

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergie renouvelables

Par : KHERBOUCHE Abdallah

Sujet

**Analyse de comportement thermique des
parois transparente a faible 'inertie thermique
application aux serre agricole**

Soutenu publiquement, le 13 /09 / 2019 , devant le jury composé de :

M.HAMOUNI
N.BIBI-TRIQUI
S.AMARA

PRF
PRF
MAA

Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen

Président
Encadreur
Examineur

Introduction Générale

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

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

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

Le choix d'une conception de la serre agricole pour un endroit spécifique sur la planète pour satisfaire les conditions économiques des serristes demeure toujours un défi pour le concepteur. Une approche systématique qui intègre des modèles physiques, biologique et économiques est la manière la plus prometteuse pour la prise de décision stratégique sur la configuration de la serre. Cependant, une méthodologie basée sur une étude comparative du comportement énergétique d'un ensemble de serres sous les mêmes conditions climatiques est une approche simple, qui peut contribuer aux choix du type de la géométrie de la serre pour le développement des cultures abritées dans notre pays, puisqu'un type de serre qui peut satisfaire les serristes pour le développement des différentes variétés et espèces des cultures protégées n'est pas encore disponible. Le problème du choix de la conception peut être considéré comme un problème multidimensionnel. Une telle approche d'optimisation peut être réalisée sur une compensation quantitative entre les retombés économiques à savoir: la récolte et les coûts liés à la construction, l'entretien et l'exploitation de la serre.

Pour résoudre ce problème, nous proposons à travers ce travail, une étude comparative du comportement énergétiques de deux type de serres agricoles, sous un même type de climat, pour contribuer aux choix de type de la serre la mieux rentable énergétiquement pour les serristes dans notre région (climat du sud de l'Algerie) en se basant sur un logiciel de calcul de la dynamique des fluides (CFD Comsol 3.2.1) vu sa réputation dans plusieurs disciplines. Ce travail porte essentiellement sur l'interaction des différents phénomènes existant à l'intérieur de la serre en présence de la culture en mode jour et nuit. Pour cela, on se propose de structurer notre travail de la façon suivante :

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

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

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

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

Chapitre I

1.1 Introduction

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

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

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

1.2 Les différents types de serres

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

L'abri doit dans tous les cas respecter deux contraintes principales : permettre de créer un climat plus favorable aux cultures que le climat extérieur et être suffisamment robuste pour être capable de résister aux vents forts, aux surcharges externes (neige, grêle, ...) ou interne (poids des cultures palissées

portées par la charpente, poids des équipements de chauffage, irrigation, ...), le tout en répondant aux considérations économiques (prix de revient, longévité, etc.).

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

- Les faibles températures extérieures en hiver, engendrant des températures intérieures en dessous de l'optimum biologique, durant les nuits notamment, et rendant nécessaire le chauffage,*
- Les vents importants, les chutes de neiges et de grêle pouvant endommager la structure de la serre,*
- L'éclairement insuffisant en hiver qui réduit considérablement la photosynthèse,*
- Les températures intérieures trop élevées en été et même parfois au printemps qui peuvent être néfastes au végétal,*
- Les taux élevés d'humidité nocturne à l'intérieur de la serre qui augmentent les risques de développement de maladies fongiques.*

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

1.2.1. Les serres tunnels

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



Figure 1.1: Serre tunnel



Figure 1.2: serre à pieds droits

1.2.2 Les serres d'horticultures

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

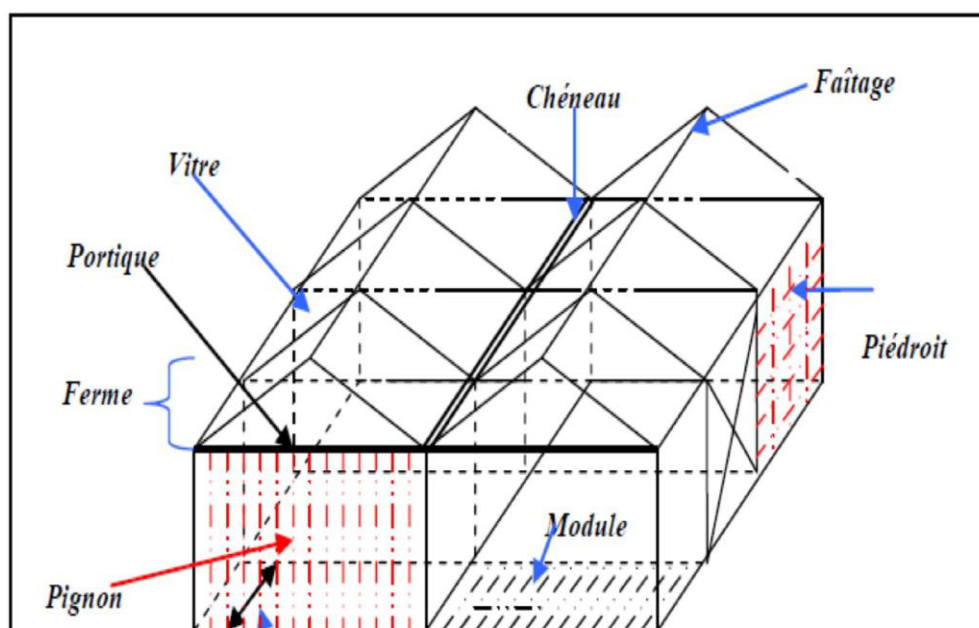


Figure 1.3: Structure d'une Serre d'horticulture constituée de deux chapelles et de trois modules chacune.

1.3. Composantes d'un abri serre

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

- ***L'ossature (armature)***

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

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

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

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

- ***Le verre:***

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière

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

- ***Les matériaux plastiques:***

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

Les matériaux plastiques rigides : On peut citer quatre type principaux de ce type de plastique rigide : Le polyester armé de fibres de verre (PRV), le chlorure de polyvinyle bi orienté (PVC bi orienté), le polycarbonate (PVC), le poly méthacrylate de méthyle (PMMA). Les matériaux plastiques souples (films) : Les

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

1.4. Caractéristiques d'une serre :

1.4.1. Paramètres influents le climat sous serre:

La température, l'humidité, la teneur en CO₂ et la lumière sont les paramètres les plus influents dans la production des plantes. Pour améliorer leurs rentabilités, il est indispensable de faire optimiser le climat environnant aux cultures.

✓ Température

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

- Température issue du sol.*
- Température de la plante.*
- Température ambiante à la culture.*

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

✓ Humidité

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

✓ .La lumière

La lumière joue un grand rôle dans la croissance de la plante car elle intervient dans beaucoup de phénomènes physiologiques et conditionne surtout la photosynthèse. En effet, l'énergie lumineuse fixe dans la plante le gaz carbonique et l'eau de l'air pour produire le sucre et l'amidon. Par conséquent, la croissance et le niveau de production des plantes dépendent fortement de la quantité du soleil que la culture reçoit tout au

long de sa croissance. Toutefois, on peut prolonger ou raccourcir l'éclairage en utilisant respectivement les lumières artificielles ou les stores.

✓ **Teneur en CO₂**

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

✓ **Photosynthèse:**

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

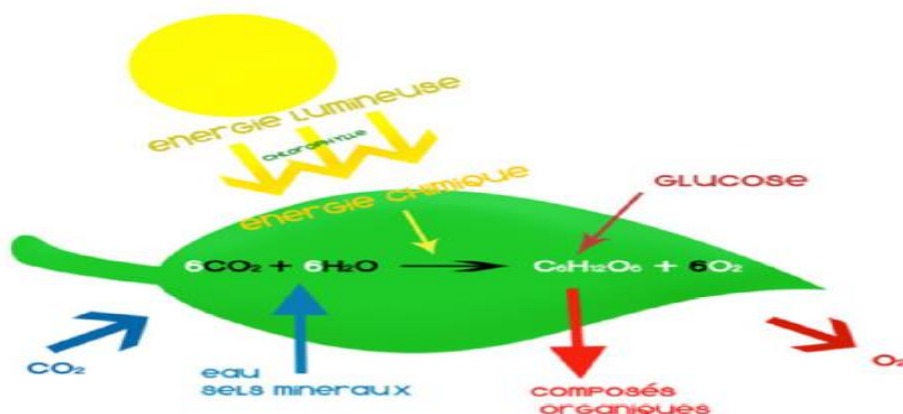


Figure 1.4 : Schéma simplifié de la photosynthèse.

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

✓ **Respiration:**

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

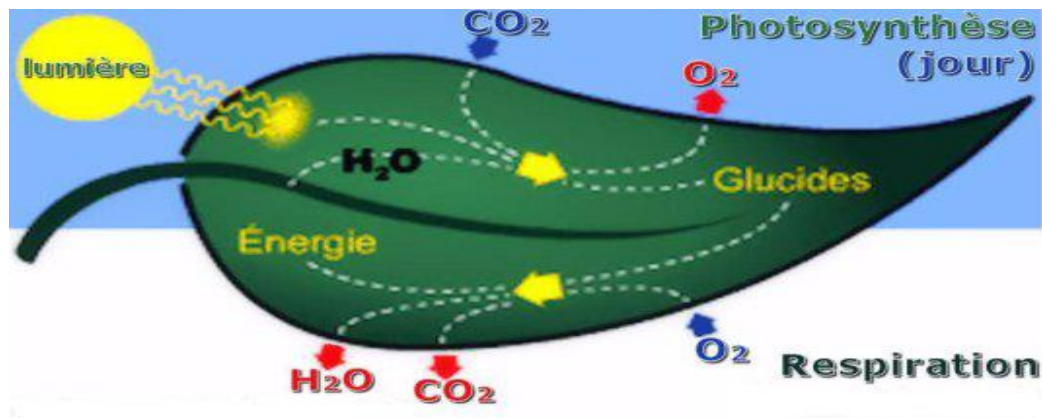


Figure 1.5: schéma du cycle de la photosynthèse et de la respiration chez la plante.

✓ **Transpiration:**

Lors de la photosynthèse les stomates (fig.1.3) s'ouvrent afin de laisser rentrer du CO₂. Il y a alors mise en contact de la solution des feuilles avec l'air extérieur. La différence entre le potentiel hydrique atmosphérique et celui des feuilles induit la sortie de l'eau (présente dans les feuilles) dans l'atmosphère. On appelle ce phénomène la transpiration qui contribue au rafraîchissement des plantes et elle permet le transfert des sels minéraux aux endroits où la plante en a besoin, principalement dans les feuilles qui sont le siège de la photosynthèse.

✓ **Stomates:**

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

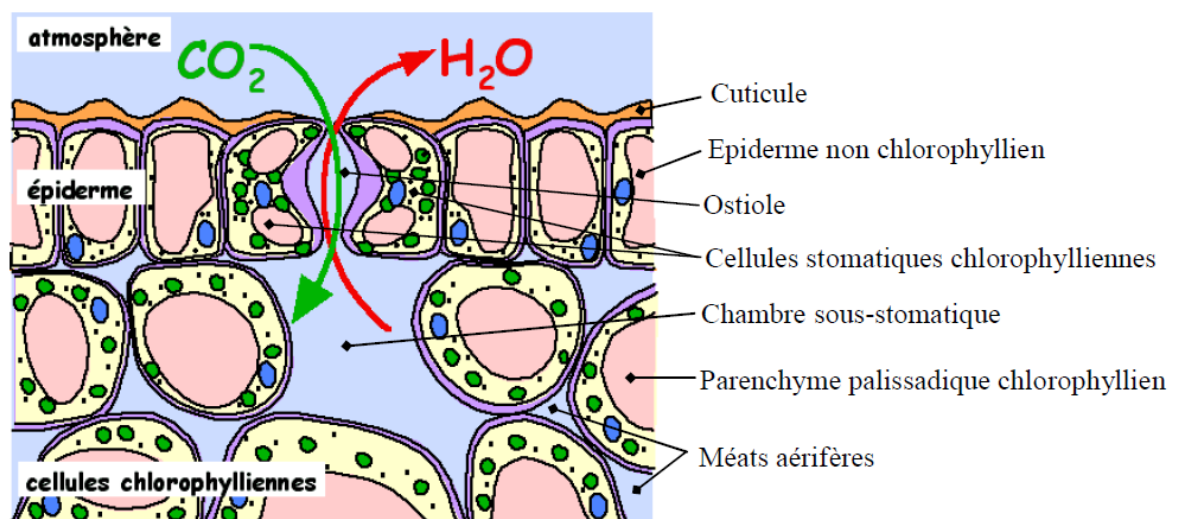


Figure 1.6: Schéma général montrant l'organisation d'une feuille (le stomate est ici ouvert).

