins rapidement l'air intérieur enrichi en eau par la transpiration des plantes; durant le, jour, l'eau transpirée doit être éliminée pour éviter une humidité trop forte, proche de la saturation, propice aux maladies et nuisibles à la croissance des végétaux. L'importance de l'aération d'une serre peut être exprimée par le débit d'air échangé (volume d'air entrant ou sortant pendant l'unité de temps). Il est plus commode, pour comparer des serres, d'utiliser le taux de renouvellement d'air qui est le rapport du débit d'air sur le volume de la serre.

Le problème de refroidissement des serres lorsque la température intérieure dépasse les limites supérieures admissibles pour les cultures, reste entièrement posé pour les abris plastiques, en général, on assure l'aération par ouverture d'une des deux portes de la serre au sens opposé du vent et par l'écartement des bâches plastiques tous les quatre

mètres de façon intercalée des deux cotés de la serre. L'aération se fait pour les modèles les plus simples en soulevant le film sur les côtés fig. 2.13. Pour les autres modèles on utilise des ouvrants situés au milieu des montants et proche de plus en plus du faîtage, créant alors des parties à toit ouvrant ce qui permet une largeur d'aération importante, mais le plus important inconvénient climatique est le confinement de l'air et la condensation de l'humidité de l'air dans cette partie de la serre. Les figures ci dessous montrent les différentes combinaisons utilisées dan l'aération des serre commençant par l'aération par un seul versant fig.2.10 ; L'aération par deux versants fig.2.11 ; aération latérale fig. 2.12, et aération automatiser (avec des équipements : écran thermique, filet d'insectes).



Fig. 2. 10 : Aération par un seul versant



Fig. 2.11 : Aération par double versant

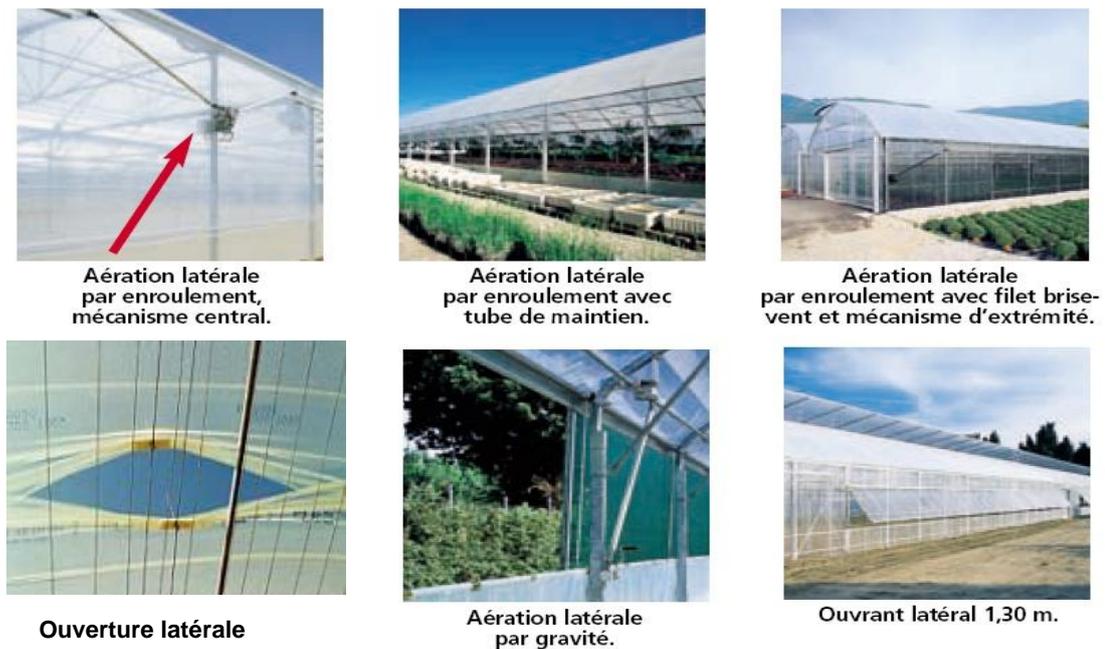


Fig. 2.12: Les différents modes d'aération latérale des serres

- **Influence des paramètres climatiques**

Influence de la température : L'élévation de la température obtenue naturellement grâce aux rayons solaires peut se révéler insuffisante à certaines périodes de l'année (il faut réduire au les pertes de chaleur) et excessive à d'autre moment (il faut abaisser la température). Il serait donc préférable pour une régulation des températures de prendre en compte : l'appréciation des exigences thermiques de jour et de nuit des cultures réalisées sous serre ; la réalisation d'un équilibre entre les conditions de température d'air et de sol ; la nécessité d'un ajustement aux conditions d'éclairement.

- *influence de l'humidité :* En période nocturne, les serres étant généralement fermées, l'humidité relative de l'air y est élevée. Des condensations se produisent fréquemment au niveau des parois et peuvent tomber sur la végétation créant ainsi des conditions particulièrement favorables au développement des maladies cryptogamiques. En période diurne , l'élévation de la température de l'air peut déterminer un abaissement exagéré de son humidité relative de l'air et provoque un véritable « stress hydrique » au niveau de la végétation. Donc lorsque l'humidité relative de l'air est faible on peut l'augmenter en faisant des nébulisations (le fractionnement en fines gouttelettes assure une meilleure

efficacité à l'apport de l'eau). Au contraire, lorsqu'il s'agit d'abaisser le degré d'hygrométrie, l'aération ou la ventilation s'impose.

- *influence de la lumière* : Sous abri, les conditions d'éclairage sont sous l'étroite dépendance du climat lumineux naturel. La meilleure utilisation de ce climat naturel sera liée par le choix du matériau de couverture. La recherche d'un éclairage maximale est la règle générale pendant la période à faible ensoleillement par contre, en cas de fort ensoleillement il est souvent nécessaire de réduire les apports lumineux (ombrage) pour éviter les risques d'échauffement excessif de la culture et du déséquilibre dans l'alimentation hydrique par suite de la forte demande d'évaporation. En revanche l'effet de l'abri va avoir un rôle par une diminution de lumière par rapport à l'extérieur c'est à dire diminution de la photosynthèse par la présence de la couverture qui tend à diminuer la lumière. Une réduction de la photosynthèse va éventuellement entraîner une durée de la culture plus longue.

- *influence du gaz carbonique CO₂* : La teneur en CO₂ est l'un des trois facteurs nécessaires pour la photosynthèse, qui n'est autre que la concentration en gaz carbonique. Plus la présence de CO₂ est élevée meilleure est la photosynthèse. Durant la nuit, par rapport à l'extérieur, l'effet de l'abri va avoir comme conséquence une augmentation de la teneur de la teneur en CO₂. En effet comme le signale, le taux de gaz carbonique dans une serre varie au cours d'un cycle de 24 heures. Les plantes continuent de respirer, durant la journée, il y a absorption du CO₂ par la fonction chlorophyllienne et la teneur en gaz carbonique très élevée au petit jour est réduite en fin d'après midi. Lorsque les quantités de CO₂ dégagées et absorbées se trouvent en équilibre on définit alors le point de compensation. Le point de compensation est l'intensité lumineuse pour laquelle les quantités de CO₂ dégagées et absorbées sont exactement identiques. Au delà de ce point de compensation, la plante fabrique plus de glucides qu'elle n'en dégage par respiration.

2.2 Synthèse bibliographique sur les travaux entrepris dans le domaine du fonctionnement du microclimat sous serre

Les travaux entrepris dans le domaine de la thermique des serres agricoles représentent la serre généralement comme un système constitué fondamentalement de quatre milieux distincts et homogènes : le sol, le couvert végétale, l'air intérieur et enfin la paroi. Au sein de ces milieux surviennent de nombreux mécanismes physiques et biologiques qui sont largement gouvernés par les échanges de masse (vapeur d'eau, dioxyde de carbone,...), de quantité de mouvement (convection-diffusion) et de chaleur (les échanges thermiques).

2.2.1 Les Modèles du bilan énergétique de la serre.

Suite aux premières analyses détaillées du bilan thermique d'une serre par Businger, 1963 de nombreux modèles permettent de simuler le comportement thermique d'une serre ont vu le jour dans les années 1980 (Kindeelan, 1980 ; Avissar 1982 ; Kimball 1986 ; Deltour 1985). Le principe de calcul, fondé sur la notion du bilan, est toujours le même, mais l'approche du problème est différente selon les objectifs recherchés par les auteurs. Ces modèles considèrent que la serre est composée de plusieurs éléments (la couverture, le sol, l'air intérieur, la végétation) pour les quels les variables d'états sont supposées homogènes. Ils considèrent généralement les composants suivant : paroi simple ou double, l'air intérieur avec les bilans d'énergie et de vapeur d'eau correspondants, le couvert végétale, le sol de la serre (surface du sol et 3 à 4 couches successives de sol). Les équations des bilans thermiques et de masse sont écrites pour chacun d'eux sans négliger les termes différentiels liées à leur inertie thermique. On détermine ainsi un système de 8 à 10 équations susceptibles d'être simplifiées. Le système d'équations est ensuite résolu au moyen de méthodes numériques. Ces modèles offrent de multiples possibilités d'applications et de précision, ils sont par contre complexes et d'un maniement peu aisé, notamment dans le pilotage des serres. Ceci a conduit différents chercheurs à élaborer des modèles appelés modèles intermédiaires présentant un nombre réduit de paramètres (Seginer 1983 ; Boulard 1987). Les analyses qui ont conduit à ces élaborations sont très généralement de nature empirique et fortement liées au type de serre et à l'objectif de la modélisation.

Les premiers modèles établis par les chercheurs dans le domaine sont dit "statiques", ces modèles ont rapproché les déperditions d'énergie et leurs compensations (Morris, 1964; Chiapale *et al.* 1981). Malgré leur simplicité, ces modèles ont montré leurs limites en termes de précision. Ultérieurement, Bailey, (1977), Hurd & Sheard, (1981) ainsi que Breuer & Short (1985) ont amélioré ces modèles statiques en tenant compte de la contribution de l'énergie solaire. Les modèles de bilan d'énergie "dynamiques" peuvent prévoir à la fois les besoins en énergie et le climat à l'intérieur de la serre. Un certain nombre de modèles dynamiques ont été proposés et développés (Takakura *et al.*, 1971; Kindelan, 1980; Bot, 1983; De Halleux *et al.*1991). Wang, (1998) a exploité ces derniers modèles pour déduire le taux d'aération dans une grande serre de type Venlo. Teitel & Tanny, (1999) ont analysé le comportement dynamique de la température et de l'humidité.

2.2.2 Les échanges de chaleur dans une serre

Il existe trois modes fondamentaux d'échange de chaleur : le rayonnement, la convection (sans ou avec changement de phase) et la conduction. Ces modes doivent être bien identifiés et connus au niveau du système serre et de chacun de ses sous-systèmes (i.e. le sol, les plantes, l'air intérieur et enfin la paroi séparant l'intérieur de l'extérieur) :

- i) les échanges radiatifs de courtes longueurs d'ondes aussi bien directs que diffus, qui sont transmis, réfléchis et / ou absorbés par les différents milieux considérés (figure 2.13a) ; les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes entre ces milieux, le ciel et l'extérieur;
- ii) Les échanges convectifs : échanges de chaleur sensible et latente par aération entre les différents milieux et l'extérieur (figure 2.13b);
- iii) Les échanges de chaleur latente d'évaporation ou de condensation;
- iv) Les échanges conductifs : concernent essentiellement les transferts thermiques entre la surface du sol et ses couches profondes et les déperditions thermiques à travers les parois (figure 2.13b).

L'un ou l'autre de ces différents modes peut être dominant. En revanche, ils n'ont pas la même importance relative selon les conditions climatiques extérieures. Certains peuvent

être appréhendés de manière simplifiée, ou négligés dans le cadre de modèle de simulation de serres (Boulard, 1996).

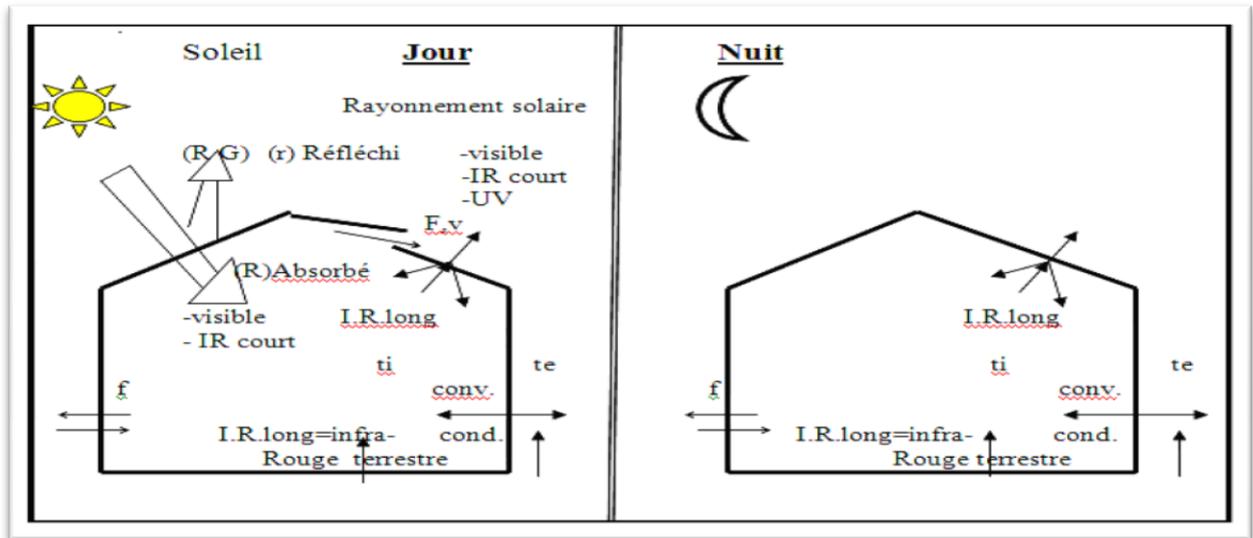


Fig.2.13a : Les Echanges radiatifs entre les composantes de la serre et son environnement, en période diurne et nocturne (Waquant, 2000)

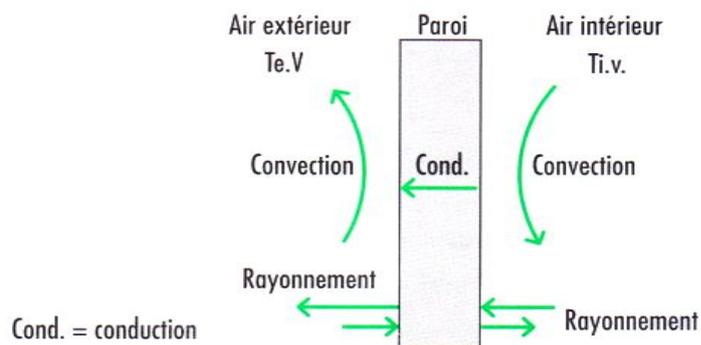


Fig.2.13b : Les Echanges de chaleur entre la couverture de la serre et son environnement

- *Les échanges radiatifs*

Tous les corps ayant une température supérieure à -273 K (0 absolu) émettent de l'énergie à leur surface. Ceci se traduit par des oscillations rapides du champ électromagnétique. Ces oscillations correspondent à des ondes électromagnétiques (Guyot, 1999). 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 2.14.

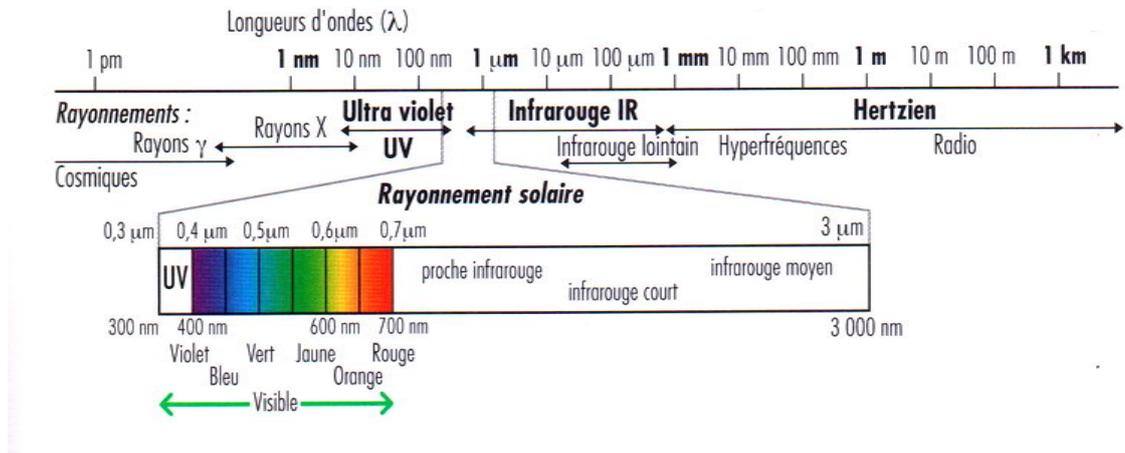


Fig.2.14: Spectre du rayonnement électromagnétique (Waquant, 2000)

L'énergie rayonnée se transforme en énergie thermique si elle rencontre un corps absorbant pour ces longueurs d'ondes. Ce transfert de chaleur se fait dès que deux corps à des températures différentes sont séparés par un milieu perméable. Aucun support matériel n'est requis pour cet échange qui peut se produire même dans le vide (Urban, 1997). L'énergie reçue par la surface du corps le plus froid est divisée en trois parties : une fraction est réfléchiée, une autre fraction est transmise, elle passe à travers le corps sans le réchauffer, et une dernière fraction est absorbée par le corps dont elle élève la température. Les corps ont des propriétés de réflexion, de transmission et d'absorption du rayonnement variables en fonction des longueurs d'ondes reçues. Dans les problèmes de transfert radiatif, les propriétés dites optiques sont toujours représentées pour un élément de surface d'une paroi solide localement plane, opaque et participant aux transferts radiatifs. Lorsqu'un rayonnement atteint l'élément de surface, une

fraction de la puissance incidente est réfléchiée, c'est-à-dire renvoyée sans avoir pénétré dans la paroi, une autre fraction a est absorbée dans la masse du récepteur, constituant un apport énergétique pour ce dernier, et une troisième fraction peut être transmise.

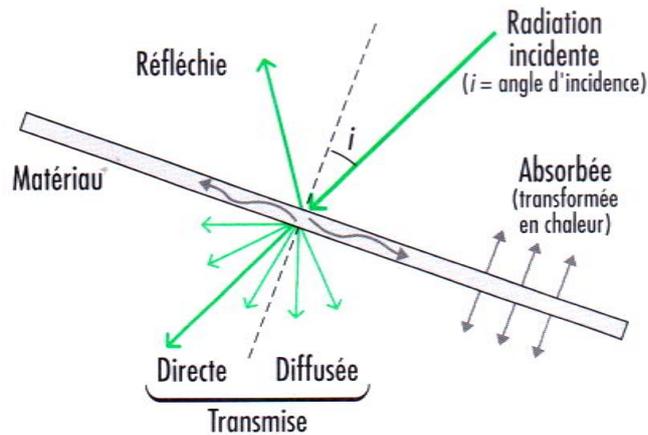


Fig. 2.15 : Radiation incidente, réfléchiée, et absorbées ; Radiation transmise, direct, et diffuse

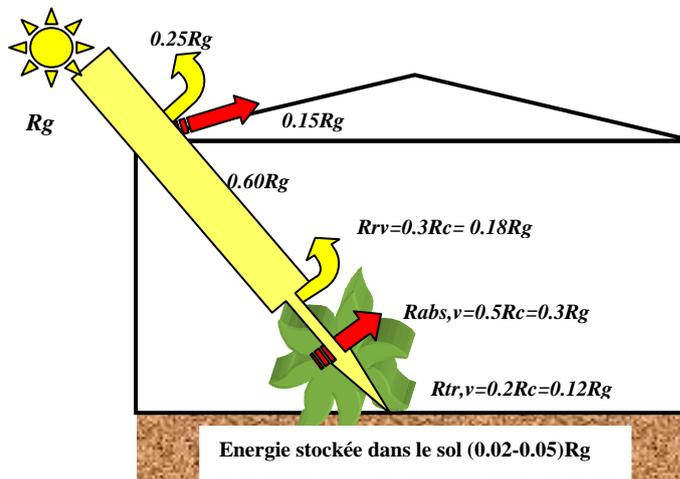


Figure 2.16 : Exemple de répartition du rayonnement solaire dans une serre (Baille, 1999)

R_g , Rayonnement global extérieur (rayonnement solaire) ; R_c , Rayonnement global intérieur correspondant au rayonnement solaire qui a traversé la toiture de la serre ; R_{rv} , fraction du Rayonnement global réfléchiée par la végétation ; $R_{abs,v}$, fraction du Rayonnement global absorbée par le couvert végétal ; $R_{tr,v}$ fraction du Rayonnement global transmise par le couvert végétal.

- *Échanges radiatifs de courtes longueurs d'ondes au niveau de la couverture de la serre :*

La fraction du rayonnement global transmise par le revêtement de la couverture de la serre représente une fonction complexe de la position du soleil dans le ciel, de l'orientation de la serre ainsi que des propriétés radiatives des éléments structuraux de la serre. Dans ce contexte Nisen, (1975) expose les éléments essentiels permettant de calculer l'angle d'incidence du rayonnement direct selon l'orientation des parois, la latitude et la longitude du lieu, le jour et l'heure. Sur un plan quantitatif, on peut estimer que la proportion du rayonnement global extérieur transmis par un vitrage simple varie entre 55 et 70%, avec des maxima en été et des minima en hiver. Pour un double vitrage, une transmission comprise entre 50 et 60% est couramment observée. La variabilité de la transmission du rayonnement diffus peut en revanche être considérée comme constante pour une serre donnée. Le reste du rayonnement est absorbé (varie entre 0.15 pour un simple vitrage et 0.25 pour un double vitrage) ou réfléchi (0.20 – 0.25 en moyenne) par la paroi et les différentes structures (Baille, 1999). Il importe de noter que ces propriétés changent d'une serre à l'autre. La transmission totale d'une serre du type Venlo par exemple est de l'ordre de 80 %. Les 20% restants incluent la part qui est réfléchi par le verre ainsi que le rayonnement qui est réfléchi et absorbé par les éléments structurels du toit (faîtage, faîtières intermédiaires, chéneau...) Waaijbergen, (1995). Critten (1987) cité par Mistriotis *et al.*, (1997a) estiment que le rayonnement solaire intercepté par ces éléments structurels est de l'ordre de 14% du rayonnement extérieur parvenu sur le revêtement du toit. Papadakis *et al.* (1989) ont mesuré une transmission du rayonnement solaire à travers une couverture de serre plastique de l'ordre de 65%. Ces valeurs nous permettront d'estimer la proportion du rayonnement solaire absorbée par la couverture de la serre et les éléments structurels. On peut estimer ainsi que 10% du rayonnement solaire incident sont absorbés par une structure en verre et entre 10 et 15% par une structure en plastique. Une partie de l'énergie rayonnante absorbée est restituée à l'air extérieur et à l'air intérieur de la serre sous forme de chaleur sensible ou réémise sous forme d'infrarouge (Baille, 1999).

-Échanges radiatifs de courtes longueurs d'ondes au niveau des plantes :

La culture sous serre absorbe l'énergie solaire, transmise par la couverture de la serre et celle réfléchiée par la surface du sol (Wang, 1998). Cette dernière est généralement négligée du point de vue du bilan énergétique, excepté dans le cas d'une végétation (clairsemée) (*i.e.* culture hors sol disposée en rangs), ou lorsque le sol est recouvert d'un plastique blanc ou réfléchissant (Baille, 1999). La fraction du rayonnement visible qui contribue à la photosynthèse dans le domaine des courtes longueurs d'ondes est appelée rayonnement photo-synthétiquement actif (*PAR* : *Photosynthetic Active Radiation*). Elle correspond au domaine 0.4-0.7 μ m. Cette fraction peut être négligée du point de vue du bilan énergétique. Ainsi, de 1 à 2% du rayonnement global incident au-dessus de la culture, sont susceptibles d'être absorbés par les organismes chlorophylliens pour l'élaboration de la matière organique. L'absorption du rayonnement global et du PAR dans le couvert végétal est un phénomène de grande importance (sur le plan physique et physiologique). Ce phénomène a été étudié en premier pour une culture de rosiers disposée en rangs sous serre par Stanhill *et al.* (1973). Ils ont montré que la fraction du rayonnement global, absorbée par la culture varie de 0.45 quand les plantes atteignent leur demi-hauteur finale (*i.e.* jeunes plants) à 0.51 quand les plantes arrivent à leur stade de maturation. Cette étude a également montré que l'absorption du rayonnement diffus est très faible par rapport à l'absorption du rayonnement direct. Et il a été montré, d'une façon générale que : Le rayonnement sous serre se caractérise surtout par une proportion de rayonnement diffus beaucoup plus forte qu'en plein air ; L'effet de la saison est très important sur l'absorption du rayonnement direct sous serre. En effet, la structure, l'orientation de la serre et le type de matériau de couverture ont une forte incidence sur le rapport rayonnement diffus/rayonnement direct, et jouent un rôle déterminant dans l'absorption du rayonnement solaire par le couvert végétal. Pour une culture de rosiers bien développée, environ 20% du rayonnement global parvenu au sommet du couvert végétal est réfléchi en rayonnement photo synthétiquement actif (<0.7 μ m) et plus de 40% en proche infrarouge (>0.7 μ m). Cette différence est liée à la forte réflectivité des feuilles dans le proche infrarouge ; La fraction transmise par la couverture au sol représente 30% du rayonnement global intérieur, que se soit par les trous dans le couvert végétal ou par les allées entre les rangs. Des études similaires ont été menées

sur d'autres types de cultures disposées en rangs telles que tomates ou concombres ; elles ont conduit aux mêmes résultats (Baille, 1999). Selon la loi de Beer (Stanghellini, 1987), la transmission du rayonnement global dans le couvert végétal est une fonction exponentielle décroissante de l'indice foliaire :

$$\tau_v = e^{-0.48LAI} \quad (2.1)$$

L'indice foliaire LAI ; (*Leaf Area Index*) est un paramètre classique utilisé en agronomie ; il est défini par la relation :

$$LAI = \frac{S_{feuilles}}{S_{culture}} \quad (2.2)$$

Avec : $S_{feuilles}$: surface totale des feuilles, (m^2);
 $S_{culture}$: surface des rangées cultivées, (m^2).

A partir d'une étude de plants de tomates, De Halleux (1989) estime l'absorption de l'énergie solaire par le couvert également par une fonction exponentielle décroissante de l'indice foliaire exprimée comme suit :

$$\alpha_v = (1 - \rho_v)e^{-0.609.LAI} \quad (2.3)$$

L'absorption de l'énergie solaire par le couvert végétal sera donc déduite comme :

$$\alpha_v = 1 - \rho_v - \tau_v \quad (2.4)$$

avec : ρ_v la réflectivité du rayonnement global par la végétation.

Notons enfin que l'essentiel de l'énergie solaire absorbée par le couvert végétal est transformée en chaleur sensible et en chaleur latente par le biais de la transpiration puisque les végétaux ont tendance à maintenir une température constante et modérée dans leur couvert.

-Échanges radiatifs de courtes longueurs d'ondes au niveau du sol :

Le sol absorbe une bonne partie de l'énergie solaire qui lui parvient directement (sol non couvert par la végétation, sol des allées entre les rangs des plantes,...) ou transmis par le couvert végétal. Néanmoins, même à l'échelle d'une journée, cette absorption n'est plus homogène car la distribution spatiale du rayonnement global au niveau de la surface du sol est fortement hétérogène. En outre, la géométrie de la serre, et surtout la présence d'ouvrants et d'ombres portées par les structures peuvent accentuer d'avantage cette hétérogénéité (Wang & Boulard, 2000). La fraction du rayonnement global absorbée par le sol dépend elle-même de l'albédo (α ; coefficient de réflexion de la surface du sol). Le Tableau 2.1, fournit l'albédo pour différents types de surface du sol de serre dans le domaine spectral des courtes longueurs d'ondes. La somme des deux fractions, absorbée et réfléchi par le sol est égale à 1. L'énergie absorbée par le sol elle est restituée en chaleur sensible et/ou latente (convection / évaporation), soit elle est stockée dans les couches profondes par conduction.

<i>Type de surface</i>	<i>Valeur de l'albédo</i>
Sable nu Sec	0.35 – 0.45
Sable humide	0.20 – 0.30
Sol argileux sec	0.20 – 0.35
Sol nu argileux humide	0.10 – 0.20
Sol humide avec chaumes	0.05 – 0.07
Surface en Béton	0.17 – 0.27

Tableau 2.1. Valeur de l'albédo pour différents types de sol (Guyot, 1999)

-Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes, Rayonnement Infrarouge Thermique : Ils ont lieu essentiellement entre le sol, les plantes, les parois et l'extérieur. La nature de la couverture joue un rôle prédominant dans ces échanges. Les matériaux de couverture doivent être le plus transparent possible dans le spectre visible, afin de

favoriser la photosynthèse, et en même temps être opaques pour les grandes longueurs d'ondes, afin de bloquer les infrarouges de grandes longueurs d'ondes et optimiser ainsi l'effet de serre. Ainsi, le verre normal transmet le rayonnement visible mais bloque (absorbe) le rayonnement infrarouge. La différence de comportement du verre vis-à-vis du rayonnement infrarouge et du rayonnement visible et de certains plastiques est à l'origine de l'effet de serre. Un exemple qui illustre les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes en serre est celui des tubes de chauffage. Ces derniers réchauffent directement les plantes par rayonnement infrarouge, mais aussi indirectement par convection.

2.2.3 Les échanges convectifs

- *Convection sans transfert de masse*

Les transferts thermiques par convection mettent en jeu le déplacement de matière. Ils ont essentiellement lieu dans les fluides et tirent leur origine de leurs mouvements. Lorsque ceux-ci sont provoqués par une action mécanique extérieure (ventilation d'air, pompe de circulation d'eau...), la convection est dite forcée. Un cas particulier de convection forcée dans les serres est celui des échanges convectifs induits par des effets du vent extérieur. Les échanges de chaleur entre les fluides et les parois à différentes températures sont à l'origine de variations de masse volumique au sein des fluides. On parle de convection naturelle lorsque le mouvement des fluides est dû à des variations de masse volumique. Quel que soit le régime d'écoulement d'un fluide, il demeure une sous-couche laminaire (dans la couche limite dynamique) dont l'épaisseur varie en fonction de la nature du fluide, de son degré d'agitation, de la rugosité de la paroi et de la température (Figure 2.17). Le gradient thermique est particulièrement important à proximité de la paroi, c'est-à-dire dans la sous-couche limite laminaire. Ce gradient élevé traduit la faible conductivité thermique de contact de ce film laminaire qui adhère pratiquement à la paroi. Quel que soit le régime d'écoulement du fluide, on ne considère que la résistance aux transferts thermiques.

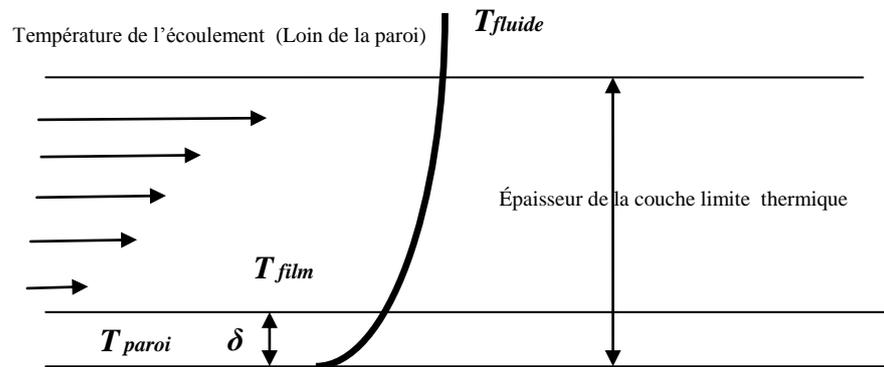


Fig. 2.17 : La couche limite dynamique

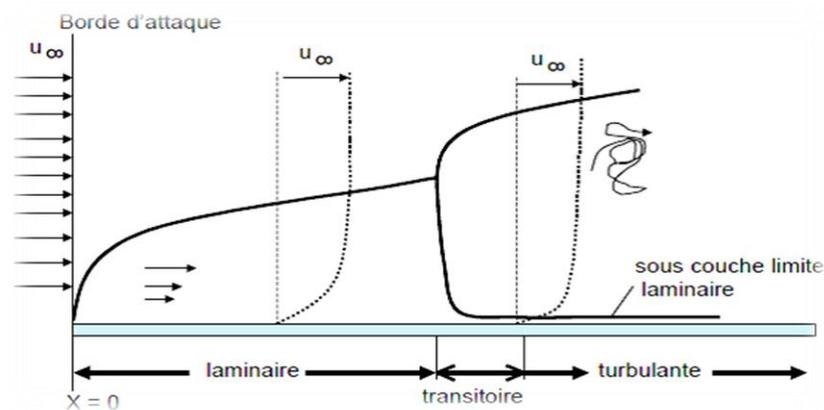


Fig. 2.18 : Profils des vitesses des couches limites laminaire et turbulente pour le cas d'un écoulement sur une plaque plane.

- *Les types d'échanges convectifs*

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

- *Convection naturelle* : si, à l'origine, la masse fluide est au repos au contact de la paroi, l'énergie transmise par conduction à travers le film laminaire tend à augmenter

l'agitation des atomes, ou des molécules ; désormais, la densité du fluide diminue et des courants de convection prennent naissance et deviennent rapidement assez importants pour assurer le transport d'énergie au point qu'ils deviennent prépondérants par rapport à la conduction : c'est la convection libre ou naturelle.

- *Convection forcée* : si, à l'origine, la masse fluide est animée d'une certaine vitesse, les transferts de chaleur sont activés : on parle de convection forcée.

- *Convection mixte* : c'est un régime convectif que l'on rencontre lorsque les termes de convection naturelle et de convection forcée sont du même ordre de grandeur. Néanmoins, un écoulement de convection peut avoir des caractéristiques géométriques inconnues dont on ne peut pas toujours deviner le mouvement. Ainsi, une couche de fluide froide qui se situe au-dessus d'une couche chaude conduit à ce qu'on appelle une stratification instable dans le champ de pesanteur. Pour l'air confiné entre le sol chaud de la serre et sa toiture plus froide, des cellules – de Rayleigh Bénard – ont été identifiées par plusieurs auteurs (Mistriotis *et al.*, 1997a; Lamrani *et al.*, 2001; Boulard *et al.*, 2002).

Les échanges de chaleur par convection jouent un rôle important dans les serres. Par exemple, l'air à proximité des tubes de chauffage d'une serre est réchauffé par convection naturelle. L'air réchauffé peut à son tour réchauffer les plantes, toujours par convection naturelle. En Cette classification n'est pas trop controversée dans la littérature, elle conduit à une terminologie spécifique : convection libre dans le cas d'écoulements externes ; convection naturelle dans le cas d'écoulements confinés ou partiellement confinés et avec éventuellement l'apparition de la notion de thermosiphon dans le cas d'écoulements partiellement confinés. En revanche, des échanges convectifs peuvent avoir lieu entre l'air et les parois, entre l'air et les cultures, et entre l'air et le sol. En présence du vent, l'enveloppe d'une serre échange de la chaleur par convection forcée avec l'air extérieur.

En convection, toute la difficulté consiste à déterminer le coefficient du transfert convectif qui dépend des caractéristiques du fluide et de son écoulement, des températures et de la géométrie de la surface d'échange. Dans les serres, on exprime en général les coefficients de convection en fonction de nombres sans dimensions (encore appelés nombres adimensionnels). On détermine ainsi le régime des écoulements en faisant intervenir le nombre de Reynolds pour les écoulements en convection forcée, le nombre de Grashof pour les écoulements en convection naturelle, *i.e.* régis par des gradients de température ou encore le nombre de Richardson pour les écoulements en convection mixte. Il importe de noter que quel que soit le mode de convection, l'écoulement peut être laminaire ou turbulent. Pour chacun de ces deux types d'écoulement (laminaire ou turbulent) la relation empirique qui permet de quantifier l'échange d'énergie est modifiée. Les coefficients de convection sont toujours plus grands en régime turbulent. L'hypothèse d'uniformité du climat sous serre a été largement utilisée depuis les années 80 pour modéliser les transferts de chaleur et de masse (Kindelan, 1980; Kimball, 1986; Roy *et al.*, 2002). Elle suppose une parfaite homogénéité de la température, de la concentration de vapeur d'eau et de la concentration en dioxyde de carbone dans toute l'enceinte. On considère, en général, une seule température et une seule vitesse d'air, aussi bien près des parois qu'au niveau du sol ou dans le couvert végétal. Ce dernier est généralement assimilé à une grande feuille (*i.e. big leaf*) de température uniforme.

- *Détermination du coefficient d'échange convectif*

En convection naturelle: la plupart des auteurs déterminent les coefficients d'échanges à partir de corrélations basées sur le nombre de Grashof (Kindelan, 1980; Kittas, 1980; Kimball, 1986; Issanchou, 1991). Ils considèrent alors que la convection est générée par un gradient de densité de l'air, lui-même induit par le gradient de température entre l'air et les surfaces d'échange. Pour le couvert végétal, on reprend en général des coefficients déterminés pour des formes simples, après ajustement avec des données expérimentales obtenues sur des maquettes de feuille (Stanghellini, 1987; Meneses & Bailey, 1997).

En convection forcée: le coefficient de convection entre une paroi et l'air dépend de la vitesse du vent et varie selon des lois linéaires (Selcuk, 1971; Takakura *et al.*,

1971; Bot, 1983) ou exponentielles (Papadakis *et al.*, 1994). Cependant, c'est l'échange dû à l'aération de la serre ouverte qui est le plus important dans le refroidissement de celle-ci. C'est donc l'échange convectif entre l'intérieur et l'extérieur qui a été le plus étudié, tant du point de vue expérimental (Boulard *et al.*, 1997; Wang, 1998) que théorique (Mistriotis *et al.*, 1997a).

En convection mixte: On considère généralement dans ce cas que la convection peut être décrite par la superposition des échanges liés à chacun des deux régimes (Kindellan, 1980; Kittas, 1980; Kimball, 1986; Issanchou, 1991). Une synthèse complète des travaux exprimant des coefficients d'échange convectifs entre l'air et les surfaces des parois de la serre, entre l'air intérieur et le sol de la serre, ou entre l'air intérieur et la végétation a été établit par Roy *et al.*, (2002). L'ensemble des auteurs expriment le coefficient d'échange convectif pour une vitesse moyenne ou un écart de température moyen entre l'air et les différentes surfaces. D'après Roy *et al.* (2002), le tableau (2.2) résume les différentes corrélations établis par les chercheurs dans le domaine, ça concerne les coefficients d'échange convectif à l'intérieur et à l'extérieur de la serre, pour différents type de serres.

