

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI TIZI-OUZOU  
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE EN GENIE MECANIQUE**  
OPTION : ENERGETIQUE

# **Simulation numérique de l'ambiance interne d'une serre de culture sous un climat chaud et sec**

Présenté par : DLIM Massinissa

MOHELLEBI Salim

SADI Karima

Devant le jury composé de :

Mr. MAKHLOUF.S

Mr. NEBBALI. R

Mr. SALHI. F

Président

Promoteur

Examineur

Promotion 2017 / 2018

# *Remerciements*

*On tient à exprimer notre sincère gratitude à Monsieur REZKI NEBBALI, qui a accepté de diriger ce mémoire. Pour l'intérêt porté à notre travail, sa disponibilité, ses conseils précieux, et surtout sa grande patience, qu'il veuille bien trouver ici nos vifs remerciements, l'expression de notre profonde reconnaissance et de notre sincère considération.*

*Nos remerciements vont aux membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux responsables du laboratoire LEEM pour l'espace qu'ils nous ont laissé à notre portée.*

*On tient à présenter nos vifs remerciements aux personnes qui nous ont aidés durant toute la préparation.*

# *Dédicaces*

*Je dédie cet humble travail à :*

*À mes très chers parents,*

*qui m'ont toujours accompagné et soutenu durant mes études, recevez ici le témoignage de mon amour et d'une profonde reconnaissance.*

*À ma sœur, mes deux frères*

*À ma fiancée*

*À tous mes amis*

*Massi,*

# **Dédicaces**

**Je dédier ce travail**

**A mes chers parents qui m'ont soutenue durant mes  
études et à qui je dois beaucoup.**

**A mes deux frères et ma sœur.**

**Et sans oublier les personnes qui me sont chère**

**Qui m'ont beaucoup apporté et soutenue.**

**A mes deux collègues et leur famille.**

**A mes amis.**

***Salim***

## **Dédicaces**

**Je dédie ce modeste travail à :**

**Mes parents qui me sont les plus chers**

**À mes sœurs, mes frères**

**À tous les membres de ma famille, grands et petits.**

**À tous mes amis.**

**SADI.K**

Symboles	Désignations	Unités
$h_c$	Coefficient de transfert de chaleur par convection.	(W /m <sup>2</sup> °C)
$h_f$	Coefficient d'échange convectif forcé.	(W /m <sup>2</sup> °C)
$C_p$	Chaleur massique de l'eau.	( J/kg°C )
$u$	Vitesse du fluide.	( m/ s )
$L$	Longueur caractéristique.	(m)
$\beta$	Coefficient de dilatation du fluide.	(°C <sup>-1</sup> )
$g$	Accélération de la pesanteur.	( m /s <sup>2</sup> )
$\Delta T$	Ecart de température paroi-fluide.	(K)
$S$	Surface	(m <sup>2</sup> )
$K$	Coefficient d'absorption.	(m <sup>-1</sup> )
$K_\lambda$	Coefficient d'absorption du milieu associé à la longueur d'onde	
$K_q$	Coefficient d'absorption du milieu, supposé gris, associé à l'intervalle $\Delta\lambda_q$ .	
$I_\lambda$	Intensité de rayonnement de longueur d'onde.	(W/m <sup>2</sup> )
$I_q$	Intensité du rayonnement associé à l'intervalle de longueur	
d'onde $\Delta\lambda_q$		
$n$	Indice de réfraction.	/
$\vec{n}$	Vecteur unitaire de la surface	/
$e$	Epaisseur du matériau de couverture	(m)
$\omega$	L'humidité spécifique de l'air	(kg air sec/kg eau)
$L_s$	Longueur de la serre	(m)
$V_s$	Volume de la serre	(m <sup>3</sup> )
$Q$	Chaleur échangée par convection	(W)

**Symboles grecs**

$\lambda$	Conductivité thermique	(W/ m. K).
$\rho$	Masse volumique	(kg /m <sup>3</sup> ).
$\varepsilon$	Émissivité	/
$r$	Réfectivité	/
$\mu$	Viscosité dynamique	(m <sup>2</sup> /s)
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman	(W/ m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> ).
$\Omega_m$	Angle solide	(Radian).
$\Phi_{in}^q$	Flux radiatif reçu par la paroi	(W)

**Nombres adimensionnels**

Gr	Nombre de Grashof.
Pr	Nombre de Prandtl.
Nu	Nombre de Nusselt.
Re	Nombre de Reynold.

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	Schématisation de l'effet de serre.....	6
<b>Figure I.2</b>	Serre tunnel.....	8
<b>Figure I.3</b>	Serre multi chapelle.....	9
<b>Figure I.4</b>	Aération par un seul versant.....	10
<b>Figure I.5</b>	Aération par double versant.....	10
<b>Figure I.6</b>	Aérations mécanique des serres.....	11
<b>Figure I.7</b>	Schéma explicatif de cooling système.....	12
<b>Figure II.1</b>	Spectre électromagnétique.....	18
<b>Figure II.2</b>	Illustration des échanges radiatifs dans un milieu semi Transparent.....	22
<b>Figure II.3</b>	Schématisation de la discrétisation d'un dièdre en angles solides de contrôle.....	23
<b>Figure II.4</b>	Discrétisations de l'angle solide en pixels.....	24
<b>Figure II.5</b>	Schématisation de volume de contrôle.....	25
<b>Figure II.6</b>	Mode de réflexion et de réfraction.....	27
<b>Figure II.7</b>	Illustration des rayonnements réfractés et réfléchis à travers un dioptre plan.....	28
<b>Figure II.8</b>	Schématisations des rayonnements réfractés.....	30
<b>Figure II.9</b>	Réfraction à travers une paroi d'épaisseur « e » .....	32
<b>Figure II.10</b>	Schématisation des rayonnements réfléchis par différents types de parois opaques.....	34

<b>Figure III.1</b>	Vue globale de GAMBIT .....	38
<b>Figure III.2</b>	Exemples de maillages .....	39
<b>Figure III.3</b>	Type de résolution.....	41
<b>Figure III.4</b>	Vue globale de l'environnement Fluent .....	41
<b>Figure III.5</b>	La serre maillée sous GAMBIT .....	44
<b>Figure III.6</b>	Représentation des stands de végétations te des humidificateurs sous Gambit .....	45
<b>Figure III.7</b>	Différents plans de la serre étudiée sous Solid Work.....	45
<b>Figure III.8</b>	Courbe des résidus pour un débit de 0.8 kg/s.....	47
<b>Figure III.9</b>	Température des feuilles au niveau de 3 plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	48
<b>Figure III.10</b>	Distribution de l'air au niveau de 3 plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	48
<b>Figure III.11</b>	Température de l'air intérieure de la serre sur 3 plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	49
<b>Figure III.12</b>	Distribution de l'humidités relative sur les plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	49
<b>Figure III.13</b>	Température de l'air intérieure sur 3 plans Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>3</sub> .....	50
<b>Figure III.14</b>	Distribution de la vitesse sur 3 plans Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>3</sub> .....	50
<b>Figure III.15</b>	Distribution de l'humidité absolue sur 3 plans Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>3</sub> .....	51
<b>Figure III.16</b>	Courbe des résidus pour un débit de 0.6 kg/s .....	51
<b>Figure III.17</b>	Température de l'air intérieur sur 3 plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	52
<b>Figure III.18</b>	Distribution de l'humidité absolue sur 3 plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	52
<b>Figure III.19</b>	Température des feuilles au niveau de 3 plans X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	53

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b>	Coefficient de transmission pour le verre, PE, PVC.....	4
<b>Tableau I.2</b>	Evolution de la température initiale en fonction de l'humidité relative externe.....	12
<b>Tableau III.1</b>	Condition d'entrée d'air.....	46

# Sommaire

## Table des matières

**Introduction générale**

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

**Chapitre I : Généralités sur les serres**

1. Introduction.....	3
2. Définition d'une serre agricole .....	3
3. Le climat sous serre.....	3
3.1. La lumière.....	3
3.2. La température.....	4
3.3. L'humidité .....	4
3.4. La luminosité .....	5
3.5. L'effet de serre.....	5
3.6. Orientation de la serre.....	6
4. Aspects spécifiques d'une serre .....	6
4.1. La photosynthèse .....	6
4.2. Evapotranspiration.....	6
4.3. Respiration.....	7
5. Effet du climat chaud sur la longévité des serres.....	7
5.1. Les contraintes climatiques sur les serres.....	7
5.2. Le choix du type de serre.....	7
5.2.1. Les serres chapelles et multi-chapelles .....	8
5.2.2. La serre bioclimatique (Chinoise) .....	9
6. Humidification de l'air.....	9
6.1. Types de ventilation.....	10
6.2. Système de refroidissement .....	11
7. Conclusion .....	12

**Chapitre II : Bilans thermiques et massique**

1. Introduction.....	14
2. Les échanges de chaleur par conduction.....	14
3. Les échanges de chaleur par convection .....	15
3.1. Convection naturelle.....	15
3.2. Convection forcée.....	16

- 3.3. Convection mixte..... 16
- 4. Les échanges de chaleur par rayonnement..... 17
  - 4.1. Rayonnement de courte longueur d’onde (CLO) ..... 18
  - 4.2. Rayonnement de grande longueur d’onde (GLO) ..... 18
- 5. Transfert de masse ..... 18
  - 5.1. Vapeurs d’eau ..... 19
  - 5.2. Dioxyde de carbone ..... 20
- 6. Equations de transfert radiatif (ETR) ..... 20
  - 6.1. Ecriture discrétisée de l’ETR..... 22
- 7. Traitements de l’ETR aux parois et dans les milieux semi transparents ..... 26
  - 7.1. Cas des dioptrés spéculaires ..... 26
    - 7.1.1. Réflectivité et transmittivité ..... 27
    - 7.1.2. Intensité et direction des rayonnements émis et transmis ..... 28
  - 7.2. Cas des dioptrés diffus..... 29
    - 7.2.1. Réflectivité ..... 29
    - 7.2.2. Intensité et direction des rayonnements émis et transmis ..... 30
  - 7.3. Intensité et direction des rayonnements émis et transmis par une paroi partiellement diffuse ..... 31
- 8. Transmittivité d’une paroi d’épaisseur « e »..... 31
- 9. Traitements de L’ETR aux parois opaques..... 32
- 10. Méthode discret ordinates (DO) ..... 34
  - 10.1. Présentations du modèle (DO)..... 34
  - 10.2. Mise en œuvre informatique de la méthode DO ..... 34
    - 10.2.1. Condition aux limites de la voute céleste ..... 34
    - 10.2.2. Prise en compte des phénomènes de réflexion ..... 34
    - 10.2.3. Couplage radiatif-convectif-transfert de masse ..... 35
- 11. Conclusion..... 35

**Chapitre III : Simulation numérique**

- 1. Introduction..... 36
- 2. Définition de la CFD..... 36
- 3. Mise en œuvre d’un code de CFD ..... 37
- 4. Définition de la méthode des volumes finis..... 37
- 5. Présentation de GAMBIT ..... 37

- 5.1. Interface ..... 38
- 6. Choix du type de maillage ..... 38
  - 6.1. Maillage structuré ..... 38
  - 6.2. Maillage non structuré ..... 39
  - 6.3. Maillage hybride (mixte) ..... 39
- 7. Présentation de Fluent ..... 40
  - 7.1. Interface du code Fluent ..... 40
  - 7.2. Conditions aux limites utilisées par le code Fluent ..... 42
  - 7.3. Les étapes à suivre pour la modélisation numérique par Fluent ..... 43
  - 7.4. Simulation de la convection sous serre ..... 43
    - 7.4.1. Position du problème ..... 43
- 8. Description de la serre étudiée ..... 44
  - 8.1. Conditions aux limites ..... 46
- 9. Résultats ..... 46
  - 9.1. Climat sous serre ..... 46
  - 9.2. Résultat et discussions ..... 53
- Conclusion générale ..... 55**

# *Introduction générale*

## Introduction générale

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

Les principaux facteurs climatiques du milieu interne à une serre, qui sont différents par rapport à l'extérieur, sont : la température, la lumière et l'humidité. Chacun de ces facteurs est conditionné dans la serre, par son niveau à l'extérieur de l'enceinte, par les propriétés du matériau de couverture et par les caractéristiques propres à cette serre.

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

L'étude et la modélisation du microclimat de la serre (température, humidité, évapotranspiration, condensation, échange convectif et radiatif, et ventilation) est un moyen indispensable 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.

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

La simulation numérique à l'aide de ces logiciels (*CFD*) a été largement utilisée dans l'analyse de l'hétérogénéité climatique sous serre. Cette approche peut fournir des indications réalistes du climat des serres pour une large gamme de conditions aux limites et géométriques, comme elle peut orienter le domaine de contrôle des serres et de l'optimisation de leurs performances.

Notre travail s'intéresse à l'étude d'une serre de culture de tomate sous des conditions climatique extrêmes caractères par un rayonnement solaire de  $1000 \text{ w/m}^2$  et une température d'air de  $45^\circ\text{C}$ .

Considérant un climat sec, on prévoit d'humidifier l'air ambiant pour refroidir la serre.

S'agissant d'une étude numérique on a recours au code de calcul Fluent pour ce faire, on procède selon le plan de travail suivant :

On s'est intéressé, au chapitre I, aux éléments qui conditionnent le climat interne d'une serre de culture. Le chapitre II nous avons présenté l'équation de transferts radiatifs, ainsi que la convection et la conduction, par la suite on s'est intéressé à la méthode discret ordinates (DO). Le troisième chapitre, les résultats de simulation sous forme de champs et de profils dynamiques, thermiques à l'intérieur de la serre en présence de végétale.

# *Chapitre I : généralités sur les serres*

## 1. Introduction

Né, il y a un peu plus de cinquante ans, le système de culture abritée, est devenu de nos jours un outil indispensable pour subvenir aux besoins alimentaires en produit frais, car la fonction essentielle d'une serre agricole est de créer un microclimat plus favorable aux exigences de la plante que le climat locale ou régionale. La température représente l'un des paramètres les plus importants pour la gestion du climat malgré la difficulté de la contrôler. La culture sous abris est un système de production agricole intensif dont les interactions avec l'environnement naturel, social et économique sont très fortes.

## 2. Définition d'une serre agricole

Une serre est une structure close ou semi-ouverte translucide, destinée en général à la production agricole. Elle vise à protéger les plantes non rustiques et à favoriser la croissance des cultures (légumes, fleurs, etc.) en créant un microclimat que l'on peut maîtriser.

La définition de la norme française NF U57-001, déc.1984 décrit la serre comme « une enceinte destinée à la culture ou à la production des plantes en exploitant le rayonnement solaire. Les dimensions de cette enceinte permettent à un homme de travailler aisément à l'intérieur ». [1]

Il s'agit donc, de créer des conditions climatiques plus favorables que le climat local, ainsi pour permettre les cultures dites « hors saison » grâce à un gain de température par effet de serre sous la structure, afin d'assurer une productivité continue et maximale.

## 3. Le climat sous 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, du volume de l'abri, son orientation et des qualités physico-chimiques des matériaux de la couverture utilisée.

Les principaux facteurs du milieu interne d'une serre, qui sont modifiés par rapport à l'extérieur sont : la lumière, la température, l'humidité et les concentrations des gaz (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).

### 3.1. La lumière

Sous abri, les conditions d'éclairement 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 (tableau (I-1)). La recherche d'un éclairement 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. [2]

**Tableau (I.1) : Coefficient de transmission pour le verre, PE, PVC [2]**

Matériau	Verre	PVC	Polyéthylène
Rayonnement solaire	0,86	0,50	0,80
Rayonnement IR thermique	0	0,30	0,80

### 3.2. La température

La température de l'air est prise comme résultante du bilan d'énergie s'établissant sous serre, l'effet de serre se concrétise de la façon suivante : **Figure (I.1)**

- **Pendant la nuit** : la déperdition d'énergie par rayonnement infrarouge limite l'atténuation de refroidissement nocturne. Dans le cas des nuits particulières et en absence de turbulence à l'intérieur de la serre ce phénomène peut entraîner des abaissements de température plus marquée, on parle alors de l'inversement de température.
- **Pendant le jour** : les effets conjugués de piégeage des apports radiatifs solaires et de la réduction des échanges convectifs conduisent à une élévation de température excessive. Il est donc nécessaire d'intervenir en augmentant la vitesse de renouvellement de l'air soit par aération statique soit par ventilation dynamique. [2]

### 3.3. L'humidité

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 la saturation. Les conséquences de l'humidité sont :

- **Pendant le jour** : 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 d'où la nécessité de prévoir un système de ventilation de la serre.
- **Pendant la nuit** : Les serres étant généralement fermées, l'humidité relative est élevée. Au cours de la nuit, la température baisse. Il se produit fréquemment des condensations

sur les parois et les gouttes condensées peuvent tomber sur la végétation (Conditions favorables au développement des certaines maladies...). [3]

### 3.4. La luminosité

Seulement une partie du rayonnement solaire est utile à la plante pour qu'elle effectue la photosynthèse, elle est appelée rayonnement photosynthétique Actif (P.A.R.). Le P.A.R. est compris entre 400 et 700 nm, il coïncide donc avec le rayonnement visible (380 à 760 nm). Le rayonnement capté par la plante est l'énergie nécessaire à la synthèse de matière organique par la réaction de photosynthèse.



La plante puise du CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant et dans le substrat et produit de l'oxygène et des sucres. [4]

### 3.5. L'effet de serre

L'énergie solaire qui pénètre dans la serre est absorbée par les plantes, le sol et les différentes structures. Les parois ne laissant pas, en partie, sortir les rayonnements infrarouges longs, il en résulte que l'énergie solaire est piégée par la serre, c'est "l'effet de serre".

Cet effet est favorable au maintien ou à l'élévation des températures de l'air et du sol lorsque les températures extérieures sont trop basses.

Mais, en été, lorsque les températures extérieures sont élevées, cet effet devient défavorable.