1.4.2 Orientation de la serre :

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

1.4.3. Comportement thermique et hydrique sous serre:

La compréhension des différents phénomènes physiques qui interviennent à l'intérieur de la serre et leur interaction nous permet de contrôler la quantité des différents paramètres influents le climat sous serre précités (température, humidité, teneur en CO₂ et lumière

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

- **Echanges thermiques**

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

- **.La conduction :**

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres .

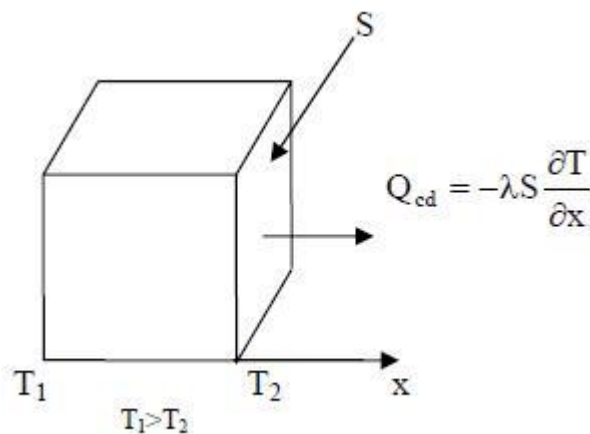


Figure.1.7-: le transfert par conduction

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité du flux est proportionnelle au gradient de température : $\vec{Q}_{cd} = -\lambda \vec{\text{grad}}(T) \dots\dots\dots(I.1)$

Ou sous forme algébrique :

Q_{cd} : flux de chaleur transmis par conduction. (W).

λ : conductivité thermique du milieu. ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$). x

: variable d'espace dans la direction du flux. (m).

S : aire de la section de passage du flux de chaleur. (m^2).

○ **.La convection :**

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

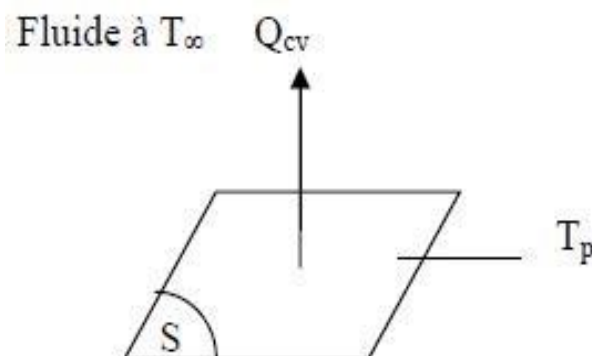


Figure. (1-8): le transfert par convection.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q_{cv} = h_{cv} S (T_p - T_{\infty}) \dots\dots\dots(I.3)$$

Q_{cv} : flux de chaleur transmis par convection. (W).

h_{cv} : coefficient de transfert de chaleur par convection. ($W m^{-2}K^{-1}$).

T_p : température de la surface du solide. (K).

T_{∞} : température du fluide loin de la surface du solide. (K).

S : aire de la surface de contact solide/fluide. (m^2).

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h_{cv} est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

○ **Convection naturelle et convection forcée :**

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

- La convection libre ou naturelle : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).
- La convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...etc.). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

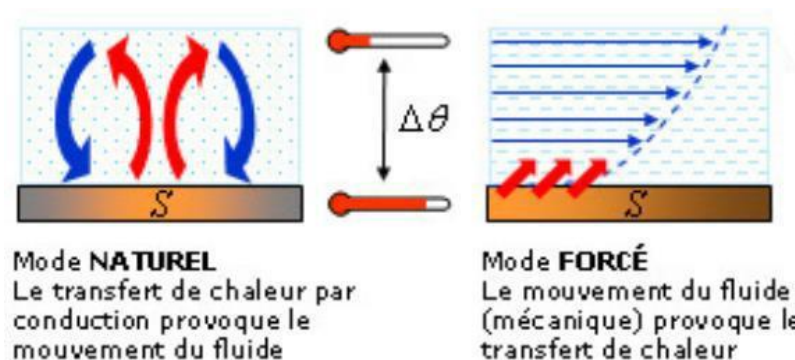


Figure. (1-9): le transfert par convection naturelle et convection forcée.

I.1.4. Le transfert par rayonnement :

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur [3]. Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le corps chaud émet un flux Φ_1 et absorbe une partie du flux Φ_2 émis par le corps froid. Comme $\Phi_1 > \Phi_2$, le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe. [4]

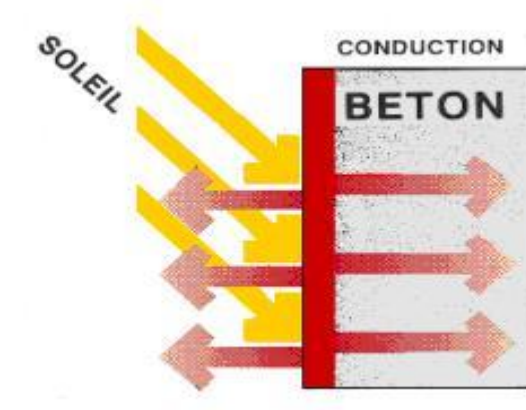


Figure. (I-9):Le transfert par rayonnement.

- **Echange hydrique:**

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

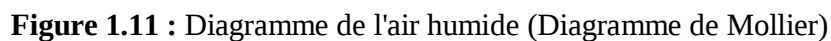
- **Vapeur d'eau**

La quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur d'eau a une influence sur la transpiration des cultures ainsi que sur le risque de condensation. La transpiration des plantes est le phénomène qui permet la circulation de la sève. Plus l'écart de pression de vapeur d'eau (appelé déficit de pression de vapeur d'eau) entre l'air près du végétal et l'air à l'intérieur des feuilles (chambre sous stomatique) est élevé, plus la transpiration est favorisée. Cette transpiration est alors une source de vapeur

d'eau dans l'air au voisinage des cultures. Il résulte de ce phénomène une humidité plus élevée à proximité du végétal que dans le reste de la serre. Pour une serre ouverte, les vitesses de l'air sont plus élevées que pour une serre fermée et cette humidité est convectée (chassée de la serre). L'aération naturelle permet donc de renouveler l'air à proximité du végétal, ce qui maintient un gradient de pression de vapeur d'eau important entre le végétal et l'air. La transpiration étant d'autant plus importante que ce gradient est élevé, ce transfert de vapeur d'eau grâce au mouvement de l'air favorise donc les

pertes hydriques du végétal. Ce transport de vapeur d'eau peut néanmoins avoir lieu lorsque la vitesse de l'air est faible du simple fait de gradient de concentration de vapeur d'eau dans l'air. En effet, en présence de différence de concentration de vapeur d'eau, des phénomènes de diffusion tendent à réduire les hétérogénéités. Il s'agit en fait d'un transfert au niveau microscopique des composantes de l'air sans mouvement macroscopique de l'air. Ce transfert a lieu depuis les zones les plus humides (proches du végétal) vers les zones présentant les concentrations de vapeur d'eau les plus faibles ; en particulier, vers les parois lorsqu'il y a condensation, puisque le phénomène de condensation "soutire" de la vapeur d'eau à l'air. Dans une serre, il est préférable d'éviter la condensation pour deux raisons principales:

- l'apparition d'eau libre sur les feuilles des plantes favorise le développement de certaines maladies (fongiques comme le botrytis par exemple), la formation de gouttes sur les parois de la serre réduit sensiblement la transmission du rayonnement. La condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air se produit lorsque de l'air humide est refroidi jusqu'à atteindre le point de rosée (Figure 1.5). En effet, l'eau se condense quand la pression de vapeur d'eau dans l'air atteint la pression de vapeur saturante (courbe de saturation). Cette pression de vapeur saturante augmente avec la température. Ainsi, un air chaud peut présenter une humidité absolue importante sans qu'il y ait de condensation. Par contre, à humidité absolue constante, si cet air est refroidi, alors son humidité relative (i.e le rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante, usuellement exprimé en pourcentage) augmente jusqu'à atteindre 100% c'est-à-dire le point de rosée : il y a alors condensation.



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

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

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

caractérisée par une température plus élevée et une masse d'air plus humide, la combinaison de l'effet du vent et les forces de flottabilité étaient le moteur du mouvement de cette dernière, contrairement à la masse d'air évacuée par les ouvrants situé au niveau supérieur de la toiture où l'intensité de la température et l'humidité étaient relativement plus faible. Désormais, ces résultats montrent bien que l'augmentation de la ventilation ne peut pas induire automatiquement l'amélioration de l'uniformité et de l'homogénéisation de l'air intérieur. Jusqu'à présent il existe peu d'informations sur le mouvement de l'air affectant l'efficacité du refroidissement et l'uniformité de l'environnement de l'air intérieur de la serre [10]. Ces mêmes résultats ont été rapportés par Bournet et al., (2010) [11].

1.5.3. Effets du Chauffage

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

1.5.4. Effets de la Ventilation

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

important dans la production agricole sous abri serre. Le système de ventilation peut être soit un système passif (ventilation naturelle), ou un système actif (ventilation forcée) en utilisant des ventilateurs mécaniques.

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

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

.La Ventilation Forcée

La ventilation forcée permet d'éviter la condensation de la vapeur d'eau sur les parois de la serre et surtout sur la surface du feuillage des plantes en forçant l'air à circuler à l'intérieur du couvert végétal par l'installation sur deux faces opposées de la serre les installations suivantes: disposés d'une part des ventilateurs mécaniques, et de l'autre part des ouvertures obturables (surfaces d'ouvertures variables). Les inconvénients de ce dispositif sont une répartition des échanges de chaleur et de masse non homogène, ainsi qu'une consommation d'énergie importante, notamment en période estivale [14]. L'efficacité de la ventilation forcée dépend essentiellement de la puissance des ventilateurs et éventuellement du débit d'eau dans le cas d'une ventilation forcée avec apport d'eau (c-à-d cooling system). La ventilation peut être quantifiée par le taux de renouvellement d'air, par la différence de température entre l'air intérieur et extérieur ainsi que par la longueur maximale de balayage d'air entre les deux extrémités de la serre [15]. L'étude réalisée par Hughes et al., (2010) [16] a pris en compte l'effet de l'angle d'inclinaison des volets de l'appareil de ventilation (Wind vent) et de la vitesse d'écoulement de l'air afin d'optimiser les performances du dispositif. L'angle optimal trouvé était entre 35° à 40° avec une vitesse d'air d'environ 4,5 ms⁻¹. Selon Sase (2006) [10] pour une serre équipée d'un système de brumisation combiné à la ventilation naturelle « fog-cooling», l'air refroidi par ce dernier est très susceptible de déposer de la buée au dessus des

plantes. Kim et al., (2007) [17] ont développé un modèle CFD pour simuler la température de l'air et la distribution de l'humidité relative dans une serre sans couvert végétale et équipée par système de brumisation. Une légère différence a été constatée entre les températures simulées et mesurées les gradients variaient de 0,1°C à 1,4°C, quant aux valeurs de l'humidité relative ils variaient entre 0,3% à 6,0%. Les résultats trouvés par cette équipe de recherche ont montré que la meilleure performance de ce type de système de refroidissement se produit lorsque les buses de brumisation sont installées à une hauteur d'environ 2,3m du sol et à 1,9m des parois latérales de la serre avec un espacement uniforme d'environ 3,7 m, et le meilleur emplacement des injecteurs de la pulvérisation doivent être placés à l'entrée des ouvertures latérales de la serre.