- *Convection avec transfert de masse*

Évaporation

L'évaporation est un phénomène physique qui consomme de l'énergie. Pour s'en persuader, il suffit de se rappeler qu'il faut chauffer de l'eau (lui apporter de l'énergie) pour accélérer son évaporation. L'évaporation de l'eau se traduit par un changement de son état : l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux. La pression partielle de vapeur d'eau de l'air augmente, et donc son contenu énergétique, ce qu'on appelle son enthalpie. L'évaporation n'est possible que si la pression de vapeur d'eau est inférieure à la pression de vapeur saturante. La transpiration est une forme particulière de l'évaporation qui concerne les organismes vivants. La transpiration consomme de l'énergie : elle permet le refroidissement des organes transpirants. C'est essentiellement par transpiration que les plantes luttent pendant la journée contre l'élévation de température liée à l'absorption d'énergie solaire par leurs surfaces. Le flux transpiratoire est proportionnel à la différence entre le potentiel hydrique de la vapeur d'eau de l'air et le potentiel hydrique de l'eau dans les parois des cellules du mésophile, et inversement

proportionnel à la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau entre ces deux points (Figure 2.19a). Pour un couvert végétal donné, le flux d'évapotranspiration est donc proportionnel à la différence entre l'humidité spécifique saturante au niveau de la feuille de la strate de végétal considérée et l'humidité absolue de l'air et inversement proportionnel à la résistance totale à la diffusion de la vapeur d'eau entre les stomates et l'air de la serre.

	<i>Modèle</i>	<i>Type et Conditions de la serre</i>	<i>Auteurs</i>
L'intérieur de la Serre	$4.3\Delta T^{0.33}$	<i>Serre Tunnel équipée d'une couverture en PVC</i>	<i>Kittas (1986)</i>
	7.2	<i>Serre Tunnel couverte par un film en polyéthylène</i>	<i>Garzoli (1987)</i>
	$1.86\Delta T^{0.33}$	<i>Serre double largeur couverte par un film en polyéthylène</i>	<i>De Halleux (1989)</i>
	$2.21\Delta T^{0.33}$	<i>Petite serre a double largeur couverte par un film en polyéthylène, angle d'inclinaison égale a 15°</i>	<i>Papadakis (1992)</i>
	$2.97\Delta T^{0.33}$	<i>Serre couverte par filet d'insectes</i>	<i>Miguel (1998)</i>
	$8.0\Delta T^{0.33}$	<i>Serre vide équipée par un sol chauffé et couverte par un film en polyéthylène, angle de la toiture égale à 34°</i>	<i>Lamrani (2001)</i>
L'extérieur de la Serre	$3.49 U_e$	<i>Serre chauffée couverte par un film en polyéthylène</i>	<i>Kanthak(1970)</i>
	$2.8 + 1.2 U_e$	<i>Serre de type Venlo en verre (Verre horticole), angle de la toiture égale à 18° ($U_e \leq 4ms^{-1}$)</i>	<i>Bot (1983)</i>
	$1.32 \Delta T^{0.25} + 3.12U_e^{0.8}$	<i>Serre Tunnel équipée d'une couverture en PVC</i>	<i>Kittas (1986)</i>
	$7.2 + 3.84 U_e$	<i>Serre Tunnel couverte par un film en polyéthylène</i>	<i>Garzoli (1987)</i>
	$5.96 (U_e^{0.8}/L^{0.2})$	<i>Serre a double largeur couverte par un film en polyéthylène</i>	<i>De Halleux (1989)</i>
	$0.95 + 6.76U_e^{0.49}$	<i>Petite serre a double largeur couverte par un film en polyéthylène, angle d'inclinaison égale a 15° ($U_e \leq 6.3ms^{-1}$)</i>	<i>Papadakis (1992)</i>

Tableau (2.2): Modèles du coefficient de transfert de chaleur par convection h ($W m^{-2} K^{-1}$) entre l'air intérieur et le toiture de la serre , et entre la face extérieure de la couverture de la serre et l'air environnant (Roy et.al 2002). Avec: T , température (K); ΔT , gradient caractéristique de température (K); U_e , Vitesse du vent (ms^{-1}); L , Longueur caractéristique de la surface solide (m)

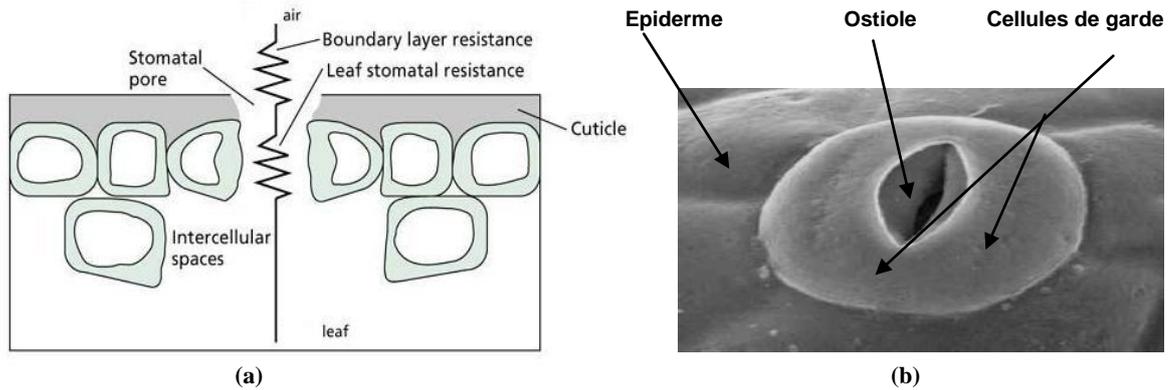


Fig.2.19 : (a) Schématisation des résistances aux transferts de vapeur d'eau entre la feuille et l'air; (b) Photo de l'appareil stomatique d'une feuille de tomate (microscope électronique a balayage) (Urban, 1997)

2.2.4 Les échanges conductifs

Les échanges par conduction se font suivants des mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou des molécules, et une transmission par les électrons libres. L'importance de chacun des deux mécanismes dépend de la nature du corps. Dans les serres, les principaux échanges 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...). Compte tenu de la faible épaisseur des parois (quelques millimètres pour le verre, quelques centaines de microns pour les plastiques souples), on considère que les échanges sont stationnaires et on les intègre dans un coefficient global de transfert (Nijkskens *et al.*, 1984; Kimball, 1986; Jolliet, 1988; Issanchou, 1991; Kittas, 1994). Le phénomène de conduction dans le cas du sol, si le pas de temps est suffisamment court, on néglige le terme capacitif et on traite également le problème de façon stationnaire. Pour des pas de temps plus grands (à l'échelle de la journée), on doit introduire la capacité calorifique du sol et on traite le problème en régime transitoire car la température du sol à une profondeur donnée est une fonction périodique du temps. Près de la surface, on observe une variation quotidienne de la température dont l'amplitude s'atténue rapidement en fonction de la profondeur (Guyot, 1999). Néanmoins, 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 (Deltour, 1985; Kimball, 1986; Nebbali *et al.*, 2006).

2.2.5 Interaction entre les différents phénomènes physiques

L'enveloppe de la serre modifie les échanges d'énergie et de matière entre l'atmosphère libre et le milieu abrité. Le climat qui s'établit spontanément dans ce dernier résulte d'une combinaison d'effets physiques et biologiques. Les effets à considérer sont : l'effet de serre ainsi que l'effet de la végétation.

- *Effet de serre*

La température spontanée résulte de l'effet de serre qui conjugue deux phénomènes, l'un radiatif, l'autre convectif (Bordes, 1993).

Effet radiatif : Les matériaux de couverture des serres sont en principe très perméables (transparents) au rayonnement solaire visible et infrarouge (IR) court (0.38 à 2.5 μm); faiblement perméables au rayonnement infrarouge (IR) long (2.5 à 50 μm) émis par les corps terrestres, y compris l'atmosphère libre. En revanche, les corps abrités par la serre (les plantes, le sol,...) absorbent l'essentiel du rayonnement reçu quelle que soit sa longueur d'onde.

De jour : le rayonnement solaire transmis par les vitres ou les films plastiques de couverture rencontre le sol, les plantes et est pour l'essentiel absorbé. La température de surface du sol et des plantes étant voisine de 27 °C environ, on constate que, d'après la loi de Wien, la longueur d'onde du rayonnement réémis est voisine de 10 μm , c'est-à-dire que le rayonnement réémis est dans le domaine de l'infrarouge long. Cette énergie est absorbée par la couverture (parois latérales, toiture) qui s'échauffe et réémet, toujours dans l'infrarouge long, mais cette fois-ci selon une proportion de 50 % vers l'extérieur par la face externe, et de 50 % vers l'intérieur par la face interne. Compte tenu de la faible épaisseur des matériaux, on considère que les émissivités des surfaces interne et externe sont généralement les mêmes. D'après ces chiffres on remarque qu'une partie de l'énergie solaire reçue a été en quelque sorte piégée à l'intérieur de la

serre, au lieu d'être perdue vers l'extérieur. Ce piégeage pendant la journée se traduit par un échauffement, la température à l'intérieur d'une serre est donc plus élevée qu'à l'extérieur. L'effet de serre est favorable au développement des cultures en hiver dans les régions froides, mais il est gênant en été, en particulier dans les régions chaudes, au point d'obliger le producteur à recourir à des méthodes d'évacuation de la chaleur en excès (ventilation mécanique ou naturelle), ou de refroidissement évaporatif (nébulisation fine : *fog, cooling system...*).

De nuit : le rayonnement infrarouge long est seul présent et l'interposition, au-dessus d'une culture, d'une paroi l'absorbant ou le réfléchissant réduit les déperditions radiatives nettes et, là encore, la température reste plus élevée qu'en plein air. Par contre, lorsque le ciel est bien clair (en présence d'air sec, climat aride et semi aride), ce qui donne des températures apparentes de l'atmosphère négatives de l'ordre de (-39 °C), la température de l'air à l'intérieur de la serre peut devenir inférieure à celle de l'air extérieur. Une inversion de température apparaît généralement pour une température de ciel d'environ (-10 °C) (Montero *et al.*, 2005). Cela se traduit par une perte d'énergie par transfert radiatif entre le sol, les cultures et la couverture de la serre et la voûte céleste. Cette perte demeure non compensée par la restitution de la chaleur accumulée par le sol durant la journée. Dans des situations pareilles, l'absence du système de chauffage à l'intérieur des serres, augmente le risque de gel des cultures. D'une façon plus générale, le fonctionnement radiatif de la serre dépend essentiellement du comportement des matériaux de couverture à l'égard du rayonnement infrarouge long. On distingue parmi ces matériaux (Bordes, 1993) :

- les matériaux absorbant totalement l'infrarouge long (ils constituent la référence) : Le verre, Le polyester armé de fibres de verre, et Le poly-carbonate PMMA. A signaler que le verre à faible émissivité possède une face traitée; Le polyméthacrylate de méthyle qui est un thermoplastique transparent, utilisé pour remplacer le verre ;
- Les matériaux à transmission infrarouge limitée (de 20 à 40 %) : PVC polyéthylènes améliorés, ces polyéthylènes sont en mono, bi ou tri-couche ;
- Les matériaux à transmission infrarouge élevée (60 à 80 %) : Polyéthylène basse densité (PE bd). A noter que l'eau, qui se condense normalement sur les films, absorbe le rayonnement IR long.

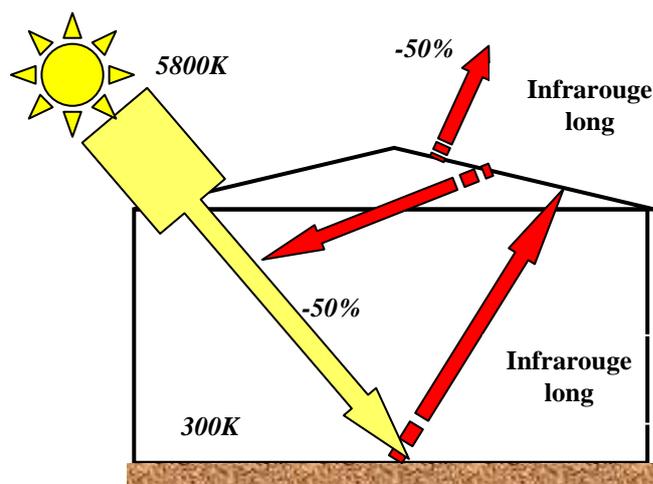


Figure 2.20 : L'effet de serre dans une serre (Urban, 1997)

2.2.6 Effet de la végétation sur le bilan énergétique dans la serre

La présence des plantes mûres génère un gradient de température quasi uniforme dans la serre. Ce gradient de température peut être dû au processus de transpiration, qui convertit la chaleur sensible en chaleur latente, la présence des plantes obstrue aussi l'écoulement de l'air. La transpiration des végétaux est également à l'origine d'un gradient d'humidité vertical quasi-uniforme dans la serre (Zhaio *et al.* 2001). Cependant, le processus de transpiration des cultures dépend de l'intensité du rayonnement solaire, des échanges convectifs et de l'hétérogénéité du climat à l'intérieur de la serre qui a une incidence sur la résistance aérodynamique et stomatique (Boulard & Wang, 2002a). Ces mêmes auteurs ont observé des niveaux de transpiration inférieurs de 30% dans les zones où l'air circule moins vite et où le rayonnement solaire est plus faible. Enfin, ces effets sont interdépendants. Par exemple, une augmentation de l'intensité du rayonnement solaire entraîne une augmentation de température mais une diminution de la teneur en eau. De plus, en période de vent faible, l'accroissement de la température dans la serre intensifie les gradients thermiques, les forces de flottabilité et donc la ventilation par effet cheminée (Baptista *et al.*, 1999). Les réactions des plantes à chacun de ces mécanismes varient beaucoup selon l'espèce, et de la variété, des plantes, et dépendent également de leur stade de développement.

- *Effet thermique de la végétation*

Bien que les échanges de chaleur dus à l'évapotranspiration (générée par la transpiration de la culture) jouent un rôle primordial dans la climatisation estivale de la serre, la modélisation de la transpiration des cultures (flux de chaleur latente) sous serre n'a pas fait l'objet de beaucoup de recherches jusqu'au milieu des années 1980. A partir de cette époque furent entrepris un certain nombre de travaux portant en particulier sur la transpiration de la tomate de serre (Stanghellini, 1987; Jolliet, 1988; Papadakis *et al.*, 1994). Les modèles physiques actuels supposent que le transfert de vapeur d'eau entre la plante et l'atmosphère obéit à une loi classique de diffusion. Le flux de vapeur d'eau est proportionnel au gradient de concentration de vapeur d'eau entre la surface des feuilles et l'air ambiant. La résistance totale du couvert est alors considérée comme la somme de deux résistances en série, à savoir :

-La résistance aérodynamique de la feuille :

Dans les limites des variations climatiques usuelles rencontrées sous serre, les variations des caractéristiques de l'air humide qui interviennent dans l'échange de chaleur convectif par l'intermédiaire des forces de flottabilité qu'elles induisent - influencent assez peu la valeur de la résistance aérodynamique. Au contraire la vitesse de l'écoulement a une influence majeure sur cette résistance. Nous nous placerons dans des conditions pour lesquelles la convection forcée est largement prépondérante par rapport à la convection naturelle. Pour une feuille de tomate, la dimension caractéristique est voisine de 25 cm de long (cette valeur a été déterminée de façon statistique sur un grand nombre de feuilles) et pour une foliole de rose de 4 cm (Baille *et al.*, 1994). La vitesse maximale de l'écoulement de l'air dans une serre, à l'intérieur de la végétation, est de l'ordre de 2 m s^{-1} . Ainsi, le nombre de Reynolds, défini par :

$$Re = \frac{LV}{\nu} \quad (2.5)$$

Est voisin de 3.10^4 ($\nu = 1,53.10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$). La transition vers la turbulence intervient pour un nombre de Reynolds critique dépassant 3.10^5 (Sacadura, 1993). Nous considérerons donc, même si l'écoulement est turbulent,

que la couche limite le long des feuilles est largement laminaire. Dans ce cas, le coefficient d'échange local h_x s'écrit :

$$h_x = \frac{Nu_x \lambda}{x} = 0.332 \frac{\lambda}{x} Pr_x^{0.33} \cdot Re_x^{0.5} \quad (2.6)$$

x : longueur d'échange,

Nu_x : nombre de Nusselt local,

λ : conductivité thermique de l'air ($\lambda = 0.0262 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ à 20°C),

Pr : nombre de Prandtl de l'air ($Pr = 0.7$ à 20°C).

Pour une feuille de longueur L , le coefficient d'échange moyen h_L s'écrit :

$$h_L = \frac{Nu_L \lambda}{L} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx = 0.332 \frac{\lambda}{L} Pr^{0.33} \cdot Re_L^{0.5} \quad (2.7)$$

Par conséquent, d'après la définition de la résistance (i.e. elle est la l'inverse de la conductance, multipliée par le produit ρC_p), on obtient la valeur de la résistance aérodynamique moyenne pour les deux faces de la feuille d'une plante:

$$r_a = \frac{\rho C_p L}{0.664 \lambda \cdot Pr^{0.33} \cdot Re_L^{0.5}} \quad (2.8)$$

-La résistance stomatique (interne) de la feuille :

Les stomates sont des structures de 5 à 30 μm de diamètre (Figure 2.22b) qui interrompant l'épiderme de revêtement des feuilles assurent l'essentiel des échanges gazeux entre les feuilles et le milieu extérieur. Leur ouverture conditionne le transfert de vapeur d'eau entre l'intérieur de la feuille et l'atmosphère environnant par l'intermédiaire de l'ostiole. Les stomates participent ainsi à la transpiration. Ils participent aussi à l'absorption du dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère. Ils ménagent une résistance supplémentaire en série avec la résistance aérodynamique. La résistance stomatique varie en fonction d'un certain nombre de paramètres physiologiques et climatiques. Généralement les chercheurs dans le domaine ne considèrent que les effets de ces derniers, en supposant que les cultures sont saines et ne souffrent pas de stress hydriques ou thermiques très importants. De tous les paramètres climatiques, le plus important

dans le processus de régulation stomatique est le rayonnement reçu par le couvert R_f . (Meidner et Mansfield, 1968). Ensuite, le déficit de pression de vapeur de l'air Dv (Lange et al., 1971), la température de surface de la feuille T_f (Neilson et Jarvis, 1975), la concentration en CO_2 (Meidner et Mansfield, 1968), et le potentiel hydrique de la feuille H_f (Stalfelt, 1955) peuvent jouer un rôle. Le potentiel hydrique H_f de la feuille traduit l'effet des différentes forces de liaison existant entre les molécules d'eau et les constituants de la feuille. On constate que la résistance stomatique évolue en fonction de R , Da et T_f selon un certain nombre d'auteurs (Jarvis, 1976, Avissar et al., 1985, Stanghellini, 1987) ont adopté l'hypothèse suivante : la résistance interne observée est la résultante de l'influence des variables climatiques, sans aucun effet synergique entre elles, soit :

$$r_s = r_{s,min} + f1.R + f2.Da + f3.T_f \quad (2.9)$$

ou $f1$, $f2$, et $f3$ sont des fonctions mathématiques choisies et déterminées expérimentalement pour représenter le mieux possible l'évolution de r_s en fonction de la variable climatique considérée et $r_{s,min}$ est la résistance minimale au transfert de vapeur d'eau obtenue lorsque tous les facteurs sont à leur niveau optimal pour la transpiration. Boulard et al. (1991) et Baille et al. (1994) ont trouvé $r_{s,min} = 150 \text{ s m}^{-1}$ respectivement pour une culture de tomate et une culture de rose sous serre.

La simulation de la transpiration à partir de cette approche requiert donc la connaissance de la température de feuille en plus des paramètres physiques de l'air et de paramètres liés à la culture. Or, la mesure de la température de feuille est très délicate en raison de l'hétérogénéité de sa répartition et des difficultés inhérentes à la mesure. Pour y remédier, on fait appel à la méthode dite combinatoire qui permet de calculer la transpiration en fonction du rayonnement absorbé par le couvert et du déficit de saturation de l'air (Penman, 1948; Monteith, 1973) Toutes ces approches s'appuient sur le concept de (*big leaf*), grande feuille virtuelle possédant les propriétés moyennes des

feuilles du couvert, tant du point de vue de la conductance stomatique et aérodynamique que du point de vue climatique. Bien que cette approche est simplifiée, ce concept de feuille virtuelle a permis l'élaboration d'un grand nombre de modèles de transpiration pour une large gamme de cultures de serre : le concombre (Yang, 1995), le rosier et une série de neuf espèces ornementales (Baille *et al.*, 1990) et la tomate, (Boulard, 1996). Dans le cas de la simulation numérique, la modélisation des cultures est prise en combinant l'approche milieux poreux (*i.e.* modèle dynamique) et l'approche du macro-modèle de transpiration (*i.e.* modèle thermique). Ainsi, des termes sources volumiques pour le flux de chaleur sensible et le flux de vapeur d'eau sont affectés à chaque cellule du milieu poreux (*i.e.* végétation) (Boulard *et al.* 2002).

2.2.7 Les mécanismes de la ventilation dans la serre

La différence entre les conditions climatiques à l'intérieur de la serre et celles qui règnent à l'extérieur concerne la vitesse du vent qui entrent en jeu. La vitesse moyenne du vent est de l'ordre de $(4 - 6) \text{ m s}^{-1}$ à l'extérieur tandis qu'elle est nettement plus faible à l'intérieur $(0.5-0.3) \text{ m s}^{-1}$. Le rôle d'abri joué par la structure de la serre est essentiel, car la croissance des plantes est sensiblement réduite lorsqu'elles sont soumises à des vitesses de l'air très supérieures à 0.5 m s^{-1} (Day & Bailey, 1999). Néanmoins, le mouvement d'air est nécessaire, car il facilite les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone entre les plantes et l'air environnant. Même dans le cas d'une serre fermée, l'air à l'intérieur n'est pas complètement au repos du fait qu'il existe des gradients de températures. Ces gradients créent des mouvements d'air convectifs. Par ailleurs, la serre n'étant pas complètement étanche, des mouvements d'air peuvent être induits par le vent extérieur. Parfois également, les mouvements d'air sont créés par l'utilisation du chauffage ou de ventilateurs pour contrôler le microclimat à l'intérieur de la serre (Day & Bailey, 1999). Nous distinguons donc deux mécanismes prépondérants qui mettent en mouvement l'air dans la serre : les forces de flottabilité qui correspondent à la poussée d'Archimède créée par le gradient de température. Elles sont fonction de la densité de l'air, qui elle-même dépend de la température. Plus l'air est froid, plus il est lourd et plus il descend. La force motrice générée par le vent extérieur (ou par des ventilateurs), qui met en action les masses d'air dans la serre et

créée des zones de surpression ou de dépression. En pleine période chaude, la serre peut recevoir du soleil jusqu'à 1000 W m^{-2} , dont environ les deux tiers (600 W m^{-2}) pénètrent dans la serre. L'excès de chaleur est un souci majeur des producteurs, en raison de ses effets directs (élévation de température des organes végétaux) ou indirects (abaissement de l'humidité relative de l'air) (Bordes, 1993). La lutte contre les températures élevées demeure une priorité elle vise à réduire les apports énergétiques et à accroître les déperditions de chaleur, ce qui peut être réalisé en optimisant l'aération de la serre. Le processus d'aération influence directement le transport d'énergie et de masse entre l'environnement extérieur et l'intérieur (Bartzanas *et al.*, 2004). Il s'agit de dissiper le surplus de chaleur. Accroître les échanges de dioxyde de carbone et d'oxygène. Maintenir un niveau d'humidité acceptable. Ainsi, l'aération affecte fortement la distribution du climat qui règne dans la serre. Or une distribution hétérogène des variables microclimatiques dans une serre engendre elle-même une hétérogénéité de la production, notamment en termes de qualité. L'efficacité de l'aération joue donc un rôle prépondérant dans la production. Selon les objectifs de climatisation, l'aération peut être réalisée de manière active (dynamique) ou passive (naturelle).

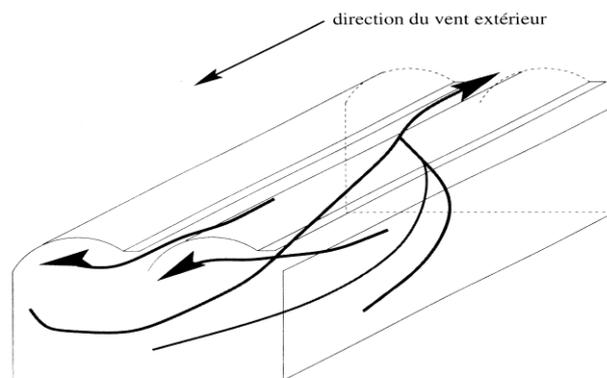


Figure 2.21. Description de la circulation générale de l'air dans une serre de type 'Méditerranéenne', Haxaire (1999)

- *Aération mécanique ou forcée :*

Sur deux faces opposées de la serre sont disposés d'une part des ventilateurs, d'autre part des ouvertures, ce qui peut être nécessaire s'il n'y a pas assez de vent ou si la serre s'aère mal. La ventilation forcée permet d'éviter la condensation à la surface des feuilles en forçant l'air à circuler au sein du couvert végétal. Les inconvénients de ce dispositif sont une répartition des échanges peu homogène, ainsi qu'une consommation d'énergie importante, notamment en période chaude (Wacquant, 2000). L'efficacité de l'aération forcée dépend essentiellement de la puissance des ventilateurs et éventuellement du débit d'eau dans le cas de la ventilation forcée avec apport d'eau (i.e. *cooling system*). Elle 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 (Bordes, 1993).



Fig.2.22.: Système d'aération des serres (Ouvrants en Toiture)

- *Aération naturelle :*

Elle est réalisée au moyen d'ouvertures (ouvrants) disposées en toiture ainsi que sur les faces latérales fig.2.22 son efficacité dépend, en dehors des conditions météorologiques qui règnent à l'extérieur de la serre, des paramètres géométriques suivants : La disposition et la surface relative des ouvrants, généralement rapportée à la surface au sol de la serre, ce rapport, fixé de façon empirique en fonction du climat et

des cultures envisagées, est souvent de l'ordre de 20 % (Bordes, 1993) ; Le mode de gestion des ouvrants ; La hauteur et la longueur de la serre ; Les aménagements particuliers réalisés à l'intérieur de la serre (présence d'écran thermique ou d'écran d'ombrage, présence de filets anti insectes). Le flux d'air échangé entre l'intérieur et l'extérieur est lié aux différences de pression existant au niveau des ouvertures d'aération. Ces différences de pression peuvent être reliées aux surpressions et dépressions créées par : (i) la différence de densité de l'air, elle-même liée à la différence de température, entre l'intérieur et l'extérieur de l'abri, (ii) l'effet du vent sur les parois de la serre. Le premier phénomène, engendré par les forces de flottabilité, est également connu sous le nom 'd'Effet cheminée' (Roy *et al.* 2002). Outre la ventilation, il existe des infiltrations ou des fuites d'air dans une serre. Ces dernières dépendent à la fois des conditions climatiques extérieures (vitesse et direction de vent, température extérieure...) et du niveau d'étanchéité de la serre. On note enfin que le renouvellement d'air, qu'il soit dû à l'aération ou aux déperditions par fuite est exprimé en terme de flux volumique ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) ou encore en terme de taux horaire d'aération (h^{-1}) qui représente le nombre de volumes d'air (volumes de serre) renouvelés par heure.

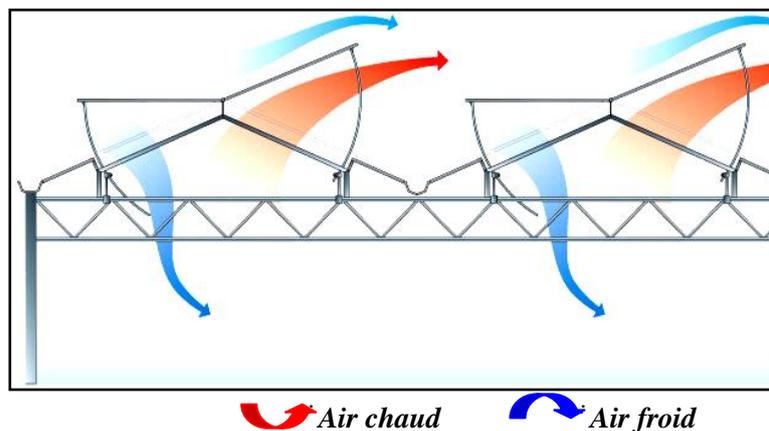


Fig. 2.23 : Le mouvement de l'air à travers les ouvrants (ouvrants en toiture)

2.2.8 Méthodes de mesures du microclimat des serres

- *Mesures du climat distribué*

Mesures de vitesses : Plusieurs techniques sont utilisées : Anémométrie à fil chaud (directionnel) ou à boule chaude (omni directionnel): L'anémomètre à fil chaud enregistre la vitesse de l'écoulement (*i.e.* écoulement d'air) en comparant les écarts de température existant entre le fil chaud placé du côté amont de l'écoulement et celui placé du côté aval. Plus la vitesse est élevée plus le fil chaud en aval de l'écoulement se refroidit. Cette technique a notamment été utilisée par Haxaire *et al.*, (1998) et par Boulard *et al.*, (1999) ; Anémométrie sonique : Il s'agit de mesurer le temps mis par un ultrason pour aller d'un point à un autre. En effet l'air étant le support de l'ultrason, la vitesse de propagation de ce signal se trouve corrélée à la vitesse de déplacement de l'air. Cette technique permet une investigation plus fine du champ des vitesses que l'anémomètre à fil chaud, elle présente aussi l'avantage de pouvoir dresser une cartographie de l'écoulement. L'anémométrie sonique a été utilisée récemment avec succès pour cartographier les champs fluides au travers des ouvrants et à l'intérieur des serres (Boulard *et al.*, 1997; Wang, 1998; Haxaire, 1999; Wang & Deltour, 1999). Le protocole expérimental de mise en œuvre de cette installation est décrit dans l'article de Boulard *et al.*, (2000) ; Anémométrie laser Doppler, ou Tomographie laser : cette méthode est peu intrusive, car seules les particules de fumée injectées dans l'écoulement constituent une intrusion dont les effets sur l'écoulement sont négligeables. Dans le principe, un faisceau laser illumine des particulesensemencées et transportées par l'air à travers ce faisceau (Figure 2.24). Les particules peuvent par exemple être des gouttelettes d'huile (Haxaire *et al.*, 1998; Boulard *et al.*, 1999). Cette technique permet ainsi d'accéder à une cartographie bidimensionnelle du champ des vitesses et donc de décrire aisément un écoulement tridimensionnel en effectuant des mesures sur plusieurs sections. Des informations quantitatives peuvent alors être extraites par analyse d'image. Cette méthode a notamment été employée par Lamrani *et al.*, (2001). Le dispositif de mise en place de cette technique est décrit dans (Haxaire, 1999).

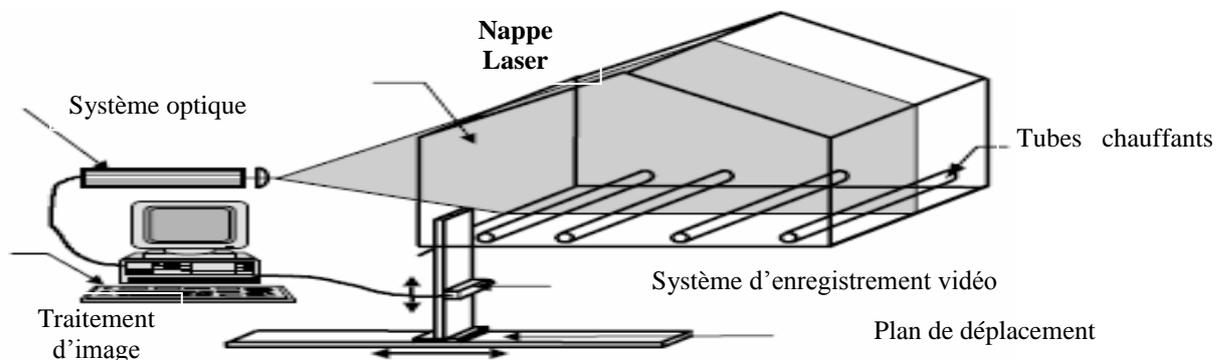


Figure 2.24 : Représentation du dispositif de visualisation laser d'après (Roy *et al.*, 2000)

- *Mesures de températures et d'humidités*

La température ainsi que l'humidité de l'air peuvent être mesurées par des psychromètres ventilés. C'est la technique la plus souvent utilisée dans les mesures expérimentales en serre. Il s'agit de mesurer la température par deux sondes platine abritées du rayonnement solaire dans une tuyère ventilée mécaniquement. La température peut aussi être mesurée par des thermocouples différentiels associés à une sonde platine. Lorsque l'on souhaite procéder à des acquisitions haute fréquence afin d'étudier les fluctuations de température et déterminer des grandeurs turbulentes, on utilise un thermocouple fin associé à un anémomètre sonique (Boulard, 1996; Boulard *et al.* 1996; Boulard *et al.* 2002; Boulard & Wang, 2002a).

- *Mesures du rayonnement solaire et du rayonnement net*

Le rayonnement d'origine solaire dans le domaine spectral allant de 0.3 jusqu'à 3.0 μm (*i.e.* courtes longueurs d'ondes), qui parvient sur la surface du sol peut être mesuré par des cellules de silicone (pyranomètres) placées sur la surface du sol, dans la serre ou à

l'extérieur (Boulard & Wang, 2002a). Le rayonnement net dans le domaine spectral entre (0.2 – 100 μ m), correspondant à la somme des contributions de courtes (0.3 – 3.0 μ m) et grandes (3.0 – 100 μ m) longueurs d'ondes, peut quant à lui être mesuré avec un pyradiomètre différentiel, à l'extérieur ou à l'intérieur de la serre. Le rayonnement provenant de l'atmosphère, le rayonnement réfléchi et émis par la surface extérieure de la toiture ainsi que le bilan radiatif sont déduits de ces mesures.

- *Mesures du taux d'aération*

Les travaux expérimentaux menés sur l'aération naturelle des serres dans les années 80 et au début des années 90 se sont focalisés sur l'estimation des flux volumiques de ventilation (*i.e.* taux d'aération) par la méthode dite des "gaz traceurs" (Bot, 1983; de Jong, 1990; Fernandez & Bailey, 1992; Boulard & Draoui, 1995). Cette technique consiste à injecter un gaz à une concentration donnée et à observer sa décroissance dans le temps. Le taux d'aération est déterminé à partir d'un bilan massique du gaz traceur à l'intérieur de la serre.

- *Mesure de la vitesse et de la direction du vent*

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles (Boulard *et al.*, 1998; Fatnassi *et al.*, 2002; Ould Khaoua *et al.*, 2005). Un tel anémomètre est constitué d'un rotor muni de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent.

2.3 Objectifs de l'étude et la démarche adoptée

Nous venons de présenter dans la première partie de ce chapitre la description de la serre et de son microclimat, dans la deuxième partie de ce même chapitre nous venons de présenter les principaux phénomènes et mécanismes physiques qui concourent à l'établissement de la structure énergétique du microclimat sous serre. Dans la deuxième partie, l'analyse de différents travaux entrepris par plusieurs auteurs en matière d'étude du bilan énergétique et de ces composantes (chauffage, ventilation, présence de couvert végétal etc.....), a conduit à resituer notre démarche dans un cadre plus large et à mieux définir les objectifs et les étapes de notre travail de recherche. Se référant à l'objectif initial, qui était :

- L'introduction en Algérie de l'analyse des paramètres du climat intérieur de la serre (i.e. température, humidité, vitesse de l'air etc.),
- L'étude caractéristique du bilan énergétique des serres,
- Amélioration de nos connaissances concernant le comportement des serres,
- Compléter les diverses approches dans le domaine par l'introduction de modèles empiriques et semi empiriques qui caractérisant le climat semi aride.
- Enfin, nous tenterons d'élaborer des modèles, réellement opérationnels, dont la prédiction est en accord avec les informations à notre disposition. Ces modèles sont fondés sur des théories et des techniques de mathématiques bien adaptées.

Notre démarche sera structurée selon les deux approches classiquement employées en recherche :

- i) Une approche **expérimentale** visant à caractériser les mécanismes physiques et à fournir des données nécessaires au fonctionnement et à la vérification d'un tel modèle;
- ii) Une approche de **modélisation mathématique** aboutissant à l'élaboration de modèles de connaissance. Nos modèles utilise à la fois des paramètres facilement mesurables, ils sont basés sur des équations théoriques qui

intègrent l'ensemble des processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur, la plante, et le sol.

Les particularités de nos modèles sont :

- (i) Les modèles font une analyse globale des différents bilans thermiques échangés.
- (ii) Les modèles sont basés essentiellement sur des données réelles mesurées sur site (la serre).

Chapitre 3

Matériel et méthode

Introduction

Les connaissances actuelles sur les paramètres du micro climat de la serre (i.e. température, humidité, vitesse de l'air. etc.) proviennent principalement de trois sources : les mesures sur site, la simulation en soufflerie des prototypes de serre, les simulations numériques et les résolutions analytiques. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est la description des approches expérimentales mises en œuvre dans notre travail de recherche pour parvenir à la modélisation des phénomènes intervenant dans l'agro-système serre. Deux serres, une en plastique l'autre en verre de grandeur réelle (32m², L=8 m, l=4 m), ont été construites par le département d'Agronomie de l'université de Batna et qui ont été retenue pour les mesures et pour la modélisation mathématique.

En premier lieu, nous présentons les protocoles expérimentaux concernant les cinq expérimentations réalisées:

- la première, consiste à identifier la distribution de la température de l'air intérieur de la serre sans couvert végétal durant la saison hivernale dans la région de batna.
- La seconde, porte principalement sur l'acquisition de données nécessaires à la formulation et la vérification puis à la validation d'un modèle semi empirique de bilan énergétique globale de la serre agricole sans couvert végétale.
- La troisième consiste à l'établissement d'un modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre avec plants de tomate.
- La quatrième, est une approche expérimentale du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région semi aride.
- La cinquième porte aussi sur l'établissement de deux modèles de coefficients d'échange convectif près de la paroi (face intérieure et face extérieure) de la serre, pour une serre sans couvert végétale en période nocturne.

3.1 Dispositif expérimental

3.1.1 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 et affiner la connaissance du climat sous serre. ii) Sur le plan modélisation, il s'agit de :

- Recueillir des données pour l'établissement du modèle mathématique et disposer de mesures permettant de caler les paramètres de ce modèle,
- Fournir les données nécessaires à la vérification puis à la validation des modèles établis.