L'effet de serre peut être considéré comme la somme de deux phénomènes [5] :

- Le piégeage du rayonnement de grande longueur d'onde (GLO) par le matériau de couverture. Il est d'autant plus important que le matériau est plus opaque aux GLO.
- L'effet de confinement de la masse d'air contenue dans le volume de la serre, dont les échanges thermiques avec l'extérieur sont fortement ralentis à cause des parois. [5]

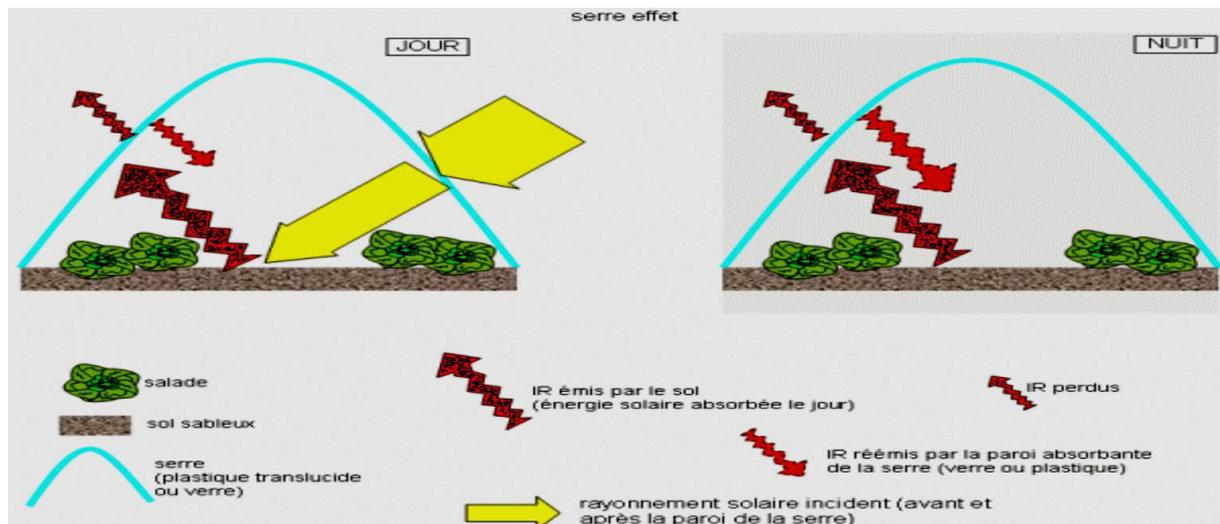


Figure (I-1) : Schématisation de l'effet de serre

### 3.6. Orientation de la serre

Le choix de l'orientation d'une serre se fait en tenant compte de l'éclairement naturel solaire, de type de serre, de la direction du vent dominant et des caractéristiques particulières du terrain, il est difficile d'éviter l'existence d'une hétérogénéité climatique à l'intérieur de la serre (la répartition de la lumière dans la serre est hétérogène).

Le sud est beaucoup plus éclairé et cela d'autant plus que le matériau de couverture est plus diffusant, la répartition est également hétérogène dans le temps avec une accentuation du maximum à midi.

Une orientation Nord-Sud va capter plus de lumière de fin mars à septembre, avec une répartition plus homogène, cette orientation (Nord-Sud) a l'avantage de réduire les effets néfastes des vents tant sur la structure que sur les déperditions énergétiques. [6]

## 4. Aspects spécifiques d'une serre

### 4.1. La photosynthèse

La photosynthèse est un processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable. Elle repose sur la transformation de l'oxyde, du carbone et d'hydrogène à faible énergie potentielle chimique, en hydrates de carbone à énergie potentielle chimique élevée. [7]

### 4.2. Evapotranspiration

Les transferts d'eau du système sol-végétation dans la serre peuvent s'effectuer selon deux canaux. Soit par évaporation directe de l'eau du sol soit par transpiration des

végétaux préalablement prélevée dans le sol par leurs systèmes racinaux. L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol. Les deux processus se produisent simultanément et de telle manière qu'il est difficile de les distinguer. Ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration. [7]

### **4.3. Respiration**

Les hydrates de carbone formés par photosynthèse sont distribués dans tout l'organisme et peuvent alors être soit polymérisés en macromolécules destinées à l'élaboration des parois cellulaires, soit mis en réserve sous forme de sucre ou de graisse, soit finalement utilisés comme source d'énergie lors de synthèse d'autres substances organiques.

La récupération de l'énergie chimique emmagasinée dans les hydrates de carbone s'effectue par un processus de dégradation oxydative, dénommé respiration, qui peut être considéré dans une certaine mesure comme la réaction inverse de la photosynthèse. [7]

## **5. Effet du climat chaud sur la longévité des serres**

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 (vent de sable, chaleur, ...) ou interne (poids, des cultures palissées portées par la charpente, poids des équipements de ventilation, irrigation, ...), le tout en répondant aux considérations économiques (prix de revient, longévité, etc...). [8]

### **5.1. Les contraintes climatiques sur les serres**

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

- les températures élevées à l'extérieures, pendant le jour.
- les vents importants.
- les tempêtes de sable, pouvant endommager la structure de la serre.
- les pathogènes

### **5.2. Le choix du type de serre**

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 : [9]

### Les serres tunnels "légères"

Les serres légères sont généralement préférées pour les cultures à faible valeur ajoutée (i.e. maraîchage). Il s'agit de structures système de climatisation hormis l'aération dont la couverture est le plus souvent en plastique.

Les serres légères sont le plus souvent utilisées dans des régions au climat méditerranéen dans lesquelles les besoins en chauffage sont relativement faibles. Elles représentent 99% des surfaces de serre en Espagne, 98% au Portugal, 95% en Grèce, 91% en Italie (Von Elsner, 2000a). [9]



**Figure (I-2) : serre tunnel**

#### 5.2.1. Les serres chapelles et multi-chapelles

Les serres lourdes, souvent des serres multi-chapelles en verre sont principalement utilisées pour les cultures à forte valeur ajoutée (i.e. les plantes fleuries, les fleurs coupées, les tomates, les concombres...) car elles requièrent un coût d'investissement relativement élevé. Leur couverture est généralement en verre ou en double paroi plastique gonflable. Elles sont principalement utilisées dans les régions au climat tempéré (98% des surfaces de serres aux Pays bas et au Danemark, 95% en Belgique, 86%, en Suède, 30% en France).

Le choix du type de serre dépend du coût d'investissement et du type de culture mais aussi et surtout du climat de la région considérée.

Dans notre cas l'étude se fera dans climat chaud et sec, dans le sud de l'Algérie, par conséquent il est préférable d'opter pour les serres qui ont une couverture en verre. [9]



**Figure (I-3) : Serre multi chapelle**

### **5.2.2. La serre bioclimatique (Chinoise)**

La serre bioclimatique est une structure qui s'inscrit dans une démarche environnementale et durable. Comme le terme l'indique, la serre bioclimatique utilise les variations du climat : son fonctionnement suit les variations environnementales et climatiques pour assurer un chauffage et une régulation naturelle de la structure.

Concrètement, la serre bioclimatique se chauffe grâce aux rayons du soleil : construite à l'aide de matériaux favorisant la captation, l'isolation et la conservation de la chaleur extérieure, la serre bioclimatique, appelée aussi serre solaire passive, n'est en aucun cas une serre équipée de panneau solaire.

La climatisation interne est également basée sur une circulation naturelle de l'air : l'énergie solaire emmagasinée le jour est restitué la nuit.

L'orientation idéale pour une telle serre est le sud. Lors de la construction de la serre bioclimatique, certains principes sont à respecter tels que les vitrages verticaux, indispensables pour attirer les rayons solaires l'hiver et préserver la fraîcheur l'été.

## **6. Humidification de l'air**

Afin de maintenir des conditions de température acceptables pour les plantes, il importe d'évacuer l'excès de chaleur en période estivale dès lors que l'ensoleillement est important. De même, afin de maintenir un taux d'humidité acceptable, il importe de ventiler les serres. Des systèmes de ventilation mécanique sont parfois utilisés pour extraire l'air chaud et/ou humide de la serre et le remplacer par de l'air extérieur plus frais et/ou plus sec. [8]

### 6.1. Types de ventilation

- **La Ventilation naturelle** : Dans la ventilation naturelle, l'air chaud devient moins dense et s'élève. Cet air chaud sort et permet à l'air frais de s'écouler dans la serre à travers les ouvrants de ventilation. Plusieurs facteurs interagissent et interviennent dans la ventilation naturelle :
  - Les paramètres géométriques de la serre (hauteur, longueur, et forme de la serre
  - le mode de gestion des ouvrants.
  - les aménagements particuliers réalisés à l'intérieur de la serre (présence d'écran thermique ou d'écran d'ombrage, présence de filets d'insectes (insect-proof).
  - les conditions météorologiques qui règnent à l'extérieur de la serre : température, vitesse et direction du vent notamment. [9]



**Figure (I-4) :** Aération par un seul versant



**Figure (I-5) :** Aération par double versant

- **La Ventilation Forcée** : permet d'atteindre des débits élevés de circulation d'air dans une serre de grande dimension ou dans une serre où la ventilation naturelle est insuffisante. Elle présente l'avantage de permettre un réglage précis de la vitesse et de la direction de l'air, de stimuler l'assimilation de  $\text{CO}_2$  et d'éviter la condensation à la surface des feuilles en forçant l'air à circuler au sein du couvert végétal. La ventilation mécanique ne demande pas une serre de construction aussi complexe que celle qui est ventilée par aérateurs latéraux et faitiers, mais elle exige une plus grande étanchéité. Les prises d'air et les ventilateurs d'extraction doivent être conçus en vue de permettre une circulation homogène de l'air. L'espacement des ventilateurs et l'emplacement des prises d'air dépendent du type de serre et de plantes qu'on y cultive, et de la direction

du courant d'air par rapport à l'axe longitudinal de la serre et aux planches de culture. Pour la ventilation d'été, la serre doit être dotée de prises d'air sur toute sa longueur ou sa largeur et, si possible, du côté du vent dominant. Leur ouverture devrait être réglée automatiquement de façon que la vitesse de l'air à l'entrée soit peu élevée, de l'ordre de 0,75 à 2,50 m/s [10].



**Figure (I-6) : Aérations mécanique des serres**

## 6.2. Système de refroidissement

Les panneaux de refroidissement par évaporation, associées aux systèmes de ventilation mécanique, abaissent la température à l'intérieur de la serre. Le principe est celui d'un refroidissement adiabatique, efficace dans les climats chauds et secs.

Il consiste à refroidir l'air extérieur en le faisant circuler à travers des panneaux (pads) composés de feuilles en cellulose alvéolaire ondulées et collées. Ces pads sont positionnés en façade de la serre et humidifiés en continu. Au contact de l'eau, l'air se charge en humidité et permet de contrôler l'hygrométrie de la serre. Un système de pompage distribue l'eau dans les pads. Une partie de l'eau s'évapore sous l'action des ventilateurs. L'eau restante est collectée dans une gouttière au bas du mur puis stockée dans des réservoirs avant d'être recyclée.

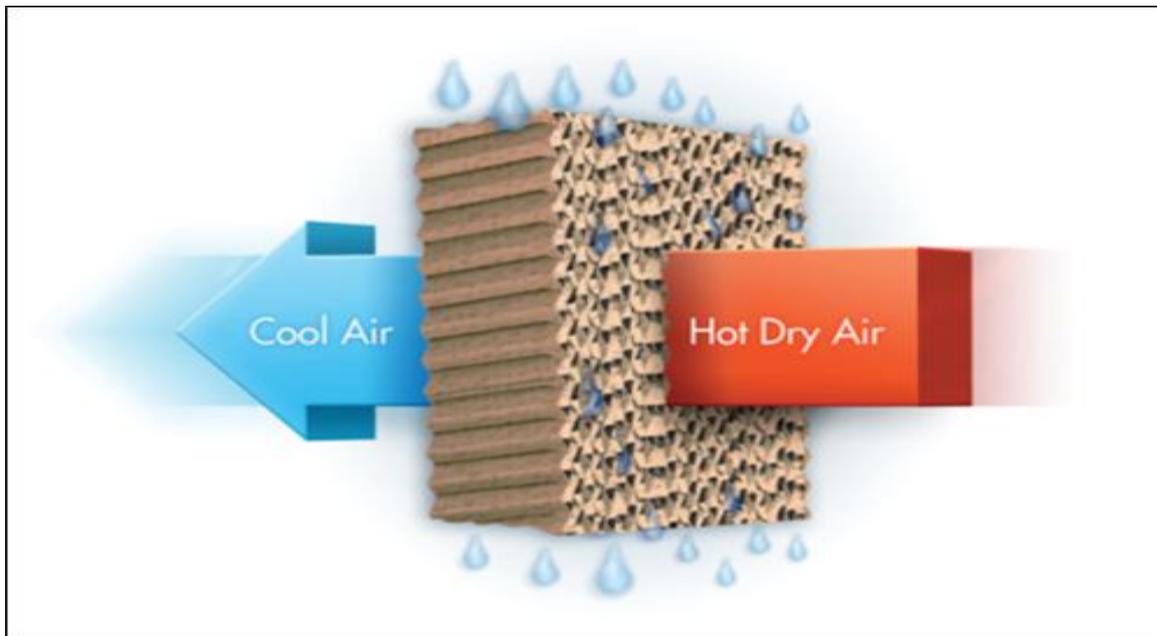


Figure (I-7) : Schéma explicatif de cooling système

Tableau (I.2) : évolution de la température initiale en fonction de l'humidité relative externe

Température externe initiale (°C)	Humidité relative externe				
	15%	30%	40%	50%	60%
	Température interne finale (°C)				
30	18	20	22	24	25
35	21	24	26	28	30
40	25	28	31	33	34

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a abordé, les différentes variables climatiques que on peut trouver dans un climat sous serre, ensuite-on à vue les mécanismes biologiques d'une plante sous un climat abrités, et l'effet du climat sur la longévité des serres, comme on a traité les différents

systèmes de ventilation qui permet à la serre d'être dans des conditions climatique favorable au développement de la végétation.

***Chapitre II : Bilans  
thermiques et massique***

## 1. Introduction

Les sources de variation de température dans une serre sont causées par le rayonnement solaire et par la réflexion du rayonnement de grande longueur d'onde la nuit.

D'autres part, l'existence de phénomènes thermiques plus complexes régissent le comportement thermique de la serre qui transfère un état température vers un état chaleur. Ce dernier est défini comme correspondant à une variation de température. Il existe différents modes de transferts de chaleur : par conduction, convection et ou rayonnement. Les trois modes de transfert de chaleur sont : (Wacquant, 1995).

## 2. Les échanges de chaleur par conduction

Le transfert d'énergie par conduction se produit dans tout référentiel, en particulier dans le référentiel d'un élément matériel, dès lors qu'il existe un gradient de température : il représente l'effet global du transport d'énergie par les porteurs élémentaires (molécules, phonons, électrons, etc.).

Dans le cas d'un fluide, les porteurs élémentaires (molécules, atomes, ions etc.) sont caractérisés par des énergies de translation, éventuellement de vibration-rotation, des énergies électroniques, etc. Le formalisme d'Enskog (Ferziger et Kaper, 1972 ; Chapman et Cooling, 1970 ; Hirschfelder et al, 1964) dérivé de l'équation de Boltzmann permet de calculer, avec une excellente précision, la conductivité thermique d'un gaz comme toutes les autres propriétés de transport (viscosité, diffusivités d'espèces, etc.), même dans le cas d'un mélange dans un milieu réactif.

Dans le cas de solides, les atomes sont liés dans un réseau cristallin plus ou moins parfait. Les vecteurs élémentaires de l'énergie sont les phonons (quanta de vibration du réseau) et, éventuellement, les électrons libres (ou de conduction électrique et thermique). La modélisation des transferts par conduction électrique et thermique relève des méthodes de la physique du solide (Kittel, 1998 ; Ziman, 1971).

Le flux de chaleur par conduction s'exprime par la formule : [11]

$$\Phi = -\alpha A \frac{d\theta}{da} \quad (\text{II-1})$$

(Le signe – indique que la chaleur se transmet de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide).

Avec :

$\alpha$  : coefficient de conductivité

A : section du solide

$d\theta$  : différence de température

$da$  : longueur parcourue par conduction.

### 3. Les échanges de chaleur par convection

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant. [12]

Par unité de temps, la quantité de chaleur échangée par convection entre un fluide à température  $\theta_1$  et un solide à température  $\theta_2$  s'écrit :

$$Q = hS(\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$h$  : coefficient de convection

$S$  : surface d'échange.

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

#### 3.1. Convection 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). [12]

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur par convection aux variables dont il dépend peut-être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :  $Nu=f(Gr, Pr)$  définis par :

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt.}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho^2}{\mu^2} \quad \text{Nombre de Graschof.}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} \quad \text{Nombre de Prandtl.}$$

Avec :

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection. ( $W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ).

$\lambda$  : Coefficient de conductibilité thermique de l'air. ( $W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ).

$C_p$  : Chaleur massique ( $J / kg \text{ } ^\circ C$ ).

$\rho$  : Masse volumique. ( $kg / m^3$ ).

$\mu$  : Viscosité dynamique. ( $m^2 / s$ ).

$u$  : Vitesse du fluide. ( $m / s$ ).

$L$  : longueur caractéristique. (m).

$\Delta T$  : écart de température paroi-fluide. ( $^\circ C$ ).

$\beta$  : Coefficient de dilatation du fluide. ( $^\circ C^{-1}$ ).

$g$  : accélération de la pesanteur ( $m / s^2$ ).

### 3.2. Convection forcée

Ce phénomène apparaît quand le mouvement du fluide est imposé par une cause mécanique extérieure au système. C'est le cas, par exemple, des échangeurs industriels, des radiateurs de voitures, qui sont essentiellement des convecteurs : deux fluides en mouvement échangent de l'énergie à travers une paroi dont la température diffère des leurs. Comme les vitesses d'écoulement peuvent atteindre des valeurs très élevées, le transfert associé à la convection forcée est souvent efficace. [13]

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection forcée aux variables dont il dépend peut-être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :  $Nu = f(Re, Pr)$  définis par :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds.}$$

### 3.3. Convection mixte

Ce cas se rencontre souvent dans les conditions naturelles, lorsque la vitesse du vent est faible. Les mouvements de l'air sont alors produits à la fois par les facteurs qui entretiennent le vent et par les gradients verticaux de température. Les transferts de chaleur et de masse sont alors dus en partie à la convection naturelle et en partie à la convection forcée.

#### 4. Les échanges de chaleur par rayonnement

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie naturelle faisant chauffer le système terrestre. La partie qui nous parvient se situe dans une bande spectrale grossièrement comprise entre 0.3 et 2.5  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde où, sa répartition par régions spectrales est [13] :

- Proche de l'ultraviolet, caractérisé par une longueur d'onde comprise entre 0.3 et 0.4  $\mu\text{m}$ . Cette partie du rayonnement ne représente que quelque pourcentage de l'énergie totale.
- le visible caractérisé par un domaine de longueur d'onde allant de 0.4 à 0.8  $\mu\text{m}$ . Il représente environ 45% de l'énergie totale.
- L'infrarouge qui se caractérise par une longueur d'onde limitée entre 0.8 et 2.5  $\mu\text{m}$ . Cette dernière représente la grande partie du rayonnement solaire arrivant à la terre (environ 55% de l'énergie totale).

Par conséquent, le bilan radiatif sous n'importe quel élément terrestre est la somme des échanges radiatifs de courtes (le rayonnement proche de l'ultraviolet et le visible) et de grandes longueurs d'ondes (le rayonnement infrarouge).