1.5.5. Effets des filets anti insectes

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

1.5.6. Effets du Rayonnement Solaire

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

1.5.7. Effet du Gradient de Température

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

Pontikakos et al., (2006) [26] ont analysé les données obtenues à partir d'un modèle CFD, montrant que la température externe de la couverture de la serre est un paramètre crucial concernant la distribution des températures intérieur de la serre, ils ont démontré que pour des températures extérieures et une direction du vent spécifique, la vitesse de l'air intérieur devienne un paramètre important concernant les fonction physiologiques des plantes. Nebbali et al., (2006) [28] ont utilisé une méthode semi-analytique pour déterminer le profil de température dans le sol de la serre à partir de paramètres météorologiques et d'autres caractéristiques thermo

physiques des composantes de la serre, afin de réaliser une évaluation de l'échange de chaleur entre la surface du sol et l'air intérieur. En outre, les travaux de Majdoubi et al., (2009) [22], dans le même contexte ont démontré que les phénomènes de convection et rayonnement sont les formes dominantes de transfert de chaleur, dans les serres agricoles, désormais les mesures effectuées par cette équipe de recherche montrent bien que la différence entre la température de l'air l'intérieur et l'extérieur de la serre est fortement liée au rayonnement solaire et à la vitesse du vent. Cependant, Chow et al., (2010) [29] ont obtenu des résultats assez remarquables concernant les forces de flottabilité due aux gradients de températures et des échanges thermiques:

1. Le Rayonnement thermique en absence du vent modifie la distribution de la température de l'air par rayonnement thermique sous l'effet d'échange radiatif entre une paroi chaude et paroi froide de la serre, ce phénomène affecte la température de l'air intérieur par conduction et convection.
2. La prise en compte de l'absorption du rayonnement thermique par l'air augmente l'effet de la redistribution thermique à l'intérieur de la serre en permettant à l'air d'absorber et de rayonner de la chaleur, ce qui réduit les gradients de température supplémentaire.
3. Les conditions aux limites thermiques affectent beaucoup les seuils de température absolue prévus, mais n'affectent pas la distribution de la température.
4. Les conditions de rayonnement jouent un rôle important dans la redistribution de la chaleur, ainsi que les conditions atmosphériques, notamment l'humidité relative, pour le calcul des transferts radiatifs dans la serre.

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

Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, le CFD est devenu de plus en plus sophistiqué. Selon Norton et al., (2006) [30] , le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ le plus utilisé dans certains cas, fournit des résultats insuffisants, désormais le choix des modèles de turbulence doit être basé sur les phénomènes impliqués dans la simulation. Différents modèles de turbulence peuvent provoquer des incohérences dans les profils de vitesse, de température et d'humidité, ce qui confirme l'importance du choix du modèle qui correspond le mieux aux conditions réelles de turbulence (Roy

et al., 2005) [6] . Dans le travail réalisé par Teitel et al., (2005) [31] , les chercheurs ont montré que l'écoulement turbulent est principalement due à l'air froid qui s'introduit dans la serre, ce qui produit des recirculations à l'intérieur de la serre. Roy et al., (2005) [6] ont montré que les effets de la direction du vent sur les paramètres climatiques de la serre sont généralement détectables en utilisant des modèles de turbulence différents du modèle k- ϵ , le travail a été réalisé dans le but de déterminer le bilan énergétique entre le flux de transpiration et le flux de rayonnement du couvert végétal. En outre, Rouboa et al., (2007) [12] ont noté que le modèle de turbulence RNG est le mieux adapté pour simuler des microclimats dans les serres tunnel. Rico et al., (2008) [3] ont indiqué que les effets des gradients de températures sont les principales forces motrices qui provoquent le phénomène de flottabilité. Ces mécanismes fournissent un moyen simple pour étudier les modes de ventilation et le mouvement de l'air intérieur. Majdoubi et al., (2009)

ont montré que les forces de flottabilité induites par la température de l'air fait augmenté significativement l'humidité entre les ouvertures d'aérations et les feuillages des plantes et accélèrent le rythme de l'évacuation de la vapeur d'eau et améliorent l'homogénéisation du climat intérieur. Fidaros et al., (2010) [32] ont étudié la turbulence à l'intérieur d'une serre agricole installée sous un climat méditerranéen en Grèce; ils ont constaté que les effets de la température extérieure sur le microclimat de la serre est très importants car la variation de la température intérieure est liée étroitement à la convection naturelle. et les zones de recirculations se situent essentiellement dans les zones où les effets du courant d'air est faible près des angles de la serre et du couvert végétal. Selon Bournet et al., (2010) [11], les modèles de turbulences K- ϵ même s'ils ont été utilisés pendant une longue période dans les travaux liés à l'agronomie et l'environnement, d'autres approches empiriques basées sur l'utilisation des ERP n'ont jamais été appliquées pour la modélisation du climat sous serre et pourraient être utilisés pour des situations plus complexes. Vera et al., (2010b) [33] ont étudié la flottabilité de l'air dans des espaces clos, ils ont aboutis aux conclusions suivantes:

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

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

1.5.9. Incorporation des Cultures dans la Modélisation

L'effet des plantes sur la ventilation des serres agricoles a également été étudié auparavant. Bournet et al., (2007) [1], en se basant sur les études de Nederhoff (1985) [34], et Lee (1998) [35], ils ont constaté qu'une culture de 90 cm de hauteur et de faible densité fait diminuer l'efficacité de la ventilation d'environ 12 et 15%. Roy et al., (2005) [6] ont développé un modèle 3D pour la caractérisation des paramètres climatiques dans une serre agricole, on intégrant cinq rangées de plantes de tomates comme un milieu poreux tout en considérant les différents phénomènes à savoir: le phénomène de flottabilité, le transfert de masse (humidité) entre la culture et son milieu environnant, ainsi que la circulation de l'air à l'intérieur des plantes. Les coefficients de transfert de chaleur et de masse ont été calculés à partir des caractéristiques de la couche limite laminaire de la feuille de la plante de la tomate, et de la vitesse de l'air à l'intérieur du couvert végétal variant entre 0.1 à 0.3 ms⁻¹. Par ailleurs, une étude de simulation réalisée par Sapounas et al., (2007) [36] sur une culture de tomate prise comme un milieu poreux, tout en tenant compte de l'adjonction du phénomène de flottabilité pour développer un modèle qui fait apparaître le mécanisme de la chute de pression du flux d'air causé par la présence du végétal dans la serre. Le modèle dépend du stade foliaire de la plante et de son état de croissance. Une étude réalisée par Roy et al., (2008) [37] au niveau de la feuille d'une plante de Soja, ont utilisé un dispositif expérimental constitué de sondes et de capteurs pour mesurer la température, l'humidité relative et les différents flux de chaleur échangés entre les feuilles et leur environnement, dans le but d'obtenir des valeurs de la résistance stomatique de la feuille de plante; les valeurs trouvées étaient entre 66 à 200 sm⁻¹. Teitel et al., (2008b) [38] ont construit un modèle à petite échelle, ils ont constaté que la direction du vent affecte de manière significative le taux de ventilation et la distribution de la température dans le couvert végétal. En outre, le couvert végétal dans la serre agricole fait induire une résistance aérodynamique (force de traînée) sur les écoulements d'air qui provoquent des interactions dans le processus de la transpiration de la plante, la distribution des températures et d'humidité du micro climat (Bournet et al., 2010) [11]

1.5.10. Les effets de l'humidité

Roy et al., (2005) [6] ont réalisé un travail de simulation de l'effet de la direction du vent (variation de l'angle entre les valeurs (0°, 45° et 90° par rapport à l'axe de l'orientation de la serre) dans le but de déterminer la distribution des paramètres du micro climat de la serre (la vitesse, la température et l'humidité), ils ont constaté une

bonne approximation concernant la distribution de l'humidité. Le même modèle a été utilisé par Demrati et al., (2007) [39], pour estimer les besoins en eau d'une culture de banane sous serre dans les régions arides. Roy et al., (2008) [37] ont étudié l'humidité sur la surface des feuilles ; les modèles de l'évapotranspiration et du flux d'air ont été intégrés dans un modèle unique en tenant compte de la résistance stomatique du feuillage de la plante. Campen (2008) [40] a montré que le climat distribué est plus homogène si la serre est équipée par un système de ventilation et un procédé classique d'extraction de vapeur. Ces mêmes résultats ont été démontrés par Kim et al., (2008) [40] en utilisant un modèle 3D permettant d'identifier la répartition de l'humidité relative dans une serre agricole.

1.5.11. Validation des Modèles

Selon Sase (2006) [10], les progrès récents du CFD ont accéléré d'une manière significative l'analyse détaillée du microclimat de la serre. Cependant, plus de détails

dans ce domaine sont devenues nécessaires pour répondre aux besoins d'information concernant chaque élément impliqué dans le climat distribué de la serre (Flores et al., 2010)

[42]. La qualité des résultats est souvent déduite de la concordance entre les données expérimentales et les résultats théoriques ou numériques. Néanmoins, jusqu'à présent aucune procédure standard n'a été adoptée pour évaluer les précisions des simulations, car le type de comparaison est souvent différent d'une étude à une autre (Bournet et al., 2010) [11]. Les nouvelles technologies telles que l'anémométrie sonique, et les caméras infrarouges ont beaucoup contribué pour compléter les prévisions des études et de rapprocher le réalisme des

simulations (Norton et al., 2007) [43]

Les modèles statistiques

L'utilisation des modèles statistiques développés par Pontikakos et al., (2006) [26] est

simple et sont moins gourmands concernant le temps de calcul, désormais ils sont moins

coûteux que les modèles CFD. Ce type de modèle peut être utilisé pour les estimations en temps réel de la température et du débit dans une serre.

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

- 1- Le modèle analytique donne généralement une évaluation globale du phénomène.
- 2- Le modèle empirique a des capacités similaires à celles du modèle analytique, mais il est développé à partir d'une base de données expérimentale spécifique.
- 3- Le modèle à petite échelle peut être utile pour examiner les problèmes de ventilation si une similitude de flux peut être maintenue entre le modèle et la réalité.

4-Le modèle à grande échelle est le plus fiable pour les prédictions, mais il est coûteux et prend beaucoup de temps de calcul.

5- Le modèle multizones est un outil très utile pour la conception et la prédiction des phénomènes, mais ne peut pas fournir des informations détaillées.

6- Le modèle CFD fournit des informations plus détaillées c'est le plus sophistiqué. Cependant, le modèle doit être validé par données expérimentales et l'utilisateur doit avoir des connaissances en mécanique des fluides et en calcul numérique. Par conséquent, le choix d'un modèle approprié dépend du problème à résoudre.

1.5.12. Éléments finis vs volumes finis

Dans une étude réalisée par Molina et al., (2010) [45] sur l'efficacité de la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode de volumes finis (FVM) pour deux écoulements turbulents incompressible, ils ont constaté que la MEF nécessite deux fois plus de temps de calcul et 10 fois plus de mémoire de stockage de MVF . C'est pour cette raison que les Logiciels basés sur la méthode des volumes finis FVM (Comsol v 3.2.) englobent le paquet de la CFD les plus fréquemment utilisés dans le domaine de la thermique bâtiments.

I.6.Inertie thermique :

Dans les matériaux de construction utilisés. L'inertie thermique d'un bâtiment se juge en première approximation par la masse interne des matériaux min en œuvre le rôle et les principaux paramètres sont énoncés comme suit :

En été, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte est faible et plus les variations de température jour/nuit son faibles. L'inertie thermique permet donc de lisser les flux thermiques et les températures extrêmes. L'utilisation de matériaux lourds, contribue à donner au bâtiment une forte inertie. Elle évite les surchauffes et aide à la stabilisation de la température .