3.1.2 Le climat de Batna

La ville de Batna est considérée historiquement comme étant la "capitale" des Aurès ; Elle est située entre 35° 33' Nord et 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, quelques données moyennes de son climat sont résumées sur les tableaux ci-dessous :



Annee	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dece	Annuel
1995	5.3	9.0	8.2	10.9	18.2	22.5	26.1	24.2	20.6	15.7	10.7	9.2	15.1
1996	8.6	6.2	9.6	11.8	16.5	19.8	24.8	26.4	19.2	13.9	11.5	9.3	14.8
1997	7.6	8.2	8.4	12.1	19.6	25.8	26.6	25.4	20.6	16.1	11.3	7.7	15.8
1998	6.1	7.5	8.8	13.8	16.5	23.5	26.8	25.7	23.0	14.7	10.0	5.5	15.2
1999	6.7	5.0	9.5	13.6	21.6	25.7	26.1	29.2	23.6	19.2	9.9	6.8	16.5
2000	3.8	7.2	10.8	15.0	20.7	22.9	27.1	25.8	22.2	15.5	11.3	8.2	15.9
2001	7.3	6.7	14.7	12.8	18.8	24.0	27.7	26.6	22.5	20.3	10.6	5.8	16.6
2002	5.3	8.0	11.4	14.8	19.0	24.4	26.6	25.5	21.2	17.2	11.7	8.3	16.2
2003	6.0	6.1	10.1	13.9	18.0	24.0	28.3	26.6	21.4	18.6	11.5	6.2	15.9
2004	6.1	8.3	10.4	11.5	15.0	21.1	25.4	27.5	21.1	19.0	9.3	7.1	15.2
Moyen	6.3	7.2	10.2	13.0	18.4	23.4	26.5	26.3	21.5	17.0	10.8	7.4	15.7

Tableau 3.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air (en °C) ; Période : 1995 – 2004 ; Station météo de l'aéroport de BATNA (Altitude : 822 m ; Latitude : 35°45 N, Longitude : 06°19 E) (Document de l'office national de météorologie)

Annee	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuel
1995	77.	69.	66.	56.	48.	51.	39.	49.	60.	69.	60.	73.	60.
1996	69.	72.	69.	69.	63.	58.	40.	43.	54.	57.	53.	59.	59.
1997	69.	63.	58.	58.	41.	38.	40.	44.	65.	72.	73.	73.	58.
1998	75.	74.	63.	55.	65.	41.	32.	44.	50.	64.	67.	78.	59.
1999	77.	76.	64.	52.	40.	39.	39.	35.	52.	56.	68.	79.	56.
2000	78.	65.	56.	47.	56.	51.	36.	39.	51.	62.	59.	68.	56.
2001	70.	64.	36.	55.	56.	38.	33.	37.	62.	57.	74.	76.	55.
2002	74.	63.	56.	53.	44.	36.	42.	50.	53.	54.	67.	75.	56.
2003	75.	71.	67.	68.	62.	47.	36.	41.	61.	62.	71.	78.	62.
2004	77.	62.	64.	68.	65.	60.	44.	42.	58.	51.	80.	80.	63.
Moyen	74.	68.	60.	58.	54.	46.	38.	42.	57.	60.	67.	74.	58.

Tableau 3.2 : Moyenne mensuelle de l'humidité relative (en %) : Période : 1995 – 2004 ; Station météo de l'aéroport de BATNA ; (Document de l'office national de météorologie)

Annee	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuel
1995	3.5	2.2	3.5	3.4	4.0	4.4	3.4	3.1	3.5	1.9	3.1	4.2	3.4
1996	4.2	5.4	3.3	3.6	2.8	2.9	3.5	4.1	3.3	3.4	4.3	5.3	3.8
1997	3.4	1.8	2.4	3.8	4.2	4.6	3.8	3.4	2.5	2.2	3.9	3.1	3.3
1998	2.2	2.1	3.0	4.6	3.5	4.0	3.7	3.7	3.6	2.0	3.1	2.4	3.1
1999	2.9	4.0	4.1	4.5	4.3	4.9	4.3	4.7	4.3	4.3	4.5	4.0	4.2
2000	2.7	3.7	4.4	5.2	4.6	3.9	4.3	4.0	4.0	4.4	4.2	4.6	4.2
2001	4.8	4.4	4.0	4.6	4.9	4.7	4.9	4.1	3.8	3.5	3.5	3.3	4.2
2002	3.1	4.2	4.7	5.7	4.9	4.3	4.7	4.2	3.9	3.5	5.3	3.1	4.3
2003	4.0	3.3	2.4	3.1	2.5	2.9	2.8	2.5	2.4	2.6	1.7	2.3	2.7
2004	1.8	2.7	2.9	2.6	3.3	2.1	2.6	2.7	2.0	2.0	1.7	2.4	2.4
Moyen	3.3	3.4	3.5	4.1	3.9	3.9	3.8	3.7	3.3	3.0	3.5	3.5	3.6

Tableau 3.3 : Moyenne mensuelle de la vitesse du vent (m/s) : Période : 1995 – 2004 ; Station météo de l'aéroport de BATNA, (Document de l'office national de météorologie)

Annee	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuel
1995	174.6	240.0	238.6	282.0	329.0	285.2	375.2	320.3	248.6	256.4	196.3	162.6	3108.8
1996	161.5	145.4	228.3	206.0	299.5	298.2	347.4	311.1	260.9	261.2	206.1	176.5	2902.1
1997	140.3	224.3	288.2	258.0	309.7	330.4	348.3	320.0	233.2	233.2	173.2	183.9	3042.7
1998	187.3	201.1	251.8	268.5	267.3	328.2	390.2	314.0	269.5	241.7	170.6	178.2	3068.4
1999	151.3	170.7	244.5	299.9	297.9	230.6	346.9	287.5	270.8	239.8	180.9	152.4	2873.2
2000	198.4	214.1	247.7	272.5	241.8	306.1	366.2	336.0	249.5	221.9	194.5	193.9	3042.6
2001	181.2	215.3	214.9	271.7	292.3	343.9	340.3	318.9	270.4	268.1	183.0	171.0	3071.0
2002	192.1	220.6	255.6	275.4	309.6	344.1	325.1	271.3	283.9	272.3	148.3	168.1	3066.4
2003	131.7	166.6	227.7	245.4	293.6	338.4	328.0	314.3	229.2	186.2	182.1	153.5	2796.7
2004	178.6	211.7	217.4	239.7	259.2	302.4	342.2	312.9	252.0	224.7	139.6	112.9	2793.3
Moyen	169.7	201.0	241.5	261.9	290.0	310.7	351.0	310.6	256.8	240.6	177.5	165.3	2976.5

Tableau 3.4 : Durée mensuelle de l'insolation totale (en heures) ; Période : 1995 – 2004 ; Station météo de l'aéroport de BATNA, (Document de l'office national de météorologie)

Le climat observé durant les périodes de mesure (de mi-octobre à mi-avril) de chaque année (2002, 2006, 2008) est un climat semi aride, fortement marqué par des journées très ensoleillées. En revanche la vitesse et la direction du vent sont faiblement variables même à l'échelle d'une journée.

3.1.3 Site d'étude, serres expérimentées, et expérimentations

- *Première Expérimentation*

La serre d'exploitation utilisée pour cette première expérimentation est une serre de structure mono chapelle couverte par un film en plastique, de 18m² (L= 6 m, l= 3) de surface, de forme de serre d'horticulture, une vue schématique de cette dernière et des plans de mesures sont montrés sur la figure 3.1. La serre a été installée dans l'ancien terrain d'expérimentation du département d'agronomie de l'université de Batna, une région qui appartient aux hauts plateaux du Nord Est algérien à 1000m d'altitude; entre 4° et 7° de longitude Est ; 36°de latitude Nord.

Les mesures de la température ont été effectuées durant la saison hivernale de l'année (2002-2003). Les trois plans de mesure sont parallèles à la surface du sol de la serre et sont situés de la manière suivante :

- Le plan I se situe à 20 cm de profondeur au dessous de la surface du sol ;
- Le plan II se situe à 20 cm au dessus de la surface du sol ;
- Le plan III se situe à une hauteur de 2 m au dessus de la surface du sol.

Le choix de ces trois niveaux c'est fait pour les raisons suivantes :

- i) Plan I, c'est la profondeur de prospection des racines ;
- ii) Plan II, c'est l'espace qu'occupe la végétation au stade juvénile ;
- iii) Plan III, c'est la partie comprise entre le toit de la serre et le sommet de la végétation.

La température est mesurée en 20 points de chaque plan par des thermomètres et des thermocouples, la figure 3.2 montre en détail le positionnement des points de mesure. Les mesures sont effectuées durant la journée (période diurne), chaque cinq heures de temps à (7h; 13h; 17h) sur une période de 3 mois, durant la période la plus froide et la plus ventée de la saison, du mois de décembre 2002 jusqu' a la fin du mois

de février de l'année 2003. Les conditions climatiques extérieures sont mesurées à une distance de 8m au Nord de la serre. Le tableau 3.5 illustre les conditions climatiques de la serre et du climat extérieur durant l'expérimentation et résume leur déviation standard par rapport à leurs valeurs moyennes. Pour minimiser l'influence des paramètres climatiques extérieurs et atténuer l'influence de la variation des paramètres thermiques de l'air intérieur de la serre durant la collecte des mesures, nous avons fait appel à la méthode de normalisation, qui a pour principe : le remplacement de la température mesurée $T(i,j,t)$ par une température réduite adimensionnelle $T^*(i,j,t)$, définie comme suit :

$$T^*(i,j,t) = \frac{T(i,j,t) - T_e(t)}{T_i(t) - T_e(t)} \quad (3.1)$$

La différence de température moyenne d'un point avec la température extérieure à un instant (t), $\Delta T_{ie}(t)$, est calculée à partir de la formule suivante :

$$\Delta T_{ie}(t) = \frac{\sum_{k=1}^{90} [T_i(t) - T_e(t)]}{90} \quad (3.2)$$

Paramètre	T= 7h		T= 13h		T = 17h	
	Moy	D _{st}	Moy	D _{st}	Moy	D _{st}
<i>T_e</i> (°C)	1.71	0.3	09.03	0.33	07.55	0.4
<i>He</i> (%)	32.2	4.8	30.3	5.0	31.5	4.5
<i>T_i</i> (°C)	3.75	0.5	13.49	0.53	11.02	0.6
<i>Hi</i> (%)	33.5	4.6	34.7	5.0	33.8	5.1
<i>Ve</i> (m/s)	3.1	0.8	2.7	1.1	3.6	1.0
$\Delta T_{ie}(i)$ (°C)	2.04		4.46		3.47	

Tableau 3.5 : Conditions climatiques durant l'étude expérimentale.
Avec : *D_{st}* : Déviation standard. *Moy* : Valeur moyenne.

	07h	13h	17h
<i>T* I</i>	$0.63 \leq T^*I \leq 3.25$	$0.05 \leq T^*I \leq 0.54$	$1.3 \leq T^*I \leq 1.94$
<i>T* II</i>	$0.18 \leq T^*II \leq 2.25$	$1.74 \leq T^*II \leq 2.28$	$1.1 \leq T^*II \leq 1.78$
<i>T* III</i>	$0 \leq T^*III \leq 0.54$	$1.67 \leq T^*III \leq 2.09$	$0.9 \leq T^*III \leq 1.55$

Tableau 3. 6: Bornes de Variation des températures moyennes adimensionnelles Réduites (*T*I*, *T*II* et *T*III*).

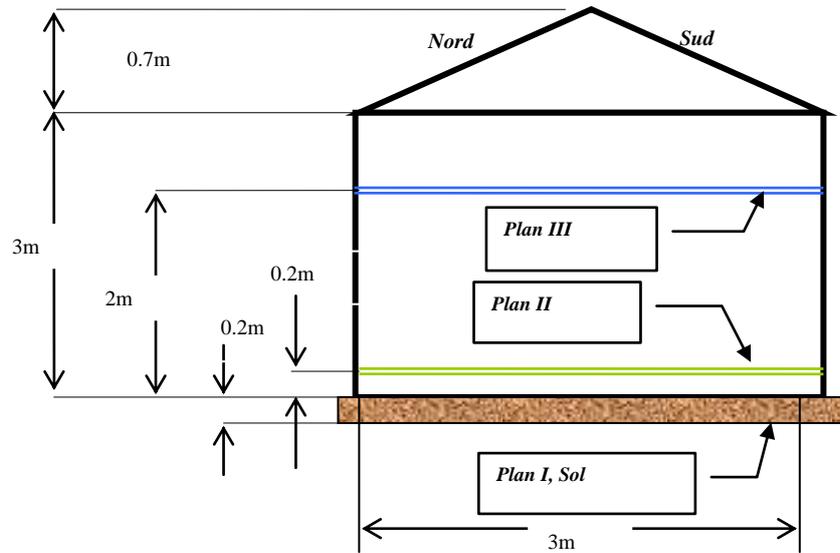


Fig. 3.1 : Schéma de la serre en plastique expérimentée.
Les plans I, II, et III sont les plans de mesure

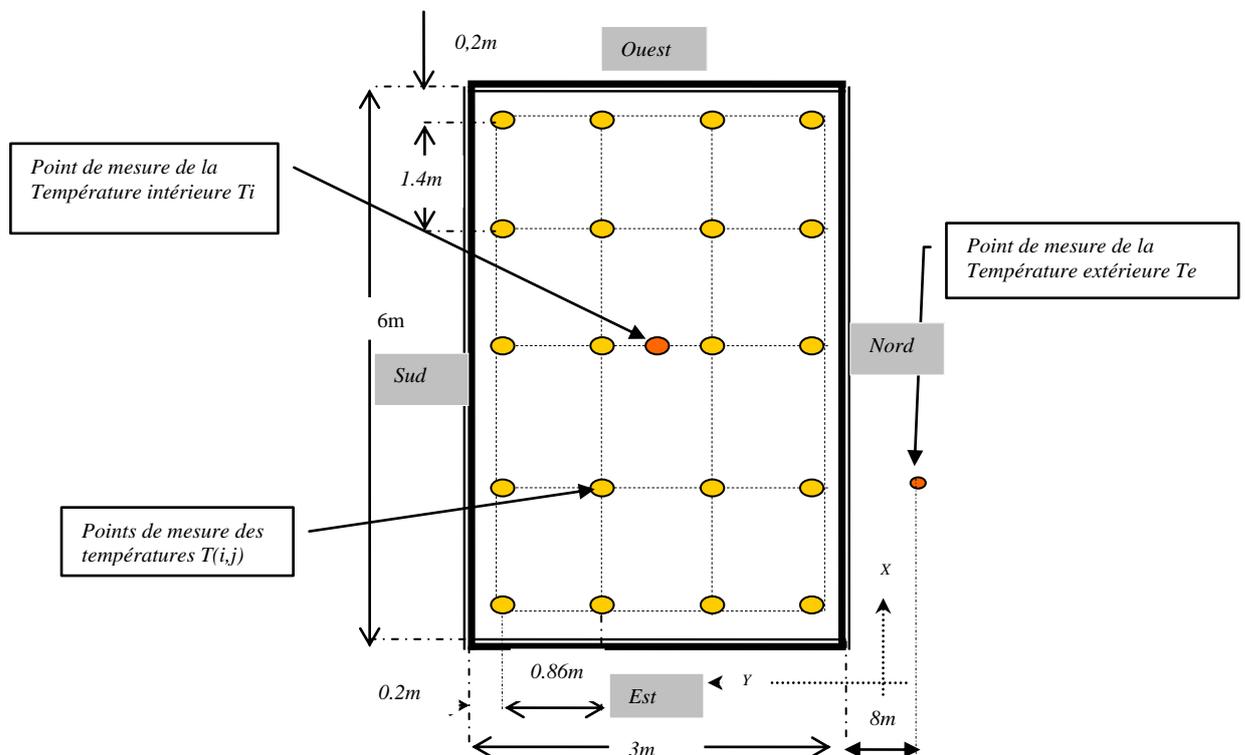


Fig. 3.2: Schéma du positionnement des points de mesure de la température sur les trois plans de mesure.

• *Deuxième Expérimentation*

Cette seconde expérimentation a été réalisée dans une serre de production de 32m² (L=8m, l=4m) de surface, installée dans le nouveau terrain d'expérimentation du département d'agronomie de l'université de Batna (nouveau campus). La serre à une forme de serre d'horticulture d'une hauteur 3.10m sous faîtage et 2.70m sous chéneau, de longueur 8m et de largeur 4m; Ce qui conduit a un volume de V= 103.04 m³.

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 3.7. Les propriétés des deux sols extérieur et intérieur, considérés à humidité moyenne sont aussi rapportées sur le même tableau.

Les mesures de température ont été effectuées chaque 60 mn durant les 24 heures de chaque journée type. La figure 3.3 montre en détail le positionnement des points de mesures. La température et l'humidité de chaque point sont mesurées par un système de mesure a distance (OACTON Logger Plus; Wireless transmisting system), ce dernier est composé de dix capteurs (hygro - thermomètres), de dix émetteurs sans fil (Cradle) et d'un collecteur de signaux, ce dernier est lié directement au PC à l'aide d'un câble USB. La lecture, le stockage et le traitement des données sont réalisés sur PC à l'aide du logiciel de traitement (OACTON Log). Les conditions climatiques extérieures (la température, l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement solaire global) sont mesurées à une distance de 200m au Nord de la serre, par la station météorologique "Aurès Solar" du laboratoire d'études des systèmes énergétiques industriels (LESEI) de l'université de Batna, le tableau 3.8 résume les valeurs moyennes de ces conditions durant l'expérimentation pour les trois journées types de mesures.

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

Tableau 3.7 : Caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composantes de la serre

Jours Types	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 (m.s ⁻¹)
1 ^{er} jour	6 - 24.33 4 - 40	52.08	610.77	7h11'	1.3
2 ^{eme} jour	4.6- 13.5 7.5 - 26	63.5	466.33	2h14'	3.2
3 ^{eme} jour	4 - 15.67 4 - 20.33	67.83	150.74	20'	1.8

Tableau 3.8: Conditions climatiques extérieures moyennes pour chaque journée-type

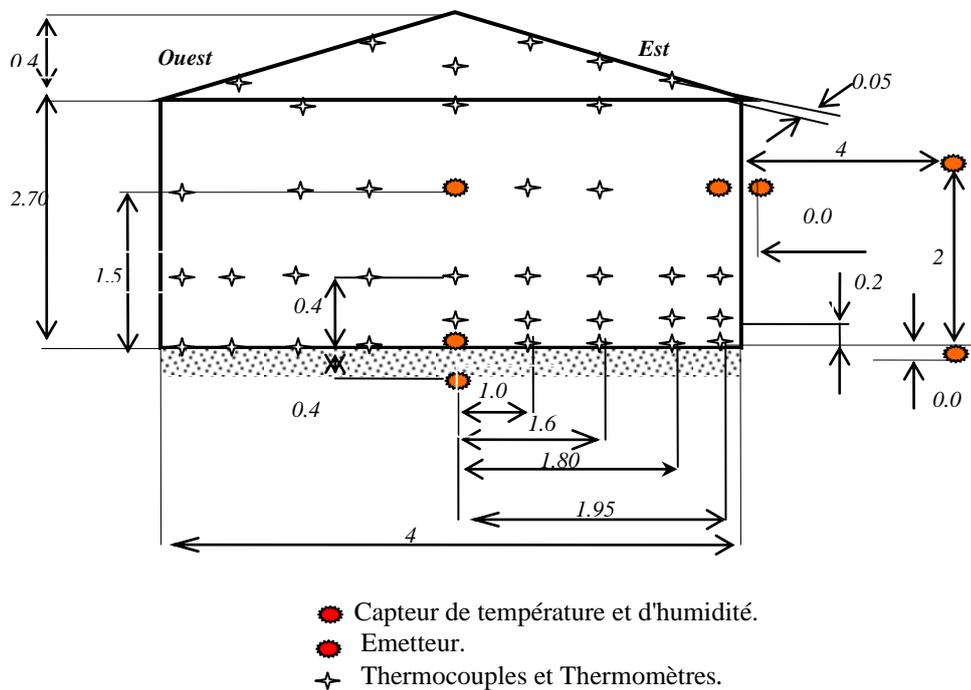


Fig. 3.3: Schéma de la serre et des points de mesure

• **Troisième Expérimentation**

Cette expérimentation a été effectuée dans une serre naturellement aérée de type Venlo avec quatre rangées de plant de tomates (culture hors sol en pots). La serre est orientée Est-Ouest. Les caractéristiques géométriques de la serre sont identiques à celle de la serre utilisée pour la deuxième expérimentation (i.e. serre Venlo: surface du sol 32 m², hauteur sous faitages égale à 3.2m, hauteur sous chenaux égale à 3.60m, largeur totale égale à 4m, longueur totale égale à 8 m).

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 ont eu une taille moyenne de 0.8m, et leur densité était de 3,5 plants par m². Les plantes ont été cultivées dans des pots, rangés 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. Une vue schématique du dispositif expérimental est montrée dans la figure 3.4.

A l'intérieur de la serre, la température et l'humidité relative de l'air ont été mesurées par deux sondes qui couvrent un éventail de mesure de l'ordre de (température -50° à 100°C avec une résolution de 1°C, précision $\pm 2\%$; humidité de 0 à 100%HR, avec une résolution 0,5%, et une précision de l'ordre de $\pm 3\%$ jusqu'à 90% HR), ces deux sondes sont rassemblés dans un seul enregistreur de données (enregistreur OAKTON plus), les sondes étés naturellement aérées et sont protégées contre l'influence du rayonnement solaire direct par une boîte 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 en 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 pyranometer (lite PS, Kipp and Zonen, Netherlands) 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 côtés et du toit de 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 de la surface 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 (model 100075, précision $\pm 0.1\text{ms}^{-1}$, Climatronic Corporation), et une palette de vent (model 100076, précision $\pm 2^\circ$,

Climatronic Corporation). Le rayonnement solaire global extérieur a été mesuré avec un pyranometer (Kipp & Zonen,). 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 (modèle MP601A, accuracy \pm 0,2 %, Rotronic instruments) situées à la même hauteur que le pyranometer extérieur. Toutes les mesures mentionnées ci-dessus ont été collectées par un système d'acquisition de données (Campbell, CR3000, USA made). Toutes les données ont été enregistrées chaque 2 seconds et ramenées à une moyenne sur une durée de 30min.

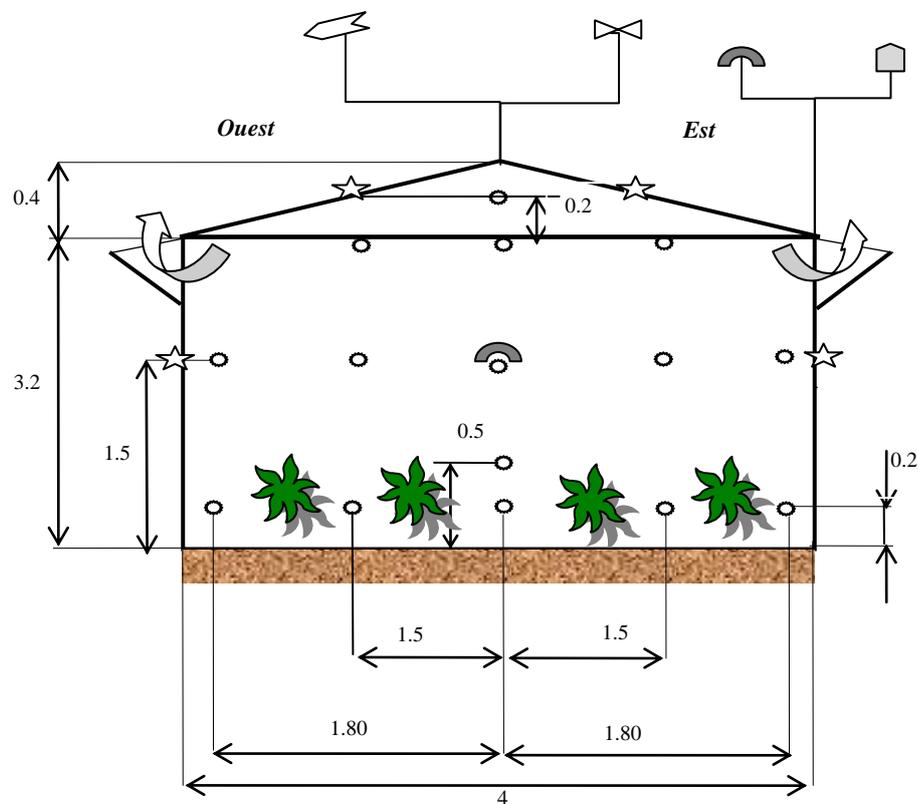


Fig. 3.4: Schéma de la serre expérimentée et du positionnement des appareils et des sondes de mesures (Toutes les distances sont en mètre linéaire).

- ◻ : 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.

• *Quatrième Expérimentation*

Cette quatrième expérimentation a été effectuée dans la même serre que celle des deux expérimentations précédentes (la 2^{ème} et la 3^{ème}), (i.e. une serre en verre de type Venlo, de 32 m² de surface). Dans cette expérimentation, le sol de la serre était nu (i.e.

serre sans couvert végétale) et la serre était dépourvue de toute installation de ventilation ou de chauffage artificiel. Le sol abrité été identique au sol extérieur, l'analyse de ce dernier sur une profondeur de 50 cm par le laboratoire de pédologie du département d'agronomie de l'université de batna, a donné les résultats suivants: le sol de la région de Batna est formé principalement 30.62% d'argile, 25.60 % de limon fin, 17.13% de limon grossier, 15.41% de sable fin, et 11.24% de sable grossier. La masse volumique du sol, ainsi que sa conductivité thermique moyennes ont été mesurées avant chaque période d'expérimentation sur une vingtaine d'échantillons, et ces propriétés spectrales sont retenues à partir de l'étude réalisée par Capderou (1985), voir tableau 3.9. Pendant les trois périodes de mesure (25 janvier 2007, 21 février 2007, et 18 mars 2007), le sol de la serre été nu, cependant une évaporation était présente, comme il a été confirmé par l'analyse des bilans sur la surface du sol abrité et l'air intérieur, présenté dans la section suivante. La source principale de la vapeur d'eau était la quantité d'eau contenue dans le sol de la serre, (l'ordre de 23.57%), au début de l'expérimentation.

	ρ kg/m ³	λ w/m.K	Cm J/kg.K	Sous Eclairment visible	Sous Eclairment infrarouge long	Source
Sol	1625.91*	2.541*	1491.62*	$r_s=0.25$ $\alpha_s=0.75$ $\tau_s=0$	$\epsilon_s=0.9$ $r_{ci}=0.2$ $\alpha_{st}=0.8$	Capderou 1985
Air	101354/(287.05T)	(2.5 103T ³ /2)/(T+194.44)	1004	-	-	F D Molina-Aiz 2004
Couvertur e en Verre	840	0.76	2700	$r_c=0.1$ $\alpha_c=0.15$ $\tau_c=0.75$	$\epsilon_{ct}=0.93$ $r_{ct}=0.1$ $\alpha_{ct}=0.9$ $\tau_{ct}=0.0$	Abaques du fabricant ENAVA Algérie

Tableau 3.9 : Caractéristiques thermiques et spectrales des composants de la serre, * grandeur mesurée

La figure 3.6 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 (T_{ai} et H_{ai}) 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 (T_g), et à une profondeur de 40 cm dans le sol est mesurée la température du sous sol (T_{g1}). Sur la face intérieure de la couverture

(vitrage) à une hauteur de 2 m du sol est mesurée la température de la face intérieure de la couverture (T_{ci}). Sur la face extérieure de la couverture à la même hauteur (2m) est mesurée la température de la couverture extérieure (T_{ce}). La température et l'humidité de l'air extérieur (T_{ce} et H_{ce}) sont mesurées à 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 (T_{ge}) 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 (OAKTON Logger Plus, Wireless transmitting system), ce dernier est composé de sept capteurs (thermo hygromètre), de sept émetteurs et d'une boîte d'acquisition (OAKTON), cette dernière est liée directement au PC à l'aide d'un câble USB. La lecture, le stockage et le traitement des données sont réalisés sur PC à l'aide du logiciel de traitement (OAKTON Log). 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 3.6. 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 3.8 résume les valeurs moyennes de ces conditions durant les trois périodes d'expérimentation.

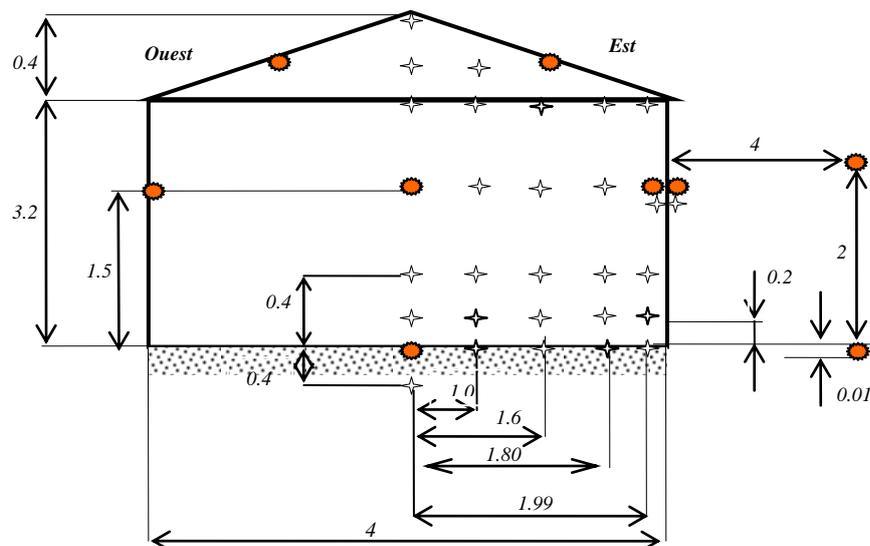


Fig. 3.6 : Schéma de la serre et des points de mesure ; Toutes les distances sont en mètre linéaire.

- Capteur de température et d'humidité,
- ✦ Thermocouples et Thermomètres.

- *Cinquième Expérimentation*

Cette cinquième et dernière expérimentation a été réalisée dans une serre non chauffée et fermée identique à celle utilisée pour les trois expérimentations précédentes (i.e. une serre en verre de type Venlo, fermée, de 32 m² de surface).

Les données ont été enregistrées durant trois périodes de la saison d'hiver, en phase nocturne (de 18 h jusqu'à 6h du matin, temps local).

La température de l'air intérieur a été mesurée à l'aide d'un enregistreur de données (enregistreur d'OAKTON) positionné à 1.5m au-dessus du sol nu, au milieu de la serre. La sonde du capteur mesure la température et l'humidité avec un temps de réponse rapide sur un éventail de l'ordre de (de -50° à 100°C avec une résolution de 1°C, et une précision de $\pm 2\%$, humidité de 0 à 100% avec une résolution de 0,5%, et une précision de $\pm 3\%$ jusqu'à 90% Hr). La sonde est protégée par un abri (boitier) naturellement aéré.

Les températures des surfaces de la couverture de la serre ont été mesurées en 8 positions, à l'aide des thermocouples minces de type K, ces derniers sont distribués sur les parois latérales et le toit de la serre. Les thermocouples ont été fixés sur la couverture de la serre avec un ruban adhésif transparent. La température de la surface du sol de la serre été mesurée par 4 thermocouples distribués le long de la surface et placés à une profondeur de 1 cm au dessous de la surface (i.e. éviter le contact de la tête du thermocouple avec l'air intérieur). Simultanément, les données climatiques extérieures ont été mesurées avec quatre sondes installées au-dessus de la surface du toit de la serre à une hauteur de 1m. La vitesse et la direction de vent ont été mesurées par deux anémomètres, une girouette (model 100075, précision $\pm 0.1\text{ms}^{-1}$, Climatronic Corporation) et une palette de vent (model 100076, précision $\pm 2^\circ$, Climatronic Corporation). La température et l'humidité de l'air extérieur ont été mesurées en utilisant une sonde en platine (modèle MP601A, précision $\pm 0,2\%$, Rotronic instruments) placée dans un abri naturellement aérés. Les mesures de ces conditions climatiques ont été enregistrées par un système d'acquisition de données utilisant par une boîte d'acquisition du type (Campbell, CR3000 USA made) appartenant au laboratoire de physique énergétique appliqué (LPEA), les prélèvements des mesures ont été effectués chaque 2 seconds,

puis ramenées à une moyenne sur un intervalle de temps de 30min. Une vue schématique du dispositif expérimental est montrée sur la figure 3.8.

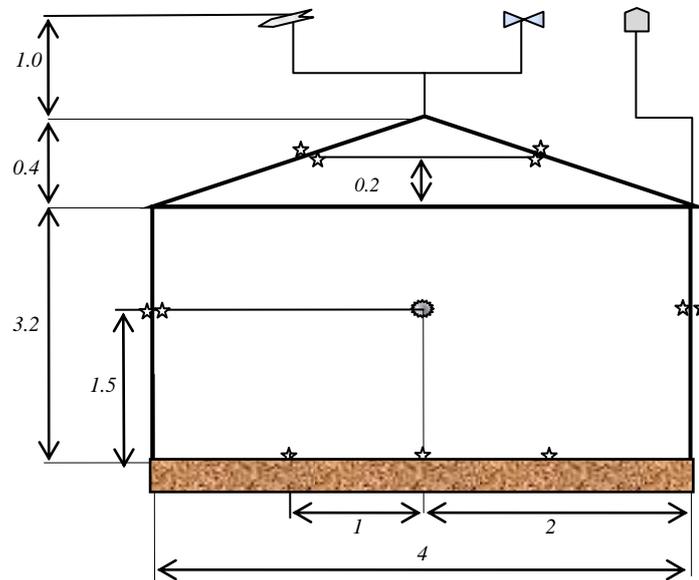


Fig. 3.8: Schéma de la serre expérimentée (Toutes les distances sont en mètre linéaire)

- Sonde de mesure de la température et d'humidité. ⊞ Sonde en Platine (T° et Hr%).
- Σ Capteur de la direction du vent X Capteur de la vitesse du vent, girouette.
- ☆ Thermocouple.



a



b



c



d



e



f



g



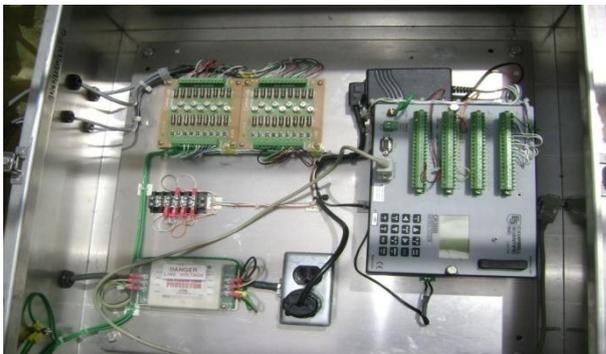
h



i



j



k



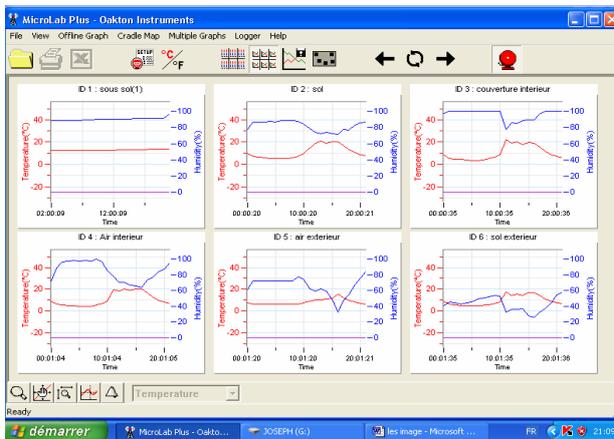
l



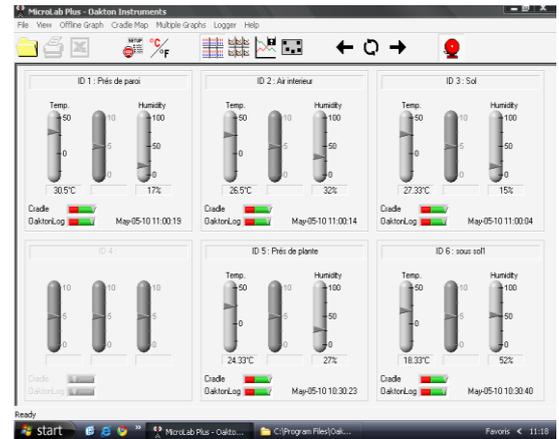
m



n



o



p

Fig. 3.9 : Photos prises durant les expérimentations : Serre expérimentée (Serre en verre de type Venlo), Appareillage de mesure utilisé, et positionnement des sondes ; Le tableau ci-dessous représente la nomenclature de l'ensemble des illustrations

Réf	Désignation	Réf	Désignation
(a)	Préparation du sol de la serre	(i)	Installation du capteur du rayonnement visible (PAR) près du plant de tomate
(b)	Photo de la serre (Serre en verre, Venlo)	(j)	Installation des plants dans des pots
(c)	Installation des capteurs (Capteur OAKTON, thermocouple, thermomètre) à l'intérieur de la serre	(k)	Centrale d'acquisition Campbell CR3000
(d)	Installation des capteurs dans le sous sol et surface de la serre	(l)	Collage de thermocouple sur la surface de la couverture
(e)	Installation des capteurs sur la surface du sol de la serre	(m)	Collecteur de données (Cradle, OAKTON)
(f)	Installation des capteurs dans le sous sol de la serre	(n)	Multimètre, et Thermocouple type K
(g)	Installation des capteurs de la vitesse et la direction du vent sur le toit de la serre	(o)	Illustrations des courbes de variation de (T° et Hr%) par le logiciel Oakton Log
(h)	Installation des capteurs sur le toit de la serre pour mesurer : l'éclairement solaire (Pyranometer), la température et l'humidité de l'air extérieur (sonde en platine)	(p)	Représentation des variations de (T° et Hr%) par le logiciel Oakton Log

3.2 Approches Physiques et Modélisation

3.2.1 Description du modèle semi empirique du bilan énergétique globale d'une serre agricole sans couvert végétale

La figure 3.10. Schématise l'ensemble des flux thermiques échangés entre les éléments de la serre et son entourage pris en compte dans notre modèle. À partir de cette figure on peut écrire les différents bilans d'énergie sur chaque composant du système.

Le modèle est constitué de trois composantes essentielles : La couverture en verre (c) a simple parois, l'air intérieur (ai) et le sol abrité (s). Chacun de ces éléments est caractérisé par sa variable d'état : la température T supposée uniforme le long de sa surface. Seul composant à grande capacité thermique le sol de la serre, joue un rôle important dans le bilan énergétique global de la serre non chauffée, pour mieux appréhender ce rôle dans le calcul du bilan énergétique, nous avons opter à l'introduction du paramètre inertielle (q_s) dans l'équation (3.6), ce dernier représente l'énergie stockée par le sol de la serre qui est égale en valeur absolue à l'énergie restituée pendant la nuit .