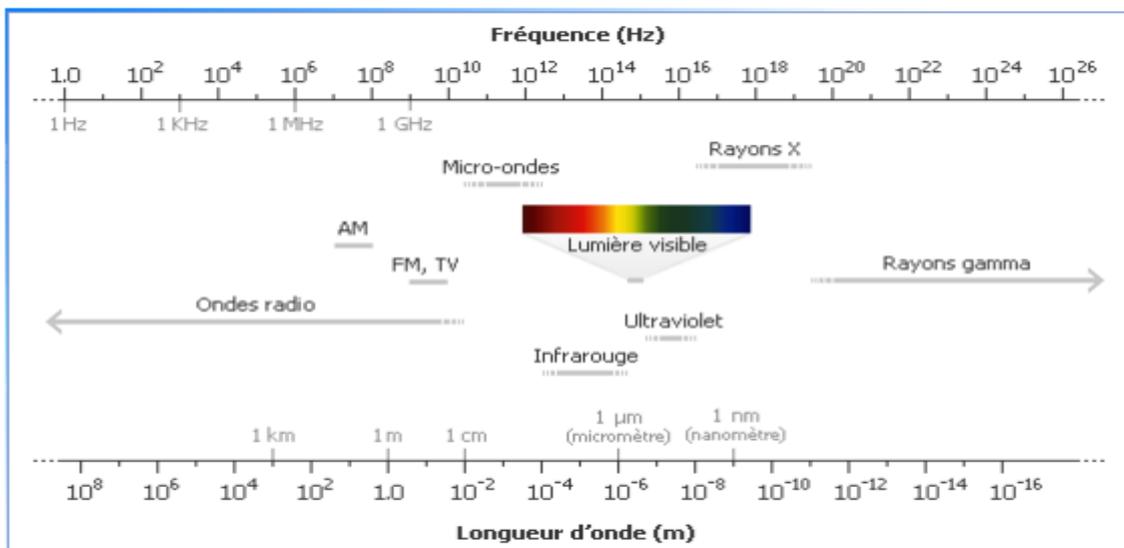


Figure (II-1) : Spectre électromagnétique.

#### 4.1. Rayonnement de courte longueur d'onde (CLO)

La propriété de transparence de la couverture des serres vis-à-vis de certains rayonnements, permet de pénétrer une grande partie du rayonnement solaire et plus précisément celui qui est compris entre 0.4 et 0.7 $\mu\text{m}$  (rayonnement visible) et qui contribue au processus de la photosynthèse [15]. Sur un plan quantitatif, la portion du rayonnement extérieur transmise dans la serre a été estimée d'environ 60%, le reste étant absorbé ou réfléchi par les parois et les différentes structures. La grande partie du rayonnement pénétrant est interceptée ou absorbée par la culture surtout lorsque la culture est bien développée. La partie qui contribue à la photosynthèse peut être négligée car elle ne représente que 1 à 2% du rayonnement global incident au sommet de la culture, mais la part du rayonnement réfléchi vers l'extérieur n'est pas négligeable dans certains cas, notamment le cas de cultures hors sol. [14]

#### 4.2. Rayonnement de grande longueur d'onde (GLO)

Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes se font entre les éléments de la serre (sol, plante et parois) et l'extérieur. La paroi est l'élément le plus important dans ces échanges car ses propriétés de transmission dans l'infrarouge qui varient suivant la nature du matériau de couverture caractérise la quantité du rayonnement (infra rouge) intercepté sous serre [14]. Donc, les matériaux utilisés pour la couverture doivent être le plus transparent possible dans le domaine du visible afin de ne pas pénaliser la photosynthèse et être opaques dans le domaine des infrarouges thermiques qui n'ont que peu d'action sur la physiologie des plantes. Du fait de son importance, les échanges radiatifs entre les différents constituants de la serre ont été profondément étudiés par nombreux auteurs (Nisen, 1969 ; Nisen et Dognieux, 1975 ; Kozai et al., 1978 ; ...), où la simulation du rayonnement était l'objectif principal de ces études. Par conséquent, ces travaux ont conduit à élaborer des modèles très détaillés qui prennent en compte l'ensemble des échanges radiatifs en fonction de facteurs caractéristiques (Monteil, 1985 ; Kimball, 1986 ; Issanchou, 1991) [14].

Ils ont démontré ainsi que :

- La proportion du rayonnement diffus sous serre est beaucoup plus forte qu'en plein air.
- La disposition des cultures en rang complique le traitement du problème (Stanhill et al, 1973 ; Tchamitchian, 1990).

### 5. Transfert de masse

À 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. [15]

### 5.1. Vapeurs 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. 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 (le botrytis par exemple),
- la formation de gouttes sur les parois de la serre réduit sensiblement la transmission du rayonnement. [15]

## 5.2. Dioxyde de carbone

Pour réaliser la photosynthèse, la plante a besoin de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le CO<sub>2</sub> présent dans l'air est fixé par la plante au niveau des feuilles. Ainsi la quantité de CO<sub>2</sub> à proximité du végétal est plus réduite. Afin de ne pas diminuer l'activité des cultures, il est nécessaire de maintenir un taux de CO<sub>2</sub> important. Les phénomènes de diffusion du CO<sub>2</sub> vers les zones proches du végétal du fait de leur plus faible concentration en CO<sub>2</sub> ne sont pas suffisants pour assurer l'apport nécessaire aux besoins des cultures. Il est alors nécessaire de favoriser le renouvellement de l'air à l'aide de la ventilation. On notera que pour certaines cultures, un enrichissement de l'air en CO<sub>2</sub> est pratiqué afin d'augmenter les rendements de production. [15]

## 6. Equations de transfert radiatif (ETR) [16]

En tout point de l'espace, repéré par le vecteur position  $\vec{r}$ , l'intensité du rayonnement suivant la direction  $\vec{l}$ , s'atténue en traversant un milieu semi transparent. De plus, ce dernier caractérisé par son indice de réfraction (n), par son coefficient d'absorption (K) et assimilé à un corps gris, émet un rayonnement diffus dans toutes directions de l'espace. Le bilan thermique effectué sur un élément de volume (Figure II-2.) permet d'écrire (Necati, 1973 ; Ismail thermique et al., 2004) :

$$\frac{dI_{\lambda}(\vec{r}, \vec{l})}{dl} + K_{\lambda} \cdot I(\vec{r}, \vec{l}) = K_{\lambda} \cdot I_{b\lambda} \quad (\text{II-3})$$

Où :

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$I_{\lambda}$  : Intensité du rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$ .

$K_{\lambda}$ : Coefficient d'absorption du milieu associé à la longueur d'onde  $\lambda$ .

En subdivisant l'ensemble du spectre d'onde en N intervalles, définis par : [17]

$\lambda\Delta_q = [\lambda_{1q}, \lambda_{2q}]$  : Avec q variant de 1 à N. Avec :

$$\sum_{q=1}^N (\Delta\lambda_q) = [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$$

Pour lesquels, la valeur minimale du spectre d'onde est à zéro, alors que la valeur maximale (en  $\mu\text{m}$ ) est déduite par l'expression suivante (Fluent,2001) :

$$n \cdot \lambda_{\max} \cdot T_{\min} \geq 50000 \quad (\text{II-4})$$

Où :

$T_{\min}$  : valeur minimale de la température, exprimée en K, que l'on peut rencontrer dans l'ensemble du domaine discrétisé.

$n$  : valeur minimale de l'indice de réfraction de l'ensemble des milieux constituant le domaine discrétisé.

L'intégration de l'ETR, donnée par l'expression (II-3), sur chacun de ces intervalles conduit à :

$$\frac{dI_q(\vec{r}, \vec{\ell})}{d\ell} \cdot \Delta\lambda_q + K_q \cdot I_q(\vec{r}, \vec{\ell}) \cdot \Delta\lambda_q = [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})] K_q \cdot n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (\text{II-5})$$

Avec :  $K_q$  : Coefficient d'absorption du milieu, supposé gris, associé à l'intervalle  $\Delta\lambda_q$ .

$I_q$  : Intensité du rayonnement associé à l'intervalle de longueur d'onde  $\Delta\lambda_q$ .

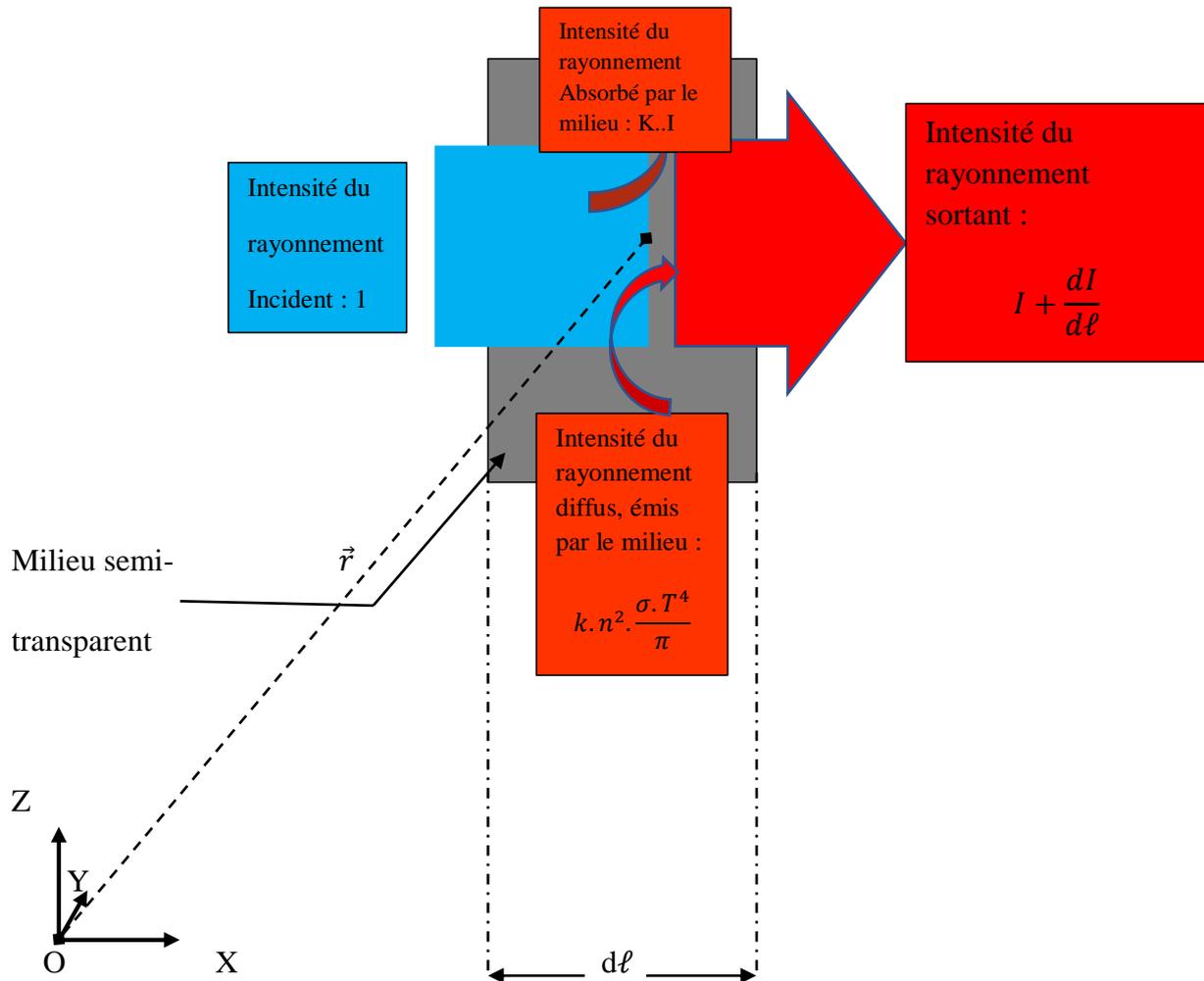
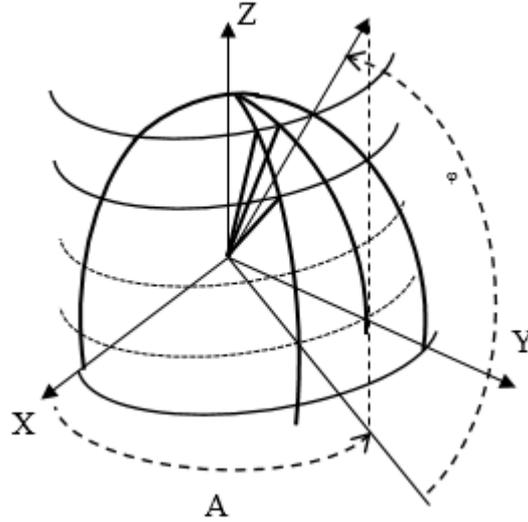


Figure (II-2) : Illustration des échanges radiatifs dans un milieu semi transparent

### 6.1. Ecriture discrétisée de l'ETR

Afin de discrétiser l'ETR, l'ensemble de l'angle solide ( $4 \times \pi$ ), associé à chaque élément de surface du volume de contrôle, est subdivisé en 8 dièdres. Chacun d'eux est discrétisé en  $N_\theta \times N_\varphi$  angles solides, dits angles solides de contrôle.

En 2D et 3D un nombre respectivement de  $4 N_\theta \times N_\varphi$  et  $8 N_\theta \times N_\varphi$  angles solides de contrôle sont associés à l'ETR (figure II-3).[16]



**Figure (II-3) :** schématisation de la discrétisation d'un dièdre en angles solides de contrôle

L'expression (II-5) associée à chaque angle solide  $\Omega_m$ , centré autour d'une direction  $\vec{\ell}_m$  permet alors d'écrire :

$$\frac{dI_q(\vec{r}, \vec{\ell}_m)}{d\ell_m} \Delta\lambda_q \cdot \Omega_m + K_q \cdot I_q(\vec{r}, \vec{\ell}_m) \Delta\lambda_q \cdot \Omega_m = \begin{bmatrix} F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) \\ -F(0 \rightarrow \lambda_{1q}) \end{bmatrix} K_q n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \cdot \Omega_m \quad (\text{II-6})$$

Laquelle s'écrit en coordonnées cartésiennes ;

$$\left[ \mu_m \frac{\partial I_q^m}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_q^m}{\partial y} + \eta_m \left( \frac{\partial I_q^m}{\partial z} \right) + K_q \cdot I_q^m \right] \Delta\lambda_q = [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})] K_q n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \cdot \Omega_m \quad (\text{II-7})$$

Avec :

$$\mu_m, \xi_m, \eta_m : \text{définissent les cosinus directeurs de } \vec{\ell}_m .$$

En multipliant l'expression (II-7) par  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ , puis en l'intégrant sur le volume de contrôle de centre P et de cotés  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$ , (Fig.II-5), on aboutit à :

$$\begin{aligned} & \mu_m \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Omega_m (I_{qe}^m - I_{qw}^m) + \xi_m \Delta x \cdot \Delta z \cdot \Omega_m (I_{qn}^m - I_{qs}^m) + \eta_m \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Omega_m (I_{qt}^m - I_{qb}^m) + \\ & K \cdot I_{qp}^m \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Omega_m = K \frac{\sigma \cdot T_p^4}{\pi} \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Omega_m \end{aligned} \quad (\text{II-8})$$

Où :

$$I_{qg}^m = I_q(\vec{r}, \vec{\ell}_m) \vec{\ell}_m \cdot \vec{n}_g \cdot \Omega_m$$

$\{e, w, n, s, t, b\}$ : Indices relatifs aux centres de surfaces qui délimitent le volume de contrôle.

$$g = \{e, w, n, s, t, b\}.$$

P : Nœud du centre de la maille.

$\Omega_m$ : Angle solide centré autour de la direction  $\vec{\ell}_m$

Par ailleurs, pour plus de précision, l'angle solide  $\Omega_m$  est subdivisé en  $n_{\theta p} \times n_{\phi p}$  pixels (Figure II-4). Ces derniers, repérés par des directions  $\vec{\ell}_i$  centrés autour des angles solides  $\omega_i$  permettent d'écrire :

$$\vec{\ell}_m \cdot \vec{n}_g \cdot \Omega_m = \sum_{i=1}^{n_{\theta p} \times n_{\phi p}} \vec{\ell}_i \cdot \vec{n}_g \cdot \omega_i$$

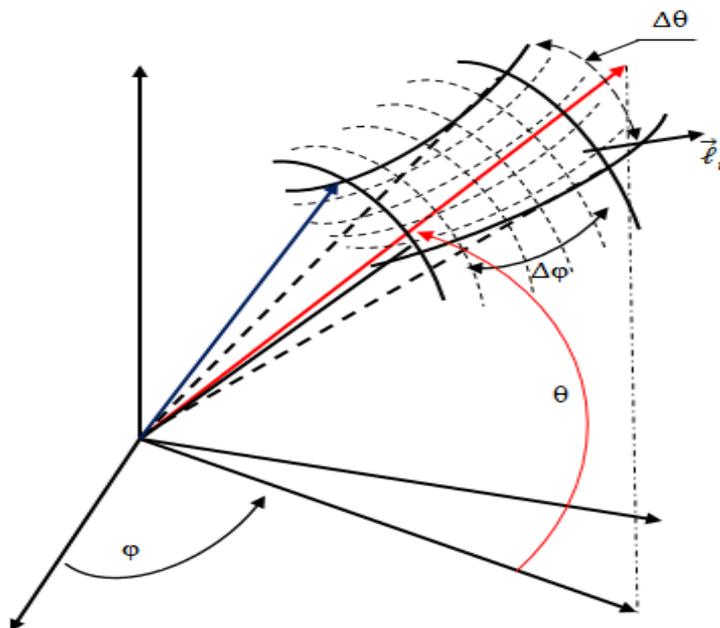


Figure (II-4) : Discretisations de l'angle solide en pixels

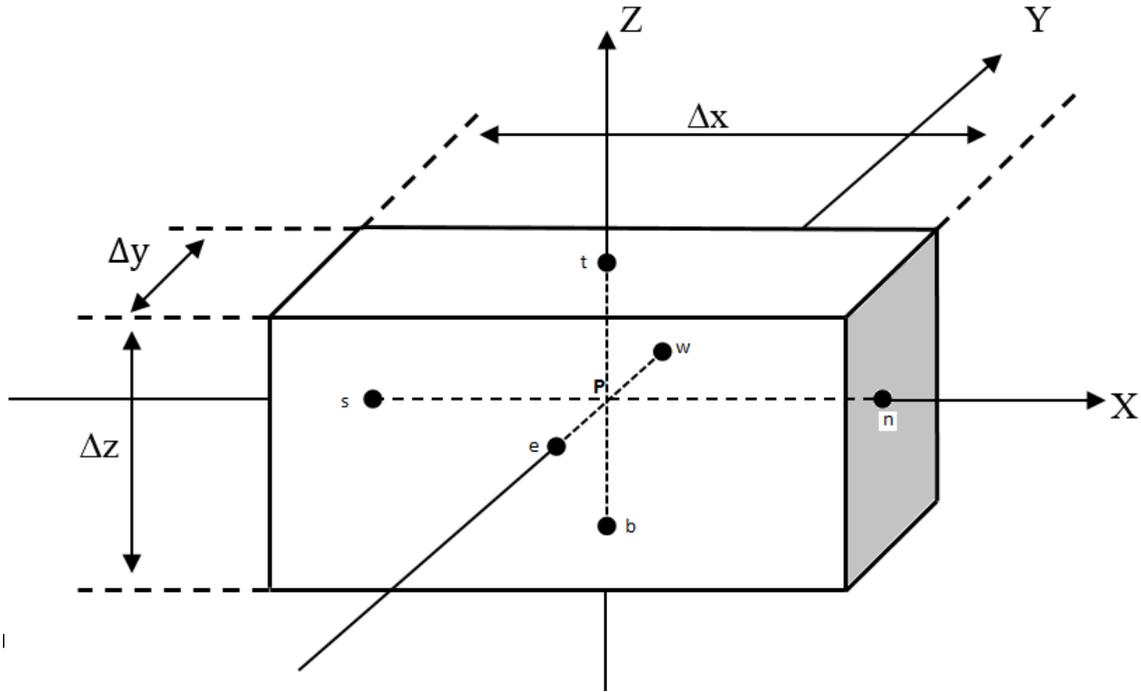


Figure (II-5) : Schématisation de volume de contrôle

Par des schémas d'interpolation, l'intensité du rayonnement aux interfaces est exprimée aux centres des mailles (Ismail *et al.*, 2004). Ce qui permet d'aboutir à un système algébrique linéaire semblable à celui développé pour les variables de vitesse et de températures, de la forme :[16]

$$a_p I_{q^n}^m = a_e I_{q^e}^m + a_w I_{q^w}^m + a_N I_{q^N}^m + a_s I_{q^s}^m + a_T I_{q^T}^m + a_B I_{q^B}^m + S$$

Ce système est constitué de  $N_\theta \times N_\varphi \times N$  équations supplémentaires qui viennent s'ajouter aux équations de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie cinétique turbulente, du taux de dissipation, de diffusion de vapeur et d'énergie.