En hiver, l'inertie thermique joue également un rôle important, principalement dans le cas de chauffage intermittent. Le refroidissement est plus lent dans un local dont les parois sont lourdes. Les coupures de chauffage, visant à faire des économies d'énergie, sont d'autant moins intéressantes que la structure est plus inerte, car plus lourds.

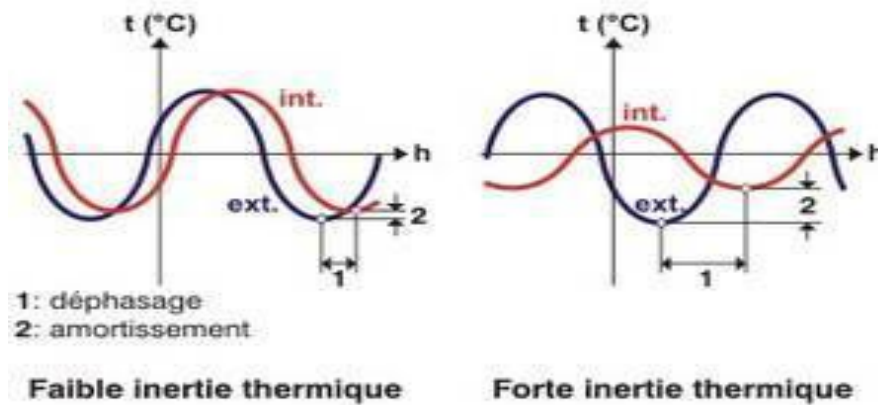


Figure. (1-11) Inertie thermique.

I.6.1.les principales caractéristiques de l'inertie thermique :

I.6.1.1.la diffusivité thermique :

La diffusivité thermique "a" exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps. Plus la diffusivité est grande, plus le matériau s'échauffe ou se refroidit rapidement. Tandis que, plus elle est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, elle s'exprime selon l'équation suivante [7] :

Ou :
$$a = \lambda / \rho \cdot C \dots\dots\dots (I.4)$$

a : Diffusivité en (m²/s).

λ: Conductivité thermique du milieu (W m⁻¹K⁻¹).

ρ: Masse volumique de l'air (kg/m³).

c: Chaleur spécifique en (kJ/kg).

I.6.1.2.l'effusivité thermique :

L'effusivité thermique "b" exprime l'aptitude de la surface d'un matériau à stocker ou restituer de la chaleur. Elle caractérise, donc, la capacité des matériaux à réagir plus

ou moins rapidement à un rapport de chaleur au logement. Elle croît avec la conductivité et la capacité thermique. Elle s'exprime en $((\text{W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2)^{1/2})$ et donnée par la formule suivante

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C}$$

En général, pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois d'enveloppe devront présenter une faible diffusivité et une forte effusivité.

Dans le contexte de la démarche bioclimatique, une inertie très lourde, associée à une bonne gestion des apports solaires (captage l'hiver et protection l'été) devient un critère décisif de la construction, notamment pour le confort d'été, qu'il s'agisse des températures maximales atteintes ou des variations de températures jour/nuit [9].

I.6.3.Effets dans le cas d'un bâtiment :

Schématiquement, sur des temps d'observation donnés (journaliers, saisonniers...), les variations de température extérieure mais surtout les impacts thermiques du rayonnement solaire sur les parois sont périodiques. Grâce à l'inertie thermique du bâti, la température à l'intérieur du bâtiment suit nécessairement ces variations, mais avec :

- un amortissement, qui permet d'atténuer les effets des canicules ou des grands froids.

- un déphasage thermique, lié au temps caractéristique mentionné plus haut, qui permet de retarder les effets (exemple : en été, le front de la chaleur du rayonnement solaire pénètre dans la maison en fin de journée plutôt qu'en matinée).

L'amortissement et le déphasage sont d'autant plus marqués que l'inertie thermique est grande. On peut distinguer deux cas de figure où intervient l'inertie thermique :

L'inertie en transmission, qui concerne l'atténuation de l'influence des conditions extérieures notamment les impacts du rayonnement solaire sur la température intérieure du bâtiment. Cette inertie repose essentiellement sur une isolation thermique avec une très bonne diffusivité thermique du côté extérieur de l'enveloppe du bâtiment. La résistance thermique de l'isolant mais surtout sa diffusivité jouent un rôle important dans ce cas ;

L'inertie par absorption, qui concerne l'accumulation de chaleur ou de fraîcheur dans les cloisonnements et les parois de la structure en contact avec l'intérieur du bâtiment.

L'épaisseur des parois lourdes n'a pas trop d'importance au-delà d'une quinzaine de centimètres par face (accumulation de chaleur près de la surface).

Chapitre II

2.1. Introduction:

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

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

2.2. Equations générales

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

2.3 Principe de base

Les bilans énergétiques représentent les règles d'évolution du modèle d'un état de départ à un état final. Ils traduisent le principe de conservation de l'énergie. L'équation du bilan d'énergie sous sa forme générale s'écrit:

$$\text{Energie reçue} - \text{Energie perdue} = \text{Variation d'énergie interne}$$

Le second membre traduit un terme différentiel par rapport au temps. Il caractérise l'inertie de l'élément, c'est-à-dire, l'aptitude de la variable d'état à évoluer rapidement (inertie faible) ou lentement (inertie forte) sous l'action des sollicitations extérieures.

2.4 Caractérisation en régime stationnaire

La modélisation des échanges thermiques au sein d'une serre fait intervenir plusieurs coefficients intrinsèques à la serre. Ces coefficients sont des conductivités thermiques, des masses volumiques, des débits, des émissivités, des coefficients d'absorption, de transmission et de réflexion, des caractéristiques dimensionnelles, etc...

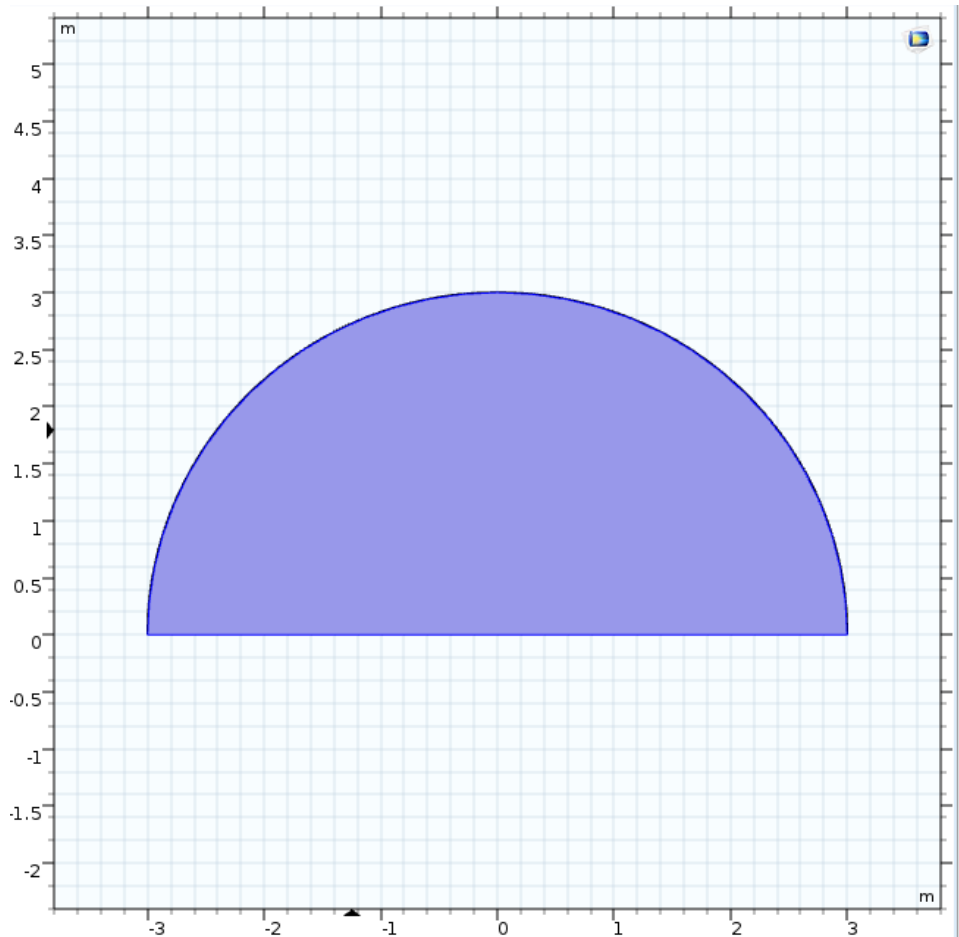
Or, la caractérisation de la serre, telle qu'elle a été proposée, se réfère à des coefficients de performance globaux (ou agrégés) qui ne correspondent pas à cette description. Il faut en fait synthétiser une partie de l'information relative à la serre à travers son comportement stationnaire, comme cela a été réalisé pour les parois de bâtiments avec la mesure des

coefficients de déperdition thermique, [7, 8]. Le régime stationnaire suppose que les conditions extérieures sont constantes sur la période considérée.

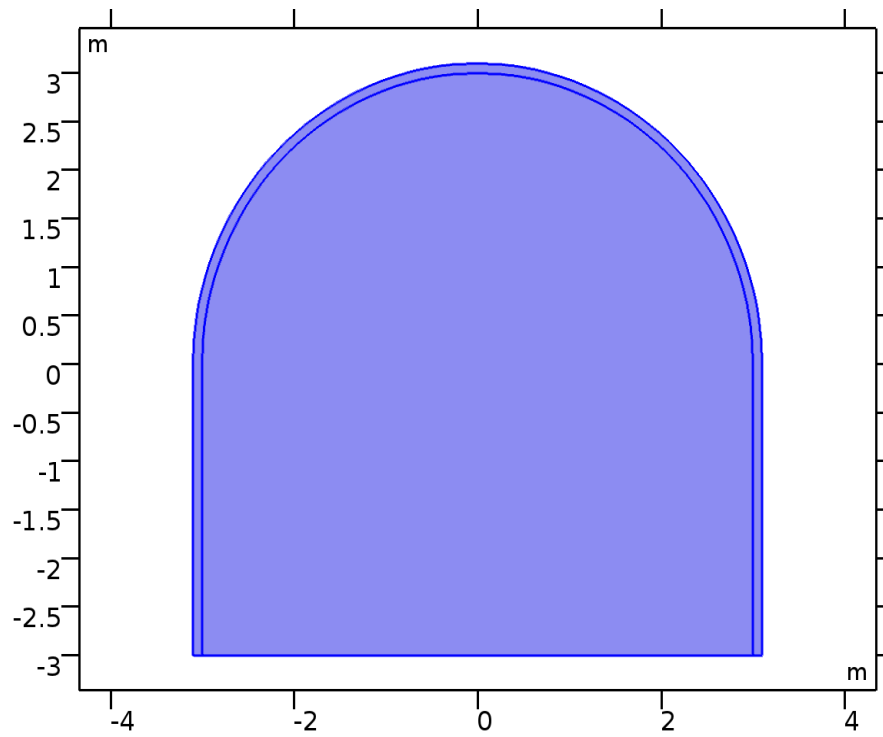
Plus précisément, il faut parler de coefficient 'moyen' se rapportant à la séquence climatique considérée. On comprendra que, pour cette raison, les paramètres caractéristiques de la serre, tels que le coefficient de déperdition global K , puissent varier d'une séquence à une autre, du fait des variations des sollicitations climatiques.