L'air intérieur (ai) est caractérisé en plus par son humidité absolue (E_{ai}), à cet effet, deux bilans sont formulés, puisque l'air intérieur est défini par ces deux variables d'état : sa température (T_{ai}) et son humidité (E_{ai}), l'équation (3.4) tienne compte du terme d'inertie (q_{ai}) lié à la capacité calorifique de l'air , et l'équation (3.5) fait intervenir le terme (qE) représentant le terme d'inertie lié à la variation de la masse de vapeur d'eau.

- **Bilan sur la couverture**

$$-Q_{cae}^C + Q_{aic}^C + Q_{aic}^L + Q_c^S + Q_c^I = 0 \quad (3.3)$$

Avec Q_{cae}^C est la puissance du flux de chaleur convectif échangée entre la face extérieure de la couverture et l'air extérieur, Q_{aic}^C est la puissance du flux de chaleur convective entre l'air intérieur et la face intérieure de la couverture, Q_{aic}^L est la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau sur la paroi intérieure de la couverture, Q_c^S est le bilan solaire net de la couverture et Q_c^I est le bilan infrarouge net de la couverture.

- **Bilan sur l'air intérieur**

$$-Q_{aic}^C + Q_{sai}^C - Q_{aiae}^C = q_{ai} \quad (3.4)$$

$$Q_{sai}^L - Q_{aic}^L - Q_{aiae}^L = qE \quad (3.5)$$

Avec Q_{sai}^C est la chaleur sensible échangée entre la surface du sol abrité et l'air intérieur de la serre et Q_{aiae}^C est la chaleur sensible échangée entre l'air intérieur et l'air extérieur de la serre par ventilation ou par fuite d'air à travers la structure de la serre. La chaleur latente de vaporisation de la surface du sol est donnée par Q_{sai}^L et la chaleur latente de la vapeur échangée entre l'intérieur et l'extérieur est donnée par Q_{aiae}^L .

Bilan sur le sol de la serre

$$Q_s^S + Q_s^I - Q_{sai}^C - Q_{sai}^L - Q_s^D = q\zeta \quad (3.6)$$

Avec Q_s^S est la puissance du flux solaire net absorbé par la surface du sol et Q_s^I est la puissance du bilan infrarouge net de la surface du sol de la serre. La puissance du flux de chaleur de conduction à travers la couche du sol (d'épaisseur $e=40\text{cm}$) est donnée par Q_s^D . Les expressions des différentes puissances de flux de chaleurs citées ci-dessus (i.e. les relations numérotées de (3.3) jusqu'à (3.6)) sont détaillées dans l'Annexe A.

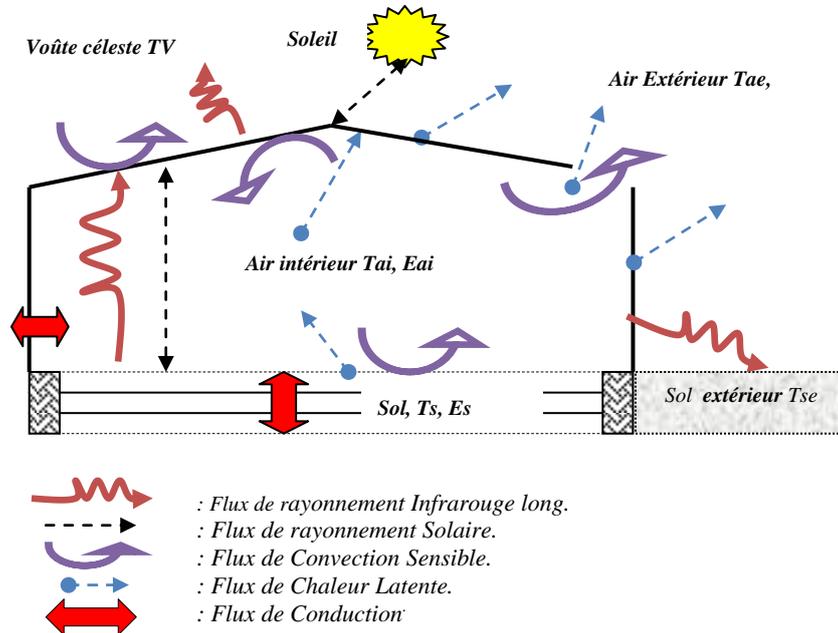


Fig. 3.10: Schéma des flux échangés entre les composants de la serre et son environnement.

Le coefficient d'échange convectif h_e à l'extérieur de la serre est uniquement lié à la vitesse du vent U_e , ce dernier est déduit de l'expression (3.7) évoquée par Baille 1980.

$$h_e = 7.5 + 3.88U_e \quad \text{si } U_e \leq 7.72 \text{ (m/s)} \approx 30 \text{ km/h} \quad (3.7)$$

L'étanchéité de la serre a également été prise en compte avec un taux de renouvellement d'air par fuite moyen fixée à $(0,5+0,25.U_e)$, d'après Bailly (1981).

Le coefficient d'échange convectif h_i à l'intérieur de la serre est liée à la vitesse moyenne de déplacement de l'air intérieur U_i , de la température de la surface du sol abrité T_s et de la température de l'air intérieur T_{ai} , il est déterminé à partir de la relation (3.8) comme suit :

$$h_i = 1.52(T_s - T_{ai})^{1/3} + 3.U_i^{1/2} \quad (3.8)$$

Le cas de l'évaporation du sol est traité comme celui des plantes, c'est-à-dire le coefficient de résistance à la diffusion r_s est pris constant, d'après Boulard et.al 2000, il est égal à 120s/m. Le coefficient de transfert hydrique k se déduit du coefficient d'échange convective intérieur h_i par les deux relations de Lewis, soit dans le cas d'une condensation par la relation (3.9), soit dans le cas d'une évaporation par la relation (3.10).

$$k = h_i / Cm \quad (3.9)$$

$$k = (h_i / Cm) \frac{1}{\left[1 + \frac{r_s.h_i}{\rho.Cm} \right]} \quad (3.10)$$

Où Cm et ρ sont respectivement la chaleur massique de l'eau et la masse volumique de l'air. Les bilans infrarouges nets de la couverture et du sol Q_C^I et Q_S^I sont exprimés par les relations (3.11) d'après Singh et.al 2004 et (3.12) d'après Kittas, 1986.

$$Q_C^I = -\varepsilon_c S_c \sigma T_c^4 + \varepsilon_{sky} S_c \sigma T_{sky}^4 \alpha_{ct} + \varepsilon_s S_s \sigma T_s^4 \alpha_{ct} - \varepsilon_c S_c \sigma T_c^4 (1 - f_{cc} \alpha_{ct}) \quad (3.11)$$

$$Q_S^I = -\varepsilon_s S_s \sigma T_s^4 + \varepsilon_c S_c \sigma T_c^4 f_{cs} \alpha_{st} \quad (3.12)$$

Ou ε_c , ε_{sky} et ε_s sont les émissivités: de la couverture de la serre, du ciel, et du sol abrité; et T_c , T_{sky} et T_s , sont leurs températures respectives. S_c , et S_s sont les surfaces de la couverture et du sol de la serre. α_{st} et α_{ct} sont respectivement les coefficients d'absorption du rayonnement thermique du sol et de la couverture de la serre. La constante de Stefan Boltzmann est symbolisée par $\sigma = 5,57.10^{-8}$ (W/m²K⁴). La température du ciel T_{sky} est calculée à partir, de relation (3.13) (la loi de Swinbank), évoquée par Bot (1983).

$$T_{sky} = (T_{ae} - 6) \frac{Nub}{8} + 0.055T_{ae}^{1.5} \left(1 - \frac{Nub}{8} \right) \quad (3.13)$$

Avec T_{ae} est la température de l'air extérieur à la serre et N est la nébulosité du ciel. Les paramètres f_{cc} et f_{cs} symbolisent respectivement les facteurs de formes entre (couverture-couverture) et (couverture-sol).

Le bilan thermique global de la serre durant les 24 heures se formule algébriquement à partir des équations (3.3), (3.4), (3.5) et (3.6) comme suit:

$$Q_{tot}^S + Q_{tot}^I = Q_{cae} + Q_{fuite} = Q_{bilan} \quad (3.14)$$

La quantité Q_{bilan} (i.e. l'équation 3.14) représente le bilan global journalier de la serre, c'est une approximation des besoins thermiques de la serre, cette quantité permet d'assurer une plage des températures que l'on fixe en fonction des contraintes agronomiques de la culture, elle peut être considéré aussi comme une approximation des besoins thermiques de la serre. Q_{tot}^S Représente le flux de rayonnement solaire global capté par les éléments de la serre, Q_{tot}^I correspond au bilan net des rayonnements infrarouges de grandes longueurs d'onde absorbés par la serre, en pratique il est toujours négatif et représente en valeur absolue les pertes radiatives de la serre. Q_{cae} représente le bilan des pertes convectives de la serre, et Q_{fuite} le bilan des pertes sensibles dû à la ventilation ou aux fuites à travers la structure de la serre.

3.2.2 Approche de l'établissement d'un modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre avec un plant de tomate

A l'intérieur d'une serre, les absorptions d'énergie égalisent la somme des déperditions et de l'inertie thermique passagère de la serre. Habituellement, le microclimat de la serre est représenté par le climat du milieu de l'enceinte, et cinq paramètres affectent principalement la température de l'air intérieure de la serre : le gain de la chaleur, les pertes par ventilation (sensibles et latentes), l'évapotranspiration des plantes, l'évaporation du sol, et le coefficient de perte de chaleur à travers la couverture de la serre. L'équation du bilan énergétique global de la serre qui combine ces mécanismes (A l'état d'équilibre) peut être écrite comme suite (Boulard et al 1998):

$$Q^{sol} = Q^{cov} + Q^{vent} + Q^{evp} + Q^{sto} \quad (3.15)$$

Avec Q^{sol} ($W m^{-2}$) est le rayonnement solaire qui s'introduit à l'intérieur de la serre, Q^{cov} ($W m^{-2}$) est le bilan des pertes de chaleur près de la paroi de la serre (englobant transfert convectif et radiatif); Q^{vent} ($W m^{-2}$) sont les pertes par infiltration et ventilation (i.e. échange de chaleur sensible et latente par ventilation). Q^{sto} (Wm^{-2}) est la quantité de chaleur stockée dans la serre. Cette dernière est négligeable devant les autres quantités de chaleur en phase diurne. Q^{cov} et Q^{vent} peuvent être écrites comme suit:

$$Q^{cov} = \frac{S_c h}{S_g} (T_{ai} - T_{ae}) \quad (3.16)$$

$$Q^{vent} = \frac{\rho C_p G}{S_g} (T_{ai} - T_{ae}) \quad (3.17)$$

Avec h , le coefficient d'échange thermique global ($W m^2 K^{-1}$), S_c , surface de la couverture, S_g , surface du sol abrité par la serre (m^2), T_{ai} la température de l'air intérieur de la serre, et T_{ae} , la température de l'air environnant (K). ρ est la densité de l'air ($Kg m^{-3}$), C_p , la chaleur spécifique de l'air ($J kg^{-1}$), et G , le taux de ventilation ($m^3 s^{-1}$). Les autres composants du bilan énergétique peuvent être exprimés comme suit:

$$Q^{sol} = \tau R \quad (3.18)$$

$$Q^{evp} = \varepsilon R^{net} \quad (3.19)$$

Avec R est le flux de rayonnement solaire global en dehors de la serre (W m^{-2}), et τ est le coefficient de transmission de la couverture de la serre au rayonnement solaire. Q^{evp} est la partie de la chaleur utilisée dans la transpiration de la plante (W m^{-2}), cette chaleur est une partie du rayonnement net entrant dans la serre R^{net} ; ε est le rapport du flux de la chaleur latente et du rayonnement net, ce coefficient est un " coefficient d'évaporation ", qui correspond à la fraction du rayonnement totale utilisée dans le phénomène de l'évapotranspiration. On considère souvent que la gamme de variation de ce coefficient est entre zéro et un. Les valeurs proche de zéro sont recommandées pour les plantes entourées par un sol sec sous un climat humide, alors que les valeurs plus proche de un sont recommandées pour les végétations dans une région aride. Aucun autre détail n'est donné pour le choix approprié de ε et les exemples standards emploient souvent $\varepsilon = 0,5$ (Stanghellini, 1993). Si on considère que R^{net} est très proche du rayonnement entrant dans la serre, et négliger l'inertie thermique de la serre, on combinant les équations précédentes (i.e. : les équations de 3.16 à 3.19) avec l'équation. (3.15), on pourra avoir ce qui suit:

$$\tau R(1 - \varepsilon) - S_{cg} h(T_{ai} - T_{ae}) - \rho C_p G_g (T_{ai} - T_{ae}) = 0 \quad (3.20)$$

S_{cg} représente le rapport entre la surface de la couverture S_c et la surface du sol S_g , et G_g représente le taux de ventilation de la serre ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) par unité de surface couverte par la serre (G/S_g). D'une façon générale, pour une serre avec une simple paroi, le coefficient d'échange thermique de la couverture h est sensiblement affecté par la vitesse du vent (Bot, 1983), et peut être exprimé comme suit:

$$h = a + bU_e \quad (3.21)$$

Où a et b sont des constantes et U_e la vitesse du vent extérieur (m s^{-1}). Combinant l'équation (3.20) et (3.21), la température de l'air intérieur de la serre peut être déduite comme suit :

$$T_{ai} = T_{ae} + \frac{\tau R(1 - \varepsilon)}{aS_{cg} + bS_{cg}U_e + \rho C_p G_g} \quad (3.22)$$

Quand la serre est ouverte (naturellement aérée), l'échange d'air est principalement dû à la ventilation naturelle et aux fuites à travers la structure de la serre. Pour des vitesses de vent supérieures à (1-1.5) m s⁻¹, l'effet des forces de flottabilité sont négligeables devant l'effet des force du vent, et le taux de ventilation de la serre est seulement une fonction de la vitesse du vent. Le calcul de l'échange d'air dû à la ventilation peut être exprimé par l'équation (3.23) selon Jolliet et al. (1991).

$$G_g = \frac{WU_e + v_0}{S_g} \quad (3.23)$$

$$W = 0.5S_l C_d C_w^{0.5} \quad (3.24)$$

où W est une constante qui dépend des paramètres suivants: S_l Surface totale des ouvertures des fuites (m²), C_d est le coefficient de perte de charge des ouvertures et, C_w est le coefficient global d'effet du vent sur la structure de la serre. Le paramètre v_0 dans l'équation (3.23) représente la partie du taux de ventilation qui n'est pas induit a partir des forces du vent. La substitution de G_g dans l'équation (3.23) par l'expression donnée par l'équation (3.24) donne:

$$(T_{ai} - T_{ae}) = \frac{\tau R \alpha}{\beta U_e + \gamma} \quad (3.25)$$

$$\text{Avec} \quad \alpha = (1 - \varepsilon) \quad (3.26)$$

$$\beta = (S_{cg} b + \rho C_p \frac{W}{S_g}) \quad (3.27)$$

$$\gamma = (aS_{cg} + \rho C_p \frac{v_0}{S_g}) \quad (3.28)$$

L'équation (3.25) représente une version simplifiée du bilan énergétique de la serre, qui peut être employé pour estimer la température de l'air intérieur (T_{ai}) des serres avec un couvert de plant de tomate dans les conditions climatiques semblables à celles du climat semi aride. L'Equation (3.25) doit être calibré pour identifier les constantes α , β et γ .

3.3.3 Description du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région semi aride

- *Bilan énergétique de la serre*

Pour le cas de cette étude, le bilan énergétique de la serre est réalisé pour les trois composants de la serre: La couverture en verre (c) simple parois, l'air intérieur (ai) et le sol abrité (g). Chacun de ces éléments est caractérisé par sa variable d'état: la température T supposée uniforme le long de sa surface. L'air intérieur (ai) est caractérisé en plus par son humidité absolue χ_{ai} supposée uniforme pour tout le volume de la serre. Le calcul du bilan énergétique est réalisé durant trois périodes nocturnes de journées types. L'analyse du bilan énergétique est réalisée seulement durant la période d'équilibre des paramètres du microclimat de la serre, quand les valeurs des flux de chaleur et des variables d'états sont relativement stationnaires. Pour un pas de temps d'une heure la variation des flux de chaleur radiatif et de conduction est inférieur $\pm 2.02 \text{ W/m}^2$, et les variations des températures des composants de la serre sont inférieur à $\pm 0.42^\circ\text{C}$, sous ces conditions qu'on peut considérer stationnaire, le bilan énergétique de chaque composant a été calculé.

Sur la figure (3.11) est schématisé l'ensemble des flux thermiques échangés entre les éléments de la serre et le milieu extérieur, cette figure nous a permis d'écrire les différents bilans d'énergie pour chaque composant:

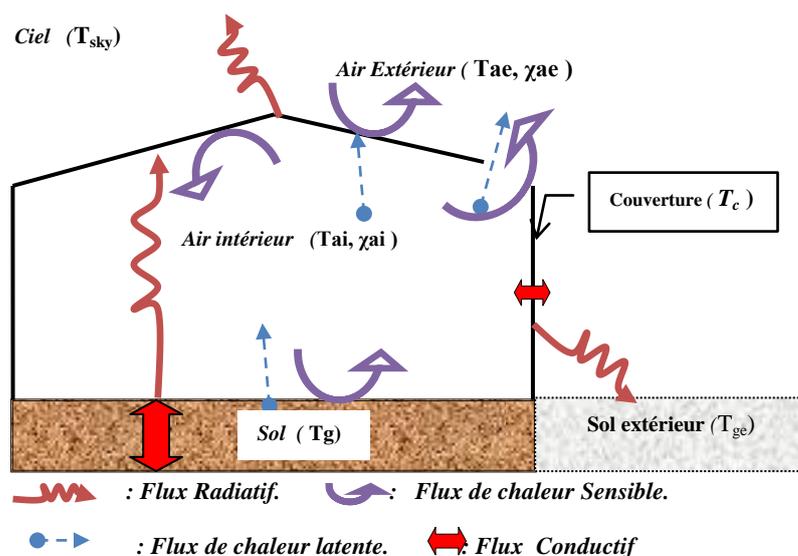


Figure 3.11: Représentation des flux de chaleur échangés entre les composantes de la serre et son milieu extérieur

- **Bilan énergétique de la surface du sol abrité**

L'ensemble des flux de chaleur sont exprimés par rapport à la surface du sol de la serre S_g en (W/m^2). Par convention la direction de chaque terme des équations décrites ci-dessous est négative en partant de la surface du composant et elle est positive en partant vers la surface du composant. Le bilan énergétique sur la surface du sol de la serre en régime permanent est décrit par l'équation (3.29).

$$Q_g^{inf} + Q_{gai}^{cov} + Q_{gai}^{lat} + Q_g^{cod} = 0 \quad (3.29)$$

Avec: Q_g^{inf} est le bilan radiatif net du flux thermique sur la surface du sol de la serre, il est calculé à partir des mesures horaires des températures des composants de la serre, des caractéristiques thermo physique citées dans le tableau 3.9 et par la relation (B12) évoquée en Annexe. Q_{gai}^{lat} , est le flux de la chaleur latente de l'évaporation de la surface du sol capté par l'air intérieur, ce dernier est déterminé à partir du bilan de la chaleur latente sur l'air intérieur par la relation (3.32). Le flux de conduction entre deux couches du sol Q_g^{cod} est calculé à partir de la relation (B1) en annexe. Le flux de chaleur convectif échangé entre le sol abrité et l'air intérieur Q_{gai}^{cov} est déterminé directement à partir d'un calcul résiduel de l'équation (3.29) et le coefficient d'échange de chaleur par convection entre le sol de la serre et l'air intérieur h_{gi} est calculé à partir de la relation (3.30).

$$h_{gai} = \frac{Q_{gai}^{cov}}{(T_{ai} - T_g)} \quad (3.30)$$

- **Bilan énergétique de l'air intérieur**

Pour le bilan énergétique de l'air intérieur, seul les échanges convectifs et latents sont considérés, si on suppose que les rayonnements infrarouges ne sont pas absorbés par l'air, à partir de cette hypothèse deux bilans interdépendants sont formulés. L'équation (3.31) englobe: Q_{aici}^{cov} le flux de chaleur convectif échangé entre l'air intérieur et la paroi intérieure de la couverture, et le flux de chaleur sensible dû aux fuites d'air à travers les éléments de la structure de la serre Q_{aiae}^{cov} . L'équation (3.32) fait intervenir les pertes

d'enthalpies par fuites Q_{aiae}^{lat} , et le flux de la chaleur latente de condensations sur la paroi intérieure de la couverture Q_{aici}^{lat} .

$$Q_{aic}^{cov} + Q_{gai}^{cov} + Q_{aiae}^{cov} = 0 \quad (3.31)$$

$$Q_{gai}^{lat} + Q_{aiae}^{lat} + Q_{aici}^{lat} = 0 \quad (3.32)$$

Les flux de chaleur sensible Q_{aiae}^{cov} et latente Q_{aiae}^{lat} dues aux fuites, sont calculés à partir des températures et des humidités relatives mesurées sur l'air (intérieur et extérieur) et le taux de renouvellement d'air \mathfrak{R} , à partir des relations (3.33) et (3.34) évoquées par Tantau (2006).

$$Q_{aiae}^{cov} = \frac{\rho_a \mathfrak{R} V C_a}{3600 S_g} [T_{ai} - T_{ae}] \quad (3.33)$$

$$Q_{aiae}^{lat} = \frac{\rho_a \mathfrak{R} V L_v}{3600 S_g} [\chi_{ai} - \chi_{ae}] \quad (3.34)$$

$$Q_{aic}^{lat} = \varphi_{vap} L_v \quad (3.34)$$

Le taux de renouvellement \mathfrak{R} est déterminé à partir de la vitesse du vent U_e et le gradient de température ($\Delta T_{aiae} = T_{ai} - T_{ae}$) par la relation (B3) dans l'annexe. Le flux de la chaleur latente de condensation sur la paroi intérieure de la couverture Q_{aici}^{lat} est calculé à partir du flux de vapeur d'eau de condensation φ_{vap} par la relation (3.34), ces deux flux sont calculés par les relations (B4) et (B5) évoquées en annexe. La quantité de chaleur sensible Q_{aici}^{cov} échangée entre l'air intérieur de la serre et la paroi intérieure de la couverture est déduite à partir d'un calcul résiduel sur la relation (3.31), et le coefficient d'échange de chaleur par convection entre l'air intérieur et la couverture h_{aici} est déterminé à partir de la relation (3.35):

$$h_{aici} = \frac{S_g Q_{aici}^{cov}}{S_c (T_{ai} - T_{ci})} \quad (3.35)$$

• **Bilan énergétique de la couverture**

L'absence de condensation sur la paroi extérieure durant les trois périodes d'expérimentation, fait négliger ce phénomène dans le calcul du bilan énergétique de la face extérieure de la couverture par la relation (3.37). Ainsi le bilan thermique sur les deux faces de la couverture, en régime permanent, sera gouverné par les équations (9) et (10) respectivement:

$$Q_{aici}^{cov} + Q_{aici}^{lat} + Q_c^{cod} + Q_{ci}^{inf} = 0 \tag{3.36}$$

$$Q_{ceae}^{cov} + Q_c^{cod} + Q_{ce}^{inf} = 0 \tag{3.37}$$

Ces deux équations englobent comme nouveaux paramètres: Le flux de conduction à travers la couverture Q_c^{cod} , et les deux bilans des flux radiatifs infrarouges sur les deux faces de la couverture Q_{ci}^{inf} et Q_{ce}^{inf} . Ces trois flux de chaleur sont calculés respectivement par les relations (B2) (B12) et (B13) dans l'annexe B, à partir des températures mesurées, des caractéristiques thermo physiques des composants, et des caractéristiques géométriques de la serre citées dans le tableau 3.10. Le flux de convection échangé entre la face extérieure de la couverture et l'air extérieur Q_{ceae}^{cov} est déterminé directement à partir d'un calcul résiduel de l'équation (3.37), et le coefficient d'échange par convection h_{ceae} entre la face extérieure de la couverture et l'air extérieur est calculé à partir de la relation (3.38).

$$h_{ceae} = \frac{S_g Q_{ceae}^{cov}}{S_c (T_{ce} - T_{ae})} \tag{3.38}$$

Nom de la constante	Symbole	Valeur	
Longueur de la serre.	L	8m	mesurée
Largeur de la serre.	l	4m	mesurée
Volume de la serre.	V	92.75m ³	calculé
Surface du sol abrité par la serre.	S_g	32 m ²	calculée
Surface de la couverture de la serre.	S_c	69.25m ²	calculée
Surface totale des fuites dans la serre.	S_f	0.22m ²	calculée
Epaisseur de la couche du sol abrité.	Z_g	0.4m	mesurée
Epaisseur de la couverture de la serre.	z_c	0.04m	mesurée
Facteur de forme entre la paroi intérieure et le sol de la serre.	f_{cig}	0.46	calculé
Facteur de forme entre la couverture et le ciel.	f_{csky}	0.73	calculé
Facteur de forme entre la couverture et le sol extérieur.	f_{cege}	0.27	calculé

Tableau 3.10 : Caractéristiques géométriques des composants de la serre

3.3.4 Description des modèles de coefficient d'échange convectif près de la paroi de la serre, pour une serre sans couvert végétale en période nocturne

1.1 *Transfer de chaleur convective à l'intérieur de la serre*

Le transfert de chaleur convectif est défini selon Holman (1990) par l'expression suivante :

$$Q^{cov} = h(T - T_{\infty}) \quad (3.39)$$

Où h représente le coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$), T est la température de surface, et T_{∞} est la température du fluide loin de la surface (jet libre, en K). Il est à signaler que le coefficient de transfert thermique h n'est pas constant, il est une fonction de plusieurs paramètres décrivant le mécanisme de transfert thermique. h dépend du régime et du mode d'écoulement, il est décrit à partir du nombre de Nusselt Nu selon l'équation (3.40):

$$h = \frac{\lambda Nu}{L} \quad (3.40)$$

Avec λ est la conductivité thermique de l'air ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), et L est la longueur caractéristique de la surface (m). L dépend de la forme de l'objet, elle mesure la longueur de la surface couverte par l'écoulement laminaire. Pour la couverture de la serre, la longueur du toit (longueur des vitres) est généralement utilisée. En convection naturelle, le transfert thermique est souvent le résultat de l'effet des gradients de température, et le nombre de Nusselt peut être exprimé en fonction du nombre de Grashof Gr et du nombre de Prandtl Pr , comme suit:

$$Nu = C_1 (Gr.Pr)^n \quad (3.41)$$

Où C_1 et n sont des constantes qui peuvent être exprimées théoriquement ou expérimentalement. Le coefficient n dépend du régime d'écoulement au-dessus de la surface, alors que le coefficient C_1 ne dépend pas seulement du régime d'écoulement mais également de la condition : si la surface est à une température constante ou elle

est chauffée par un flux constant. Dans le cas de la convection forcée, le nombre de Nusselt Nu est une fonction du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl:

$$Nu = C_2 Pr^m Re^p \tag{3.42}$$

où C_2 , m , p sont des coefficients qui dépendent de la géométrie et du régime d'écoulement. L'expression du nombre de Nusselt pour les écoulements laminaires et turbulents en modes de convection naturelle et forcé le long d'une plaque plane est rapportée dans le tableau 3.1

Mode de Convection	Écoulement Laminaire	Écoulement Turbulent	Surface	Auteurs
Convection Naturelle	$Gr < 105$ $Nu = 0.54(Gr Pr)^{0.25}$	$Gr > 105$ $Nu = 0.14(Gr Pr)^{0.33}$	Plaque plane horizontale froide ou chaude	Monteith & Unsworth (1990)
	$104 < Gr < 109$ $Nu = 0.59(Gr Pr)^{0.25}$	$109 < Gr < 1012$ $Nu = 0.13(Gr Pr)^{0.33}$	Plaque plane verticale froide ou chaude	Monteith & Unsworth (1990)
Convection Forcée	$Re < 2.104$ $Nu = 0.67Re^{0.5}Pr^{0.33}$	$Re > 2.104$ $Nu = 0.036Re^{0.8}Pr^{0.33}$	Plaque plane	Monteith & Unsworth (1990)
	$Nu = 0.60Re^{0.5}$	-	Plaque plate horizontale	Schuepp (1993) cité par Katsoulas (2007)

Table 3.11: Expressions du nombre de Nusselt le long d'une plaque plane, en fonction du nombre de Grashof Gr , du nombre de Prandtl Pr , et du nombre de Reynolds Re , pour une convection naturelle ou forcée, en régime laminaire ou turbulent.

	Modèle	Type et Conditions de la serre	Auteurs
L'intérieur de la Serre	$4.3\Delta T^{0.33}$	Serre Tunnel équipée d'une couverture en PVC	Kittas (1986)
	7.2	Serre Tunnel couverte par un film en polyéthylène	Garzoli (1987)
	$1.86\Delta T^{0.33}$	Serre double largeur couverte par un film en polyéthylène	De Halleux (1989)
	$2.21\Delta T^{0.33}$	Petite serre a double largeur couverte par un film en polyéthylène, angle d'inclinaison égale a 15°	Papadakis (1992)
	$2.97\Delta T^{0.33}$	Serre couverte par filet d'insectes	Miguel (1998)
	$8.0\Delta T^{0.33}$	Serre vide équipée par un sol chauffé et couverte par un film en polyéthylène, angle de la toiture égale à 34°	Lamrani (2001)
L'extérieur de la Serre	$3.49 U_e$	Serre chauffée couverte par un film en polyéthylène	Kanthak(1970)
	$2.8 + 1.2 U_e$	Serre de type Venlo en verre (Verre horticole), angle de la toiture égale à 18° ($U_e \leq 4ms^{-1}$)	Bot (1983)
	$1.32 \Delta T^{0.25} + 3.12U_e^{0.8}$	Serre Tunnel équipée d'une couverture en PVC	Kittas (1986)
	$7.2 + 3.84 U_e$	Serre Tunnel couverte par un film en polyéthylène	Garzoli (1987)
	$5.96 (U_e^{0.8}/L^{0.2})$	Serre a double largeur couverte par un film en polyéthylène	De Halleux (1989)
	$0.95 + 6.76U_e^{0.49}$	Petite serre a double largeur couverte par un film en polyéthylène, angle d'inclinaison égale a 15° ($U_e \leq 6.3ms^{-1}$)	Papadakis (1992)

Table 3.12: Modèles du coefficient de transfert de chaleur par convection h ($W m^{-2} K^{-1}$) entre l'air intérieur et la face intérieure de la couverture de la serre, et entre la face extérieure de la couverture de la serre et l'air environnant (Roy et.al 2002). Avec: T , température (K); ΔT , gradient caractéristique de température (K); U_e , Vitesse du vent (m s-1); L , Longueur caractéristique de la surface solide (m)

1.2 Méthode de détermination des coefficients de transfert thermique par convection près de la paroi de la serre

Un modèle statique mono dimensionnel de transfert thermique a été mis en application. Il calcule les échanges thermiques entre cinq composantes : le sol de la serre (*s*), la couverture de la serre (*c*), l'air intérieur (*ai*), l'air extérieur (*ao*) et le ciel (*sky*). Le modèle a été établi pour des phases nocturnes (nuit), le rayonnement solaire n'est pas considéré. Le coefficient convectif de la couverture de la serre est déterminé en utilisant la méthode de bilan énergétique de la couverture de la serre. Une couverture a simple paroi avec une épaisseur de 0,004 m, il est donc raisonnable de supposer que la capacité de stockage de la chaleur dans la couverture (inertie thermique de la couverture) est négligeable comparée aux autres flux existants. Partant des principes dans lesquels les phénomènes de transfert thermique latents n'apparaissent pas sur les deux faces de la couverture (absence de couvert végétale), et des états d'équilibre, le bilan énergétique des deux surfaces intérieure et extérieure de la couverture de la serre en phase nocturne peut être décrit comme suit:

$$Q_{ci}^R - Q_{ci-co}^{cod} + Q_{ci-ai}^{cov} = 0 \quad (3.43)$$

$$Q_{co}^R + Q_{ci-co}^{cod} - Q_{co-ao}^{cov} = 0 \quad (3.44)$$

Où Q_{ci}^R et Q_{co}^R sont les rayonnements thermiques nets sur les deux faces de la couverture intérieure et extérieure respectivement en ($W m^{-2}$) ; au lieu de les mesurées, ces deux flux de chaleur sont estimés par calcul, en utilisant quelques suppositions (citées précédemment). Ils correspondent au rayonnement infrarouge long comprenant des réflexions multiples (excepté le rayonnement du ciel, ce dernier est considéré comme corps noir). Q_{ci-co}^{cod} est le flux de conduction entre les deux face de la couverture ($W m^{-2}$) ; et Q_{ci-ai}^{cov} and Q_{co-ao}^{cov} sont les flux de chaleur de convection sur la surface intérieure et extérieure de la couverture respectivement ($W m^{-2}$). La figure 3.12 récapitule les flux de la chaleur échangés entre les éléments de la serre et son environnement. Toutes les composantes énergétiques impliquées dans le rayonnement thermique net de la couverture de la serre sont également illustrés sur la même figure.

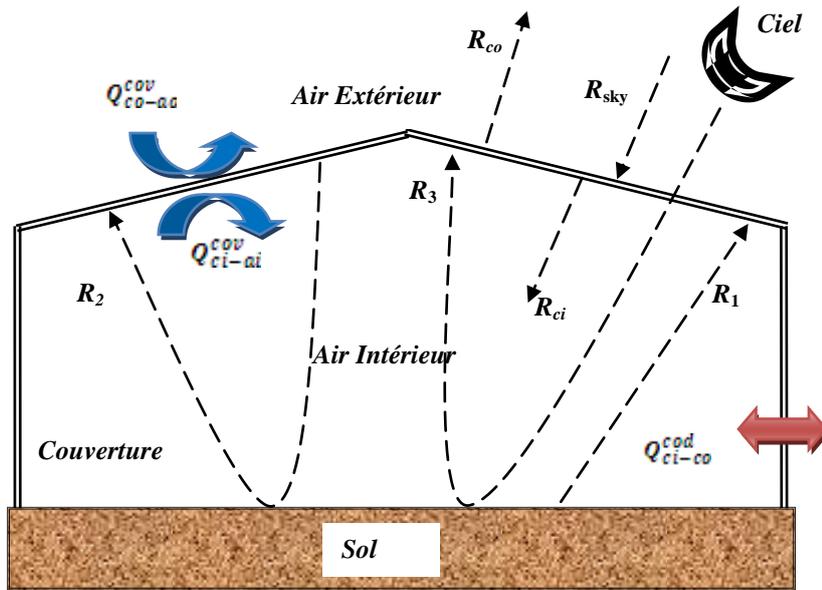


Figure 3.12: Représentation des flux de chaleur échangés près de la couverture de la serre.
 \rightarrow : Flux thermique (infrarouge). \curvearrowright : Flux Convectif. \leftrightarrow : Flux Conductif.

Le bilan radiatif sur la face intérieure de la couverture peut s'écrire de la façon suivante:

$$Q_{ci}^R = R_1 + R_2 + R_3 - R_{ci} \quad (3.45)$$

$$Q_{co}^R = R_{co} - R_{sky} \alpha_{co} \quad (3.46)$$

Les paramètres R_1 R_2 R_3 sont les flux radiatifs absorbés par la couverture après des réflexions multiples du sol, du toit et du ciel respectivement. R_{ci} est le flux radiatif émis par la surface intérieure de la couverture, R_{co} , le flux radiatif émis par la surface externe de la couverture et R_{sky} , le flux radiatif émis par le ciel. α_{co} est le coefficient d'absorption du rayonnement thermique de la face extérieure de la couverture. Les expressions mathématiques de ces flux de chaleur sont exprimés dans l'annexe C.

Les flux convectifs sur les deux parois de la serre sont donnés par les équations suivantes:

$$Q_{ci-ai}^{cov} = h_{ai-ci} (T_{ai} - T_{ci}) \quad (3.47)$$

$$Q_{co-ao}^{cov} = h_{ao-co} (T_{co} - T_{ao}) \quad (3.48)$$

T_{ai} et T_{ao} sont la température de l'air intérieur et extérieur respectivement (K), T_{ci} et T_{co} les températures de la surface intérieure et extérieure de la couverture (K).

h_{ai-ci} et h_{co-ao} sont les coefficients de transfert de chaleur par convection de la face intérieure et extérieure de la couverture ($W m^{-2} K^{-1}$); Il convient de noter que : bien cerner les problèmes (les incertitudes impliquées) de transfert de chaleur par convection entre les différents éléments à l'intérieur de la serre est un point clé pour le bon choix des expressions des coefficients pour la plupart des modèles de serre (Kimball, 1973). En général, le coefficient intérieur h_{ai-ci} est décrit dans la littérature en modes de convection naturelle et turbulente (Roy et al, 2002) il est donné en fonction de la température de la paroi intérieure de la serre et de la température de l'air ambiant de la serre (tableau 3.12).

Durant la nuit, quand les ouvertures d'aération de la serre sont fermées, la vitesse de l'air intérieur dans l'enceinte de la serre est habituellement inférieure à $0,3 m s^{-1}$ (Papadakis et al, 1992). Les critères évoqués par Monteith (1990) rapportés dans le tableau 3.11 ont été utilisés dans la présente étude. Pour une surface plate horizontale chauffée ou non chauffée les critères indiquent que la convection naturelle en régime laminaire aura lieu si $Gr < 10^5$, et une convection naturelle turbulente aura lieu si $Gr > 10^5$. Après avoir appliqué ces critères pour la présente étude, on a constaté que la plupart des valeurs du nombre de Gr étaient inférieures à $1.8 \cdot 10^8$, ceci signifie que le mécanisme de convection naturelle turbulente a lieu entre l'air intérieur et la surface intérieure de la couverture de la serre. Ainsi le coefficient n (La puissance n) dans l'équation (3.41) a été pris égal à 0,33 (écoulement turbulent), et h_{ai-ci} a été rapprochée par l'équation suivante:

$$h_{ai-ci} = a(T_{ai} - T_{ci})^{0.33} \quad (3.49)$$

Où a est une constante qui va être déterminé expérimentalement

Différentes expressions ont été établies pour calculer l'influence de la vitesse du vent sur le coefficient de transfert convectif le long de la surface extérieure de la couverture de la serre (tableau 3.12). Après une analyse des modèles rapportés par Roy et.al 2002 dans ce tableau, on n'a pas trouvé de relation qui peut être employée pour toutes les

conceptions de serre, sous n'importe conditions environnementales. L'échange de chaleur par convection entre la surface extérieure de la couverture et l'air extérieur est généralement considéré comme forcé et turbulent, car il est principalement influencé par la vitesse de vent. La plupart des études supposent que ce coefficient de transfert thermique est une fonction linéaire de la vitesse du vent, de plus ils ajoutent souvent une constante pour tenir compte de l'effet de la température quand la vitesse du vent est faible (Bot, 1983; Baille, 1985; Garzoli, 1987). Mais plusieurs auteurs réclament qu'une partie non négligeable de l'échange de chaleur ne suit pas le mode de convection forcée (Kittas, 1986; Papadakis, 1992). Désormais une détermination plus précise du coefficient convectif sur la couverture extérieure de la serre exige une expression qui tient compte non seulement de l'effet du vent mais également du régime d'écoulement et de l'effet de la différence de température T_{co-ao} (quand la vitesse du vent est faible). Ainsi le coefficient d'échange convectif sur la face extérieure de la couverture h_{co-ao} peut être exprimé comme suit:

$$h_{ao-co} = b + cU_e^d \quad (3.50)$$

Où b , c et d sont des constantes qui vont être déterminées expérimentalement.