La résolution de ce système permet d'évaluer, au centre des mailles, les intensités de rayonnement pour les différents intervalles de longueurs d'ondes. Le flux radiatif net associé à chaque élément de volume sera alors calculé, tenant compte des termes explicités dans la relation (II-1), par l'expression suivante : [16]

Flux net =

$$\sum_{m=1}^{N_{\theta} \times N_{\varphi}} \sum_{q=1}^N \left[ K_q \cdot I_{qp}^m \cdot \Delta\lambda_q - [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})] K_q n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \cdot \Omega_m \right] \quad (\text{II-9})$$

Où :

$$\sum_{m=1}^{N_{\theta} \times N_{\varphi}} \sum_{q=1}^N K_q \cdot I_{qp}^m \cdot \Delta\lambda_q$$

» Exprime la puissance volumique, absorbée par l'élément de volume de centre P.

$$\sum_{m=1}^{N_{\theta} \times N_{\varphi}} \sum_{q=1}^N [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})] K_q n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \cdot \Omega_m$$

» Exprime la puissance volumique, émise par l'élément de volume de centre P.

Ce flux net est alors introduit comme un terme source dans l'équation de l'énergie.

## 7. Traitements de l'ETR aux parois et dans les milieux semi transparents [16]

### 7.1. Cas des dioptrés spéculaires

Quand un dioptré sépare deux milieux biréfringents (1 et 2), une part de l'intensité du rayonnement incident est réfléchiée, alors que le reste est transmis selon les lois de Descartes-snell.

Pour un rayonnement incident porté par un vecteur unitaire  $\vec{S}$ , la direction  $\vec{S}_r$ , de réflexion figure (II-5) vérifie la condition : [16]

$$\vec{S}_r \cdot \vec{n} = - \vec{S} \cdot \vec{n}$$

Où :

$\vec{n}$  : définit le vecteur unitaire de la surface.

Laquelle peut se mettre sous la forme :

$$\vec{S}_r \cdot \vec{n} - \vec{S} \cdot \vec{n} = -\vec{S} \cdot \vec{n} - \vec{S} \cdot \vec{n}$$

Ce qui donne :

$$\vec{S}_r \cdot \vec{n} - \vec{S} \cdot \vec{n} = -2 \vec{S} \cdot \vec{n}$$

Les deux membres, de cette équation, multipliés par  $\vec{n}$  permet de déduire l'expression du rayonnement réfléchi, la quelle s'écrit :

$$\vec{S}_r = \vec{S} - 2 [\vec{S} \cdot \vec{n}] \cdot \vec{n}$$

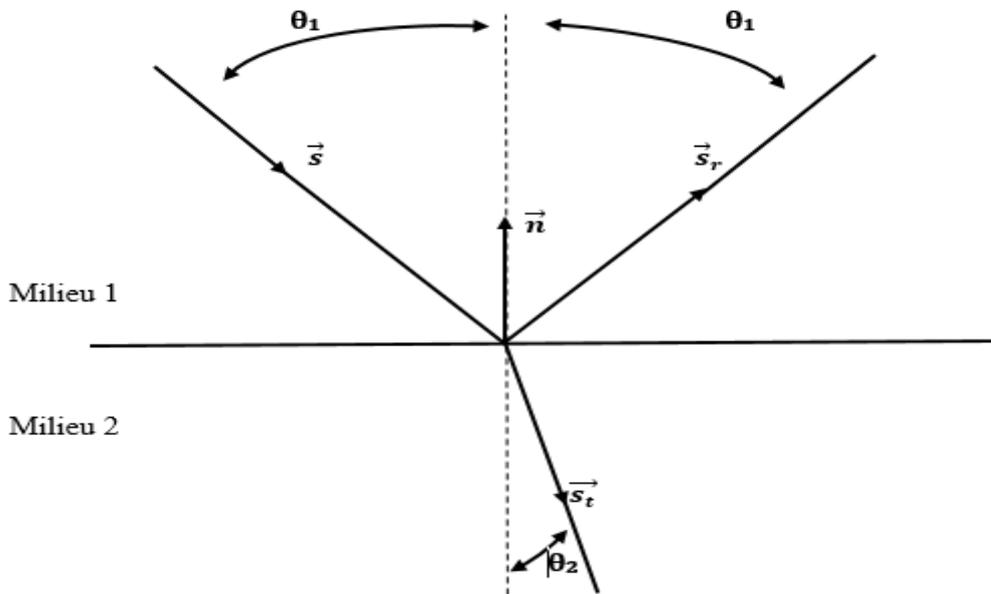


Figure (II-6) : Mode de réflexion et de réfraction

### 7.1.1. Réflectivité et transmittivité

La réflectivité de dioptré figure (II-6), définie par une paroi spéculaire dans le code Fluent, est fonction des indices de réfraction des deux milieux et des angles d'incidence et de réfraction. Ainsi l'intensité du rayonnement réfléchi, porte par le vecteur unitaire  $\vec{S}_r$ , s'évalue à partir de la composante incidente portée par le vecteur  $\vec{S}$ , par l'expression suivante : [16]

$$I(S_r) = r_1(\vec{S}) I(\vec{S}) \quad (\text{II-10})$$

$$r_1(\vec{s}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_2) - n_2 \cos(\theta_1)}{n_1 \cos(\theta_2) + n_2 \cos(\theta_1)} \right]^2 + \frac{1}{2} \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right]^2 \quad (\text{II-11})$$

$r_1(\vec{s})$  : définit la réflectivité du dioptre vis-à-vis du rayonnement de direction  $(\vec{s})$ , se propageant du milieu 1 vers le milieu 2.

**7.1.2. Intensité et direction des rayonnements émis et transmis**

Le rayonnement émis par un dioptre de manière spéculaire, suivant la direction  $\vec{s}_r$  dans le milieu 1 constitue la résultante du rayonnement réfléchi, de la composante portée par la direction  $\vec{s}$  en provenance de ce même milieu, avec celui réfracté à partir du rayonnement porté par la direction  $\vec{s}'$ , du milieu, avec le milieu 1 (Figure II-7). Elle est donnée par la relation :

$$I(\vec{s}_r) = r_1(\vec{s}) I(\vec{s}) + \tau_2(\vec{s}') I(\vec{s}') \quad (\text{II-12})$$

S'agissant de la composante portée  $\vec{s}_t$ , elle représente la résultante des rayonnements transmis du milieu 1 vers le milieu 2 avec celui réfracté dans le milieu b. Elle s'évalue par l'expression : [16]

$$I(\vec{s}_t) = r_2(\vec{s}') I(\vec{s}') + \tau_1(\vec{s}) I(\vec{s}) \quad (\text{II-13})$$

Avec :

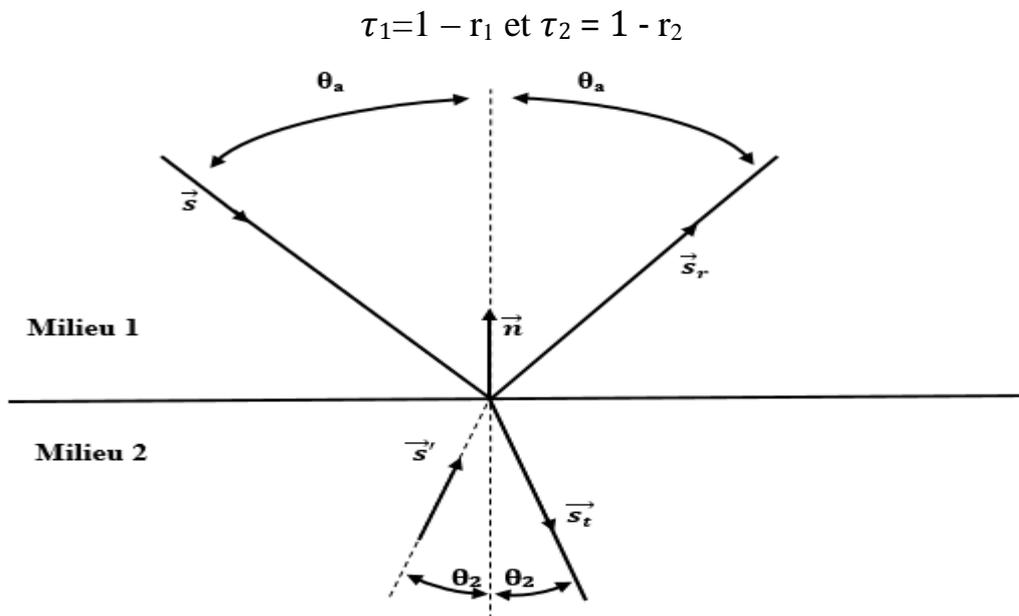


Figure (II-7) : Illustration des rayonnements réfractés et réfléchis à travers un dioptre plan

**7.2. Cas des dioptrés diffus**

Quand une part du rayonnement incident sur cette paroi est diffuse, les intensités et les directions des rayonnements émis cette dernière se calculent comme suit :

**7.2.1. Réflectivité**

La réflectivité des dioptrés diffus est indépendante de l'angle d'incidence et donc de la direction  $\vec{S}$  (figure II-8) Elle est donnée pour les deux milieux 1 et 2, contigus à cette paroi, par les expressions suivantes :

$$r_{d,2} = \frac{1}{2} + \frac{(3n+1)(n-1)}{6(n+1)^2} + \frac{n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3} \ln \left[ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right] - \frac{2n^3(n^2+2n-1)}{(n^2+1)(n^4-1)} + \frac{8n^4(n^4-1)}{(n^2+1)(n^4-1)}$$

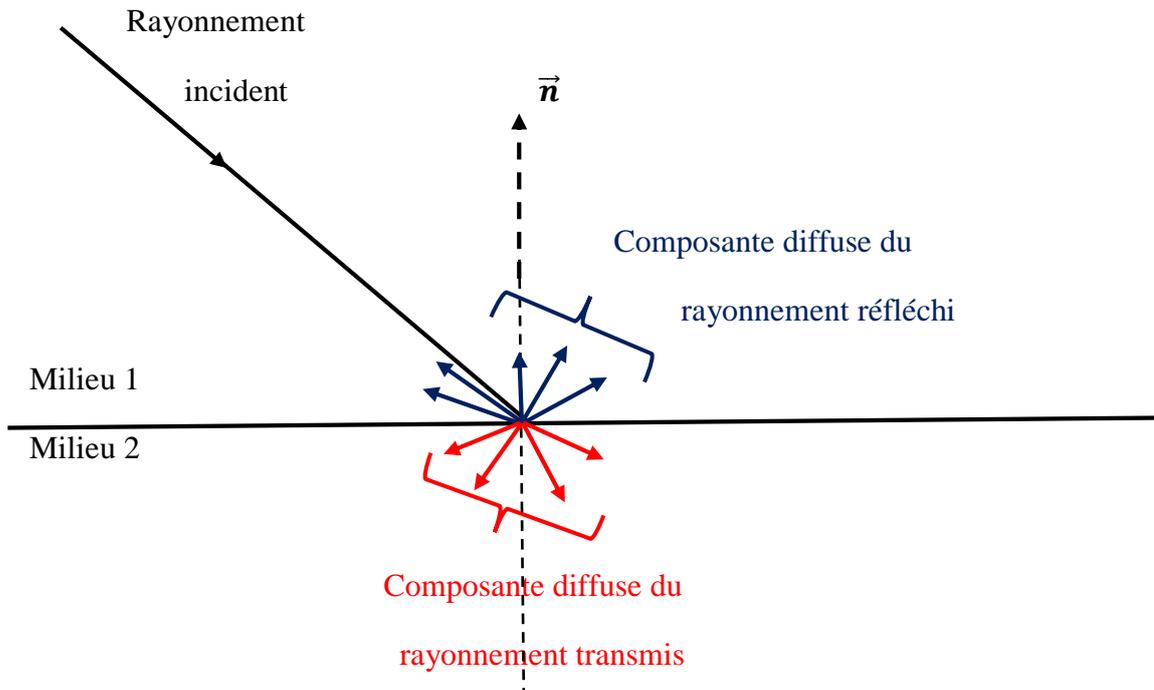
$$r_{d,1} = \frac{1 - r_{d,2}}{n^2}$$

}  $\ln(n)$

(II-14)

$$n = \frac{n_1}{n_2} > 1 \qquad \tau_{d,1} = 1 - r_{d,1} \qquad \tau_{d,2} = 1 - r_{d,2}$$

$r_{d1}$  et  $r_{d2}$  : représentent respectivement les réflectivités de la paroi vis –à vis des milieux 1 et 2



**Figure (II-8) :** Schématisation des rayonnements réfractés et réfléchis par une paroi semi transparente diffuse

### 7.2.2. Intensité et direction des rayonnements émis et transmis

L'ensemble des rayonnements définis dans l'intervalle  $\Delta\lambda_q$ , incidents sur une paroi diffuse et provenant de toutes les directions, sont absorbés par celle-ci pour être ensuite réfléchis ou transmis dans toutes les directions de l'espace (figure II-7) avec une intensité constante exprimée, respectivement par les relations suivantes : [16]

$$I_1^q = \frac{\tau_{d,1}^q \phi_{in,1}^q + \tau_{d,2}^q \phi_{in,2}^q}{\pi} + \varepsilon_q \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} (F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})) \quad (\text{II-15})$$

$$I_2^q = \frac{\tau_{d,1}^q \phi_{in,1}^q + \tau_{d,2}^q \phi_{in,2}^q}{\pi} + \varepsilon_q \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} (F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})) \quad (\text{II-16})$$

$$\phi_{in,1}^q = -\Delta\lambda_q \int I_q(\vec{s}) \vec{S} \cdot \vec{n} d\Omega \quad \text{vérifiant la condition } \vec{S} \cdot \vec{n} < 0$$

$$\phi_{in,2}^q = \Delta\lambda_q \int I_q(\vec{s}) \vec{S} \cdot \vec{n} d\Omega \quad \text{vérifiant la condition } \vec{S} \cdot \vec{n} > 0$$

$\phi_{in,1}^q$  : Flux radiatif reçu par la paroi en provenance du milieu 1

$\phi_{in,2}^q$  : Flux radiatif reçu par la paroi en provenance du milieu 2

### 7.3. Intensité et direction des rayonnements émis et transmis par une paroi partiellement diffuse

Les parts de rayonnement réfléchi ou transmis de façon spéculaire respectivement vers les milieux 1 et 2, sont données par les relations suivantes :

$$I(\vec{s}_t) = (1 - f_d) \left[ r_1(\vec{s}) I(\vec{s}') + \tau_2(\vec{s}') I(\vec{s}') \right] \quad (\text{II-17})$$

$$I(\vec{s}_t) = (1 - f_d) \left[ r_2(\vec{s}') I(\vec{s}') + \tau_1(\vec{s}) I(\vec{s}) \right] \quad (\text{II-18})$$

Parts diffuses, elles se propagent dans toutes les directions avec une intensité constante.

Les composantes réfléchie et transmise sont respectivement données les relations suivantes :

$$I_1^q = \frac{r_{d,1}^q \Phi_{in,1}^q + \tau_{d,2}^q \Phi_{in,2}^q}{\pi} \quad (\text{II-19})$$

$$I_2^q = \frac{\tau_{d,1}^q \Phi_{in,1}^q + r_{d,2}^q \Phi_{in,2}^q}{\pi} \quad (\text{II-20})$$

$$\Phi_{in,1}^q = -f_d \Delta\lambda_q \int_{4\pi} I_q(\vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad \text{vérifiant la condition } \vec{s} \cdot \vec{n} < 0$$

$$\Phi_{in,2}^q = f_d \Delta\lambda_q \int_{4\pi} I_q(\vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad \text{vérifiant la condition } \vec{s} \cdot \vec{n} > 0$$

$\Phi_{in,1}^q$  : Part diffuse du Flux radiatif reçu par la paroi en provenance du milieu 1

$\Phi_{in,2}^q$  : Part diffuse du Flux radiatif reçu par la paroi en provenance du milieu 2

### 8. Transmittivité d'une paroi d'épaisseur « e »

L'absorptivité, qui est un paramètre radiatif aux parois opaques, est souvent utilisée, Par soucis de simplification, pour le cas des parois minces et semi transparentes (plastique, verre...) (Wang et Boulard 2000a).

Pour les parois semis transparentes, il exprime l'extinction du rayonnement qui traverse ce milieu par la loi de Beer, laquelle permet de quantifier de rayonnement transmis (figure II-8)

$$\text{par l'expression : } I(\vec{s}_t) = (1-r) I(\vec{s}) e^{-kl} \quad (\text{II-21})$$

Où :

$r$  : réflectivité moyenne de la paroi, qui est une fonction de  $r_1$  et  $r_2$ .

$r_1$  : réflectivité du dioptré pour un rayonnement se propageant du milieu 1 vers le milieu 2.

$r_2$  : réflectivité du dioptre pour un rayonnement se propageant du milieu 2 vers le milieu 1.

$K.L$  : définit l'épaisseur optique du milieu semi transparent.

$K$  : coefficient d'absorption du milieu semi transparent.

$L$  : chemin optique.