2.5 PRESENTATION DES DEUX SERRES EXPERIMENTALES

- Serre tunnel



- Serre a pied droit



2.6 Modèle de la serre

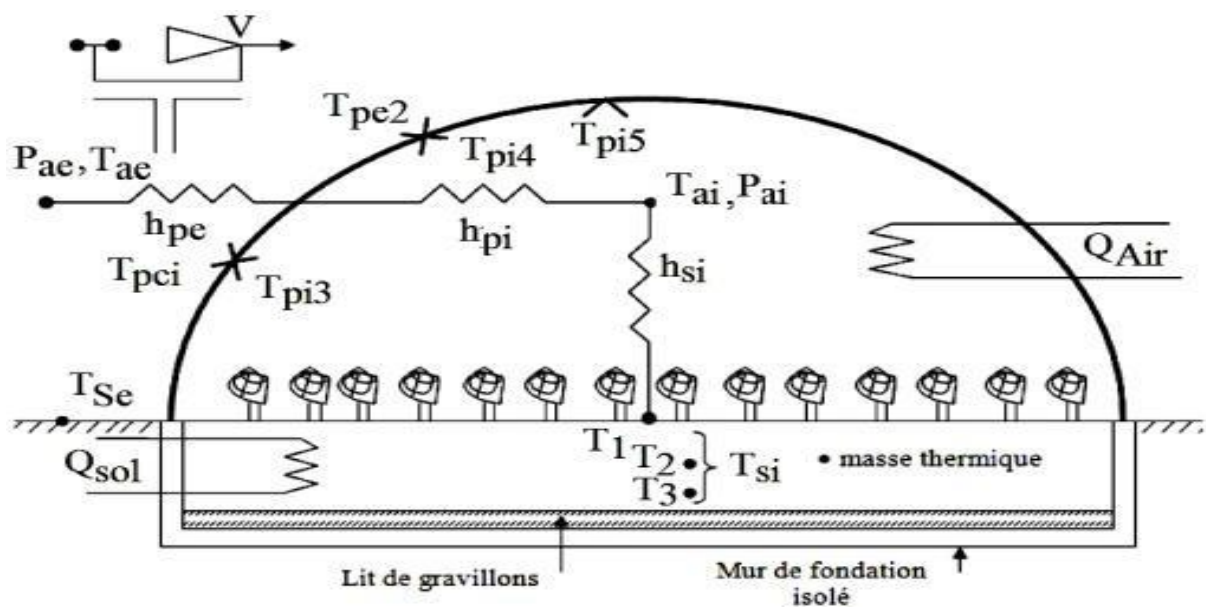


Fig. 2.1: Modèle réduit

3.4 Modèle de serre R.C d'ordre 1

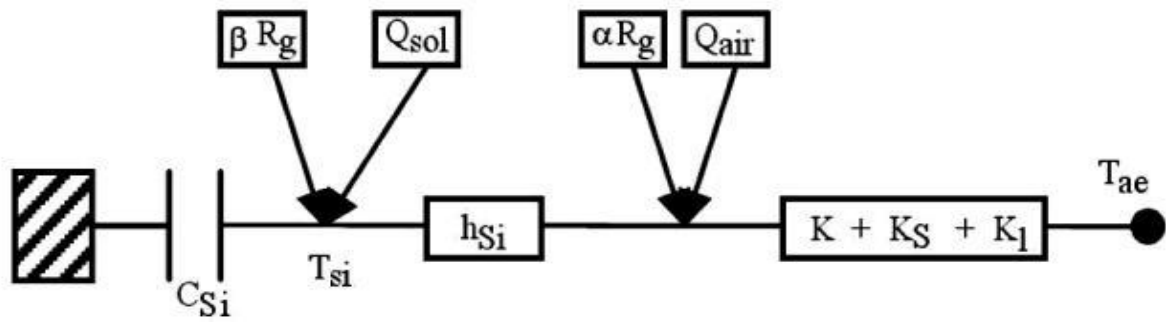


Fig. 2.2: Modèle de serre R.C. d'ordre 1 – Bilan thermique

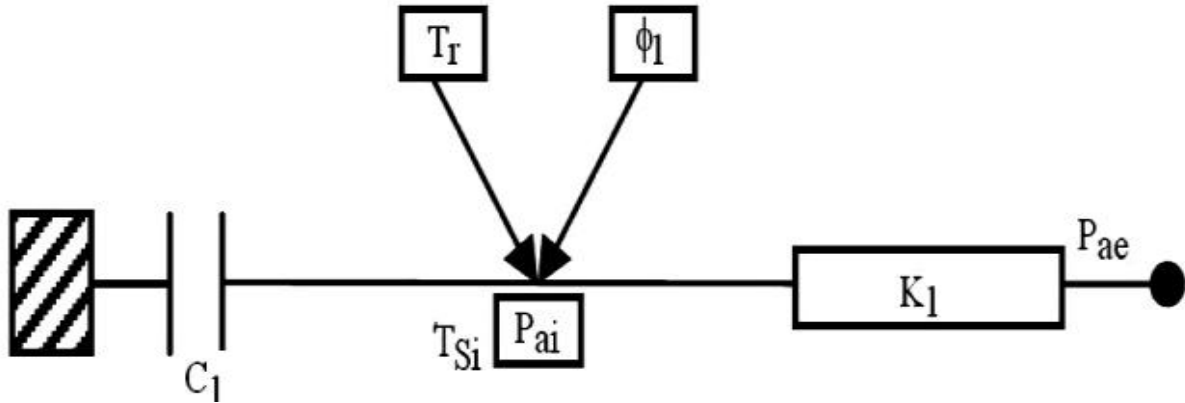


Fig2. 3: Modèle de serre R.C. d'ordre 1 – Bilan hydrique

2.7. Bilan d'énergie

2.7.1 Bilan d'énergie de l'ambiance interne

2.7.1.1 Bilan de la vapeur d'eau de l'air de la serre

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \dots \dots \dots 1$$

$$\nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \left(\mu + \mu_T \right) \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] + \mathbf{F} \dots \dots \dots 2$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \dots \dots \dots 3$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon P_k}{k} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = \epsilon_p \dots \dots \dots 4$$

2.7.1.2 Bilan dsur la prois

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \dots \dots \dots 5$$

$$\left[\left(\mu + \mu_T \right) \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] \mathbf{n} = -\rho \frac{u_\tau}{u^+} \mathbf{u}_{tang} \dots \dots \dots 6$$

$$\mathbf{u}_{\text{tang}} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \dots\dots\dots 7$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \epsilon = \rho \frac{C_\mu k^2}{\kappa_\nu \delta_w^+ \mu} \dots\dots\dots 8$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \dots\dots\dots 9$$

2.7.1 Bilan d'énergie de l'ambiance extérieur

$$d_z \rho C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_\rho \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{\text{ted}} \dots\dots\dots 10$$

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T \dots\dots\dots 11$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \dots\dots\dots 12$$

$$q_0 = \epsilon_u \sigma (T_{\text{amb,u}}^4 - T^4) + \epsilon_d \sigma (T_{\text{amb,d}}^4 - T^4) \dots\dots\dots 13$$

- Trubulance

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \dots\dots\dots 14$$

$$\nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F} \dots\dots\dots 15$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \dots\dots\dots 16$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = \text{ep} \dots\dots\dots 17$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots 18$$

Chapitre III

3.1. Introduction

Après avoir présenté dans les deux chapitres précédents (L'analyse bibliographique & La Formulation mathématique) les différents phénomènes physiques intervenant dans l'évolution du comportement du micro climat de la serre agricole, et les équations qui gouvernent ces mécanismes ainsi que les méthodes de résolution adapté pour ce types d'équations, un logiciel de la CFD (Computational Fluid Dynamics) COMSOL .3.2.1 a été utilisé pour simuler le comportement thermique de trois type de serre agricoles en mode jour et nuit et en présence de couvert végétal sous forme de quatre rangés de plante de tomate. Les trois géométries de serres agricoles étudiées sont: serre tunnel en plastique (fig. 3.1), serre en plastique a pieds droits (fig. 3.2) et en fin une serre en verre horticole mono-chapelle de type Venlo (fig. 3.3), pour cette dernière on a utilisé seulement deux rangés de plante a cause de sa taille réduite.