Si on considère que les flux conductifs sont des fonctions linéaires des gradients de température ; après une combinaison des équations (3.47), (3.48), (3.49) et (3.50) avec les équations (3.43) et (3.44), les bilans énergétiques des deux parois (intérieure et extérieure) de la couverture de la serre peuvent être décrits comme suit:

$$Q_{ci}^R + a(T_{ai} - T_{ci})^{1.33} - \frac{\lambda_c}{e}(T_{ci} - T_{co}) = 0 \quad (3.51)$$

$$Q_{co}^R + \frac{\lambda}{e}(T_{ci} - T_{co}) - b(T_{ao} - T_{co}) - c(T_{ao} - T_{co})U_e^d = 0 \quad (3.52)$$

Avec λ_c , est la conductivité thermique du verre horticole clair ($=0.76 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), et e , est l'épaisseur de la couverture en verre ($=0.004\text{m}$).

Chapitre 4

Résultats et Discussion

Rappel des objectifs

Il s'agit d'identifier et de déterminer :

- i) La distribution de la température de l'air intérieur de la serre et de l'hétérogénéité climatique de son micro climat durant la saison hivernale dans une région appartenant à un étage bioclimatique semi aride (région de Batna);
- ii) L'acquisition de données (i.e. température, humidité, éclairement solaire, vitesse du vent etc.) nécessaires à la formulation et la vérification d'un modèle semi empirique de bilan énergétique globale de la serre agricole sans couvert végétale ;
- iii) L'établissement d'un modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre avec plant de tomate ;
- iv) Détermination d'une approche expérimentale du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre non chauffée installée dans une région semi aride ;
- v) L'établissement de modèles des coefficients d'échange convectif près de la paroi de la serre, pour une serre sans couvert végétale en période nocturne.

4.1 Distribution de la température de l'air intérieur de la serre durant la saison hivernale dans la région des Aurès

4.1.1 Introduction

Les serres en plastique sont largement utilisées en bassin méditerrané et particulièrement en Algérie, cet intérêt est dû à: leurs structures simples, leurs prix de reviens modeste et leurs aménagements faciles. Malheureusement l'hétérogénéité climatique est très marquée dans ce type d'abri, ce phénomène oblige les agriculteurs à augmenter les opérations de fertilisation et d'irrigation, ceci a été observé sur les plants de laitue au sud de la France. Une distribution homogène de la température dans une

serre est non seulement un facteur essentiel pour l'uniformité de croissance du plant abrité, elle est également un paramètre important pour l'optimisation des déperditions énergétique et des opérations commandées (irrigation, fertilisation, enrichissement en CO₂, et ventilation), dans la plupart des cas, un environnement homogène est désiré. La température extérieure, l'intensité et la direction du vent sont largement responsable de l'hétérogénéité de la distribution de la température à l'intérieur d'une serre. La majorité des travaux réalisés dans le domaine de l'hétérogénéité climatique des serres se sont orientés vers les effets de la ventilation et les équipements (de chauffage, de climatisation, filet d'insectes,...) sur la variation des paramètres de l'air intérieur; tout on marginalisant les effets de la convection naturelle et ceux du vent sur une serre fermé. D'autre part: Jusqu'à nos jours, on n'a pas rencontré de travaux expérimentaux menés sur ce phénomène à l'intérieur d'un abri serre situé dans une zone aride ou semi aride (les hauts plateaux Est d' Algérie). Le premier objectif de cette première expérimentation était la détermination des champs de température de l'air intérieur et ceux du sol, pour une serre fermée durant la période la plus froide et la plus ventée de la région. Le second objectif était de faire apparaître les deux types d'hétérogénéités climatiques (horizontales et verticales) à l'intérieur de la serre sous les effets de la convection naturelle, l'intensité du vent et sa direction.

4.1.2 Interprétation des résultats

La figure 4.0 montre la variation de la température de l'air intérieur et de l'air environnant durant les six mois de l'expérimentation, et les variations des températures moyennes (T1 température du sol à -20 cm, T2 température de l'air intérieur à +20 cm, au dessus du sol, et T3 la température de l'air à +2 m au dessus du sol), sont présentées sur les figures de 4.1 à 4.6.

Les graphes des figures (4.1, 4.2 et 4.3) montrent bien le phénomène de l'hétérogénéité verticale de la distribution de la température à l'intérieur de la serre. A t=7 heure la figure 4.1 illustre d'une manière claire la présence d'un gradient de température élevé entre T1 et T3, ce dernier est dû à l'inertie thermique du sol résultant de son emmagasinement diurne de la chaleur durant la journée précédente. Le

rapprochement des courbes de T1 et T2 pendant la même période est dû à la faible distance séparent les deux plans I et II ($h=40\text{cm}$). A $t=13\text{heure}$, la figure 4.2 montre le rapprochement des températures des trois plans, ce phénomène est causé essentiellement par l'augmentation d'agitation de la masse d'air sous l'effet de l'intensité du rayonnement solaire et du phénomène de la convection naturelle. A $t=17\text{h}$ le gradient verticale de température réapparaît d'une manière sélective entre le plan I et le plan III, la figure 4.3 montre l'écart de température entre T1 et T3 d'un coté et le rapprochement entre T1 et T2 d'un autre coté, ce phénomène est causé par le refroidissement de l'air près du toit de la serre sous l'effet du vent et l'affaiblissement du flux du rayonnement solaire en fin de journée.

Les variations de la température de chaque plan aux différents temps de mesure sont présentées sur les figures de (4.4 à 4.6). La figure 4.4 montre la variation de la température du sol T1 à chaque instant de mesure; On remarque que T1 à $t=17\text{h}$ est la plus élevée a cause de la fin de l'emmagasinement diurne de la chaleur par le sol. Contrairement à la température T1, la température T2 est plus élevée à $t=13\text{h}$ voir figure 4.5, a cause de son rapprochement de la surface supérieur du sol, car l'échauffement de cette dernière débute dès les premières heures d'ensoleillement. La figure 4.6 montre la variation de la température de l'air à une distance de 2m au dessus du sol (T3), on remarque que ces variations à ($t=13$ & $t=17\text{h}$) sont presque semblables à cause de son rapprochement du toit de la serre et son éloignement de la surface du sol ou se déroule l'échauffement périodique de l'air par le phénomène de la convection naturelle.

La variation de la température adimensionnelle réduite $T^*(i,j,t)$ (i.e. équation 3.1) est présentée sur les figures de (I,a) à (III,c) (voir ci-dessous page 94). Les figures (I-a), (I-b) et (I-c) montrent la distribution de la température adimensionnelle à $t=7\text{h}$ pour les trois plans de mesure, les isothermes représentées montrent les phénomènes suivants: les températures sont de plus en plus élevées en se rapprochant du sol et l'hétérogénéité de la distribution de la température au plan III est la plus élevée. A $t=13\text{h}$ l'hétérogénéité s'accroît pour les deux plans II & III, ce phénomène est marqué par les gradients de température qui se développent au voisinage des régions Ouest et Nord Ouest de la serre voir fig.(II-b) et fig.(II-c). Durant cette période sur le tableau 02 on observe une diminution de la température du plan I par rapport au plan II, ce

phénomène est dû à l'échauffement de la surface supérieure du sol et de l'air situé à 20cm au dessus, aux premières heures d'ensoleillement avant les couches du sol situées à 20 cm de profondeur, car avant d'atteindre l'échauffement des couches inférieures par le flux de rayonnement solaire les températures de ces dernières atteints leurs valeurs minimal, ça c'est d'une part, d'autre part la vitesse d'échauffement du plan II l'emporte sur la vitesse d'échauffement du plan I, puisque l'échauffement de ce dernier se fait par conduction et l'échauffement du plan II se fait par convection. A $t=17h$ le phénomène de l'hétérogénéité de la distribution horizontale de la température se généralise pour les trois plans et se concentre à l'Ouest et au Nord Ouest de la serre voir fig.(III-a) ; fig.(III-b) et fig.(III-c), les isothermes tracées sur ces figures montrent des distorsions et des valeurs relativement faibles près de ces zones pour les plans II et III, ce phénomène est dû essentiellement aux effet du vent, puisque ce dernier souffle souvent dans les directions citées ci dessus durant la période hivernale de la région. De ces observations, on peut dire, contrairement a l'hétérogénéité verticale de la distribution de la température dû seulement au phénomène de la convection naturelle qui est régit par l'échauffement du sol et les échanges radiatifs des composantes de la serre avec l'extérieur; l'hétérogénéité horizontale de la distribution de la température est due a l'intensité du vent dans la direction Nord Ouest et Sud Ouest.

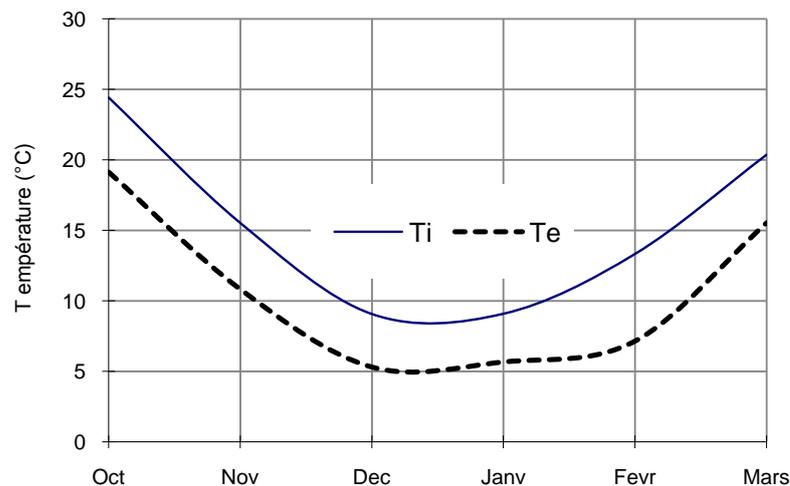


Fig.4.0: Variation de T_i (Température de l'air intérieur), et T_e (Température de l'air extérieur) durant les durées des expérimentations.

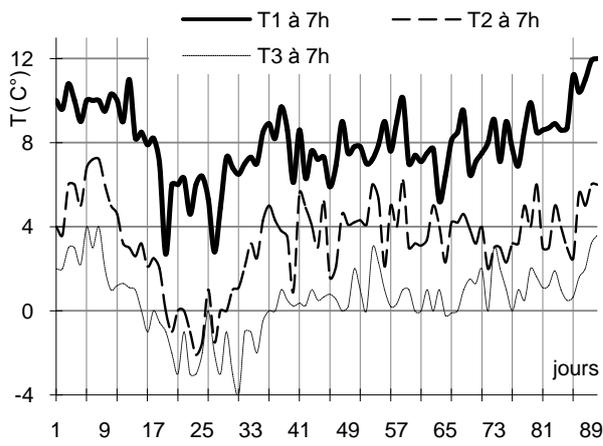


Fig. 4.1: Variation de T1, T2, T3 à t= 07h.

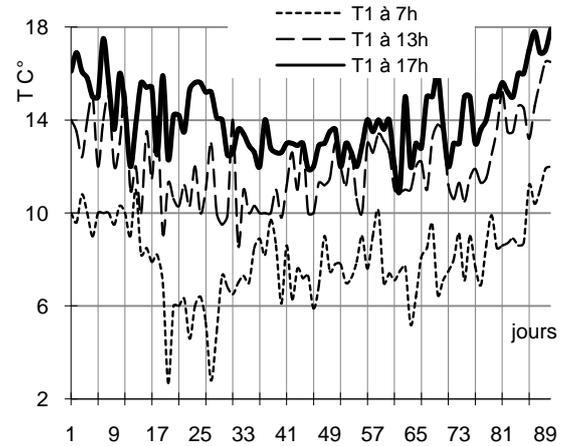


Fig. 4.4: Variation de T1 à t= (07h, 13h, 17h).

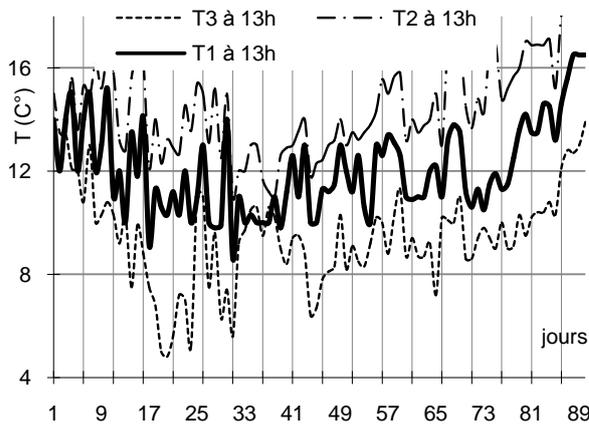


Fig. 4.2: Variation de T1, T2 et T3 à t=13h.

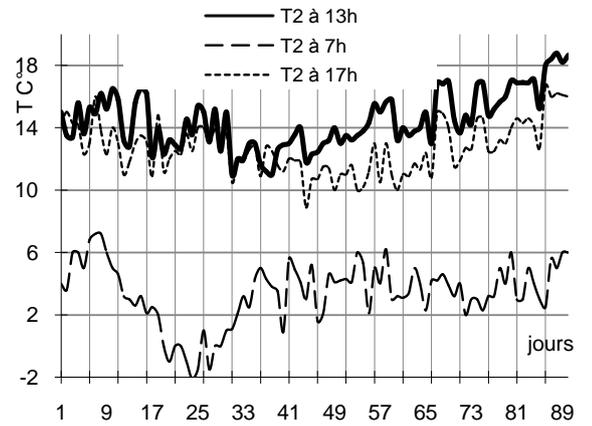


Fig. 4.5: Variation de T2 à t= (07h, 13h, 17h).

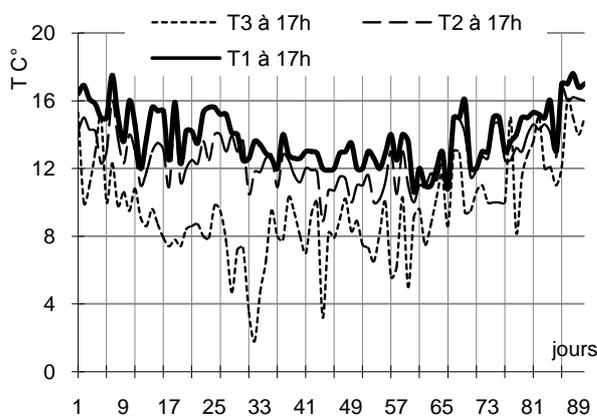


Fig. 4.3: Variation de T1, T2 et T3 à t=17h.

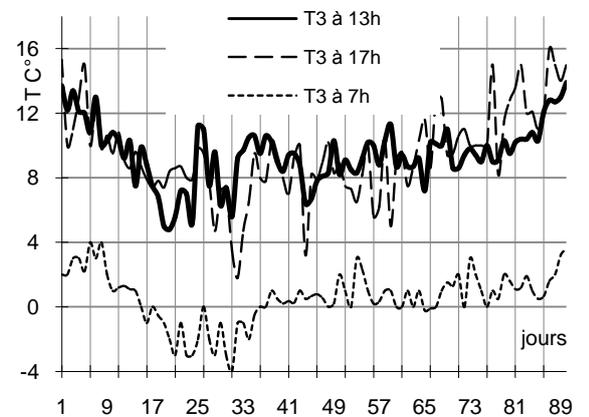
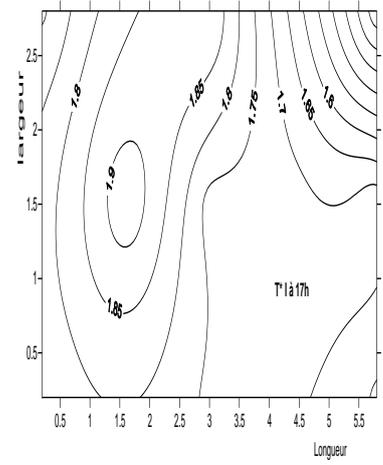
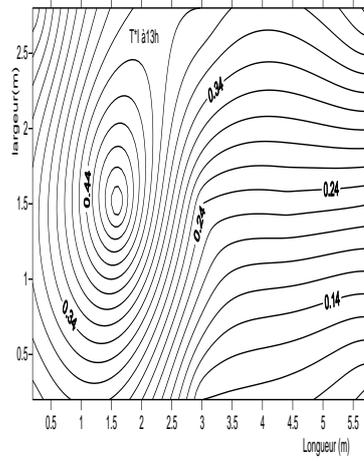
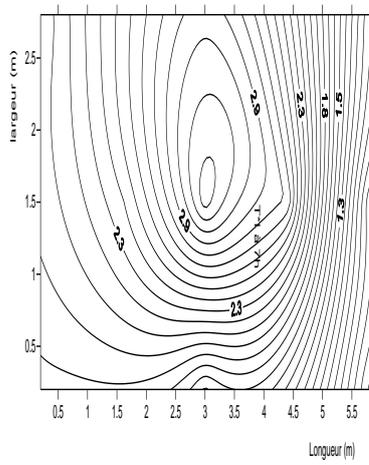


Fig. 4.6: Variation de T3 à t= (07h, 13h, 17h).

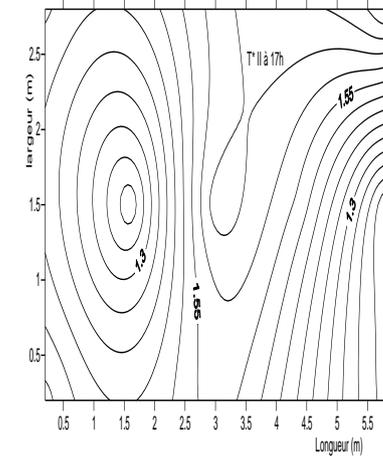
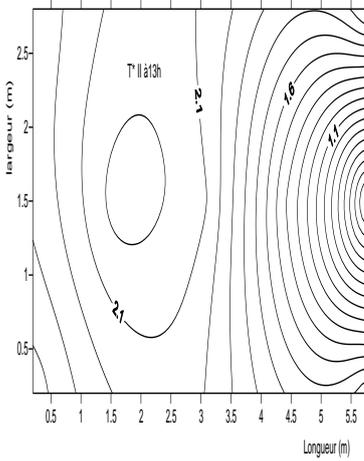
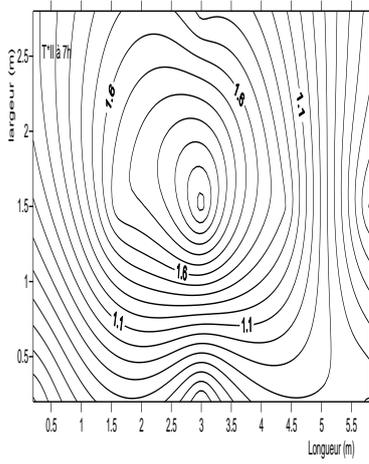
Sud

a h = 20cm



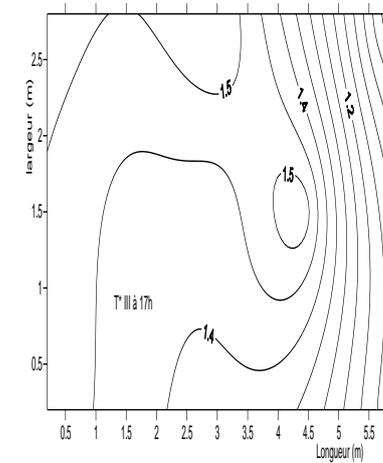
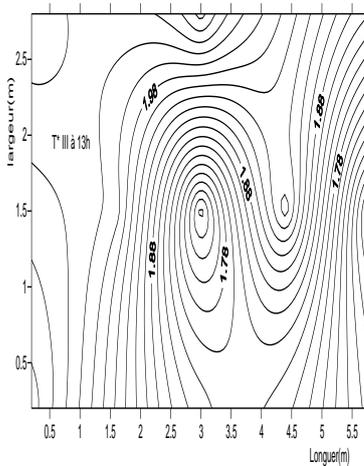
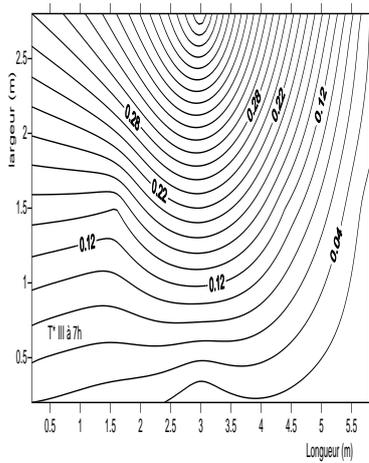
b h=20cm

Est



Ouest

c h=2m



I t=7h

II
t=13h
Nord

III
t=17h

Conclusion

Le phénomène de l'hétérogénéité climatique à l'intérieur des serres pose énormément de problèmes pour le développement du plant abrité ainsi que pour les coûts d'investissement. A fin de pouvoir contribuer à l'étude de ce phénomène, nous avons décidé de réaliser une étude expérimentale basée sur la mesure de la température dans une serre en plastique de production sans couvert végétale, qui nous a permis de déterminer : la variation verticale de la température moyenne de l'air à l'intérieur de la serre et les distributions spatio-temporelles des isothermes adimensionnelles dans les trois plans horizontaux mis à l'étude. Nous avons montré que pour des conditions climatiques semblables à celles de la région des Aurès, l'hétérogénéité climatique de la serre est causée essentiellement par les phénomènes suivants : Le phénomène de la convection naturelle régie par le biais d'un gradient de température entre le sol et le toit de la serre, cause l'hétérogénéité verticale de la température. La direction du vent et l'intensité d'échauffement du sol par le soleil, causent ensemble l'hétérogénéité de la distribution horizontale de la température.

Cette étude pourra contribuer à :

- L'étude de l'hétérogénéité climatique des serres.
- L'optimisation des systèmes de fertilisations et d'irrigations
- L'évaluation des besoins calorifiques d'une serre en plastique durant la période hivernale.
- L'idée de mettre des ouvrants en haut pour la ventilation, au lieu des ouvrants sur la surface latérale de la serre.

4.2 Modèle semi empirique de bilan énergétique global de la serre agricole

4.2.1 Introduction

Récemment la recherche spécialisée fait état d'un grand nombre de travaux de modélisation destinés à appréhender les phénomènes énergétiques qui régissent le climat intérieur des serres agricoles. Quoique la plupart de ces modèles aient produit des évaluations raisonnables, très peu d'entre eux ont été employés dans la pratique pour les prévisions du microclimat de serre sur une longue période continue. Rappelons que notre objectif principal dans cette partie de notre travail est l'analyse du bilan énergétique des serres installées sous climat semi aride par un modèle semi empirique

inspiré des modèles classiques proposés déjà par la littérature. Le modèle utilise à la fois des paramètres facilement mesurables et il est basé sur des équations théoriques qui intègrent l'ensemble des processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur et le sol. Les particularités de notre modèle sont :

- (i) Le modèle fait une analyse globale des différents bilans thermiques échangés avec une analyse des échanges infrarouges de grande longueur d'onde.
- (ii) Le modèle est basé essentiellement sur des données réelles mesurées expérimentalement dans la serre.

4.2.2 Interprétation des résultats

les graphes des figures 4.7, 4.8, et 4.9 montrent les variations : de l'éclairement solaire global sur un plan horizontal E_{gh} , des températures de l'air intérieur T_{ai} , du sol T_s et celles du bilan global de la serre Q_{bilan} pour les trois journées types. On remarque une nette proportionnalité des variations des deux températures par rapport à l'éclairement solaire E_{gh} et par rapport au bilan global Q_{bilan} . Sur les mêmes figures on remarque une faible variation de la température T_s à cause de l'inertie thermique du sol et de la technique d'isolation utilisée. Quant à l'intensité des températures et de l'éclairement E_{gh} sont proportionnelles aux conditions climatiques moyennes enregistrées.

Sur la figure 4.7 : le bilan global Q_{bilan} atteint la valeur maximal de 10300W équivalant à 321.87 (W/m^2) sur la surface du sol de la serre au environ de midi avec une température de l'air intérieur $T_{ai}=40(^{\circ}C)$ et une température extérieur $T_{ae}=25(^{\circ}C)$, ce phénomène est due essentiellement à la durée d'insolation de cette journée (7h 14') et la faible vitesse du vent enregistrée ($U_{e moy}=1.3m/s$).

Sur la figure 4.8: sont représentées les variations des mêmes paramètres, on remarque que le bilan Q_{bilan} pour une journée ventée en présence d'averses (2^{ème} journée type: $U_{e moy}=3.2m/s$ et $E_{ae} =63.23\%$) ce dernier est relativement faible par rapport au bilan de la première journée type, avec un $Q_{bilan max}=7000(W)$ équivalant à 218.75 (W/m^2) sur la surface du sol abrité, et une température de l'air intérieur T_{ai} ne dépassant pas les 26($^{\circ}C$). La durée d'insolation relativement faible ($t=2h14'$), la vitesse de vent $U_{e max}=9(m/s)$ et

la présence d'averses durant toute la journée ont contribué directement à cette baisse relative du bilan global de la serre Q_{bilan} .

La figure 4.9 représente elle aussi les variations des températures T_{ai} , T_s , de l'éclairement E_{gh} et du bilan global Q_{bilan} de la serre pour une journée type couverte (3^{ème} jour type). La durée d'insolation été de 20 minutes seulement; on peut remarquer aisément que le bilan énergétique Q_{bilan} calculé par notre modèle reflète bien l'état de la serre; ce dernier (le bilan de la serre) est le plus faible par rapport aux bilans globaux des deux autres journées avec un $Q_{bilan} max=4644(W)$ équivalent a $145.12 (W/m^2)$ sur la surface du sol de la serre. Les températures T_{ai} et T_s sont aussi faibles durant cette journée ne dépassant pas les $22(^{\circ}C)$ pour T_{ai} et les $16^{\circ}C$ pour T_s .

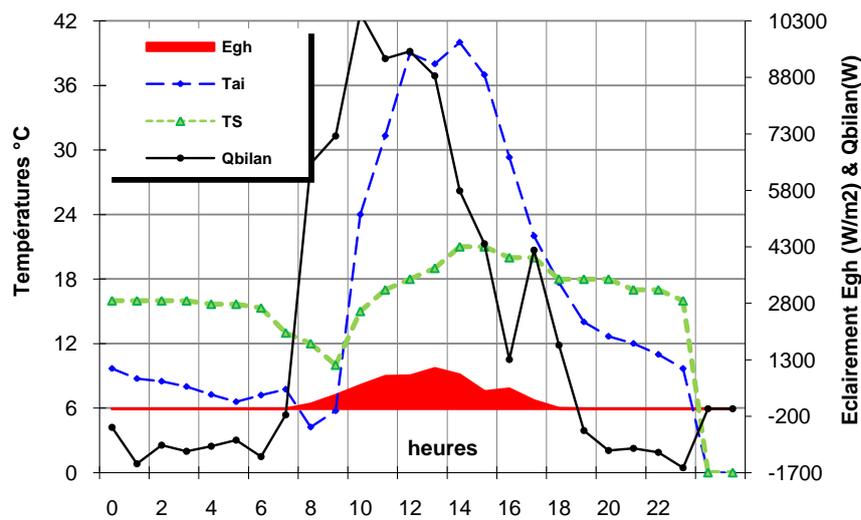


Fig.4.7 : Variation des températures T_{ai} , T_s et de l'éclairement solaire E_{gh} et du bilan total de la serre Q_{bilan} durant le 1er jour type

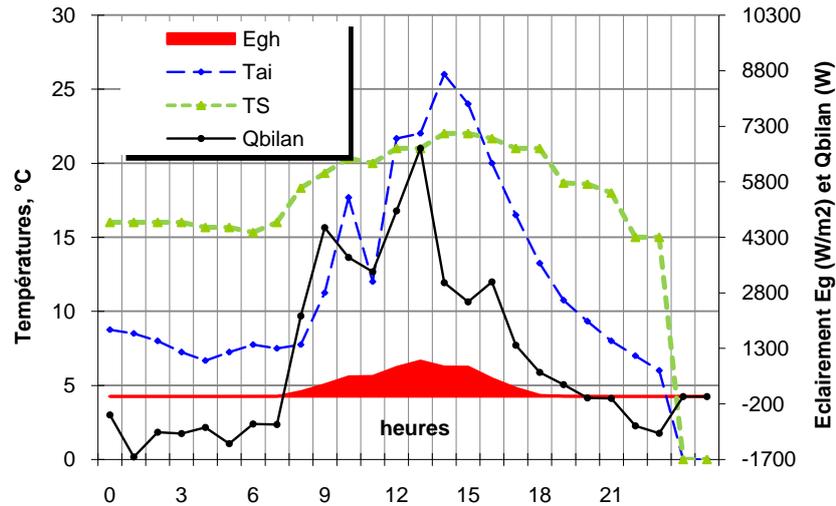


Fig.4.8: Variation des températures T_{ai} , T_S et de l'éclairement solaire E_{gh} et du bilan total de la serre Q_{bilan} durant le 2^{ème} jour type

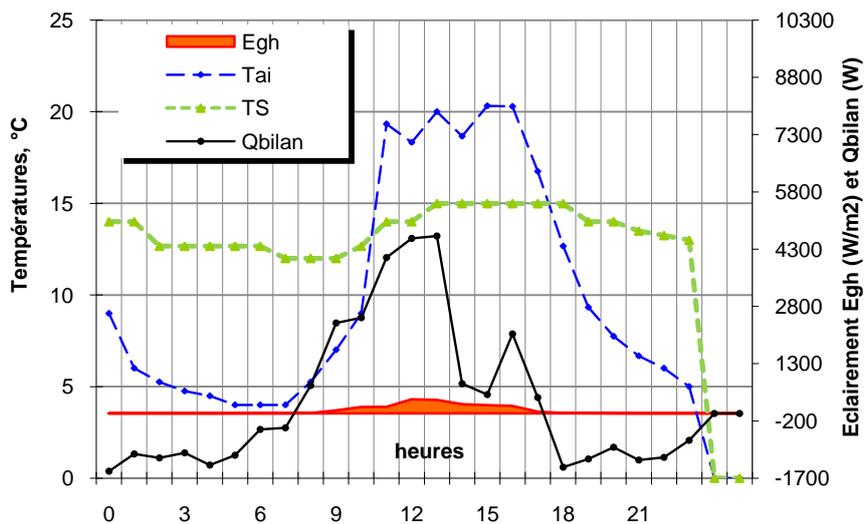


Fig.4.9: Variation des températures T_{ai} , T_S et de l'éclairement solaire E_{gh} et du bilan total de la serre Q_{bilan} durant le 3^{ème} jour type

La figure 4.10 montre la variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la vitesse du vent U_e durant les trois journées types. Le modèle permet de suggérer les estimations du bilan énergétique de la serre en fonction de la vitesse du vent, la corrélation déduite pour plus de 75 essais est une équation polynômiale avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.6255$.

La figure 4.11 montre la variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la différence de température de l'air (intérieure et extérieure) $\Delta T = (T_{ai} - T_{ae})$, durant les

trois journées types. D'après cette courbe, le modèle peut contribuer à l'estimation du bilan énergétique de la serre en fonction de la différence des températures intérieures et extérieures, la corrélation trouvée pour un nombre d'essais égal à 75, est une équation polynomial du second degré avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.7356$.

La figure 4.12 représente la variation de la vitesse moyenne de l'air intérieur U_i et des pertes de chaleur par fuites Q_{fuite} (phénomène de renouvellement d'air par fuites) en fonction de la vitesse du vent U_e durant la journée la plus ventée (2^{ème} journée type); on remarque une variation proportionnelle et significative entre (U_i , Q_{fuite} et U_e) avec un coefficient de détermination $R^2=0.96$ pour U_i et un coefficient de détermination $R^2=0.81$ pour Q_{fuite} .

La figure 4.13 représente la variation des pertes radiatives Q_{ir} en fonction de la température du ciel durant le 2^{ème} jour type; on remarque que la décroissance de la température de la voûte céleste T_V provoque la croissance linéaire des pertes radiatives globales des composantes de la serre avec un coefficient de détermination $R^2=0.57$.

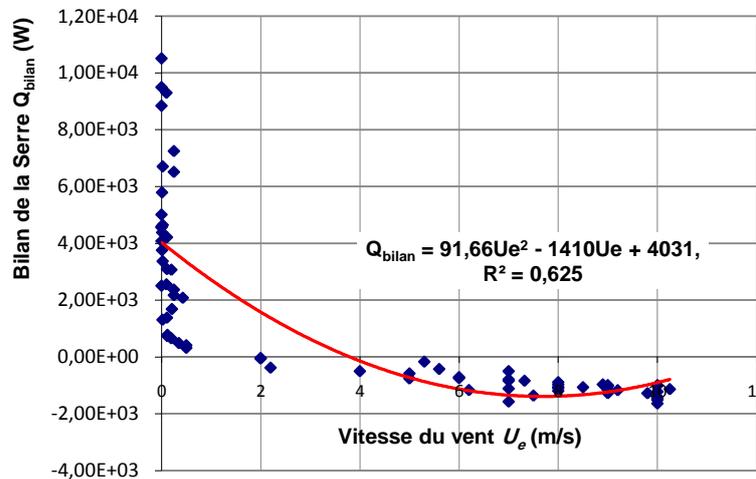


Fig.4.10: Variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la vitesse du vent U_e durant les trois journées types.

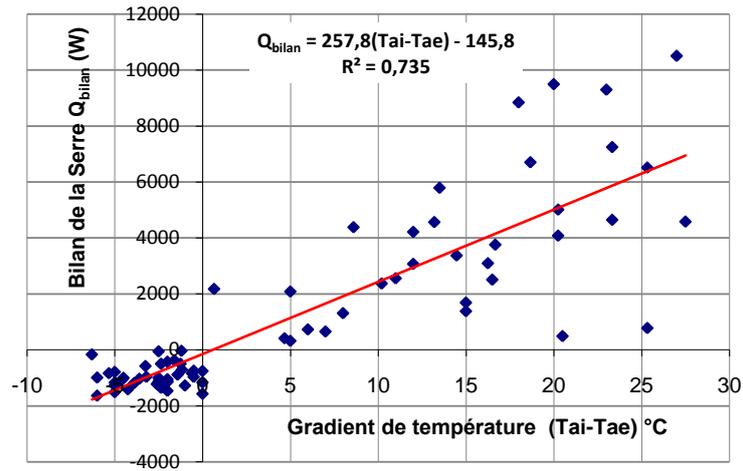


Fig.4.11: Variation du bilan global de la serre Q_{bilan} en fonction de la différence de température (Tai-Tae) durant les trois journées types

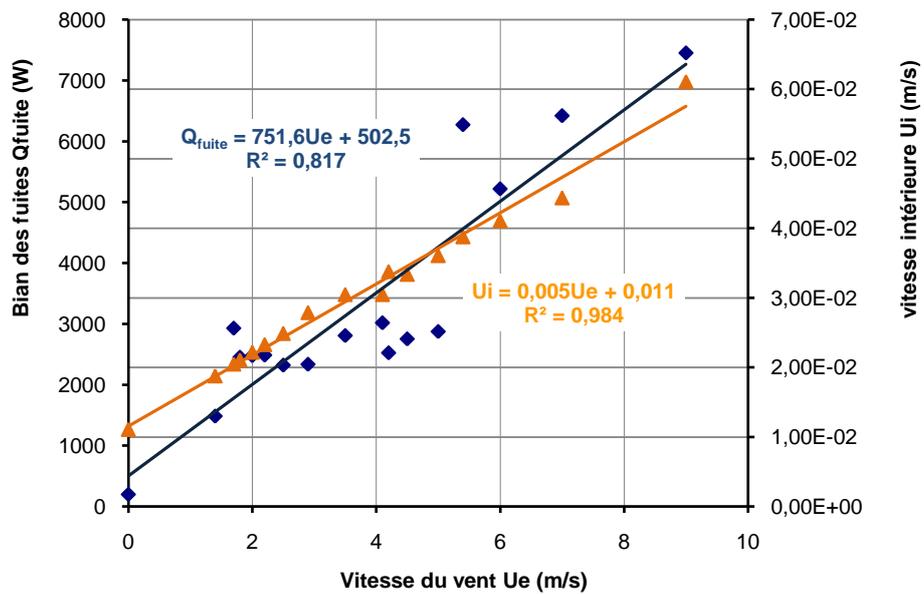


Fig.4.12: Variation du bilan des fuites Q_{fuite} et de la vitesse intérieure U_i en fonction de la vitesse U_e (2^{ème} jour type).

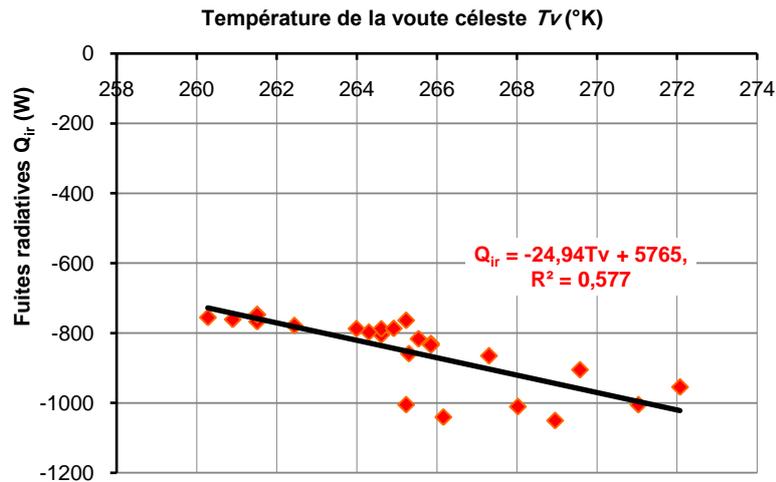


Fig.4.13: Variation pertes radiatives Q_{ir} en fonction de la température de la voûte céleste T_v (2^{ème} jour type).

Conclusion

Dans cette étude nous avons réalisé un modèle semi empirique de bilan énergétique de la serre capable de représenter son comportement thermique. La mise en œuvre de ce modèle a permis, de formuler le bilan énergétique global journalier de la serre en mettant en évidence les apports thermiques naturels d'une part, et de préciser leurs évolutions d'autre part.