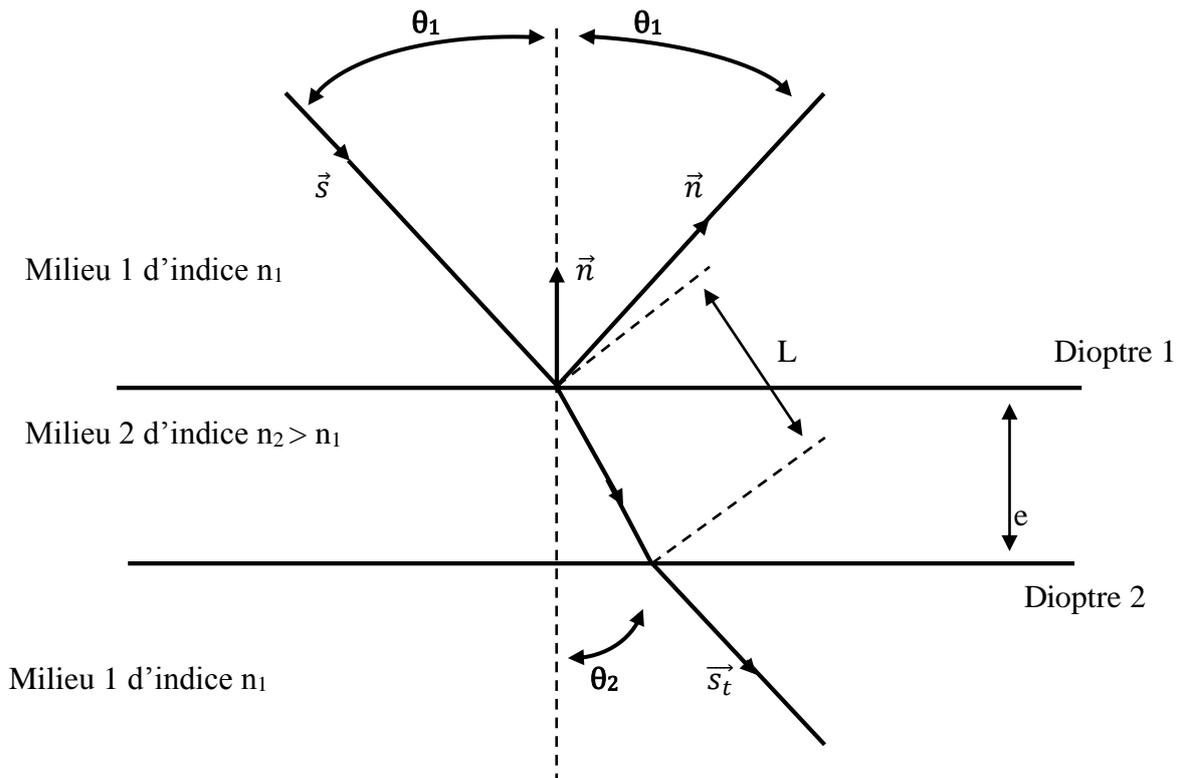


Figure (II-9) : Réfraction à travers une paroi d'épaisseur « e »

**9. Traitements de L'ETR aux parois opaques [16]**

Le cas de parois opaque, la composante réfractée nulle. Les intensités des rayonnements réfléchis par ces différentes parois sont respectivement par les expressions suivantes :

- **Paroi diffuse :**

$$I_0^q = \frac{r^q \phi_q + (1-r^q) \phi_q + \varepsilon^q \sigma T^4 [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})]}{\pi} \quad (\text{II-22})$$

- **Paroi spéculaire :**

$$I^q(\vec{s}_r) = r^q I^q(\vec{s}) + \frac{\varepsilon^q \sigma T^4 [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})]}{\pi} \quad (\text{II-23})$$

- **Paroi partiellement diffuse de fonction  $F_d$  :**

$$I_0^q = \frac{r^q \phi_q + (1-r^q) \phi_q + \varepsilon^q \sigma T^4 [F(0 \rightarrow \lambda_{2q}) - F(0 \rightarrow \lambda_{1q})]}{\pi} \quad (\text{II-24})$$

Quant à la part spéculaire, qui est portée par la direction  $\vec{s}_r$ , elle s'écrit :

$$I^q(\vec{s}_r) = r^q (1 - f_d) I^q(\vec{s})$$

L'intensité totale réfléchie selon la direction  $\vec{s}_r$  sera alors :

$$I^q(\vec{s}_r) + I_0^q$$

Où :

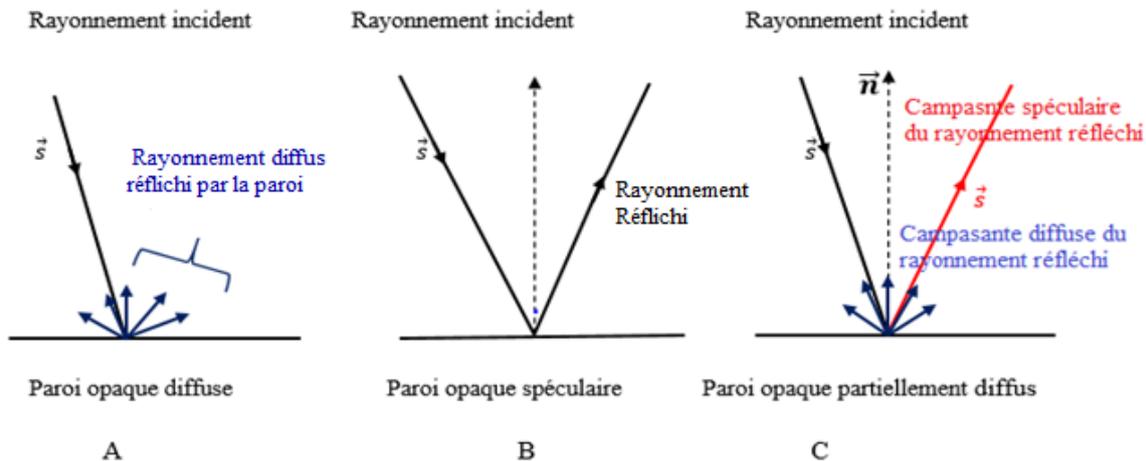
$$\vec{s} \cdot \vec{n} < 0$$

$$\phi_q = - \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} < 0} I^q(\vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega$$

$\varepsilon^q$  : émissivité de la paroi dans la bande de longueur d'onde  $\Delta\lambda_q$

$r^q$  : réflectivité de la paroi dans la bande de longueur d'onde  $\Delta\lambda_q$  qui est donnée par la relation :

$$r^q = 1 - \varepsilon^q$$



**Figure (II-10) :** Schématisation des rayonnements réfléchis par différents types de parois opaques

## 10.Méthode discret ordinales (DO)

### 10.1. Présentations du modèle (DO)

Jusqu'à nos jours différents logiciels de calcul en dynamique des fluides (CFD – Computational Fluid Dynamics) ont été développés, ces derniers sont associés à différents modèles mathématiques afin de nous permettre de simuler le climat intérieur distribué. Parmi ces méthodes on trouve le modèle DO et celle-ci à l'avantage de nous donner l'évolution des variables climatiques pendant le jour et pour chaque heure. Elle a été largement utilisée dans les applications de transfert radiatif.

### 10.2. Mise en œuvre informatique de la méthode DO [16]

#### 10.2.1. Condition aux limites de la voute céleste

Pour chaque heure du jour on définit un rayonnement de CLO et GLO au niveau de la limite supérieure du domaine avec une intensité et une direction pour la fraction directe du rayonnement solaire et seulement une intensité pour la part diffuse de CLO et de GLO. On change pour chaque heure du jour ces valeurs en fonction de la position du soleil dans le ciel.

#### 10.2.2. Prise en compte des phénomènes de réflexion

Ils sont pris en compte automatiquement par le modèle DO lorsqu'il est activé moyennant la spécification des valeurs de réflectivité pour chaque surface rencontrée.

### 10.2.3. Couplage radiatif-convectif-transfert de masse

Pour ce qui concerne les parois solides, un couplage est activé automatiquement par Fluent entre le modèle DO et l'équation de l'énergie. Cette dernière intègre le rayonnement net au niveau de la paroi comme terme source ou puits de chaleur.

Pour ce qui concerne les stands de végétation un tel couplage qui tient compte de la chaleur latente générée par la transpiration des feuilles n'est pas prévu par le logiciel. Il ne nous a pas été possible de parvenir à récupérer automatiquement les quantités d'énergie absorbées à l'intérieur de chacune des mailles de végétation. Celles-ci déterminent les flux énergétiques à l'origine de la transpiration et des échanges convectifs entre les plantes et leur environnement.

## 11. Conclusion

Ce chapitre rassemble toutes les équations de transfert thermique telle la conduction et la convection, et plus précisément les équations qui régissent les transferts radiatifs des corps noirs ou gris, ainsi l'ensemble des modes de réflexion des parois opaques et de transmissions des parois semi transparentes de type diffuses et spéculaires associés à l'équation de transfert radiatif (ETR) dans les milieux semi transparent.

Comme on a fait une initiation sur le transfert de masse.

# **Chapitre III : Simulation numérique**

## 1. Introduction

Actuellement la simulation numérique est devenue un passage recommandé avant tout développement de dispositif dont le fonctionnement est lié à la circulation d'un fluide. Les méthodes numériques permettent de tester plusieurs paramètres et configurations à moindre coût. Elle permet également de réaliser plusieurs essais avant de passer à l'expérimentation. Elle est donc devenue un outil indispensable pour le développement de la recherche et de l'industrie.

L'objectif des méthodes numériques est de fournir une solution approchée du comportement réel des phénomènes physiques. La physique possède des caractères tris dimensionnels, temporels et non linéaire, c'est à dire très complexe. Le rôle du modélisateur est de simplifier suffisamment le problème tout en conservant l'originalité du phénomène physique étudié.

En mécanique des fluides, les écoulements que ce soit on régime laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équations aux dérivées partielles (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie qu'il convient de résoudre pour les caractéristiques du champ d'écoulement et du champ thermique [17].

## 2. Définition de la CFD

La CFD est l'étude des systèmes mettant en jeu les phénomènes physiques de transfert de chaleur et de masse, des écoulements fluides, de la combustion et de tout autre phénomène connexe à l'aide de simulations exécutées sur des ordinateurs.

Elle est répandue dans divers domaines, dont :

- Aéronautique et automobile.
- Hydrodynamique navale.
- Turbomachines.
- Industrie chimique, solidification, croissance cristalline...etc.
- Moteurs à combustion interne et turbines à gaz.
- Applications biomédicales : étude de l'écoulement sanguin dans les veines et les artères.

### 3. Mise en œuvre d'un code de CFD

Une méthode de discrétisation est appliquée pour l'approximation des EDP. Ces dernières sont remplacées par des équations algébriques qui sont résolues par une méthode numérique. Le plus souvent une itération est appliquée. Les calculs sont exécutés à l'aide d'un code CFD. En pratique, les simulations CFD s'effectuent en trois étapes :

- Pré-processing (géométrie, maillage, choix des phénomènes physiques à étudier, propriétés thermo physiques, conditions aux limites et conditions initiales).
- Solver (mise en œuvre de la MVF).
- Post-processing (visualisation et traitement des données).

### 4. Définition de la méthode des volumes finis

La MVF est une technique numérique qui permet de transformer les équations aux dérivées partielles, traduisant les lois de conservation de la physique, en des équations algébriques discrètes, sur des volumes finis. Elle a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar.

La résolution par cette méthode passe par quatre étapes principales :

- Le domaine d'analyse (de calcul) est divisé en volumes finis (génération du maillage) ;
- L'intégration formelle des équations sur tous les volumes de contrôle ;
- La discrétisation, qui implique la substitution des différentes approximations de type différences finies pour les termes intégrés en représentant différents processus d'écoulement comme la convection, la diffusion et le terme source. Le résultat est la conversion des intégrales dans un système d'équations algébriques ;
- Résoudre le système d'équation obtenu par l'une des méthodes de résolution des équations algébrique linéaires.

### 5. Présentation de GAMBIT

GAMBIT (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit) est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Il permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandu dans l'industrie (automobile, aéronautique, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

## 5.1. Interface

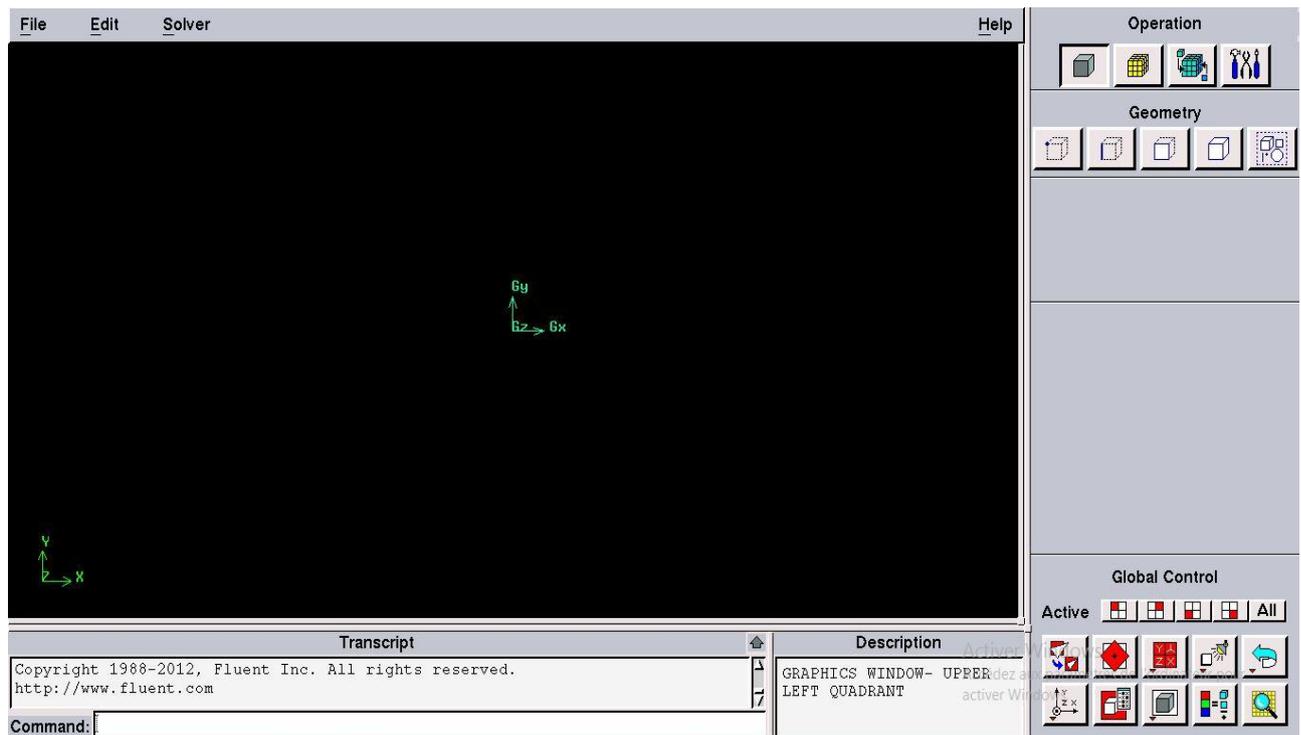


Figure (III.1) : Vue globale de GAMBIT

## 6. Choix du type de maillage

La localisation des variables du problème qui doit être calculé est définie par le maillage (grille) qui correspond à une représentation discrète du domaine physique. Le domaine de calcul se trouve alors divisé en un nombre fini de volumes de contrôle. Dans les différents codes de calcul utilisant la méthode des volumes finis, on rencontre principalement deux types de maillage :

### 6.1. Maillage structuré

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc.

#### Ses avantages :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

**6.2. Maillage non structuré**

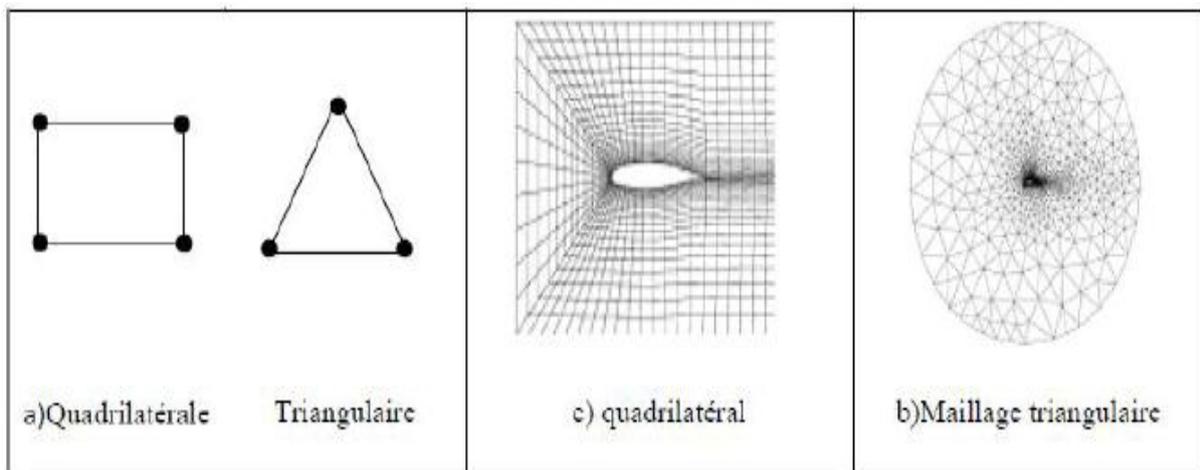
Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré.



**Figure (III-2) :** Exemples de maillages

**6.3. Maillage hybride (mixte)**

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

## 7. Présentation de Fluent

Fluent est un logiciel de calcul numérique en dynamique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics), destiné à effectuer des simulations numériques des problèmes d'écoulements fluides. Le package Fluent s'appuie sur la méthode de volume-fini pour résoudre les équations régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que [18] :

- Ecoulement dans des géométries 2D et 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés.
- Ecoulement incompressible et compressible.
- Analyse stationnaire ou instationnaire.
- Ecoulement non-visqueux, laminaire ou turbulent.
- Ecoulement Newtonien ou non-Newtonien.
- Transfert de chaleur par convection, naturelle ou forcée.
- Transfert de chaleur par rayonnement.
- Repères de références inertielles (stationnaire) ou non-inertielles (en rotation)
- Multiple repère de référence en mouvement, incluant des interfaces glissantes et des plans mélange.
- Mélange et réaction d'espèces chimiques, incluant des modèles de combustion et des réactions de surface.
- Sources volumiques arbitraires de chaleur, masse, quantité de mouvement, turbulence, et espèces chimiques.

FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (ex. : allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace. FLUENT s'utilise à travers une interface graphique. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

### 7.1. Interface du code Fluent

La première chose à faire quand on entre sous fluent est de choisir le type de résolution que le logiciel va avoir à faire : résolution 2D ou 3D, figure (III.3). Puis d'ouvrir ou d'importer un

maillage (fichier. msh), et ce en suivant la procédure suivante : File → Import→ case, figure (III.4).