3.2. Domaine physique et maillage

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

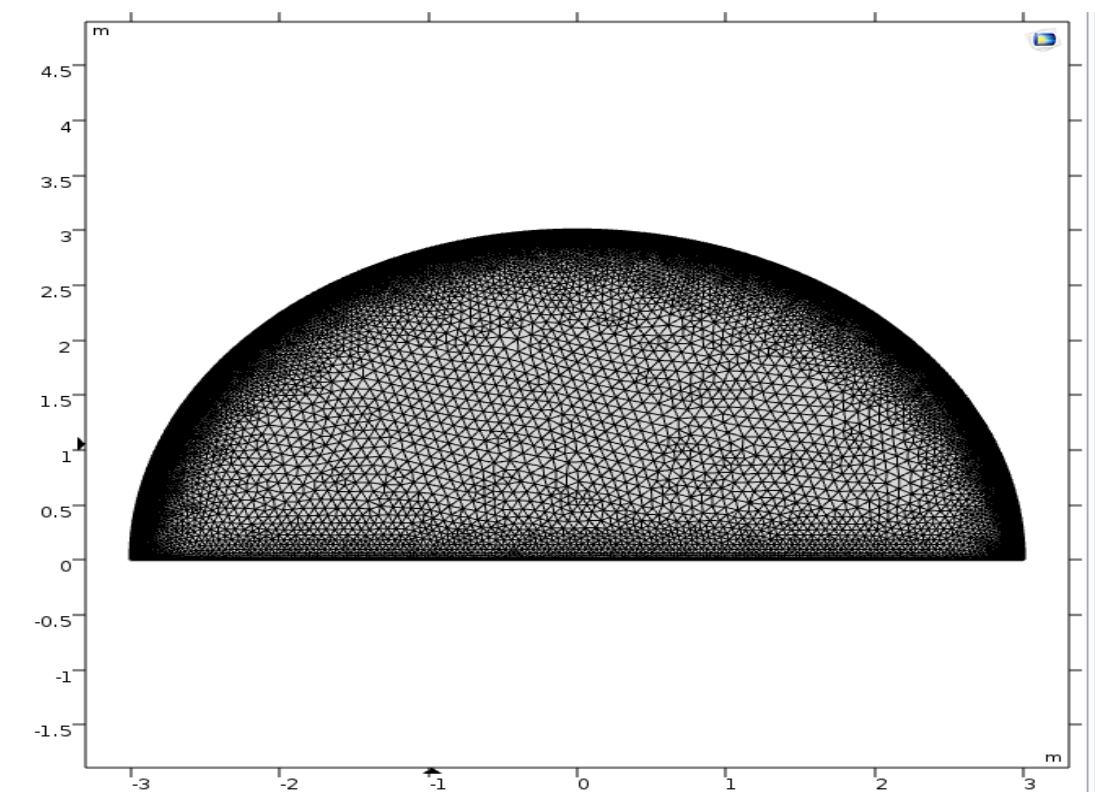


Figure 3.1: Serre Tunnel: (a) Domaine physique et (b) Domaine maillé

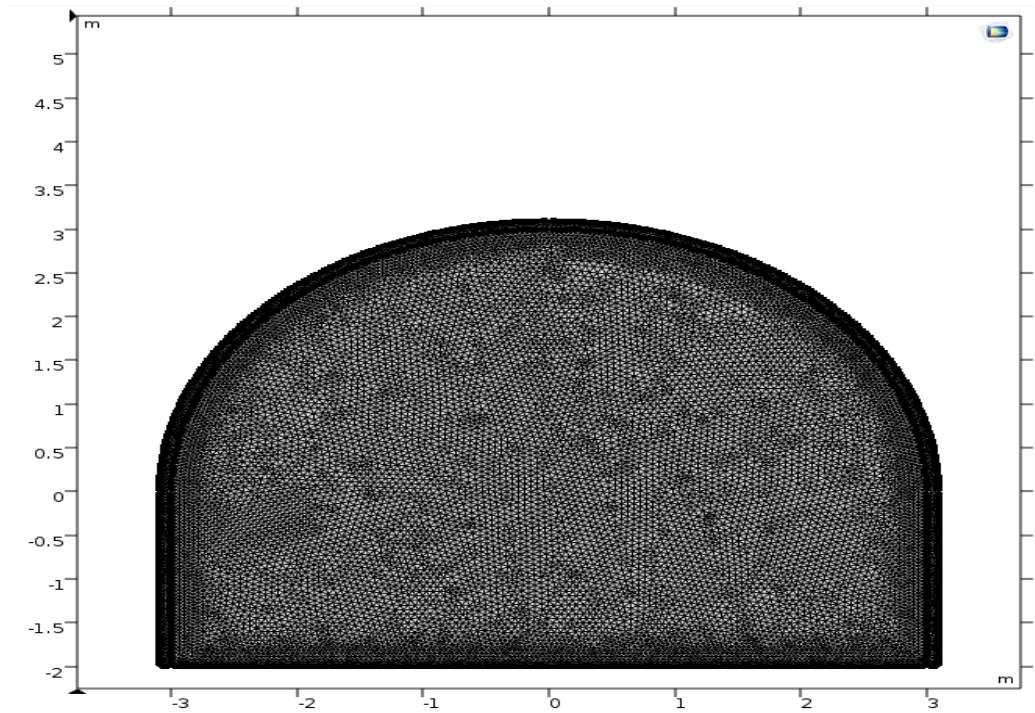


Figure 3.2: Serre à pieds droits: (a) domaine physique et (b) Domaine maillé

3.3 Site d'étude, serres expérimentées, et expérimentations

Les données utilisés dans notre travail de simulation soient concernant les conditions aux limites ou bien les courbes de validation des résultats de simulation, étaient inspirés à partir d'estimation de la température de l'air intérieur de la serre avec une plante de tomate, la seconde expérimentation est une approche expérimentale de la modélisation du comportement des échanges d'énergie en période nocturne pour une serre installée dans une région sud Algérienne Ouargla l'objectif de cette simulation d'analyse le comportement thermique des parois en pvc , polyéthylène et le verre partir des condition au limites qui sont présenter dans le tableau suivant dans deux types déférentes serres sont :

1-Serre Tunnel et Serre à pieds droits :