Notre modèle peut aisément déterminer et quantifier l'équilibre énergétique quotidien de la serre en mettant en évidence les apports et les pertes. D'après l'expérimentation réalisée sous les conditions des trois journées types; notre modèle a pu représenter les phénomènes suivants :

- L'augmentation de la durée d'ensoleillement corrélée à une baisse de nébulosité du ciel influence largement le bilan global de la serre par une grande captation solaire durant la journée et fait augmenter nettement les pertes (notamment infrarouges) du fait: du ciel dégagé, d'un état énergétique plus élevé de la serre et de la baisse de la température de voûte céleste.
- La décroissance de la température extérieure influe notablement sur les besoins thermiques de la serre.

- L'augmentation de la vitesse du vent modifie le bilan global journalier de la serre en provoquant une augmentation des pertes par fuites d'air, ces dernières sont provoquées par l'augmentation consécutive de la vitesse de l'air intérieur.

Cette analyse peut améliorer notamment la représentation du bilan thermique des serres dans les différentes régions d'Algérie et permettra de contribuer au dimensionnement de leurs systèmes de chauffages et d'apprécier leurs emplacements. Ce modèle peut suggérer également des modifications des calendriers cultureux dans les différentes régions d'Algérie, visant à limiter les dépenses énergétiques. Dans tous les cas, le modèle est susceptible de fournir une estimation des besoins de la culture abrités en matière (chauffage, ventilation).

4.3 Modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre

4.3.1 Influence des conditions climatiques extérieures sur la température de l'air intérieur

- Influence de l'éclairement solaire sur la température de l'air intérieur

L'influence du rayonnement solaire extérieur sur la température de l'air intérieur est rapportée sur la figure 4.14, la figure fournit la variation de la différence de la température (ΔT_{ai-ae}) en fonction du rayonnement solaire R . l'analyse de la régression linéaire donne un coefficient de corrélation relativement faible ($r^2 = 0,61$), montrant la dispersion des données. De ce résultat, on peut conclure que (ΔT_{ai-ae}) est proportionnel au rayonnement solaire, et que l'influence du rayonnement solaire est relativement importante en ce qui concerne les changements de la température intérieur de la serre, ceux-ci est dû au rôle prédominant joué par le rayonnement solaire dans l'équilibre thermique de la serre. Ces résultats confirment ceux obtenus par Teitel, et.al (1999) ; Litago, et al. (2005), et Montero et al.(2001) pour des serres naturellement aérées.

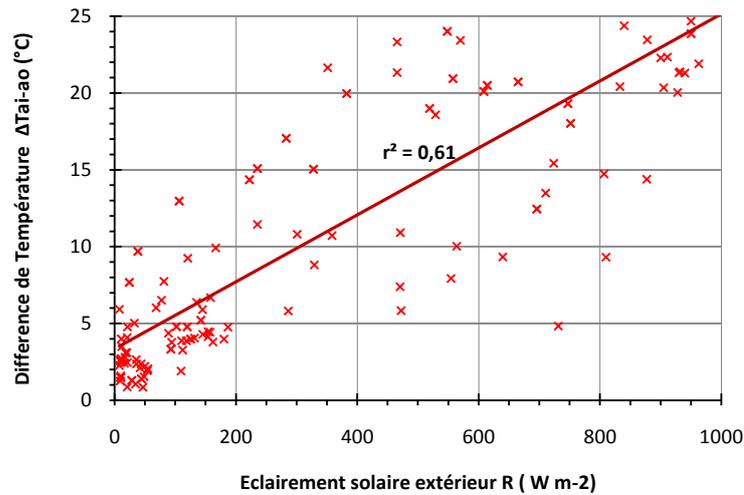


Fig. 4.14: Variation de la différence de température ΔT_{ai-ao} (°C) En fonction de l'éclairement solaire R ($W m^{-2}$)

- *Influence de la vitesse du vent sur la température de l'air intérieur*

L'effet de la vitesse de vent sur la température de l'air intérieure est montré sur la figure 4.15. Cette figure montre la différence de température mesurée ΔT_{ai-ae} en fonction de la vitesse de vent, pour une gamme de valeurs de la vitesse du vent variant entre (1 et $5 m s^{-1}$). Une influence remarquable de la vitesse du vent sur la température de l'air intérieur est montrée par cette courbe ; désormais on peut remarquer que les valeurs de ΔT_{ai-ae} diminuent avec l'augmentation de la vitesse du vent, et l'effet de la vitesse de vent sur ΔT_{ai-ae} est non-linéaire. Le coefficient de détermination obtenu est relativement faible ($r^2 = 0,39$) ce résultat pourrait être expliqué probablement par le fait que le rayonnement solaire surmonte (*L'emporte sur*) l'effet direct de la vitesse de vent sur la température de l'air intérieur de la serre dans les conditions climatiques semblables à celles d'une serre naturellement aérée installée dans une région ensoleillée.

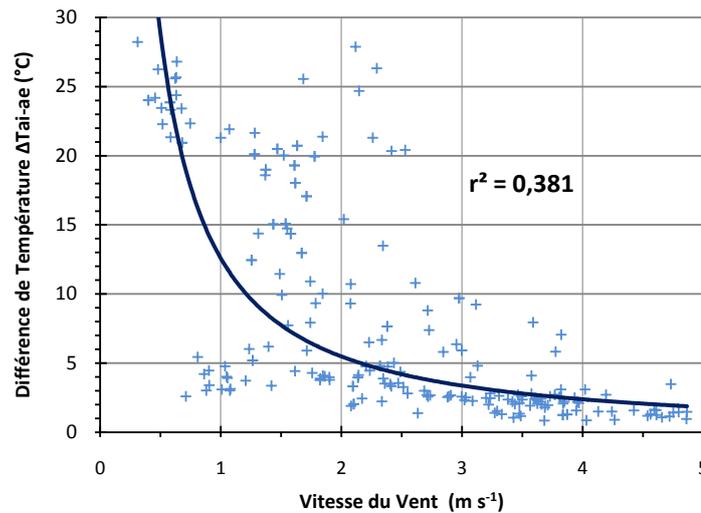


Fig. 4.15: Variation de la différence de température ΔT_{ai-ae} (°C)
En fonction de la vitesse du vent U_e (ms⁻¹)

4.3.2 Interprétation des résultats

La comparaison entre les valeurs mesurées et calculées de la température de l'air intérieure T_{ai} obtenu par l'équation (3.25) au milieu de la serre est présentée sur la figure 4.16. L'accord du modèle avec les données expérimentales est très satisfaisant ($r^2=0.97$) pour toutes les mesures, comme il est montré par la proximité des points de la ligne bissectrice. En outre, pour vérifier la validité de la méthode développée, les valeurs mesurées du rayonnement global extérieur R et les valeurs estimées de R dérivées de l'équation ont été tracées sur la figure 4.17. L'analyse de la régression linéaire des valeurs mesurées en fonction des valeurs de la présente étude donne un coefficient de corrélation $r^2=0.98$. Le rayonnement solaire global calculé par la méthode développée a ainsi montré une bonne concordance avec les valeurs mesurées.

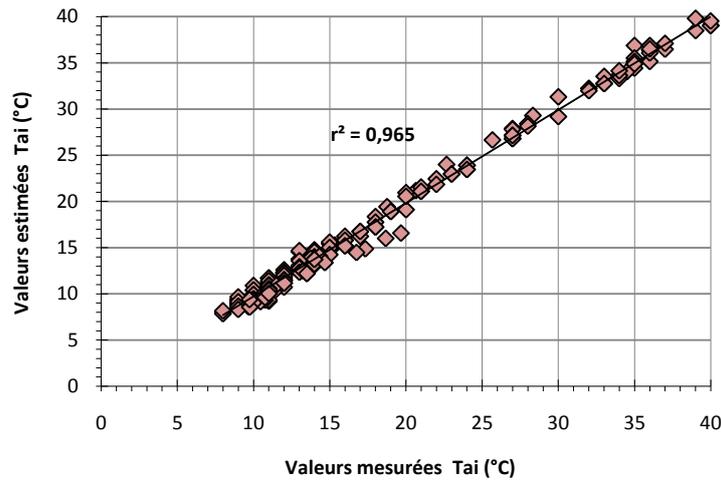


Fig. 4.16: Comparaison des valeurs mesurées et estimées de la température T_{ai} (°C)

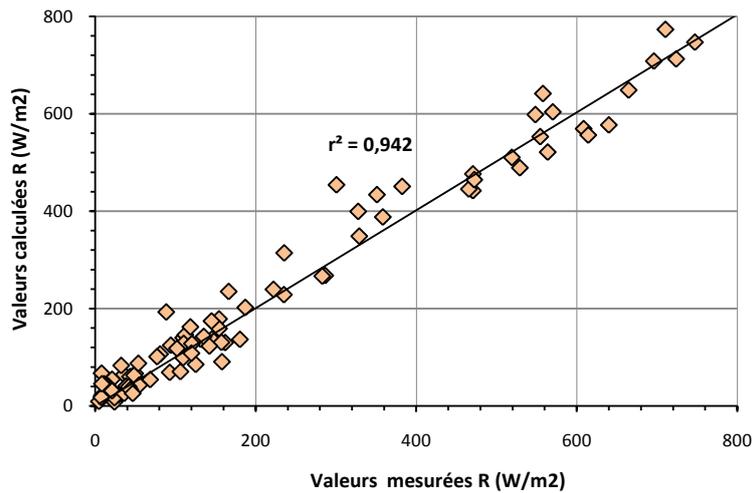


Fig. 4.17: Comparaison des valeurs mesurées et estimées de l'éclairement solaire R (Wm^{-2})

La dépendance de la température de l'air intérieur à l'égard de plusieurs paramètres tels que le rayonnement solaire, la vitesse de vent, ou le coefficient de transmission de la couverture de la serre au rayonnement solaire sont investiguées. Dans cette perspective des valeurs de α, β et γ ont été obtenues à partir des résultats expérimentaux, ces valeurs ont été employées dans le modèle indiqué par l'équation (3.25). Les effets du rayonnement solaire sur la température de l'air intérieur sont montrés sur la figure 4.18. Cette figure montre que T_{ai-ae} calculée en fonction du rayonnement solaire R pour des vitesses de vent variant entre 0 et 7 m s^{-1} , et une couverture en verre horticole : les

valeurs de ΔT_{ai-ae} augmentent avec l'augmentation du rayonnement solaire. Mais pour une valeur donnée de R l'augmentation de la vitesse de vent réduit fortement les valeurs de ΔT_{ai-ae} .

Pour la même serre, la figure 4.19 montre une représentation des valeurs de ΔT_{ai-ae} en fonction de la vitesse du vent pour un ensemble de valeurs du rayonnement solaire variant dans le domaine ($100 - 800 \text{ W m}^{-2}$); ici encore, on peut voir que pour une valeur de rayonnement solaire donnée, la différence de température ΔT_{ai-ae} diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent. Ce phénomène montre bien la contribution de la vitesse du vent dans les mécanismes de la ventilation et les pertes de chaleur sensible.

La figure 4.20 montre bien la décroissance de ΔT_{ai-ae} en fonction de la vitesse du vent pour deux valeurs de rayonnement solaire (250 et 800 W m^{-2}), et trois types de couverture de serre (HG verre horticole $\tau=0.83$, RP film en polyéthylène rigide $\tau=0.72$, et PF film en polyéthylène fin $\tau=0.68$). On remarque, quand le coefficient de transmission τ change, l'intensité du rayonnement solaire entrant est affectée. Les résultats montrent que la diminution de T_{ai-ae} est fonction des valeurs décroissantes de τ et des valeurs croissantes de la vitesse du vent. Ce phénomène est dû essentiellement au fait que ΔT_{ai-ae} est directement proportionnel au coefficient de transmission τ et inversement proportionnelle à la vitesse du vent U_e ; ces résultats sont qualitativement semblables à ceux obtenus par Teitel, et al. 1999. et Katsoulas, et al. 2006.

Les valeurs de ΔT_{ai-ae} obtenu par la présente étude ont été comparées aux valeurs précédemment obtenues par le modèle de Kittas et.al 1987 (i.e. Eq. 4.1) pour une serre tunnel non chauffée, fermée, et sans couvert végétale.

$$(T_{ai} - T_{ae}) = \frac{0.031R - 0.017\Delta R + 2.64}{1 + 0.085U_e^{0.8}} \quad (4.1)$$

Pour les deux modèles, la variation du ΔT_{ai-ae} calculée en fonction du rayonnement solaire R pour une vitesse de vent fixe ($U_e = 2 \text{ m s}^{-1}$) est rapportée sur la figure 4.21. Le modèle développé dans la présente étude et le modèle de Kittas fournissent des résultats semblables. La déviation standard moyenne entre les deux modèles est de (2.173°C), cet écart pourrait être dû aux raisons suivantes:

- i) Géométrie différente des deux serres (Tunnel et Venlo), possédant un coefficient de transmission de la couverture au rayonnement solaire différent (verre horticole et film en plastique);
- ii) Le modèle de Kittas fait intervenir la variation temporelle du rayonnement solaire ΔR (Wm^{-2}) pour tenir compte de l'inertie thermique de la serre, tandis que dans notre cas les valeurs expérimentales ont été calculées durant des intervalles de temps de 30mn, afin de réduire l'effet des fluctuations dues aux changements du rayonnement solaire;
- iii) Le modèle de Kittas a été établi pour une serre tunnel sans couvert végétale avec un sol sec tandis que dans notre cas, le sol de la serre été irrigué et couvert de plant de tomates ;
- iv) Pour le modèle de Kittas, la direction du vent a été supposée parallèle à l'axe principal de la serre et l'effet du vent été représenté par $U_e^{0.8}$ (correspondant à un échange de chaleur convectif forcé et turbulent entre la couverture de la serre et le milieu externe), tandis que dans notre expérimentation, l'angle moyen entre la direction du vent et l'axe de la serre à changé entre 3° et 58° . Le nombre de Richardson ($Ri = Gr/Re$) calculé pour les 94 données considérées été supérieur à 0,1. Le critère général pour la convection forcé est $Ri < 0.1$; et pour la convection naturelle $Ri > 16$ (Roy et.al 2002), ce qui signifient que dans la présente étude l'échange de chaleur autour de notre serre été dominé par le mécanisme de la convection mixte. .

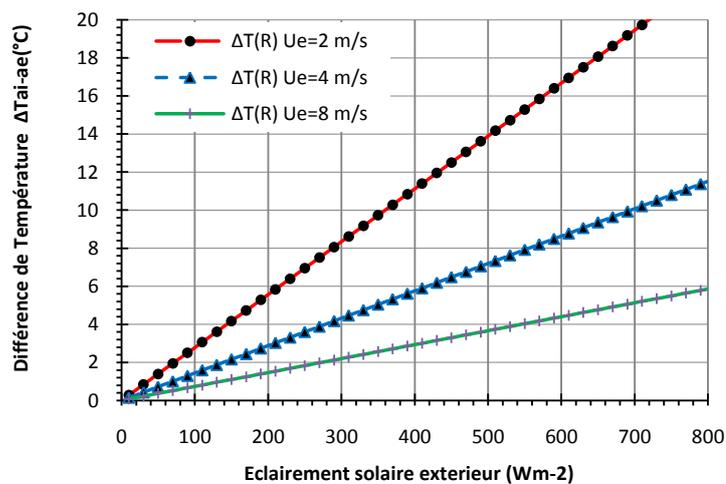


Fig. 4.18: Variation de la différence de température ΔT_{ai-ae} ($^{\circ}C$) en fonction de l'éclairement solaire R (Wm^{-2}), pour trois vitesse de vent différentes U_e (ms^{-1})

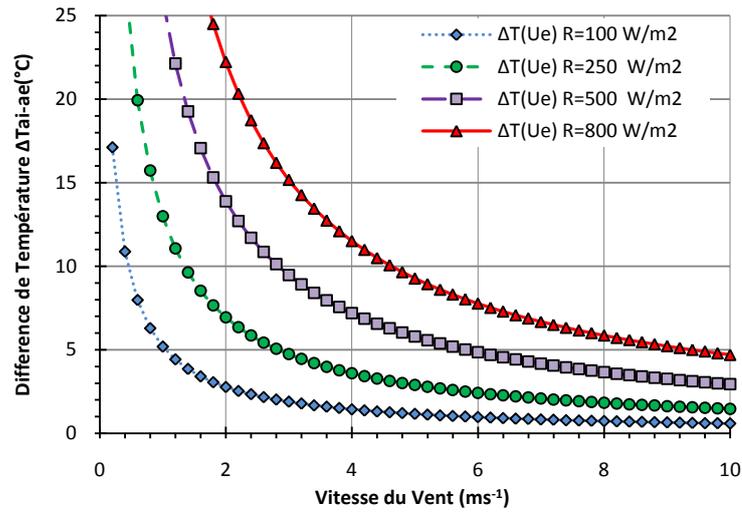


Fig. 4.19: Variation de la différence de température ΔT_{ai-ae} (°C) en fonction de la vitesse du vent U_e (ms⁻¹) en utilisant l'équation (3.25) pour quatre valeurs de l'éclairement solaire R (Wm⁻²)

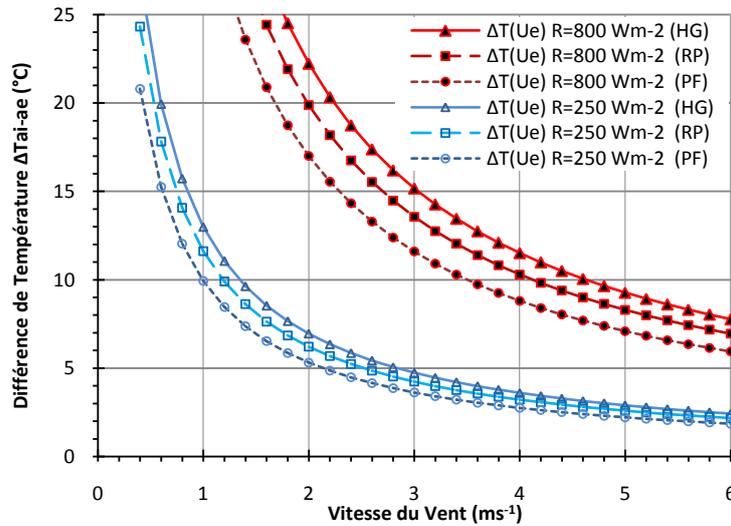


Fig.4.20: Variation de la différence de température ΔT_{ai-ae} (°C) en fonction de la vitesse du vent U_e (ms⁻¹) en utilisant l'équation (3.25), pour deux valeurs de l'éclairement solaire R (Wm⁻²), et trois type de couverture : horticultural glass (HG), polyéthylène rigide(RP), Polyéthylène film (PF)

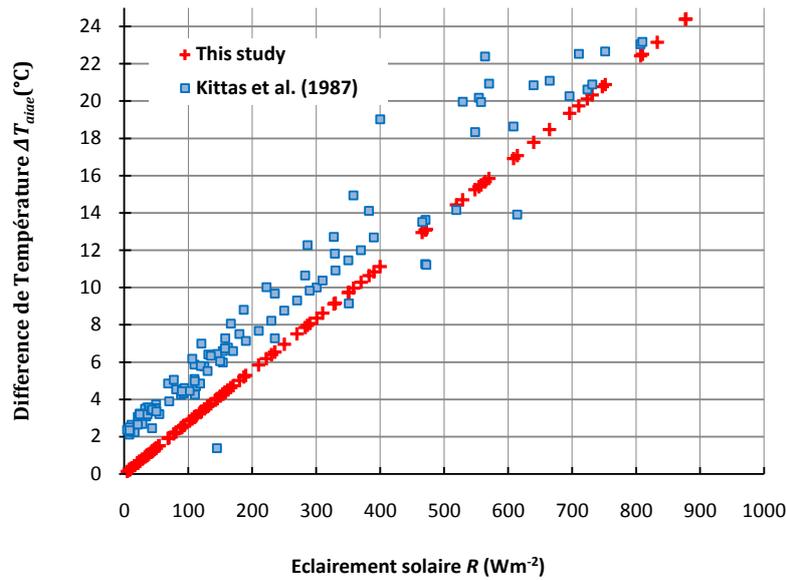


Fig. 4.21: Comparaison entre le modèle établi par cette étude et le modèle proposé par Kittas 1987

Conclusion

Une méthode a été développée pour déterminer expérimentalement in situ la température de l'air intérieur d'une serre naturellement aérée de type Venlo avec un couvert végétal de plant de tomate. Une équation qui peut prédire la température de l'air intérieur T_{ai} en fonction des valeurs mesurées du rayonnement solaire global extérieur, de la température de l'air extérieur et de la vitesse de vent a été établie. La formule empirique développée était:

$$T_{ai} = T_{ae} + \frac{(0.043\tau R)}{(0.612U_e + 0.091)} \quad (4.2)$$

Le coefficient de corrélation obtenu pour la courbe de régression entre les valeurs calculées et mesurées est égale à $r^2=0.965$, cette valeur montre une bonne concordance du modèle avec les données expérimentales.

Indépendamment d'être un modèle simple pour l'évaluation de la température de l'air intérieur de la serre, l'approche développée dans la présente étude fournit une

contribution utile à la compréhension du comportement énergétique d'une serre, en fonction des conditions climatiques, de la structure de la serre et de sa forme.

Pour ce qui concerne ces aspects les conclusions suivantes peuvent être tirées, au moins pour une serre naturellement ventilée de type Venlo sous des conditions climatiques semi aride :

- Les résultats montrent bien que la température de l'air intérieur de la serre dépend fortement du rayonnement solaire aussi bien que de la vitesse du vent;
- Néanmoins, le rayonnement solaire l'emporte sur la vitesse du vent (i.e. le rayonnement solaire domine le mécanisme de la variation de la température de l'air intérieur de la serre);
- Le calibrage du modèle a abouti à des résultats satisfaisants, et montre bien que le modèle pourrait être incorporé dans les algorithmes utilisés dans les systèmes de pilotage du climat sous serre (serres Venlo avec des plants de tomate);
- Le modèle proposé par la présente étude pourrait être employé comme outil pratique de calcul, et de dimensionnement des systèmes de chauffage et de ventilation des serres agricoles avec des normes raisonnables de transpiration sous des conditions climatiques semblables;
- La méthode empirique représentée dans cette partie de thèse (i.e. étude basée sur des mesures in situ), pourrait être adaptée à d'autres conceptions de serre sous des conditions climatiques semblables;

4.4 Approche expérimentale du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région semi aride

4.4.1 Introduction

Les hauts plateaux du nord d'Algérie, secteurs situés dans une région bioclimatique semi aride du sud de la méditerranée, est caractérisée par une insolation hivernale élevée, variant entre (1030 et 1400) heures du mois d'octobre à mars de chaque année, par un hiver froid et sec, avec des températures minimales moyennes situées entre (-5°C et 2°C) peuvent se produire durant les périodes nocturnes des mois

de janvier et Février, avec des états d'humidité faible Mesmoudi (2007). Ces deux facteurs peuvent affecter négativement le rendement et la qualité des cultures abritées. En revanche, parce que peu de travaux sur le bilan énergétique des serres dans les régions aride du sud de la méditerranée ont été réalisées, sauf les travaux menés par Mesmoudi et.al 2008 et Mesmoudi et.al 2010.

Ces raisons sont suffisantes pour se pencher sur l'étude du bilan énergétique d'une serre de production dans la région durant la phase nocturne de la saison hivernale. Dans ce contexte, le premier objectif scientifique de cette partie de notre travail est d'analyser le bilan énergétique nocturne d'une serre dépourvue de système de chauffage artificielle. Pour aboutir à ce but, l'étude énergétique de la serre et de chacun de ces composants a été établie. Les échanges radiatifs sont aussi analysés, ces derniers sont actuellement mal connus par les serristes installés dans la région en raison de la difficulté de les mesurer. Les issus critiques qui seront abordées dans cette partie d'analyse sont :

- Evaluer les pertes énergétiques de la serre.
- Evaluer l'efficacité énergétique du sol de la serre.
- Evaluer la praticabilité et l'efficacité énergétique d'une serre dépourvue de système de chauffage sous les conditions climatiques de la région.

4.4.2 Interprétation des résultats

Le tableau 4.1 présente les valeurs moyennes des paramètres du microclimat mesurés (jour et nuit) à l'intérieur et à l'extérieur de la serre durant les 24 heures des journées d'expérimentation. Pendant la première période, la nuit du (25 janvier 2007) été caractérisée par un état de ciel assez claire, une vitesse de vent faible ($U_e=0.7\text{m/s}$) et une période diurne fortement ensoleillée. La deuxième période d'expérimentation, la nuit du (21 février 2007) été caractérisée par un ciel moyennement couvert, une vitesse de vent plus élevé ($U_e=1.75\text{m/s}$) et une phase diurne faiblement ensoleillée. La troisième période, la nuit du (18 mars 2007) été caractérisée par état de ciel totalement clair, une vitesse du vent moyenne de l'ordre ($U_e=1.07\text{m/s}$), et une phase diurne totalement couverte.

Périodes	Extérieur						Intérieur		
	T_{ae} (°C)	χ_{ae} (g/kg)	U_e (m/s)	E_{gh} (W/m ²)	θ (heure)	N_{ub}	T_{ai} (°C)	χ_{ai} (g/kg)	
25 janv. 2007	Jour	15.17 (± 4.29)	04.67 (±1)	02.11 (±1.1)	299.30 (±14.50)	7h 11'	0	27.06 (±1.30)	14.92 (±0.98)
	Nuit	08.5 (±2.52)	04.67 (±0.53)	0.7 (±1.20)	-	-	0.5	10.09 (±1.02)	05.92 (±0.47)
21 févr. 2007	Jour	09.99 (±1.79)	04.24 (±0.43)	04.08 (±1.52)	163.33 (±10.66)	03h 14'	0.8	17.88 (±1.23)	9.41 (±0.56)
	Nuit	05.2 (±0.68)	05.59 (±0.32)	1.75 (±0.70)	-	-	0.5	07.07 (±1.23)	06.42 (±0.49)
18 Mars. 2007	Jour	04.69 (±1.79)	04.24 (±0.40)	04.08 (±0.80)	78.65 (±7.52)	35'	1	17.88 (±1.0)	9.41 (±0.48)
	Nuit	04.69 (±0.68)	04.74 (±0.21)	1.07 (±0.78)	-	-	0	05.35 (±1.42)	5.82 (±0.52)

Tableau 4.1: Valeurs moyennes des variables du microclimat de la serre et des conditions climatiques extérieures mesurées durant les périodes de mesure (jour et nuit). Les valeurs entre parenthèses sont les déviations standards.

Périodes	Q_g^{cod} (W/m2)	Q_{gai}^{cov} (W/m2)	Q_{gai}^{lat} (W/m2)	Q_g^{inf} (W/m2)	T_g (°C)	T_{ai} (°C)	ΔT_{gai} (°C)	h_{gai} (Wm ⁻² K ⁻¹)
Nuit couverte 25janv.2007	44.03 (±2.6)	-06.85 (±1.50)	-09.09 (±0.52)	-28.09 (±2.85)	10.98 (±0.85)	10.09 (±1.0)	0.89 (±0.21)	07.7 (±2.13)
Nuit ventée 26fév.2007	42.23 (±4.13)	-07.21 (±1.85)	-10.4.2 (±0.47)	-27.57 (±3.21)	08.05 (±0.70)	07.07 (±1.32)	0.98 (±0.18)	08.54 (±1.86)
Nuit claire 18mar. 2007	38.70 (±3.2)	-06.29 (±1.23)	-09.88 (±0.61)	-22.52 (±2.22)	06.39 (±0.65)	05.35 (±1.0)	01.04 (±0.07)	06.55 (±1.56)

Tableau 4.2: Flux et paramètres thermiques composants le bilan énergétique du sol de la serre. Les valeurs entre parenthèses sont les déviations standards.

- **Bilan énergétique sur la surface du sol de la serre.**

La conduction dans le sol de la serre

Les valeurs moyennes des flux thermiques composants le bilan énergétique sur la surface du sol de la serre sont présentés dans le tableau 4.2 pour les trois nuits d'expérimentation, ainsi que la valeur moyenne de la température de la surface du sol (T_g), le gradient de température entre la surface du sol de la serre et l'air intérieur ($\Delta T_{gai}=T_g-T_{ai}$), et le coefficient de transfert thermique par convection entre la surface du sol et l'air intérieur de la serre (h_{gai}). Le flux de conduction à travers la surface du sol abrité Q_g^{cod} est ascendant (positif) durant les trois nuits d'expérimentation, de ce fait, les couches inférieures du sol contribuent au bilan énergétique de la surface du sol par la restitution nocturne de la chaleur emmagasinée durant la phase diurne, ce phénomène

peut compenser largement les pertes radiatives, qui représentent les pertes principales du composant (le sol de la serre).

Dans le cas d'une nuit assez claire et précédée par une journée très ensoleillée (cas de la nuit du 25 janvier) le flux de conduction moyen est de l'ordre de ($Q_g^{cod} = 44.03 \text{W/m}^2$), cette valeur peut compenser largement les pertes radiatifs de la surface du sol abrité ($Q_g^{inf} = 28.09 \text{W/m}^2$), les pertes sensibles ($Q_{gai}^{cov} = 6.85 \text{W/m}^2$) et les pertes latentes ($Q_{gai}^{lat} = 09.09 \text{W/m}^2$).

Pour le cas d'une nuit assez clair précédée par une journée faiblement ensoleillée et ventée (cas de la nuit du 26 février 2007), le sol de la serre contribue toujours dans la compensation de pertes radiatives, sensibles et latentes. La valeur du flux de conduction pour cette nuit est de ($Q_g^{cod} = 42.2 \text{W/m}^2$), cette dernière est similaire à la somme des pertes radiatifs ($Q_g^{inf} = 24.57 \text{W/m}^2$), sensibles ($Q_{gai}^{cov} = 7.21 \text{W/m}^2$) et latentes ($Q_{gai}^{lat} = 10.42 \text{W/m}^2$).

De même pour la troisième période (Nuit a ciel clair précédée par une période diurne couverte), le flux Q_g^{cod} compense toujours les pertes radiatifs ($Q_g^{inf} = 22.52 \text{W/m}^2$), sensibles ($Q_{gai}^{cov} = 6.29 \text{W/m}^2$) et latentes ($Q_{gai}^{lat} = 9.88 \text{W/m}^2$).

Dans la plupart des études du bilan énergétique des serres, les valeurs de Q_g^{cod} étaient assumées pour être relativement faible et négligeable d'après Roy et.al (2002), cette avis peut être valide dans le cas des serres avec un couvert végétale de forte densité où le sol est entièrement couvert par la végétation; ou bien dans le cas d'une serre équipée par un système de chauffage artificiel, sous ces conditions l'effet de la contribution du flux de conduction du sol de la serre est minime. Dans le cas contraire, les serres avec des densités de couvert végétal faible (cultures basses), dans le cas d'absence de chauffage, ou bien dans le cas de la présence de chauffage modéré, le stockage d'énergie dans le sol et sa restitution durant le cycle de 24 heures, sont loin d'être négligeables. Ceci a été confirmé dans le cas d'un chauffage modéré de serre, avec une contribution du sol représentant environ 40 % des apports de chauffage, comparée seulement à 15% dans le cas d'un chauffage élevé Baille et.al (2006). Dans notre cas les valeurs moyennes du flux de conduction pour les trois périodes avoisinent une énergie restituée par le sol abrité équivalentes pour une durée nocturne de 12h (1.90MJ et

1.67MJ), ces résultats équivaux presque au double des valeurs trouvées par Baille et.al (1999) pour les serres installées en Europe occidentales caractérisées par un climat hivernale froid, couvert et humide. Ces résultats sont satisfaisant, vue le site de la serre (Région caractérisée par une durée d'ensoleillement hivernale élevée), et les résultats entrepris par Garzoli (1981) qui rapporte que le sol d'une serre non chauffée contribue positivement durant la phase nocturne dans son bilan énergétique, par la chaleur stockée dans le sol .

Echange convectif entre le sol de la serre et l'air intérieur

Pour les trois nuits de mesure les valeurs du gradient de température (ΔT_{gai}) sont assez faibles et elles sont de l'ordre de ($\pm 1^\circ\text{C}$), par contraste les valeurs moyennes du coefficient (h_{gai}) sont assez élevées et sont de l'ordre de ($7.2\text{W/m}^2\text{K}$), ce dernier étant négatif, c'est-à-dire, le sol de la serre fourni de la chaleur à l'air intérieur. Les courbes de variation de (h_{gai}) en fonction du gradient de température (ΔT_{gai}) pour les trois nuits sont représentées dans la figure 4.22, cette dernière montre bien que (h_{gai}) varie entre des valeurs limites (supérieure et inférieure) qui correspondent respectivement aux valeurs des modèles proposés par Silva (1988) ($h_{gai} = 10\Delta T_{gai}^{0.33}$) pour une serre en plastique non chauffée et celui de Lamrani (2001) ($h_{gai} = 5.2\Delta T_{gai}^{0.33}$) pour une serre avec sol chauffé. Nos résultats apparaissent cohérents avec ceux trouvés par Silva (1988) pour une serre non chauffée. La déviation standard qui est de l'ordre de ($\pm 1.85\text{W/m}^2\text{K}$) peut être due aux erreurs expérimentales et aux modèles utilisés pour le calcul des flux radiatifs infrarouges. Un autre facteur peut expliquer cette variation: c'est l'influence de la vitesse du vent sur la variation de la vitesse de l'air intérieur. L'analyse de la variation de (h_{gai}) en fonction de la vitesse du vent (U_e) et le gradient (ΔT_{gai}) donne des coefficients de détermination positifs voir figure 4.23, ce qui montre que le coefficient d'échange (h_{gai}) est fonction de la vitesse du vent même à l'intérieur de la serre, ce qui n'est pas le cas pour ca description par les modèles évoqués par la littérature, qui prend en compte seulement le gradient de température (ΔT_{gai}). Pour des applications empiriques, la valeur moyenne de (h_{gai}) égale à ($7.2\text{W/m}^2\text{K}$) peut être considérée comme une estimation raisonnable pour le cas d'une serre non chauffée située dans une zone appartenant à un étage bioclimatique semi aride.

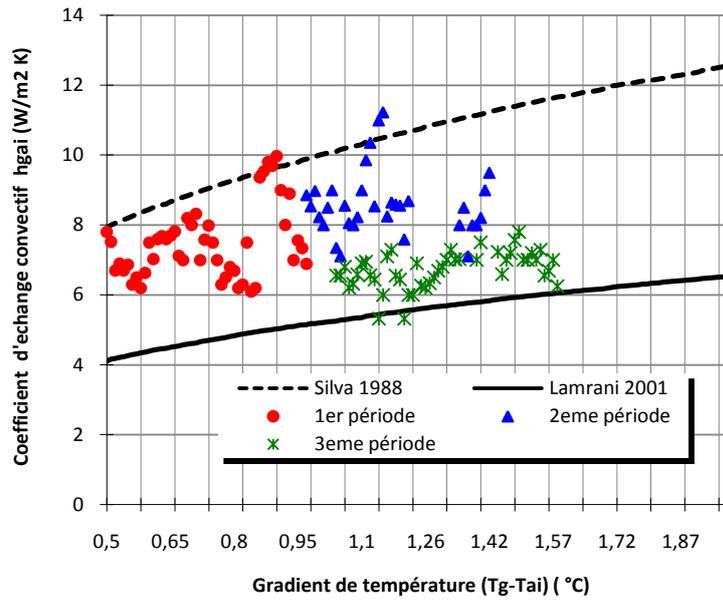


Fig.4.22 : Valeurs du coefficient d'échange par convection entre la surface du sol abrité et l'air intérieur de la serre h_{gai} ($W/m^2 K$) en fonction du gradient de température (ΔT_{gai}), durant les trois périodes de mesure, comparées aux modèles de Silva (1988) et Lamrani (2001).

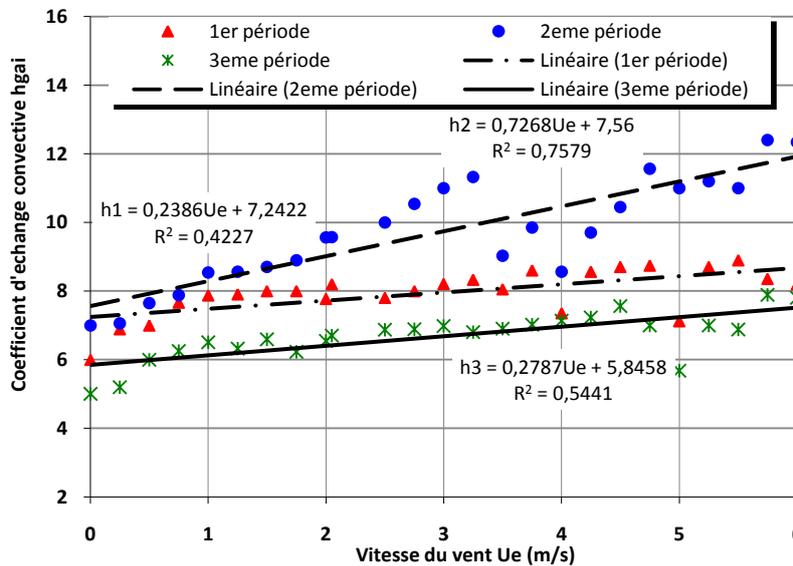


Fig.4.23 : Variations du coefficient d'échange par convection entre la surface du sol abrité et l'air intérieur de la serre h_{gai} (W/m^2K) en fonction de la vitesse du vent U_e durant les trois périodes.

Périodes	Q_{gai}^{cov} (W/m ²)	Q_{aic}^{cov} (W/m ²)	Q_{aiae}^{cov} (W/m ²)	Q_{gai}^{lat} (W/m ²)	Q_{aic}^{lat} (W/m ²)	Q_{aiae}^{lat} (W/m ²)	T_{ai} (°C)	T_{ci} (°C)	ΔT_{aic} (°C)	h_{aic} (W/m ² K)
Nuit couverte 25janv.2007	06.85 (±1.50)	-04.19 (±0.2)	-02.65 (±0.10)	09.09 (±0.52)	-03.95 (±0.15)	-05.14 (±0.20)	10.09 (±1.32)	09.35 (±1.25)	-0.74 (±0.10)	02.60 (±0.23)
Nuit ventée 21fév.2007	07.21 (±1.85)	-02.93 (±0.11)	-04.28 (±0.11)	09.26 (±0.47)	-04.62 (±0.11)	-04.64 (±0.16)	07.07 (±1.56)	06.43 (±1.23)	-0.64 (±0.06)	02.10 (±0.21)
Nuit Clair 18mar. 2007	06.29 (±1.23)	-04.96 (±0.16)	-01.33 (±0.08)	09.88 (±0.41)	-04.53 (±0.13)	-05.35 (±0.23)	05.35 (±1.06)	03.10 (±1.0)	-02.25 (±0.04)	01.01 (±0.06)

Tableau 4.3: Flux et paramètres composants le bilan énergétiques sur l'air intérieur. Les valeurs entre parenthèses sont les déviations standards.