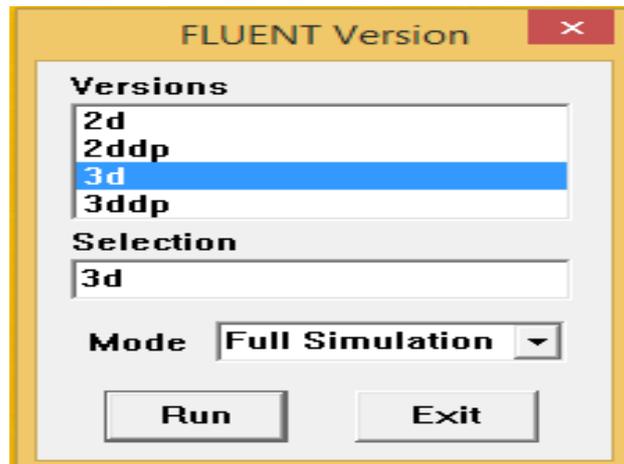


Figure (III-3) : Type de résolution

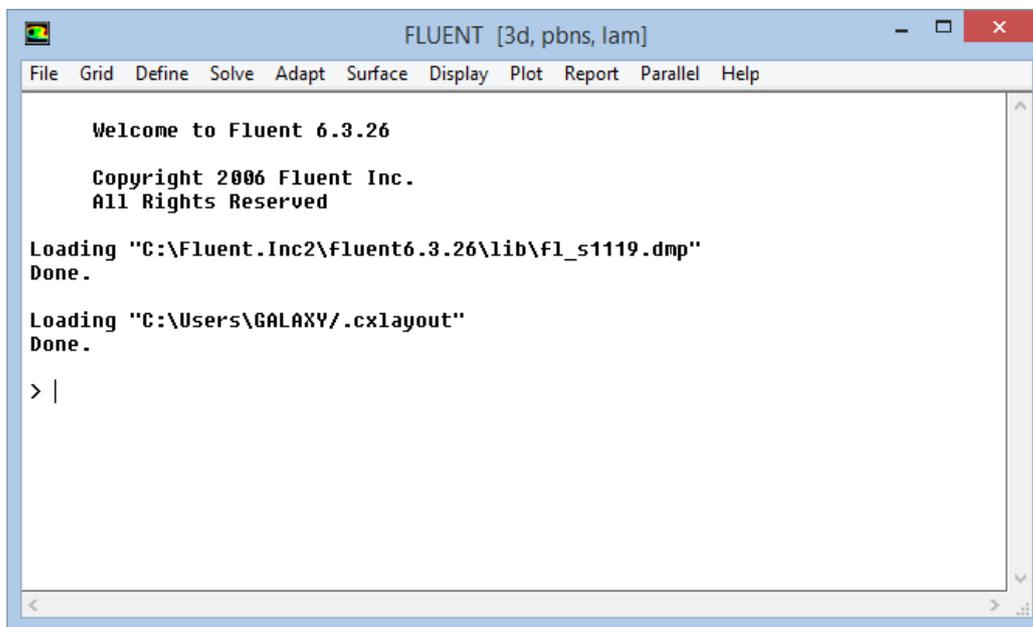


Figure (III-4) : Vue globale de l'environnement Fluent

Fluent offre deux modèles de calcul : le mode « double précision » et le mode « simple précision ».

Le revers de cette précision est que le mode « double précision » requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, le mode « double précision » est préconisé, pour les écoulements disparates, comme dans le cas d'un canal très long et mince [19].

- **File** : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarder, importation... etc.
- **Grid** : pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie ;
- **Définie** : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites ;
- **Solver** : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de Sous relaxation, les critères de convergence, initialiser et procéder au calcul ;
- **Adapt** : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres ;
- **Surface** : pour créer des points, des lignes et des plans nécessaires, l'affichage des résultats ;
- **Display et plot** : pour l'exploitation des résultats ;
- **Report** : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité ;
- **Parallel** : pour le calcul parallèle ;
- **Help** : pour l'exploitation du contenu du code.

## 7.2. Conditions aux limites utilisées par le code Fluent

Pour Fluent, les types disponibles des conditions aux limites sont classés comme suit [20] :

**a) Conditions d'entrée et de sortie de l'écoulement** : Pression d'entrée (pressure inlet), vitesse de l'entrée (velocity inlet), débit massique à l'entrée (mass flow inlet), admission (intake), pression de sortie (pressure outlet) ; sortie (outflow), champ de pression lointain (pressure far-field), échappement (exhaust).

**b) Mur et condition du pôle** : mur (wall), axe de symétrie (axis), conditions périodiques, plan de symétrie (symétrie).

**c) Cellules des zones internes** : fluide ou solide (de différent type).

**d) Conditions des faces internes** : ventilation, radiation, mur intérieur.

Mais si on parle d'une façon plus générale nous aurons quatre types de conditions aux limites ou chacun d'eux nécessite une étude approfondie :

- **À l'entrée du domaine** : la valeur de la variable est connue.
- **À la sortie du domaine** : soit on connaît la valeur de la variable donnée, ou on suppose que le régime est établi.

- **À la paroi** : soit on connaît la variable posée (la vitesse ou la température par exemple), soit on connaît d'autres grandeurs physiques (gradient de vitesse, flux thermique).
- **Sur l'axe de symétrie** : où le gradient de la variable posée suivant la direction perpendiculaire à l'axe de symétrie est nul.

### 7.3. Les étapes à suivre pour la modélisation numérique par Fluent

Les principales étapes à suivre lors du travail sur le logiciel de simulation numérique des écoulements Fluent nécessitent la connaissance de certaines notions théoriques de base. Ces notions, concernent notamment, les définitions des principales équations régissant l'écoulement.

La résolution numérique par Fluent d'une manière générale, suit les étapes suivantes : [21]

1. Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT ;
2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles ;
3. Définition des conditions aux limites dans GAMBIT ;
4. Définition du problème sous le logiciel FLUENT, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue ;
5. Calcul avec FLUENT pour les différents cas retenus ;
6. Analyse des résultats obtenus.

### 7.4. Simulation de la convection sous serre

#### 7.4.1. Position du problème

L'énergie excédentaire captée par la serre est évacuée en renouvelant d'air entre l'intérieur et l'extérieur, ce qui contribue ainsi à limiter la surchauffe de l'air interne, notamment en saison estivale. L'impact de l'humidification sur le climat interne de la serre et sur la culture sous abris est très important, particulièrement dans les régions sèches et chaudes. Notre étude a pour objectif d'observer le comportement d'une serre implantée dans un milieu chaud et sec à travers une simulation sous les conditions suivantes :

- Le soleil est supposé très haut dans le ciel (midi solaire) avec une valeur :  
 $R_g = 1000 \text{ W/m}^2$  ;
- L'air extérieur est considéré avec un degré d'hygrométrie de 20%, et une température de  $45^\circ\text{C}$  ;

- L'air intérieur de la serre est renouvelé par le biais de trois humidificateurs.

## 8. Description de la serre étudiée

La serre étudiée est de dimensions de  $18*13,38*5,91\text{m}^3$ , comportant douze stands de végétation (tomate) de dimensions de  $11,38*0,72*2\text{m}^3$ , trois humidificateurs placés du côté sud de  $1,1*1,1*1\text{m}^2$  pour chacun, et une sortie d'air du côté nord de  $18*0,8\text{m}^2$ . Les parois de la serre sont en verre de 4mm d'épaisseur ayant une émissivité  $\varepsilon=0.9$ , et une conductivité thermique  $\lambda=1.2\text{ W/m.K}$ .

Ainsi après le maillage, on constate que la serre est de 214 368 mailles.

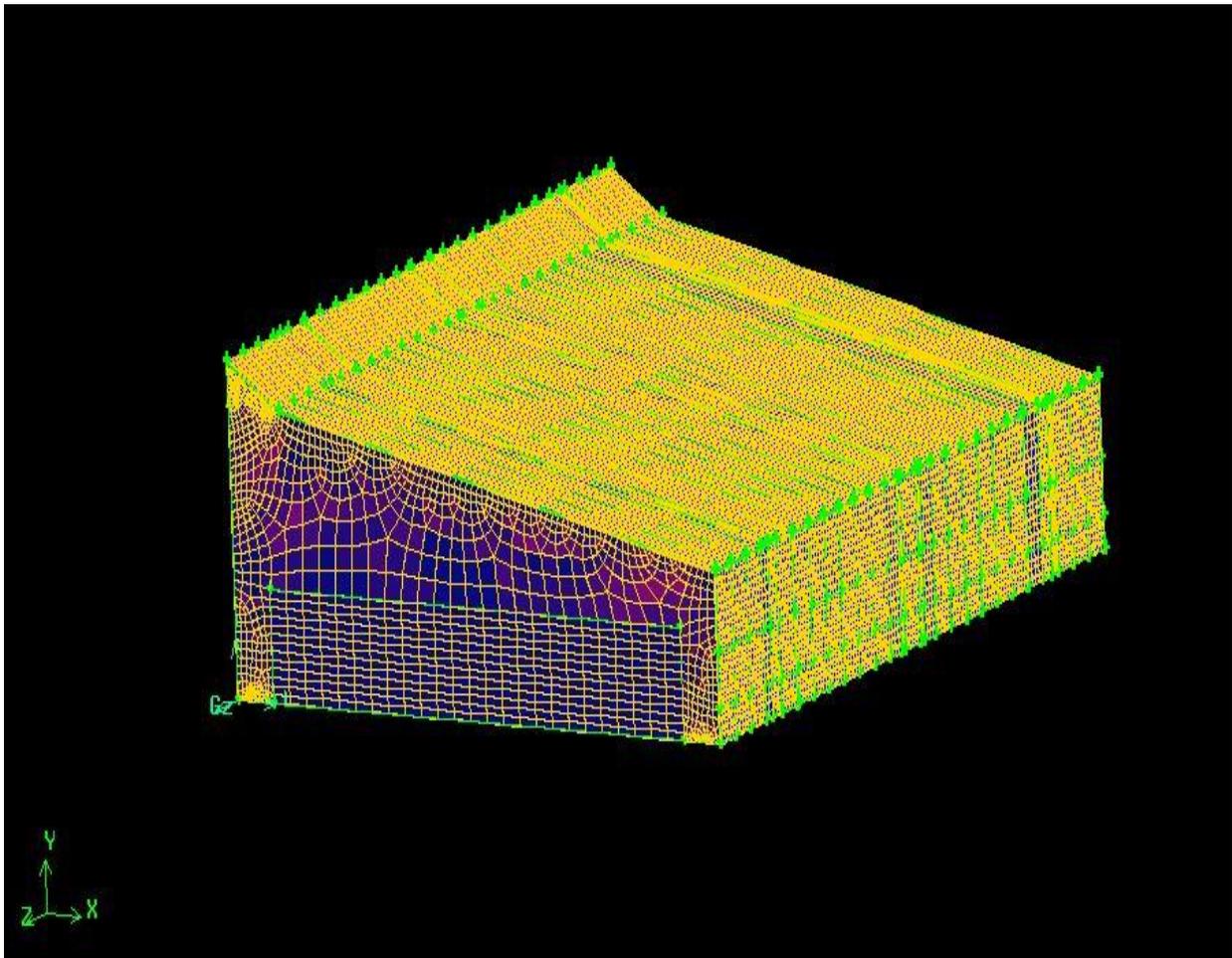
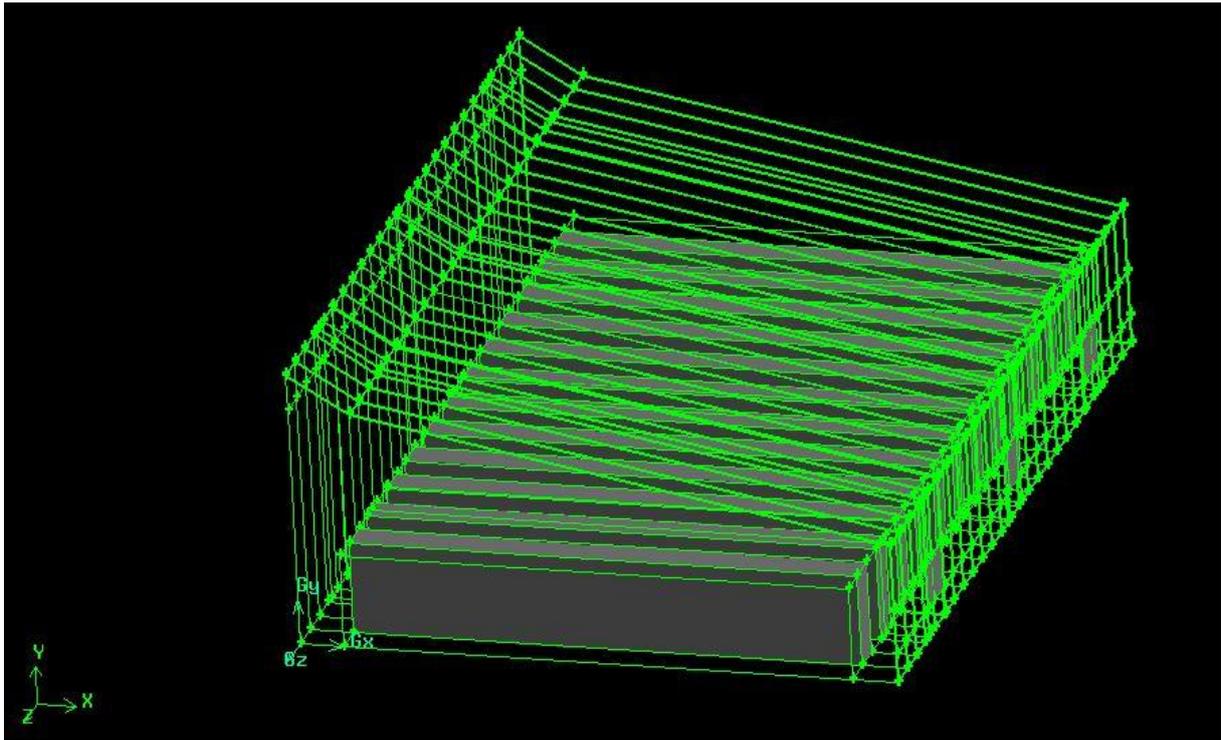
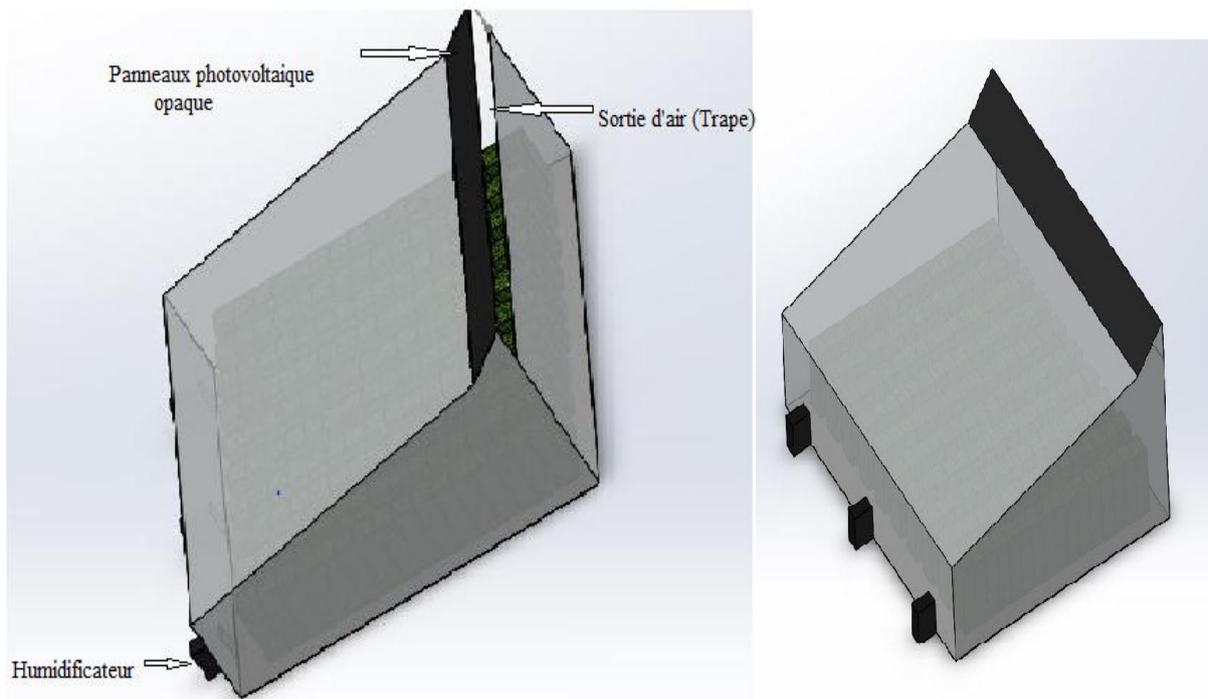


Figure (III-5) : La serre maillée sous GAMBIT



**Figure (III-6) :** représentation des stands de végétation et des humidificateurs sous GAMBIT



**Figure (III-7) :** Différents plans de la Serre étudiée sous SolidWorks

Etant limitées par l'outil de calcul, les dimensions de la serre ont été réduites d'un tiers. Ceci a permis de générer seulement 214368 mailles (Fig II-5 à II-6).

### 8.1. Conditions aux limites

Fluent donne le choix entre un certain nombre de types de conditions aux limites, très différentes.

Pour les conditions climatiques considérées on impose :

**a) Condition à l'entrée (humidificateurs) :** Les conditions à l'entrée sont la température de l'air  $T = 23\text{C}$  et l'humidité absolue  $\omega = 0.016\text{Kgeau/Kgairsec}$  (HR= 80%), avec des débits massiques de 0.6 et de 0.8 kg/s, ( $57.38\text{ h}^{-1}$  et  $76.49\text{ h}^{-1}$ )

**Tableau (III.1) : Condition d'entrée d'air**

Température (°C)	23	
Humidité absolue (Kgeau/Kgairsec)	0.016	
Débit massique (Kg/s)	0.6	0.8
Taux de renouvellement d'air ( $\text{h}^{-1}$ )	57.37	76.49

**b) Paroi de la serre :** Elles sont considérées semi-transparentes, exposés à un rayonnement solaire incident de  $1000\text{W/m}^2$ , dont  $200\text{W/m}^2$  sont diffus.

- une convection naturelle sur l'ensemble des surfaces de la serre.
- la surface du sol est adiabatique.

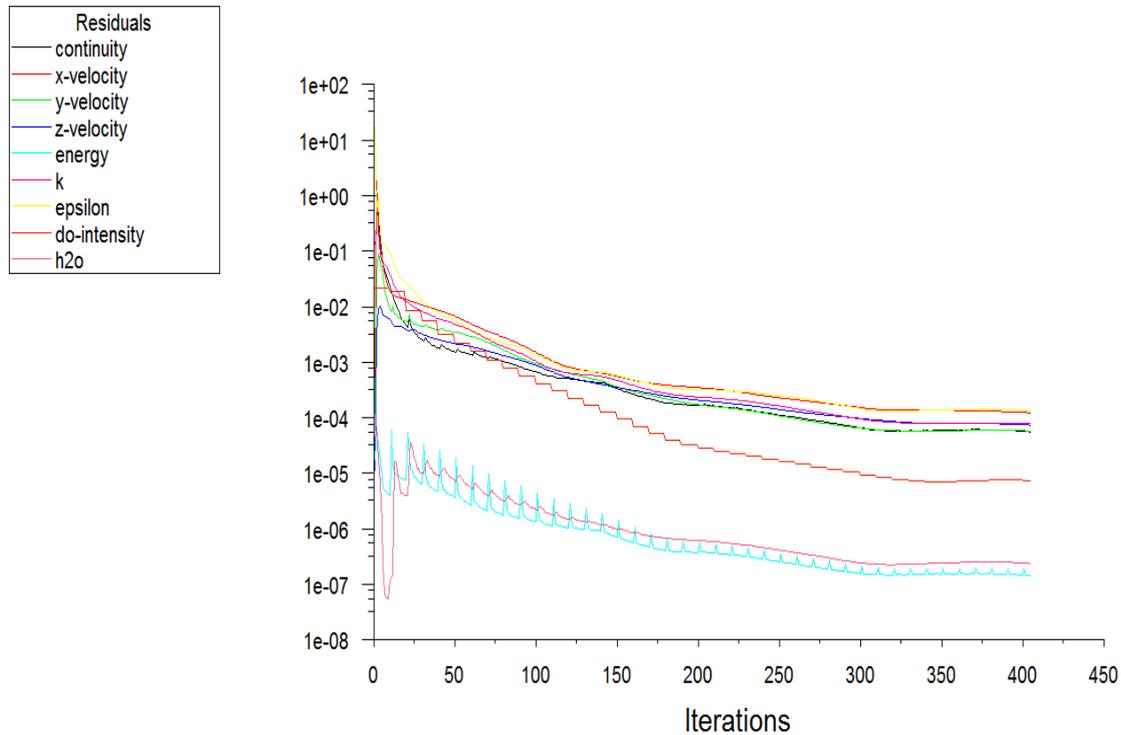
## 9. Résultats

### 9.1. Climat sous serre

Afin de voir la distribution des champs de température et de vitesse ainsi celui de l'humidité relative dans la serre, on s'intéressera à différents plans horizontaux et verticaux.