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

Tableau 3.2: Conditions climatiques extérieures moyennes pour chaque journée

3.4. Propriétés thermo-physiques

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

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

Tableau 3.3: Propriétés thermo-physiques déterminées expérimentalement

3.5 Contours de la température :

3.5.1 Cas d'une serre tunnel

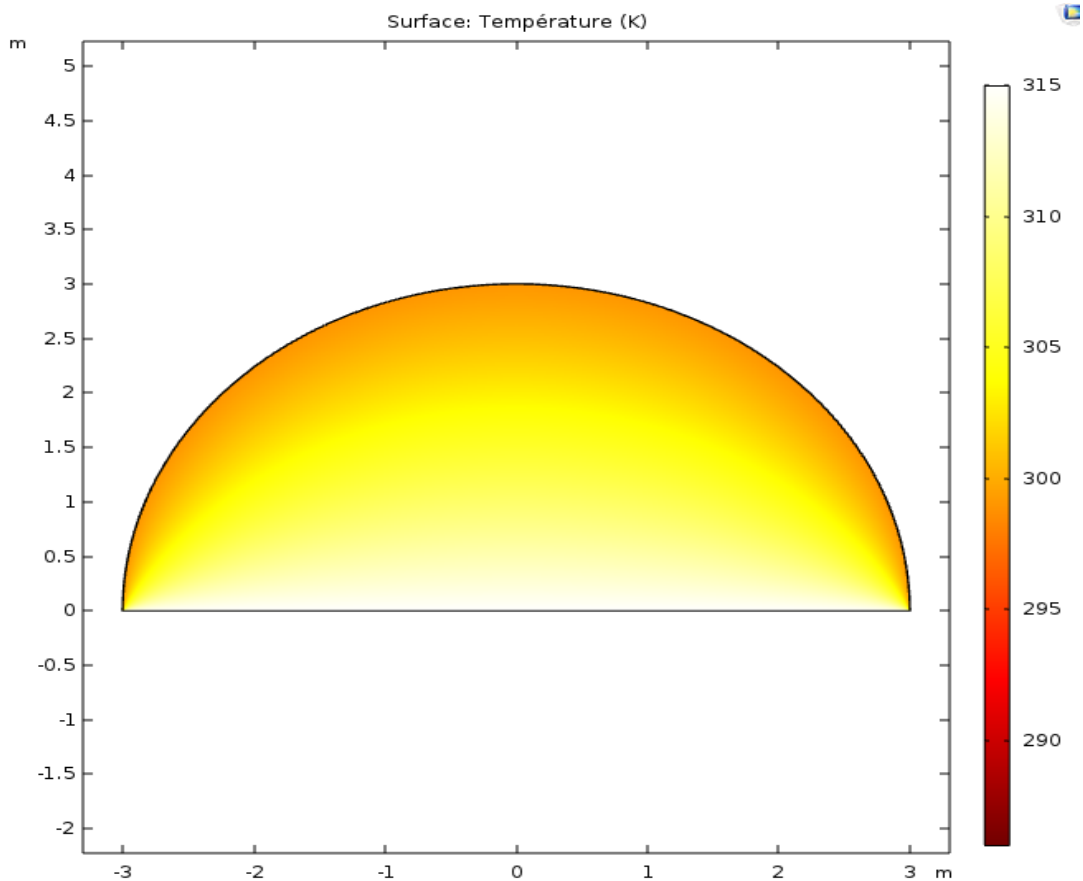


Fig 3.3 : changement de température verre

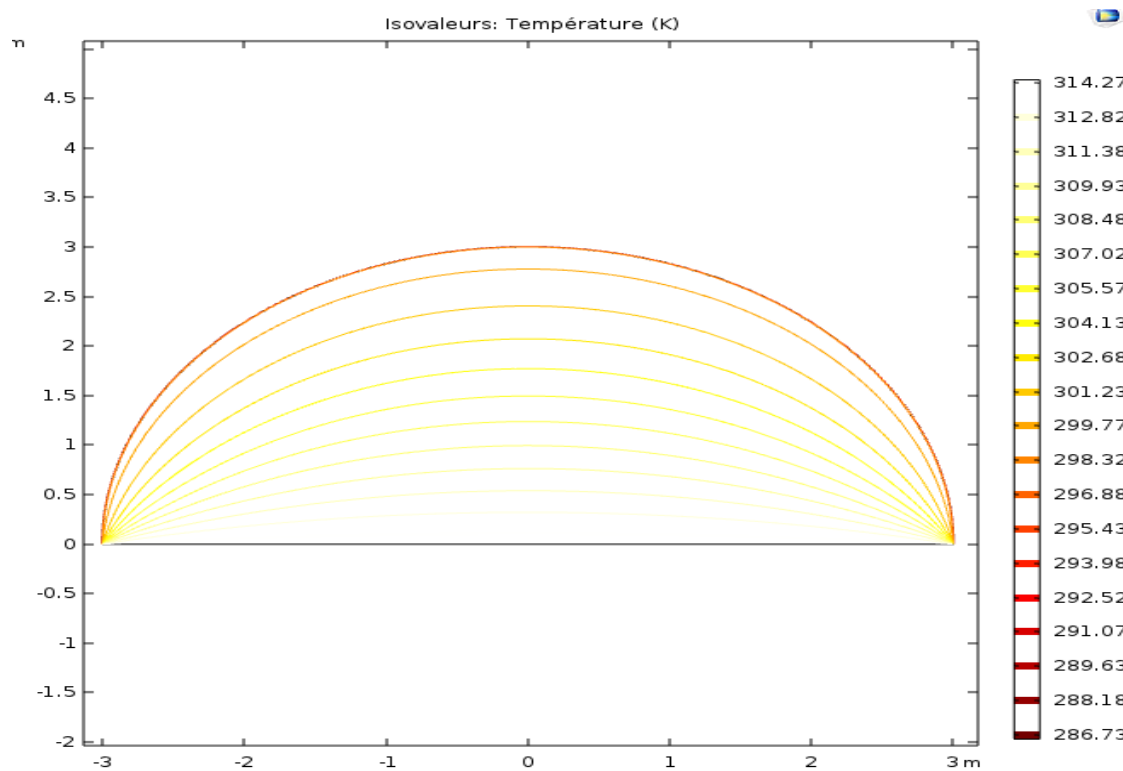


Fig 3.4 : isotherme verre

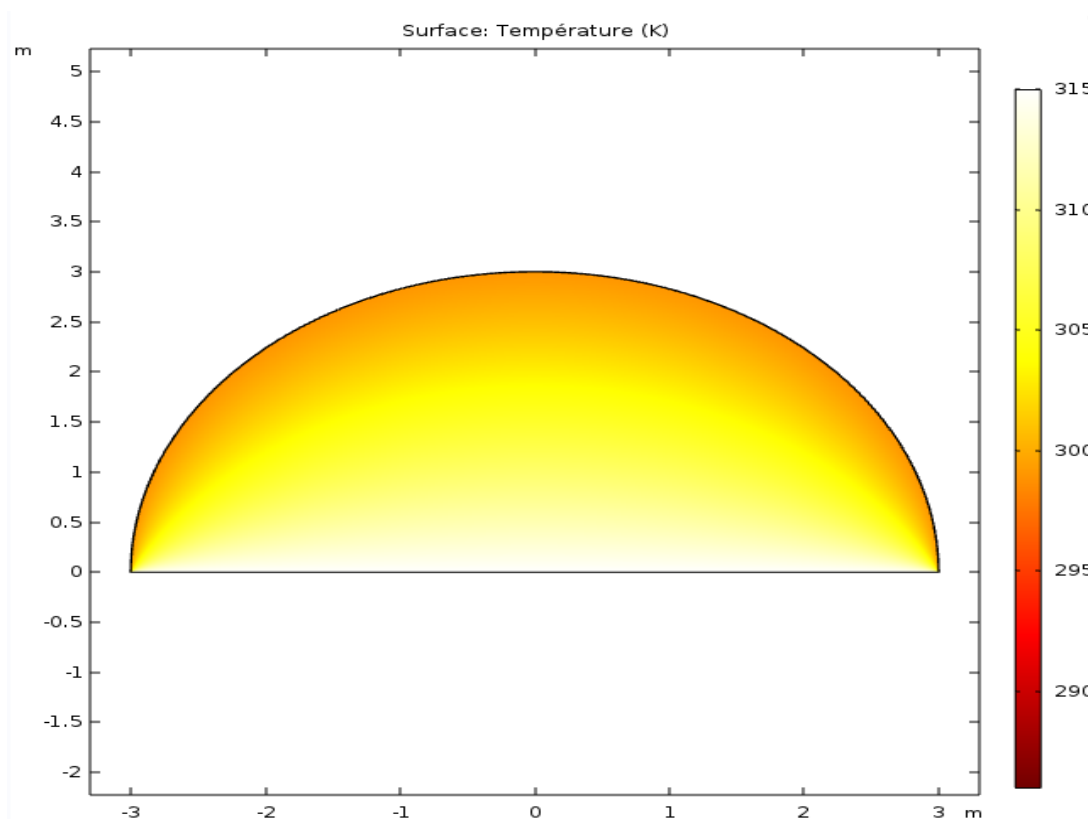


Fig3.5: changement de température pvc

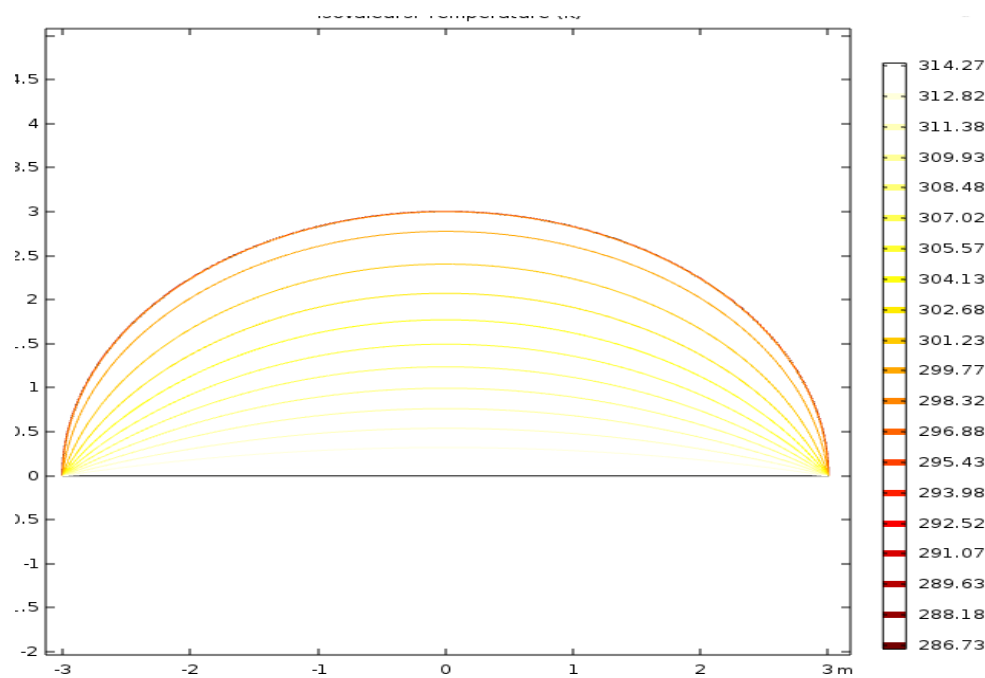


Fig 3.6 : isotherme pvc

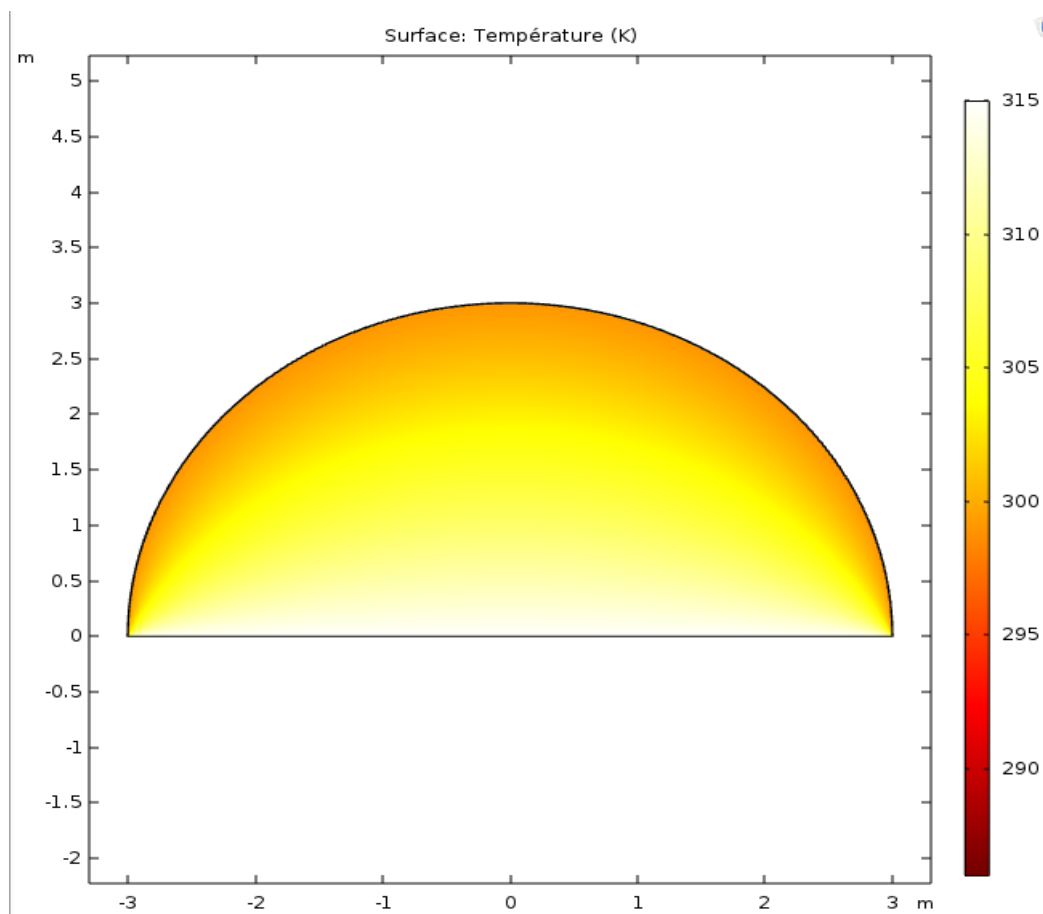


Fig 3.7 : changement de température polyéthylène

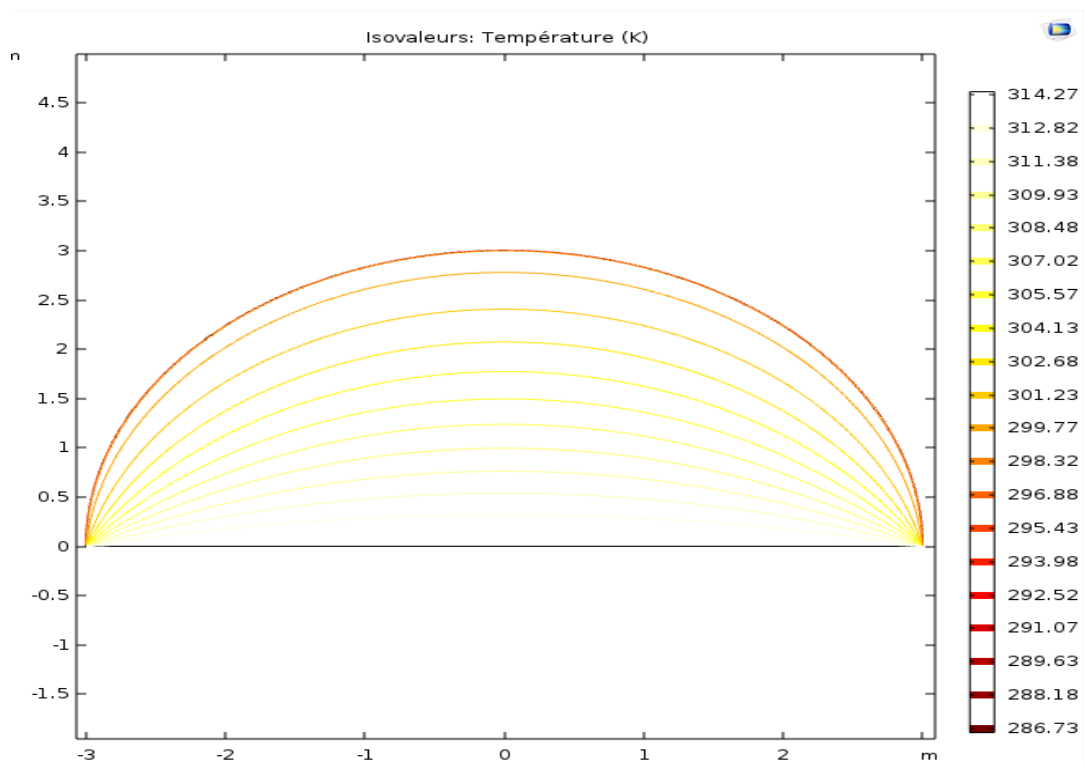


Fig 3.8 : isotherme polyéthylène