- **Bilan énergétique sur l'air intérieur:**

Le tableau 4.3 présente les valeurs moyennes des flux qui composent le bilan énergétique sur l'air intérieur durant les trois périodes de mesures, ainsi que la température de la face intérieure de la couverture (T_{ci}), la température de l'air intérieur (T_{ai}), le gradient de température (ΔT_{aic}) et le coefficient d'échange par convection entre l'air intérieur et la face interne de la couverture (h_{aici}). D'après ces résultats on remarque que le phénomène responsable des pertes énergétiques de l'air intérieur diffère d'une période à une autre.

La figure 4.24 présente la variation du coefficient (h_{aici}) en fonction du gradient (ΔT_{aic}) avec trois modèles empirique proposés par la littérature (Tantau 1975), (Kittas 1986), et (Garzoli 1987), on remarque pour la première période (la nuit du 24 janvier) le coefficient (h_{aici}) avoisine les valeurs du coefficient calculé à partir du modèle de Kittas 1986 ($h_{aici} = 4.3\Delta T^{0.25}$), et pour les deux autre périodes (21 février et 18 mars) le coefficient (h_{aici}) est presque similaire à celui déduit à partir du modèle de Tantau (1975) ($h_{aici} = 1.247\Delta T^{0.33}$).

Il est important de signaler que le coefficient d'échange convectif (h_{aici}) dépend de plusieurs facteurs, aussi bien du mode de chauffage que de la forme du toit de la serre. Dans notre étude, après plusieurs observations, le coefficient (h_{aici}) est faible ceci est dû peut être a l'absence de turbulence dans notre cas (serre fermée non chauffée), car il a été observé dans les travaux de Garzoli (1981) et Kittas (1986) menés dans des serres chauffées par de l'air chaud pulsé, que le coefficient d'échange par convection (

h_{aici}) est élevé, et dans les travaux de De Halleux (1989) menés sur une serre chauffée par des tubes chauffants, le coefficient (h_{aic}) pour ce cas est aussi élevé. Donc la signification d'un coefficient (h_{aici}) faible observé (le cas de notre étude) est dû probablement à l'absence d'équipement de chauffage artificiel qui pourra activer et augmenter la circulation de l'air intérieur et provoquer par conséquent des mélanges et des turbulences. Nos résultats peuvent contribuer à la théorie qui indique: Que le mouvement de l'air induit directement par le mode de chauffage utilisé dans les serres, joue un rôle principal dans la détermination du coefficient d'échange par convection entre l'air intérieur et la paroi intérieure de la couverture de la serre.

Il est à noter aussi qu'il existe une corrélation positive et linéaire entre les températures T_{ai} et T_{ci} voir figure 4.25. qui signifie que le mode de chauffage de l'air intérieur de la serre (Chaleur dégagée par le sol abrité emmagasinée durant la période diurne) fait provoquer une variation proportionnelle entre les deux températures, pratiquement la variation de T_{ci} est la résultante de la variation de T_{ai} et vice versa.

Il est à signaler aussi que le gradient de température entre la surface du sol abrité et l'air intérieur ΔT_{gai} est relativement constante, il est égale à une valeur moyenne de l'ordre de $0.89 (\pm 0.21)^\circ\text{C}$ durant la première période, sa valeur moyenne pour la deuxième période était de l'ordre de $0.98 (\pm 0.18)^\circ\text{C}$, et sa valeur moyenne pour la troisième période était de l'ordre de $1.04 (\pm 0.07)^\circ\text{C}$.

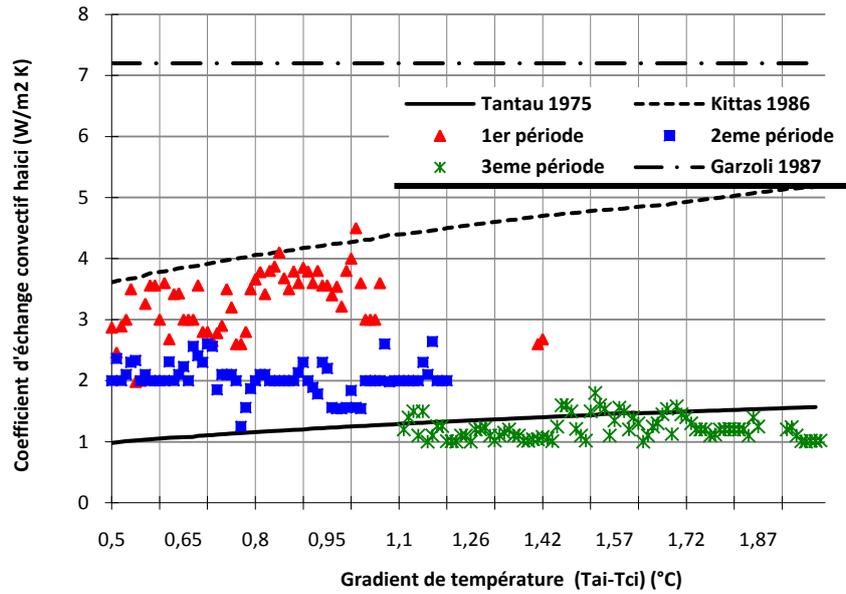


Fig.4.24 : Valeurs du coefficient d'échange entre l'air intérieur et la face intérieure de la couverture de la serre h_{aici} ($W/m^2 K$) en fonction du gradient de température (ΔT_{aici}), durant les trois périodes de mesure, comparées aux modèles proposés par Tantau (1975), Kittas (1986) et Garzoli (1987).

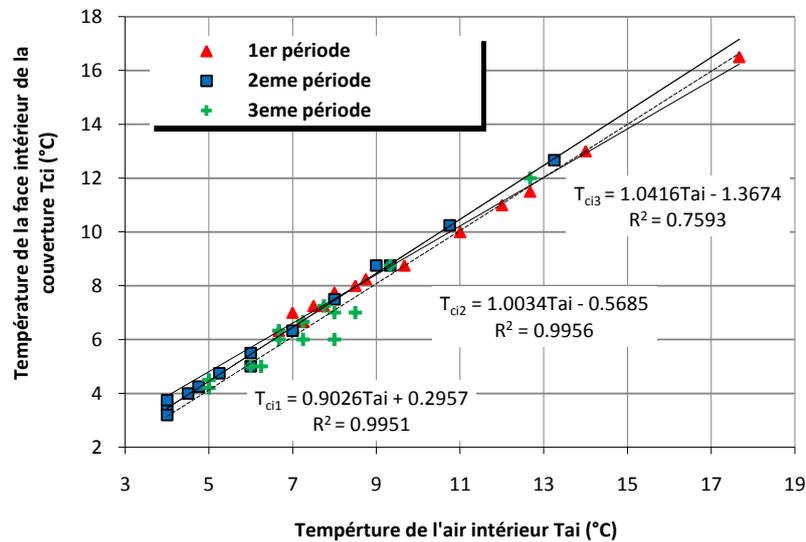


Fig.4.24 : Variations de la température de la face intérieure de la couverture en fonction de la température de l'air intérieur durant les trois périodes de mesure et leurs courbes de tendances.

Périodes	Face Intérieure				Face Extérieure						
	T_{ci}	Q_{ci}^{inf}	Q_{aic}^{cov}	Q_{aic}^{lat}	T_{ce}	T_{ae}	Q_{ce}^{inf}	Q_{cice}^{cod}	Q_{ceae}^{cov}	ΔT_{ceae}	h_{ceae}
	(°C)	(W/m ²)	(W/m ²)	(W/m ²)	(°C)	(°C)	(W/m ²)	(W/m ²)	(W/m ²)	(°C)	(W/m ² K)
Nuit couverte 25janv.2007	09.35 (±1.25)	09.41 (±2.30)	04.19 (±0.20)	03.95 (±0.15)	09.28 (±2.3)	08.5 (±2.4)	-16.25 (±2.32)	23.02 (±2.38)	-06.12 (±1.23)	0.80 (±0.02)	-03.60 (±1.1)
Nuit ventée 21fév.2007	06.43 (±1.23)	08.96 (±1.66)	02.92 (±0.11)	04.62 (±1.1)	06.33 (±2.12)	05.2 (±2.2)	-22.68 (±2.89)	32.89 (±3.51)	-10.21 (±1.63)	01.13 (±0.52)	-04.15 (±1.03)
Nuit clair 18mar. 2007	03.1 (±1.0)	16.24 (±2.69)	04.96 (±0.16)	05.35 (±0.13)	03.00 (±1.11)	04.49 (±1.8)	-53.11 (±4.59)	32.83 (±3.42)	+20.29 (±4.62)	-01.69 (±0.33)	+05.47 (±1.7)

Tableau 4.4: Flux et paramètres thermiques composants le bilan énergétique sur les deux faces de la couverture de la serre. Les valeurs entre parenthèses sont les déviations standards.

- **Bilan énergétique sur la couverture de la serre**

Echange convectif entre la face extérieure de la couverture et l'air extérieur

Le tableau 4.4 présente les valeurs moyennes des flux de chaleur qui composent les bilans énergétiques sur les deux faces de la couverture de la serre, ainsi que les températures des deux faces (T_{ci} et T_{ce}), la température de l'air extérieur (T_{ae}), le gradient de température entre la face extérieure de la serre et l'air extérieur (ΔT_{ceae}), et le coefficient d'échange convectif entre la face extérieure et l'air extérieur h_{ceae} . Pour la première nuit, caractérisée par une vitesse de vent moyennement faible ($U_e=0.7m/s$) et précédée par une insolation élevée, le gradient de température (ΔT_{ceae}) est de l'ordre de 0.8 °C variant entre (+0.50 et +1.75 °C). La valeur du flux moyen de convection Q_{ceae}^{cov} durant cette période est de (-06.12W/m²) indiquant que ce dernier est en majeure partie négative et la couverture est plus chaude que l'air extérieur.

Pour la deuxième nuit caractérisée par une vitesse de vent plus élevée ($U_e=1.70m/s$), et précédée par une durée d'insolation faible, le gradient de température moyen (ΔT_{ceae}) est de l'ordre (01.13°C) variant entre (±0.50 et ±2.08 °C), ce qui est compatible avec la valeur du flux convectif $Q_{ceae}^{cov}=10.21 W/m^2$ calculé. La valeur moyenne du coefficient (h_{ceae}) correspondante est de (04.15±1.03W/m²K) cette dernière est en parfaite concordance avec le modèle proposé par Bot (1983), le coefficient (h_{ceae}) est assez élevé que celui calculé à partir du modèle de Kittas (1986), ceci est due d'une part à l'influence dominante de la vitesse du vent (U_e), et d'autre part, à la faible influence du gradient de température (ΔT_{ceae}). Il est à signaler qu'une

corrélation positif proche de l'unité a été trouvée entre la variation du coefficient d'échange (h_{ceae}) et la vitesse du vent voir figure 4.25.

Pour la troisième nuit, caractérisée par un ciel clair, une vitesse de vent moyenne ($U_e=1.07\text{m/s}$) et précédée par une période diurne couverte; le gradient de température (ΔT_{ceae}) est le plus élevé par rapport aux deux périodes de mesure précédentes, il varie entre (+0.90 °C et -1.71°C). Le coefficient (h_{ceae}) a une valeur moyenne correspondante a ($05.47\pm 1.70\text{W/m}^2\text{ K}$) avec un flux de chaleur convectif $Q_{ceae}^{cov}=20.29\text{ W/m}^2$ positif, et une large déviation standard de l'ordre de ($\pm 04.62\text{ W/m}^2$), indiquant que ce dernier est positif pour les trois quart de la période, c'est à dire la couverture reçoit de la chaleur de l'air extérieur, ce phénomène est appelé phénomène d'inversion, il est souvent remarqué pour les serres non chauffée durant des nuits a ciel clair (faible nébulosité) (Mesmoudi et.al 2008), ce phénomène a été signalé et dans les travaux menés par Montero (1985) et Papadakis (1989).

Echanges radiatifs infrarouges sur la couverture

La face intérieure de la couverture reçoit de l'énergie thermique de la part de l'air intérieur par le biais des flux (Q_{aic}^{cov} et Q_{aic}^{lat}) et de la part du sol abrité par le bais du flux thermique Q_{ci}^{inf} , ce dernier lui fournit la majeure partie d'énergie qui la perd par conduction. Le bilan d'échange radiatif de la face intérieure de la couverture de la serre est positif pour les trois périodes de mesure voir tableau 4.4. L'inverse est tout a fait remarquable pour la face extérieure, et la prédominance des pertes radiatives étaient claire dans le Tableau 4.4. Pour la première période (nuit du 24 janvier) caractérisée par un ciel assez couvert et précédée par une journée fortement ensoleillée, le bilan radiatif net sur la face extérieure de la serre était plus faible que le flux de conduction venant de la face interne. Pour une nuit assez couverte (nuit du 21 février) précédée par une durée d'ensoleillement de l'ordre de trois heures, le bilan radiatif est légèrement faible par rapport au flux de conduction à travers la paroi, mais ce dernier (le bilan radiatif) contribue toujours aux déperditions d'énergie à travers la face extérieure de la couverture. Le bilan radiatif net sur la face extérieure atteint des valeurs élevées ($Q_{ce}^{inf}=53.11\text{W/m}^2$) comparée au flux de conduction venant de la face intérieure ($Q_{cice}^{cod}=32.38\text{W/m}^2$), ce phénomène est souvent remarqué pour des nuits a ciel clair similaire à

la troisième nuit (19 mars). Pour les trois périodes, les pertes radiatives à travers la face extérieure de la couverture de la serre représentent la majorité des pertes vers l'extérieur et leur prédominance demeure majoritaire dans notre cas, mais leur intensité diminue avec la croissance de la nébulosité du ciel et la durée d'ensoleillement qui précède juste la période nocturne.

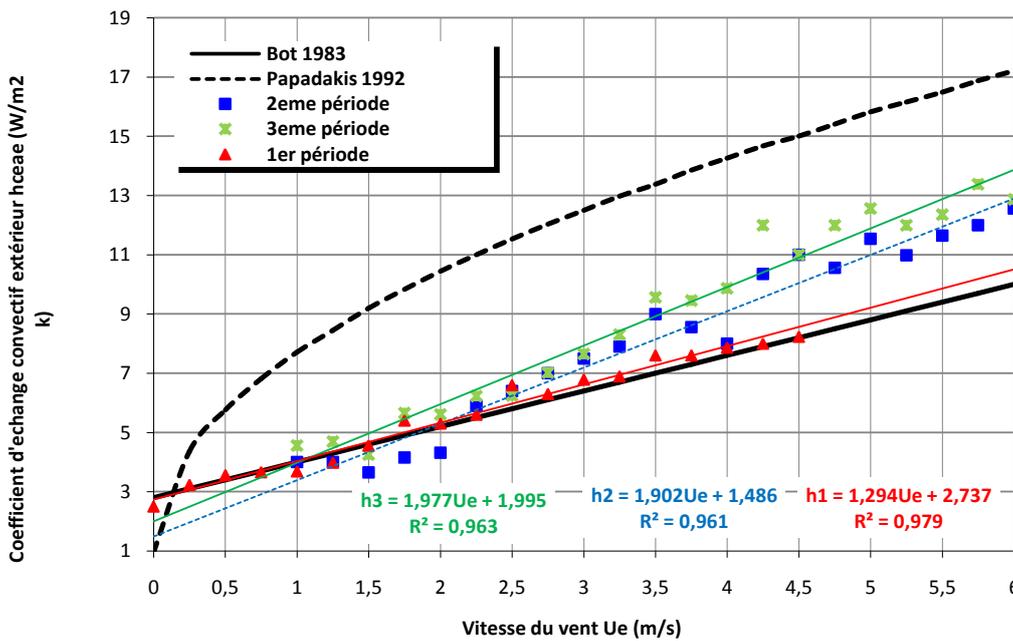


Fig.4.25 : Valeurs du coefficient d'échange par convection h_{acee} ($W/m^2 K$) entre la face extérieure de la couverture et l'air extérieur en fonction de la vitesse du Vent (U_e), durant les trois périodes de mesure, comparées aux modèles proposés par Bot (1983) et Papadakis (1994).

Conclusion

L'analyse globale des résultats de notre expérimentation, montre désormais que notre étude pourra fournir un meilleur jugement du comportement thermique des abris serres installés dans des zones appartenant à des régions caractérisées par un climat semi aride. En outre, ce travail peut être considéré comme une contribution utile pour la compréhension du comportement énergétique des serres non chauffées. Dans ces aspects les résultats suivants peuvent être accentués.

- 1- Le sol de la serre est une source importante de chaleur durant la phase nocturne (environ $44.03W/m^2$) pour une nuit précédée par une insolation diurne importante, en comparaison avec le chauffage artificiel pour

maintenir la température de l'air intérieur entre (15 et 18°C), il faut environ (78 W/m²) pour une nuit de la saison hivernale dans la région.

- 2- L'évaluation des coefficients d'échange par convection entre les composants de la serre, sont en concordance avec les modèles rapportés par la littérature. Il est à signaler que le mode de convection à l'intérieur de la serre induit directement du type de chauffage avec le quel est équipée la serre, celui-ci semble jouer un rôle important dans la détermination du coefficient d'échange convectif.
- 3- Les pertes radiatives sont les pertes énergétiques principales de la serre, essentiellement sur la face extérieure de la couverture, qui s'accroît avec des états de ciel à faible nébulosité.

Pour ce qui concerne la praticabilité des abris serres et leur extension dans la région (Les Hauts plateaux Est d' Algérie), les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- i) Puisque le processus d'échange radiatif est majoritaire dans la dissipation de la chaleur à travers la couverture, l'emplacement d'écrans thermique, ou bien l'utilisation des couvertures (plastique, verre) à faible émissivité thermique engendre une solution économique.
- ii) Les pertes par fuites peuvent être remédiées par l'augmentation de l'étanchéité de la serre.
- iii) Le sol de la serre en tant que source importante de chaleur dans notre région, ceci suggère l'installation d'un système qui peut valoriser cette source d'énergie, cette solution peut augmenter significativement l'efficacité des serres particulièrement dans les régions fortement ensoleillées du sud de la méditerranée.

4.5 Modèles de coefficient d'échange convectif près de la paroi de la serre, pour une serre sans couvert végétale en période nocturne

Un nombre de 5400 données des paramètres (T_{ai} , T_{ci} , T_{co} , T_{ao} , U_e) ont été collectés et analysés. L'évaluation des constantes qui apparaissent dans les équations (3.51) et (3.52) ont été établies en utilisant la méthode des moindres carrés décrite par Gourdin et Boumahrat (1991). Ces constantes (i.e. a , b , c , et d) ont été estimées à partir d'un échantillon de 125 mesures correspondant à une gamme relativement large des variables mesurées.

Les ajustements ont aboutis aux résultats suivants avec des variations relativement faibles pour chaque paramètre: $a = 3.68 \pm 0.03$; $b = 2.56 \pm 0.06$; $c = 2.34 \pm 0.022$ et $d = 0.69 \pm 0.08$. Ainsi les équations décrivant les coefficients de transfert de chaleur convectif à l'intérieur et l'extérieur de la couverture de la serre prennent les formes suivantes:

$$h_{ai-ci} = 3.68(T_{ai} - T_{ci})^{0.33} \quad (4.3)$$

$$h_{ao-co} = 2.56 + 2.34U_e^{0.69} \quad (4.4)$$

A l'intérieur de la serre, les valeurs calculées à partir de l'équation (4.3) ont été comparées à celles obtenues à partir des modèles de la littérature voir figure. 4.26. La différence observée était dû aux différences dans les géométries des serres employées, et aux conditions climatiques à l'intérieur de la serre (systèmes de chauffage, de climatisation, ou de ventilation).

Le modèle établi par notre étude (i.e. Eq. 4.3) est plus près du modèle de Kittas (1986), et le coefficient 3,68 est dans la marge des valeurs trouvées dans la littérature, sauf la valeur trouvée et par Lamrani et.al (2001) pour un prototype de serre avec sol chauffé.

Pour vérifier la validité du modèle, la comparaison entre les valeurs mesurées et estimées de la température de l'air intérieur T_{ai} dérivée de l'équation (4.3) ont été tracées voir figure. 4.27. Les valeurs de T_{ai} calculées à partir de la méthode développée ont montré une bonne concordance avec les valeurs mesurées: Un coefficient de corrélation élevé a été trouvé ($r^2=0.91$), et un rapprochement des points de la ligne bissectrice est bien remarquable sur la figure 4.27.

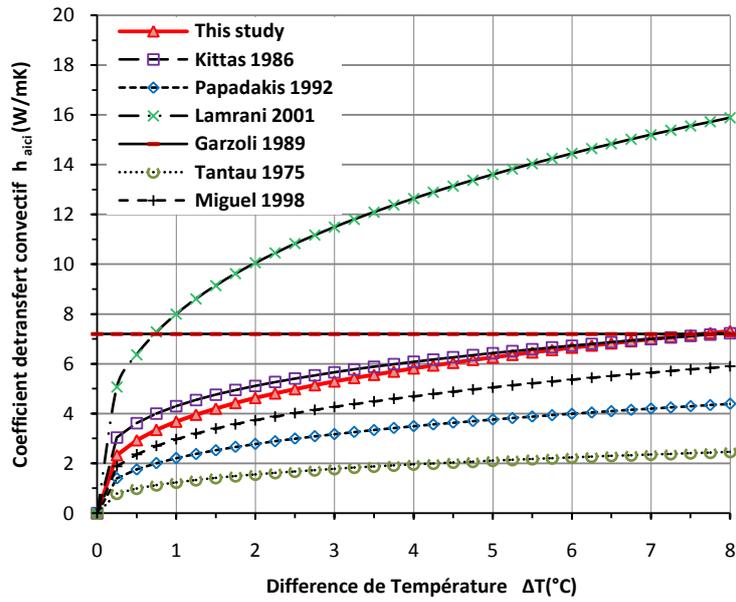


Fig.4.26: Variation du coefficient de transfert thermique par convection h_{ai-ci} entre la face intérieure de la couverture et l'air intérieur en fonction du gradient de température ΔT_{ai-ci}

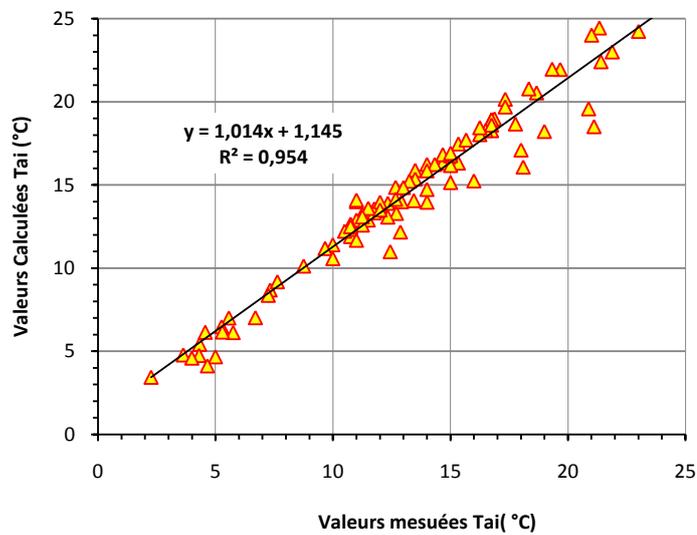


Fig. 4.27: Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées de la température de l'air intérieur T_{ai} (°C)

Sur la face externe de la couverture de la serre, les valeurs du coefficient d'échange convectif établis (i.e. Eq 4.4) ont été tracées en fonction de la vitesse de vent voir (fig. 4.28). Les résultats ont été aussi comparés à d'autres résultats issues de la littérature en utilisant un gradient de température constant $\Delta T_{co-ao} = 2^{\circ}\text{C}$, cette valeur (2°C) correspond à une valeur moyenne de la différence de température entre la surface externe de la couverture et l'air environnant (la valeur moyenne enregistrée durant les mesures était de l'ordre de 1.82°C). Les différences entre les différentes corrélations qui apparaissent sur la figure 4.28 étaient dues aux différences entre les géométries et les formes des serres employées, aux différents types de couverture (verre Horticole, polyéthylène, film plastique PVC), et aux conditions climatiques extérieures (i.e. étage bioclimatique)

Le modèle du coefficient convectif établi par notre étude était plus près proche du modèle déterminé par Bot (1983) pour l'ensemble des vitesses du vent testées. Sa variation demeure entre les variations des trois modèles établis par Kittas (1986), Papadakis (1992) et Kanthak (1970) pour des vitesses de vent plus faibles et inférieures à 3 ms^{-1} .

A fin de vérifier la validité de la méthode développée (c.-à-d. Sans mesuré la quantité Q_{co}^R), les valeurs calculées du bilan radiatif net sur la face extérieure de la couverture dérivées de l'équation de transfert thermique (Eq. 3.46) ont été tracées en fonction des valeurs obtenues à partir de l'expression théorique fournie par l'équation (3.52) voir figure 4.29. Les valeurs obtenues de Q_{co}^R par la méthode développée ont montrés une bonne concordance avec le calcul fondamental ($r^2=0.84$). Les valeurs négatives observées sur la figure 4.29 précisent qu'elles peuvent se produire pour quelques valeurs du flux de rayonnement infrarouge libérées à partir de la face extérieure de la couverture (quand la couverture est plus froide que l'air extérieur). On a remarqué que ce phénomène peut se produire souvent dans le cas des serres non chauffées durant des nuits calmes et sans nuages. Dans de telles conditions, les pertes radiatives de la couverture sont élevées et la température de la couverture peut baisser de plusieurs degrés au-dessous de la température de l'air extérieur. Mais l'intensité de ce phénomène diminue avec la nébulosité du ciel et la période d'ensoleillement qui précède juste la phase nocturne (Mesmoudi et.al, 2008). De telles observations sont en concordance avec les travaux entrepris par Papadakis et.al (1992), cet auteur a également trouvé des

valeurs négatives durant son expérimentation menée sur une serre double chapelle sans couvert végétale.

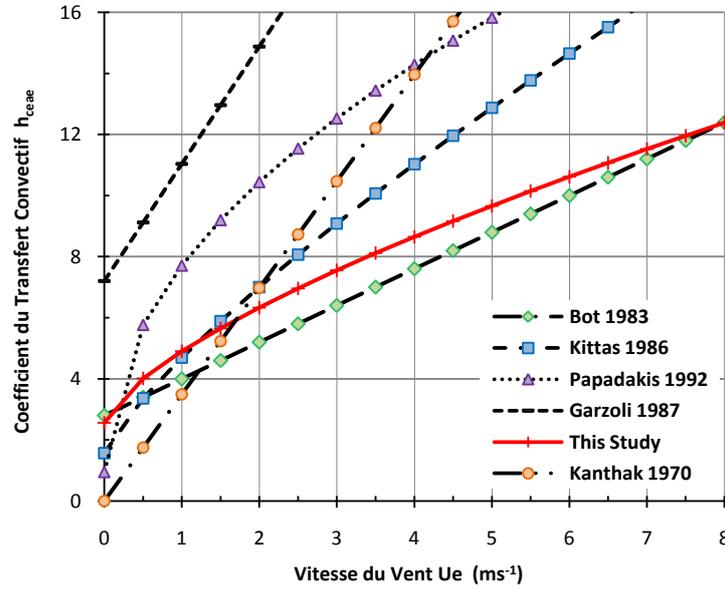


Fig.4.28: Variation du coefficient de transfert convectif h_{co-a0} en fonction de la vitesse du vent U_e

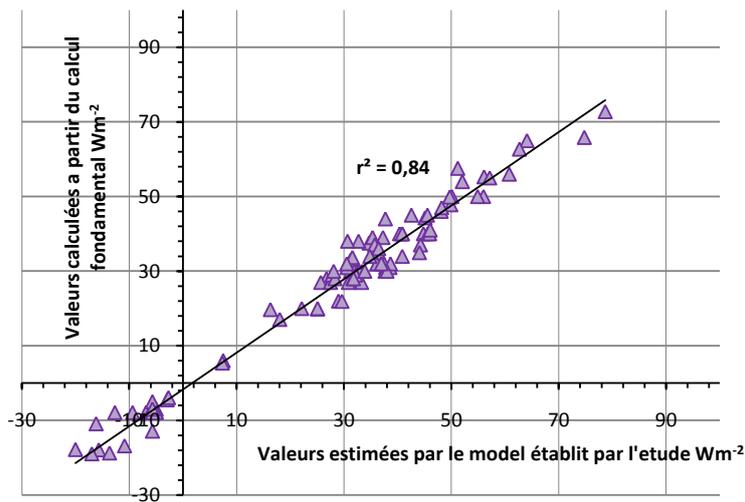


Fig. 4.29: Comparaison entre les valeurs calculées à partir du calcul fondamental et les valeurs estimées par le modèle établi par cette étude. Valeurs du rayonnement net infrarouge sur la face extérieure de la couverture

Plusieurs combinaisons des nombres de Reynolds et de Grashof (Re et Gr) ont été employées (Etude du phénomène de la convection près des parois de la serre) pour séparer et distinguer les régions de la convection mixte et forcée sur les surfaces. Dans notre cas, afin de séparer la région de la convection mixte et forcée, sur la face extérieure de la couverture de la serre, le rapport $(Nu/Re^{0.8})$ a été employé et tracé en fonction du rapport $(Re^{2.4}/Gr)$. Cette combinaison a été employée et établie par Bot (1983) pour une serre Venlo en verre, et appliquée par Papadakis (1992) dans ces travaux menés sur une serre à double chapelle et à double envergure couverte par un film en polyéthylène ; Pour tracer la combinaison citée ci-dessus, tous les nombres (Nu , Re et Gr) ont été calculés en utilisant les données du climat extérieur de la serre (en utilisant les équations (3.40) et (4.4) pour le calcul du nombre de Nu , et les équations (C11) et (C12) dans l'annexe C pour le calcul des nombres adimensionnels Gr et Re). La longueur caractéristique L apparaissant dans ces nombres, a été fixée à 2.04 m, qui est la longueur de l'arête perpendiculaire à la gouttière de la serre. La figure 4.30 montre que le rapport $(Nu/Re^{0.8})$ converge vers une valeur relativement constante pour des valeurs de $(Re^{2.4}/Gr)$ supérieures à 6500. Ce seuil peut être considéré comme un critère pour séparer la convection forcée et mixte.

Des mesures sur une serre de type Venlo ont été réalisées par Bot (1983), les résultats de ce dernier ont montré que la nature du transfert thermique convectif sur la face extérieure de la couverture (le toit de la serre) devienne en mode de convection forcée pour $(Re^{2.4}/Gr) > 6000$.

Dans notre cas la moyenne des valeurs du rapport $(Nu/Re^{0.8})$ pour $(Re^{2.4}/Gr) > 6500$, donne une valeur de l'ordre de 0,0301 avec une erreur égale à 0,005. Si on suppose que la valeur du nombre de Prandtl Pr pour l'air est constante (i.e. $Pr=0.71$) quand la convection est forcée, l'équation suivante peut être valable:

$$Nu = 0.0337Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad Re > 2.10^4 \quad (4.5)$$

Le coefficient 0,0337 dans l'équation (4.5) est approximativement 6% inférieur à 0,036, valeur référée par Monteith (1990) pour une plaque plane, et 1,2 % plus élevée que la valeur 0,033 trouvé par Papadakis (1992) au-dessus du toit de la serre à double envergure couverte par un film de polyéthylène. Le modèle obtenu par cette étude est

donc en parfait accord avec les résultats de Papadakis et.al (1992). La petite différence entre les deux modèles peut être attribuée aux géométries des deux serres et aux conditions climatiques.

Le coefficient trouvé par Bot (1983) était égale à ($= 0,015$), c'est la valeur la plus petit rapportée dans la littérature, ce dernier a été calculé en analysant la vitesse du vent au-dessus du toit de la serre. Les différences avec la présente étude peuvent être attribuées au protocole employé pour mesurer la vitesse du vent: dans notre cas, la vitesse du vent a été mesurée par deux anémomètres placés à 1 m au-dessus du toit de la serre et 4,6 m au-dessus du sol extérieur, tandis que dans le cas de l'étude menée par Bot (1983) la vitesse du vent a été mesurée en utilisant des petits anémomètres au-dessus du toit de la serre pour mesurer les vitesses locale du vent. Bot (1983) a constaté que près de la gouttière de la serre, la vitesse du vent était inférieure à celle près du sommet de la serre, ces détails concernant les protocoles de mesure employés, peuvent expliquer pourquoi le coefficient trouvé par notre étude était plus grand que celui trouvé par Bot (1983).

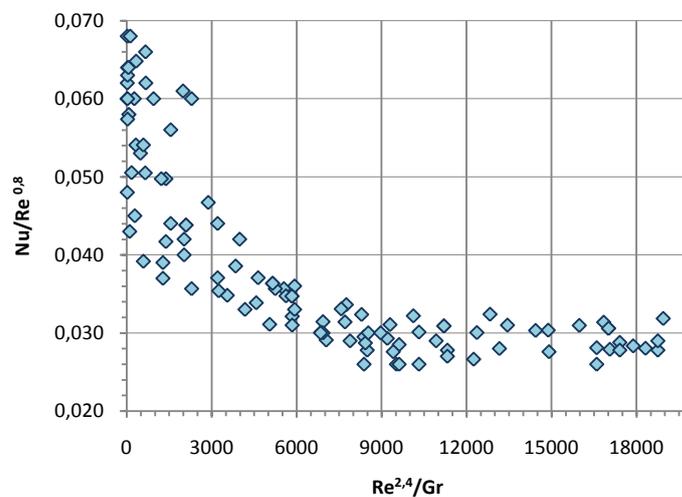


Figure 7: Valeurs de $(Nu/Re^{0,8})$ en fonction de $(Re^{0,8}/Gr)$

Conclusion

Des nouvelles corrélations ont été établies pour le coefficient de transfert de chaleur convectif près de la couverture de la serre en utilisant une méthode in situ. Ces coefficients ont été déterminés pour une serre de type Venlo sous des conditions

climatiques semi arides, durant la saison hivernale. Nos corrélations pourraient être employées pour calculer le transfert thermique convectif d'une serre fermée de type Venlo sans couvert végétale dans les conditions climatiques semblables.

Après analyse des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Les coefficients de transfert thermique près de la couverture de la serre dépendent non seulement du gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre, mais également de la température de la couverture, du transfert thermique près de la couverture, et de la quantité de chaleur transférée à l'intérieur et à l'extérieur de la serre. Il serait donc pas commode de considérer les coefficients de transfert thermique près de la couverture des serre comme constants dans le bilan énergétique des serres.
- Le transfert de chaleur de convectif le long de la couverture intérieure dépend de la température de la surface intérieure de la couverture et de la température de l'air intérieur de la serre, alors que le transfert de chaleur convectif le long de la surface extérieure de la serre dépend principalement de la vitesse de vent mais également de la différence de la température (air extérieur- surface de la couverture extérieure).
- Dans le cas ou les ouvertures d'aération de la serre sont fermées, la convection le long de la couverture intérieure de la serre est toujours en mode de convection naturelle turbulente, et la vitesse de l'air à l'intérieur de la serre demeure inférieure a $0,3 \text{ m s}^{-1}$
- La méthode expérimentale employée, telle que celle décrite dans notre travail peut être employée pour étudier le transfert de chaleur convectif de la couverture de la serre, sous un éventail de couvertures, de modes d'opération, et de conditions atmosphériques.

Davantage d'effort expérimental est nécessaire pour étudier des expressions plus appropriées pour les coefficients de transfert thermique convectif à l'intérieur et à l'extérieur de la serre, pour d'autre géométrie de serre avec des couvertures différentes, dans les conditions climatiques semblables, afin d'analyser l'impact de la conception sur les expressions des coefficients.

Conclusion Générale

Notre étude pourra contribuer à la compréhension et à l'analyse des phénomènes mis en jeu dans le micro climat de la serre installée dans les régions climat semi aride, ce type de climat est caractérisé par des hivers souvent ensoleillés avec des vitesses de vent modérés. Deux approches ont été adoptées dans ce travail de thèse:

- Une approche expérimentale

Cette approche est basée sur des mesures in situ, à travers laquelle nous avons pu recueillir des données du micro climat de la serre ainsi que ceux du climat extérieur. Cette approche nous a permis d'appréhender en première phase d'expérimentation la compréhension du comportement de l'hétérogénéité climatique dans l'agro-système serre, et d'affiner la connaissance des mécanismes qui interviennent dans ce phénomène. En deuxième phase, l'approche nous a permis d'établir un modèle semi empirique du comportement énergétique global de la serre, le modèle établi permettra d'améliorer dans le futur la représentation du bilan thermique des serres dans les différentes régions d'Algérie, en contribuant au dimensionnement de leurs équipements (chauffage, et ventilation), et suggérer également des calendriers culturaux dans les différentes régions d'Algérie. En troisième phase, l'approche expérimentale nous a permis d'établir un modèle d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre, le modèle développé peut fournir une contribution utile à la compréhension du comportement énergétique des serres en fonction de leur structure, de leur forme, et des conditions climatiques. Dans la quatrième phase de cette approche, une expérimentation en phase nocturne nous a permis d'évaluer les pertes énergétiques de la serre, d'évaluer l'efficacité énergétique du sol de la serre, et d'évaluer la praticabilité et l'efficacité énergétique d'une serre dépourvue de système de chauffage sous les conditions climatiques de la région. En cinquième et dernière phase de cette approche, sous les mêmes conditions que ceux de la quatrième expérimentation (serre vide fermée), l'approche expérimentale nous a permis d'établir de nouvelles corrélations des coefficients d'échange convectif de la paroi de la serre, ces modèles peuvent être utilisés dans le calcul du transfert thermique à l'intérieur et à l'extérieur

d'une serre fermée de type de Venlo sans couvert végétal et sous des conditions climatiques semi aride.

- Une approche de modélisation

Dans laquelle nous avons commencé à formaliser les principaux mécanismes gouvernant le comportement et la variation de la température de l'air intérieur de la serre en verre, en deuxième lieu nous avons utilisé cette approche pour établir un modèle semi empirique du comportement global du bilan énergétique de la serre qui a débouché sur des résultats appréciables. En troisième et dernière phase, nous avons pu établir des nouvelles corrélations des coefficients d'échange convectif de la paroi de la serre.

Résultats Expérimentaux

L'étude expérimentale a été menée à l'intérieur de deux types de serre : serre en plastique et serre en verre de type Venlo, dans leur environnement immédiat (climat hivernal de la région de batna). Cette étude est composée en deux volets:

- Une approche diurne

Des mesures météorologiques classiques ont été recueillies à l'intérieur et à l'extérieur de la serre. L'ensemble de ces mesures constitue un jeu de données conséquent destiné à fournir des données pour les modèles à établir. Parallèlement à ces mesures, nous avons systématiquement procédé à d'autres mesures (températures des surfaces de la couverture, températures de la surface du sol, température du sous sol, et des éclairagements à l'intérieur de la serre etc.). Ces mesures ont été utilisées dans la description de l'hétérogénéité climatique de la serre en plastique, et utilisées dans la détermination du modèle du bilan énergétique global, ainsi que dans la formulation et la validation du modèle de la température de l'air intérieur.