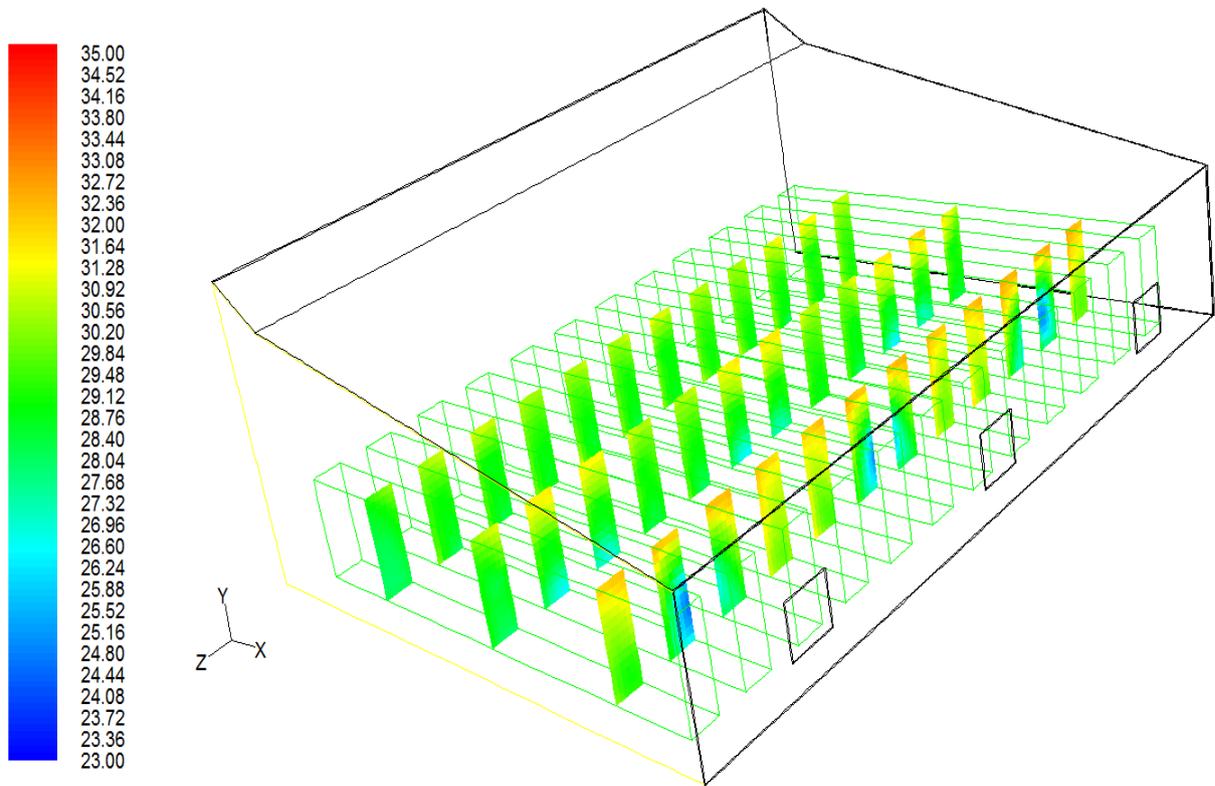
- **Plans verticaux :**  $X_1=1\text{m}$ ,  $X_2=2.32\text{m}$ ,  $X_3=3.47\text{m}$
- **Plans horizontaux :**  $Y_1=0.2\text{m}$ ,  $Y_2=0.5\text{m}$ ,  $Y_3=1\text{m}$

Après avoir atteint un niveau de convergence satisfaisant (Fig III-8) on procède à l'exploitation des résultats.

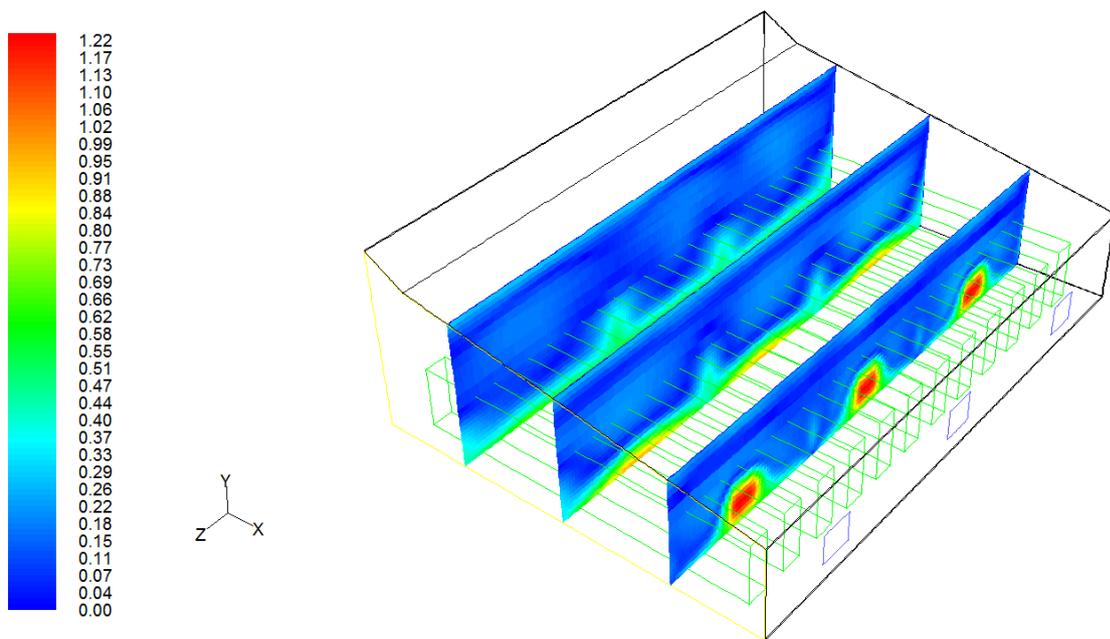


**Figure (III-8) :** Courbe des résidus pour un débit de 0.8 kg/s

- Pour un débit d'air 0.6 Kg/s et un taux de renouvellement d'air de  $57.37 \text{ h}^{-1}$  et une humidité absolue de 0.016 Kgeau/Kgairsec et une température de  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , comme Condition à l'entrée (sorties d'humidificateurs), on obtient les figures (III-8 a III-14).



**Figure (III-9) :** Température des feuilles au niveau de 3 plans  $X_1, X_2, X_3$



**Figure (III-10) :** Distribution de l'air au niveau de 3 plans  $X_1, X_2, X_3$

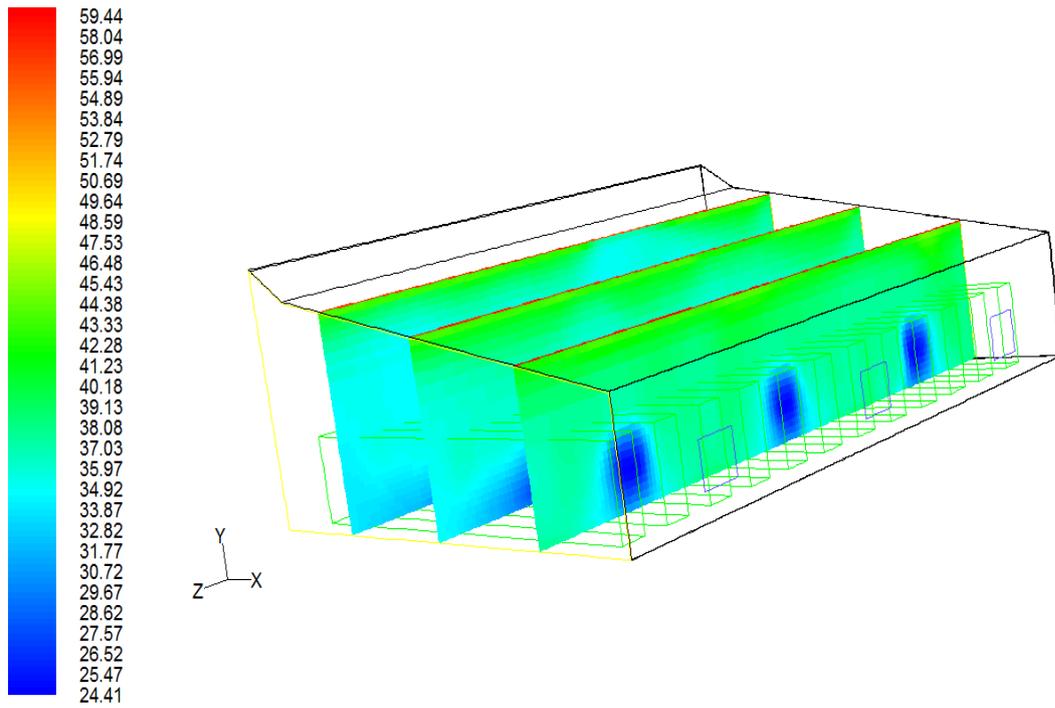


Figure (III-11) : Température de l'air intérieure de la serre sur 3 plans  $X_1, X_2, X_3$

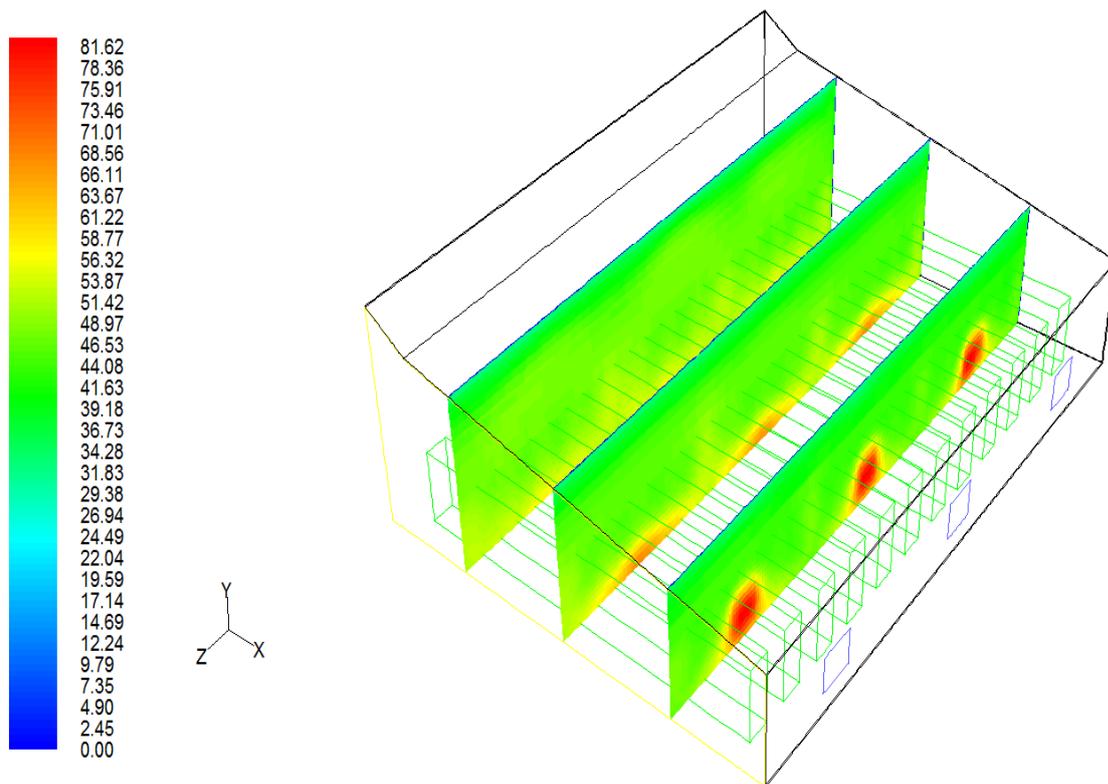


Figure (III-12) : Distribution de l'humidités relative sur les plans  $X_1, X_2, X_3$

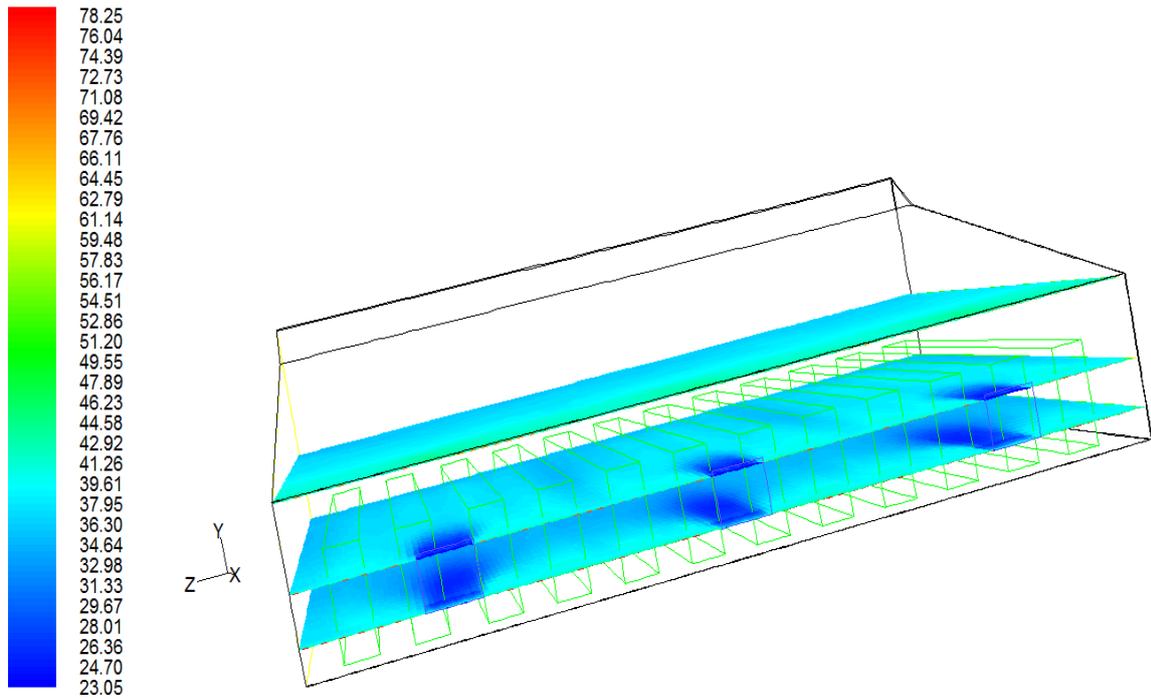


Figure (III-13) : Température de l'air intérieure sur 3 plans  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$

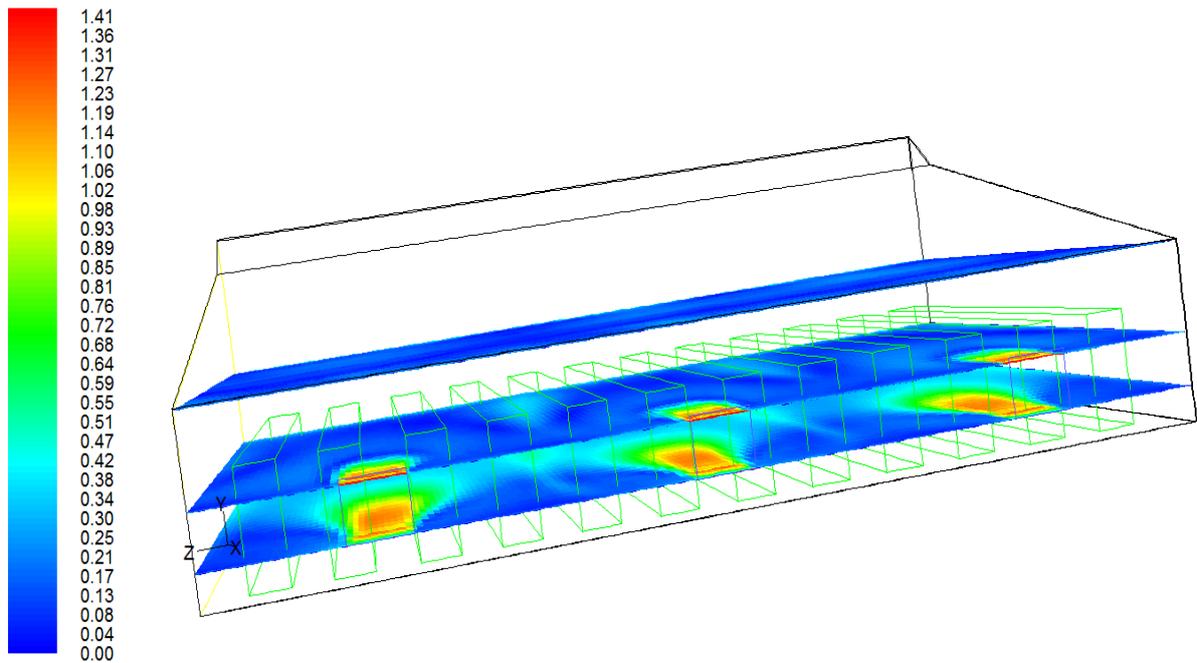


Figure (III-14) : Distribution de la vitesse sur 3 plans  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$