3.5.1 Cas d'une serre pied droit :

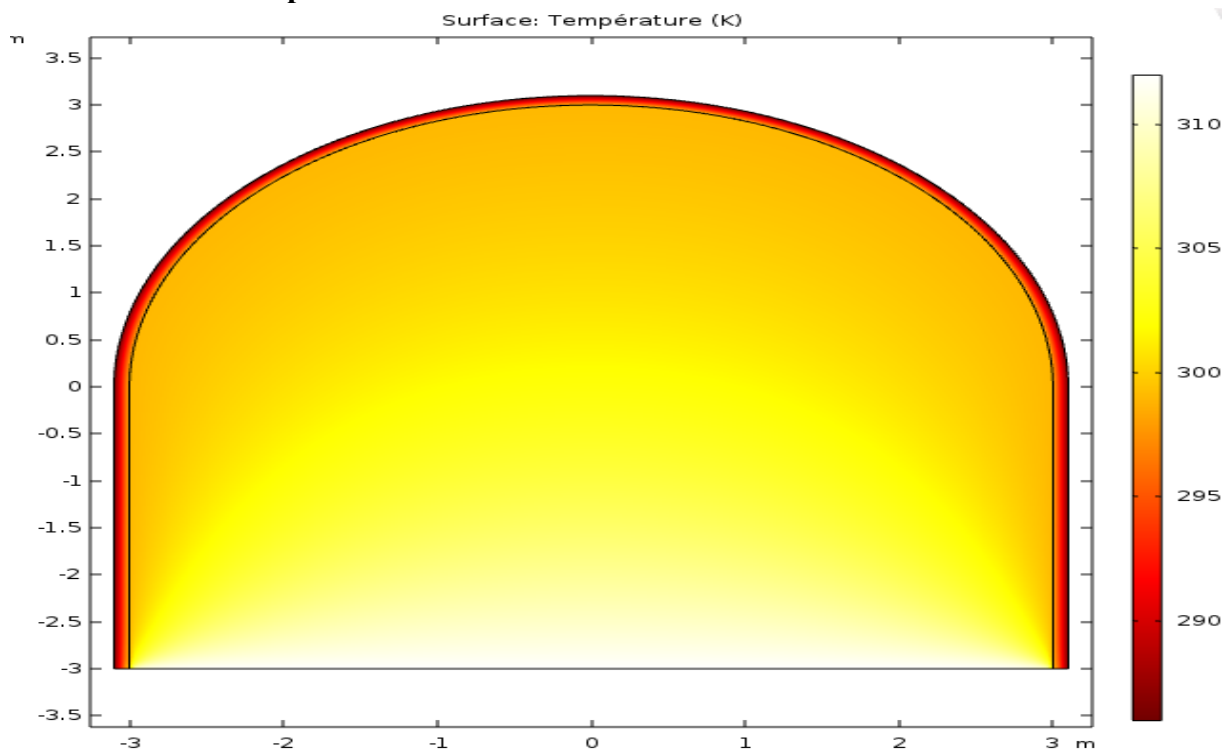


Fig 3.9 : changement de température polyéthylène

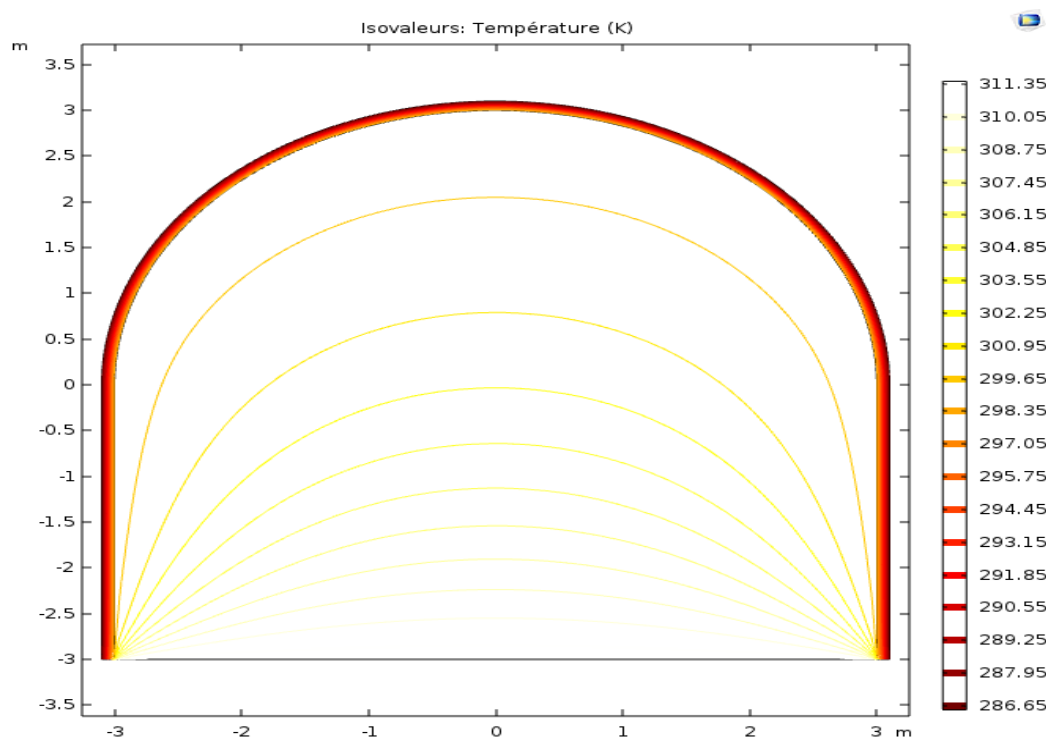


Fig 3.10 : isotherme polythène

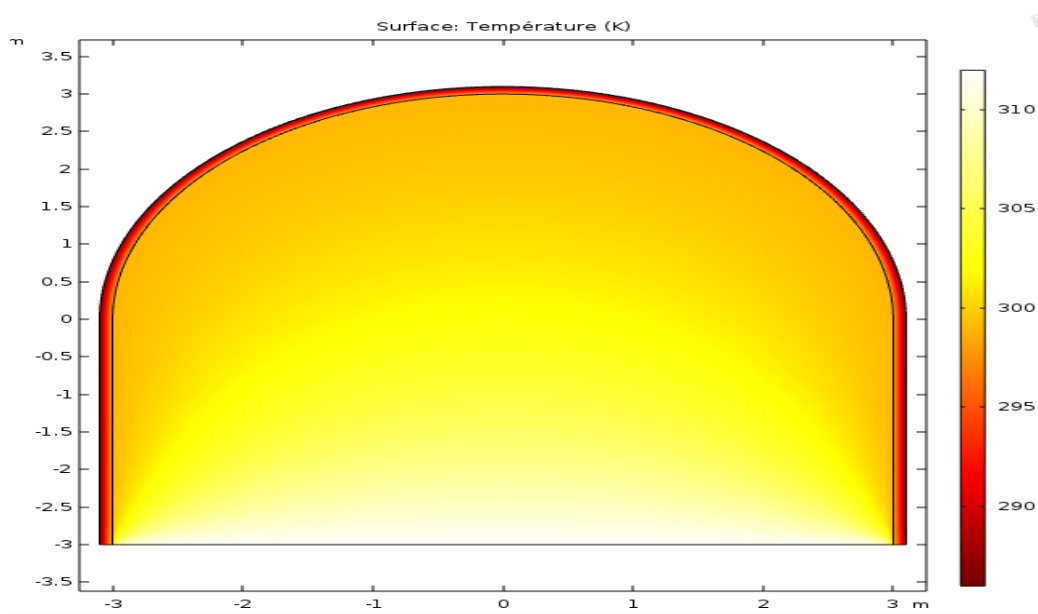


Fig 3.11 : changement de température verre

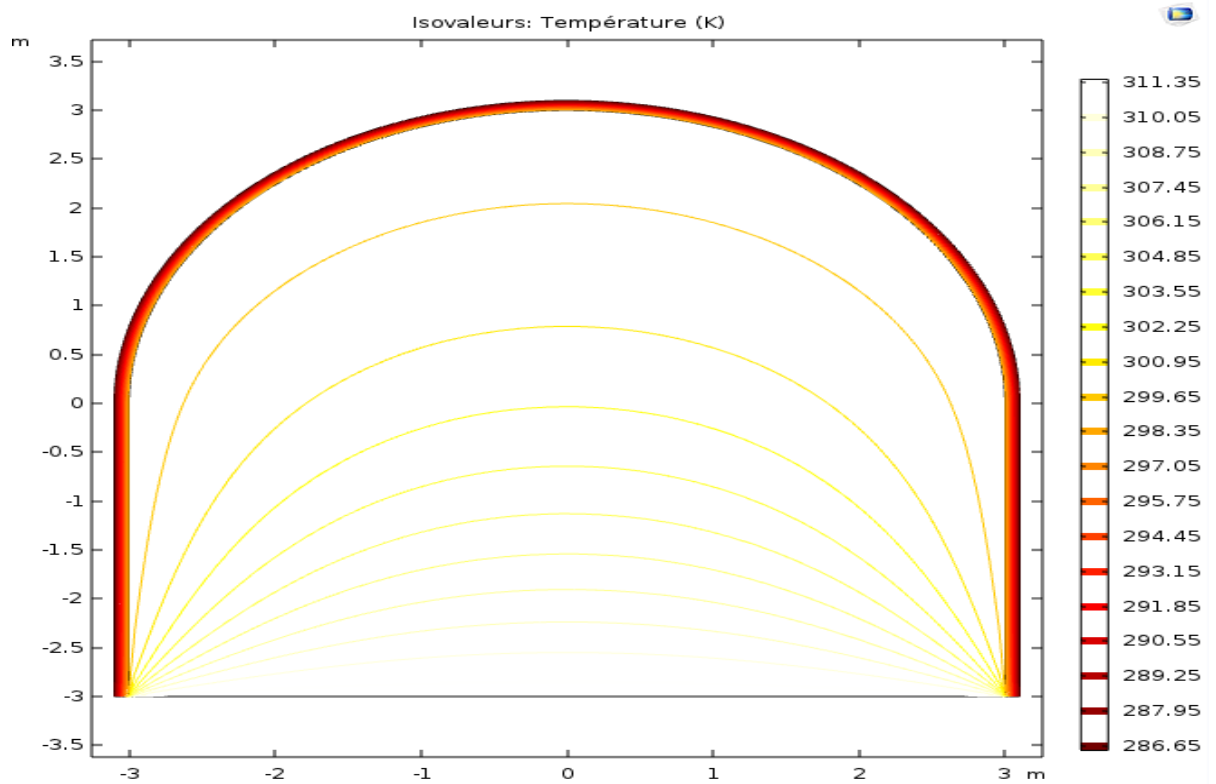


Fig 3.12 : isotherme verre

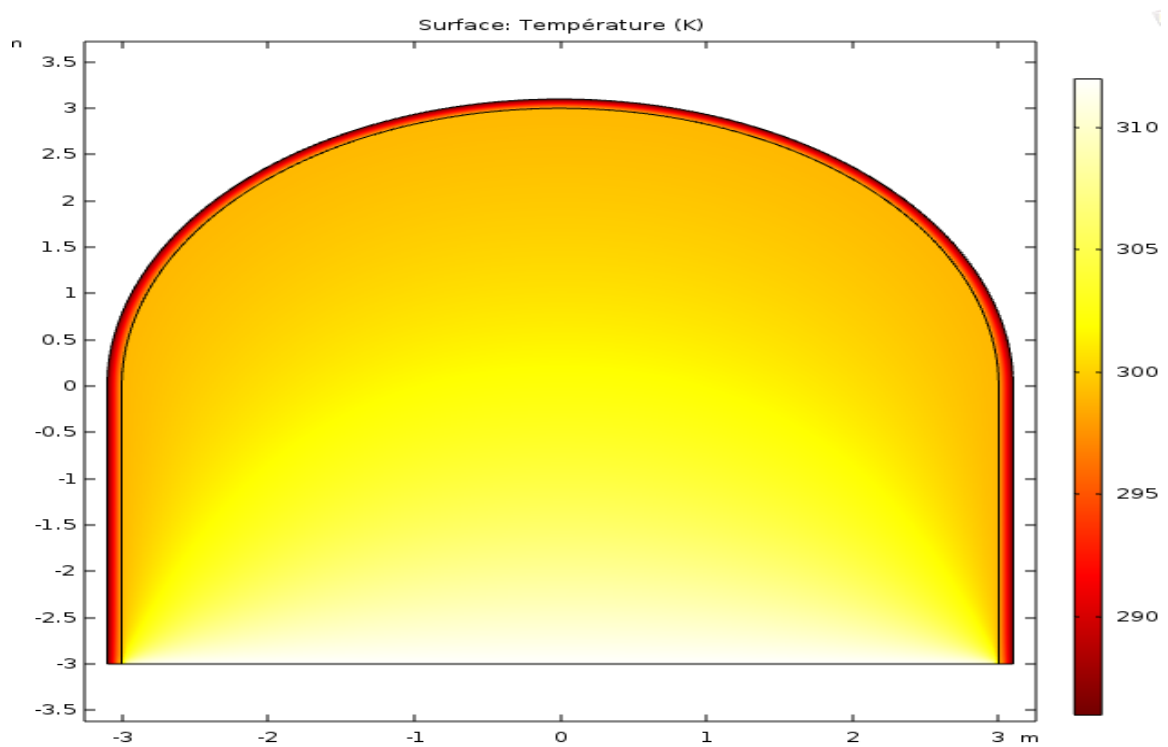


Fig 3.13 : changement de température pvc

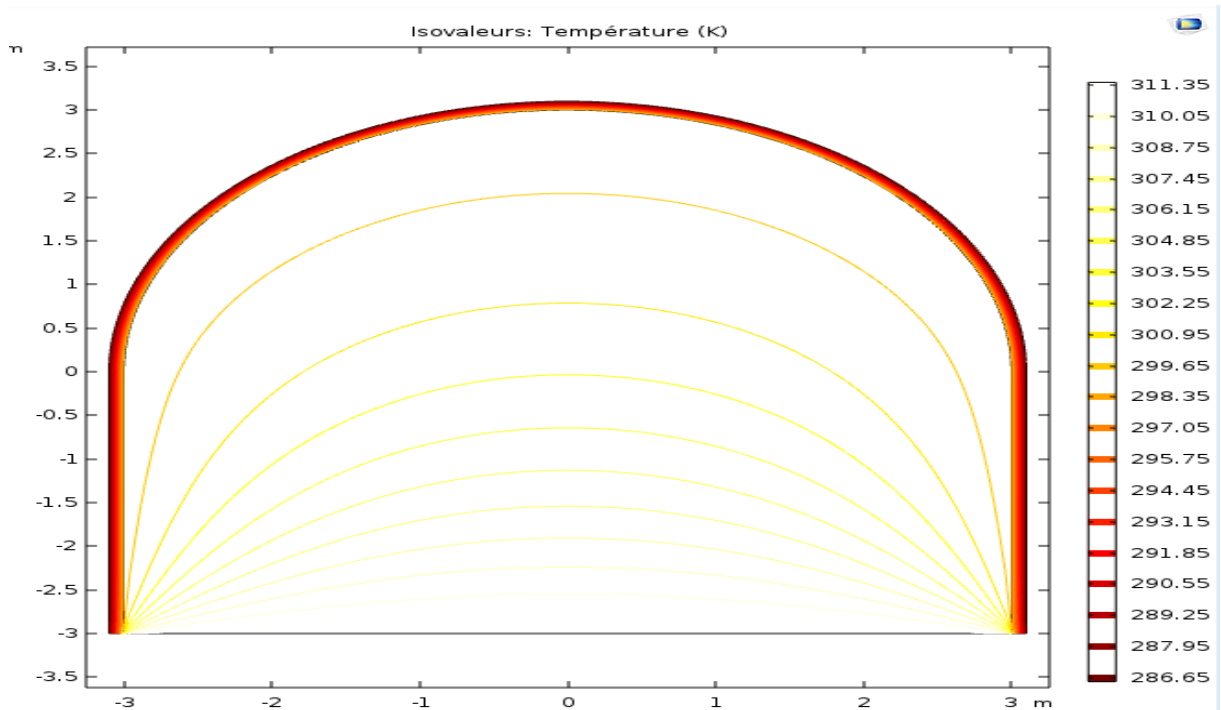


Fig 3.14: isotherme pvc

c) Distribution de la température dans la serre:

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

CONCLUSIONS

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

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

Résumé

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

ملخص

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