- Une approche nocturne

Cette approche est une caractérisation de l'étude du bilan énergétique de la serre en phase nocturne, afin de pouvoir comprendre le comportement thermique de la serre sous le type de climat (climat hivernal semi aride). Dans cette approche nous avons aussi procédé a des mesures météorologiques classiques à l'extérieur de la serre. À l'intérieur de la serre, nous avons recueillies l'ensemble des données nécessaires pour le calcul des bilans énergétiques de chaque composante de la serre. En première phase les résultats de cette approche ont permis de mettre en évidence le comportement thermique des composantes de la serre (sol abrité, air intérieur, couverture) en faisant apparaître certains mécanismes (le sol abrité se comporte comme une source de chaleur en phase nocturne, le mode de chauffage à l'intérieur de la serre peut jouer un rôle important dans la détermination du coefficient d'échange convectif). En deuxième phase cette expérimentation nocturne, nous a permis de recueillir un ensemble de données pour la détermination et la validation de nouvelles corrélations des coefficients d'échange convectifs.

Résultats de la Modélisation Mathématique

La modélisation mathématique de certains processus physiques qui interviennent dans le micro climat de la serre a été menée en considérant la serre de référence retenue pour les mesures (serre en verre de type Venlo). Dans cette démarche, trois modélisations ont été élaborées:

- Modèle du bilan énergétique global de la serre

Dans le but d'établir un nouveau modèle de bilan énergétique qui s'appui sur des mesures in situ, nous avons mis en œuvre une méthode simple qui utilise des modèles globaux d'échanges de chaleur et des valeurs de mesures in situ. Le modèle réalisé est un modèle de bilan énergétique semi empirique capable de représenter le comportement thermique de la serre, de formuler le bilan énergétique global journalier de la serre en mettant en évidence les apports thermiques naturels d'une part, et de préciser leurs

évolutions d'autre part. Le modèle peut aisément déterminer et quantifier l'équilibre énergétique quotidien de la serre en mettant en évidence les apports et les pertes. Ce type de modèle s'appuie essentiellement sur des paramètres facilement mesurables et il est basé sur des équations théoriques qui intègrent l'ensemble des processus d'échanges thermiques entre la couverture, l'air intérieur et le sol.

- **Modèle de la température de l'air intérieur de la serre**

Cette approche de modélisation a constitué l'un des travaux principaux de notre travail de thèse. Ce modèle permettra de prédire la température de l'intérieur de la serre en utilisant des paramètres métrologique facilement mesurable (ces données peuvent être procurés de la station météorologique la plus proche du site de la serre) autrement dit ce modèle peut être utilisé comme outil de pronostique et d'expertise des cultures abritées en zone semi aride. Le calibrage du modèle donne des résultats satisfaisants et prouve qu'il pourrait être incorporé aux algorithmes utilisés pour la commande de climat de serre dans des serres de type Venlo avec couvert végétale (Plant de tomates). Concernant la méthode utilisée pour la détermination de ce modèle (basée sur des mesures in situ) cette méthode pourrait être adaptée à d'autres conceptions spécifiques de serre dans les conditions climatiques semblables. A la fin de cette étape de modélisation, nous avons pris soin de vérifier la crédibilité et la validité de notre modèle. Ainsi, nous avons confronté les résultats de ce modèle à des données issues de la littérature, le modèle a pu être validé sur le plan global.

- **Modèles des coefficients d'échange convectifs**

Deux nouvelles corrélations ont été établies pour les coefficients d'échange convectif près de la couverture de la serre sous les conditions climatiques semi aride, durant la saison nocturne d'hiver. Pour la détermination des constantes apparaissant dans les formulations des deux corrélations on a utilisé un nombre de 5400 données, ces données ont été analysées avant d'appliquer la méthode des moindres carrés pour l'établissement des constantes, les ajustements des modèles ont abouties à de bons résultats avec des limites d'erreur relativement faible pour chaque paramètre. Les nouvelles corrélations pourraient être employées pour calculer le transfert thermique

par convection à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre fermée de type de Venlo sans couvert végétales sous des conditions climatiques semblables à celle de la région.

Bibliographies

- Abdel-Ghany M; Kozai T.** (2006). On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer. *Energy Conversion and Management* 47: 2612–2628.
- Aubinet, M.** (1994). Long wave sky radiation parameterizations. *Solar Energy* 53: 147-154.
- Bailey B J** (1977). The calculation of glasshouse fuel requirement using degree day data corrected for solar heat gain. Dept. Note, Nat. Inst. Agric. Eng. Silsoe. DN/67/798/04013. Bedfordshire, England
- Bailey B J.** (2000). Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. *Acta Horticulturae*, **534**, 21-30
- Baille A** (1999). Energy cycle. In *Greenhouse ecosystems*, Vol. 20, pp. 423 [G Stanhill and H Z Enoch, editors]. Elsevier, The Netherlands
- Baille M; Baille A; Tchamitchian M** (1990). A simple model for the estimation of greenhouse transmission : influence of structures and internals equipment. *Acta Horticulturae*, **281**, 35-45
- Baille A; Lopez J.C; Bonachela S; Gonzalez-Real M.M; Montero J.I.**, 2006, Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse, *Agricultural and Forest Meteorology.*, 137, 107-118.
- Baptista F J; Bailey B J; Randall J M; Meneses J F** (1999). Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **72**, 363-374
- Bartzanas T; Boulard T; Kittas C** (2002). Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Computers and electronics in agriculture*, **34**, 207-221
- Bartzanas T; Boulard T; Kittas C** (2004). Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, **88**(4), 479-490
- Bordes P** (1993). Serres. In *Traité Construction. Généralités*. Ref CB-C 4 145 *Techniques de l'ingénieur*, Vol. *Traité Construction. Généralités*, pp. 15. *Techniques de l'ingénieur*, Paris
- Bot G P A** (1983). Greenhouse climate: from physical processes to dynamic model. Ph. D. Dissertation, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 240pp
- Boulard T; Baille A** (1995). Modeling of Air Exchange-Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **61**(1), 37-47
- Boulard T; Draoui B** (1995). Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **61**, 27-36
- Boulard T; Haxaire R; Lamrani M A; Roy J C; Jaffrin A** (1999). Characterization and modelling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **74**, 135-144
- Boulard T; Kittas C; Papadakis G; Mermier M** (1998). Pressure field and airflow at the opening of a naturally ventilated greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **71**, 93-102

- Boulard T; Kittas C; Roy J C; Wang S** (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, part 2: Determination of the distributed greenhouse climate. *Biosystems Engineering*, **83**(2), 129-147
- Boulard T; Meneses J F; Mermier M; Papadakis G** (1996). The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, **79**(1-2), 61- 77
- Boulard T; Papadakis G; Kittas C; Mermier M** (1997). Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. *Agricultural and forest Meteorology*, **88**, 111-119
- Boulard T; Wang S** (2002a). Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and electronics in agriculture*, **34**, 173-190
- Boulard T; Wang S** (2002b). Hétérogénéité des transferts convectifs et radiatifs dans un tunnel plastique: conséquences sur la transpiration des cultures. *Plasticulture*, **121**, 23-35
- Boulard T; Wang S; Haxaire R** (2000). Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**, 169-181
- Breuer J J G; Short T H** (1985). Greenhouse energy demand comparisons for the Netherlands and Ohio U.S.A. *Acta Horticulturae*, **174**, 145-153
- Campen J B; Bot G P A** (2003). Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, **84**(1), 69- 77
- Chiapale J P; Kittas C; de Villèle O** (1981). Estimation régionale des besoins de chauffage des serres. [Regional assessment of greenhouse heating requirements.]. *Acta Horticulturae*, **115**, 493-502
- De Halleux D** (1989). Dynamic model of heat and mass transfer in greenhouses: theoretical and experimental study. PhD Thesis, Gembloux, Belgium
- De Halleux D; Nijkens J; Deltour J** (1991). Adjustment and validation of a greenhouse climate dynamic model. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, **26**, 429– 453
- de Jong T** (1990). Natural ventilation of large multi-span greenhouses. Thèse de doctorat, Agricultural University Wageningen.
- Deltour J** (1985). Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouse. *Acta Horticulturae*, **1974**, 119-126
- Fatnassi H; Boulard T; Bouirden L** (2003). Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology*, **118**, 97-111
- Fatnassi H; Boulard T; Bouirden L; Sappe G** (2002). Ventilation performances of a large canarian type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Acta Horticulturae*, **578**, 79-88
- Fernandez J E; Bailey B J** (1992). Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and forest Meteorology*, **58**, 229-245
- Garzoli K; Blackwell J.** (1987). An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse. *Agricultural Engineering Research*. **36**: 75-85.
- Gourdin A ; Boumahrat M.** (1991). Méthodes numériques appliqués. Office des Publications Universitaires Alger, pp: 235-267

- Guyot G** (1999). Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Masson, Paris (F.).
- Haxaire R** (1999). Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre. Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, Nice, 1-148
- Hill J.M.** (2006). Dynamic modeling of tree growth and energy use in a nursery greenhouse using Matlab and Simulink. Master thesis. Cornell University, UK.
- Holman J.P.** (1997) Heat Transfer. eighth ed. McGraw-Hill Companies Inc.
- Hurd R G; Sheard G F.** (1981). Fuel Saving in Greenhouses: the Biological Effects. In Grower Books, Vol. 22, pp. 1–53. London
- Impron I; Hemming S; and Bot G.P.A.** (2007). Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland, Biosystems Engineering. 98:79-89.
- Issanchou G .** (1991). Modélisation énergétique des serres. Contribution à la mise au point d'un logiciel de thermique appliqué à l'ingénierie des serres. Thèse de doctorat, Université de Perpignan.
- Joliet O ; Danoly L ; Gay J.P ; Munday G.L. Reist, A.** (1991). HRTICERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse, Agricultural and Forest Meteorology. 55:265-294.
- Joliet O** (1988). Modélisation du comportement thermique d'une serre horticole. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Karadag, R.** (2009). The investigation of the relation between radiative and convective heat transfer coefficients at the ceiling in a cooled ceiling room, Energy Conversion Management. 50: 1-5.
- Kacira M; Short T H; Stowell R** (1998). A CFD evaluation of naturally ventilated multispans, sawtooth greenhouses. Transaction of the ASAE, **41**(3), 833-836
- Kimball B A** (1986). A modular energy balance program including subroutines for greenhouses and other latent devices. Agricultural Research Service,
- Kindellan M** (1980). Dynamic modelling of greenhouse environment. Transactions of the ASAE, **23**, 1232-1239
- Katsoulas N; Baille A ; Kittas C.** (2007). Leaf boundary conductance in ventilated greenhouses: An experimental approach, Agricultural and Forest Meteorology. 144:180-192.
- Kimball B. A.** (1973). Simulation of the energy balance of a greenhouse, Agricultural Meteorology. 11:243-260
- Kittas C.** (1986). Greenhouse cover conductance. Boundary Layer Meteorology. 36: 213-225
- Kittas C.** (1980). Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres : application à l'analyse du déterminisme des températures de la paroi et de l'air intérieur de la serre. Thèse Docteur-Ingénieur, Université de Perpignan, Montpellier, 161
- Kittas C.** (1994). Détermination du coefficient global de transmission de chaleur à travers la paroi d'une serre. Agricultural and forest Meteorology, **69**, 205-221
- Kittas C; Boulard T; Bartzanas T; Katsoulas N; Mermier M** (2002). Influence of an insect screen on greenhouse ventilation. Transaction of the ASAE, **45**(4), 1083-1090
- Kittas C; Boulard T; Mermier M; Papadakis G** (1996). Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. Journal of Agricultural Engineering Research, **65**(1), 37-49

- Lamrani M A; Boulard T; Roy J C; Jaffrin A** (2001). Airflows and temperature patterns induced in a confined greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **78**(1), 75-88
- Lee I-B; Short T H** (1998a). A CFD model of volumetric flow rates for a naturally ventilated, multi-span greenhouse. 92nd Annual International Meeting of ASAE, Paper No 987011, Orlando, Florida, USA, July 12-16
- Lee I-B; Short T H** (1998b). Predicted effects of internal horizontal screens on natural ventilation of a multi-span greenhouse. 91st Annu. Int. Meeting of ASAE, Paper No 987014, Orlando, Florida, USA, July 12-16.
- Lee I-B; Short T H** (2000). Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transaction of the ASAE*, **43**(3), 745-753
- Miguel A F; van de Braak N J; Silva A M; Bot G P A** (1998). Physical Modelling of Natural ventilation Through screens and Windows in Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **70**, 165-176
- Mesmoudi K; Adjroudi R; Soudani A; Bougoul S.** 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 (ICRESD_07), Tlemcen May 2007.
- Mesmoudi K; Soudani A; Serir L.** 2008, Modèle de Bilan Energétique d'une Serre en Verre Sans Couvert Végétale, *Revue des Energies Renouvelables.*, 1 (11), 51-64.
- Mesmoudi K; Soudani A; and P.E Bournet.** The determination of the inside air temperature of a greenhouse with tomato crop, under hot and arid climates, *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, Vol. 5 N°2 (2010) 114-127.
- Miguel A.F; Van de Braak N.J; Silva A.M; Bot G.P.A.** (1998). Free convection heat transfer in screened greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69: 133–139
- Molina-Aiz F.D; Valera, D.L; Alvares A.J.** (2004). Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouse using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125:33-51
- Monteith J L; and M Unsworth.** (1990). *Principles of Environmental Physics*. 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth Heinemann.
- Mistriotis A; Arcidiacono C; Picuno P; Bot G P A; Scarascia-Mugnozza G** (1997a). Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero-and low-wind-speeds. *Agricultural and forest Meteorology*, **88**, 121-135
- Mistriotis A; Bot G P A; Picuno P; Scarascia-Mugnozza G** (1997b). Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **85**, 217-228
- Molina-Aiz F D; Valera D L; Alvarez A J** (2004). Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agricultural and forest Meteorology*, **125**(1-2), 33-51
- Monteith J L** (1973). *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, New York
- Montero J I; Anton A; Kamaruddin R; Bailey B J** (2001). Analysis of thermally driven ventilation in tunnel greenhouses using small scale models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **79**(2), 213-222
- Montero J I; Munoz P; Anton A; Iglesias N** (2005). Computational fluid dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. *Acta Horticulturae*, **691**(1), 403-409

- Morales M I; Castilla N** (2004). A Study of Direct Solar Radiation Transmission in Asymmetrical Multi-span Greenhouses using Scale Models and Simulation Models. *Biosystems Engineering*, **88**(2), 243-253
- Nebballi 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 Horticulturae*, **719**, 295-302
- Nijkskens J; Deltour J; Courtisse S; Nisen A** (1984). Heat transfer through covering materials of greenhouses. *Agricultural and forest Meteorology*, **33**, 193-214
- Ould Khaoua S.A; Bournet P.E; Migeon C; Boulard T; Chassériaux G.** 2006, Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics, *Biosystems Engineering.*, 95 (1), 83-98.
- Papadakis G ; Frangoudakis S ; Kyritsis S.** (1992). Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover. *Agricultural Engineering Research*; 51: 191-205.
- Pieters J.G; Deltour M.J.J; Debruyckere M.J.G.** (1995). Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night. *Agricultural Research*, 61: 165-171.
- Papadakis G; Frangoudakis A; Kyristis S** (1994). Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **57**, 217-227
- Papadakis G; Mermier M; Meneses J F; Boulard T** (1996). Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **63**, 219-228
- Roy J C; Boulard T; Kittas C; Wang S** (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, **83**(1), 1-20
- Roy J.C; Boulard T; Kittas C; Wang S.** (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouse, Part II. *Biosystems Engineering*, 83: 1-20.
- Silva A. M.** (1988). A contribution to the study of the greenhouse climate, analysis of some processes of energy transfer. PhD thesis. University of Evora. Portugal.
- Siginer I; Kantz D; Peiper UM; Levav N.** (1988). Transfer coefficient of several polyethylene greenhouse covers. *Agricultural Engineering Research* 39: 19-37.
- Sase S; Takakura T; Nara M** (1984). Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae*, **148**, 329-336
- Shilo E; Teitel M; Mahrer Y; Boulard T** (2004). Air-flow patterns and heat fluxes in roofventilated multi-span greenhouse with insect-proof screens. *Agricultural and forest Meteorology*, **122**(1-2), 3-20
- Sauser B J; Giacomelli GA** 1998. Modeling the effect of air temperature perturbations for control of tomato plant development. *Acta Horticulturae*, (456), 87-92.
- Stanghellini C.** (1993). Mixed convection above greenhouse crop canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*; 66: 111-117.
- Stanhill G; Fuchs M; Bakker J; Moreshet S** (1973). The radiation balance of a glasshouse rose crop. *Agricultural Meteorology*, **11**, 385-404
- Takakura T; Jordan K A; Boyd L L** (1971). Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Transaction of the ASAE*, **14**(5), 964-971
- Teitel M; Tanny J** (1999). Natural ventilation of greenhouses: experiments and model. *Agricultural and forest Meteorology*, **96**(1-3), 59-70

- Uchida Frausto H; Pieters J.G; Deltour J.M.** 2003, Modeling greenhouse temperature by means of auto regressive models, *Biosystems Engineering.*, 84 (2), 147-157.
- Urban L** (1997). Introduction à la production sous serre. La gestion du climat
- Vandaele L; Wouters P** (1994). Modeling ventilation: basic mechanisms. Documentation for BAG Meeting on Ventilation Related Aspects in Buildings, pp 1-25
- Von Elsner B; Briassoulis D; Waaijberg D; Mistriotis A; Von Zabeltitz C; Grataud J; Russo G; Suay-Cortes R** (2000). Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union Countries: Part I, design requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **75**, 1-16
- Waaijberg D** (1995). Greenhouse construction and equipment. In *Greenhouse climate control. An integrated approach*, Vol. pp. 279 [J C Bakker, G P A Bot, H Challa and N J Van de Braak, editors]. Wageningen Pers, The Netherlands
- Wacquant C** (2000). La construction des serres et abris. Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Paris
- Wang S** (1998). Measurement and modeling of natural ventilation in a large Venlo-type greenhouse. Thèse de Doctorat, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique
- Wang S; Deltour J** (1999). Lee-Side ventilation-induced air movement in a large-scale multispan greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **74**, 103-110
- Yang X** (1995). Comments on 'thermal and aerodynamic conditions in greenhouses in relation to estimation of heat flux and evapotranspiration. *Agricultural and forest Meteorology*, **77**, 131-136
- Zhang Y; Gauthier L; de Halleux D; Dansereau B; Gosselin A.** (1996). Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 82: 227-44.

Annexes

Annexe A

La puissance du Flux de chaleur convectif échangé entre la couverture et l'air extérieur est :

$$Q_{cae}^C = h_e \cdot S_c \cdot (T_c - T_{ae}) \quad (A1)$$

La puissance du flux de chaleur convectif échangé entre l'air intérieur et la couverture est définie par :

$$Q_{aic}^C = h_i \cdot S_c \cdot (T_{ai} - T_c) \quad (A2)$$

La chaleur du flux représentant le transfert d'enthalpies résultant de la condensation de la vapeur d'eau de l'air intérieur sur la face interne de la couverture est définie par :

$$Q_{aic}^L = L \cdot k \cdot S_c \cdot (E_{ai} - E_{ais}) \quad (A3)$$

La puissance du flux de chaleur convectif échangé entre le sol abrité et l'air intérieur est définie par :

$$Q_{Sai}^C = h_i \cdot S_s \cdot (T_s - T_{ai}) \quad (A4)$$

Le flux de chaleur convectif dû aux fuites d'air est :

$$Q_{aiae}^C = \frac{(T_{ai} - T_{ae}) \cdot C_m \cdot \rho \cdot \mathcal{R} \cdot V}{3600} \quad (A5)$$

La chaleur latente de l'évaporation du sol captée par l'air intérieur est définie par:

$$Q_{Sai}^L = L \cdot k \cdot S_s \cdot (E_s - E_{ai}) \quad (A6)$$

$$L = 752.5 - 0.568 \left[\frac{273(T_s - T_{ai})}{2} \right] \quad (A7)$$

Le flux de chaleur correspondant aux transferts d'enthalpies de l'air intérieur vers l'air extérieur par le phénomène des fuites d'air à travers les assemblages de la serre est définie par:

$$Q_{aiae}^L = \frac{(E_{ai} - E_{ae}) \cdot L_p \cdot \mathcal{R} \cdot V}{3600} \quad (A8)$$

La puissance du flux de conduction entre deux couches successives du sol est définie par :

$$Q_s^D = \frac{\lambda}{e} \cdot S_s \cdot (T_s - T_{s_1}) \quad (\text{A9})$$

La puissance du flux de rayonnement solaire absorbée par la couverture est :

$$Q_c^S = (\alpha_c - \tau_c - \rho_c) \cdot E_g \cdot S_c \quad (\text{A10})$$

La puissance du flux de rayonnement solaire absorbé par le sol de la serre est définie par:

$$Q_s^S = (\alpha_s - \tau_s - \rho_s) \cdot \tau_c \cdot S_s \cdot E_g h \quad (\text{A11})$$

Les pertes de chaleur entre la couverture et l'air extérieur sont données par:

$$Q_{cae} = Q_{cae}^L + Q_{cae}^C \quad (\text{A12})$$

Les pertes de chaleur entre l'air intérieur et l'air extérieur sont :

$$Q_{fuit} = Q_{aiae}^C + Q_{aiae}^L \quad (\text{A13})$$

La chaleur du flux de rayonnement solaire global capté par les éléments de la serre est définie par :

$$Q_{tot}^S = Q_s^S + Q_c^S \quad (\text{A14})$$

Le bilan global de la puissance du flux radiatif infrarouge des éléments de la serre est exprimé par :

$$Q_{tot}^I = Q_c^I + Q_s^I \quad (\text{A16})$$

Annexe B

La relation (B1) représente le flux de conduction entre la surface du sol de la serre et la couche située à 40 cm de profondeur, et la relation (B2) représente le flux de conduction à travers l'épaisseur de la paroi de la couverture de la serre.

$$Q_g^{cod} = \frac{\lambda_g}{z_g} (T_g - T_{g1}) \quad (B1)$$

$$Q_c^{cod} = \frac{\lambda_c S_c}{z_c S_g} (T_{ci} - T_{ce}) \quad (B2)$$

Le taux de renouvellement d'air \mathfrak{R} dans une serre fermée est donné par la relation (B3) utilisée pour le calcul des infiltrations d'air dans les immeubles évoquée et utilisée par Joliet (1988) pour le calcul des fuites dans une serre fermée de type Venlo.

$$\mathfrak{R} = S_f \sqrt{0.046 U_e^2 + 0.020 (T_{ai} - T_{ae})} \quad (B3)$$

La chaleur latente de condensation sur la paroi intérieure de la couverture de la serre est donnée par :

$$Q_{gai}^{lat} = \varphi_{vap} L_v \quad (B4)$$

Où φ_{vap} est le débit massique, il est calculé par la relation (B5):

$$\varphi_{vap} = \kappa \frac{S_c}{S_g} \rho_{ai} (\chi_{ai} - \chi_{aic}^*) \quad (B5)$$

Avec, κ est la conductance du transfert de masse en (m/s), χ_{ai} est l'humidité absolue de l'air, et χ_{aic}^* est l'humidité absolue saturante de l'air à la température de la face intérieur de la couverture.

$$\chi_{ai} = \frac{M_w}{M_{ai}} \frac{e_{ai}}{Pa} \quad (B6)$$

D'après (B4) (B5) et (B6) le flux de la chaleur latente de condensation Q_{gai}^{lat} peut s'écrire:

$$Q_{gai}^{lat} = \kappa \rho_{ai} \frac{S_c M_w}{S_g M_{ai} Pa} (e_{ai} - e_{aic}^*) \quad (B7)$$

D'après la relation de Monteith (1990) citée par Stanghellini (1995) la conductance du transfert de masse de la vapeur d'eau κ peut être calculée à partir des températures virtuelles de l'air intérieur et de la face intérieure de la couverture (\ddot{T}_{ai} et \ddot{T}_{ci}) respectivement par la relation (B8) :

$$\kappa = 1.64.10^{-3}(\ddot{T}_{ai} - \ddot{T}_{ci}) \quad (\text{B8})$$

Chaque température virtuelle est déterminée par la relation (B9) évoquée par J M Hill (2006).

$$\ddot{T} = \frac{T}{1 - 0.37 \frac{e}{Pa}} \quad (\text{B9})$$

D'où le flux de la chaleur latente de condensation sur les parois interne de la serre peut s'écrire sous la forme de la relation (B10):

$$Q_{aici}^{lat} = 1.64.10^{-3}(\ddot{T}_{ai} - \ddot{T}_{ci})L_v\rho_{ai} \frac{S_c}{S_g} \frac{M_w}{M_{ai}} \left[\frac{(e_{ai} - e_{aici}^*)}{Pa} \right] \quad (\text{B10})$$

Avec $M_w = 0.018 \text{kg/mol}$ $M_{ai} = 0.029 \text{kg/mol}$

La pression de vapeur de saturation de l'air en fonction de la température de l'air intérieur T_{ai} est donnée par la relation (B11) donnée par la NASA (2005) citée par Impron (2007).

$$e_{ai}^* = 2.22 \cdot 10^{11} e_{ai}^{\left(\frac{-5385}{T_{ai}}\right)} \quad (\text{B11})$$

La pression de vapeur de l'air peut être calculée à partir de la formule de Tentens (1973) (B11b).

$$e_{ai} = 6.1070 \cdot 10^{7.5T/(2373+T)} \quad (\text{B11b})$$

Le bilan radiatif net sur la surface du sol de la serre décrit par la relation (B12) d'après Singh (2006), doit faire intervenir le flux radiatif émis par le sol de la serre et celui reçus par ce dernier à partir de la paroi intérieure de la couverture:

$$Q_g^{inf} = -\varepsilon_g \sigma T_g^4 S_g + \varepsilon_c \sigma T_{ci}^4 S_c \alpha_{gt} f_{cig} \quad (\text{B12})$$

Le bilan radiatif net sur la face intérieure de la couverture de la serre décrit par la relation (B13) d'après Singh (2006), il fait intervenir le flux radiatif émis par le sol de la serre et reçue par cette face, et le flux émis par la face intérieure de la couverture vers le sol de la serre:

$$Q_{ci}^{inf} = -f_{cig} \varepsilon_c \sigma T_{ci}^4 S_c + \alpha_{ct} \varepsilon_g \sigma T_g^4 S_g \quad (\text{B13})$$

D'après Kittas (1986) et Singh (2006) le bilan radiatif net sur la face extérieure de la couverture peut être calculé à partir du flux radiatif émis par cette face vers l'extérieur, le flux radiatif reçu par cette face à partir du ciel et le flux radiatif émis par le sol extérieur vers la surface. Le bilan radiatif sur la face extérieure de la couverture est donné par la relation (B14):

$$Q_{ce}^{inf} = -f_{cesky} \varepsilon_c \sigma T_{ce}^4 S_c + f_{cesky} \alpha_{ct} \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 S_c + f_{cege} \alpha_{ct} \varepsilon_g \sigma T_{ge}^4 S_c \quad (B14)$$

La température du ciel T_{sky} est donnée en fonction de la température extérieure T_{ae} , de l'éclairement solaire global Eg et de la nébulosité du ciel Nub par la relation (B15) donnée par Aubinet (1994).

$$T_{sky} = 94 + 12.6 \ln(Eg) - 13N_{ub} + 0.34T_{ae} \quad (B15)$$

Annexe C

Expressions Mathématique des flux Radiative :

R_1 , est le flux radiatif émis par le sol de la serre et absorbé par la face intérieure de la couverture. R_2 , est le flux radiatif émis par le toit de la serre et absorbé par la face intérieure de la couverture. R_3 , est le flux radiatif émis par le ciel et absorbé par la face extérieure de la couverture de la serre. R_{ci} , est le flux radiatif émis par la face intérieure de la couverture de la serre. R_{co} , est le flux radiatif émis par la face extérieure de la couverture de la serre.

R_{sky} , est le flux radiatif émis le ciel. Ces flux radiatifs sont donnés par les expressions suivantes :

$$R_1 = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \alpha_{ci} / (1 - \rho_s \rho_{ci}) \quad (C1)$$

$$R_2 = \varepsilon_{ci} \sigma T_{ci}^4 \rho_s \alpha_{ci} / (1 - \rho_s \rho_{ci}) \quad (C2)$$

$$R_3 = \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 \tau_c \rho_s \alpha_{ci} / (1 - \rho_s \rho_{ci}) \quad (C3)$$

$$R_{ci} = \varepsilon_{ci} \sigma T_{ci}^4 \quad (C4)$$

$$R_{co} = \varepsilon_{co} \sigma T_{co}^4 \quad (C5)$$

$$R_{sky} = \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 \quad (C6)$$

$$\text{Avec } T_{sky} = 0.0552 T_{ao}^{1.5} \quad (C8)$$

Ou ε_s , est l'émissivité du sol ; ε_{sky} , est l'émissivité du ciel ; ε_{ci} and ε_{co} sont les émissivités des faces intérieure et extérieure de la couverture de la serre, σ est la constante de Stefan Boltzmann ($=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), α_{ci} est le coefficient d'absorption (Rayonnements thermique) de la face intérieure de la couverture de la serre ; τ_c est le coefficient de transmission (Rayonnements thermique) de la couverture ; ρ_s , est le coefficient de réflexion (Rayonnements thermique) de la surface du sol abrité par la serre ($=0.05$); ρ_{ci} est le coefficient de réflexion (Rayonnements thermique) de la face intérieure de la couverture de la serre ($=0.1$), et ρ_{co} est le coefficient de réflexion (Rayonnements thermique) de la face extérieure de la couverture de la serre ($=0.1$). Les températures $T_s, T_{ci}, T_{co}, T_{ao}, T_{sky}$ sont respectivement: la température du sol de la serre, la temperature de la face intérieure de la couverture, la température de la face extérieure de la couverture, la température de l'air extérieur, et la température du ciel (K).

	Absorptivité = Emissivité $\alpha = \varepsilon$	Réfectivité ρ	Transmissivity τ
Ciel	1.00	0.00	0.00
Verre Horticole, co	0.90	0.10	0.00
Verre Horticole, ci	0.90	0.10	0.00
Sol	0.95	0.05	0.00

Tableau C 9 : constantes utilisées dans le calcul des flux radiatifs

Nombres adimensionnel et caractéristiques physiques de l'air:

Les nombre de Grashof, de Prandtl, est de Reynolds sont définies comme suit:

$$Gr = \frac{\beta L^3 g \Delta T}{\nu_m^2} \quad (C10)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (C11)$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (C12)$$

Avec β est le coefficient d'expansion de l'air (0.00342 K⁻¹); L , est la longueur caractéristique de la surface (m); g , est l'accélération de pesanteur (9.81m s⁻¹); ΔT , est le gradient de température entre la surface et l'air environnant ; ν_m , est la viscosité cinématique de l'air, estimée a partir de la température moyenne de la surface (m² s⁻¹) ; μ , est la viscosité dynamique de l'air calculée a partir de la température du fluide (Kg m⁻¹ s⁻¹) ; c_p , est la chaleur spécifique de l'air (1004 J kg⁻¹ K⁻¹) ; λ , est la conductivité thermique de l'air (W m⁻¹ K⁻¹) ; et U the speed of the air (in m s⁻¹). Les quantités (ρ , λ et μ) sont calculées on utilisant les expressions suivantes données par Molina-Aiz F D et.al (2004):

$$\rho = \frac{(101354)}{(287.05T_a)} \quad (C13)$$

$$\lambda = \frac{(2.5 \cdot 10^3 T_a^{1.5})}{(T_a + 194.44)} \quad (C14)$$

$$\mu = \frac{(1.4592 \cdot 10^{-6} T_a^{1.5})}{(T_a + 110.56)} \quad (C15)$$

Avec T_a est la température de l'air (K).

Annexe D Travaux et Publications

Publications dans des revues avec comité de lecture

- 1- **K. Mesmoudi; A. Soudani; P.E. Bournet.** The determination of the inside air temperature of a greenhouse with tomato crop, under hot and arid climates, Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, Vol. 5 N°2 (2010) 114-127.
- 2- **K. Mesmoudi; A. Soudani; L. Serir.** Modèle de bilan énergétique d'une serre agricole sans couvert végétal, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 51 – 64.

Congrès internationaux avec comité de lecture

- 1- **K. Mesmoudi; A. Soudani; P.E. Bournet; S. Bougoul ;** Convection Heat Transfer Conductance at the Greenhouse Cover. Second International Conference on Energy Conversion and Conservation, CICME'2010, Hammamet (El Mouradi), April 22-25, 2010 – Tunisia
- 2- **K. Mesmoudi; A. Soudani; P.E. Bournet; S. Bougoul ;** On the Determination of the Convection Heat Transfer Conductance at the Greenhouse Cover. Under hot and arid climates. International Conference of horticultural , IHC'2010, Lisbon , August 23-25, 2010 – Lisbon Portugal

Congrès nationaux avec comité de lecture

- 1- **K. Mesmoudi; A. Soudani; P.E. Bournet; S. Bougoul ;** Méthode de détermination de la température de l'air intérieur d'une serre agricole Sans Couvert Végétale, installée dans la Région des Hauts Plateaux Est d'Algérie. ICRE'09, Bejaia 12-16 novembre 2009- Algérie
- 2- **K. Mesmoudi; A. Soudani; R. Adjroudi ; S. Bougoul ;** 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. ICRESO_07, Tlemcen 21-24 mai 2007. ALGÉRIE
- 3- **K. Mesmoudi; A. Soudani; R. Adjroudi ; L. Serir ; S. Bougoul ;** Bilan Energétique d'une Serre en Verre Sans Couvert Végétale, dans la Région des Hauts Plateaux Est d'Algérie; Etude Expérimentale. ICRE'07, Bejaia 23-26 novembre 2007. ALGÉRIE
- 4- **L. Serir ; H. Benmoussa ; K. Mesmoudi;** Possibilités et limites du Système de Rafraîchissement des Serres Agricoles dans la Zone Climatique du littoral. ICRE'07, Bejaia 23-26 novembre 2007. ALGÉRIE.

Résumé

Le micro climat de la serre dépend étroitement du climat extérieur (Etage bioclimatique de la région). Ainsi l'étude du climat de la serre permet de contrôler les paramètres de ce même climat tels que les concentrations de gaz comme le CO₂ par exemple. Ce contrôle est essentiel pour maintenir les plantes dans des conditions métaboliques favorables (respiration, photosynthèse, transpiration) et dans un état sanitaire satisfaisant. La maîtrise de l'hétérogénéité climatique de la serre et la modélisation de son bilan énergétique sont des approches qui peuvent contribuer d'une manière directe dans la régulation du microclimat de la serre. Notre travail de thèse contribue à l'analyse et à la modélisation de quelques mécanismes physiques intervenant dans la variation de ce micro climat. Les serres expérimentées sont deux serres de type Venlo, ce type de serre est habituellement utilisées en culture ornementale (plantes en pots). Les serres expérimentées étaient installées sous des conditions climatiques appartenant à un étage bioclimatique semi aride (Hauts plateaux Est d'Algérie). Deux approches incluant expérimentation *in situ* et modélisation mathématique ont été mises en œuvre. Les campagnes de mesures ont été menées sur les deux serres, dans leur environnement immédiat et sous des conditions réelles de culture. L'ensemble de ces mesures ont constitué un jeu de données conséquent destiné à fournir les données nécessaires pour l'établissement, le calage, et la vérification des modèles établis par cette étude. Des approches purement expérimentales ont été mises en œuvre : i) Une approche pour l'étude de l'hétérogénéité climatique de la serre (hétérogénéité de la distribution de la température de l'air intérieur de la serre) ; ii) Une approche pour l'établissement d'un modèle semi empirique du contrôle du climat de la serre; iii) Une approche pour la détermination d'un modèle de température de l'air intérieur de la serre; vi) Une approche pour l'étude du bilan énergétique nocturne de la serre a été également mise en œuvre, et les résultats montrent que le sol de la serre en tant que source importante de chaleur en période nocturne dans la région, suggèrent l'installation d'un système qui peut valoriser cette source d'énergie, afin d'augmenter l'efficacité des serres dans la région ; v) En cinquième et dernière phase, une approche expérimentale pour la détermination des coefficients d'échange convectif près de la paroi de la serre a été établie, et les résultats montrent que les nouvelles corrélations pourraient être employées dans le calcul des échanges de chaleur convectif à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre de type de Venlo sous des conditions climatiques semblables à celle du climat aride et semi aride.

Mots clés : *Serre agricole, Climat semi aride, Hétérogénéité du climat sous serre, Bilan énergétique, Modèle de température, Modèle de bilan énergétique, Coefficients d'échange convectif.*

Abstract

The micro climate of the greenhouse depends closely on the external climate (bioclimatic Stage of the area). Thus the study of the climate of the greenhouse makes it possible to control the parameters of this same climate such as the gas concentrations like CO₂. This control is essential to maintain canopy under favorable metabolic conditions and in a satisfactory state (photosynthesis, transpiration). The control of the climatic heterogeneity of the greenhouse and the modeling its energy balance are all approaches which can contribute directly in the regulation of the microclimate of the greenhouse. This study contributes to the analysis and the modeling of some physical mechanisms intervening in the variation of the micro climate of the greenhouse. The tested greenhouses are two greenhouses (Venlo type), usually used in horticultural culture. Greenhouses were installed under semi arid climatic conditions (high plateaus of Algeria). Two approaches including: Experimentation *in situ* and mathematical modeling of the climatic parameters are implemented. Series of measurements were carried out on the two greenhouses, under real conditions of culture. The whole of these measurements constituted a consequent file intended to provide the data necessary for the establishment, and the checking of the models established by this study. Experimental approaches were put opens: i) an approach for the study the climatic heterogeneity of the greenhouse; ii) an approach to establish an empirical model of the control of the greenhouse climate; iii) an approach for the determination of a model of the inside air temperature of greenhouse; vi) an approach for the study of the night energy balance of the greenhouse was also put opens, and the results show that the ground of the greenhouse as a significant source of heat at nocturnal period in the area, suggest the installation of a system which can develop this source of energy, in order to increase the effectiveness of the greenhouses in the area; v) In fifth phase, an experimental approach for the determination of the convective heat exchange coefficients near the cover of the greenhouse was established, and the results show that the new correlations could be employed to calculate the convective heat transfers inside and outside a Venlo type greenhouse under similar climatic conditions (the arid and semi arid climate).

Keywords: *Greenhouse, Semi arid climate, Heterogeneity of the Climate under Greenhouse, Energy Balance, Model of temperature, Model of Energy Balance, Coefficients of convective heat transfer.*