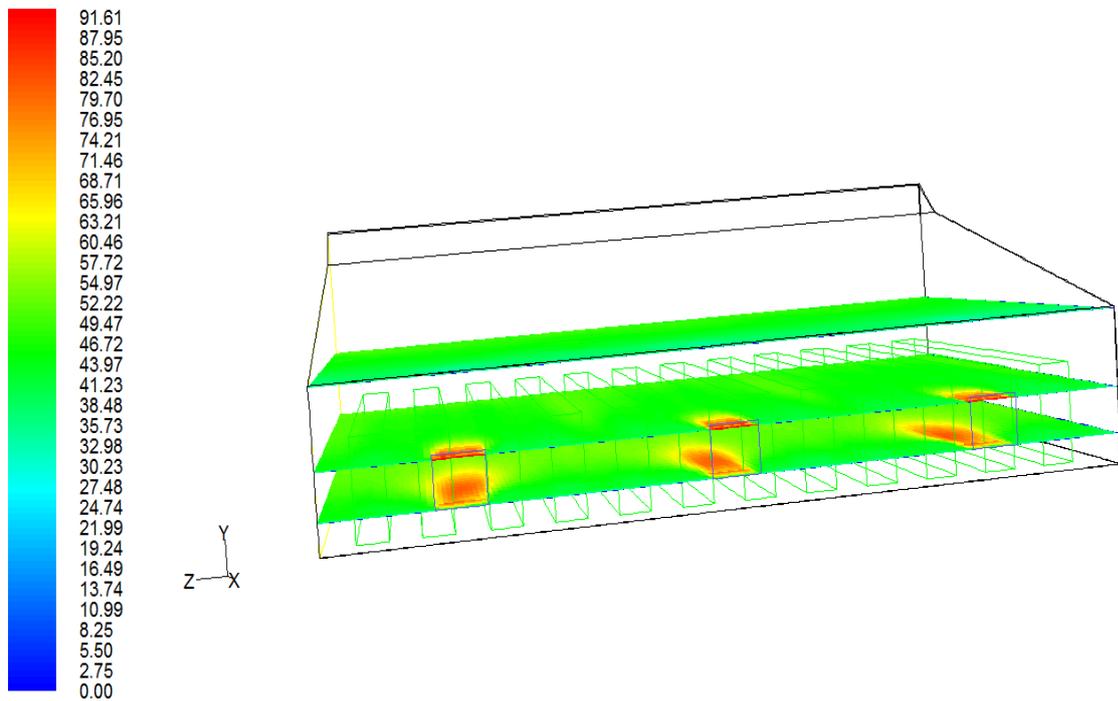


Figure (III-15) : Distribution de l'humidité absolue sur 3 plans  $Y_1, Y_2, Y_3$

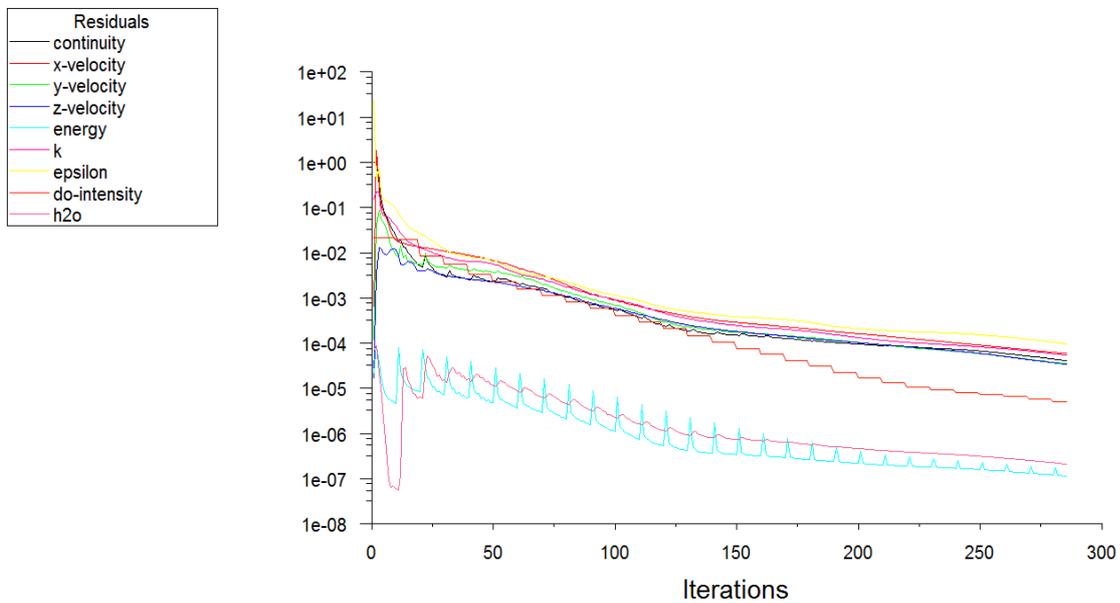
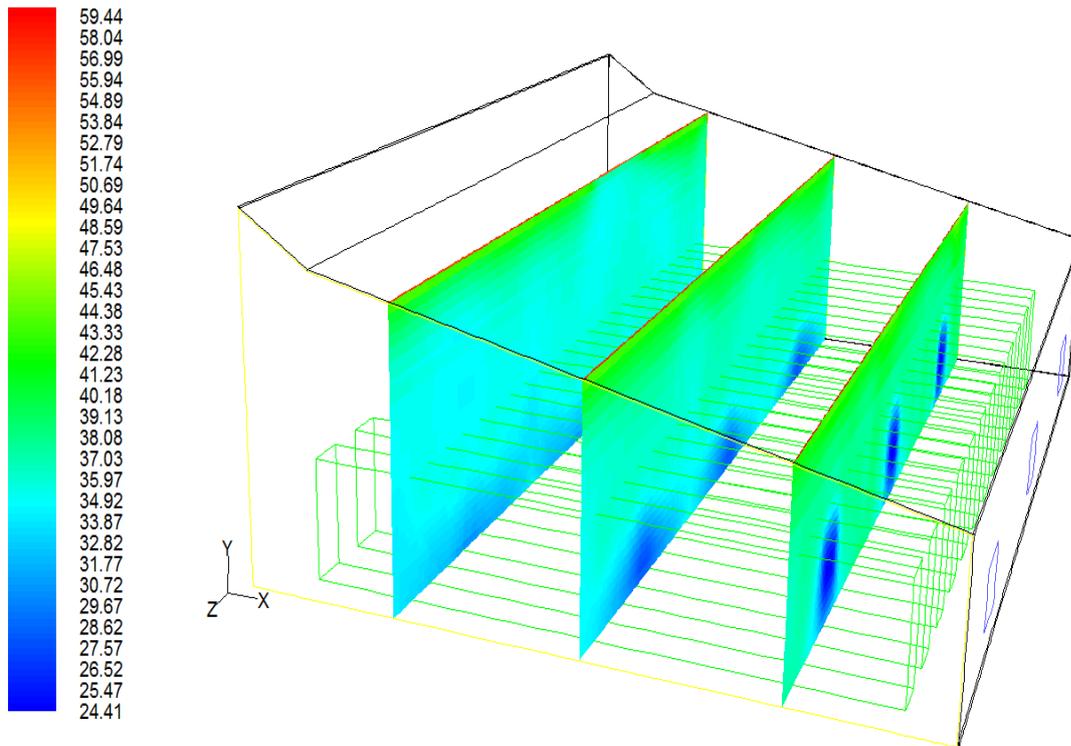
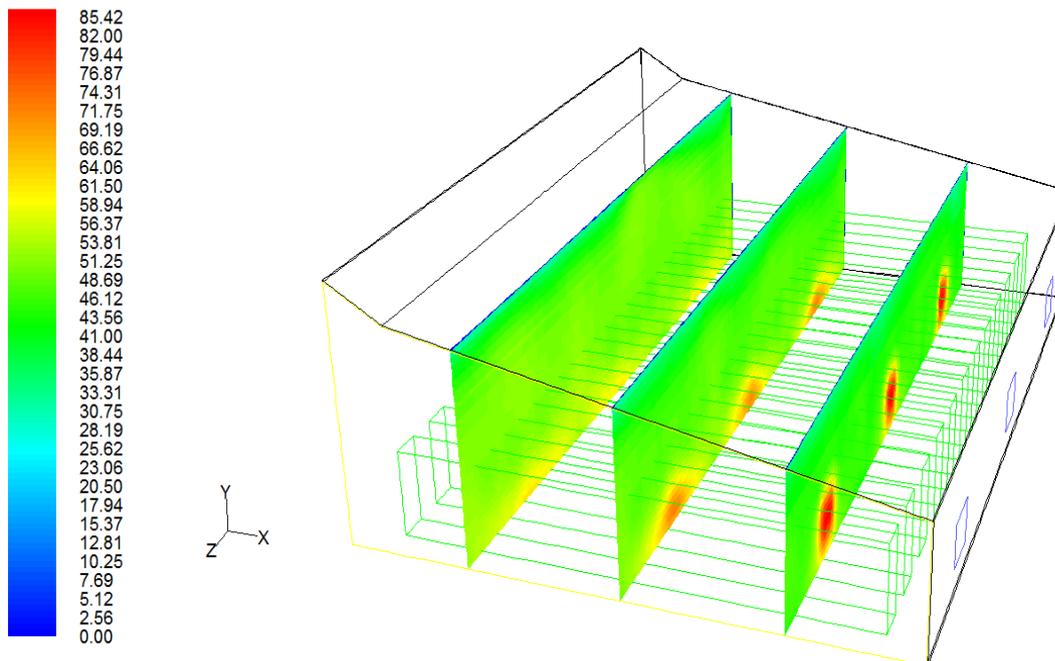


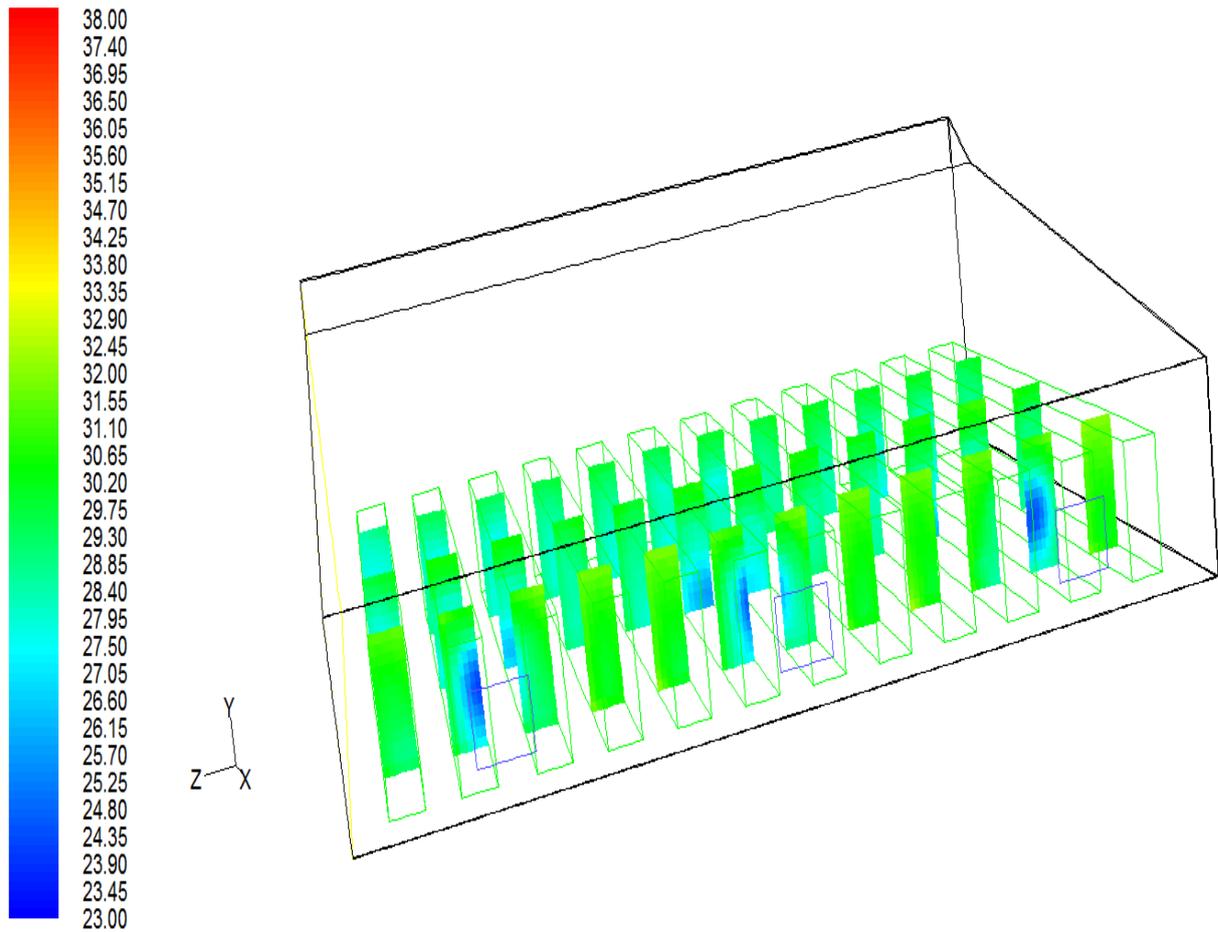
Figure (III-16) : Courbe des résidus pour un débit de 0.6 kg/s



**Figure (III-17) :** Température de l'air intérieur sur 3 plans  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$



**Figure (III-18) :** Distribution de l'humidité absolue sur 3 plans  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$



**Figure (III-19) :** Température des feuilles au niveau de 3 plans  $X_1, X_2, X_3$

## 9.2. Résultat et discussions

Les feuilles du végétal fortement ventilées sont les mieux refroidies (Fig III-9 et III-10). En effet, les zones situées dans le sillage d'écoulement d'air provenant des humidificateurs sont le siège d'intenses échanges convectifs qui contribuent à la réduction de la résistance aérodynamique entre les feuille et l'air et favorise la transpiration des feuilles. Les températures des feuilles varient de 25 à 35 °C.

Ce constat est aussi établi pour le cas de la distribution des champs de températures et d'hygrométrie de l'air. Au niveau des ouvrants d'entrée, l'air intérieur à 24°C est mieux renouvelé (Fig III-11) avec des niveaux d'hygrométries de l'ordre de 80% (Fig III-12).

Loin des ouvrants les distributions des champs de vitesses, de températures et d'hygrométries sont quasi-homogènes (Fig III-10 a III- 15). On constate aussi une

stratification de l'air intérieur avec des zones chaudes proches du toit de la serre et froides se rapprochant du sol.

Afin d'abaissez davantage les températures à l'intérieur de la serre, on s'est proposé d'augmenter le taux de renouvellement d'air à  $76.5h^{-1}$ . On a constaté une faible variation des températures et d'hygrométries d'air intérieur observées précédemment mais avec une meilleure homogénéisation du climat intérieur (Fig III-17 a III-18).

Par contre, les températures des feuilles du végétal présentent une nette amélioration dans leur refroidissement. En effet, celles exposées directement au flux d'air provenant des humidificateurs atteignent  $23^{\circ}C$  alors qu'au loin elles ont atteint seulement  $30^{\circ}C$  (Fig III-19).

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail, est de simuler la distribution du climat intérieur d'une serre refroidie par humidification de l'air, en présence du végétal, dans un milieu chaud et sec.

Dans une serre agricole, il existe plusieurs paramètres qu'il y a lieu de maîtriser en fonction des plantes qui y sont cultivées. Cependant, il existe des périodes pendant lesquelles ces paramètres sont défavorables pour la plante, notamment en période estivale.

Dans un premier temps, on s'est intéressé aux différents modes de climatisation des serres. Dans notre cas, nous avons opté pour un refroidissement par humidification de l'air, en utilisant trois humidificateurs, ce qui améliore l'homogénéisation du climat intérieur de la serre.

Par ailleurs, à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides (*CFD*) qui autorise la résolution des équations de transport, nous avons simulé les champs de vitesse et de température.

La simulation du climat à l'intérieur des serres à l'aide de l'approche *CFD* permet de contourner les difficultés rencontrées dans l'étude expérimentale du problème et de réaliser des simulations plus proches de la réalité avec des conditions quelques fois inaccessibles aux techniques classiques.

En perspective, il serait intéressant de reprendre cette étude tout en mettant un panneau photovoltaïque sur la partie inclinée du toit.

- [1] La production sous serre, en 2 tomes (2<sup>o</sup> Éd.). Tome 1. La gestion du climat.
- [2] N. REKE, et A. KEBSI (2015). Etude de refroidissement d'une serre vide par humidification de l'air.
- [3] AZIL FATIMA ZOHRA. Etude des paramètres climatiques, sous serre, chauffée en présence de la plante. Thèse de Magister En Physique Option : Physique Energétique, Université El-Hadj Lakhdar – Batna.
- [4] RAHAL BOUSSEHAIN ; ARIANE GRISEY ; 2013 ; " Réduire les consommations énergétiques, tester une énergie alternative – Agriculture durable" ; Projet de Fin d'Etudes réalisé au Ctifl, Par Emilie AUGER.
- [5] A. NISEN. "L'éclairage naturel des serres". Presse Agronomique, Gembloux (1969).
- [6] Y. BABI ; Exploitation de l'énergie géothermique pour le chauffage des serres agricoles ; Mémoire de magister ; spécialité physique ; option physique énergétique ; 2001, Centre universitaire de Ouargla.
- [7] H. VERLODT ; Amélioration du bilan thermique sous abri-serre ; Article ; Institut national Agronomique de Tunisie, tropicultura, 1983, 1 (2), 59- 69.
- [8] MORILLE BENJAMIN .Elaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres : analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques. (2012).
- [9] MEGUELLATI KHEIREDDINE. Etude Comparative du Comportement Energétique de Trois types de Serres Agricoles installées dans une Région Semi-aride. (2016).
- [10] D. XUE, D. ATHERTON, and Y. CHEN. Linear feedback control analysis and design with Matlab. Siam (2007).
- [11] Y. CORMARY, C. NIKOLAS. " La thermique des serres". Collection de la direction des études et Recherches en France, (1985).
- [12] YVES JANNOT. "Transferts thermiques". (2012).
- [13] SCHWARTZ M. ; MENGUY G. et BERNARD R. Rayonnement solaire : conversion thermique et applications. Technique & Documentation, Paris.

- [14] BOULARD T. (1996). Caractérisation et modélisation du climat des serres : Application à la climatisation estivale. Thèse de Doctorat, Ecole National Supérieure Agronomique de Montpellier.
- [15] MORILLE BENJAMIN. Elaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres : analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques.
- [16] R. NEBBALI, Simulation d'une serre agricole sous un climat chaud et sec, thèse de doctorat, UMMTO 2008.
- [17] B.M. ISMAIL et T. MANSOUR : Etude numérique comparative entre deux conditions thermiques symétriques (Flux, Température) appliquées, dans les échangeurs de chaleur, Thèse de Master, Université Abou BekrBelkaïd Tlemcen, 2012-2013.
- [18] H. GHAEDAMINI, P.S.LEE, C.J.TEO: Developing forced convection in converging-diverging micro-channel, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol 65, P.P 491-499, 2013.
- [19] N. KHODJA et A. SOUDANI : Etude hydrodynamique thermique des écoulements dans les microcanaux, Edition Universitaire Européennes, 2013.
- [20] MURIEL REGARD : Contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code de champ : application à la ventilation naturelle d'un local par une ou deux grandes ouvertures, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 1996.
- [21] MENNI YOUNES : Etude Numérique Comparative Entre Deux Types de Chicanes et Ailettes (Trapézoïdale et Triangulaire) Utilisées Pour Améliorer les Performances des Capteurs Solaires Plans à Air, Thèse de Magistère, Université Abou BekrBelkaïd Tlemcen, 2011-2012.